

SİZCE NEDİR?

Kullanılanın gözyaşlarındaki proteinleri çekip karmaşık moleküllerin doğrudan merceklerle kattıkları için yumuşak kontak (degen) merceklerin kullanımı rahattır. Bunlar bir anlamda kullanıcının bir parçası olurlar. Bazı makaj türlerinde deriye tutunması için aynı çekici kuvvetten yararlanılır. Bu kuvvetin doğası nedir? (Charles D. Winters)



b ö l ü m

23

Elektrik Alanları

İçerik

- | | |
|---|---|
| 23.1 Elektrik Yüklerinin Özellikleri | 23.5 Sürekli bir Yük Dağılımının Elektrik Alanı |
| 23.2 Yalıtkanlar ve İletkenler | 23.6 Elektrik Alan Çizgileri |
| 23.3 Coulomb Yasası | 23.7 Düzgün bir Elektrik Alanında Yüklü Parçacıkların Hareketi |
| 23.4 Elektrik Alanı | |

Yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvet, doğanın temel kuvvetlerinden biridir. Bu bölüme, elektromanyetik kuvvetlerin başlıca özellikleri anlatılarak başlanacak, sonra, herhangi iki yüklü parçacık arasındaki temel kuvvet yasası olan Coulomb yasası tartışılacektir. Ardından, bir yük dağılımı ile ilişkili elektrik alan kavramı sunulup öteki yüklü parçacıklar üzerindeki etkisi anlatılacaktır. Belli bir yük dağılıminin elektrik alanının Coulomb yasasından nasıl hesaplanacağı gösterilecektir. Yüklü bir parçacığın düzgün bir elektrik alandaki hareketinin anlatımı ile bölüm bitirilecektir.

23.1 ELEKTRİK YÜKLERİİNİN ÖZELLİKLERİ

11.2 Elektrik yükleri ve kuvvetlerinin varlığını göstermek için birkaç basit deney yapabilir. Örneğin, saçınızı kuru bir günde taradıktan sonra, tarağın kâğıt parçalarını çektığını göreceksiniz. Çekim kuvveti çoğu kez kâğıt parçalarını düşürmeyecek kadar kuvvetlidir. İpek ya da kürke sürtülülmüş cam veya lâstik gibi başka maddelerle de aynı olay gözlenebilir.

Bir başka basit deney, şişirilmiş bir balonun yünle ovulmasıdır. Bu durumda balon odanın duvarı veya tavanına saatlerce yapışık kalabilir. Böyle davranışın cisimlerin **elektriklenmiş** veya **elektrikle yüklenmiş** oldukları söylenir. Ayakkabılarınızı yün bir haliyle iyice sürterek, vücudunuzu kolayca elektrikleyebilirsiniz. Bir arkadaşınıza hafifçe dokunarak (ve onu korkutarak) vücudunuzdaki bu yükü hissedip ondan kurtulabilirsiniz. Uygun koşullarda birbirine böyle dokunulduğunda bir kivircım görülür ve her iki taraf da hafif bir karıncalanma hisseder. (Havadaki aşırı nem vücudunuzda biriken yükün toprağa kaçmasına yol açacığından, bu tür deneyler kuru havalarda en iyi sonuç verirler.)

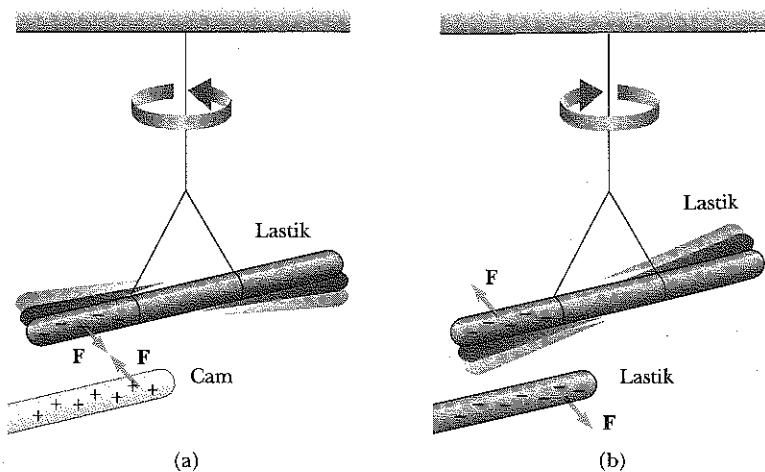
Bir dizi basit deneylerle, Benjamin Franklin'ın (1706-1790) **arti (pozitif)** ve **eksi (negatif)** adları verdiği iki çeşit elektrik yükü olduğu bulunmuştur. Bu nü göstermek üzere, kürke sürtülüden sonra metal olmayan bir iple Şekil 23.1'deki gibi asılmış sert bir lâstik çubuğu göz önüne alalım. İpeğe sürtülülmüş bir cam çubuk lâstik çubuğa yaklaştırıldığında, ikisi birbirini çekerler (Şekil 23.1a). Öte yandan, yüklü iki lâstik çubuk (veya yüklü iki cam çubuk) birbirlerine yaklaştırıldığında, Şekil 23.1b deki gibi birbirlerini iterler. Bu gözlemeden lâstik ve camın, farklı iki elektriklenme durumunda bulundukları görülmektedir. Bu gözlemlere dayanarak, **aynı yüklerin birbirlerini ittikleri, farklı yüklerin birbirlerini çekikleri** sonucuna varılır.

Franklin'ın önerisi benimsenerek cam çubuktaki elektrik yüküne artı, lâstik çubuktakine eksi denilir. Bu nedenle yüklü bir lâstik çubuk tarafından çekilen (veya yüklü bir cam çubuk tarafından itilen) yüklü herhangi bir cisim artı yüklü, yüklü bir lastik çubuk tarafından itilen (veya yüklü bir cam çubuk tarafından çekilen) yüklü herhangi bir cisim eksi yüklü olmalıdır.

Birçok ticârî ürünün özelliklerinden, çekici elektrik kuvvetleri sorumludur. Örneğin birçok kontakt merceğin plâstiği (etafilkon), gözyaşındaki protein moleküllerini elektriksel olarak çeken moleküllerden oluşur. Bu protein moleküllerinin plâstikçe soğrulup tutulması ile mercek kullanıcının gözyaşlarından olmuşdur durumuna girer. Bundan dolayı kullanıcının gözü merceği yabancı cisim gibi algılamaz ve böylece rahatça kullanılabilir. Kozmetiklerin çoğunda bulunan maddeler deri ya da saç tarafından böyle elektrik kuvvetleri ile çekilme özellikleri nedeniyle, boyaya ya da başka kimyasal maddeler bir kez uygulandıktan sonra orada kalırlar.

Ev Deneyi

Şişirilmiş bir balonu saçınıza sürtükten sonra, bir musluktan akan ince bir su demeti yakınında tutunuz. Ne olur? (Sürtülmüş plâstik bir dolmakalem ya da târak da aynı işi görür).



Şekil 23.1 (a) Bir iple asılmış eksi yüklü bir lâstik çubuk, artı yüklü bir cam cububa doğru çekilir. (b) Eksi yüklü bir lâstik çubuk, eksi yüklü başka bir lâstik çubuk tarafından itilir.

Yük korunur

Franklin'in elektrik modelinin bir başka önemli yanı, **elektrik yükünün daima korunuyor olmasıdır**. Yani, bir cisim bir başkasına sürüldüğünde bu süreçte yük olusmaz. Elektriklenme durumu yükün bir cisimden ötekine *geçmesiyle* meydana gelir. Böylece, cisimlerden biri bir miktar eksi yük kazanırken ötekisi aynı miktar artı yük kazanır. Örneğin, bir cam cubuk ipeğe sürüldüğünde, ipek, cam cubuktaki artı yükle eşit miktarda eksi yük kazanır. Atom yapısının hakkındaki bugünkü bilgilerden, sürülmeyeyle camdan ipeğe geçenlerin eksi yüklü elektronlar olduğu bilinmektedir. Benzer biçimde, lâstik, kürke sürüldüğünde, elektronlar kürkten lâstiğe geçerek lâstiğe net bir eksi yük, kürke de net bir artı yük kazandırırlar. Bu süreç nötr, yüklenmemiş maddede, artı yükler (atom çekirdeklereindeki protonlar) kadar eksi yüklerin (elektronlar) bulunması olgusu ile uyuşur.

Sinama Sorusu 23.1

Şişirilmiş bir balonu saçınıza sürterseniz Şekil 23.2'deki gibi ikisinin birbirlerini çektileri görülür. Sürtmeden sonra balon ve saçınızdaki yük miktarı sürtmeden öncekine göre (a) az mıdır?, (b) aynı mıdır?, (c) daha çok mudur?

Robert Millikan (1868-1953), 1909 da, elektrik yükünün, her zaman, bir temel e yük biriminin tam katları halinde bulunduğuunu keşfetti. Modern anlatımla, q yükünün **kuantumlanmış** olduğu söylenir. Yani, elektrik yükü kesikli "paketlerden" oluşur. Buna göre, N tam sayı olmak üzere, $q = Ne$ yazılabilir. Aynı dönemde yapılan başka deneyler, elektronun $-e$ yükünde, protonun ise buna eşit fakat zıt işaretli $+e$ yükünde olduğunu göstermiştir. Nötron gibi bazı parçacıkların yükü bulunmaz. Nötr bir atomda protonlar kadar elektronlar bulunmalıdır.

Yük korunumlu bir nicelik olduğundan kapalı bir bölgedeki net yük aynı kalır. Bir süreçte yüklü parçacıklar oluşturulursa, bu yükler her zaman zıt işaretli eşit büyüklükli çiftler olarak ortaya çıkarlar.

Şekil 23.2 Kuru bir günde bir balonu saçınıza sürterseniz, balon ve saçınız yüklenir. (Charles D. Winters).

Yük kuantumludur

Şimdiye kadarki anlatımlardan, elektrik yükünün aşağıdaki önemli özelilikleri olduğu sonucu çıkarılır:

- Doğada iki tür yük bulunur. Benzer olanlar birbirlerini iterler, farklı olanlar ise birbirlerini çekerler.
- Yük korunumludur.
- Yük kuantumludur.

Elektrik yükünün özellikleri

23.2 YALITKANLAR VE İLETKENLER

 Maddeler, elektrik yükünü iletme yeteneklerine göre sınıflandırılırlar.

11.3

Elektriksel İletkenler, elektrik yüklerinin içinde özgürce hareket ettikleri, **yalıtkanlar** ise edemedikleri maddelerdir.

Cam, lâstik gibi maddeler elektriksel yalıtkan sınıfına girerler. Bu tür maddeler sürtüllerde yükleniklerinde, yalnızca sürtünen bölgeleri yüklenir ve bu yük maddenin başka taraflarına geçemez.

Buna karşın, bakır, alüminyum ve gümüş gibi maddeler iyi elektriksel iletkenlerdir. Bu maddelerin küçük bir bölgesi yüklenildiğinde, yük iletkenin tüm yüzeyine çabukça dağılır. Bir bakır çubuk elde tutulup yün veya kürke sürülürse küçük bir kâğıt parçasını çekmediği görülür. Buna göre metalin yüklenmeyeceği sanılır. Öte yandan, bakır çubuğa tahta bir sap takılıp saptan tutularak sürtüldüğünde çubuk yüklenerek kâğıt parçasını çeker. Bunun açıklaması, yalıtkan tahta olmadığından, sürtmeyle oluşan elektrik yüklerinin bakır dan vücuda oradan da toprağa geçmesi şeklinde yapılır. Yalıtkan tahta sap, yükün ele geçmesini önler.

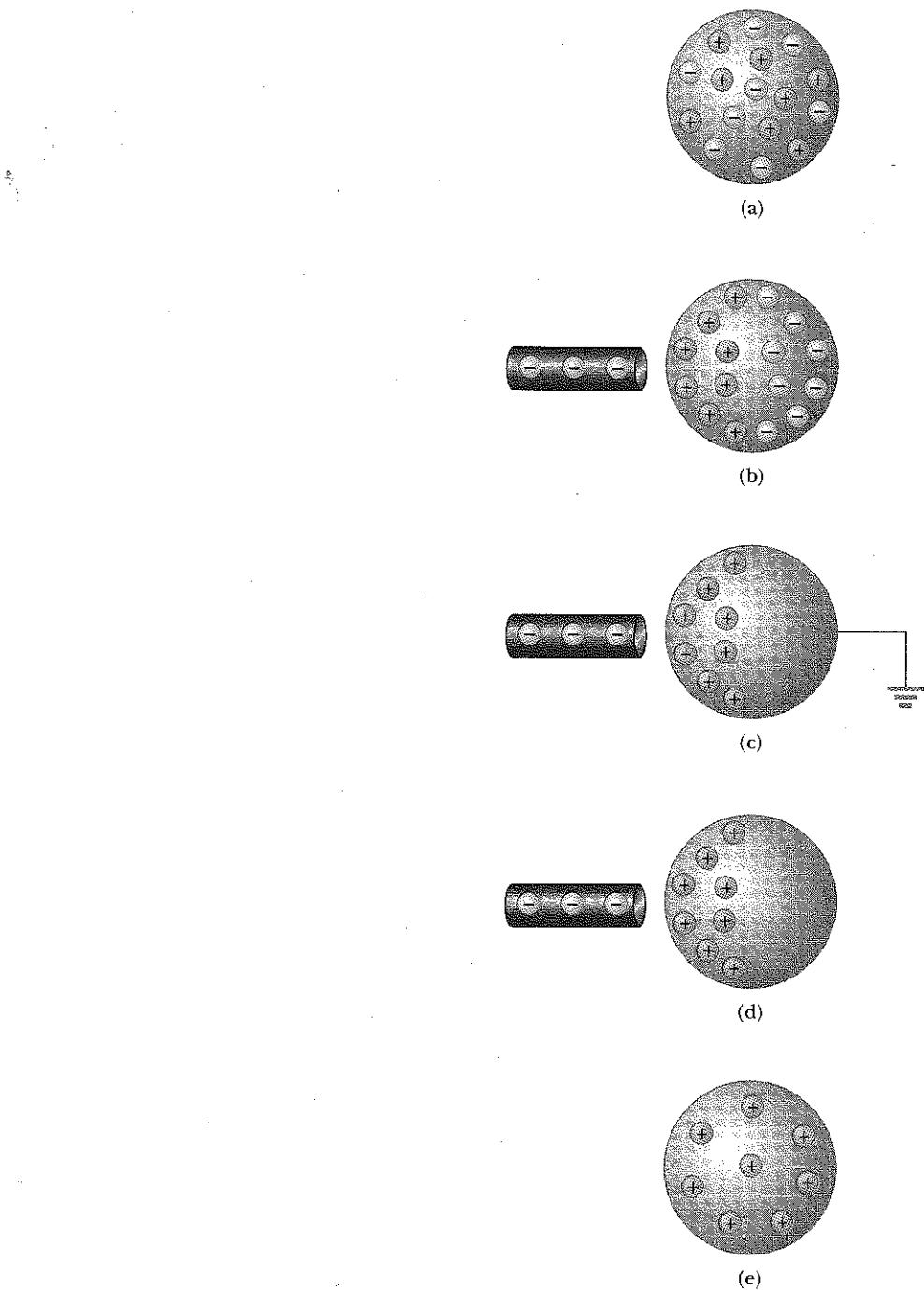
Metaller iyi iletkendir

Yarıiletkenler, elektriksel özellikleri yalıtkanlarla iletkenler arasında bir yerde bulunan üçüncü bir madde sınıfıdır. Silisyum ve germanium, transistör ve ışık veren diyon gibi çeşitli elektronik aygıtların üretiminde sıkça kullanılan yarıiletkenlerin iyi bilinen örnekleridir. Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri, malzemelere istenilen miktarlarda belli yabancı atomlar katılarak büyük oranda değiştirilebilir.

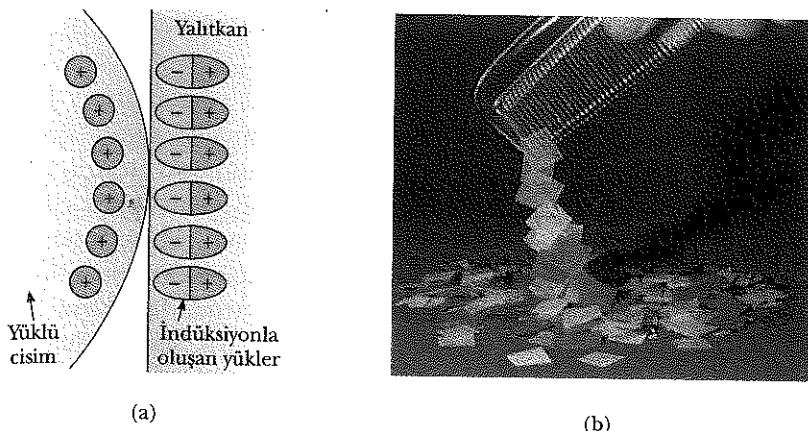
Bir iletken, iletken bir tel veya bakır boruya toprağa bağlanırsa, **topraklılığı** söylenir. O zaman toprak, elektronların kolayca gidebileceği sonsuz bir "gider" olarak düşünülebilir. Bu göz önünde tutularak bir iletkenin **indüksiyon** denilen bir işlemle nasıl yüklenebileceği anlaşılabılır.

İndüksiyonu anlamak için, Şekil 23.3a'daki gibi topraktan yalıtılmış iletken nötr (yüklenmemiş) bir küre gözönüne alınınsın. Bu küre yakınına eksi yüklü lastik bir çubuk yaklaştırıldığında kürenin çubuğa yakın bölgesi artı yük fazlalığı kazanırken, uzak bölgesi aynı miktarda eksi yük fazlalığı kazanır. (Yani, kürenin çubuğa yakın kısmındaki elektronlar kürenin öbür yanına geçerler. Çubuk küreye değmese de bu gerçekleşir.) Küre iletken bir telle toprağa bağlanarak aynı deney yapılrsa (Şek. 23.3c) iletkenin bazı elektronlar çubuktaki eksi yük tarafından itileceklerinden bunlar toprak teli üzerinden toprağa akarlar. Toprak bağlanıltı tel kaldırılınca (Şek. 23.3d) iletken kürede **indüksiyonla** artı bir yük fazlalığı oluşur. Lâstik çubuk küreden uzaklaştırıldığında (Şek. 23.3e), indüksiyonla oluşan artı yük topraklanmamış kürede kalır. Ünutmuyalım ki benzer yükler arasındaki itme kuvvetlerinden dolayı kürede kalan

İndüksiyonla yükleme



Şekil 23.3 Metal bir cismin *indüksiyonla* elektrik yüklenmesi (yani, iki cisim birbirlerine hiç değilmezler). (a) Eşit sayıda artı ve eksi yüklü nötr metalik bir küre. (b) Nötr metal küre yakınına yüklü lastik bir çubuk konulduğunda, küre üzerindeki yük dağılımı yeniden düzenlenir. (c) Küre topraklandığında elektronlarından bir kısmı toprak teli üzerinden ayrılır. (d) Topraklama kaldırıldığında, kürede düzgün olmayan bir artı yük dağılımı bulunur. (e) Lastik çubuk uzaklaştırıldığında fazla artı yük kureye düzgün dağıılır.



Şekil 23.4 (a) Soldaki yüklü cisim, sağdaki yalıtkanın yüzeyinde indüksiyonla yükler oluşturur. (b) Kağıtta yükler yerdeğiştirdiği için yüklü bir tarak kağıt parçalarını çeker. © 1968 Temel fotoğrafları.

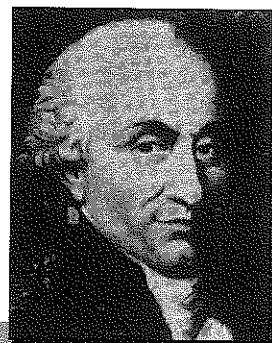
Ev Deneyi

Cok küçük parçalar halinde biraž kağıt yirtin. Saçınızı tarayın ve tarağı bu kağıt parçalarına yaklaştırın, tarağa doğru çekildiklerine dikkat edin. Kağıt parçalarına uygulanan kütle-çekiminin büyüklüğünü elektrik kuvvetlerinin büyüklüğü ile kıyaslasınız nasıldır? Gözleme devam ederseniz kağıt parçalarının taraftan uzaklıklarını görebilirsiniz. Tam olarak, çekilmeler uzaklaştırılır, itilirler. Bunun sebebi nedir?

yük, küre yüzeyine düzgün olarak dağılır. Bu işlem sırasında elektriklenmiş lâstik çubuk eksi yükünden hiç bir kayba uğramaz.

İndüksiyonla yüklemeye cisimlerin değmesine gerek yoktur. Bu, iki cismin değmesini gerektiren sürtme ile elektrik yüklemesi (yani *iletimle* elektrik yüklemesi) yapılmasından farklıdır.

İletkenlerdeki indüksiyonla elektrik yüklemesinin benzeri, yalıtkanlarda da görülür. Nötr moleküllerin çoğu, artı ve eksi yük merkezleri çakışırlar. Oysa, yüklü bir cismin etkisinde, yalıtkanın her molekülündeki bu yük merkezleri hafifçe kayarak molekülün bir yanının diğerinden daha artı yüklenmesine yol açarlar. **Kutuplanma** denilen bu olay Bölüm 26 da daha iyi biçimde ele alınacaktır. Molekülerdeki yüklerin bu şekilde yeniden düzenlenmesi, Şekil 23.4'teki gibi, yalıtkanın yüzeyinde bir indüksiyon yükü oluşturur. Yalıtkanlarda indüksiyonun bilinmesi ile saça sürtülen tarağın nötr kağıt parçalarını neden çektığı veya elbiseye sürtülen balonun nötr bir duvara niçin yaptığı açıklanabilir.



Charles Coulomb (1736-1806)

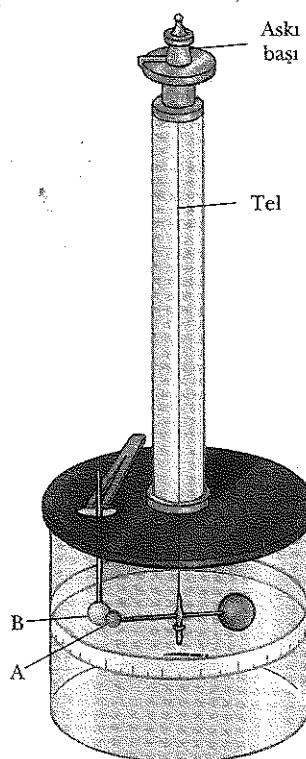
Coulomb'un bilime en büyük katkıları elektrostatik ve manyetizma alanında oldu. Yaşamı boyunca mazemelerin dayanıklılıklarını inceledi ve kırışıklarındaki cisimlere etkileyen kuvvetleri belirledi. Böylece yapı mekaniği alanına katkıları oldu. Ergonomi alanında yapılan çalışmaları insanların ve hayvanların çalışmalarını en iyi biçimde yapabilme yollarının temelini anlamayı sağladı. (Fotoğraf, AIP Niels Bohr Kütüphanesinin izniyle E.Scott Barr koleksiyonundan).

Sinama Sorusu 23.2

A cismi B cismine çekiliyor. B cisminin artı yüklü olduğu biliniyorsa A cismi için ne söylenebilir? (a) Artı yüklüdür. (b) Eksi yüklüdür. (c) Elektrikçe nötrdir. (d) Yanıtlamak için yeterli bilgi bulunmuyor.

23.3 COULOMB YASASI

Charles Coulomb (1736-1806) kendi buluşu olan burulma terazisini (Şek. 23.5) kullanarak, yüklü cisimler arasındaki elektrik kuvvetlerinin büyüklük-



Şekil 23.5 İki yük arasındaki elektrik kuvvetin ters-kare yasasına uyduğunu göstermede kullanılan Coulomb burulma terazisi.

Coulomb sabiti

Bir elektron veya protondaki yük

rini ölçtü. Coulomb, yüklü iki küçük küre arasındaki elektrik kuvvetinin, $F \propto 1/r^2$ şeklinde, aralarındaki r uzaklığının karesiyle ters orantılı olduğunu doğruladı. Burulma terazisinin çalışma ilkesi, küteler yerine yüklü küreler almak üzere, çekim sabitini ölçmek için Cavendish'in kullandığı aygitinkı ile aynıdır (Kesim 14.2). Sek. 23.5'teki A ve B yüklü kulerler arasındaki elektrik kuvveti, kulerlerin birbirlerini çekme ya da itmelerine neden olur. Ortaya çıkan hareket asılı telde bir burulma oluşturur. Burulmuş telin geri çağrırcı momenti, burulma açısından orantılı olduğundan, bu açının ölçümü elektriksel çekme veya itme kuvvetinin nicel bir ölçümünü sağlar. Küreler sürmeyeyle yüklenirse, kulerler arasındaki elektrik kuvveti kütle çekimine göre çok büyük olduğundan, kütleçekim kuvveti önemsenmeyebilir.

Coulomb, deneyleri, durgun yüklü iki parçacık arasındaki **elektrik kuvvetinin** aşağıdaki özelliklerini olduğunu gösterdi:

- Kuvvet, parçacıkları birleştiren doğru boyunca yönelmiş olup aralarındaki r uzaklığının karesiyle ters orantılıdır.
- Kuvvet, parçacıklardaki q_1 ve q_2 yüklerinin çarpımıyla orantılıdır.
- Kuvvet, yükler zıt işaretli olduğunda çekici, aynı işaretli olduğunda iticidir.

Bu gözlemlere dayanarak, **Coulomb yasası** iki noktalı yük arasındaki elektrik kuvvetinin (arasında Coulomb kuvveti denilir) büyüklüğünü

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (23.1)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada k_e , **Coulomb sabiti** denilen bir sabittir. Coulomb, deneyleriyle r nin üssünün, yüzde birkaç belirsizlikle 2 olduğunu gösterdi. Modern deneylerle üssün 10^{16} da bir kesinlikle 2 olarak verilmiştir.

Coulomb sabitinin değeri birim sistemine bağlıdır. SI birimler sisteminde yük birimi **coulomb**dur (C). SI birimlerinde k_e Coulomb sabitinin değeri:

$$k_e = 8,9875 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

Bu sabit

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

olarak da yazılabilir. Burada ϵ_0 sabiti *boş uzayın elektriksel geçirgenliği* olup değeri $8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ dir.

Doğada bilinen en küçük yük birimi, elektron veya protonda bulunan yük tür ve mutlak değeri:

$$|e| = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Buna göre 1 C yük, yaklaşık $6,24 \times 10^{18}$ elektron ya da proton¹ yüküne eşittir. Bu, 1 cm³ bakırda serbest elektronların 10^{23} basamağındaki sayısına² göre

¹ Serbest bir yük olarak e den daha küçük bir yük birimi saptanamamıştır. Bununla birlikte bazı yeni kuramlar, $e/3$ ve $2e/3$ yüke sahip kuark denilen parçacıkların varlığını öne sürmüştür. Madde çekirdeklere böyle parçacıkların bulunduğuna dair önemli deneyler kanıtlar olmakla beraber, *serbest* kuarklar hiçbir zaman saptanamamıştır. Bu kitabın 46. Bölümünde, kuarkların öteki özellikleri tartışılmıştır.

**TABLO 23.1 Elektron, Proton ve Nötronun
Yük ve Kütlesi**

Parçacık	Yük (C)	Kütle (kg)
Elektron (e)	$-1,6021917 \times 10^{-19}$	$9,1095 \times 10^{-31}$
Proton (p)	$+1,6021917 \times 10^{-19}$	$1,67261 \times 10^{-27}$
Nötron (n)	0	$1,67492 \times 10^{-27}$

çok küçüktür. Yine de 1 C oldukça büyük bir yük miktarıdır. Lâstik veya cam bir çubuğu sürmeyeyle yüklendiği deneylerde 10^{-6} C basamağında net bir yük elde edilir. Başka bir deyişle, mevcut toplam yükün ancak çok az bir kısmı çubuk ile sürtünen cisim arasında geçiş yapar.

Elektron, proton ve nötronun yük ve kütleseri Tablo 23.1 de verilmiştir.

ÖRNEK 23.1 Hidrojen Atomu

Hidrojen atomundaki elektron ve proton arasındaki uzaklık ortalama olarak yaklaşık $5,3 \times 10^{-11}$ m dir. Bu parçacıklar arasındaki elektriksel ve kütle-çekim kuvvetlerinin büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm Coulomb yasasından elektriksel çekim kuvvetinin büyüklüğünün

$$F_e = k_e \frac{|e|^2}{r^2} = \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

olduğu bulunur.

Newton'un kütle-çekim yasası ve Çizelge 23.1 kullanılarak, kütle-çekim kuvvetinin büyüklüğünün

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_e m_p}{r^2} \\ &= \left(6,7 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right) \\ &\quad \times \frac{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} \\ &= 3,6 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

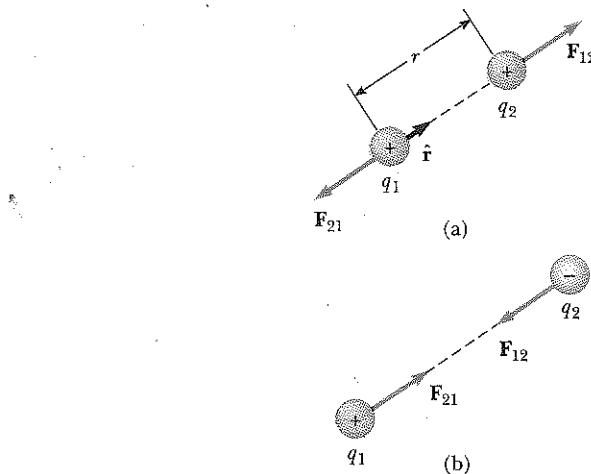
olduğu bulunur. F_e/F_g oranı yaklaşık 2×10^{39} dur. Buna göre atomdaki yüklü parçacıklar arasındaki kütle-çekim kuvveti elektriksel kuvvet yanında önemsenmeyebilir. Newton'un kütle-çekim yasası ile Coulomb'un elektrik kuvvetleri yasasının biçimsel benzerliğine dikkat ediniz. Büyüklük dışında bu iki kuvvet arasındaki temel fark nedir?

Coulomb yasasıyla uğraşırken, kuvvetin bir *vektörel* nicelik olduğunu unutmamak işemeler buna göre yapılmalıdır. Buna göre bir q_1 yükünün ikinci bir q_2 yüküne uyguladığı \mathbf{F}_{12} şeklinde yazılan elektrik kuvvetini vektörel olarak ifade eden Coulomb yasası;

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.2)$$

dir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$, Şekil 23.6a daki gibi q_1 den q_2 ye doğru yönelmiş bir birim vektördür. Elektrik kuvveti Newton'un üçüncü yasasına uyduğundan, q_2 nin q_1 e

² Bakır gibi bir metalin atomunda çekirdeğe zayıf olarak bağlı bir veya daha çok dış elektronlar bulunur. Bir metali oluşturmak üzere birçok atom biraraya geldiğinde, *serbest elektron* olarak bilinen ve hiçbir atoma bağlı olmayan elektronlar iste bu dış elektronlardır. Bu elektronlar, bir kapta hareket eden gaz moleküllerine benzer biçimde metal içinde dolanırlar.



Şekil 23.6 Aralarında r uzaklığı olan iki nokta yük birbirine Coulomb yasasına göre kuvvet uygularlar. q_2 nin q_1 e uyguladığı F_{21} kuvveti q_1 in q_2 ye uyguladığı F_{12} kuvvette eşit ve zit yönindedir. (a) Yükler aynı işaretli olduklarında kuvvet iticidir. (b) Yükler zit işaretli olduklarında kuvvet çekicidir.

etkidiği elektrik kuvveti, q_1 in q_2 ye etkidiği kuvvete büyüklükçe eşit ve zit yönindedir; yani, $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$. Son olarak, (23.2) e göre Şekil 23.6a'daki gibi q_1 ve q_2 aynı işaretli iseler, $q_1 q_2$ çarpımı artı olur ve kuvvet iticidir. q_1 ve q_2 , Şekil 23.6b deki gibi zit işaretli iseler, $q_1 q_2$ çarpımı eksi olur ve kuvvet çekicidir. $q_1 q_2$ çarpımının işaretine bakılması, yüklere etkiyen kuvvetlerin doğrultusunu belirlemenin kolay bir yoludur.

Sınamaya Sorusu 23.3

A cisminin yükü $+2 \mu\text{C}$, B cismininki ise $+6 \mu\text{C}$ dur. Hangi ifade doğrudur?

- (a) $\mathbf{F}_{AB} = -3\mathbf{F}_{BA}$ (b) $\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$ (c) $3\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$

İkiden fazla yük bulunduğuunda, herhangi bir yük çifti arasındaki kuvvet (23.2) ile verilir. Buna göre yüklerden herhangi biri üzerine etkiyen bileşke kuvvet, öteki her bir yükten ileri gelen kuvvetlerin *vektörel* toplamına eşittir. Örneğin, dört yük bulunması durumunda, 1. parçacık üzerine, 2., 3. ve 4. parçacıkların uyguladığı bileşke kuvvet

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{31} + \mathbf{F}_{41}$$

ile verilir.

ÖRNEK 23.2 ► Bileşke Kuvveti Bulunuz

Şekil 23.7 deki üçgenin köşelerine konulmuş üç nokta yük düşününüz. Burada $q_1 = q_3 = 5,0 \mu\text{C}$, $q = -2,0 \mu\text{C}$ ve $a = 0,10 \text{ m}$. q_3 üzerine etkiyen bileşke kuvveti bulunuz.

Çözüm Önce, q_1 ve q_2 nin q_3 e uyguladığı kuvvetlerin doğrultularını belirtelim. q_2 ve q_3 zit işaretli olduklarından, q_2 nin q_3 e uyguladığı F_{23} kuvveti çekicidir. q_1 in q_3 e uyguladığı F_{13} kuvveti, ikisi de artı olduklarından iticidir.

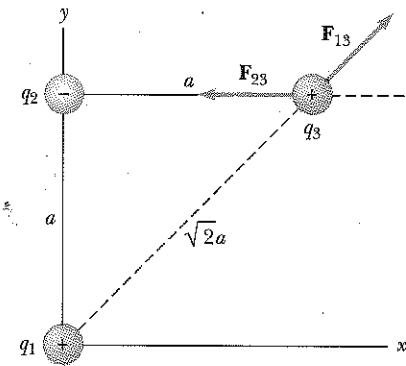
F_{23} kuvvetinin büyüklüğü:

$$F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{a^2}$$

$$= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(2,0 \times 10^{-6} \text{ C})(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,10 \text{ m})^2}$$

$$= 9,0 \text{ N}$$

q_3 ve q_2 zit işaretli olduklarından, \mathbf{F}_{23} Şekil 23.7 deki gibi sola doğrudur.



Şekil 23.7 q_1 in q_3 e uyguladığı kuvvet \mathbf{F}_{13} , q_2 nin q_3 e uyguladığı kuvvet \mathbf{F}_{23} dür. q_3 e etkiyen bileşke kuvveti, $\mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{23}$ vektör toplamıdır.

q_1 in q_3 e uyguladığı kuvvetin büyüklüğü:

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(\sqrt{2}a)^2}$$

$$= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{2(0,10 \text{ m})^2} \\ = 11 \text{ N}$$

\mathbf{F}_{13} kuvveti itici olup x ekseniyle 45° lik bir açı yapar. Bunun için \mathbf{F}_{13} ün x ve y bileşenleri aynı $F_{13} \cos 45^\circ = 7,9 \text{ N}$ büyükünlündedirler.

\mathbf{F}_{13} kuvveti eksiz x doğrultusundadır. Buna göre, q_3 e etkiyen bileşke kuvvetin x ve y bileşenleri:

$$\mathbf{F}_{3x} = F_{13x} + \mathbf{F}_{23} = 7,9 \text{ N} - 9,0 \text{ N} = -1,1 \text{ N}$$

$$\mathbf{F}_{3y} = F_{13y} = 7,9 \text{ N}$$

q_3 e etkiyen bileşke kuvveti birim vektörlerle belirtilebilir:

$$\mathbf{F}_3 = (-1,1\mathbf{i} + 7,9\mathbf{j}) \text{ N}$$

Alişturma \mathbf{F}_3 bileşke kuvvetin büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.

Cevap x ekseniyle 98° lik açıda $8,0 \text{ N}$.

ÖRNEK 23.3 Bileşke Kuvvet Nerede Sıfırdır?

Üç nokta yük, Şekil 23.8 deki gibi, x ekseni üzerinde bulunmaktadır. Artı $q_1 = 15 \mu\text{C}$ yükü $x = 2 \text{ m}$ de, artı $q_2 = 6 \mu\text{C}$ yükü de başlangıç noktasında bulunmaktadır. q_3 e etkiyen bileşke kuvvet sıfırdır. q_3 ün x koordinatı nedir?

Çözüm q_3 eksi, q_1 ve q_2 nin her ikisi de artı olduğundan, \mathbf{F}_{13} ve \mathbf{F}_{23} kuvvetleri, Şekil 23.7 de ki gibi, çekicidir. Coulomb Yasasına göre, \mathbf{F}_{13} ve \mathbf{F}_{23} kuvvetlerinin büyüklükleri

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2,00 - x)^2} \quad F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2}$$

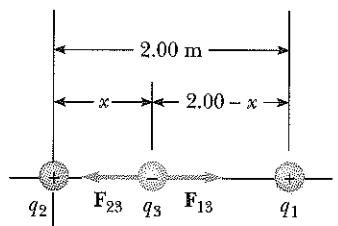
dir. q_3 e etkiyen bileşke kuvvet sıfır olması için, \mathbf{F}_{23} , \mathbf{F}_{13} e eşit ve zit olmalıdır, veya

$$k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2,00 - x)^2}$$

Eşitliğin her iki tarafı $k_e |q_3|$ e bölünüp düzenlenirse,

$$(2 - x)^2 |q_2| = x^2 |q_1| \\ (4 - 4x + x^2)(6 \times 10^{-6} \text{ C}) = x^2 (15 \times 10^{-6} \text{ C})$$

bulunur. İkinci dereceden bu denklemden x çözüldüğünde, $x = 0,775 \text{ m}$ bulunur. Eksi kök neden kabul edilemez?



Şekil 23.8 Üç nokta yük x ekseni üzerinde bulunmaktadır. q_3 e etkiyen net kuvvet sıfırsa, bu durumda, q_1 in q_3 e uyguladığı \mathbf{F}_{13} kuvveti, q_2 nin q_3 e uyguladığı \mathbf{F}_{23} kuvvette büyülükçe eşit fakat zit yönde olmalıdır.

ÖRNEK 23.4 Küreler Üzerindeki Yükü Bulunuz

Herbirinin kütlesi $3 \times 10^{-2} \text{ kg}$ olan yüklü özdeş iki küçük küre, Şekil 23.9a daki gibi dengede asılı durmaktadır. İplerin herbiri $0,15 \text{ m}$ uzunluğunda ve açı $\theta = 5^\circ$ dir. Her bir küredeki yük miktarını bulunuz.

Çözüm Şekil 23.9a daki dik üçgenden $\sin\theta = a/L$ ol-

duğu görülmeye. Buna göre

$$a = L \sin\theta = (0,15 \text{ m}) \sin 5^\circ = 0,013 \text{ m}$$

küreler arası uzaklık $2a = 0,026 \text{ m}$ dir.

Sol küreye etkiyen kuvvetler Şekil 23.9b de gösterilmiştir. Küre dengede olduğundan yatay ve düşey kuvvetler bi-

leşkesi ayrı ayrı sıfır olmalıdır:

$$(1) \quad \sum F_x = T \sin \theta - F_e = 0$$

$$(2) \quad \sum F_y = T \cos \theta - mg = 0$$

(2) den bulunan $T = mg/\cos\theta$, (1) de yerine konularak F_e elektrik kuvvetinin büyüklüğü bulunur:

$$(3) \quad F_e = mg \tan \theta \\ = (3 \times 10^{-2} \text{ kg}) (9,80 \text{ m/s}^2) \tan (5^\circ) \\ = 2,6 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Coulomb yasasından (Eş. 23.1), elektrik kuvvetinin büyüklüğü

$$F_e = k_e \frac{|q|^2}{r^2}$$

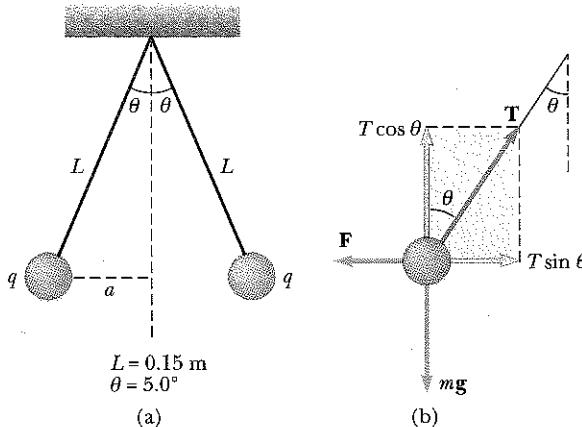
dir. Burada, $r = 2a = 0,026 \text{ m}$ ve $|q|$ her bir küre üzerindeki yük miktarıdır. (Burada $|q|^2$ teriminin ortaya çıkması, her iki kürede de aynı miktarda yük bulunmasındandır.) Bu denklemden $|q|^2$ çözürlerek yük bulunabilir:

$$|q|^2 = \frac{F_e r^2}{k_e} = \frac{(2,6 \times 10^{-2} \text{ N})(0,026 \text{ m})^2}{8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2}$$

$$|q| = 4,4 \times 10^{-8} \text{ C}$$

Aliştırma Kürelerdeki yük eksisi olduğunda, kürelere $-4,4 \times 10^{-8} \text{ C}$ luk net yük kazandırmak için kaç elektron katılması gereklidir?

Cevap $2,7 \times 10^{11}$ elektron.



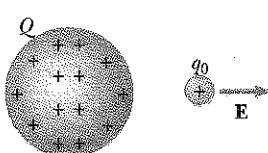
Şekil 23.9 (a) İplerle asılı aynı q yüklü özdeş iki kürenin denge bulunuşası. (b) yüklü kürelerden soldaki için serbest-cisim çizimi.

Ev Deneyi

Bu deney için 20 cm'lik saydam iki şerite (her birinin kütlesi $\approx 65 \text{ mg}$) gereksiniminiz vardır. Bir sap yapmak için şeritleri bir ucundan 1 cm katlayınız. Şeritleri bir masa üzerinde yanyana bastırıp parmağınızla üzerinden ileri geri sürtünüz. Şeritleri yüzeyden çabucak sıyrılığınızda yüklenirler. Şeritleri saplarından birlikte tuttuğunuzda şeritler birbirlerini iterek ters bir "V" şeklini alırlar. Şeritler arasındaki açıyı ölçelerek şeritlerin her birindeki fazla yükü tahmin ediniz. Yüklerin, şeritlerin kütle merkezlerinde bulunuyor gibi etkileşiklerini varsayıñız.

23.4 ELEKTRİK ALANI

Şimdiye dek kütle çekimi kuvveti ve elektrik kuvveti olmak üzere, tartışmalarda 11.5 iki alan kuvveti tanıttık. Bundan önce dechinliği üzere, alan kuvvetleri, uzaya cisimler birbirlerine fiziksel olarak değișeseler bile etkileşebilirler. Uzaya bir noktadaki, g kütle-çekim alanının, m deneme kütlesine etkiyen F_g kütle-çekim kuvvetinin, deneme kütlesine bölümune eşit olduğu Kesim 14.6'da tanımlanmıştır: $g = F_g/m$. Elektrik kuvvetlerine benzer bir yaklaşım Michael Faraday tarafından yapılmıştır. Bunun pratik önemi nedeniyle gelecek birkaç bölümde de dechinilmişdir. Bu yaklaşımda elektrik yüklü bir cismi saran uzay bölgesinde elektrik alanının bulunduğu söylenir. Bu alana başka bir yüklü cisim girdiğinde buna bir elektrik kuvveti etkir. Örneğin, küçük bir artı q_0 deneme yükünün daha büyük artı yük taşıyan ikinci bir cismin yakınında bulunduğu Şekil 23.10 da göz önüne alınınsın. Deneme yükünün konumundaki elektrik alanının şiddeti (başa deyişle büyülüğu) birim yük başına elektrik kuvveti olarak tanımlanır. Daha kesin bir anlatımla,



Şekil 23.10 Çok daha büyük artı Q yükü taşıyan bir cismin yakınına konulmuş küçük bir artı q_0 deneme yüküne gösterilen doğrultuda bir \mathbf{E} elektrik alanı etkir.

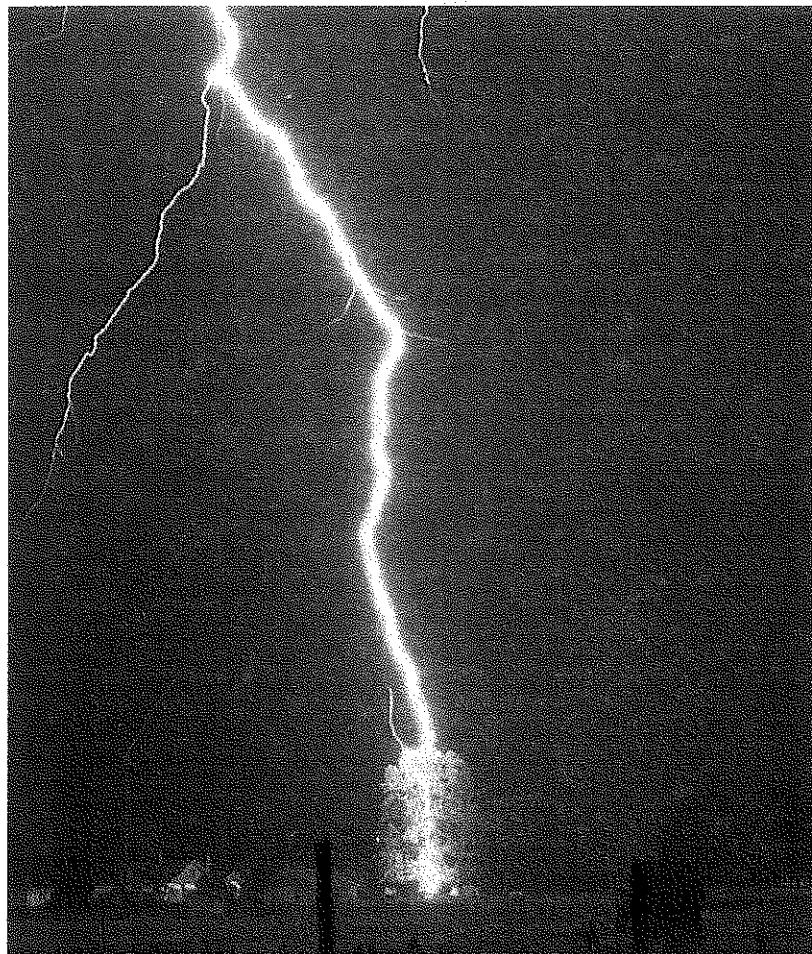
uzayda bir noktadaki **E elektrik alanı**, o noktaya konulan artı bir deneme yüküne etkiyen \mathbf{F}_e elektrik kuvvetinin deneme yükünün q_0 büyüklüğünə böülümlü olarak tanımlanır:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_0} \quad (23.3)$$

Elektrik alanın tanımı

E, deneme yükünce oluşturulmayıp deneme yüküne *dışarıdan* etkiyen bir alanıdır. Ayrıca elektrik alanının varoluşu, kaynağının bir özelliğidir. Örneğin, her elektronla birlikte kendi alanı da vardır.

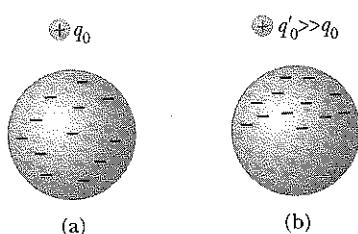
E vektörünün SI sistemindeki birimi coulomb başına newtondur (N/C) ve Şekil 23.10'daki gibi doğrultusu, alana konulan artı bir deneme yüküne etkiyen kuvvetin doğrultusudur. \mathbf{F} nin artı bir deneme yüküne etkidiğini varsayıdığımızdan **E**, \mathbf{F} doğrultusundadır. Buna göre, **durgun bir deneme yükü bir noktaya konulduğunda elektrik kuvvet etkisinde kalırsa, o noktada bir elektrik alanı vardır** denir. Bir noktadaki elektrik alanın doğrultu ve büyüklüğü bir kez bi-



Kırsal kesim evleri yakınında bir ağaca yıldırım düşüş anını yakalamış olan heyecan verici fotoğraf (©Johnny Autery)

TABLO 23.2 Bazı Örnek Elektrik Alan Değerleri

Kaynak	E(N/C)
Floresan lâmba	10
Atmosfer (iyi havada)	100
Saça sürtülmüş balon	1000
Atmosfer (şimşekli bulutlarla kaplı)	10 000
Fotokopi makinesi	100 000
Havadaki kivilcim	>3 000 000
Hidrojen atomunda elektron yakını	$5 \cdot 10^{11}$



Şekil 23.11 (a) Yeterince küçük q_0 deneme yükü için küredeki yük dağılımı değişmez. (b) q'_0 deneme yükü büyük olduğunda küredeki yük dağılımı q_0 'ın yakınlığı nedeniyle değişir.

lindikten sonra, o noktaya konulan yüklü *herhangi* bir parçacığa etkiyen kuvvet Eş. 23.3'den hesaplanabilir. Bunun yanında, **bir noktada deneme yükün bulunup bulunmadığına bakılmaksızın** (boş uzayda bile) o noktada elektrik alanının bulunduğu söylenir. (Bu, bir cismin oluşturduğu kütleçekim alanına benzerdir. Bu alanın o noktada, alanı algılaması için başka bir cismin bulunup bulunmamasına bakılmaksızın, var olduğu söylenir.) Çeşitli kaynakların elektrik alan büyüklükleri Tablo 23.2'de verilmiştir.

Eş. (23.3) kullanılırken, q_0 deneme yükünün elektrik alanı oluşturan yük dağılımını bozmayacak kadar küçük olduğu varsayılr. Şekil 23.11a daki gibi düzgün yüklü bir metal küre yakınına son derece küçük bir q_0 deneme yükü konulduğunda, elektrik alanını oluşturan metal küredeki yük düzgün dağılımini korur. Deneme yükü Şekil 23.11b deki gibi yeterince büyük olduğunda ($q'_0 >> q_0$), metal küredeki yük, yeni bir düzenlemeye uğrar ve kuvvetin deneme yüküne oranı farklı olur: $(F'_e/q'_0) \neq (F_e/q_0)$. Bu durumda, metal küredeki bu yük dağılımının yeniden düzenlenisi nedeniyle, oluşturduğu elektrik alanı, çok daha küçük q_0 bulunması durumunda oluşturulan alanlardan farklıdır.

Bir elektrik alanının doğrultusunu belirlemek için Şekil 23.12'deki gibi bir P noktasındaki bir q_0 deneme yükünden r uzaklığında bulunan bir q noktası yükünü ele alalım. Coulomb yasasına göre q yükünün deneme yüküne uyguladığı kuvvet;

$$\mathbf{F}_e = k_e \frac{qq_0}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

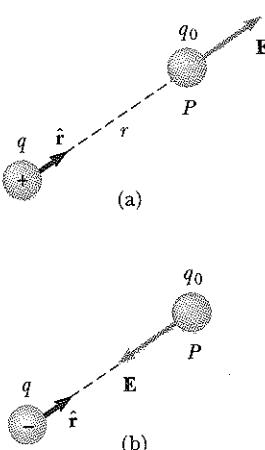
dir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$, q dan q_0 a yönelik birim vektördür. Deneme yükünün bulunduğu konumda elektrik alanı $\mathbf{E} = \mathbf{F}_e/q_0$ ile tanımlandığından, q nun P de oluşturduğu elektrik alanı:

$$\mathbf{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.4)$$

dir. Şekil 23.12a daki gibi, q artı ise, alan, bu yükten yarıçap boyunca *dışan* doğru yönelmiştir. Şekil 23.12b deki gibi q eksi ise, alan, yüze *doğru* yöneliktir.

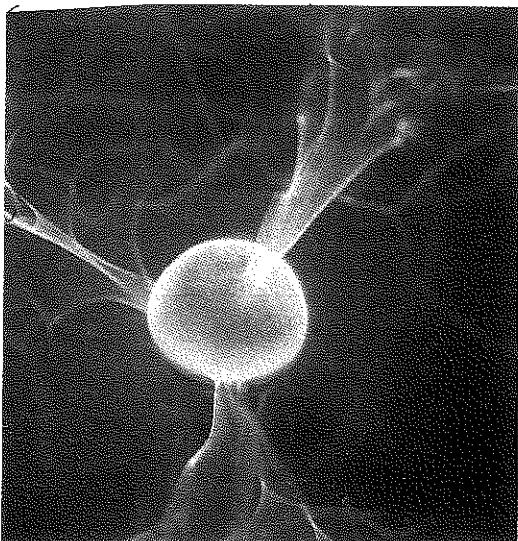
Nokta yükler topluluğundan ileri gelen elektrik alanını hesaplamak için, Eş. 23.4 kullanılarak P noktasındaki elektrik alan vektörleri tek tek bulunup *vektörel* olarak toplanır. Başka bir deyişle,

yükler topluluğunun herhangi bir P noktasında oluşturduğu toplam elektrik alanı, bütün yüklerin elektrik alanlarının vektörel toplamına eşittir.



Şekil 23.12 P noktasındaki q_0 deneme yükü, q nokta yükünden r uzaklığındadır. (a) q artı ise, P deki elektrik alanı yarıçap boyunca q den *dışan* doğrudur. (b) q eksi ise, P deki elektrik alanı yarıçap boyunca *icde doğru* q ye yöneliktir.

Alanlara uygulanan bu üstüste binme ilkesi, elektrik kuvvetlerinin üst üste binme özelliğinin doğal bir sonucudur. Buna göre, yükler topluluğunun elektrik alanı



Bir üreteçle yüklenen bu metal küre net bir elektrik yükü taşımaktadır. Küredeki yük yoğunluğu, çevreinde şiddetli elektrik alanı oluşturur. Böylece yükler küreyi saran gazdan kaçarak pembe ışıldamaya yol açarlar. (E.R. Degginer/H. Armstrong Roberts)

$$\mathbf{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (23.5)$$

şeklinde belirtilebilir. Burada, r_i , i inci q_i yükünden P noktasına (deneme yükünün bulunduğu yer) olan uzaklık ve $\hat{\mathbf{r}}_i$, q_i den P ye yönelikmiş bir birim vektördür.

Sınaması Sorusu 23.4

$+3 \mu\text{C}$ luk bir yük $4,10^6 \text{ N/C}$ büyüklüğünde sağa yönelik elektrik alanın bulunduğu bir P noktasındadır. Bu yük yerine $-3 \mu\text{C}$ luk bir yük konulursa P deki elektrik alana ne olur?

ÖRNEK 23.5 İki Yükün Elektrik Alanı

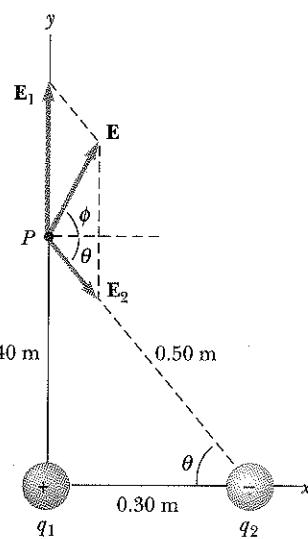
Bir $q_1 = 7,0 \mu\text{C}$ yükü başlangıç noktasında, ikinci bir $q_2 = -5,0 \mu\text{C}$ yükü x ekseni üzerinde başlangıçtan $0,3 \text{ m}$ uzakta bulunmaktadır (Şekil 23.13). $(0; 0,40) \text{ m}$ koordinatlı P noktasındaki elektrik alanını bulunuz.

Çözüm Önce, her bir elektrik yükünden ileri gelen elektrik alanlarının büyüklüklerini bulalım. P noktasındaki $7,0 \mu\text{C}$ yükünden ileri gelen \mathbf{E}_1 ve $-5,0 \mu\text{C}$ yükünden ileri gelen \mathbf{E}_2 alanları Şekil 23.13 de gösterilmiştir. Bunların büyüklükleri

$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^2} = \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(7,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,40 \text{ m})^2} \\ = 3,9 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^2} = \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,50 \text{ m})^2} \\ = 1,8 \times 10^5 \text{ N/C}$$

\mathbf{E}_1 vektörünün yalnız y bileşeni vardır. \mathbf{E}_2 vektörünün $E_2 \cos\theta = \frac{3}{5} E_2$ ile verilen x bileşeni, $-E_2 \sin\theta = -\frac{4}{5} E_2$ ile verilen eksi y bileşeni bulunmaktadır. Böylece vektörleri,



Şekil 23.13 P deki \mathbf{E} toplam elektrik alanı $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$ vektör toplamının eşittir. Burada \mathbf{E}_1 , q_1 artı yükünden, \mathbf{E}_2 ise eksi q_2 yükünden ileri gelen alanlardır.

$$\mathbf{E}_1 = 3,9 \times 10^5 \mathbf{j} \text{ N/C}$$

$$\mathbf{E}_2 = (1,1 \times 10^5 \mathbf{i} - 1,4 \times 10^5 \mathbf{j}) \text{ N/C}$$

şeklinde ifade edilebilir. P deki \mathbf{E} bileşke alanı, \mathbf{E}_1 ve \mathbf{E}_2 nin üstüste birleşmesiyle oluşur:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = (1,1 \times 10^5 \mathbf{i} + 2,5 \times 10^5 \mathbf{j}) \text{ N/C}$$

Bu sonuçtan, \mathbf{E} nin $2,7 \times 10^5 \text{ N/C}$ büyüklüğünde ve artı x ekseniyle 66° lik ϕ açısı yaptığı bulunur.

Alıştırma P de bulunan $2 \times 10^{-8} \text{ C}$ luk bir yüze etkiyen elektriksel kuvveti bulunuz.

Cevap E ile aynı doğrultuda $5,4 \times 10^{-8} \text{ N}$.

ÖRNEK 23.6 Bir Dipolün Elektrik Alanı

Bir elektrik dipolü, aralarında belli bir uzaklık bulunan artı ve eksi $-q$ yük çiftinden oluşur. Şekil 23.14 deki dipol için P noktasında bu yüklerin oluşturduğu \mathbf{E} elektrik alanını bulunuz. Burada P , başlangıç noktasından $y \gg a$ uzaklığındadır.

Çözüm P noktası yüklerden aynı uzaklıkta bulunduğundan, bu noktada bu iki yükün oluşturduğu \mathbf{E}_1 ve \mathbf{E}_2 alanlarının büyüklükleri eşittir. Toplam alan $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$ olup burada:

$$E_1 = E_2 = k_e \frac{q}{r^2} = k_e \frac{q}{y^2 + a^2}$$

dir. \mathbf{E}_1 ve \mathbf{E}_2 nin y bileşenleri birbirini yok ederler, x bileşenleri ise artı x yönünde olup birbirlerine eşittir. Bunun sonucu olarak \mathbf{E} , x eksene paralel olup $2E_1 \cos\theta$ büyüklüğündedir. Şekil 23.14 den $\cos\theta = a/r = a/(y^2 + a^2)^{1/2}$ olduğu görürlür. Bu nedenle

$$\begin{aligned} E &= 2E_1 \cos\theta = 2k_e \frac{q}{(y^2 + a^2)} \frac{a}{(y^2 + a^2)^{1/2}} \\ &= k_e \frac{2qa}{(y^2 + a^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

$y \gg a$ den dolayı a^2 önemsenmeye bileceği için

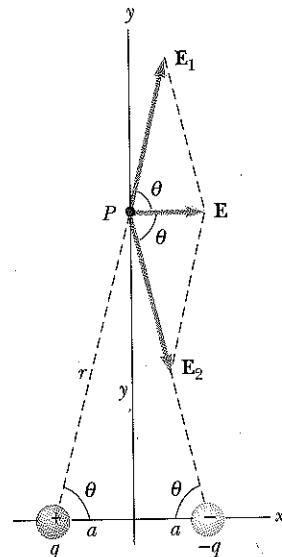
$$E = k_e \frac{2qa}{y^3}$$

yazılabilir.

Böylece, iki yükü birleştiren doğru parçasının orta dikmesi üzerinde uzak noktalarda dipolün oluşturduğu elektrik alanının $1/r^3$ le değiştiği, oysa bir nokta yükün alanının $1/r^2$ ile daha yavaş değiştiği görülür. (Bakınız Es. 23.4) Bu nedeni, uzak noktalarda eşit büyüklükte zıt iki yükün alanlarının birbirlerini hemen hemen yok etmeleridir. Çift kutupluğunun (dipolün) E alanının $1/r^3$ değişimi, x ekseni

üzerindeki (Problem 21) veya herhangi genel konumda uzaq bir nokta için de elde edilebilir.

Dipol, Hidroklorik asit (HCl) gibi birçok molekül için iyi bir modeldir. Nötr atom ve moleküllerin bir elektrik alanına konulduklarında dipol (çiftkutuplu) gibi davranışları, sonraki bölümlerde görülecektir. Bundan başka, HCl gibi birçok molekül kalıcı çiftkutupludur. Böyle çiftkutupların elektrik alanına konulan maddelerin davranışları üzerindeki etkisi, Bölüm 26 da incelenecaktır.



Şekil 23.14 Eşit ve zıt iki yükün (elektrik çift kutuplu) P de oluşturduğu \mathbf{E} toplam elektrik alanı, $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$ vektör toplamına eşittir. \mathbf{E}_1 , artı q yükünden ileri gelen alan, \mathbf{E}_2 , eksi $-q$ yükünden ileri gelen alandır.



SÜREKLİ BİR YÜK DAĞILIMININ ELEKTRİK ALANI

Çoğu kez bir yükler topluluğunun yükleri arasındaki uzaklıklar ilgilenilen bir noktanın (örneğin elektrik alanın hesaplanacağı bir nokta) topluluktan olan uzaklığından çok daha küçüktür. Böyle durumlarda yükler sistemi *sürekli*dir.

Yani, birbirlerine yakın yüklerden oluşan bir sistem, bir çizgi, bir yüzey veya hacim üzerinde sürekli biçimde dağılmış toplam bir yüke eşdeğerdir.

Sürekli bir yük dağılımının elektrik alanını hesaplamak için şu işlem yapılır: Önce, yük dağılımı, Şekil 23.15 teki gibi her birinde Δq küçük yüklerinin bulunduğu küçük parçalara ayırılır. Sonra, bu parçalardan birinin bir P noktasında oluşturduğu elektrik alanını hesaplamak için Eş. 23.4 kullanılır. Son olarak, bütün küçük yük parçalarının katkıları toplanarak (yani, üstüste bittiği ilkesi uygulanarak) yük dağılımının P de oluşturduğu toplam alan hesaplanır.

Bir Δq yük parçasının P de oluşturduğu elektrik alanı

$$\Delta \mathbf{E} = k_e \frac{\Delta q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

ile verilir. Burada r , elemanın P ye olan uzaklığı ve $\hat{\mathbf{r}}$, yük elemanından P ye doğru yönelmiş bir birim vektördür. Yük dağılımindaki bütün elemanların P de oluşturduğu toplam elektrik alanı yaklaşık olarak

$$\mathbf{E} \approx k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i$$

Burada i indis, dağılımdaki i inci parçayı belirtir. Yük dağılımı yaklaşık sürekli olduğundan, P deki toplam alan, $\Delta q_i \rightarrow 0$ limitinde

$$\mathbf{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.6)$$

olur. Burada integral tüm yük dağılımı üzerindedir. Bu bir vektörel işlem olduğundan dikkatle ele alınmalıdır.

Bu tür hesaplamalar birkaç örnek gösterilecektir. Bu örneklerde yükün bir doğru, bir yüzey veya bir hacme düzgün olarak dağıldığı varsayılacaktır. Böyle hesaplar yapılırken aşağıdaki tanımlamalarla birlikte yük yoğunluğu kavramını kullanmak kolaylık sağlar:

- Bir Q yükü bir V hacmine düzgün olarak dağılmışsa, ρ **hacimsel yük yoğunluğu**

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

Hacimsel yük yoğunluğu

ile tanımlanır. Burada ρ 'nun birimi metreküp başına coulombdur (C/m^3).

- Bir Q yükü, A yüzölçümü bir yüzeye düzgün olarak dağılmışsa, σ **yüzeysel yük yoğunluğu**

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

Yüzeysel yük yoğunluğu

ile tanımlanır. Burada σ 'nın birimi metre kare başına coulombdur (C/m^2).

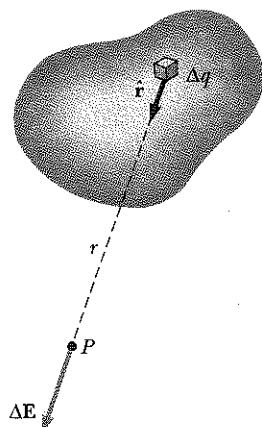
- Bir Q yükü ℓ uzunluğunda bir doğru boyunca düzgün olarak dağılmışsa, λ **doğrusal yük yoğunluğu**

$$\lambda = \frac{Q}{\ell}$$

Doğrusal yük yoğunluğu

ile tanımlanır. Burada λ 'nın birimi metre başına coulombdur (C/m).

Sürekli bir yük dağılımı



Şekil 23.15 Sürekli bir yük dağılımının P de oluşturduğu elektrik alanı, yük dağılımının bütün Δq öğelerinden ileri gelen $\Delta \mathbf{E}$ alanlarının vektörel toplamıdır.

Sürekli bir yük dağılımının elektrik alanı

- Yük, bir hacim, yüzey veya doğru üzerinde düzgün olmayan biçimde dağılmışsa yük dağılımlarının

$$\rho = \frac{dQ}{dV} \quad \sigma = \frac{dQ}{dA} \quad \lambda = \frac{dQ}{d\ell}$$

şeklinde belirtilmesi gereklidir. Burada dQ , küçük bir hacim, yüzey veya uzunluk ögesindeki yük miktarıdır.

ÖRNEK 23.7 Yüklü Bir Çubuğu Elektrik Alanı

ℓ uzunluklu bir çubugun toplam yükü Q , boyca yük yoğunluğu λ dir. Çubuk ekseni üzerinde, çubugun bir ucundan d uzaklığında bir P noktasındaki elektrik alanını hesaplayınız (Şek. 23.16).

Çözüm Çubugun x ekseni boyunca uzandığı, küçük bir parçasının uzunluğunun dx , bu parçadaki yükün dq olduğu varsayılsın. Çubugun birim uzunluk başına yükü λ olduğuundan küçük dx parçasındaki dq yükü, $dq = \lambda dx$ olur.

Bu parçanın P noktasında oluşturduğu dE alanı, eksi x doğrultusunda olup (alan kaynağı yük artı olduğu için) büyüğündür,

$$dE = k_e \frac{dq}{x^2} = k_e \lambda \frac{dx}{x^2}$$

ile verilir. Her bir elemanın oluşturduğu alan eksi x doğrultusunda olduğundan, bunların katkılarının toplanması bu durumda oldukça basittir. P ye farklı uzaklıklarda bulunan çubugun bütün parçalarının P de oluşturduğu toplam alan, Es. 23.6 ile verilir. Bu ifade, integral sınırları çubugun bir ucundan ($x = a$) öteki ucuna ($x = \ell + a$) kadar değiştirmek üzere

$$E = \int_a^{\ell+a} k_e \lambda \frac{dx}{x^2}$$

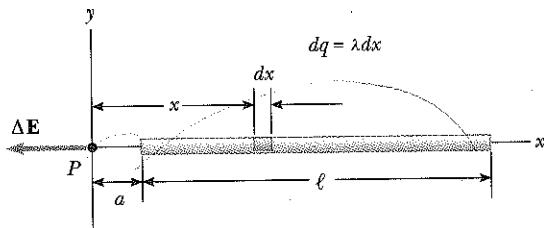
şeklini alır.³

k_e ve λ sabit olduklarından integral dışına alınabilirler. Toplam yük $Q = \lambda \ell$ olmak üzere,

$$E = k_e \lambda \int_a^{\ell+a} \frac{dx}{x^2} = k_e \lambda \left[-\frac{1}{x} \right]_a^{\ell+a} \\ = k_e \lambda \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{\ell+a} \right) = \frac{k_e Q}{a(\ell+a)}$$

bulunur.

P noktası çubuktan uzakta ise ($a \gg \ell$), paydadaki ℓ , önemsenmeyebilir ve $E \approx k_e Q / a^2$ olur. Bu bir nokta yük için beklenilen sonuçtır. Bu nedenle a/ℓ nin büyük değerlerinde çubuktaki yük dağılımı, Q büyüğünde bir nokta yük gibi gözükür. Kuramsal bir formülün kontrolü için limit alma ($a/\ell \rightarrow \infty$) çoğu kez iyi bir yöntemdir.



Şekil 23.16 x ekseni üzerinde bulunan düzgün yüklü bir çubugun P deki elektrik alanı. Δq yük ögesinin P deki alanı $k_e dq/x^2$ ile verilir. P deki toplam alan, çubugun bütün parçaları üzerinden alınan vektörel toplamdır.

ÖRNEK 23.8 Düzgün Yüklü Bir Halkanın Elektrik Alanı

a yarıçaplı bir halka üzerinde düzgün olarak dağılmış artı bir Q yükü bulunmaktadır. Halka ekseninde, halka merkezinden x uzaklığında bir P noktasında halkanın elektrik alanını hesaplayınız (Şek. 23.17a).

Çözüm dq yük parçasının P de oluşturduğu elektrik alanının büyüğünü:

$$dE = k_e \frac{dq}{r^2}$$

Bu alanın, halka ekseni paralel $dE_x = dE \cos\theta$, x bileşeni ve dik dE_\perp bileşeni vardır. Şekil 23.17b den görüldüğü gibi, dik bileşenler toplamı sıfır olduğundan, P deki bileşke alan x ekseni doğrultusundadır. Yani, bir yük parçasının dik bi-

³ Bu tür integrallerin nasıl hesaplanacağını bilinmesi önemlidir. Önce dq yük ögesi integraldeki öteki değişkenler cinsinden belirtilebilir (bu örnekte tek bir x değişkeni bulunduğundan $dq = \lambda dx$ değişimi yapılmıştır). İntegralin skaler nicelikler üzerinden alınması gereklidir; bu bakımından gerektiğinde elektrik alanının bileşenleri cinsinden belirtilemesi gereklidir. (Bu örnekte alanın yalnız x bileşeni olduğundan bu ayrıntı ile uğraşılması gerekmeyez.) Bundan sonra bulunan ifade tek değişkenli bir integrale indirgenir (ya da her biri tek değişkenli katlı integrale). Küresel veya silindirik simetrisi olan örneklerde tek değişken radyal koordinat olur.

leşeni, halkanın karşılarındaki öteki yük parçasının dik bilesenince yok edilir. $r = (x^2 + a^2)^{1/2}$ ve $\cos\theta = x/r$ olduğundan,

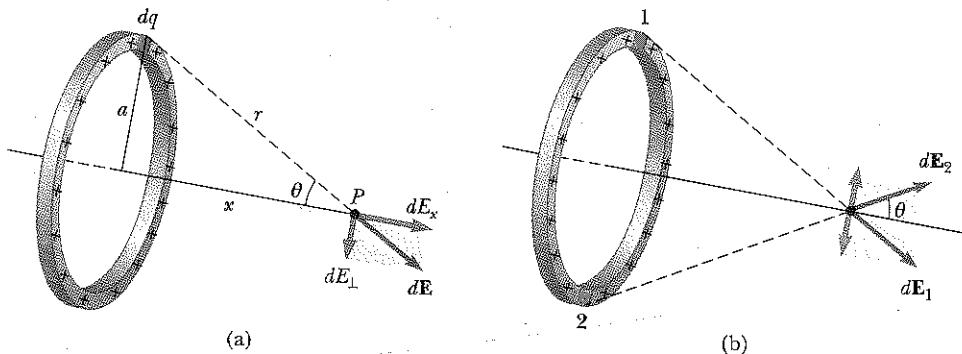
$$dE_x = dE \cos \theta = \left(k_e \frac{dq}{r^2} \right) \frac{x}{r} = \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} dq$$

bulunur. Halkanın bütün parçalarının P deki alana katkıları, bu noktaya eşit uzaklıkta bulunduklarından aynıdır. Buna göre, P deki toplam alanı elde etmek için bütün elemanlar üzerinden integral alınır:

$$\begin{aligned} E_x &= \int \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} dq = \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \int dq \\ &= \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} Q \end{aligned}$$

Bu sonuç $x = 0$ da alanın sıfır olduğunu gösterir. Bu bulgu sizin şaşırtır mı?

Aliştırma Şekil 23.17'deki gibi eksen boyunca halkadan çok uzaklarda ($x \gg a$) elektrik alanın, bir Q nokta yükü nükkine yaklaşlığını gösteriniz.



Şekil 23.17 a yarıçaplı düzgün yük dağılımlı bir halka. (a) Bir dq yük parçasının x eksenini üzerinde P de oluşturduğu alan. (b) P deki toplam elektrik alanı x ekseninde doğrultusundadır. P de parça 1 den ileri gelen elektrik alanının normal bileşeni, parça 2 den ileri gelen normal bileşeneye eşittir.

ÖRNEK 23.9 Düzgün Yük Dağılımlı Bir Diskin Elektrik Alanı

R yarıçaplı bir diskin, σ düzgün yüzeyel yük yoğunluğu vardır. Diskin ekseninde, merkezinden x uzaklığında bir P noktasındaki elektrik alanı hesaplayınız (Şek. 23.18).

Çözüm Disk aynı merkezli halkalar takımı olarak düşünürse r yarıçaplı bir halkanın alanını veren Örnek 23.8 den yararlanıp, diskin oluşturan bütün halkaların katkıları

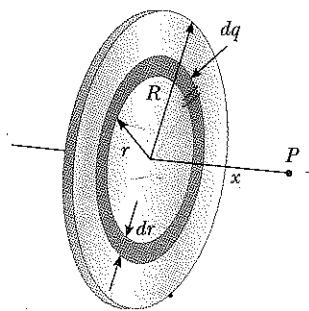
toplanabilir. Simetriden dolayı eksen üzerindeki bir noktada alan eksen boyunca olmalıdır.

r yarıçaplı dr enli halkanın alanı $2\pi r dr$ dir (Şek. 23.18). Bu halkadaki $dq = 2\pi\sigma r dr$ yükü, halka yüzölçümü ile yüzey yük yoğunluğunun çarpımına eşittir. Bu sonucu, Örnek 23.8 deki E_x bağıntısında (a yerine r alarak) kullanarak, halkanın oluşturduğu alan için

$$dE = \frac{k_e x}{(x^2 + r^2)^{3/2}} (2\pi\sigma r dr)$$

elde edilir. P deki toplam alanı bulmak için x sabit alınıp $r = 0$ dan $r = R$ ye kadar bu ifadenin integrali alınır. Böylece,

$$\begin{aligned} E &= k_e x \pi \sigma \int_0^R \frac{2r dr}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \\ &= k_e x \pi \sigma \int_0^R (x^2 + r^2)^{-3/2} d(r^2) \\ &= k_e x \pi \sigma \left[\frac{(x^2 + r^2)^{-1/2}}{-1/2} \right]_0^R \\ &= 2\pi k_e \sigma \left(\frac{x}{|x|} - \frac{x}{(x^2 + R^2)^{1/2}} \right) \end{aligned}$$



Şekil 23.18 Düzgün yüklü R yarıçaplı bir disk. Eksen üzerindeki bir P noktasındaki elektrik alanı eksen boyunca olup disk düzlemine diktir.

Bu sonuç x in bütün değerleri için geçerlidir. Eksen üzerinde diske yakın bir noktadaki alan $R \gg x$ varsayılarak hesaplanabilir; böylece parantez içindeki ifade bir olur:

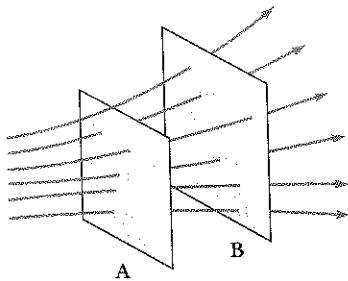
$$E \approx 2\pi k_e \sigma = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Burada $\epsilon_0 = 1/(4\pi k_e)$ boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir. Bundan sonraki bölümde görüleceği üzere, düzgün yüklü sonsuz bir tabakanın elektrik alanı için de aynı sonuç elde edilir.

23.6 ELEKTRİK ALAN ÇİZGİLERİ

 Elektrik alan desenlerini gözönünde canlandırmmanın uygun bir yolu, doğrusunu her noktada elektrik alan vektörü ile aynı olan çizgiler çizmektir. **Elektrik alan çizgileri** denilen bu çizgiler uzayın herhangi bir bölgesinde elektrik alanına aşağıdaki biçimde bağlıdır:

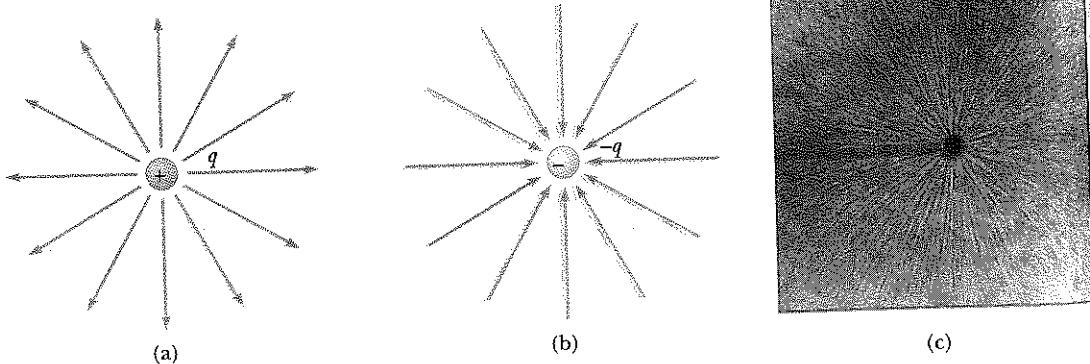
- E elektrik olan vektörü, elektrik alan çizgisine her noktada tegettir.
- Alan çizgilerine dik olan birim yüzeyden geçen çizgilerin sayısı, o bölgedeki elektrik alan büyüklüğüyle orantılıdır. Buna göre, alan çizgileri birbirlerine yakın olduğunda E büyük, uzak olduğunda küçüktür.



Şekil 23.19 İki yüzeyden geçen elektrik alan çizgileri. Alanın A yüzeyindeki büyülüğu B yüzeyindekinden fazladır.

Bu özellikler Şekil 23.19 da gösterilmiştir. A yüzeyinden geçen çizgi yoğunluğu, B yüzeyinden geçen çizgi yoğunluğundan daha büyktür. Bu nedenle, A yüzeyindeki elektrik alanı, B dekinden daha şiddetlidir. Üstelik, çizgiler, farklı noktalarda farklı doğrultularda olduklarından alan düzgün değildir.

Artı bir tek nokta yükü temsil eden elektrik alan çizgileri, Şekil 23.20a da gösterilmiştir. Bu iki boyutlu çizimde, yalnızca, nokta yükün bulunduğu düzlemdeki alan çizgileri gösterilmiştir. Alan çizgileri, yükten radyal olarak bütün doğrultularda dışarı doğru yönelmişlerdir. Buna göre şekildeki gibi düz-



Şekil 23.20 Bir nokta yükün elektrik alan çizgileri. (a) Artı bir nokta yük için alan çizgileri yarıçap boyunca (radyal olarak) dışarı doğrudur. (b) Eksi bir nokta yük için çizgiler yarıçap boyunca içeri doğrudur. Şekiller yalnızca yükün bulunduğu düzlemdeki alan çizgilerini göstermektedir. (c) Karanlık bölgeler, merkezdeki yüklü küçük bir iletkenin elektrik alanında dizilmiş yağda asılı küçük iplik parçalarıdır. (Fotograf, Princeton Üniversitesinden Harold M. Waage'in izniyle).

tekerlek yerine bir küre oluşturan çizgilerin zihinde canlandırılması gereklidir. Bu alana konulan artı bir deneme yükü nokta yükse itileceğinden, alan çizgileri artı noktası yükten yarıçap boyunca dışarı doğru yönelmişlerdir. Bir eksi noktası yükün elektrik alan çizgileri yüze doğru yönelmiştir (Şek. 23.20b). Her iki durumda da alan çizgileri yarıçap boyunca olup sonsuzda dek uzanırlar. Kaynak yüze yaklaşıkça, alan şiddetinin artmasını göstergesi olarak alan çizgileri sıkıştırırlar.

Elektrik alan çizgilerinin çizim kuralları şunlardır:

- Alan çizgileri bir artı yükten çıkışır ve bir eksi yükte son bulmalıdır.
- Bir artı yükten ayrılan veya bir eksi yüze ulaşan alan çizgilerinin sayısı yük miktariyla orantılıdır.
- İki alan çizgisi birbirini kesmez.

Elektrik alan çizgilerinin çizim kuralları

Elektrik alanın alan çizgileriyle anlatımı Coulomb yasası kullanılarak elde edilen Eş. 23.4 ile bağdaşır mı? Bu soruyu yanıtlamak için yükle aynı merkezli yarıçaplı bir küre yüzeyi düşününsün. Simetriden dolayı, küre yüzeyinin her yerinde elektrik alan büyülüğu aynıdır. Yükten çıkan N alan çizgisi sayısı, kuresel yüzeyden geçenlerin sayısına eşittir. Bunun için, küre yüzeyinde birim yüzölçümü düşen alan çizgisi sayısı $N/4\pi r^2$ dir (burada küre yüzeyinin tüm yüzölçümü $4\pi r^2$ dir). E , birim yüzeye düşen alan çizgilerinin sayısıyla orantılı olduğundan, $E \propto 1/r^2$ şeklinde değişir. Bu, sonuç Eş. 23.4'e uygundur.

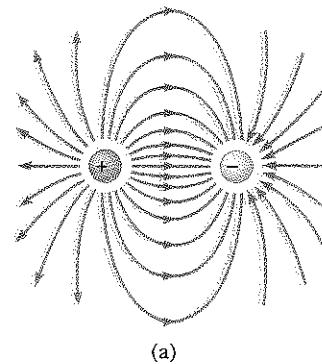
Göründüğü üzere elektrik alan çizgileri elektrik alanın nitel anlatımında kullanılır. Bu modelin bir sorunu, yükler için belli sayıda alan çizgilerinin çizilmesidir. Buna göre alan sanki belli doğrultularda etkilimiş gibi görünür. Bu gerçek değildir. Oysa, alan her noktada vardır ve süreklidir. Bu modelin başka bir sorunu da, üç boyutlu bir olayın anlatımında, alan çizgilerinin iki boyutlu çiziminin kullanılmasından dolayı, yanlış izlenimler elde edilmesi tehlikesidir. Çizerek ya da bakarak elektrik alan çizgileriyle uğraşlığında her zaman bu eksikliklerin bilincinde olunmalıdır.

Herhangi artı yüklü bir cisimden çıkan alan çizgilerinin sayısı $C'q$ ve eksi bir cisimde sona eren alan çizgilerinin sayısı $C'|q|$ olarak alınır. Burada C' rastgele bir orantı sabitidir. C' bir kez seçildikten sonra alan çizgilerinin sayısı sabit olur. Örneğin, cisim 1 ve cisim 2 nin yükleri Q_1 ve Q_2 ise, alan çizgi saylarının oranı $N_2/N_1 = Q_2/Q_1$ dir.

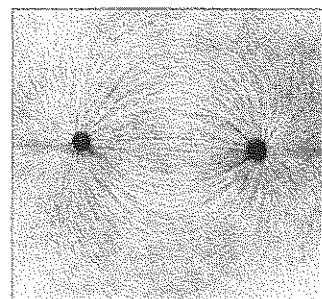
Aynı büyüklükte zit işarette iki nokta yükün (elektrik dipolü) elektrik alan çizgileri Şekil 23.21 de gösterilmiştir. Yükler eşit büyüklükte olduğundan, artı yükten çıkan alan çizgilerinin sayısı, eksi yükte son bulanların sayısına eşit olmalıdır. Yükler yakını yerlerde alan çizgileri hemen hemen radyaldır. Yükler arasındaki yüksek çizgi yoğunluğu, bu bölgede elektrik alanının şiddetli olduğunu gösterir.

Eşit yüklü artı iki nokta yükün çevresindeki elektrik alan çizgileri Şekil 23.22 de gösterilmiştir. Burada da, yükler yakını yerlerde alan çizgileri hemen hemen yarıçap boyuncaadır. Yükler eşit büyüklükte olduğundan her bir yükten aynı sayıda alan çizgisi çıkar. Yüklerden çok uzaklarda alan, $2q$ 'luk bir tek nokta yükün alanına yaklaşık olarak eşittir.

Son olarak, Şekil 23.23 te, artı $+2q$ yükü ile, eksi $-q$ yükünün elektrik alan çizgileri çizilmiştir. Bu durumda, $+2q$ yükünden ayrılan alan çizgilerinin sayısı, $-q$ yüküne girenlerin iki katıdır. Buna göre, artı yükten ayrılan alan çizgilerinin yalnız yarısı eksi yüze girmektedir. Öteki yarı, sonsuzda bulunduğu varsayılan eksi bir yükte son bulmaktadır. Yükler arasındaki uzaklığa göre

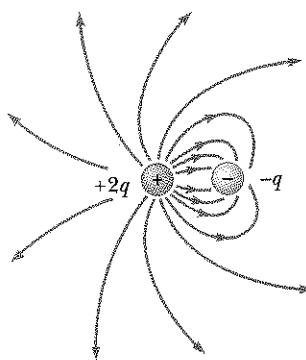


(a)

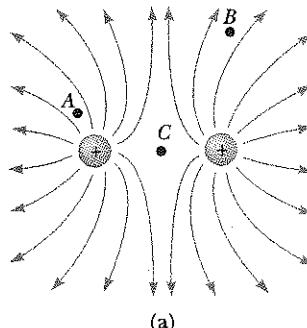


(b)

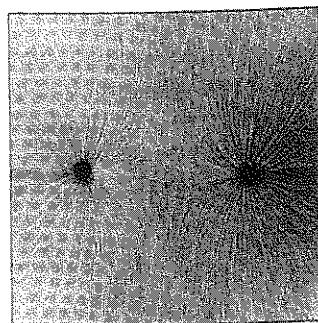
Şekil 23.21 (a) Eşit büyüklükte zit işaretli iki nokta yükün (elektrik dipolü) elektrik alan çizgileri. Artı yükten çıkışır ve eksi yüze ulaşan alan çizgilerinin sayısı aynıdır. (b) Koyu çizgiler bir dipolün elektrik alanyla sıralanan sağda asılı küçük ipli parçalarıdır. (b, Princeton Üniversitesi'nden Harold M. Waage'in izniyle)



Şekil 23.23 Bir $+2q$ nokta yükü ile başka bir $-q$ nokta yükünün elektrik alan çizgileri. $+2q$ yükünden çıkan iki alan çizgisi biri $-q$ yükünde son bulur.



(a)



(b)

Şekil 23.22 (a) İki artı nokta yükün elektrik alan çizgileri (A , B ve C nin yerleri Sinama Sorusu 23.5'de tarihlmiştir). (b) Eşit büyüklükte iki artı yükün oluşturduğu, elektrik alaniyla yağda asılı küçük iplik parçaları. (Fotoğraf, Princeton Üniversitesi'nden Harold M. Waage'in izniyle)

yüklerden çok uzaklarda elektrik alan çizgileri bir tek $+q$ yükünün kilelere eşdeğerdir.

Sinama Sorusu 23.5

Şekil 23.22a'daki A , B ve C noktalarındaki elektrik alan büyüklüğünü büyükten başlayarak sıralayınız.

23.7 DÜZGÜN BİR ELEKTRİK ALANINDA YÜKLÜ PARÇACIKLARIN HAREKETİ

q yüklü m kütleli bir parçacık bir \mathbf{E} elektrik alanına konulduğunda, yüze etkiyen elektrik kuvveti $q\mathbf{E}$ dir. Bu, parçacığa etkiyen tek kuvvetse, net kuvvet olağanından parçacığı hızlandırır. Bu durumda parçacığa Newton'un ikinci yasası uygulandığındır

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E} = m\mathbf{a}$$

elde edilir. Buna göre parçacığın ivmesi

$$\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m} \quad (23.7)$$

olur: \mathbf{E} düzgün ise (yani, doğrultu ve büyülüğu sabitse), ivme sabittir. Parçacığın yükü artı ise ivme elektrik alaniyla aynı, eksi ise *zit* yönindedir.

ÖRNEK 23.10 Hızlanan Bir Artı Yük

Şekil 23.24 teki gibi, x ekseni doğrultusunda olan düzgün bir \mathbf{E} elektrik alanında, m kütleli artı q nokta yükü, durgun halden serbest bırakılıyor. Hareketi anlatınız.

Çözüm Ivme sabittir ve $q\mathbf{E}/m$ ile verilir. Hareket x boyunca basit doğrusal bir harekettir. Bu nedenle bir boyutta ki kinematik denklemler uygulanabilir (bakınız Bölüm 2):

$$x_s = x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2}a_x t^2$$

$$v_{xs} = v_{xi} + a_x t$$

$$v_{xs}^2 = v_{xi}^2 + 2a_x(x_s - x_i)$$

$x_i = 0$ ve $v_{xi} = 0$ alındığında:

$$x_s = \frac{1}{2}a_x t^2 = \frac{qE}{2m} t^2$$

$$v_{xs} = a_x t = \frac{qE}{m} t$$

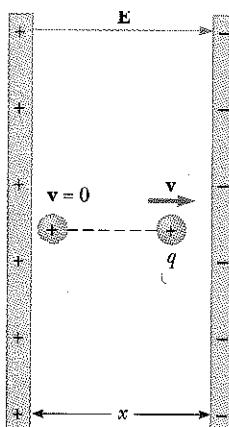
$$v_{xs}^2 = 2a_x x_s = \left(\frac{2qE}{m}\right) x_s$$

Yükün $x = x_s - x_i$ yolunu aldıktan sonraki kinetik enerjisi:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{2qE}{m}\right)x = qEx$$

ile verilir. Elektriksel kuvvetin yaptığı iş $F_e x = qEx$ ve $W = \Delta K$

olduğundan, bu sonuç iş enerji teoreminden de çıkarılabilir.



Şekil 23.24 Düzgün bir E elektrik alanında, artı bir q nokta yükü, alan doğrultusunda sabit bir ivme kazanır.

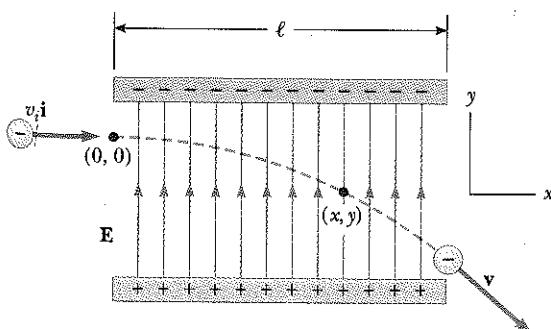
Zit işaret yüklü iki düz metal tabaka arasındaki bölgede elektrik alanı yaklaşık olarak düzgündür (Şek. 23.25). $-e$ yüklü bir elektronun bu alana v_i ilk hızıyla yatay olarak fırlatıldığı varsayılsın. Şekil 23.25 deki E elektrik alanı artı y doğrultusunda olduğundan, elektronun ivmesi eksi y doğrultusundadır. Yani,

$$\mathbf{a} = -\frac{eE}{m} \mathbf{j} \quad (23.8)$$

İvme sabit olduğundan, $v_{xi} = v_i$ ve $v_{yi} = 0$ olmak üzere, iki boyuttaki kinematik denklemleri (bakınız Bölüm 4) uygulanabilir. Elektrik alanında, bir t süresi kaldıktan sonra elektronun hız bileşenleri,

$$v_x = v_i = \text{sabit} \quad (23.9)$$

$$v_y = a_y t = -\frac{eE}{m} t \quad (23.10)$$



Şekil 23.25 İki yüklü tabakanın oluşturduğu düzgün bir elektrik alana, bir elektron yatay olarak fırlatılıyor. Elektron aşağı doğru bir ivme kazanır (E ye zıt yönde) ve tabakalar arasındayken parabolik bir yörünge izler.

olur. Elektron, elektrik alanında t süresi kaldıktan sonra koordinatları

$$x = v_i t \quad (23.11)$$

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2 = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 \quad (23.12)$$

dir. Eş. 23.11 deki $t = x/v_i$ değeri, Eş. 23.12 de yerine konulduğunda y nin x^2 ile orantılı olduğu bulunur. Buna göre yörünge bir paraboludur. Elektron düzgün elektrik alan bölgesindeinden çıkışınca Newton'un birinci yasasına uyarak $v > v_0$ hızıyla Şekil 23.25 deki v doğrultusunda bir doğru boyunca hareketini sürdürür.

Elektron üzerindeki kütle-çekim kuvveti önemsenmedi. Atomik parçacıklar için bu iyi bir yaklaşımdır. 10^4 N/C luk bir elektrik alanında eE elektrik kuvvetinin, büyülüğünün mg kütleçekim kuvvetinin büyülüğüne oranı bir elektron için 10^{14} , bir proton için 10^{11} mertebesindedir.

ÖRNEK 23.11 Hızlandırılmış Bir Elektron

Bir elektron, Şekil 23.25 teki gibi, $v_i = 3 \times 10^6 \text{ m/s}$ ve $E = 200 \text{ N/C}$ olmak üzere, düzgün bir elektrik alan bölge sine giriyor. Plakaların yatay eni $\ell = 0,100 \text{ m}$ dir. (a) Elektronun elektrik alanındaki ivmesini bulunuz.

Çözüm Elektronun yükü $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ve kütlesi $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ olduğundan, Eş. 23.8 den

$$\mathbf{a} = -\frac{eE}{m} \mathbf{j} = -\frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(200 \text{ N/C})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \mathbf{j}$$

$$= -3,51 \times 10^{13} \mathbf{j} \text{ m/s}^2$$

(b) Elektronun, elektrik alanı ne kadar sürede geçtiğini bulunuz?

Çözüm Elektrik alanı boyunca yatay uzunluk $\ell = 0,100 \text{ m}$ dir. Eş. 23.11 de $x = \ell$ alarak elektronun elektrik alanında geçirdiği süre:

$$t = \frac{\ell}{v_i} = \frac{0,100 \text{ m}}{3,00 \times 10^6 \text{ m/s}} = 3,33 \times 10^{-8} \text{ s}$$

(c) Elektrik alanındayken elektronun y düşey yerdeğiştirmesi ne kadardır?

Çözüm Eş. 23.12 ve (a) ve (b) şıklarından bulunan sonuçlar kullanılarak;

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} (-3,51 \times 10^{13} \text{ m/s}^2)(3,33 \times 10^{-8} \text{ s})^2$$

$$= -0,0195 \text{ m} = -1,95 \text{ cm}$$

buluruz.

Plakalar arasındaki uzaklık bundan daha küçük olursa elektron artı plakaya çarpar.

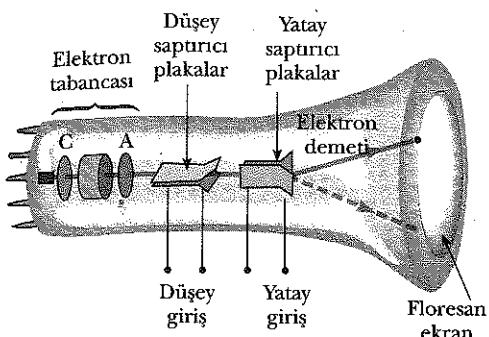
Aliştırma Elektronun elektrik alandan ayrılmış hızını bulunuz.

Cevap $3,22 \times 10^6 \text{ m/s}$.

Katot Işınları Tübü

Yukarıda incelenen örnek katot işinleri tübü (KIT) bir parçasını açıklar. Şekil 23.26 da gösterilen katot işinleri tübü osiloskoplar, radar sistemleri, televizyon alıcıları, bilgisayar ekranlarında elektronik bilginin görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. KIT, içinde, elektronların elektrik ya da manyetik alanlarda hızlandırıldıkları ve saptırıldıkları havası boşaltılmış bir tüptür. Elektron demeti, tübü boyun kısmında bulunan *elektron tabancası* denen bir ağızla üretilirler. Bu elektronlar kendi başlarına bırakıldıklarında KIT nün ön kısmındaki ekrana çarpmaya dek dosdoğru bir yol izlerler. Tübü "ekran"ı, elektronlarla dövündüğünde görünür ışık saçan bir maddeyle kaplanmıştır.

Bir osiloskopta tübü boyun kısmında birbirine dik olarak yerleştirilmiş iki plaka takımıyla elektronlar çeşitli doğrultularda saptırırlar. (Bir televiz-



Şekil 23.26 Bir katot işinleri tübüünün gösterimi. Sıcak C katodundan ayrılan elektronlar A anoduna doğru hızlanırlar. Elektron tabancası elektron demetinin odaklanmasıda kullanılır, plakalar ise demeti saptırır.

yon KIT'de elektron demeti Bölüm 29'da anlatıldığı gibi bir manyetik alanla yönlendirilir.) Plakalardaki yük miktarını denetlemek için bir dış elektrik devresi kullanılır. Yatay saptırıcı plakalardan birine artı ötekine eksi yük konulması plakalar arasında bir elektrik alan oluşturur ve demetin yanamasına denetimini sağlar. Düsey saptırıcı plakalar da aynı biçimde davranışır, yalnız plakalardaki yükün değiştirilmesi demetin düşey sapmasını sağlar.

ÖZET

Elektrik yükleri aşağıdaki önemli özelliklere sahiptir:

- Zıt yükler birbirlerini çekerler, aynı yükler iterler.
- Elektrik yükü korunur.
- Yük kuantumludur, yani, elektron yükünün tam katları olan kesikli yük paketleri şeklinde bulunur.

İletkenler, içlerinde yüklerin serbestçe hareket ettikleri maddelerdir. **Yalıtkanlar**, içlerinde yüklerin serbestçe hareket etmedikleri maddelerdir.

Coulomb yasasına göre, bir q_1 yükünün ikinci bir q_2 yüküne uyguladığı elektrik kuvveti

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.2)$$

dir. Burada r iki yük arasındaki uzaklık, $\hat{\mathbf{r}}$, q_1 den q_2 yönük birim vektördür. Coulomb sabiti denilen k_e sabitinin değeri $k_e = 8,9875 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ dir.

Doğada varlığı bilinen en küçük yük miktarı elektron veya protondaki yüktür, $|e| = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Uzayın bir noktasındaki \mathbf{E} elektrik alanı, o noktaya konulan küçük bir arıtı deneme yüküne etkiyen \mathbf{F}_e elektrik kuvvetinin, deneme yükünün q_0 büyüklüğüne bölümü olarak tanımlanır:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_0} \quad (23.3)$$

Bir q nokta yükünün, yükten r uzaklığında bir noktada oluşturduğu alan

$$\mathbf{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.4)$$

ile verilir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$, yükten sözkonusu noktaya doğru yönelmiş birim vektördür. Elektrik alanı, artı yük için yarıçap boyunca yükten dışarı doğru, eksi yük için ise, radyal olarak yüze doğru yönelir.

Bir nokta yükler topluluğunun elektrik alanı, üstüste binme ilkesi kullanılarak bulunabilir. Yani, bir noktadaki toplam elektrik alanı, bütün yüklerin o noktadaki elektrik alanlarının vektörel toplamıdır:

$$\mathbf{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (23.5)$$

Sürekli bir yük dağılıminin bir noktadaki elektrik alanı

$$\mathbf{E} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.6)$$

dir. Burada dq , yük dağılıminin bir öğesindeki yük, r ise bu öğeden ilgilenilen noktaya olan uzaklıktır.

Elektrik alan çizgileri uzayın herhangi bir bölgesinde elektrik alanını betirirler. Alan çizgilerine dik birim yüzeyden geçen çizgi sayısı, o bölgedeki \mathbf{E} nin büyüklüğüyle orantılıdır.

Bir \mathbf{E} elektrik alanında hareket eden m küteli, q yüklü bir parçacığın ivmesi:

$$\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m} \quad (23.7)$$

Problem Çözümünde İpuçları

Elektrik Alanının Bulunması

- Birimler:** k_e ($= 1/4\pi\epsilon_0$) Coulomb sabitinin kullanıldığı hesaplarda, yükler coulomb, uzunluklar metre olmalıdır.
- Nokta yüklerin elektrik alanının hesabı:** Verilen bir noktadaki toplam elektrik alanını bulmak için, önce her bir yükün bu noktada oluşturduğu elektrik alanlarını hesaplayınız. Bu noktadaki bireke alan her bir yükün oluşturduğu alanların vektörel toplamıdır.
- Sürekli yük dağılımları:** Sürekli yük dağılıminin işe karıştığı problemlerle karşılaşıldığında, bir noktadaki toplam elektrik alanını hesaplamakta kullanılan vektor toplamlarının yerini vektor integralleri almaları gerekmektedir. Yük dağılımı sonsuz küçük parçalara ayrılır ve vektor toplamı, bütün yük dağılımı üzerinden integral alınarak gerçekleştirilir. 23.7 den 23.9 a kadar olan örnekleri yeniden gözden geçirmelisiniz.
- Simetri:** Ister bir nokta yükler dağılımı, isterse sürekli bir yük dağılımı olsun hesapları basitleştirmek için sistemdeki simetriinden yararlanınız.

SORULAR

- Kuru günlerde elbisenizi karanlıkta çıkarırken kivilim çıktıığını görür (ya da duyarsınız). Açılayınız.
- Yüklerin neden çoğunlukla elektronlarca taşındığını atomik bakış açısından açıklayınız.
- Sürtmeye bir balon eksi yüklenir ve sonra duvara tutu-

- nur. Bu, duvarın artı yüklü olduğu anlamına mı gelir? Sonunda balon neden düşer?
- Bir iple asılmış yüksüz hafif bir metal küre, yüklü lâstik bir çubuğa doğru çekilmiştir. Küre çubuğa değdiğten sonra çubuk tarafından itilir. Açılayınız.

5. Nötr bir atomla ne demek istendiğini açıklayınız.
6. Kurutucudan çıkarılan bazı çamaşırlar neden birbirlerine ve bedeninize yapışırlar?
7. Yalıtılmış bir taburede oturan bir kimsenin elinde tuttuğu topraktan yalıtılmış büyük bir metal küre bir elektrostatik üreteçle yükleniyor. Bunun böyle yapılması neden güvenlidir? Yüklenikten sonra başka bir kimsenin küreye dokunması neden emniyetli olamaz?
8. Newton'un $F_g = Gm_1m_2/r^2$ kütle-çekim yasasıyla, $F_e = k_e q_1q_2/r^2$ Coulomb yasası arasındaki benzerlikler ve farklar nelerdir?
9. Birisi insanların yere kütleçekimiyle değil de, elektrik kuvvetleriyle bağlandığını belirten bir kuram öne süsse, bunun yanlış olduğunu nasıl kanıtlarsınız?
10. Bir elektrik alanını bir kütleçekim alanından deneyel olarak nasıl ayırt edersiniz?
11. Elektron artı, proton eksı yüklenmiş olsaydı yaşam farklı olur muydu? İşaret seçiminin fiziksel ve kimyasal etkileşimlerle bir ilgisi var mıdır? Açıklayınız.
12. Elektrik alanı tanımlanırken deneme yükünün çok küçük olduğunu (yani, $q \rightarrow 0$ için \mathbf{F}_e/q nun limitini almayı) belirtmeye neden gerek duyulur?
13. a yarıçaplı yüklü iki küre arasında $r > 2a$ uzaklığa bulunmaktadır. Kürelerin herbirine etkiyen kuvvet Coulomb yasasıyla verilebilir mi? Açıklayınız. (Yol gösterme: Kütle çekimiyle ilgili olarak Bölüm 14'e bakınız.)
14. Bir yük dağılımı için nokta yük yaklaşımı yapmak ne zaman geçerlidir?
15. Boş uzayda elektrik alanı var olabilir mi? Açıklayınız.
16. Elektrik alan çizgilerinin birbirlerini hiç bir zaman neden kesmeyeceklerini açıklayınız. (İpucu: \mathbf{E} nin her noktada tek bir doğrultusu olmalıdır.)
17. Bir serbest elektronla, bir serbest proton aynı elektrik alanına konulduklarında, parçacıklara etkiyen elektrik kuvvetlerini ve ivmelerini karşılaştırınız.
18. r nin sıfır gitmesi durumunda bir nokta yükün elektrik alan büyüklüğünü ne olduğunu açıklayınız.
19. Eksi bir yük, elektrik alanının düşey doğrultuda yukarı yönlenmiş olduğu bir uzay bölgесine konuluyor. Bu yüze etkiyen elektrik kuvveti hangi doğrultudadır?
20. Bir $4q$ yükü, bir $-q$ yükünden r uzaklığındadır. $4q$ yükünden çıkan elektrik alan çizgileri sayısını, $-q$ yüküne girenlerinkiyle karşılaştırınız.
21. Şekil 23.23 te $+2q$ yükünden çıkan fazlalık alan çizgisi nerede son bulurlar?
22. Aralarında d uzaklığı bulunan eşit iki nokta yük ele alınsın. Üçüncü bir deneme yüküne hangi noktada (∞ dışında) etkiyen net kuvvet sıfırdır?
23. Şekil 23.17 deki artı yüklü halka yakınındaki P noktasına, bir $-q$ nokta yükü konuluyor. $x \ll a$ ise, durgun halden serbest bırakılan nokta yükün hareketini anlatınız.
24. Doğrusal, yüzeysel ve hacimsel yük yoğunlukları arasındaki farkları açıklayınız ve kullanılmalarına örnekler veriniz.
25. Şekil 23.25 deki elektron, elektrik alanı, \mathbf{E} ile bir açı yapacak biçimde, herhangi bir v_i hızıyla atıldığından yörüngeyi yine parabol mu olur? Açıklayınız.
26. Bilindiği üzere, bazı durumlarda yakınlarında toprağa yıldırım düşmesi sırasında insanların elbiselerinin parçalandığı gözlenmiştir. Bunun niçin olabileceği açıklayınız.
27. Bir televizyon anteninin metal destek çubuğu topraklama teli neden bağlanmalıdır?
28. İnce bir aluminyum yaprak bir tahta çubuga sarılıyor. Artı yüklü bir çubuk yaprağa yaklaştırıldığında yaprağın iki parçası birbirinden ayrılr. Niçin? Yaprakta ne tür bir yük bulunmaktadır?
29. Bir cismi sürtmeyele nemli bir günde elektrikle yüklemek, kuru gündekinden neden daha zordur?

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Klavuzu*'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/simbolik problem çifti

Kesim 23.1 Elektrik Yüklerinin Özellikleri

Kesim 23.2 Yalıtkanlar ve İletkenler

Kesim 23.3 Coulomb Yasası

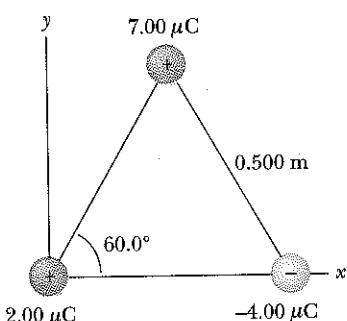
1. (a) 10 g küteli elektrikçe nötr gümüş küçük bir toplu iğnedeği elektronların sayısını hesap ediniz. Bir gümüş atomunda 47 elektron bulunmaktadır ve molar kütlesi 107,87 g/mol dır. (b) İğneye, net yük 1 mC oluncaya dek elektronlar katılmaktadır. İğnede başlangıçta bulunan her 10^9 elektrona karşılık kaç elektron eklenmiştir?
2. (a) Bir molekülden iki proton birbirinden $3,80 \times 10^{-10}$ m uzaktadırlar. Protonlardan birinin ötekisine uyguladığı elektrik kuvveti bulunuz.
 (b) Bu kuvvetin büyüklüğü iki proton arasındaki

kütleçekim kuvetine göre nedir? (c) Bu iki parçacık arasındaki kütleçekim kuvvetinin büyüklükçe elektrik kuvetine eşit olması için parçacığın yükünün kütlesine oranı ne olmalıdır?

- WEB** 3. Richard Feynman bir keresinde, birbirinden kol uzaklığında duran, üzerinde protonlara göre %1 elektron fazlalığı bulunan iki kişi arasındaki itme kuvvetinin dünya ağırlığında bir cismi kaldırmaya yeterli olacağını söylemişti. Bu savı doğrulamak için büyülük mertebe hesabını yapınız.
4. Kütleleri 10,0 g olan gümüş iki küçük küre arasındaki uzaklık 1,00 m dir. Küreler arasında $1,00 \times 10^4$ N (yaklaşık bir ton) luk bir çekim kuvveti oluşturmak için kürelerin birinden diğerine aktarılması gereken

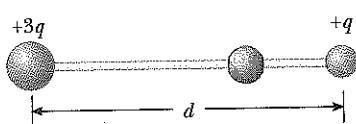
elektron yüzdesini hesaplayınız. (Bir gümüş atomunun elektron sayısı 47 dir. Bir gramdaki atom sayısı, Avogadro sayısının gümüşün molar kütlesine $107,87 \text{ g/mol}$ bölümdür).

5. 1,00 g hidrojenin elektron ve protonlara ayrıldığı varsayılsın. Protonların dünyanın kuzey, elektronların ise güney kutbuna konuldukları düşünülsün. Dünya üzerinde ortaya çıkacak olan, sıkıştırma kuvveti ne kadardır?
6. Özdeş küçük iki iletken küre merkezi arasındaki uzaklık 0,3 m'dir. Küreleden birine 12 nC ötekisine -18 nC yük veriliyor. (a) Kürelerden birinin ötekine uyguladığı elektrik kuvvetini bulunuz, (b) Küreler iletken bir telle bağlanıyor. Denge kurulduktan sonra küreler arasındaki elektrik kuvvetini bulunuz.
7. Şekil 23.27 deki gibi, üç nokta yük bir eşkenar üçgenin köşelerinde bulunuyor. $7 \mu\text{C}$ luk yük üzerindeki net elektrik kuvvetini hesaplayınız.



Şekil P23.7 Problem 7 ve 15

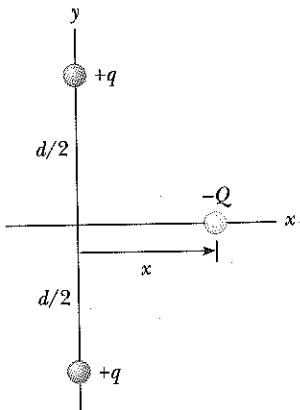
8. Başlangıç noktasından $x = d$ noktasına dek uzanan yatay yalıtkan bir çubukun uclarında artı $3q$ ve q yükülü iki küçük boncuk bulunuyor, Şekil 23.8. Küçük yüklü üçüncü bir boncuk çubuk üzerinde serbestçe kayabiliyor. Denge halinde üçüncü yükün yerini bulunuz. Kararlı bir şekilde dengede kalabilir mi?



Şekil P23.8

9. **Tarama Problemi.** Bohr hidrojen atomu kuramında bir elektron bir proton çevresinde $0,529 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ yarıçaplı dairesel bir yörüngede dolanır. (a) Elektron ve proton arasındaki elektrik kuvveti bulunuz. (b) Bu kuvvet elektronun merkezcil ivmesini sağlıyorsa elektronun hızı ne kadardır?

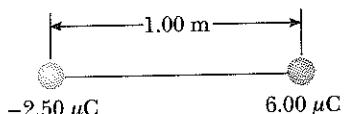
10. **Tarama Problemi.** $+q$ yüklü iki özdeş nokta yük uzayda d aralıklarla sabitlenmiştir. m kütleli üçüncü bir $-Q$ noktası yükü, iki sabit yükün ortadıkmesi üzereinde orta noktasından x uzaklığında durmakta olup serbestçe hareket edebilmektedir (Şekil P23.10). (a) x , d 'ye göre küçük olduğunda $-Q$ 'nın ortadıkme üzerinde basit harmonik hareket yapacağını gösteriniz. Bu hareketin periyodunu bulunuz. (b) $-Q$ yükü, orta noktadan $a \ll d$ uzaklığında serbest bırakıldığında, iki sabit yükün orta noktasına ulaşınca hızı ne olur?



Şekil P23.10

Kesim 23.4 Elektrik Alanı

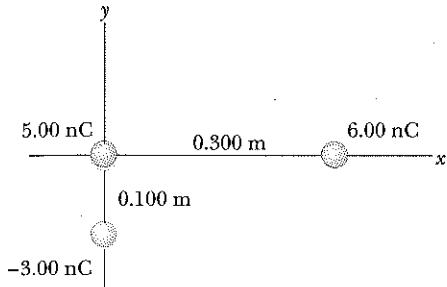
11. (a) Bir elektron ve (b) bir protonun ağırlığını dengeleyecek elektrik alanının büyüklük ve doğrultusunu bulunuz. (Tablo 23.1 deki verileri kullanınız.)
12. Net yükü $24,0 \mu\text{C}$ olan bir cisim, düşey doğrultudaki 610 N/C luk düzgün bir elektrik alanına konuluyor. Bu cisim, bu elektrik alanında “askıda kalırsın” kütlesi ne kadardır?
13. Şekil P23.13'de elektrik alanın sıfır olduğu (sonsuz dışında) noktayı bulunuz.



Şekil P23.13

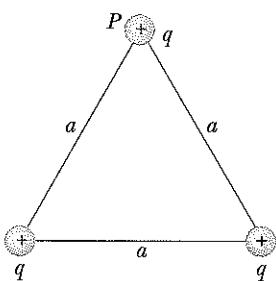
14. Bir uçak 2000 m yükseklikteki bir fırtına bulutu içinde geçmektedir. (Hava akımı, girdap ve olası bir elektrik boşalması nedeniyle bunun yapılması çok tehliklidir.) Bulut içinde 3000 m de $+40^\circ\text{C}$ luk, 1000 m de ise -40°C luk bir yük toplanması varsa, uçağın bulunduğu yerdeki E elektrik alanı ne kadardır?

15. Şekil 23.17 deki gibi, üç yük bir eşkenar üçgenin köşelerindedir. (a) $2 \mu\text{C}$ luk yükün konumunda, $7 \mu\text{C}$ ve $-4 \mu\text{C}$ luk yüklerden ileri gelen elektrik alanını hesaplayınız. (b) (a) da bulduğunuz cevabı kullanarak $2\mu\text{C}$ 'luk yükle uygulanan kuvveti hesaplayınız
16. Üç nokta yük Şekil P23.16'daki gibi düzenlenmişlerdir. (a) 6nC ve -3nC yüklerinin birlikte başlangıç noktasında oluşturdukları elektrik alan vektörünü bulunuz. (b) 5nC yüküne etkiyen vektör kuvvetini bulunuz.



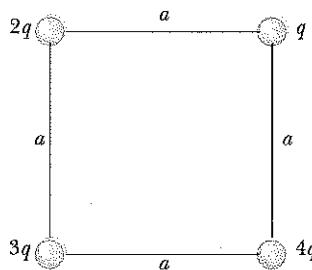
Şekil P23.16

17. Şekil 23.17 deki gibi, üç eşit artı q yükü, a kenarlı bir eşkenar üçgenin köşelerindedir. (a) Elektrik alanının üç yükün oluşturduğu varsayıldığında elektrik alanın sıfır olduğu (sonsuz dışında) noktayı bulunuz (İpucu: Alan çizgilerini yükler düzleminde çiziniz). (b) P noktasında, üçgenin iki taban yükünden ileri gelen elektrik alanının büyüklük ve doğrultusu nedir?



Şekil P23.17

18. $2,00 \mu\text{C}$ luk iki nokta yük x ekseninde bulunmaktadır. Bunlardan birisi $x = 1,00 \text{ m}$ de, ötekisi ise $x = -1,00 \text{ m}$ dedir. (a) y ekseninde $y = 0,500 \text{ m}$ de elektrik alanını bulunuz. (b) y ekseninde $y = 0,500 \text{ m}$ ye konulan $-3,00 \mu\text{C}$ luk yükle etkiyen elektrik kuvvetini hesaplayınız.
19. Dört nokta yük Şekil P23.19'daki gibi a kenarlı bir karenin köşelerindedir. (a) q yükünün konumundaki elektrik alanının doğrultu ve büyütüğünü bulunuz. (b) q ya etkiyen bileşke kuvvet ne kadardır? (c) q yükülü noktalı bir parçacık xy düzleminde (x_0, y_0) noktasında bulunuyor. Bu q yükünün (x, y) noktasında bulunuyor. Bu q yükünün (x, y) noktasında bulunuyor.



Şekil P23.19

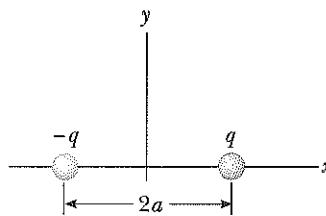
sında oluşturduğu elektrik alanının x ve y bileşenlerinin

$$E_x = \frac{k_e q(x - x_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{3/2}}$$

$$E_y = \frac{k_e q(y - y_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{3/2}}$$

olduğunu gösteriniz.

21. Şekil P23.21'deki elektrik dipolü göz önüne alınsın. x ekseninde uzak bir noktada elektrik alanının $E_x \equiv 4k_e qa/x^3$ olduğunu gösteriniz.



Şekil P23.21

22. Q/n yükünde n eşit artı noktalı yükün R yarıçaplı bir daire çevresine yerleştirildiği düşünülsün. (a) Daire merkezinden geçen daire düzlemine dik doğru üzerinde daire merkezinden x uzaklığındaki bir noktada elektrik alanının E büyütüğünü hesaplayınız. (b) Bu sonucun Örnek 23.8'de bulunanla aynı olmasının nedenini açıklayınız.

23. x ekseninde üzerinde başlangıç noktasından $a, 2a, 3a, 4a, \dots$ uzaklıklarında bulunan sonsuz sayıda özdeş q yükü göz önüne alınsın. Bu yük dağılımının başlangıç noktasında oluşturduğu elektrik alanı ne kadardir? (İpucu: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$)

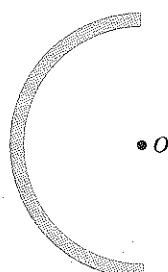
$$1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \dots = \frac{\pi^2}{6}$$

olmasından yararlanınız.

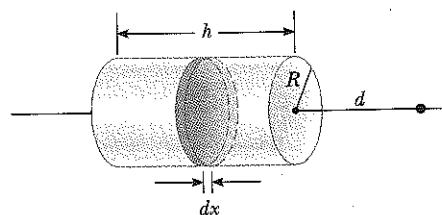
Kesim 23.5 Sürekli Bir Yük Dağılımının Elektrik Alanı

24. 14 cm uzunluğunda düzgün yüklü bir çubukun toplam yükü $-22 \mu\text{C}$ dur. Çubuk ekseninde, çubukun merkezinden 36 cm uzaklıkta elektrik alanının büyütük ve doğrultusunu bulunuz.

25. Sürekli doğrusal bir yük x eksenin boyunca $x = +x_0$ dan artı sonsuza kadar uzanmaktadır. Bu doğrusal (çizgisel) yük, düzgün dağılımlı olup doğrusal yük yoğunluğu λ_0 dir. Elektrik alanının başlangıç noktasındaki büyülüklüğü ve doğrultusu nedir?
26. Çizgisel bir yük, $x = +x_0$ dan artı sonsuza kadar uzanmaktadır. Çizgisel yük yoğunluğu $\mu = \lambda_0 x_0 / x$ ise, başlangıç noktasındaki elektrik alanını bulunuz.
27. Düzgün yüklü 10,0 cm yarıçaplı bir halkanın toplam yükü $75,0 \mu\text{C}$ dur. Halka ekseninde, halka merkezinden (a) 1,00 cm, (b) 5,00 cm, (c) 30,0 cm ve (d) 100 cm uzaktaki elektrik alanını bulunuz.
28. Düzgün yüklü bir halkanın ekseninde en büyük alan şiddetinin $x = a/\sqrt{2}$ de (bakınız Şek. 23.17) $Q/(6\sqrt{3}\pi\epsilon_0 a^2)$ değerinde olduğunu gösteriniz.
29. 35,0 cm yarıçaplı düzgün yüklü bir diskin yüzey yük yoğunluğu $7,90 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$ dir. Disk ekseninde disk merkezinden (a) 5,00 cm, (b) 10,0 cm, (c) 50,0 cm ve (d) 200 cm uzaklıktaki elektrik alanını hesaplayınız.
30. Düzgün yüklü bir diskin eksenindeki bir noktada elektrik alanının tam ifadesi Örnek 23.9 da çıkarılmıştır. $+5,20 \mu\text{C}$ luk yükün düzgün dağıldığı $R = 3,00 \text{ cm}$ yarıçaplı bir disk ele alınır. (a) Örnek 23.9 sonucunu kullanarak ekseninde, merkezden 3,00 mm uzakta bir noktadaki elektrik alanını hesaplayınız. Bu sonucu $E = \sigma/2\epsilon_0$ yakalanan yaklaşılığından hesaplanan alana karşılaşırız. (b) Örnek 23.9 sonucunu kullanarak, eksen üzerinde disk merkezinden 30,0 cm uzaklıktaki bir noktada elektrik alanını hesaplayınız. Bunu, disk 30 cm uzakta $+5,20 \mu\text{C}$ luk nokta bir yük gibi alarak elde edilen elektrik alanıyla karşılaştırınız.
31. Yarıçaplı Q yüklü, düzgün yük dağılımlı bir diskin eksen üzerindeki elektrik alanı Örnek 23.9 da hesaplandı. Elektrik alanının, R ye göre büyük x uzaklıklarında bir $Q = \sigma\pi R^2$ nokta yükününe yaklaşığını gösteriniz. (İpucu: Önce $x/(x^2 + R^2)^{1/2} = (1 + R^2/x^2)^{-1/2}$ olduğunu gösteriniz ve $\delta \ll 1$ için $(1 + \delta)^n \approx 1 + n\delta$ binom açılımını kullanınız.)
32. m küteli bir yahtkan köpük (styrofoam) parçasının net yükü $-q$ dur. Bu köpük parçası, düzgün yüzey yüklü, büyükçe bir yatay plastik tabakanın merkezi üzerinde havada asılı kalmaktadır. Plastik tabakanın yüzeyce yük yoğunluğu ne kadardır?
- WEB 33. 14,0 cm uzunluğunda düzgün yüklü yahtkan bir çubuk, Şekil P23.33 deki gibi yarımdaire şeklinde bükülüyor. Çubuğu toplam yükü $-7,50 \mu\text{C}$ ise yarımdairenin O merkezinde elektrik alanın büyülüklük ve doğrultusunu bulunuz.
34. (a) Yarıçapı R , yüksekliği h , toplam yükü Q olan dairesel dik bir silindir tabakası düzgün yüklü olsun. Şekil P23.34'teki gibi silindirin sağ yanından d uzaklığındaki bir noktada elektrik alanını bulunuz. (İpucu: Örnek 23.8'in sonucunu kullanarak silindiri halka yüklerden oluşmuş gibi düşününüz.) (b) Aynı bo-



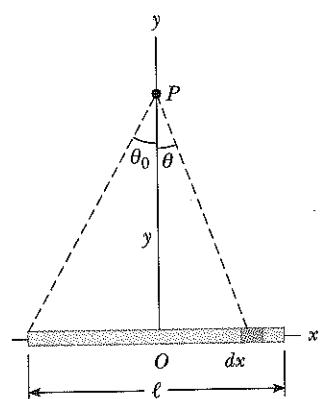
Şekil P23.33



Şekil P23.34

yutlarda aynı yükü hacmine düzgün olarak dağılmış içi dolu bir silindir göz önüne alınır. Örnek 23.9'un sonucunu kullanarak aynı noktada oluşturduğu alanı bulunuz.

35. Boyca düzgün yük yoğunluğu λ olan ℓ uzunluklu ince bir çubuk Şekil P23.35'deki x eksenini üzerindedir. (a) Çubüğün ortadıkmesinde çubuktan y uzaklığında P deki elektrik alanının x bileşeninin olmadığını ve $E = 2k_\lambda \sin\theta_0/y$ ile verildiğini gösteriniz. (b) (a) şıklında bulunan sonucu kullanarak sonsuz uzunluklu bir çubüğün alanının $E = 2k_\lambda/y$ olduğunu gösteriniz. (İpucu: Önce, λdx yükü olan dx uzunlığında bir ögeden ileri gelen P deki alanı hesaplayınız. Sonra $x = y \tan\theta$ ve $dx = y \sec^2\theta d\theta$ den yararlanarak, x yerine θ üzerinden integral alınır.)

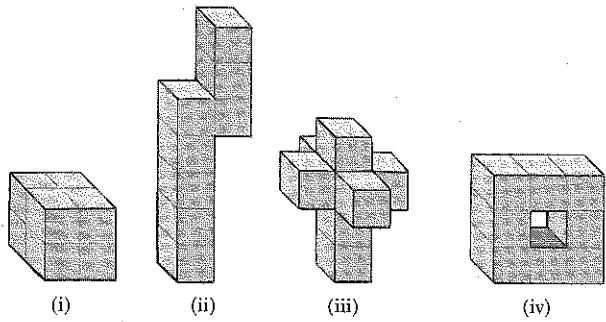


Şekil P23.35

36. 2,50 cm yarıçaplı ve 6 cm uzunluklu dolu üç plastik silindirden, biri (a) yüzeyinin her yerinde 15 nC/m^2

lik düzgün yük yoğunluğunu, ikincisi (b) aynı düzgün yük yoğunluğunu bükülmüş yanal yüzeyinde, üçüncüsü (c) plastiğin her yerinde 500 nC/m^3 'lük düzgün yük yoğunluğu bulunduruyor. Her silindirin yükünü bulunuz.

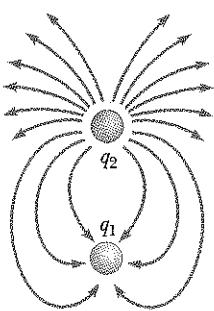
37. 3 cm kenar uzunluklu sekiz dolu plastik küp Şekil P23.37'deki (i, ii, iii, iv) cisimlerini oluşturmak üzere birbirlerine yapıştırıyorlar. (a) Cisimlerin düzgün hacimsel yük yoğunluğu 400 nC/m^3 ise, cisimlerin her birinde yük ne kadardır? (b) Cisimlerin açıkta bulunan yüzeylerinde düzgün yüzeysel yük yoğunluğu $15,0 \text{ nC/m}^2$ ise, cisimlerin her birinde yük ne kadardır? (c) Dik yüzlerin birleştiği kenarlarda düzgün boyca yük yoğunluğu $80,0 \text{ pC/m}$ ise cisimlerin her birinde yük ne kadardır?



Şekil P23.37

Kesim 23.6 Elektrik Alan Çizgileri

38. Artı yüklü bir diskin birim alan başına yüzeyel yük yoğunluğu, Örnek 23.9 da belirtildiği gibi düzgündür. Elektrik alan çizgilerini diskin merkezinden geçen ve disk düzlemine dik olan bir düzlemede çiziniz.
 39. Düzgün boyca yük yoğunluğu olan sonlu büyülükteki eksiz yüklü bir çubugün elektrik alan çizgilerini çubuğu içeren bir düzlemede çiziniz.
 40. Şekil 23.40 da aralarında küçük bir uzaklık bulunan iki nokta yükün elektrik alan çizgileri görülmektedir. (a) q_1/q_2 oranını bulunuz. (b) q_1 ve q_2 nin işaretlerini bulunuz.

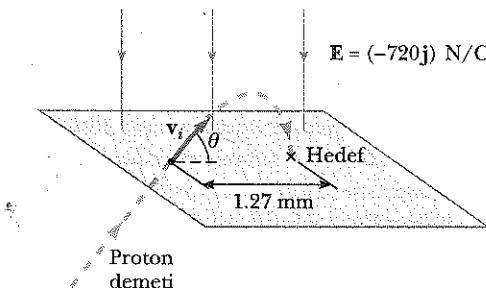


Şekil P23.40

Kesim 23.7 Yüklü Parçacıkların Düzgün Bir Elektrik Alanında Hareketi

Bir elektron ile bir proton 520 N/C luk bir elektrik alanına durgun olarak konuluyorlar. Herbirinin serbest bırakıldıkten 48 nano saniye sonraki hızını hesaplayınız.

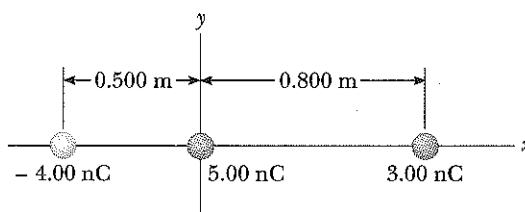
42. Bir proton $\mathbf{E} = -6 \times 10^5 \text{ N/C}$ luk düzgün bir elektrik alan bölgесine artı x doğrultusunda fırlatılıyor. Proton duruncaya dek 7 cm gidiyor. (a) protonun ivmesini (b) ilk hızını ve (c) proton duruncaya kadar geçen süreyi bulunuz.
 43. Bir proton 640 N/C luk düzgün bir elektrik alanında durgun halden hızlanıyor. Bir süre sonra hızı $1,20 \times 10^6 \text{ m/s}$ oluyor (ışığın hızından çok az olduğu için göreceli değildir). (a) Protonun ivmesini bulunuz. (b) Protonun bu hızza ulaşması için ne kadar süre geçmiştir? (c) Bu sürede ne kadar yol almıştır? (d) Bu süre sonunda kinetik enerjisi ne kadardır?
 44. Bir parçacık demetindeki elektronların her birinin kinetik enerjisi $1,60 \times 10^{-17} \text{ J}$ dır. Bu elektronları $10,0 \text{ cm}$ lik bir uzaklıkta durduracak olan elektrik alanının büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.
 WEB 45. Bir parçacık demetinin elektronlarının her birinin kinetik enerjisi K dir. Bu elektronları bir d uzaklığında durdurulan elektrik alanının büyüklük ve doğrultusu nedir?
 46. $1,0 \text{ g}$ küteli artı yüklü bir boncuk, $1,00 \times 10^4 \text{ N/C}$ luk düzgün düşey bir elektrik alanında boşlukta $5,00 \text{ m}$ yükseklikten durgun halden düşüyor. Boncuk yere $21,0 \text{ m/s}$ hızla çarpıyor. (a) elektrik alanın (yükari ya da aşağı doğru) doğrultusunu ve (b) boncuktaki yükü bulunuz.
 47. Bir proton yatay doğrultuda $4,50 \times 10^5 \text{ m/s}$ lik bir hızla, düşey doğrultulu $9,60 \times 10^3 \text{ N/C}$ luk düzgün bir elektrik alanına giriyor. Kütle çekimsel etkileri önemsemeyerek, (a) protonun yatay olarak $5,00 \text{ cm}$ yol alması için geçen süreyi, (b) protonun, yatay olarak $5,00 \text{ cm}$ yol alması durumunda düşey yerdeğitirmesini, ve (c) protonun yatay olarak $5,00 \text{ cm}$ yol aldığı durumda hızının yatay ve düşey bileşenlerini bulunuz.
 48. Bir elektron, $\mathbf{E} = 390 \text{ J/N/C}$ luk bir elektrik alan bölgесine yatay üzerinde 30° lik bir açıyla $8,2 \times 10^5 \text{ m/s}$ hızla fırlatılıyor. Kütle çekimsel etkilerini önemsemeyerek (a) elektronun ilk atıldığı yüksekliğe geri dönmesi için geçen süreyi, (b) elektronun ulaşabildiği en büyük yüksekliği ve (c) en büyük yüksekliğe ulaşlığında yatay yerdeğitirmesini bulunuz.
 49. Şekil P23.49 dağı gibi, protonlar düzgün bir $\mathbf{E} = -720 \text{ J/N/C}$ elektrik alan bölgесine $v_i = 9,55 \times 10^3 \text{ m/s}$ ilk hızıyla fırlatılıyorlar. Protonların fırlatıldıkları noktadan yatay olarak $1,27 \text{ mm}$ uzaklığındaki bir hedefi vurmaları bekleniyor. (a) Vuruşun sağlanacağı iki θ atış açısını ve (b) her iki atış için vuruşa kadar geçen süreyi bulunuz.



Şekil P23.49

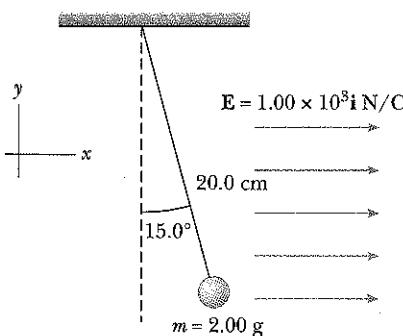
EK PROBLEMLER

50. Şekil P23.50’deki üç nokta yük x ekseni boyunca dizilmişlerdir. (a) $(2; 0)$ ve (b) $(0; 2)$ konumlarındaki elektrik alanlarını bulunuz.



Şekil P23.50

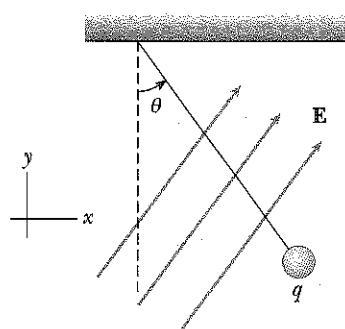
51. 4,00 cm aralıklı paralel iki tabaka arasında 640 N/C ’luk düzgün bir elektrik alanı bulunuyor. Aynı anda artı tabakadan bir proton, eksi tabakadan bir elektron serbest bırakılıyor. (a) Bu iki yükün birbirlerini geçtikleri noktanın artı tabakaya uzaklığını bulunuz (Proton ve elektron arasındaki elektriksel çekimi önemsemeyiniz) (b) (Na^+) ve (Cl^-) iyonları için (a) yi yineleyiniz.
 52. Şekil P23.2 deki gibi, 2,00 g lik plastik küçük bir top 20,0 cm uzunluğunda bir iple düzgün bir elektrik alanında asılıyor. Top, ipin düşeyle 15.0° lik bir açı yapması durumunda dengede ise, topta ne kadar net yük vardır?



Şekil P23.52

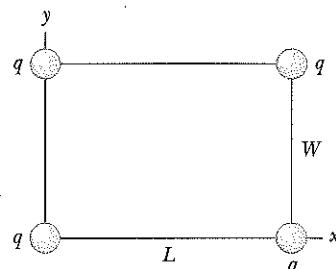
WEB 53. Şekil P23.53 deki gibi $1,00 \text{ g}$ lik yükli bir mantar top ince bir iplikle düzgün bir elektrik alanının bulunduğu bir bölgede asılıyor. $E = (3,00\text{i} + 5,00\text{j}) \times 10^5 \text{ N/C}$ olduğunda top $\theta = 37,0^\circ$ de dengede kalıyor.

- (a) toptaki yükü ve (b) iplikteki gerilmeyi bulunuz.
 54. Şekil P23.53 gibi m kütleyeli yükli bir mantar top ince bir iplikle düzgün bir elektrik alanında asılıdır. A ve B artı sayılar olmak üzere $E = (Ai + Bj) \text{ N/C}$ olduğunda top θ açısında dengededir. (a) toptaki yükü ve (b) iplikteki gerilmeyi bulunuz.



Şekil P23.53 Problem 53 ve 54

55. Şekil P23.55’teki gibi özdeş dört nokta yük ($q = +10,0 \mu\text{C}$) dikdörtgenin köşelerine konulmuştur. Dikdörtgenin boyutları $L = 60,0 \text{ cm}$ ve $W = 15,0 \text{ cm}$ ’dir. Sol alt köşedeki yüke öteki üç yükün uyguladığı net elektrik kuvvetinin büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.

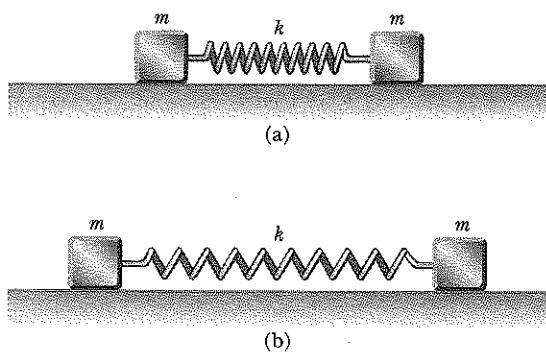


Şekil P23.55

56. Özdeş üç küçük köpük topu (styrofoam) ($m = 2,00 \text{ g}$), kütlesi önemsenmeyecek 50 cm uzunluklu iletken olmayan üç iplikle sabit bir noktaya asılıyorlar. Dengede iken bu üç top, 30 cm kenar uzunluklu bir eş-

kenar üçgen oluşturuyor. Her bir toptaki aynı miktarda olan q yükünü bulunuz.

57. Şekil P23.57a'daki gibi sürtünmesiz yatay bir yüzey üzerinde duran özdeş iki metal parçası, gerilmemiş uzunluğu $0,3\text{ m}$ ve yay sabiti $k = 100\text{ N/m}$ olan hafif metal bir yayla birbirlerine bağlıdır. Sisteme yavaşça Q toplam yükü verildiğinde, yay Şekil P23.57b'deki gibi $0,4\text{ m}$ denge uzunluğuna geriliyor. Tüm yükün metal parçalarda bulunduğuunu ve bu yüklerin de nokta yük gibi olduğunu varsayıarak Q 'nın değerini bulunuz.
58. Şekil P23.57a'daki gibi sürtünmesiz yatay bir yüzey üzerinde duran özdeş iki metal parçası, gerilmemiş uzunluğu L , ve yay sabiti k olan hafif metal bir yayla birbirlerine bağlıdır. Sisteme yavaşça bir Q toplam yükü verildiğinde yay Şekil P23.57b'deki gibi L denge uzunluğuna geriliyor. Tüm yükün metal parçalarda bulunduğuunu ve bu yüklerin de nokta yük gibi olduğunu varsayıarak Q 'nın değerini bulunuz.



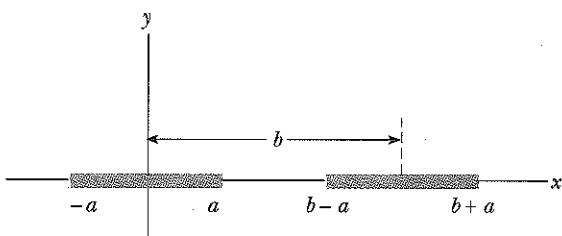
Şekil P23.57 Problem 57 ve 58.

59. $2a$ uzunluğunda özdeş ince çubuklar boyalarına düzgün olarak dağılmış eşit $+Q$ yükleri vardır. Çubuklar x eksenin boyunca merkezleri $b > 2a$ olacak şekilde birbirinden ayrılmışlardır (Şekil 23.59). Soldaki çubuğun sağdaki çubuğa uyguladığı kuvvetin büyüklüğünün

$$F = \left(\frac{k_e Q^2}{4a^2} \right) \ln \left(\frac{b^2}{b^2 - 4a^2} \right)$$

ile verildiğini gösteriniz.

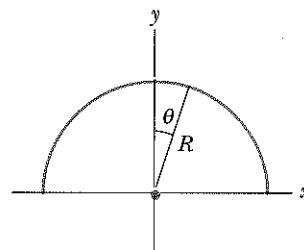
60. Bir parçacığın hızı, ışık hızının onda birinden ya da $3,00 \cdot 10^7\text{ m/s}'den daha küçük olduğunda göreli olmadığı söylenir. (a) $1,00\text{ N/C}$ 'luk bir elektrik alanında durgun halden harekete geçen bir elektron ne kadar süre göreli olmayacağı? (b) Aynı elektrik alanında bir proton ne kadar süre göresiz kalacaktır? (c) Elektrik alanları çoğu kez 1 N/C 'dan daha$



Şekil P23.59

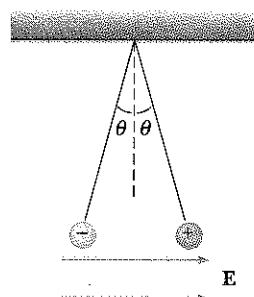
şiddetlidirler. Daha şiddetli bir elektrik alanında yüklü parçacık daha kısa mı yoksa daha uzun süre mi göresiz kalacaktır?

61. Şekil P23.61 deki gibi, artı yüklü bir doğru parçası $R = 60,0\text{ cm}$ yarıçaplı bir yarı daireye dönüştürülmüştür. Yarı daire üzerinde birim uzunluğa düşen yük $\lambda = \lambda_0 \cos \theta$ bağıntısı ile belirtiliyor. Yarı daire üzerindeki toplam yük $12,0\text{ }\mu\text{C}$ dir. Yarı dairenin eğrilik merkezine konulan $3,00\text{ }\mu\text{C}$ luk bir yüze etkilenen toplam kuvveti hesaplayınız.



Şekil P23.61

62. 2 g kütleli iki küçük küre 10 cm uzunluklu ince ipliklerle asılıyorlar (Şek. P23.62). Düzgün bir elektrik alanı x doğrultusunda uygulanıyor. Kürelerin yükleri $-5 \times 10^{-8}\text{ C}$ ve $+5 \times 10^{-8}\text{ C}$ ise, küreleri $\theta = 10^\circ$ açıda dengede tutabilecek elektrik alan şiddetini bulunuz.



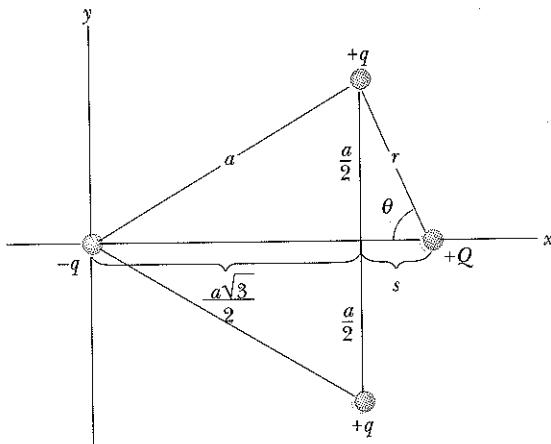
Şekil P23.62

63. m küteli iki küçük küre, ℓ uzunluklu iplerle aynı noktaya asılıyorlar. Kürelerden birinin yükü Q ötekinin $2Q$ dur. İplerin düşeyle yaptıkları θ_1 ve θ_2 açılarının küçük olduğu varsayılsın. (a) θ_1 ve θ_2 birbirlerine nasıl bağlıdır? (b) Küreler arasındaki r uzaklığının

$$r = \left(\frac{4k_e Q^2 \ell}{mg} \right)^{1/3}$$

olduğunu gösteriniz.

64. Aynı büyüklükte üç q yükü eşkenar bir üçgenin köşelerine tutturuluyorlar (Şekil P23.64). Dördüncü bir Q yükü, sabit üç yükün uyguladığı kuvvetlerin etkisiyle artı x ekseni boyunca serbestçe hareket etmektedir. Q nun dengede olduğu konumda s değerini bulunuz.

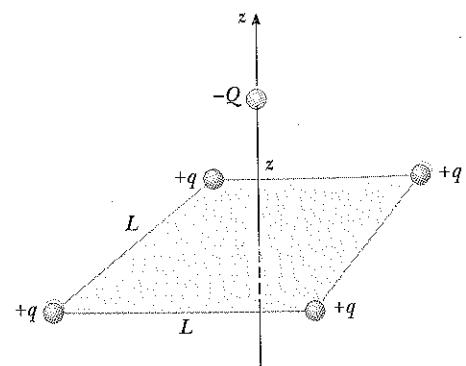


Şekil P23.64

65. **Tarama Problemi.** $+q$ yüklü özdeş dört nokta yük, L kenar uzunluklu bir karenin köşelerine tutturulmuştur. Beşinci bir $-Q$ nokta yükü, karenin merkezinden geçen kare düzlemine dik doğru üzerinde z uzaklığında bulunuyor (Şekil P23.65). (a) $-Q$ ya öteki dört yükün etkidiği kuvvetin

$$\mathbf{F} = -\frac{4k_e q Q z}{\left(z^2 + \frac{L^2}{2}\right)^{3/2}} \mathbf{k}$$

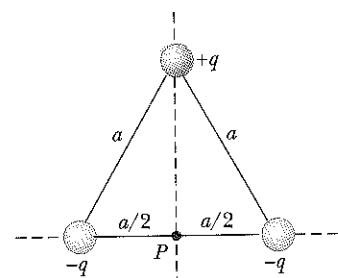
olduğunu gösteriniz. z artı ($-Q$ karenin yukarısında), ya da eksi ($-Q$ karenin altında) olması durumunda bu kuvvet karenin merkezine doğru yönelikdir. z , L 'ye göre küçükse yukarıdaki bağıntı $\mathbf{F} \approx -($ sabit) \mathbf{z} şeklini alır. Bu neden $-Q$ nun hareketinin basit harmonik olması demektir ve $-Q$ nun kütlesi m olsaydı bu hareketin periyodu ne olurdu?



Şekil P23.65

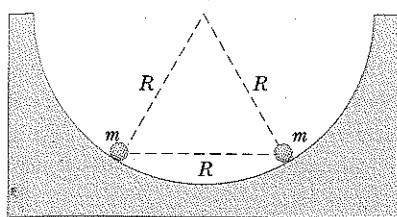
66. **Tarama Problemi.** $2,00 \mu\text{C}$ yüklü $1,00 \text{ g}$ 'lik bir man top, $E = 1,00 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ luk aşağıya doğru yönelik düzgün bir elektrik alanı içinde $0,500 \text{ m}$ uzunluklu düşey ince bir ipe asılıdır. Top düşeyden hafifçe saplırsa bir basit sarkaç gibi salınırlar. (a) Bu salınının periyodunu bulunuz. (b) Kütle çekimi (a) daki heftaba katılmalı mıdır? Açıklayınız.

67. Aynı büyüklükte üç q yükü, a kenar uzunluklu bir eşkenar üçgenin köşelerinde bulunmaktadır (Şekil P23.67). (a) Eksi yükler ortasında P noktasındaki elektrik alanın büyüklük ve doğrultusunu k , q ve a cinsinden bulunuz. (b) P noktasına konulan herhangi bir yükle hiç bir kuvvet etkimemesi için bir $-4q$ yükü nereye konulmalıdır? $+q$ yükü ile P noktası arasındaki uzaklık bir metre olsun.



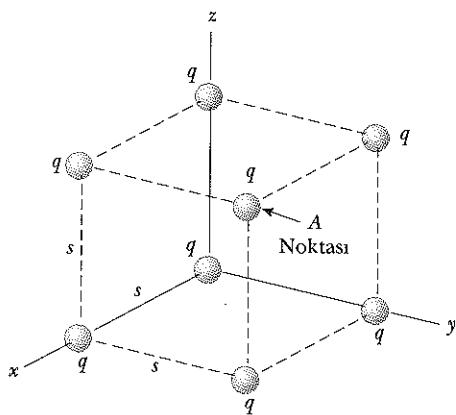
Şekil P23.67

68. m küteli, q yüklü iki özdeş boncuk, sürtünmesiz iletken olmayan duvarlı R yarıçaplı yarıküresel bir çanaga konulduğunda aralarında R uzaklık oluncaya dek hareket ediyorlar (Şekil P23.68). Her bir boncukta q yükü bulunur.



Şekil P23.68

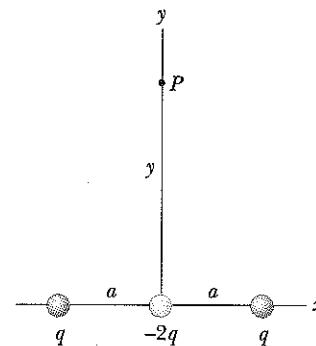
69. Şekil P23.69 daki gibi, q büyüklüğündeki sekiz nokta yük, s kenar uzunluklu bir kübün köşelerine konuluyor. (a) A noktasındaki yükle, öteki yüklerin uyguladığı bileşke kuvvetin x , y , z bileşenlerini bulunuz. (b) Bu bileşke kuvvetin büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.



Şekil P23.69 Problem 69 ve 70

70. Şekil P23.69 daki yük dağılımını ele alınız. (a) Kübün herhangi bir yüzünün merkezinde elektrik alan büyüklüğünün $2,18 \frac{k_e q}{s^2}$ olduğunu gösteriniz. (b) Kübün üst yüzünün merkezindeki elektrik alan doğrultusunu bulunuz.
71. $y = -15,0$ cm doğrusunda $x = 0$ ve $x = 40,0$ cm koordinat noktalar arasında $35,0 \text{ nC/m}$ düzgün yoğunluklu doğrusal bir yük bulunuyor. Bunun başlangıç noktasında oluşturduğu elektrik alanını bulunuz.
- (72.) Şekil P23.72 deki gibi q , $-2q$ ve q nokta yükleri x ekseninde bulunmaktadır. y ekseninde bir P ($y \gg a$) noktasında elektrik alanın

$$\mathbf{E} = -k_e \frac{4qa^2}{y^4} \mathbf{j}$$



Şekil P23.72

olduğunu gösteriniz. Aslında iki elektrik dipolden oluşan bu yük dağılımına *elektrik dörtküplü* (kuadropol) denir. \mathbf{E} nin, dörtküplü için r^{-4} , çiftküplü için r^{-3} ve tekküplü için (bir tek yük) r^{-2} şeklinde değiştiğine dikkat edelim.

- 73. Tarama Problemi:** Örnek 23.8 deki gibi, toplam artı Q yükü düzgün dağılmış bir halkanın merkezine *eksi* yükü q parçası konuluyor. Ancak x ekseni boyunca hareket edebilen parçacık, eksen boyunca küçük bir x uzaklığına ($x \ll a$) götürülüp serbest bırakılıyor. Parçacığın

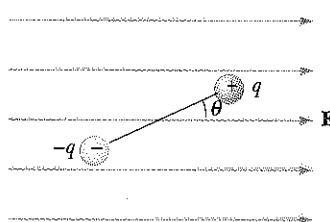
$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_e q Q}{ma^3} \right)^{1/2}$$

frekansıyla basit harmonik hareket yaptığı gösteriniz.

- 74. Tarama Problemi:** Düzgün bir elektrik alanında bir elektrik çiftküplüsü Şekil P23.74 deki gibi, θ küçük olmak üzere, denge konumundan hafifçe ayırmıyor. Çift kutupluğun (dipolin) eylemsizlik momenti I dir. Çiftküplünün bu konumdan serbest bırakılması durumunda, açısal yöneliminin

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2qaE}{I}}$$

frekansıyla basit harmonik hareket yapacağını gösteriniz.

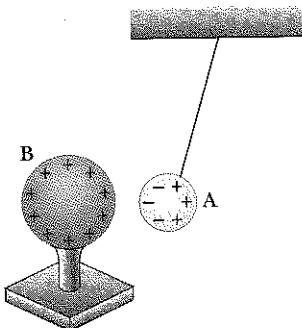


Şekil P23.74

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

23.1 (b) Sürtme sonrası bulunan yük miktarı, sürtme öncesinde bulunan yük miktarı ile aynıdır; yalnızca dğılmı farklıdır.

23.2 (d) A cismi eksi yüklenebilir, fakat aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere etki ile (indüksiyonla) ayrılan yükler nedeniyle aynı zamanda nötr olabilir.



23.3 (b) Newton'un üçüncü yasası uyarınca B cisminin A cismine uyguladığı elektrik kuvveti, A cisminin B cismine uyguladığı kuvvete büyüklükçe eşit önce zittir, yani, $\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$.

23.4 Alanı oluşturan kaynak yükün bizim eylemlerimizle etkilenmediğini varsayırsak hiçbirsey. Elektrik alanının ne $+3 \mu\text{C}$ 'luk yükten, ne de $-3 \mu\text{C}$ 'luk yükten ileri gelmeyip, yalnızca kaynak yükten (bu durumda görülmüyor) ileri geldiğini bileyim.

23.5 A, B ve C Alan çizgileri birbirlerine en yakın olduğundan A noktasında alan en büyütür. C noktasında alan çizgilerinin olmayışı elektrik alanının orada sıfır olduğunu gösterir.



SİZCE NASIL?

Bazı demiryolu şirketleri yolcu tren pencerelerini çok ince metal tabaka ile kaplamayı düşünürler. (Kaplama içeriğinden görülecek kadar incedir). Bunu başkalarının cep telefonunda yüksek sesle konuşmalarından rahatsızlık duyan yolcuların şikayetlerini karşılamak için yapıyorlar. Birkaç yüz nanometre kalınlıkta bir metal kaplama bu sorunu nasıl gidebilir? (Arthur Tilley/FPG International)

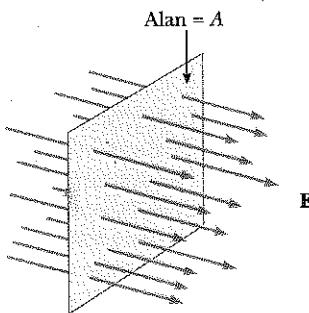
b ö / ü m

Gauss Yasası

24

Bölüm İçeriği

- 24.1 Elektrik Akısı
- 24.2 Gauss Yasası
- 24.3 Gauss Yasasının Yüklü Yalıtkanlara Uygulanması
- 24.4 Elektrostatik Dengedeki İletkenler
- 24.5 (Seçmeli) Gauss Yasası ve Coulomb Yasasının Deneysel Doğrulanması
- 24.6 (Seçmeli) Gauss Yasasının Çıkarılışı



Şekil 24.1 Alana dik A yüzölçümü bir düzlemden geçen düzgün bir elektrik alanının alan çizgileri. Bu yüzölçümde geçen Φ_E elektrik akısı EA ya eşittir.

Bundan önceki bölümde, verilen bir yük dağılıminin elektrik alanının, Coulomb yasasından nasıl hesaplandığı görüldü. Bu bölümde, *Gauss yasası* ve elektrik alanlarının başka bir hesap yolu anlatılacaktır. Bu yasa, nokta yükler arasındaki temel elektrostatik kuvvetin terskare yasasına uydugu gerçekine dayanır. Gauss yasası, Coulomb yasasının bir sonucu olmakla birlikte, yüksek simetrisi yük dağılımlarının elektrik alan hesabında çok daha kolaydır. Ayrıca, karmaşık problemlerin nitel anlaşılmamasına olanak sağlar.

24.1 ELEKTRİK AKISI

Elektrik alan çizgileri kavramı Bölüm 23 de nitel olarak tanımlandı. Elektrik alan çizgilerini daha nicek biçimde işlemek için elektrik akı kavramı kullanıltacaktır.

Once, Şekil 24.1 deki gibi doğrultu ve büyüklükçe düzgün olan bir elektrik alanımız olsun. Elektrik alan çizgileri alana dik A yüzölçümü bir dikdörtgen yüzeyden geçmektedir. Birim yüzölçümünden geçen alan çizgilerinin sayısının (bir başka deyişle, çizgi yoğunluğu), elektrik alanın büyüklüğüyle orantılı olduğu Kesim 23.6'dan biliniyor. Bu nedenle, A yüzölçümünden geçen alan çizgilerinin sayısı EA ile orantılıdır. Elektrik alan büyüklüğü E ile alana dik A yüzölçümünün çarpımına **Φ elektrik akısı** denir:

$$\Phi_E = EA \quad (24.1)$$

E ve A nin birimleri SI'ye göre alındığında, Φ_E nin birimi Coulomb başına newton metrekare ($N \cdot m^2/C$) dir. **Elektrik akısı bir yüzeyden geçen elektrik alan çizgileri sayısı ile orantılıdır.**

ÖRNEK 24.1 Bir Küreden Geçen Akı

Merkezinde $+1,00 \mu C$ luk bir yük bulunduran $1,00 \text{ m}$ yarıçaplı bir küreden geçen elektrik akısı ne kadardır?

Cözüm Bu yükten $1,00 \text{ m}$ uzaktaki elektrik alanının büyülüğu Eşitlik 23.4 ile verilir:

$$E = k_e \frac{q}{r^2} = (8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{1,00 \times 10^{-6} \text{ C}}{(1,00 \text{ m})^2}$$

$$= 8,99 \times 10^3 \text{ N/C}$$

Alan yarıçapsal (radial) olarak dışarıya yönelik olup bu ne-

denle her yerde küre yüzeyine diktir. Böylece küreden (yüzey alanı $A = 4\pi r^2 = 12,6 \text{ m}^2$) geçen akı:

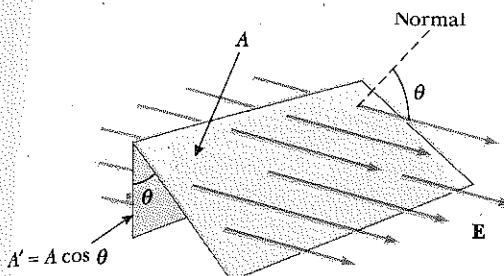
$$\Phi_E = EA = (8,99 \times 10^9 \text{ N/C}) (12,6 \text{ m}^2)$$

$$= 1,13 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$$

Alişturma Kürenin yarıçapı $0,5 \text{ m}$ olsaydı (a) elektrik alanı ve (b) küreden geçen akı ne olurdu?

Cevap (a) $3,60 \times 10^4 \text{ N/C}$; (b) $1,13 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$

Gözönüne alınan yüzey alana dik değilse, yüzeyden geçen akı (24.1) Eşitliği ile verilenden az olmalıdır. Düzgün elektrik alanyla θ açısı yapan A yüzölçümü yüzeyin normali Şekil 24.2 ye bakarak anlaşılabılır. Bu yüzölçümünden geçen alan çizgilerinin sayısı, alana dik A' izdüşüm yüzölçümünden geçenlerine eşittir. Şekil 24.2 den, bu iki yüzölçüm arasında $A' = A \cos \theta$ bağıntısının olduğu görülür. A dan ve A' den geçen akılar aynı olduğundan A dan geçen



Şekil 24.2 Alanla θ açısı yapan bir A yüzölçümünden geçen düzgün elektrik alanının alan çizgileri. A' ve A yüzölçümünden geçen alan çizgilerinin sayısı eşit olduğundan, A' ve A dan aynı $\Phi_E = EA \cos \theta$ akısı geçer.

akı için

$$\Phi_E = EA' = EA \cos \theta \quad (24.2)$$

sonucu çıkarılır. Bu sonuctan, belli yüzölçümlü bir yüzeyden geçen akının, yüzeyin alana dik olması (başa deyişle, yüzey normalinin alana paralel olması, yani Şekil 24.2 de $\theta = 0^\circ$) durumunda EA en büyük değerini aldığı; yüzeyin alana paralel olması (yani, yüzey normalinin alana dik olması, $\theta = 90^\circ$) durumunda ise sıfır olduğu görüldür.

Önceki tartışmada elektrik alanının düzgün olduğu varsayıldı. Daha genel durumlarda elektrik alanı, yüzey üzerinde değişebilir. Bu bakımdan, (24.2) Eşitliği ile verilen akı tanımının, yalnızca küçük bir yüzey öğesi için anlamı vardır. Genel bir yüzeyin, çok sayıda ΔA yüzölçümlü küçük yüzey öğelerine bölündüğü düşünelüsün. Bu yüzey öğeleri yeterince küçükseler elektrik alanının öğeler üzerindeki değişimini önemsenmeyecek. Şekil 24.3 deki gibi, büyülüğu i inci yüzey öğesinin yüzölçümünü göstermek üzere doğrultusu yüzeye *dik olan* bir $\Delta \mathbf{A}_i$ vektörünün tanımlanması yerinde olur. Bu küçük yüzey öğesinden geçen $\Delta \Phi_E$ elektrik akısı, iki vektörün ($\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta$) skaler çarpım tanımı kullanılarak;

$$\Delta \Phi_E = \mathbf{E}_i \cdot \Delta \mathbf{A}_i \cos \theta = \mathbf{E}_i \cdot \Delta \mathbf{A}_i,$$

olur. Yüzeyden geçen toplam akı, bütün öğelerin katkısı toplanarak bulunur. Yüzey öğelerinin yüzölçümleri sıfıra yaklaştığında sayıları sonsuza ulaşacağından, toplam yerine integral alınır. Buna göre elektrik akısının genel tanımı

$$\Phi_E = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \sum \mathbf{E}_i \cdot \Delta \mathbf{A}_i = \int_{\text{yüzey}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (24.3)$$

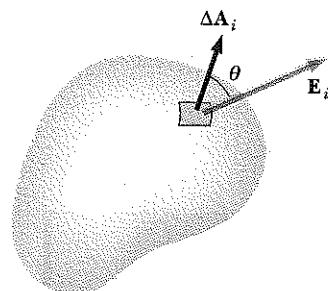
dir. 24.3 Eşitliği, söz konusu yüzey üzerinden alınması gereken bir *yüzey integrali*dir. Genelde Φ_E nin değeri, hem elektrik alanının desenine, hem de alınan yüzeye bağlıdır.

Çoğu kez *kapalı bir yüzeyden* geçen akının hesapıyla ilgilenilir. Kapalı yüzey, uzayı iç ve dış bölgelere ayıran yüzey olarak tanımlanır. Bu yüzeyi geçmeden bölgelerden birinden ötekine hareket edilemez. Örneğin, küre yüzeyi kapalı bir yüzeydir.

Şekil 24.4 deki kapalı yüzey göz önüne alının. Farklı yüzey öğelerinin $\Delta \mathbf{A}_i$ vektörleri çeşitli doğrultularda yönelmişlerdir. Her noktada bu vektörler yüze-

Ev Deneyi

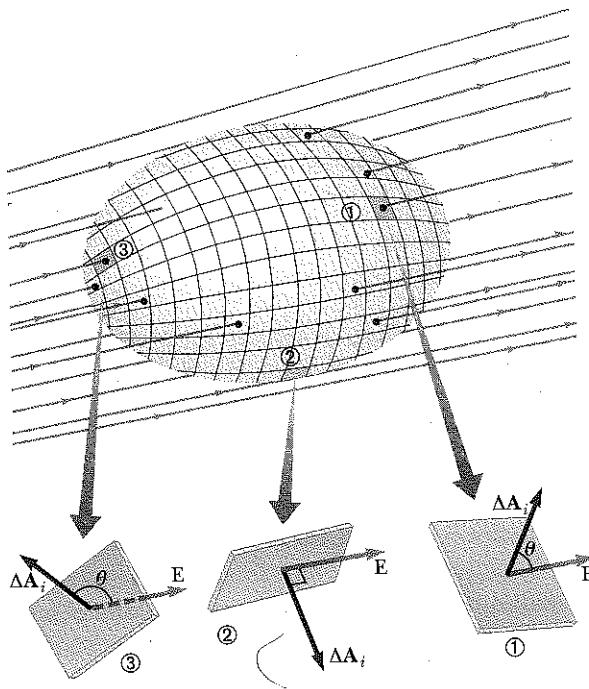
Masa lambası ile bir oyun kağıdı aydınlatıldığında kağıdın masa üzerindeki bölgesinin büyüklüğünün kağıdın ışık demetine göre yönelimine nasıl bağlı olduğunu gözlemleyiniz. Oyun kağıdının ne kadar ışığı önlediği Eş. 24.2 benzeri bir formülle bulabilir mi?



Şekil 24.3 ΔA_i yüzölçümlü küçük bir yüzey öğesi. Elektrik alanı, yüzey öğe normali olarak (ΔA_i vektörü) ile θ açısı yapmaktadır ve yüzey öğesinden geçen akı $E_i \Delta A_i \cos \theta$ ya eşittir.

Elektrik akısının tanımı

¹ Konumuna bağlı olarak bir küçük yüzey öğesinden çok az veya fazla sayıda alan çizgisi geçebilecekinden, alan çizgileriyle yapılan çizimlerde belirsizlikler olabilir. Elektrik akısının temel tanımı $\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$ dir. Alan çizgilerinin kullanımı yalnızca kavramı göz önünde canlandırmaya yarayan bir aractır.



Şekil 24.4 Elektrik alanında kapalı bir yüzey. ΔA_i , yüzölçüm vektörleri anlaşıma uyarınca yüzeye dik ve dışa doğrudurlar. Bir yüzey ögesinden geçen aki artı (① ögesi), sıfır (② ögesi) veya eksi (③ ögesi) olabilir.



Karl Friedrich Gauss
Alman matematikçi ve gökbilimci
(1777-1855)

ye dik olup anlaşıma uyarınca her zaman *dışan* yönelmişlerdir. ① ile gösterilen yüzey ögesinde \mathbf{E} dışarı doğrudur ve $\theta < 90^\circ$; böylece, bu yüzey ögesinden geçen $\Delta\Phi_E = \mathbf{E} \cdot \Delta\mathbf{A}$ aksı artıdır. ② ögesinde alan çizgileri yüzeyi yalayarak geçerler ($\Delta\mathbf{A}_i$ vektörüne dik); böylece $\theta = 90^\circ$ ve aki sıfırdır. ③ gibi yüzey ögelerinde alan çizgileri yüzeyi dışarıdan içeri doğru geçerler, $180^\circ > \theta > 90^\circ$ için $\cos \theta$ eksi olduğundan aki eksi olur. Yüzeyden geçen net aki, yüzeyden ayrılan alan çizgilerinin net sayısyla orantılıdır, burada net sayı, *yüzeyden çıkanların sayısından, girenlerin sayısının çıkarılması anlamına gelir*. Yüzeye girenden çok çıkan alan çizgisi varsa, net aki artıdır. Yüzeyden çıktıdan daha çok alan çizgisi yüzeye giriyorsa net aki eksidir. \oint sembolü, *kapalı bir yüzey üzerinden alınan integrali* göstermek üzere, kapalı bir yüzeyden geçen Φ_E net akısı,

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint E_n dA \quad (24.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_n , elektrik alanın yüzeye dik bileşenidir. Kapalı bir yüzeyden geçen net akının hesabı çok sıkıcı olabilir. Bununla birlikte, alan her noktada yüzeye dik ve büyülüğu sabitse hesaplama Örnek 24.1'deki gibi doğrudan yapılabilir. Aşağıdaki örnek bu noktaya açıklık getirmektedir.

ÖRNEK 24.2 Bir Kübten Geçen Aki

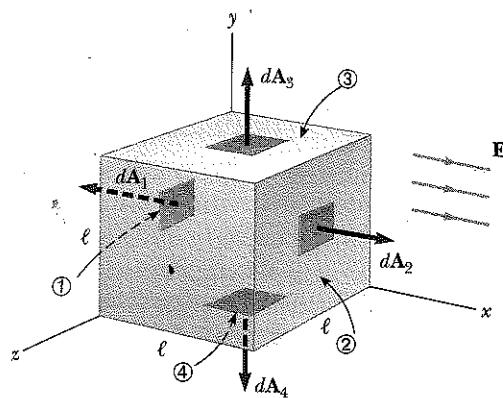
x doğrultusunda yönelmiş düzgün bir \mathbf{E} elektrik alanı göz önüne alınınsın. Şekil 24.5 deki gibi yönlendirilen ℓ kenar uzunluklu bir kübün yüzeyinden geçen net elektrik akısını bulunuz.

Çözüm Net aki, kübün her bir yüzeyinden geçen akıların toplamıdır. Önce, \mathbf{E} , $d\mathbf{A}$ ya dik olduğundan kübün

dört yüzünden (③, ④ ve sayı verilmeyenler) geçen aki sıfır dır.

① ve ② yüzlerinden geçen net aki:

$$\Phi_E = \int_1 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} + \int_2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$



Şekil 24.5 x eksenine paralel düzgün bir elektrik alanındaki küp biçimli kapalı bir yüzey. Kapalı yüzeyden geçen net aki sıfırdır. ④ yüzü küpün altı, ① yüzü de ② nin karşısındadır.

① yüzünde \mathbf{E} sabit ve içeri doğru, $d\mathbf{A}$ ise dışarı doğrudur ($\theta = 180^\circ$); böylece, bu yüzden geçen aki, her bir yüzün alanı $A = \ell^2$ olduğuna göre,

$$\int_1 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \int_1 E(\cos 180^\circ) dA = -E \int_1 dA = -EA = -E\ell^2$$

② yüzü için \mathbf{E} sabittir ve $d\mathbf{A}$ ile aynı doğrultudadır ($\theta = 0^\circ$); buna göre bu yüzden geçen aki:

$$\int_2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \int_2 E(\cos 0^\circ) dA = E \int_2 dA = +EA = E\ell^2$$

Böylece tüm altı yüz için net aki:

$$\Phi_E = -E\ell^2 + E\ell^2 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

24.2 GAUSS KANUNU

Bu kesimde, kapalı bir yüzeyden (çoğu kez gauss yüzeyi denir) geçen net elektrik akısıyla, yüzey tarafından sarılan yük arasındaki genel bağıntı anlatılacaktır. Gauss yasası olarak bilinen bu bağıntının elektrik alanlarının incelenmesinde büyük önemi vardır.

Sekil 24.6 daki gibi r yarıçaplı bir kürenin merkezinde bulunan artı bir nokta yük gözonüne alınsın. Eş. (23.4) e göre, bu küre yüzeyinde her yerde elektrik alanın büyülüklüğü $E = k_e q / r^2$ dir. Örnek 24.1 de belirtildiği gibi alan çizgileri, yarıçap doğrultusunda dışarı doğrudur ve bu nedenle yüzeye her noktada diktrler. Yani, \mathbf{E} , her yüzey noktasında o noktayı saran ΔA_i yüzölçümlü yüzey öğesini temsil eden $\Delta \mathbf{A}_i$ vektörüne paraleldir. Bu nedenle,

$$\mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{A}_i = E \Delta A_i$$

ve Eş. (24.4) den, gauss yüzeyinden geçen net akının, E , simetri nedeniyle yüzey üzerinde sabit ve $E = k_e q / r^2$ ile verildiğinden integral dışına alınarak,

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint E dA = E \oint dA$$

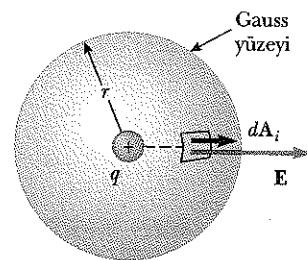
olduğu bulunur. Üstelik, yüzey kütlesel olduğundan $\oint dA = A = 4\pi r^2$ dir. Bu nedenle gauss yüzeyinden geçen net aki

$$\Phi_E = \frac{k_e q}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi k_e q$$

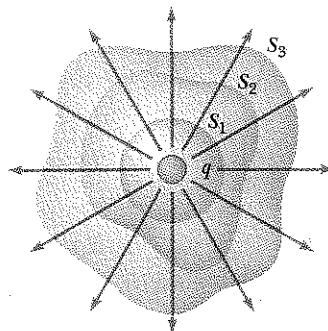
olur. Kesim 23.3 den $k_e = 1/(4\pi\epsilon_0)$ olduğu için bu

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (24.5)$$

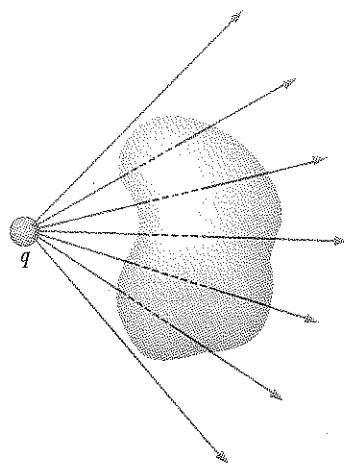
birimde yazılabilir. Net aki için bu bağıntısının, Örnek 24.1'deki ile aynı sonucu verdiği gösterilebilir: $\Phi_E = 1,00 \times 10^{-6} \text{ C} / (8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2) = 1,13 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}$.



Şekil 24.6 Bir q nokta yükünü saran r yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi. Yük kure merkezinde olduğunda, elektrik alan her yerde yüzeye dik ve sabit büyülüktedir.



Şekil 24.7 Bir q yükünü saran çeşitli biçimlerde kapalı yüzeyler. Tüm yüzeylerden geçen net elektrik akısı aynıdır.



Şekil 24.8 Kapalı bir yüzey dışında bulunan bir nokta yük. Yüzeye giren ve çıkan alan çizgilerinin sayısı eşittir.

İçinde yük olmadığından kapalı bir yüzeyden geçen net elektrik akısı sıfırıdır.

Eşitlik 24.5 e göre küresel yüzeyden geçen net aki, yüzey *icindeki* yükle orantılıdır. Elektrik alanı $1/r^2$ ile, küre yüzeyinin alanı r^2 ile orantılı olduğundan, aki r yarıçapından bağımsız olur. Böylece yüzey alanı ve elektrik alanı çarpmında r ye bağımlılık ortadan kalkar.

Şimdi Şekil 24.7 deki gibi, bir q yükünü saran çeşitli kapalı yüzeyler gözönüne alınsin. S_1 yüzeyi küresel, S_2 ve S_3 yüzeyleri ise küresel degillerdir. Eş 24.5 e göre S_1 yüzeyinden geçen aki, q/ϵ_0 değerindedir. Bundan önceki kesimde görüldüğü gibi, aki o yüzeyden geçen elektrik alan çizgilerinin sayısı orantılıdır. Şekil 24.7 deki çizimden, S_1 küresel yüzeyinden geçen elektrik alan çizgilerinin sayısının, S_2 ve S_3 küresel olmayan yüzeylerden geçen elektrik alan çizgilerinin sayısına eşittir. Bu nedenle, *herhangi* kapalı bir yüzeyden geçen net akının, yüzeyin biçiminden bağımsız olduğu sonucu çıkarılır. **Bir q noktası yükünü saran herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net aki q/ϵ_0 dir.**

Şekil 24.8 deki gibi, rastgele biçimli kapalı bir yüzey dışında bulunan bir nokta yükü göz önüne alınsin. Bu çizimden görüldüğü üzere, yüzeye giren elektrik alan çizgileri başka bir noktada yüzeyden çıkmaktadır. Yüzeye giren ve çıkan elektrik alan çizgilerinin sayıları eşittir. Bundan dolayı, **yük sarmayan kapalı bir yüzeyden geçen net elektrik akısının sıfır olduğu** sonucu çıkarılır. Bu sonucu Örnek 24.2'e uygulanırsa, içinde yük bulunmadığı için, kübten geçen net akının sıfır olduğu kolayca görülebilir.

Sınamaya Sorusu 24.1

Örnek 24.1 deki yükün kürenin merkezinden 1,01 m uzakta kürenin tam dışında olduğu varsayılsın. Küreden geçen toplam aki ne kadardır?

Bu tartışmaları, birçok nokta yük veya sürekli yük dağılımı genel haline genişletelim. Bunun için **bir çok yükün elektrik alanının, yüklerin elektrik alanlarının vektörel toplamı olduğunu söyleyen üstüste binme ilkesinden** yararlanacağız. Yani, herhangi kapalı bir yüzeyden geçen aki

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots) \cdot d\mathbf{A}$$

şeklinde belirtilebilir. Burada \mathbf{E} , yüzeyin herhangi bir noktasındaki toplam elektrik alanı olup her bir yükün o noktadaki elektrik alanlarının vektörel top-

lamıdır. Şekil 24.9 daki yükler sistemi ele alınsın. Syüzeyi yalnız q_1 yükünü sarmaktadır; bu nedenle S den geçen net aki q_1/ϵ_0 dir. S nin dışındaki q_2 ve q_3 yüklerinin S den geçirdiği aki, S ye bir noktada giren elektrik alan çizgisinin başka bir noktada S den çıkıştırı nedeniyle sıfırdır. S' yüzeyi q_2 ve q_3 yüklerini sardığından S' den geçen net aki $(q_2 + q_3)/\epsilon_0$ dir. Son olarak, içinde yük bulunmadığından S'' yüzeyinden geçen net aki sıfırdır. Yani, S'' ye bir noktada giren *bütün* alan çizgileri başka bir noktada yüzeyden ayrırlar.

Yukarıda belirtilenin bir genellemesi olan **Gauss yasasına göre, herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net aki:**

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{ic}}{\epsilon_0} \quad (24.6)$$

Gauss yasası

dir. Burada q_{ic} , yüzey içindeki net yükü, \mathbf{E} de yüzeyin herhangi bir noktasındaki elektrik alanını göstermektedir.

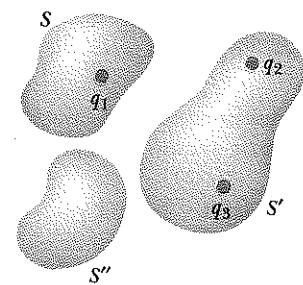
Gauss yasasının açık bir kanıtlanması Kesim 24.6'da verilecektir. Es. 24.6 kullanılırken, q_{ic} in gauss yüzeyi içindeki net yükü, \mathbf{E} nin ise gauss yüzeyinin hem iç, hem de dışındaki yüklerden ileri gelen *toplum elektrik alanını* gösterdiğine dikkat edilmelidir.

Gauss yasası, yüksek simetrisi yük dağılımının E sini hesaplamada kullanılmıştır.

İlke olarak, Gauss yasası bir yükler sistemi veya sürekli bir yük dağılımının elektrik alanını bulmak için kullanılabilir. Bununla birlikte, uygulamada bu tür çözüm yalnızca, yüksek simetrisi sınırlı sayıda durumlar için uygulanabilir. Bundan sonraki kesimde görüleceği gibi, Gauss yasası, küresel, silindirik veya düzlem simetrisi yük dağılımlarının elektrik alanını hesaplamada kullanılır. Yük dağılımını saran gauss yüzeyi özenle seçildiğinde Es. (24.6) daki integral basitleşebilir. Gauss yüzeyi matematiksel bir yüzey olup, herhangi gerçek fiziksel bir yüzeye çalışma gereği yoktur.

Sınamma Sorusu 24.2

Net akının sıfır olduğu bir gauss yüzeyi için aşağıdaki dört ifade doğru olabilir. İfade lerden hangisi doğrudur? (a) Yüzey içinde yük yoktur. (b) Yüzey içinde net yük sıfırdır. (c) Yüzey üzerinde her yerde elektrik alan sıfırdır. (d) Yüzeye giren elektrik alan çizgileri sayısı çıkanlarındaki eşittir.



Şekil 24.9 Herhangi kapalı bir yüzeyden geçen net elektrik akısı yalnızca o yüzey *icindeki* yükle bağlıdır. S , S' ve S'' yüzeylerinden geçen net akılar sırasıyla q_1/ϵ_0 , $(q_2 + q_3)/\epsilon_0$ ve sıfırdır.

KAVRAMSAL ÖRNEK 24.3

Küresel bir gauss yüzeyi bir q nokta yükünü sarmaktadır. Yüzeyden geçen toplam akiya, (a) yükün üç katına çıkarılması, (b) kürenin yarıçapının iki katına çıkarılması, (c) yüzeyin kub şecline dönüştürülmesi ve (d) yükün içerisinde başka bir konuma götürülmlesi durumunda ne olduğunu anlatınız.

Çözüm (a) Aki yüzey içindeki yük miktarı ile orantılı olduğundan yüzeyden geçen aki üç katına çıkar.

(b) Yükten çıkan tüm elektrik alan çizgileri kürenin ya-

rıçapına bakılmaksızın küreden geçeceği için aki değişmez.

(c) Yükten çıkan tüm elektrik alan çizgileri yüzeyin birincime bakılmaksızın yüzeyden geçeceği için gauss yüzeyinin biçimini değiştirdiğinde aki değişmez.

(d) Gauss yasası, yüzeyin içinde yükün nerede olduğunu bakılmaksızın yüzey içindeki toplam yükten söz ettiği için, yük yüzey içinde başka bir konuma götürüldüğünde aki değişmez.

24.3

GAUSS YASASININ YÜKLÜ YALITKANLARA UYGULANMASI

Daha önce belirtildiği gibi, yük dağılımı yüksek simetrisi olduğunda elektrik alanlarının bulunmasında Gauss yasası kullanışlıdır. Aşağıdaki örneklerde Eş. 24.6 daki integralin basitleşebileceği ve elektrik alanının bulunabileceği gauss yüzeyinin seçim yolları görülmektedir. Yüzeyi seçerken E 'yi integral dışına alıp sonra onu çözebilecek biçimde yük dağılıminin simetrisinden her zaman yarılanmak gereklidir. Bu tür hasabın amacı aşağıdaki koşullardan bir ya da daha çoğunu sağlayan bir yüzey bulmaktır:

1. Elektrik alanının büyüklüğü simetri uyarınca yüzey üzerinde sabit olabilir.
2. Eş. 24.6 daki skaler çarpım E ve dA paralel olduklarından basit bir cebirsel $E \cdot dA$ çarpımı olarak belirtilebilir.
3. Eş. 24.6 daki skaler çarpım, E ve dA dik olduklarında sıfırdır.
4. Yüzey üzerinde alan sıfır olabilir.

Bu dört koşulun tümü, bundan sonraki örneklerde kullanılacaktır.

ÖRNEK 24.4 Bir Nokta Yükün Elektrik Alanı

Gauss yasasından başlayarak, yalıtılmış bir q nokta yükünün elektrik alanını hesaplayınız.

Çözüm Tek bir yük, olası en basit yük dağılımı olduğundan, Gauss yasası ile elektrik alanının nasıl bulunacağını göstermek için bilinen durum ele alınmaktadır. Bunun için, Şekil 24.10 daki gibi, merkezi noktası yük üzerinde bulunan r yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi seçilir. Pozitif noktası yükün elektrik alanı simetriden dolayı çap boyunca dışarı doğru olacağından yüzeye her noktada diktir. (2) koşulundaki gibi, her noktada \mathbf{E} , $d\mathbf{A}$ ya paralel olduğundan $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = EdA$ dir ve Gauss yasasına göre

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint E dA = \frac{q}{\epsilon_0}$$

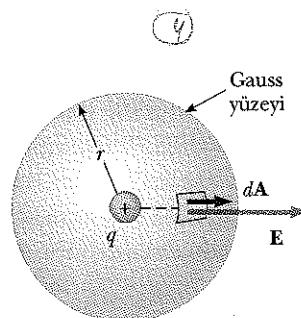
olur. Simetri uyarınca E , yüzeyin her yerine sabit olduğundan (1) koşuluna sahip ve integral dışına alınabilir. Böylece, küre yüzölçümünü $4\pi r^2$ alarak;

$$\oint E dA = E \oint dA = E(4\pi r^2) = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Buna göre, alanın büyüklüğü

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = k_e \frac{q}{r^2}$$

olur. Bu, Bölüm 23'de Coulomb yasasından çıkarılan bir nokta yükün bilinen elektrik alanıdır.



Şekil 24.10 Bir q nokta yükü küresel gauss yüzeyinin merkezindedir ve \mathbf{E} yüzeyin her noktasında $d\mathbf{A}$ ya paraleldir.

ÖRNEK 24.5 Küresel Simetrili Bir Yük Dağılımı

a yarıçaplı, yalıtkan, dolu bir kürenin düzgün yük yoğunluğu ρ ve toplam pozitif yükü Q dır (Şek 24.11). (a) Kürenin dışındaki bir noktada elektrik alan büyüklüğünü hesaplayınız.

Çözüm Yük dağılımı küresel simetrik olduğundan, yine Şekil 24.11a daki gibi, küreyle aynı merkezli r yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi seçilir. Örnek 24.4'deki nokta yükte olduğu gibi bu seçim için de (1) ve (2) koşulları sağlanır. Örnek 24.4'deki akıl yürütme izlendiğinde,

$$E = k_e \frac{Q}{r^2} \quad (r > a \text{ için})$$

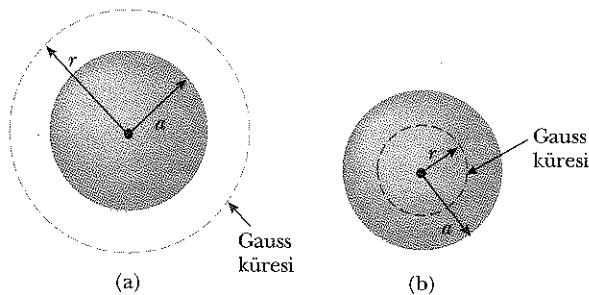
bulunur. Bu sonuc bir nokta yük için bulunanla özdeşdir. Bu nedenle, düzgün yüklü bir kürenin dışındaki bölgede elektrik alanının, kürenin merkezinde bulunan bir nokta yükün elektrik alanına eşdeğer olduğu sonucu çıkarılır.

(b) Kürenin içindeki bir noktada, elektrik alan büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm Bu durumda, yalıtılmış küre ile aynı merkezli $r < a$ yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi seçiliyor (Şek. 24.11b). Bu küçük kürenin hacmi V' olsun. Bu duruma, Gauss yasasını uygulamak için, V' hacimli gauss yüzeyi *icindeki* q_{lc} yükünün, küredeki toplam Q yükünden *daha az* olduğunu bilmek gereklidir. q_{lc} yükünü hesaplamak için, $q_{lc} = \rho V'$ bağıntısı kullanılır:

$$q_{lc} = \rho V' = \rho \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)$$

Elektrik alan simetri uyarınca küresel gauss yüzeyinin her yerinde aynı büyüklükte olup yüzeye her noktada dikdir.



Şekil 24.11 a yarıçaplı, Q toplam yüklü, düzgün yük dağılımlı bir yalıtkan küre. (a) Kürenin dışındaki bir noktada elektrik alanı $k_e Q/r^2$ dir. (b) Yalıtkan kürenin içindeki elektrik alanı, yalnızca, kesikli daire ile gösterilen gauss küresi *icindeki* yükten ileri gelir ve $k_e Q/r^3$ dir.

(1) ve (2) koşulları sağlanır. Bu nedenle, $r < a$ bölgesinde Gauss yasası uyarınca

$$\oint E dA = E \oint dA = E(4\pi r^2) = \frac{q_{lc}}{\epsilon_0}$$

olur E çözüldüğünde:

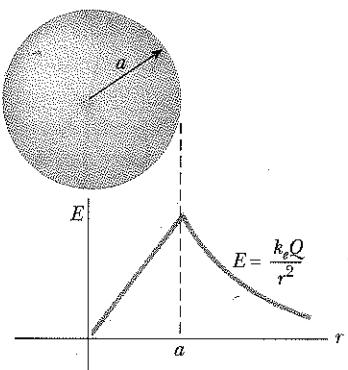
$$E = \frac{q_{lc}}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\rho \frac{4}{3}\pi r^3}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r$$

Tanım gereği $\rho = Q/\frac{4}{3}\pi a^3$ ve $k_e = 1/(4\pi\epsilon_0)$ olduğundan:

$$E = \frac{Qr}{4\pi\epsilon_0 a^3} = \frac{k_e Q}{a^3} r \quad (r < a \text{ için})$$

E için bulunan bu sonuç, (a) da bulunandan farklıdır. $r \rightarrow 0$ için $E \rightarrow 0$ olduğu görülür. Böylece bu sonuç, küre içinde E nin $1/r^2$ şeklinde değişmesi durumunda, $r = 0$ da ortaya çıkacak olan sorunu ortadan kaldırır. Yani, $r < a$ için $E \propto 1/r^2$ olursa, $r = 0$ da alan sonsuz olur. Bu da, fiziksel olarak olanaksızdır. $r = a$ da (a) ve (b) deki bağıntılar aynı olurlar.

E nin r ye göre grafiği Şekil 24.12 de gösterilmiştir.



Şekil 24.12 Düzgün yüklü yalıtkan bir küre için E nin r ye göre grafiği. Küre içinde ($r < a$) elektrik alanı, r ile değişir. Küre dışında ($r > a$) ise $r = 0$ daki Q nokta yükünden aynıdır.

ÖRNEK 24.6 Ince Küresel Bir Tabakanın Elektrik Alanı

a yarıçaplı, ince küresel bir tabakanın yüzeyinde düzgün olarak dağılmış toplam Q yükü bulunmaktadır (Şek. 24.13a). Tabakanın içinde ve dışındaki noktalarda elektrik alanını bulunuz.

Çözüm Tabakanın dışındaki elektrik alanının hesabı, Örnek 24.5a daki dolu küre için yapılmıştır. Tabakala aynı merkezli yarıçaplı $r > a$ olan, küresel bir gauss yüzeyi alındığında (Şekil 24.13b), bu yüzey içinde kalan yük Q

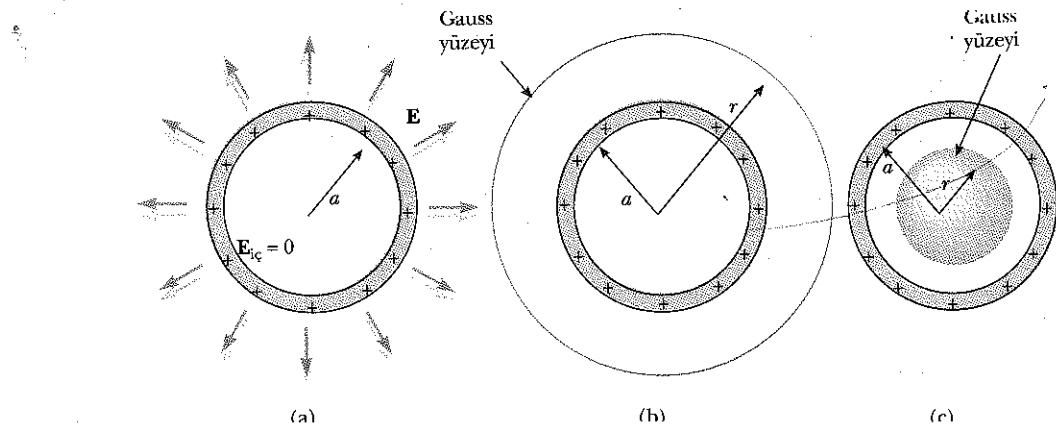
dur. Bu nedenle, tabaka dışındaki bir noktada elektrik alanı, merkezdeki bir Q nokta yükünün oluşturduğu alana eşdeğerdir:

$$E = k_e \frac{Q}{r^2} \quad (r > a \text{ için})$$

(b) Küresel tabakanın iç kısmında elektrik alanı sıfırdır. Bu, tabaka ile aynı merkezli, $r < a$ yarıçaplı küresel bir yüzeye uygulanan Gauss yasasından da çıkar. (Şekil 24.13c) Bu

yüzeyin içinde kalan net yük sıfır olduğundan ve yük dağılıminin küresel simetrisi nedeniyle, (1) ve (2) koşulları sağlanır, Gauss yasasının uygulandığında $r < a$ bölgesinde $E = 0$ bulunur.

Aynı sonuçlar, 23.6 Eşitliği kullanılıp yük dağılımı yüzeyinden integral olarak da bulunabilir. Bu hesaplama oldukça karmaşıktr. Gauss yasası ile bu sonuçlara çok daha kolay bir yolla ulaşılır.



Şekil 24.13 Düzgün yüklü küresel bir tabakanın içindeki elektrik alanı sıfırdır. Dışındaki alan ise, tabakanın merkezinde bulunan bir Q nokta yükünüyle aynıdır. (b) $r > a$ yarıçaplı gauss yüzeyi (c) $r < a$ yarıçaplı gauss yüzeyi.

ÖRNEK 24.7 Silindirik Simetrisi Bir Yük Dağılımı

11.7

λ sabit doğrusal yük yoğunluğu, sonsuz uzunlukta, doğrusal artı bir yükten r uzaklığında elektrik alanını bulunuz (Şek. 24.14a).

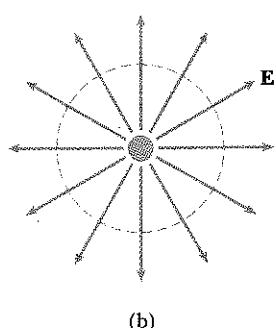
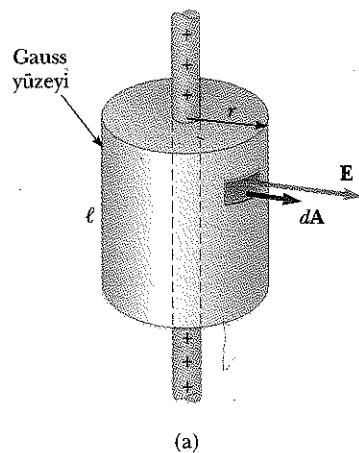
Cözüm Yük dağılımının simetrisinden dolayı Şekil 24.14a ve b deki gibi, \mathbf{E} , doğrusal yük ekseninde ve dışarı doğru doğrudır. Yük dağılımının simetrisini yansıtması için doğrusal yük aynı eksenli, ℓ uzunluğunda ve r yarıçapında silindirik bir gauss yüzeyi seçilir. Silindirin eğri yan yüzeyinde her noktada \mathbf{E} nin büyüklüğü sabit olup yüzeye dikdir, oysa, gauss silindirinin taban yüzeyleri \mathbf{E} ye paralel olduğundan bu yüzeylerden geçen akı sıfırdır—(3) koşulunun ilk uygulanışı—.

Gauss yasasındaki yüzey integrali tüm yüzey üzerinden alınır. Silindir tabanlarında $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$ sıfır olduğundan yalnızca silindirin eğri yan yüzeyi ile ilgilenilir.

Bu gauss yüzeyinin içinde kalan yük $\lambda\ell$ dir. Gauss yasası (1) ve (2) koşulları uygulandığında, silindirin yanal yüzeyi için:

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = E \oint dA = EA = \frac{q_{\text{ic}}}{\epsilon_0} = \frac{\lambda\ell}{\epsilon_0}$$

bularuz.



Şekil 24.14 (a) Doğrusal yük ekseninde silindirik bir gauss yüzeyi ile sarılmış sonsuz uzunluklu bir doğrusal yük. (b) Uçtan bakıldığından silindirin yan yüzeyinde alanın, büyük ölçüde sabit olup yüzeye dik olduğu görülmür.

Silindirin yan yüzeyinin yüzölçümü $A = 2\pi r\ell$ olduğundan;

$$E(2\pi r\ell) = \frac{\lambda\ell}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} = 2k \frac{\lambda}{r} \quad (24.7)$$

Buna göre, silindirik simetrisi yük dağılımının elektrik alanının $1/r$ şeklinde değiştiğini, oysa küresel simetrisi bir yük dağılımının dışındaki elektrik alanının $1/r^2$ şeklinde değiştiği görülmüş olur. Eş. 24.7, bir nokta yükün alanının integrali alınrak Bölüm 23 de çıkarılmıştır (bakınız Problem 35 [b]).

Bu örneklerde doğrusal yük sonlu uzunlukta olsaydı E için bulunan sonuç Eş. 24.7 olmazdı. Sonlu bir doğrusal yü-

kün Gauss yasasının kullanım için yeterli simetri bulunmaz. Bunun nedeni gauss silindiri yüzeyinde elektrik alan büyüklüğünün sabit olmayışdır; yük doğrusunun uçlarına yakın olan, uzaktakinden farklıdır. Bu durumda (1) koşulu sağlanır. Ayrıca E silindir yüzeyine her noktada dik değildir, uçlara yakın olan vektörlerinin doğruya paralel bileşenleri vardır. Buna göre (2) koşulu sağlanmaz. Bu durumda olduğu gibi yük dağılımında yeterince simetri bulunmazsa E yi hesaplamak için Eş. 23.6 yi kullanmak gereklidir.

Doğrusal yükün uçlarından uzakta fakat doğruya yakın noktalardaki alan için 24.7 Eşitliği yaklaşık iyi bir değer verir.

Sonlu yarıçaplı düzgün yüklü sonsuz uzunlukta bir çubugun içindeki elektrik alanının r ile orantılı olduğunu gösterilmesi (Problem 29 a bakınız) size bırakılmıştır.

ÖRNEK 24.8 Yalıtkan Düzlem bir Yük Tabakası

σ düzgün yüzey yük yoğunluklu, yalıtkan, sonsuz artı yüklü bir düzlemin elektrik alanını buluyoruz.

Çözüm Simetri uyarınca E düzleme dik olmalıdır ve düzlemden eşit uzaklıktaki tüm noktalarda aynı büyüklükte olmalıdır. E nin doğrultusu artı yüklerden uzaklaşan yönde olduğundan düzlemin bir yanındaki E doğrultusu Şekil 24.15 deki gibi öteki yanındaki ile zıt yönde olmalıdır. Simetriyi yansitan gauss yüzeyi, ekseni düzleme dik A yüzölçümü, tabanları düzlemden eşit uzaklıktaki küçük bir silindirdir. E , eğrisel yüzeye paralel ve dA her yerde yüzeye dik olduğundan (3) koşulu sağlanır ve bu yüzden yüzey integralline bir katkı gelmez. Silindirin tabanları için (1) ve (2) koşulları sağlanır. Silindirin tabanlarından geçen akı EA dir; buna göre tüm gauss yüzeyinden geçen toplam akı yalnızca tabanlardan geçen $\Phi_E = 2EA$ akısıdır.

Gauss yüzeyinin iç kısmındaki toplam yük $q_{ic} = \sigma A$ olduğundan, Gauss yasası kullanıldığında

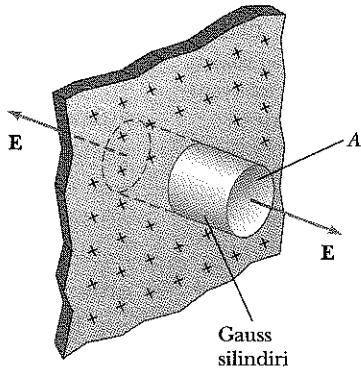
$$\Phi_E = 2EA = \frac{q_{ic}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (24.8)$$

elde edilir.

Eş. 24.8 de, taban yüzeylerinin düzlemden uzaklığa bulunmadığına göre, $E = \sigma/2\epsilon_0$ in düzlemden herhangi bir uzaklık için geçerli olduğu sonucu çıkarılır. Yani alan her yerde düzgündür.

Bu örnekle ilintili önemli bir düzenleniş σ yük yoğunluklu paralel iki düzlem yük tarafından oluşturulur (Problem 58 a bakınız). Bu durumda iki düzlemin elektrik alanları düzlemler arasında eklenecek σ/ϵ_0 büyüklüğünde bir alan oluştururken başka her yerde birbirini yok ederek sıfır alan verirler.



Şekil 24.15 Sonsuz bir yük düzlemini delen silindirik bir gauss yüzeyi. Gauss yüzeyinin her bir tabanından geçen akı EA dir. Silindirin yan yüzeyinden geçen akı sıfırdır.

KAVRAMSAL ÖRNEK 24.9

Gauss yasasının, bir elektrik dipolü, yüklü bir disk, ya da köşelerinde nokta yükler bulunan bir üçgen yakınındaki elektrik alanı hesaplamada neden kullanılmayacağını açıklayınız.

Çözüm Tüm bu yük dağılımlarında Gauss yasasının kullanılabileceği ölçüde simetri bulunmaz. Bu kesimin başında sınırlanan (1) den (4) e kadar koşullardan biri ya da daha çoğunu sağlayacak bu yük dağılımlarından herhangi birini saran kapalı bir yüzey bulunamaz.

24.4 ELEKTROSTATİK DENGEDEKİ İLETKENLER

Kesim 23.2'de görüldüğü gibi iyi bir elektriksel iletkende, atomlara bağlı olmayan ve madde içinde özgürce dolaşabilen yükler (elektronlar) bulunur. İletken içinde net bir yük hareketi olmadığından, iletken **elektrostatik dengedir**. Görüleceği üzere, elektrostatik dengedeki bir iletkenin aşağıdaki özellikler vardır:

1. İletken içinde her yerde elektrik alanı sıfırdır.
2. Yalıtılmış bir iletkende bir yük varsa bu yük, iletkenin yüzeyinde bulunur.
3. Yükü bir iletkenin hemen dışındaki elektrik alanı iletken yüzeyine dik olup σ/ϵ_0 büyüklüğündedir. Burada σ , anılan noktadaki yüzeysel yük yoğunluğu.
4. Düzgün biçimli olmayan bir iletkende, yüzeyin eğrilik yarıçapının en küçük olduğu yerlerde yüzeysel yük yoğunluğu en büyuktur.

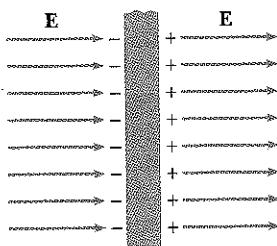
Bu ilk üç özellik aşağıdaki tartışmada doğrulanmaktadır. Üzerinde durulmadan dördüncü özellik burada verilmektedir. Böylece elektrostatik dengedeki iletkenlerin özelliklerinin tam listesi verilmiş olur.

Birinci özellik, bir E dış elektrik alanına konulan bir iletken dilimi ele alınarak anlaşılabılır (Şek. 24.16). Elektrostatik denge varsayımlı ile, iletken içindeki elektrik alanın sıfır olması gereği tartışılabılır. Alan sıfır değilse, iletkendeki serbest yükler elektrik alanın etkisi altında hızlanırlar. Elektronların bu hareketi iletkenin elektrostatik dengede olmadığı anlamına gelir. Buna göre elektrostatik denge yalnızca iletkendeki alanın sıfır olması ile mümkündür.

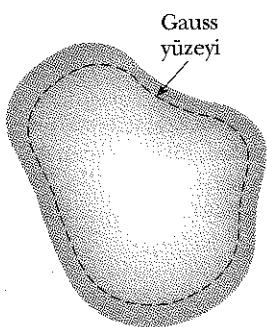
Bu sıfır alanın nasıl elde edilebileceğini araştırılah. Dış elektrik alan uygulanmadan önce serbest elektronlar iletken içerisinde düzgün olarak dağılmışlardır. Dış elektrik alan uygulandığında serbest elektronlar Şekil 24.16 da sola doğru hızlanarak, sol yüzeye eksi bir yük düzleminin, sağda ise artı yük düzleminin oluşmasına yol açarlar. Bu yükler dış elektrik alanına karşı koyan iletken içinde ek bir elektrik alanını meydana getirirler. Elektronlar hareket ettikçe iletken içinde net elektrik alanı sıfır olacak biçimde, iç elektrik alanının büyülüğu dış elektrik alaninkine eşit oluncaya dek yüzey yük yoğunluğu artar. İyi iletkenlerde iletkenin dengeye ulaşması için geçen süre 10^{-16} s metebesindedir. Bu süre birçok amaç için anı olarak düşünülebilir.

Elektrostatik dengedeki bir iletkenin ikinci özelliğinin doğrulanması Gauss yasasıyla yapılabilir. Şekil 24.17 de gelişmiş güzel biçimli yalıtılmış bir iletken görülmektedir. iletken içerisinde yüzeye istenildiği kadar yakın bir gauss yüzeyi çizilebilir. Biraz önce gösterildiği gibi, elektrostatik dengedeki bir iletken içinde her yerde elektrik alan sıfırdır. Bu nedenle Kesim 24.3 teki (4) koşulu uyarınca gauss yüzeyinin her noktasında da elektrik alan sıfır olmalıdır. Buna göre bu gauss yüzeyinden geçen net akı sıfırdır. Bu sonuç ile Gauss yasasından, gauss yüzeyi içindeki net yükün sıfır olduğu sonucu çıkarılır. Gauss yüzeyi içinde (iletken yüzeyine istenildiğince yakın olabilir) net yük sıfır olacağını-

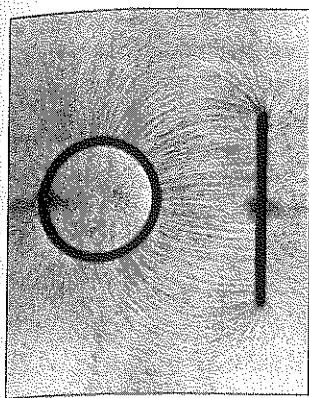
Elektrostatik dengedeki bir iletkenin özellikleri



Şekil 24.16 Bir düz E elektrik alanında iletken bir dilim. Dilimin iki yüzünde etkiyle oluşan yükler, dilim içinde bileske alanı sıfır yapacak biçimde, dış alana karşı bir elektrik alanı meydana getirirler.



Şekil 24.17 Gelişigüzel biçimli bir iletken. Kesikli çizgi, iletken içindeki bir gauss yüzeyini göstermektedir.



Zit yüklü iletken bir silindir yakınındaki yüklü iletken bir tabakanın elektrik alan deseni. Yağ içinde askıda kalmış küçük iplik parçaları elektrik alanı çizgileri ile sıraya dizilmişlerdir. (1) Elektrik alanı çizgileri her iki iletkenin diktir. (2) silindir içinde elektrik alanı çizgisi yoktur ($E = 0$). (Princeton Üniversitesinden Harold. M. Waage izniyle).

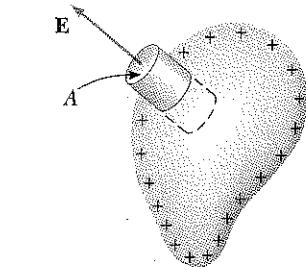
dan, iletkenin herhangi bir net yük iletken yüzeyinde bulunmak zorundadır. Bu fazla yükün iletken yüzeyinde nasıl dağıdığını Gauss yasası belirtmez.

Üçüncü özelliği doğrulamak için gauss yasası kullanılabilir. Bunun için tabanları iletken yüzeyine paralel küçük silindir biçiminde bir gauss yüzeyi uygun olur (Şek. 24.18). Silindirin bir kısmı iletkenin hemen dışında, öteki kısmı ise içindedir. Elektrostatik denge koşulu nedeniyle alan iletken yüzeyine diktir. (E nin iletken yüzeyine paralel bir bileşeni bulunsaydı serbest yükler yüzey boyunca hareket ederdi; böyle bir durumda iletken dengede olmazdı). Bu na göre silindirik gauss yüzeyinin eğri yan yüzeyi için Kesim 24.3 deki (3) koşulu sağlanır. iletkenin içinde $E = 0$ olduğundan silindirin iletken içindeki tabanından geçen akı yoktur, (4) koşulu sağlanır. Buna göre gauss yüzeyinden geçen akı, alanın gauss yüzeyine dik olduğu iletken dışındaki tabanın geçen akıdır. Bu yüzey için (1) ve (2) koşulları kullanıldığında, silindir taban yüzölçümü A , iletkenin hemen dışındaki elektrik alanı E olmak üzere akı EA dir. Gauss yasası bu yüzeye uygulandığında $q_{\text{İç}} = \sigma A$ olmak üzere;

$$\Phi_E = \oint E \, dA = EA = \frac{q_{\text{İç}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

Buradan E çözüldüğünde;

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (24.9)$$



Şekil 24.18 Yüklü bir iletkenin hemen dışındaki elektrik alanını hesaplamak için küçük silindir biçimli bir gauss yüzeyi kullanılır. Gauss yüzeyinden geçen akı $E_n A$ dir. iletken içinde E elektrik alanı sıfırdır.

elde edilir.

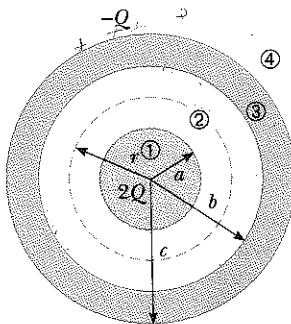
Yüklü bir iletkenin hemen dışında elektrik alanı

ÖRNEK 24.10 Küresel Tabaka İçinde Bir Küre

a yarıçaplı iletken dolu bir kürede net artı $2Q$ yükü bulunmaktadır. İç yarıçapı b , diş yarıçapı c olan iletken küresel bir tabaka, dolu küreyle aynı merkezlidir ve $-Q$ net yükünü taşımaktadır. Gauss yasasını kullanarak, tüm sistem elektrostatik dengede iken ①, ②, ③, ve ④ bölgelerindeki elektrik alanını ve küresel tabakanın yük dağılımını bulunuz.

Çözüm Küre ve tabakanın yük dağılımlarının aynı merkezli küresel simetrisi vardır. Merkezden çeşitli r uzaklıklarında elektrik alanını bulmak için söz konusu dört bölgeye her biri için küresel gauss yüzeyleri çizilit. ② bölgesi için böyle bir yüzey Şekil 24.19 da gösterilmiştir.

a yarıçaplı dolu küre içindeki E alanını bulmak için



Şekil 24.19 $-Q$ yüklü iletken küresel bir tabakaya sarılmış $2Q$ yüklü, a yarıçaplı dolu iletken bir küre.

(bölge ①), $r < a$ yarıçaplı bir gauss yüzeyi ele alınır. Elektrostatik dengede iletken içinde hiç yük bulunmayacağının dan $q_{lc} = 0$ dir. Buna göre Gauss yasasından $r < a$ için $E_l = 0$ dir.

Dolu küre yüzeyi ile tabakanın iç yüzeyi arasındaki ② bölgesinde, r yarıçaplı ($a < r < b$) küresel bir gauss yüzeyi çizilir. Bu yüzey içinde kalan yük $+2Q$ dur (dolu küredeki

yük). Küresel simetriden dolayı, elektrik alan çizgileri gauss yüzeyinde yarıçap doğrultusunda dışa doğru ve büyülükçe sabit olmalıdır. Örnek 24.4 den yararlanıp Gauss yasası kullanılarak;

$$E_2 A = E_2 (4\pi r^2) = \frac{q_{lc}}{\epsilon_0} = \frac{2Q}{\epsilon_0}$$

$$E_2 = \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{2k_e Q}{r^2} \quad (a < r < b \text{ için})$$

$r > c$, ④ bölgesinde, küresel gauss yüzeyi $q_{lc} = 2Q + (-Q) = Q$ toplam yükünü sarar. Buna göre, Gauss yasası bu yüzeye uygulandığında;

$$E_4 = \frac{k_e Q}{r^2} \quad (r > c \text{ için})$$

bulunur.

Küresel tabaka elektrostatik dengede olan bir iletken olduğundan, ③ bölgesinde elektrik alan sıfır olmalıdır. r ($b < r < c$) yarıçaplı bir Gauss yüzeyi çizilirse $E_3 = 0$ olduğundan q_{lc} sıfır olmalıdır. Buna göre, dolu küredeki $+2Q$ yükünü karşılaması için küresel tabakanın iç yüzeyindeki yükün $-2Q$ olması gerektiği sonucuna varılır. Küresel tabakadaki net yük $-Q$ olduğundan, tabakanın dış yüzeyindeki yükün $+Q$ olması gerektiği sonucuna ulaşır.

Sınamaya Sorusu 24.3

Örnek 24.10 daki tabakayı saran bir gauss yüzeyinden geçen elektrik akısı, dolu küre tabaka içinde kalmak üzere aynı merkezli olmasaydı nasıl değişirdi?

Seçmeli Kesim

24.5

GAUSS VE COULOMB YASALARININ DENEYSEL DOĞRULANMASI

Bir iletkenin net bir yük konulduğunda, bu yük iletken yüzeyine içerisindeki elektrik alanını sıfır yapacak şekilde dağılır. Bu durumda, Gauss yasasına göre, iletken içinde net yük bulunamaz. Bu kesimde bu yükün olmayacağından deneysel doğrulaması inceleneciktir.

Gauss yasasının bir yük dağılımının elektrik alan ifadesi olan Eş. 23.6 ya eş değer olduğu görüldü. Bu bağıntı Coulomb yasasından çıktıği için Gauss ve Coulomb yasalarının eşdeğer olduğu kuramsal olarak ileri sürülebilir. Bu nedenle, bu iki yasanın geçerliliği, bir iletken içinde net bir yükü ya da eşdeğer olarak elektrik alanını saptama girişimi ile sınırlanabilir. iletken içinde sıfır dan farklı bir alan saptanırsa Gauss ve Coulomb yasaları geçersiz olur. Faraday, Cavendish ve Maxwell'in önceki çalışmaları ile birlikte bir iletken içinde

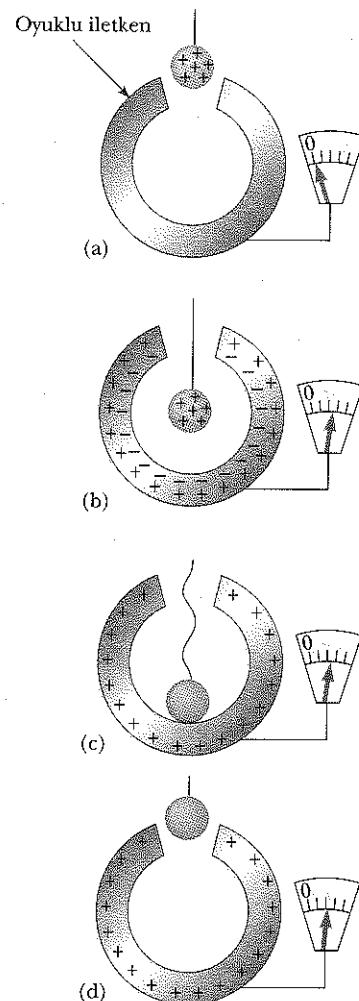
alan saptamak için yapılmıştır. Yapılan tüm çalışmalarda iletken içinde bir elektrik alan bulunamamıştır.

Yapılabilecek deneylerden biri²: bir ipek ipligin ucuna bağlı artı yüklü bir metal top, içi oyuk yüksüz topraktan yalıtılmış bir iletken üzerindeki küçük bir delikten içeriye sarkıtılmıyor (Şek. 24.20a). Artı yüklü top içi oyuk iletkenin iç çeperinde etkiyle eksi bir yük oluşturarak dış çeperde geriye eşit miktarda artı yük bırakır (Şek. 24.20b). Dış çeperde artı yük bulunduğu elektrometre (yük ölçümlünde kullanılan bir aygit ve iletkenin yalnız dış yüzeyindeki yükü ölçer) göstergesinin sapmasından anlaşılır. Metal top, aşağı indirilerek içi oyuk iletkenin iç çeperine değerlendirilir (Şekil 24.20c). Top ve iç çeper arasında yük aktarımı sonucunda her ikisi de yüksüz olur. Bu sırada göstergen, dış yüzeydeki yükün etkilenmemesi yüzünden aynı kalır. Metal top iletkeninden dışarı çıkarıldığında, elektrometre göstergesi aynı yerde kalmış ve topun yüksüz olduğu görülür (Şekil 24.20d). Bu, top ile, içi oyuk iletkenin iç yüzü arasında yük aktarımı olduğunu doğrular. Sonuçta, başlangıçta topta bulunan yük bu durumda içi oyuk iletkende ortaya çıkar. İçi oyuk iletkenin içinde ne olduğuna bakılmaksızın, iletkenin dış yüzeyindeki yükü ölçen elektrometre göstergesinin değişmeden kalması, sistemdeki net yükün her zaman iletkenin dış yüzeyinde bulunacağını gösterir.

Metal topa başka bir artı yük veriliip iletkenin dışında yakın bir yere konulursa top, iletken tarafından itilir. Bu, iletken dışında $E \neq 0$ olduğunu ortaya koyarak iletkenin net bir yük taşıdığını gösterir. Bu yüklü metal top bu kez içi oyuk yüklü iletkenin içine indirilirse hiç bir elektrik kuvveti belirtisi göstermez. Bu içi oyuk iletken içinde $E = 0$ olduğunu gösterir.

Bu deney Gauss yasasının öngörülerini ve böylece Coulomb yasasını doğrular. Gauss ve Coulomb yasalarının eşdeğer oluşu elektrik kuvvetinin ters kare davranışından ileri gelir. Buna göre bu deney, elektrik kuvvetinin $1/r^2$ davranışında üssün 2 olmasının doğrulanması olarak yorumlanabilir. Williams, Foller ve Hill'in 1971 de yaptığı deneyler Coulomb yasasındaki r üssünün $\delta = (2,7 \pm 3,1) \times 10^{-16}$ olmak üzere $(2 + \delta)$ olduğunu göstermiştir.

Anlatılan bu deneyde içi oyuk iletken içinde asılı duran yüklü top, sistemin tümüne dışarıdan bir elektrik alanı uygulanması durumunda bile hiç bir sapma göstermez. İletken içinde alan yine sıfırdır. İletkenlerin dış elektrik alanları bu önemli özelliğinden, bilgisayar parçalarının elektromanyetik perdelemesinden, hava alanları kontrol kulelerinin camlarının kule dışında oluşturulan radarın kule içindeki elektronik aygıtları olumsuz etkilenmemesi için ince metal kaplama yapılmasına kadar, bir çok yerde yararlanılır. Bu bölümün başında belirtildiği gibi trenle yolculuk eden kişiler cep telefonu ile konuşurlarken seslerini duyurabilmek için tren gürültüsünü bastıracak biçimde yüksek sesle konuşmak zorunda kahrlar. Öteki yolcuların yakınlara yanıt olarak tren şirketleri pencereleri ince metal iletkenle kaplamayı düşünmektedirler. Tren vagonlarının metal kasaları ile birlikte bu kaplama trenden cep telefon görüşmesini engelleyecektir.



Şekil 24.20 Bir iletkenin iç çeperindeki elektrik alanının gösterimi. Bir oyuklu iletkenin iç çeperine bir artı yüklü top (topa + işaretleri) yerleştirildiğinde, elektrometre göstergesi 0'a yakın bir konumda kalır. Topa - işaretleri yerleştirildiğinde, göstergen sapmadan (0) kalmıştır. Topa + işaretleri yerleştirildiğinde, elektrometre göstergesi 0'a yakın bir konumda kalır. Topa - işaretleri yerleştirildiğinde, göstergen sapmadan (0) kalmıştır. Elektrometre göstergeleri (a), (c) ve (d) durumlarında 0'a yakın, (b) durumunda ise sapmadan kalmıştır.

Ev Deneyi

Bir radyo ya da telsiz telefonu alüminyum ince bir tabakaya sarınız ve çalışıp çalışmadığını bakınız. Alüminyum ince tabakanın radyo antenine değmesinin bir önemi var mıdır?

²Bu deneye çoğu kez, ilk defa Faraday tarafından oyuk bir iletken için bir buz kovası kullanılarak yapıldığından, Faraday'ın buz kovası deneyi denir.

Seçmeli Kesim**GAUSS YASASININ ÇIKARILISI**

Gauss yasasının çıkarılışında kullanılan yöntemlerin birinde *kati açıdan* yararlanılır. ΔA yüzey öğesini içeren r yarıçaplı küresel bir yüzey ele alınınsın. Küre merkezinde, bu yüzey öğesinin gördüğü $\Delta\Omega$ katı açı

$$\Delta\Omega \equiv \frac{\Delta A}{r^2}$$

olarak tanımlanır. ΔA ve r^2 nin her ikisi de L^2 boyutunda olduğundan, bu bağıntiya göre $\Delta\Omega$ nin boyutsuz olduğu görülüyor. Boyutsuz katı açı birimine **steradyan** denir (Bu bağıntı radyanın Eş. 10.1b tanımı ile karşılaştırılabilir). Kürenin tüm yüzeyinin yüzölçümü $4\pi r^2$ olduğundan, küre merkezinde tüm kürenin görüldüğü toplam katı açı

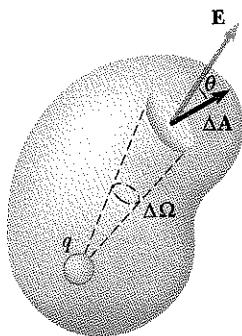
$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ steradyan}$$

dir.

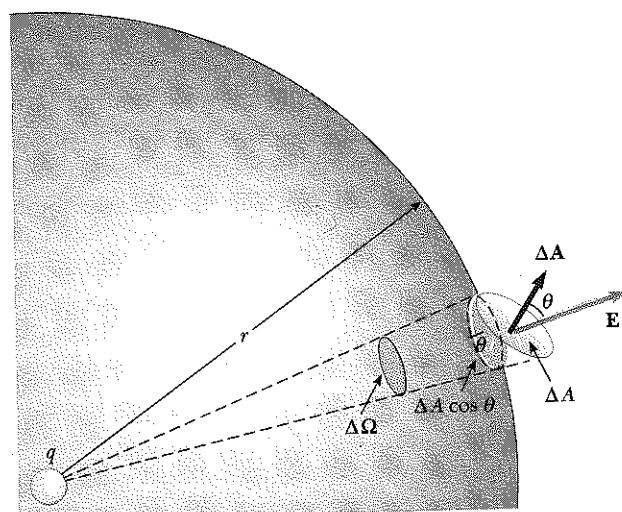
Şimdi, gelişmiş güzel biçimli kapali bir yüzeyce sarılan bir nokta yük ele alınınsın (Şekil 24.21). Bu yüzeyden geçen toplam elektrik akısı, her bir küçük ΔA yüzey öğesi için $\mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{A}$ hesaplanıp yüzeyin tüm öğeleri üzerinden toplanarak bulunabilir. Her yüzey öğesinden geçen akı

$$\Delta\Phi_E = \mathbf{E} \cdot \Delta\mathbf{A} = E \Delta A \cos \theta = k_e q \frac{\Delta A \cos \theta}{r^2}$$

olur. Burada r , yüklerin yüzey öğesine olan uzaklığı, θ ise \mathbf{E} elektrik alanı ile öğenin ΔA si arasındaki açı ve $E = k_e q / r^2$ bir nokta yük alanıdır Şekil 24.22 de yüzey öğesinin yarıçap vektöründe dik izdüşümünün $\Delta A \cos \theta$ olduğu görülüyor. Buna göre $\Delta A \cos \theta / r^2$ niceliği, ΔA yüzey öğesinin q yükünden gördüğü $\Delta\Omega$ katı açısına eşittir. Aynı zamanda, $\Delta\Omega$ nin, r yarıçaplı bir kürenin yüzey öğesinin görüldüğü katı açıyla eşit olduğu görülmüür. Bir noktadaki toplam ka-



Şekil 24.21 Gelişmiş güzel biçimli kapali bir yüzeyce sarılan bir nokta yük ele alınınsın (Şekil 24.21). Bu yüzeyden geçen toplam elektrik akısı, her bir küçük ΔA yüzey öğesi için $\mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{A}$ hesaplanıp yüzeyin tüm öğeleri üzerinden toplanarak bulunabilir. Her yüzey öğesinden geçen akı



Şekil 24.22 ΔA yüzey öğesi, q yükünden $\Delta\Omega = (\Delta A \cos \theta) / r^2$ katı açısıyla görülmüür.

ü açı 4π steradian olduğundan kapalı yüzeyden geçen toplam akı

$$\Phi_E = k_e q \oint \frac{dA \cos \theta}{r^2} = k_e q \oint d\Omega = 4\pi k_e q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

dir. Böylece Gauss yasası Eş. 24.6 çıkarılmış oldu. Bu sonuç, kapalı yüzeyin biçimi ve yükün bu yüzey içindeki konumundan bağımsızdır.

ÖZET

Elektrik akısı bir yüzeyden geçen elektrik alan çizgilerinin sayısı ile orantıdır. Elektrik alanı düzgün ve yüzey normaliyle bir θ açısı yapılıyorsa, bu yüzden geçen elektrik akısı;

$$\Phi_E = EA \cos \theta \quad (24.2)$$

olur. Genel olarak bir yüzeyden geçen elektrik akısı

$$\Phi_E = \iint_{\text{yüzey}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (24.3)$$

dir. Eş. 24.2 ve Eş. 24.3 çeşitli durumlarda özellikle simetrinin hesabı basitleştirdiği durumlarda uygulanabilir.

Gauss yasasına göre, herhangi kapalı bir gauss yüzeyinden geçen Φ_E net elektrik akısı, yüzey içindeki net yükün ϵ_0 'a bölümüne eşittir:

$$\Phi_E = \iint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{\text{ic}}}{\epsilon_0} \quad (24.6)$$

Çeşitli simetrik yük dağılımlarının elektrik alanı, Gauss yasası kullanılarak hesaplanabilir. Tablo 24.1 de bazı örneksel sonuçlar listelenmiştir.

TABLO 24.1 Gauss Yasası Kullanılarak Hesaplanan Bazı Örneksel Elektrik Alanları

Yük Dağılımı	Elektrik Alan	Konum
Q toplam yüklü, düzgün yük dağılımlı, R yarıçaplı yalıtkan küre	$\begin{cases} k_e \frac{Q}{r^2} & r > R \\ k_e \frac{Q}{R^3} r & r < R \end{cases}$	
Q toplam yüklü, R yarıçaplı küresel ince tabaka	$\begin{cases} k_e \frac{Q}{r^2} & r > R \\ 0 & r < R \end{cases}$	
λ doğrusal yük yoğunluklu, sonsuz uzun doğrusal yük	$2k_e \frac{\lambda}{r}$	Doğru dışında
σ yüzey yük yoğunluklu yalıtkan sonsuz düzlem	$\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$	Düzlemin dışında her yer
$/\sigma$ yüzey yük yoğunluklu iletken	$\begin{cases} \frac{\sigma}{\epsilon_0} & \text{İletkenin hemen dışında} \\ 0 & \text{İletkenin içinde} \end{cases}$	

Elektrostatik dengedeki bir iletken aşağıdaki özelliklere sahiptir:

1. İletken içinde her yerde elektrik alanı sıfırdır.
2. İletken üzerindeki herhangi fazla yük, tamamen iletkenin yüzeyinde bulunmaktadır.
3. İletkenin hemen dışındaki elektrik alan, yüzeye dik olup σ/ϵ_0 büyüklüğündedir. Burada σ anılan noktadaki yüzey yük yoğunluğudur.
4. Biçimi düzgün olmayan bir iletken üzerindeki yük, yüzeyin eğrilik yarıçapı en küçük olan sıvri uçlarında toplanma eğilimindedir.

Problem Çözümünde İpuçları

Gauss yasasının, yüksek simetrisi olan yük dağılımlarının işe karıştığı problemlerin çözümünde çok güçlü olduğu görüldü. Bu bölümde düzlemsel, silindirik, küresel olmak üzere, üç çeşit simetri ile karşılaşıldı. Örnek 24.4 den 24.10 a kadar olanları yeniden gözden geçirip Gauss yasası kullanırken aşağıdaki yolun izlenmesi önemlidir:

- Önce yük dağılımının simetrisine uygun olan ve Kesim 24.3 de verilen koşullardan bir ya da daha çogunu sağlayan bir gauss yüzeyi seçiniz. Nokta yükler veya küresel simetrisi olan yük dağılımları için gauss yüzeyi Örnek 24.4, 24.5, 24.6, ve 24.10 daki gibi merkezi yük üzerinde olan bir küre olmalıdır. Düzgün doğrusal yükler veya düzgün yüklü silindirler için gauss yüzeyi, Örnek 24.7 deki gibi, silindir veya doğrusal yükle aynı eksenli bir silindir yüzeyi olmalıdır. Düzlemsel yükler için uygun seçim, Örnek 24.8 deki gibi, yüzeyin iki yanına geçen silindirik bir gauss yüzeyidir. Bu seçimler Gauss yasasında bulunan, yüzeyden geçen toplam elektrik akısını temsil eden yüzey integralini basitleştirmeyi sağlar.
- Gauss yüzeyinin içindeki q_{ic} toplam elektrik yükünü bulmaya eşdeğer Gauss yasasındaki q_{ic}/ϵ_0 terimini hesaplayınız. Yük dağılımı düzgünse (yani, λ , σ veya ρ sabitse), basitçe, söz konusu yük yoğunluğunu gauss yüzeyi içinde kalan uzunluk, yüzey alanı veya hacimle çarpınız. Fakat, yük dağılımı *düzgün değilse*, yük yoğunluğunun gauss yüzeyi içinde kalan bölge üzerinden integralini alınız. Örneğin, yük bir doğru boyunca dağılmışsa $dq = \lambda dx$ bağıntısının integralini alınız. Burada, dq , sonsuz küçük bir dx uzunluk öğesindeki yüktür. Düzlemsel bir yükte, $dq = \sigma dA$ ının integralini alınız. Burada, dA sonsuz küçük bir yüzey alanı öğesidir. Hacimsel bir yükte $dq = \rho dV$ integralini alınız. Burada, dV sonsuz küçük bir hacim öğesidir.
- Gauss yasasının terimleri bir kez hesapladıkten sonra, yük dağılımı probleme verilmişse, gauss yüzeyindeki elektrik alanını bulunuz. Bunun tersine, elektrik alanı biliniyorsa, o alanı oluşturan yük dağılımını hesaplayınız.

SORULAR

1. Güneş gökyüzünde kişi yaza göre daha alçaktadır. Bu yeryüzünde belli bir yüzey alanından geçen güneş ışığı akısını nasıl değiştirir? Bu havayı nasıl etkiler?
2. Uzayın bir bölgesinde elektrik alanı sıfırsa, bu bölgede yük bulunmadığı sonucunu çıkarabilir misiniz? Açıklayınız.
3. Bir gauss yüzeyinden çıkan elektrik alan çizgileri, yüzeye girenlerden fazlaysa, bu yüzeyin çevrelediği net yük hakkında ne sonuç çıkarabilirsiniz?
4. Yüklerin olmadığı bir uzay bölgesinde düzgün bir elektrik alanı bulunmaktadır. Uzayın bu bölgесine konulan bir gauss yüzeyinden geçen net elektrik akısı hakkında ne söyleyebilirsiniz?

- 5.** Kapalı bir yüzey içindeki toplam yük biliniyor, fakat yük dağılımı belirtilmemişse, elektrik alanını bulmak için Gauss yasasını kullanabilir misiniz? Açıklayınız.
- 6.** Belli bir yükü saran kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısının, yüzeyin biçim ve büyülüğünden neden bağımsız olduğunu açıklayınız.
- 7.** Düzgün yük yoğunluğu, sonsuz büyük yalıtkan bir düzlemin elektrik alanını göz önüne alınız. Elektrik alanının düzlemden olan uzaklığa neden bağlı olmadığını, elektrik alan çizgileri arasındaki uzaklık cinsinden açıklayınız.
- 8.** Gauss yasasını kullanarak, elektrik alan çizgilerini, elektrik yüklerinden çok başka elektrik yüklerinde son bulmalarının nedenini açıklayınız. (*İpucu:* Gauss yüzeyinin büyülüğünü değiştirir.)
- 9.** Aynı yükler arasındaki kuvvetin itici özelliğini ve iletkendeki yük hareket özgürlüğünü kullanarak, yalıtlı bir iletkendeki yük fazlalığının neden iletken yüzeyinde bulunmak zorunda olduğunu açıklayınız.
- 10.** Bir insan topraktan yalıtılmış içi boş büyük bir metal

küre içine yerlesiyor. Küreye fazlaca bir yük verilirse, kürenin iç tarafına dokunmakla insana bir zarar gelir mi? Başlangıçta insanda küredekiyle zit işaretli bir yük bulunması durumunda ne olacağını açıklayınız.

- 11.** Şekil 24.20 de gösterilen gözlemler içi boş iletkenin topraklanmasıyla nasıl değişirdi? Küçük yüklü top, iletken değil de yalıtkan olsaydı bu gözlemler nasıl değişirdi?
- 12.** Şekil 24.20 deki topun yükünün içi boş iletkenne aktardığını gösteren başka hangi deney yapılabılır?
- 13.** Şekil 24.20 deki yüklü top, iletkenin iç çeperine dokunsayıdı elektrometre göstergesinde ne olurdu?
- 14.** Yıldırımlı fırtınada güvenli yerlerden birinin bir araba içi olduğunu duymuşsunuzdur. Bu neden böyledir?
- 15.** Aynı R yarıçaplı iki dolu küre aynı toplam Q yüklerini taşımaktadır. Kürelerden biri iyi bir iletken, ötekisi ise bir yalıtkandır. Yalıtkan küredeki yük, hacimine düzgün olarak dağılmışsa, bu iki kürenin dışındaki alanlar farklı mıdır? Kürelerin içlerindeki alanlar özdeş midir?

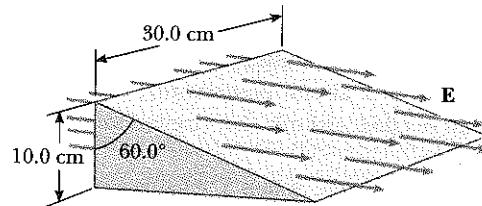
PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; = Bu problemin tam çözümü Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

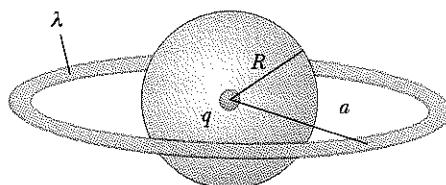
Kesim 24.1 Elektrik Akısı

- 1.** 3,50 kN/C büyülüğünde bir elektrik alanı x eksenin boyunca uygulanıyor. Uzunluğu 0,700 m, eni 0,350 m olan dikdörtgen bir düzlemden geçen elektrik akısını; (a) düzlem yz düzlemine paralel olduğunda, (b) düzlem xy düzlemine paralel olduğunda, ve (c) y eksenin düzlem içinde kalacak şekilde düzlem normali x eksenile 40° lik bir açı yaptığından hesaplayınız.
- 2.** Şimşekli bir günde yeryüzü yukarısında $2,00 \times 10^4$ N/C büyülüğünde düşey bir elektrik alanı oluşuyor. 6,00 m'ye 3,00 m boyutlarında dikdörtgen biçimli bir araba 10,0° eğimli bir yolda yokuş aşağı inmektedir. Arabanın tabanından geçen elektrik akısını bulunuz.
- 3.** 40,0 cm çaplı bir ilmek, düzgün bir elektrik alanında, en büyük akının elde edildiği konuma kadar döndürülüyor. Bu konumda $\text{a} = 5,20 \times 10^5 \text{ Nm}^2/\text{C}$ olarak ölçülüyor. Elektrik alanın büyülüğü ne kadardır?
- 4.** Küresel bir tabaka düzgün bir elektrik alanına konuyor. Tabakadan geçen toplam elektrik akısını bulunuz.
- 5.** Şekil P24.5deki gibi, kapalı üçgensel bir kutunun $E = 7,80 \times 10^4$ N/C büyülüğünde yatay elektrik alanında bulunduğu düşünülsün. (a) düşey yüzeyinden (b) eğik yüzeyinden, (c) kutunun tüm yüzeyinden geçen elektrik akısını hesaplayınız.



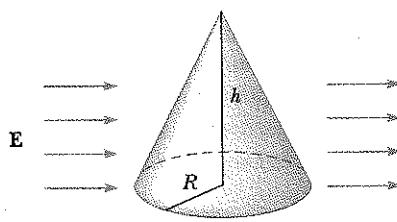
Şekil P24.5

- 6.** $ai + bj$ düzgün elektrik alanı A yüzölçümlü bir yüzeyden geçmektedir. Bu yüzölçümünden geçen elektrik akısı, yüzey; (a) yz düzleminde bulunursa, (b) xz düzleminde bulunursa, (c) xy düzleminde bulunursa, ne kadardır?
- 7.** Şekil P24.7'deki gibi bir q nokta yükü a yarıçaplı λ doğrusal yük yoğunluğu düzgün bir halkanın merkezinde bulunuyor. Merkezi bu nokta yükte olan R yarıçaplı ($R < a$) bir küreden geçen toplam elektrik akısını bulunuz.



Şekil P24.7

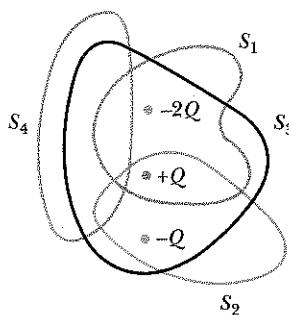
8. 6 m kenarlı kare tabanlı, 4 m yükseklikli bir piramid 52 N/C luk düşey bir elektrik alanına konuluyor. Piramidin eğik dört yüzünden geçen toplam elektrik akısını hesaplayınız.
9. Tabanı R yarıçaplı ve h yüksekliği olan bir koni yatay bir masada duruyor. Şekil P24.9'dak gibi yatay düzgün bir E alanı koniden geçmektektir. Koninin sol yanından giren elektrik akısını bulunuz.



Şekil P24.9

Kesim 24.2 Gauss Kanunu

10. 0,75 m yarıçaplı ince bir küre tabakasının yüzeyinin her yerinde elektrik alanının 890 N/C büyüklüğünde, yarıçap doğrultusunda küre merkezine yönelik olduğu bulunuyor. (a) Küre yüzeyi içindeki net yük ne kadardır? (b) Küre tabakası içindeki yük türü ve dağılımı hakkında ne söyleyebilirsiniz?
11. $5 \mu\text{C}$, $-9 \mu\text{C}$, $27 \mu\text{C}$ ve $-84 \mu\text{C}$ luk yükler bir denizaltının içine yerleştirilmiştir. (a) Denizaltıdan geçen net elektrik akısını hesaplayınız. (b) Denizaltıya giren ve çıkan elektrik alan çizgileri sayılarını karşılaştırınız.
12. Şekil P24.12 de, S_1 den S_4 e kadar dört kapalı yüzey, $-2Q$, Q ve $-Q$ yükleriyle birlikte gösterilmiştir. Her bir yüzeyden geçen elektrik akısını bulunuz.

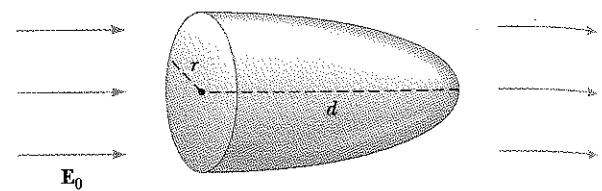


Şekil P24.12

13. (a) Bir q nokta yükü sonsuz bir düzlemden d uzaklığında bulunuyor. Bu nokta yükün düzlemden geçirildiği elektrik akısını bulunuz. (b) Bir q nokta yükü,

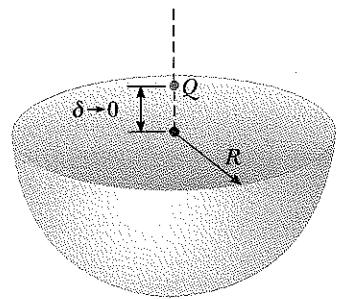
çok büyük bir karenin merkezinden geçen dikme üzerinde kareye *çok yakın* bir yerde bulunuyor. Nokta yükün kareden geçirdiği yaklaşık elektrik akısını bulunuz. (c) (a) ve (b) şıklarının yanıtlarının neden özesid olduğunu açıklayınız.

14. Şekil P24.14'deki doğrultuda E_0 büyülüklü sabit elektrik alanının paraboloid yüzeyden geçirildiği toplam elektrik akısını hesaplayınız.



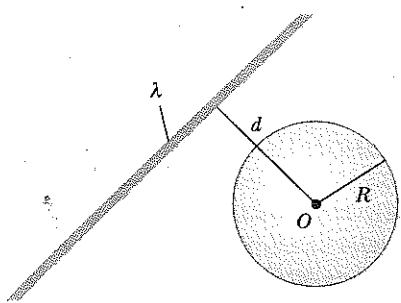
Şekil P24.14

- WEB 15. Şekil P24.15 te gösterildiği gibi, bir Q nokta yükü, R yarıçaplı yakın kürenin düzlem kısmının merkezinin hemen yukarısında bulunmaktadır. (a) eğri yüzeyden geçen elektrik akısı ne kadardır? (b) düz yüzden geçen elektrik akısı ne kadardır?



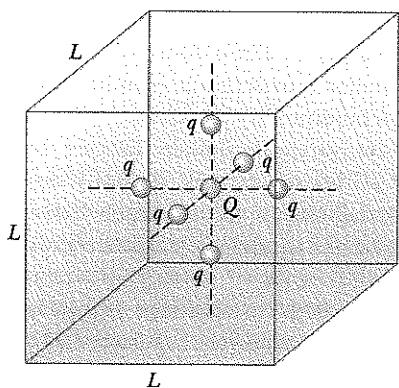
Şekil P24.15

16. $12,0 \mu\text{C}$ luk bir nokta yük, 22 cm yarıçaplı kürsell bir tabakanın merkezine konulmuştur. (a) Tabakanın tüm yüzeyinden, (b) herhangi bir yarımküre yüzeyinden geçen elektrik akısı ne kadardır? (c) Sonuçlar yarıçapbağı mıdır? Açıklayınız.
17. $0,0462 \mu\text{C}$ luk nokta yük, bir piramidin içindedir. Piramidin yüzeyinden geçen toplam elektrik akısını bulunuz.
18. Şekil P24.18'deki gibi, λ düzgün doğrusal yük yoğunluklu sonsuz uzun doğrusal bir yük 0 noktasından d uzaklığındadır. Merkezi 0 da bulunan R yarıçaplı bir küre yüzeyinden bu doğrusal yükün geçirildiği toplam elektrik akısını bulunuz. (*İpucu: $R < d$ ve $R > d$ 'nin her ikisi için de göz önüne alınır*)



Şekil P24.18

19. $Q = 5 \mu\text{C}$ luk bir nokta yük $L = 0,1$ m kenarlı bir kübün merkezinde bulunuyor. Şekil P24.19'daki gibi Q 'nın çevresinde simetrik olarak başka altı özdeş noktası $q = -1 \mu\text{C}$ yükü bulunuyor. Kübün bir yüzünden geçen elektrik akışını bulunuz.
20. Bir Q nokta yükü L kenar uzunluklu bir kübün merkezinde bulunuyor. Şekil P24.19'daki gibi Q 'nın çevresinde simetrik olarak başka altı özdeş eksi noktası yük bulunuyor. Kübün bir yüzünden geçen elektrik akışını bulunuz.

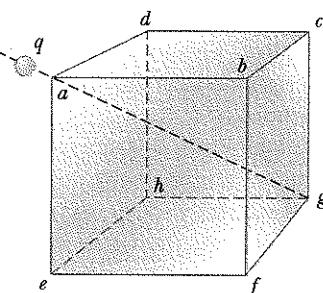


Şekil P24.19 Problem 19 ve 20

21. λ düzgün doğrusal yük yoğunluklu sonsuz uzun doğrusal bir yük veriliyor. Boyu L , yarıçapı R olan dairesel bir silindirin ekseni doğrusal yükten d uzaklığında ve doğrusal yükle paralelse, bu kapalı dik silindirden geçen toplam elektrik akışını bulunuz. (İpucu: $R < d$ ve $R > d$ durumlarının her ikisini de göz önüne alınır).
22. Merkezi, dik koordinat sisteminin başlangıç noktasında bulunan 10 cm yarıçaplı, içi boş, yalıtkan bir kürenin merkezinde $10 \mu\text{C}$ luk bir yük bulunmakta. Bu küreye z ekseni boyunca 1 mm yarıçaplı bir delik açılıyor. Bu delikten geçen elektrik akışını hesaplayınız.

23. $170 \mu\text{C}$ luk bir yük, 80 cm kenar uzunluklu bir kübün merkezindedir. (a) Kübün her bir yüzünden geçen elektrik akışını bulunuz. (b) Kübün bütün yüzlerinden geçen toplam elektrik akışını bulunuz. (c) Yük, merkeze olmasaydı (a) ve (b) ye vereceğiniz yanıtlar değişir miydi? Açıklayınız.

24. Silindir şeklindeki kapalı bir yüzeyden geçen toplam elektrik akısı $8,60 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ dir. (a) Silindir içindeki net elektrik yükü ne kadardır? (b) Verilen bilgiye dayanarak silindir içindeki yük hakkında ne söyleyebilirsiniz? (c) Net elektrik akısı $-8,60 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ olsaydı, (a) ve (b) ye vereceğiniz yanıtlar nasıl değişirdi?
25. ag doğrusu bir kübün köşegenidir (Şekil P24.25). ag doğrusunun uzantısında kübün a köşesine çok yakın bir q nokta yükü bulunuyor. a köşesinde birleşen küp yüzlerinin her birinden geçen elektrik akışını bulunuz.



Şekil P24.25

Kesim 24.3 Gauss Yasasının Yüklü Yalıtkanlara Uygulanması

26. 82 proton ve 126 nötronu olan kurşun 208 çekirdeğinin yüzeyinde elektrik alan büyüklüğünü bulunuz. Bir protonun $1,20 \times 10^{-15} \text{ m}$ yarıçaplı bir küre olduğunu ve kurşun çekirdek hacminin protonunkinin 208 katı olduğunu varsayıy়iz.
27. 40 cm yarıçaplı dolu bir kürede, hacmine düzgün olarak dağılmış $26,0 \mu\text{C}$ luk artı yük bulunmaktadır. Küre merkezinden, (a) 0 cm , (b) 10 cm , (c) 40 cm , (d) 60 cm uzaklıklarda elektrik alan büyüklüğünü hesaplayınız.
28. 7 cm yarıçaplı ve 240 cm uzunluklu bir silindir tabakasının eğri yüzeyinde düzgün dağılmış yük bulunmaktadır. Silindir ekseniinden yarıçap doğrultusunda (silindir tabakasının orta noktasından geçen) 19 cm uzaktaki bir noktada elektrik alan büyüklüğü $3,6 \times 10^4 \text{ N/C}$ dur. (a) Tabakadaki net yükü ve (b) silindir ekseniinden, silindir tabakasının orta noktasından geçen yarıçap doğrultusunda 4 cm uzaktaki bir noktada elektrik alanını bulmak için yaklaşık bağıntılar kullanınız.
- WEB 29. R yarıçaplı, ρ düzgün yük yoğunluklu uzun silindirik bir yük dağılımı düşününüz. $r < R$ olmak üzere, eksenden r uzaklıkta elektrik alanını bulunuz.

- 30.** Yalıtkan bir duvarın düzgün yük yoğunluğu $8,60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ dir. Duvardan $7,00 \text{ cm}$ uzaklıkta elektrik alanı ne kadardır? Duvardan olan uzaklık değişikçe sonuçta bir değişim olur mu?
- 31.** $32 \mu\text{C}$ luk bir yükün yüzeyine düzgün olarak dağıldığı 14 cm yarıçaplı ince bir küresel tabaka alınır. Yük dağılım merkezinden (a) $r = 10 \text{ cm}$ ve (b) $r = 20 \text{ cm}$ uzaklıklarda elektrik alanını bulunuz.
- 32.** Atom çekirdeği bölünmesinde 92 protonlu uranyum-238 çekirdeği, $5,90 \times 10^{-15} \text{ m}$ yarıçaplı 46 protonlu daha küçük ikiküreye parçalanır. Bu ikiküreyi birbirinden iten içi elektrik kuvvetinin büyüklüğü ne kadardır?
- 33.** İki lâstik balonu hava ile şişiriniz. İkisini aynı noktadan eşit uzunluklu iplerle asınız. Balonları yün ya da saçınıza sürterek aralarının açılarak askıda kalmasını sağlayınız. (a) balonlara etkiyen kuvvetin, (b) balonlardaki yükün, (c) balonlardan birisinin ötekisinin merkezinde oluşturduğu alanın, ve (d) her bir balonun toplam elektrik akısının büyülüklük mertebesini kestiriniz. Çözümünüzde veri olarak aldığınız nicelikleri ve bunların ölçüm ya da kestirim değerlerini belirtiniz.
- 34.** $+5,70 \mu\text{C}$ luk bir yük, $8,00 \text{ cm}$ çaplı yalıtkan birkürenin hacmine düzgün olarak dağılmıştır. Buküre ile aynı merkezli, (a) $r = 2,00 \text{ cm}$ ve (b) $r = 6,00 \text{ cm}$ yarıçaplı küresel yüzeyler içinde kalan yükleri hesaplayınız.
- 35.** 7 m uzunlukta, doğrusal ince bir tel üzerinde $2 \mu\text{C}$ luk artı bir yük düzgün olarak dağılmıştır. 10 cm yarıçapında 2 cm boyunda yüksüz bir karton silindir, eksenin bu tel olacak şekilde teli sarmaktadır. Akla yatkın yaklaşımlar yaparak, (a) silindir yüzeyindeki elektrik alanını ve (b) silindirden geçen toplam elektrik akısını bulunuz.
- 36.** Uzun, doğrusal ince bir telin boyca yük yoğunluğu $-90,0 \mu\text{C}/\text{m}$ dir. Telden (a) $10,0 \text{ cm}$, (b) $20,0 \text{ cm}$, (c) 100 cm dik uzaklıklardaki elektrik alanını bulunuz.
- 37.** Büyükkir düzlem yük tabakasının yüzeyce yük yoğunluğu $9,0 \mu\text{C}/\text{m}^2$ dir. Tabakanın orta noktasından itibaren, tabaka yüzeyinin hemen üzerindeki elektrik alan şiddetini bulunuz.
- Kesim 24.4 Elektrostatik Dengedeki İletkenler**
- 38.** Açık güneşli bir günde yeryüzünde yaklaşık $130 \text{ N}/\text{C}$ 'lik aşağı yönelik düşey bir elektrik alanı vardır. Bu koşullarda topraktaki yüzey yük yoğunluğu ne kadardır?
- 39.** Uzun, doğrusal metal bir çubuğun yarıçapı 5 cm ve boyca yük yoğunluğu $30 \text{ nC}/\text{m}$ dir. Çubuk ekseniinden (a) 3 cm , (b) 10 cm , (c) 100 cm uzaklıklarda elektrik alanını bulunuz.
- 40.** Çok büyük, düz, ince bir alüminyum tabakanın yüzölçümü A , yüzeylerine düzgün olarak dağılmış toplam yükü Q dur. Bu yük, aynı özelliklerdeki bir cam tabakanın üst yüzeyine düzgün dağılmış olsun, her bir tabakanın üst yüzeyinin merkezinin hemen üzerindeki elektrik alanlarını karşılaştırınız.
- 41.** Net yük olmayan 50 cm kenar uzunluklu bakır kare bir tabaka, $80 \text{kN}/\text{C}$ luk düzgün bir elektrik alanına dik olarak konuluyor. (a) Tabakanın her bir yüzündeki yük yoğunlığını ve (b) her bir yüzdeki toplam yükü bulunuz.
- 42.** İçi boş iletken birküre, aynı merkezli olacak şekilde daha büyük iletken küresel bir tabaka içine konuluyor. İçtekikürede net $-Q$ yükü, dıştakikürede ise net $+3Q$ yükü bulunmaktadır. Yükler elektrostatik dengedelerdir. Gauss yasasını kullanarak her yerdeki yükleri ve elektrik alanlarını bulunuz.
- 43.** $0,5 \text{ cm}$ yarıçaplı özdeş iki iletkenküre 2 m uzunluklu hafif bir iletken telle bağlıdır. İletkenlerden birine $60 \mu\text{C}$ yüklenirse teldeki gerilimyi bulunuz. (Yol gösterme: kürelerin her birindeki yüzey yük dağılımının düzgün olduğunu varsayıyınız.)
- 44.** Düzgün biçimli olmayan bir iletken yüzeyinde elektrik alanı $56 \text{ kN}/\text{C}$ dan $28 \text{ kN}/\text{C}$ a kadar değişmektedir. Yüzeyin eğrilik yarıçapının (a) en büyük (b) en küçük olduğu yüzey noktasında yerel yüzey yük yoğunluğunu hesaplayınız.
- 45.** Uzun doğrusal bir tel, içi boş metal bir silindirin ekseninde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Telin boyca yük yoğunluğu λ , silindirin birim uzunluk başına net yükü 2λ dir. Bu bilgiye dayanarak Gauss yasasını kullanıp (a) silindirin iç ve dış yüzeylerindeki birim uzunluk başına düşen yükü, ve (b) oyuk silindirin ekseninden r uzaklığında silindir dışında elektrik alanını bulunuz.
- 46.** $15,0 \text{ cm}$ yarıçaplı iletken küresel bir tabakada $-6,40 \mu\text{C}$ luk net bir yük, iletken yüzeyine düzgün olarak dağılmıştır. (a) tabakanın hemen dışındaki ve (b) tabaka içindeki noktalarda elektrik alanını bulunuz.
- WEB 47.** Bir kenarı $50,0 \text{ cm}$ olan ince iletken bir tabaka x düzleminde bulunuyor. Tabakaya $4,00 \times 10^{-8} \text{ C}$ luk yük verilirse, (a) tabakadaki yük yoğunluğunu, (b) tabakanın hemen üzerindeki elektrik alanını ve (c) tabakanın hemen altındaki elektrik alanını bulunuz.
- 48.** İç yarıçapı a , dış yarıçapı b olan küresel iletken bir tabakanın net yükü Q dur. Bir q nokta yükü bu tabakanın merkezine konulursa, (a) tabakanın iç yüzeyindeki ve (b) tabakanın dış yüzeyindeki yüzey yük yoğunluğunu bulunuz.
- 49.** 2 cm yarıçaplı dolu birkürenin $8 \mu\text{C}$ yükü vardır. Buküreyle aynı merkezli iletken birküre tabakanın iç yarıçapı 4 cm , dış yarıçapı 5 cm ve net yükü $-4 \mu\text{C}$ dir. Bu yük dağılımının merkezinden, (a) $r = 1,00 \text{ cm}$, (b) $r = 3,00 \text{ cm}$, (c) $r = 4,50 \text{ cm}$, ve (d) $r = 7,00 \text{ cm}$ uzaklıklardaki elektrik alanını bulunuz.

50. Artı bir nokta yük, R yarıçaplı yüksüz iletken ince bir küresel tabakanın mertezindedir. Tabakanın iç ve dışında bu düzenlenimin oluşturduğu elektrik alan çizgilerini çizimle gösteriniz.

(Seçmeli)

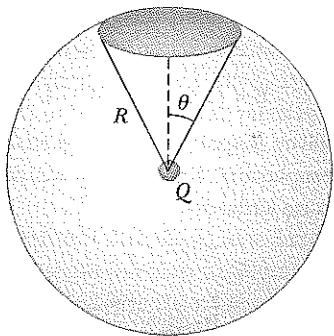
Kesim 24.5 Gauss ve Coulomb Yasalarının Deneysel Doğrulanması

Kesim 24.6 Gauss Yasasının Çıkarılması

51. Bir Q nokta yükü, R yarıçaplı bir kürenin merkezinde bulunuyor. (a) θ yarınlı açılı dairesel başlıktan (Şekil P24.51) geçen elektrik akısının

$$\Phi_E = \frac{Q}{2\epsilon_0} (1 - \cos \theta)$$

olduğunu gösteriniz. (b) $\theta = 90^\circ$ ve (c) $\theta = 180^\circ$ için akı ne kadardır?

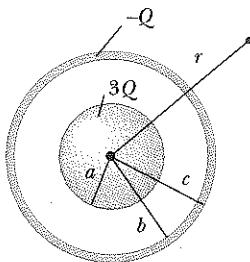


Şekil P24.51

EK PROBLEMLER

52. Düzgün olmayan bir elektrik alanı $\mathbf{E} = ax\mathbf{i} + by\mathbf{j} + cz\mathbf{k}$ bağıntısı ile veriliyor. Burada a , b ve c sabitlerdir. xy düzleminde $x = 0$ 'dan $x = w$ 'ya, $y = 0$ 'dan $y = h$ 'ya kadar uzanan bir dikdörtgen yüzeyden geçen elektrik akısını bulunuz.

53. a yarıçaplı içi dolu bir kürenin hacmine artı $3Q$ yükü düzgün olarak dağılmıştır. Bu küre ile aynı merkezli iç yarıçapı b , dış yarıçapı c olan iletken bir küre tabakası Şekil P24.53'teki gibi $-Q$ net yükü bulunuyor. (a) $r > c$ yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi çizerek bu yüzeyin sardığı net yükü bulunuz. (b) $r > c$ deki elektrik alan doğrultusu nedir? (c) $r > c$ deki elektrik alanını bulunuz. (d) $c > r > b$ bölgelerindeki elektrik alanı bulunuz. (e) $c > r > b$ olmak üzere r yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi çizip bu yüzeyin çevrelediği net yükü bulunuz. (f) $b > r > a$ olmak üzere r yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi çizip bu yüzeyin içindeki net yükü bulunuz. (g) $b > r > a$ bölgesindeki elektrik alanı bulunuz. (h) $r < a$ yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyi çiziniz ve bu yüzeyin içine aldığı net yükü r' nin fonksiyonu olarak veren bir bağıntı bulunuz. Bu yüzey içinde kalan yük $3Q$ dan azdır.

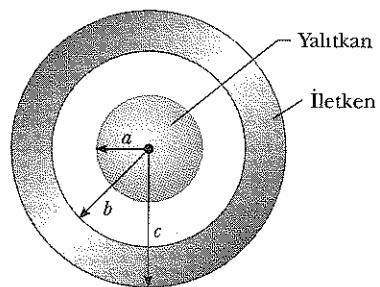


Şekil P24.53

- (i) $r < a$ bölgesinde elektrik alanı bulunuz. (j) iletken tabakanın iç yüzeyindeki yükü bulunuz. (k) iletken tabakanın dış yüzeyindeki yükü bulunuz. (l) Elektrik alan büyülüğünün r' ye göre grafiğini çiziniz.

54. Yüzeyleri arasında küçük bir uzaklık bulunan özdeş iletken iki küre ele alınız. Kürelerden birine büyük, ötekine küçük net artı yük veriliyor. Her iki kürenin net yükleri aynı işaretli olmakla birlikte kuler arasındaki kuwertin çekici olduğu bulunuyor. Buna nasıl olabildiğini açıklayınız.

- WEB 55. a yarıçaplı yalıtkan dolu bir kürenin toplam yükü Q , düzgün yük yoğunluğu ρ dur. Şekil P24.55 teki gibi, bu kürenin dışında aynı merkezli, iç yarıçapı b , dış yarıçapı c olan yüksüz iletken içi boş bir küre bulunuyor. (a) $r < a$, $a < r < b$, $b < r < c$, ve $r > c$ bölgelerindeki elektrik alan büyülüğünü bulunuz. (b) İçi oyuk kürenin iç ve dış yüzeylerinde birim yüzölçüm başına düşen induksiyonla (etkiyle) oluşan yükleri bulunuz.



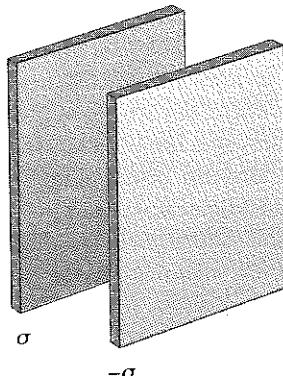
Şekil P24.55 Problem 55 ve 56.

56. Şekil 24.55 deki düzenekte, $a = 5,00$ cm, $b = 20,0$ cm, ve $c = 25,0$ cm olduğunu varsayıyız. Ayrıca, merkezden 10,0 cm uzaktaki bir noktada, elektrik alanının $3,60 \times 10^3$ N/C değerinde yarıçap boyunca içeriye doğru, merkezden 50,0 cm uzaktaki bir noktada ise $2,00 \times 10^2$ N/C değerinde yarıçap boyunca dışarıya doğru olduğunu varsayıyız. Bu bilgilere dayanarak,

(a) yalıtkan küredeki yükü, (b) içi oyuk iletken küredeki net yükü, ve (c) içi oyuk iletken kürenin iç ve dış yüzeylerindeki toplam yükü bulunuz.

57. İç yarıçapı a ve dış yarıçapı b olan sonsuz uzunlukta yalıtkan silindirik bir tabakada $\rho(\text{C}/\text{m}^3)$ düzgün hacimsel yük yoğunluğu bulunuyor. Bu tabakanın eksenine $\lambda(\text{C}/\text{m})$ doğrusal yük yoğunluklu bir yük doğrusu yerleştiriliyor. Elektrik alan şiddetini her yerde bulunuz.

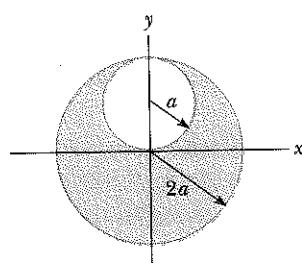
58. Şekil P24.58 deki gibi yalıtkan sonsuz iki yük tabakası birbirlerine paraleldir. Soldaki tabakanın düzgün yük yoğunluğu σ , sağdakinin ise $-\sigma$ dir (a) tabakaların solunda, (b) arasında, ve (c) sağında bulunan noktalardaki elektrik alan değerini hesaplayınız. (İpucu: Örnek 24.8 e bakınız.)



Şekil P24.58

WEB [53] Problem 58 deki hesapları, her iki tabakada pozitif σ düzgün yük yoğunluğu olması durumunda yineleyiniz.

60. $2a$ yarıçaplı yalıtkan bir kürenin düzgün ρ hacimsel yük yoğunluğu vardır. (Yalıtkan maddenin elektrik alanını etkilemediğini varsayıyın.) Şekil P24.60 daki gibi bu küreden a yarıçaplı bir kür çarpararak bir oyuk oluşturuluyor. Bu oyuk içinde elektrik alanının düzgün ve $E_x = 0$, $E_y = \rho a / 3\epsilon_0$ ile verildiğini gösteriniz. (İpucu: oyuktaki alan, başlangıçtaki içi oyulmuş kürenin alanı ile oyuk büyüğünden düzgün $-\rho$ yük yoğunluklu bir kürenin alanının üst üste binmesinden oluşur.)



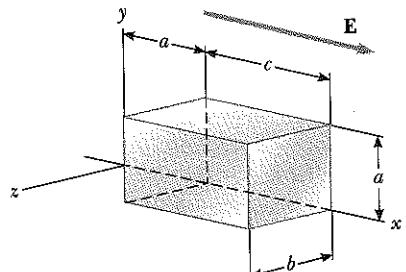
Şekil P24.60

61. **Tarama Problemi.** J.J. Thomson tarafından önerilen ilk hidrojen atom modeline göre (yanlışlı), $+e$ yük bulutu, R yarıçaplı bir kür hacmine düzgün olarak dağılmıştı. Merkezde de, eşit büyüklükte $-e$ kadarlık nokta yüklü elektron bulunuyordu. (a) Gauss yasasını kullanarak, elektronun merkezde dengede olduğunu ve $r < R$ olacak şekilde elektron merkezden r kadar uzaklığında, K bir sabit olmak üzere, elektrona etkiyen geri çağırıcı kuvvetin $F = -Kr$ şeklinde olduğunu gösteriniz. (b) $K = k_e^2/R^3$ olduğunu gösteriniz. (c) m_e küteli elektron merkezden biraz uzaklaştırılıp ($r < R$) serbest bırakıldığında yapacağı basit harmonik sahnimların f frekansı için bir bağıntı bulunuz. (d) Hidrojen spektrumunda en şiddetli çizgiye karşılık gelen ışık frekansı olan $2,47 \times 10^{15}$ Hz elektron titreşim frekansını vermek üzere R için sayısal bir değer hesaplayınız.

62. Boyutları $a = b = 0,400$ m ve $c = 0,600$ m olan kapalı bir yüzey Şekil P24.62 deki gibi yerleştirilmiştir. Bölgedeki elektrik alanı düzgün olmayıp, x metre ile belirtilmek üzere,

$$\mathbf{E} = (3,0 + 2,0x^2)\mathbf{i} \text{ N/C}$$

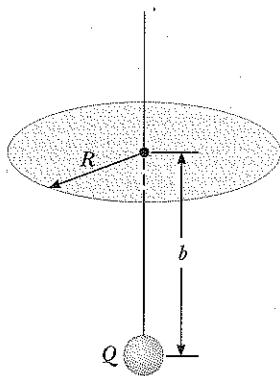
ile veriliyor. Kapalı yüzeyden çıkan net elektrik akısını hesaplayınız. Kapalı yüzey içinde kalan net yük miktarı ne kadardır?



Şekil P24.62

- [53] **R** yarıçaplı yalıtkan dolu bir küre, r ye göre değişimi, A bir sabit, $r < R$ kür merkezinden ölçmek üzere, $\rho = Ar^2$ bağıntısı ile verilen düzgün olmayan bir yük yoğunluğununa sahiptir. (a) Küre dışında ($r > R$) elektrik alanın, $E = AR^5/5\epsilon_0 r^2$ olduğunu gösteriniz. (b) Küre içinde ($r < R$) elektrik alanın, $E = Ar^3/5\epsilon_0$ ile verildiğini gösteriniz. (İpucu: Küredeki toplam Q yükü, r , 0 dan R ye kadar değiştirmek üzere ρdV nin integraline eşittir. $r < R$ yarıçapı içinde kalan q yükü Q dan daha azdır. İntegralerin hesabında kullanılan r yarıçapı, dr kalınlaklı kürsel tabakadan oluşan dV hacim ögesi $4\pi r^2 dr$ ye eşittir.)

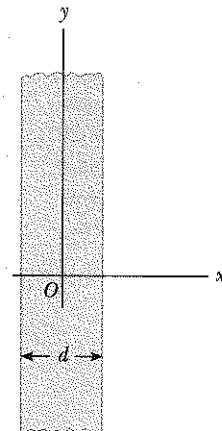
64. Bir Q nokta yükü, R yarıçaplı bir diskin ekseni üzerinde, disk düzleminden b uzaklığında bulunuyor (Şekil P24.64). Yukten çıkan elektrik akısının dörtte biri diskiten geçtiğinde, $R = \sqrt{3}b$ olduğunu gösteriniz.



Şekil P24.64

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho e}{m_e \epsilon_0}}$$

frekansıyla basit harmonik hareket yapacağını gösteriniz.



Şekil P24.67 Problem 67 ve 68

65. Küresel simetrik bir yük dağılımının a sabit olmak üzere yük dağılımı $\rho = a/r$ dir. Elektrik alanının r 'nin fonksiyonu olarak bulunuz. (İpucu: R yarıçaplı bir küre içindeki yük, r , 0 'dan R 'ye kadar değişimek üzere, ρdV 'nin integraline eşittir. Integral hesabında kullanılan r yarıçaplı dr kalınlıklı küresel tabakadan oluşan dV hacim ögesi $4\pi r^2 dr$ ye eşittir.)

66. R yarıçaplı sonsuz uzunluklu yalıtkan bir silindirin hacimsel yük yoğunluğu yarıçap'a

$$\rho = \rho_0 \left(a - \frac{r}{b} \right)$$

şeklinde bağlıdır. Burada, ρ_0 , a ve b artı sabitler olup r , silindir ekseninden olan uzaklıktır. Gauss yasasını kullanarak (a) $r < R$ ve (b) $r > R$ yarıçap doğrultusundaki uzaklıklarda elektrik alan büyüklüğünü bulunuz.

67. **Tarama Problemi.** Şekil P24.67 de yandan görünüşü verilen, iki boyutu sonsuz olan yalıtkan bir madde diliminin, düzgün artı ρ yük yoğunluğu vardır. (a) Dilim içinde dilim merkezinden x uzaklığında elektrik alanının $E = \rho x / \epsilon_0$ olduğunu gösteriniz. (b) $-e$ yükünde ve m_e kütlesinde bir elektronun dilim içine konulduğunu varsayıy়iz. Dilim merkezinden x uzaklığında elektronun durgun halden serbest bırakılması durumunda,

68. Yalıtkan bir madde diliminin, düzgün olmayan artı $\rho = Cx^2$ yük yoğunluğu vardır. Burada x , Şekil 24.67 deki gibi dilimin merkezinden ölçülmüştür ve C bir sabittir. Dilim y ve z doğrultularında sonsuzdur. (a) dilimin dışındaki bölgelerde ve (b) dilimin içindeki bölgelerde ($-d/2 < x < d/2$) elektrik alanını veren bağıntıları çıkarınız.

69. (a) Coulomb yasası ile Newton'un evrensel kütleçekim yasası arasındaki matematiksel benzerlikten yararlanarak kütleçekim Gauss yasası

$$\oint \mathbf{g} \cdot d\mathbf{A} = -4\pi G m_{ic}$$

şeklinde yazılabilir. Burada m_{ic} , gauss yüzeyi içindeki kütledir ve $\mathbf{g} = Fg/m$ gauss yüzeyinin herhangi bir noktasındaki kütleçekim alanını gösterir. (b) Yerkürenin kütle yoğunluğunun düzgün olduğunu varsayıy়iz $r < R_E$ olmak üzere yerküre merkezinden r uzaklığındaki kütleçekim alanını bulunuz.

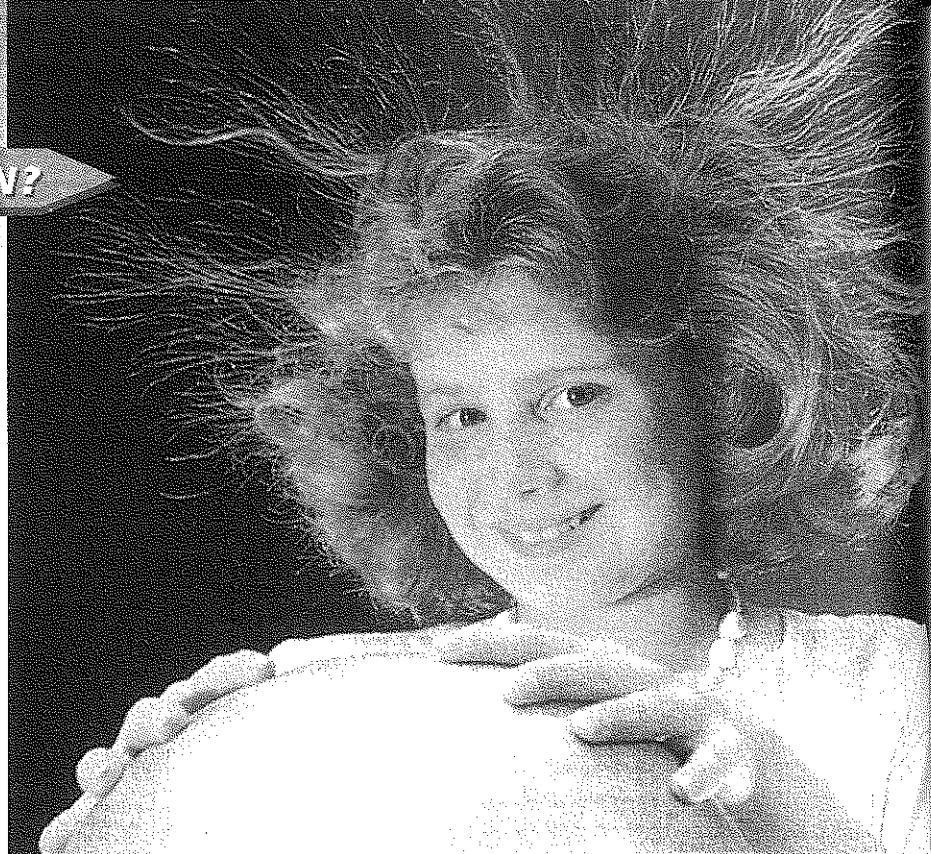
SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 24.1 Yüzey içindeki net yük bulunmadığından sıfırdır.
 24.2 (b) ve (d). Yüzey içinde eşit sayıda artı ve eksi yükler bulunabileceğinden (a) ifadesi zorunlu olarak doğru değildir. Şekil 24.8'den görülebileceği gibi, (c) ifadesi zorunlu olarak doğru değildir: yüzeyin her yerinde sıfırdan farklı elektrik alanı vardır, fakat yüzeyin içinde değildir; bundan dolayı net akı sıfırdır.

- 24.3 Sistemin öğelerinin hareketine bakılmaksızın sistemi çevreleyen herhangi bir gauss yüzeyi içinde aynı miktarda yük bulunur. Buna göre gauss yüzeyinden geçen akı, küre ve tabakanın aynı merkezli olmasındaki gibidir.

SİZCE NEDEN?

Jennifer, yaklaşık 100 000 voltluk potansiyele ulaşmış yüklü bir iletken kureyi elleriyle tutmaktadır. Bu aygit çok yüksek potansiyel üreten bir Van de Graaff jeneratörüdür. Jennifer'in saç uçlarının büyük bir kirpi gibi ığne şeklini alması hakkında ne söylebilirsiniz? Duvardaki prizde 110 volt'luk çıkışın sizi öldürebileceği bir gerçek olduğuna göre, neden o bu durumda emniyettedir? (Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle).



b ö l ü m

25

Elektriksel Potansiyel

Bölüm İçeriği

- 25.1 Elektriksel Potansiyel ve Potansiyel Farkı
- 25.2 Düzgün bir Elektrik Alandaki Potansiyel Farkları
- 25.3 Elektriksel Potansiyel ve Noktasal Yüklerin Oluşturduğu Potansiyel Enerji
- 25.4 Elektriksel Potansiyelden Elektrik Alan Elde Edilmesi
- 25.5 Sürekli Yük Dağılımının Oluşturduğu Elektriksel Potansiyel
- 25.6 Yüklü Bir iletkenin Potansiyeli
- 25.7 (Seçmeli) Milikan'ın Yağ Damlası Deneyi
- 25.8 (Seçmeli) Elektrostatığın Uygulamaları

Potansiyel enerji kavramı, ilk defa, yayın esneklik kuvveti ve yerçekimi gibi korunumlu kuvvetlerin yer aldığı Bölüm 8'de anlatılmıştı. Çeşitli mekanik problemlerin çözümünde, enerji korunumu yasasını kullanarak doğrudan doğruya kuvvetle çalışmaktan sakınmıştık. Elektriğin incelenmesini içeren bu bölümde de enerji kavramının büyük değer taşıdığını göreceğiz. Coulomb yasası ile verilen elektrostatik kuvvet korunumlu olduğundan, elektrostatik olaylar elektriksel potansiyel enerji vasıtasıyla rahatça açıklanabilir. Bu fikir, skaler bir büyülük olan *elektriksel potansiyelin* tanımlanmasına olanak sağlar. Elektrik alan içindeki herhangi bir noktada elektriksel potansiyel skaler bir fonksiyon olduğundan, elektrostatik olayların tasvirinde potansiyeli kullanmak, elektriksel kuvvet ve elektrik alan kavramlarından çok daha basit olur. Daha sonraki bölümlerde elektriksel potansiyel konusunun büyük bir pratik öneme sahip olduğunu göreceğiz.

25.1 POTANSİYEL FARKI VE ELEKTRİKSEL POTANSİYEL

Diger yüklü cisimler tarafından oluşturulan bir \mathbf{E} elektrostatik alanı içine bir q_0 deneme yükü konulduğunda, bu deneme yükü üzerine etki eden elektriksel kuvvet $q_0\mathbf{E}$ dir. (Eğer elektrik alan birden fazla yüklü cisim tarafından üretiliyorsa, deneme yükü üzerine etki eden bu kuvvet, diğer yüklü cisimler tarafından uygulanan kuvvetlerin vektörel toplamı olur). $q_0\mathbf{E}$ kuvveti korunumludur, çünkü Coulomb yasası ile verilen bireysel kuvvetler korunumludur. Bazı dış etkenle deneme yükü elektrik alan içinde hareket ettirilirse, yük üzerine alan tarafından yapılan iş, yer değiştirmeye neden olan dış etken tarafından yapılan işin negatifine eşittir. Sonsuz küçük bir ds yerdeğiştirmesi için, yük üzerine elektrik alan tarafından yapılan iş, $\mathbf{F} \cdot ds = q_0\mathbf{E} \cdot ds$ ile verilir. Alan tarafından bu miktarda iş yapılırken yük alan sisteminin potansiyel enjisi $dU = -q_0\mathbf{E} \cdot ds$ kadar azalır. Deneme yükünün A ve B noktaları arasında sonlu bir yerdeğiştirmesi halinde, sistemin $\Delta U = U_B - U_A$ potansiyel enerji değişimi,

$$\Delta U = -q_0 \int_A^B \mathbf{E} \cdot ds \quad (25.1)$$

ile verilir. İntegral q_0 yükünün A dan B'ye gittiği yol boyunca alınır ve adına *yol integrali* veya *cizgi integrali* denir. Bu iki terim eşanlamlıdır. $q_0\mathbf{E}$ kuvveti korunumlu olduğundan, bu *cizgisel integral A ve B noktaları arasında alınan yola bağlı değildir.*

Potansiyel enerji değişimi

Sinama Sorusu 25.1

A ve B arasındaki yol, 25.1 Eşitliğinde hiç bir farklılık meydana getirmiyorsa, biz niçin tam olarak $\Delta U = -q_0Ed$ bağıntısını kullanmıyoruz? Bu ifadede d değeri A ve B arasında doğrusal uzaklıktır.

Birim yük başına U/q_0 potansiyel enerjisi, q_0 'nın değerinden bağımsızdır ve elektrik alan içinde her noktada tek değere sahiptir. Bu U/q_0 niceğine **elektriksel potansiyel V** (veya kısaca **potansiyel**) denir. O halde elektrik alanın herhangi bir noktasındaki elektriksel potansiyel

$$V = \frac{U}{q_0} \quad (25.2)$$

dir ve potansiyel de skaler bir niceliktir.

Bir elektrik alan içinde A ve B gibi herhangi iki nokta arasındaki $\Delta V = V_B - V_A$ **potansiyel farkı**, sistemin potansiyel enerjisindeki değişimin, q_0 deneme yüküne oranı olarak tanımlanır:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (25.3)$$

Potansiyel farkı, hiç bir suretle potansiyel enerji ile karıştırılmamalıdır. Potansiyel farkı, potansiyel enerji ile orantılıdır ve Eşitlik 25.3'te görüldüğü gibi iki si birbirine $\Delta U = q_0 \Delta V$ ile bağlıdır.

Elektriksel potansiyel elektrik alanın skaler bir karakteristiğidir ve alan içinde bulunan yükden bağımsızdır. Fakat, potansiyel enerjiden bahsederken **alan-yük sistemini** kastederiz. Çünkü çoğu zaman, yükün bulunduğu yerdeki elektriksel potansiyeli ve yükün alanla etkileşmesi sonucu ortaya çıkan potansiyel enerjiyi biliyor olduğumuzdan, sanki yüke aitmiş gibi, potansiyel enerji yaygın söyleşisini kullanırız.

Bir yükün potansiyel enerjisindeki değişim, elektriksel kuvvet tarafından yapılan işin negatifine eşit olduğundan (Eşitlik 25.1'de belirtildiği gibi), A ve B noktaları arasındaki ΔV potansiyel farkı, kinetik enerjide bir değişme olmaksızın, bir deneme yükünü bir dış etken tarafından A dan B ye götürmek için birim yük başına yapılması gereken işe eşittir.

Potansiyel enerjide olduğu gibi, sadece elektriksel potansiyeldeki *farklar* anlamlıdır. Fakat potansiyel farkı ile çalışırken, çoğu zaman elektrik alanında uygun bir noktanın elektriksel potansiyelinin değerini sıfır seçeriz. Çünkü elektriksel potansiyeli bir noktada sıfır olarak almak demek, o noktada alanı üreten yüklerden sonsuz uzakta bulunmak demektir. Bu tercihi yapınca da, **bir elektrik alan içindeki keyfi bir noktadaki elektriksel potansiyel, pozitif deneme yükünü sonsuzdan bu noktaya getirmek için birim yük başına yapılan işe eşit olduğunu söyleyebiliriz.** O halde, 25.3 Eşitliğindenki A noktasını sonsuzda ki bir nokta olarak alırsak, herhangi bir P noktasındaki elektriksel potansiyel

$$V_P = - \int_{\infty}^P \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (25.4)$$

şeklini alır. Gerçekte V_P , sonsuzdaki bir nokta ile P noktası arasındaki ΔV potansiyel farkını temsil eder. (Eşitlik 25.4, Eşitlik 25.3'ün bir özel durumudur.)

Potansiyel farkı, birim yük başına enerjinin bir ölçüsü olduğundan, elektriksel potansiyel ve potansiyel farkının SI sistemindeki birimi, Coulomb başına joule'dür. Kisaca **Volt (V)** olarak tanımlanır:

$$1 \text{ V} \equiv 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Yani, 1 V'luk potansiyel farkı boyunca 1 C'luk yükü götürmek için yapılması gereken iş 1 J'dür.

Eşitlik 25.3'e göre potansiyel farkı aynı zamanda, elektrik alanla uzaklık birimlerinin çarpımına eşittir. Bu nedenle, elektrik alanın SI birimi (N/C), metre başına volt şeklinde de ifade edilebilir:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Atom Fiziğinde ve Nükleler Fizikte enerji birimi olarak genellikle elektron volt kullanılır. Bu da 1V büyüklüğündeki potansiyel farkı boyunca hareket eden bir elektron (veya proton) un kazadığı veya kaybettiği enerji olarak tanımlanır. $1\text{ V} = 1\text{ J/C}$ ve bir temel yük yaklaşık olarak $1,60 \times 10^{-19}\text{ C}$ 'a eşit olduğundan elektron volt'un (eV) joule cinsinden değeri:

$$1\text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}\text{ C} \cdot \text{V} = 1,60 \times 10^{-19}\text{ J} \quad (25.5)$$

Elektron volt

Örneğin tipik bir TV resim tüpünde bulunan elektron (veya katod ışını tüpü) demetindeki elektronların hızları $3,5 \times 10^7\text{ m/s}$ 'dir. Bu $5,6 \times 10^{-16}\text{ J}$ 'luk kinetik enerjiye karşılık gelir ki bu da $3,5 \times 10^3\text{ eV}$ 'a eşdeğerdir. Elektron bu sürate ulaşması için, durgun halden $3,5\text{ kV}$ 'luk potansiyel farkına kadar hızlanmalıdır.

25.2 DÜZGÜN BİR ELEKTRİK ALANDAKI POTANSİYEL FARKLARI

25.1 ve 25.3 Eşitlikleri, alan düzgün olsun veya olmasın bütün elektrik alanlarında geçerlidir, fakat alan düzgün olursa daha da basitleşirler. Önce, düzgün bir elektrik alanının negatif y ekseni boyunca yöneldiği durumu inceleyelim (Şekil 25.1a). Aralarındaki uzaklık d olan A ve B gibi iki nokta arasındaki potansiyel farkını hesaplayalım. d alan çizgilerine paralel olsun. O zaman 25.3 Eşitliği,

$$V_B - V_A = \Delta V = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \int_A^B E \cos 0^\circ ds = - \int_A^B E ds$$

olar. E sabit olduğundan, bunu integral işaretinin dışına çıkarırsak

$$\Delta V = -E \int_A^B ds = -Ed \quad (25.6)$$

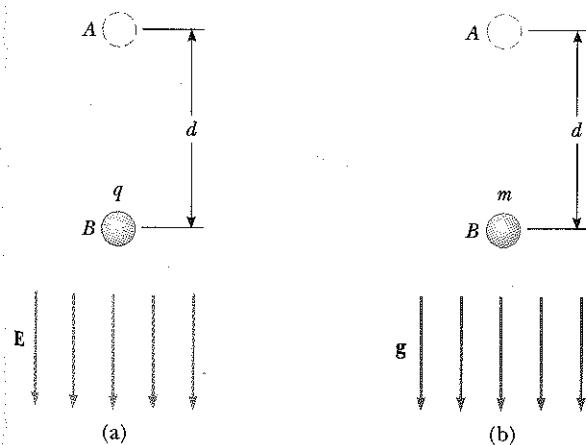
ASAGI doğru ↓

Düzgün bir E alanındaki potansiyel farkı

olar. Bu ifadedeki eksi işaret, B noktasının A noktasından daha düşük potansiyelde olmasından kaynaklanır, yani $V_B < V_A$ dir. Şekil 25.1a'da görüldüğü gibi, elektrik alan çizgileri, daima elektriksel potansiyelin azalan doğrultusunu gösterir.

Şimdi q_0 deneme yükünün A dan B ye gittiğini varsayıyalım. Potansiyel enerjisindeki değişimyi, Eşitlik 25.3 ve 25.6'den hesaplayabiliriz:

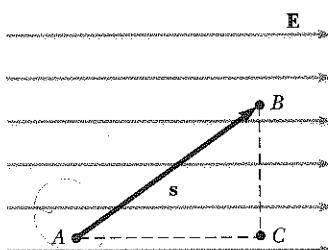
$$\Delta U = q_0 \Delta V = -q_0 Ed \quad (25.7)$$



Şekil 25.1 (a) E elektrik alanı aşağı doğru yöneldiğinde, B noktasındaki potansiyel, A noktasındakiinden daha azdır. Pozitif bir deneme yükü A noktasından B noktasına gittiğinde elektriksel potansiyel enerji kaybeder. (b) Yerin g çekim alanında aşağı doğru inen bir m kütlesi de kütle-çekim potansiyel enerji kaybeder.

Ev Deneyi

Kuru havada elektrik alan yaklaşık 30 00 V/cm değerini alırsa, elektrik atlamasına (krilçuma) neden olur. Bir halinin bir kenarından diğer kenarına ayaklarınızı sürerek yürümün ve bir kapı koluna doğru gidin. Kapı koluna dokunmadan önce, ama ayaklarınızı sürerek yürümeden sonra, kapı kolu ve parmağınızın arasında elektrik atlamasının uzunluğunu kestirerek elektriksel potansiyel farkını belirleyebilirsiniz. (Bu deneyi yapmak istediğiniz gün havadaki nem çok yüksekse, sizin çalışmanız olumsuz olacaktır. Neden?)



Şekil 25.2 Pozitif x eksenini boyunca yönen düzgün bir elektrik alan. B noktası A noktasından daha düşük potansiyeldedir. B ve C noktaları *aynı* elektrik potansiyelidir.

11.9

Espotansiyel yüzey

Bu sonuçtan görürüz ki q_0 pozitifse, ΔU negatif olmaktadır. Bu demektir ki, **bir pozitif yük elektrik alan doğrultusunda hareket ederse, elektriksel potansiyel enerji kaybeder** sonucuna varırız. Bu demektir ki, yükün hareketi elektrik alan doğrultusunda olduğu zaman, elektrik alan pozitif yük üzerine iş yapar. (Şekil 25.1b'de görüldüğü gibi, bir kütlenin çekim alanında daha düşük bir yüksekliğe doğru indikçe çekim alanının iş yapmasına benzer. Bir pozitif deneme yükü, bu elektrik alan içinde durgun halden serbest bırakılırsa, E elektrik alan doğrultusunda $q_0 E$ elektriksel kuvvetin etkisi altında kalır (Şekil 25.1a'daki aşağı doğru). Böylece yük, kinetik enerji kazanarak aşağı doğru hızlanır. Yüklü parçacık, kazandığı kinetik enerjiye eşit miktarda potansiyel enerji kaybeder.

Öte yandan, q_0 negatifse, ΔU pozitif olur ve olay ters yönde gelir. Negatif yük, elektrik alan doğrultusunda hareket ettiği zaman **elektriksel potansiyel enerji kazanır**. Bir negatif yük E elektrik alan içinde durgun halden serbest bırakılırsa, elektrik alana zıt doğrultuda ivmelenir.

Şimdi, Şekil 25.2'deki gibi, x ekseni boyunca kurulan düzgün bir elektrik alan içinde, herhangi iki nokta arasında hareket eden bir yüklü parçacığın daha genel durumunu inceliyelim. (Bu durumda yük, daha önce olduğu gibi bir dış etkenle hareket ettirilmemektedir.) A ve B noktaları arasındaki yerdeğiştirme vektörünü s ile gösterilirse, Eşitlik 25.3'ten,

$$\Delta V = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \mathbf{E} \cdot \int_A^B d\mathbf{s} = - \mathbf{E} \cdot \mathbf{s} \quad (25.8)$$

elde edilir. Burada da \mathbf{E} sabit olduğundan integralin dışına çıkardık. Ayrıca, yükün potansiyel enerjisindeki değişim

$$\Delta U = q_0 \Delta V = -q_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{s} \quad (25.9)$$

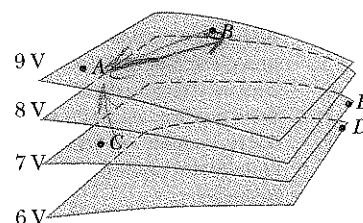
oları.

Son olarak Eşitlik 25.8'den, düzgün bir elektrik alana dik olan düzlem üzerindeki bütün noktaların aynı potansiyelde olduğu sonucunu çıkarabiliriz. Bu durum Şekil 25.2'de kolayca görülür yani, $V_B - V_A$ potansiyel farkı, $V_C - V_A$ potansiyel farkına eşittir. Şekil 25.2'de s ve E arasındaki açıyi keyfi olarak θ alarak, $\mathbf{E} \cdot \mathbf{s}$ nokta çarpımını $s_{A \rightarrow B}$ için ve $\theta = 0$ alarak $s_{A \rightarrow C}$ nokta çarpımını kullanarak kendiniz ispatlayınız.) Bu nedenle $V_B = V_C$ olur. **Aynı potansiyele sahip olan noktaların sürekli dağılımlarının oluşturduğu herhangi bir yüzeye eşpotansiyel yüzey adı verilir.**

$\Delta U = q_0 \Delta V$ olduğundan, bir deneme yükünün bir eş potansiyel yüzey üzerinde herhangi iki noktası arasındaki hareketinde hiç bir iş yapılmayacağına dikkat ediniz. Düzgün bir elektrik alanının eşpotansiyel yüzeyleri, tümü bu alana dik olan düzlem ailesinden ibarettir. Diğer simetrisiyle birlikte, bir alanın eşpotansiyel yüzeyleri bundan sonraki kesimlerde anlatılacaktır.

Sınamaya Sorusu 25.2

Şekil 25.3'teki noktalar, bir elektrik alanına ait bir takım eşpotansiyelli yüzeyler üzerinde dir. Bir pozitif yüklü parçacık, A'dan B'ye; B'den C'ye; C'den D'ye; D'den E'ye hareket ettiğinde elektrik alan tarafından yapılan işi (büyükten küçüğe) sıralayınız.



Şekil 25.3 Dört adet eşpotansiyelli yüzey.

ÖRNEK 25.1 Zit Yüklü İki Paralel Levha Arasındaki Elektrik Alanı

Batarya, belirli bir potansiyel farkının batarya kutularına bağlanmış iletkenler arasında oluşturur. 12 V'luk bir batarya, iki paralel levha arasına Şekil 25.4'teki gibi bağlanıyor. Levhalar arasındaki uzaklığın $d = 0,30\text{ cm}$ ve elektrik alanın düzgün olduğu varsayılmıyor. (Bu varsayımlı, levhalar arasın-

daki uzaklık, levhaların büyülüklüğü yanında küçükse ve levha kenarlarındaki noktalar dikkate alınmıyorsa geçerlidir.) Levhalar (plakalar) arasındaki elektrik alanın siddetini bulunuz.

Çözüm Elektrik alan, pozitif levhadan (A) negatif levhaya (B) doğrudur ve pozitif levha negatif levhadan daha yüksek potansiyeldedir. Levhalar arasındaki potansiyel farkı, bataryanın kutuları arasındaki potansiyel farkına eşit olmak zorundadır. Bu durum, dengedeki bir iletken üzerinde bütün noktaların aynı potansiyelde olduğuna dikkat ederek anlaşılabılır.¹ Böylece bataryanın bir ucu ile bu bataryanın bağlı olduğu levhaların herhangi bir kısmını arasında potansiyel farkı bulunmaz. Bu nedenle Eşitlik 25.6'dan levhalar arasındaki elektrik alanın büyüklüğü

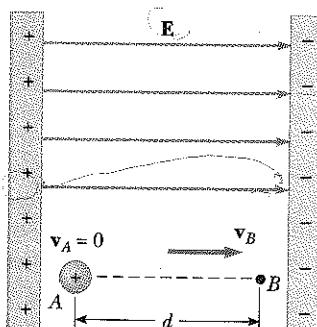
$$E = \frac{|V_B - V_A|}{d} = \frac{12\text{ V}}{0,30 \times 10^{-2}\text{ m}} = 4,0 \times 10^3\text{ V/m}$$

olar. Şekil 25.4'te gösterilen düzenlemeye *paralel plakalı (levhalı) kondansatör* denir ve (Bölüm 26'da) daha ayrıntılı incelenecaktır.

ÖRNEK 25.2 Bir Protonun Düzgün Bir Elektrik Alan İçindeki Hareketi

Bir proton, pozitif x ekseni doğrultusunu boyunca yönelen $8,0 \times 10^4\text{ V/m}$ lik düzgün bir elektrik alan içinde durgun halden serbest bırakılıyor (Şekil 25.5). Proton bu E elektrik alanın etkisiyle $0,50\text{ m}$ yerdeğiştiriliyor. (a) A ve B noktaları arasındaki elektriksel potansiyeldeki değişimi bulunuz.

Çözüm Protonun (pozitif yük taşıdığını hatırlayınız) elektrik alan doğrultusunda hareket ettiğinden, onun daha düşük elektriksel potansiyele doğru hareket etmesini bekleriz. Eşitlik 25.6 kullanılarak,



Şekil 25.5 Bir proton, elektrik alan doğrultusunda A dan B ye doğru hızlanır.

$$\begin{aligned} \Delta V &= -Ed = -(8,0 \times 10^4\text{ V/m})(0,50\text{ m}) \\ &= -4,0 \times 10^4\text{ V} \end{aligned}$$

bulunur.

(b) Bu yerdeğiştirme için protonun potansiyel enerjisindeki değişimi bulunuz.

Çözüm

$$\begin{aligned} \Delta U &= q_0 \Delta V = e \Delta V \\ &= (1,6 \times 10^{-19}\text{ C})(-4 \times 10^4\text{ V}) \\ &= -6,4 \times 10^{-15}\text{ J} \end{aligned}$$

Buradaki negatif işaret, elektrik alan doğrultusunda hareket eden protonun potansiyel enerjisindeki azalmayı belirler. Bu, proton E doğrultusunda ivmeleştikçe kinetik enerji kazanırken aynı zamanda elektrik potansiyel enerji kaybeder anlamına gelir (çünkü toplam enerji korunur).

Alıştırma Enerji korunum kavramını kullanarak B noktasındaki protonun hızını bulunuz.

Cevap $2,77 \times 10^6\text{ m/s}$

Elektrostatik dengede bulunan bir iletken içinde elektrik alan bulunmaz. Böylelikle, iletken içindeki herhangi iki nokta arasındaki $\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ yol integrali sıfır olmak zorundadır. Bu durumun tam bir tartışması Kesim 25.6'da yapılacaktır.

25.3

ELEKTRİKSEL POTANSİYEL VE NOKTASAL YÜKLERİN OLUŞTURDUĞU POTANSİYEL ENERJİ

Yahtılımiş pozitif bir noktasal q yükünü ele alalım. Hatırlanmalı ki, bu tür bir yük, yükün bulunduğu yerden dışarı doğru işinsal olarak bir elektriksel alan meydana getirir. Yükten r uzaklıkta bir noktada elektriksel potansiyeli bulmak için potansiyel farkını veren aşağıdaki genel bağıntı ile işe başlaz:

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

Burada A ve B , Şekil 25.6'da gösterildiği gibi iki keyfi noktalardır. Noktasal yükün oluşturduğu elektrik alanı $\mathbf{E} = k_e q \hat{\mathbf{r}} / r^2$ ile (Eşitlik 23.4) verildiğinden; burada $\hat{\mathbf{r}}$, yükten alının hesaplanacağı noktaya yönelen birim vektördür, $d\mathbf{s}$ niceliği

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \cdot d\mathbf{s}$$

şeklinde yazılabilir. $\hat{\mathbf{r}}$ 'nin büyüklüğü 1 olduğundan, skaler çarpım $\hat{\mathbf{r}} \cdot d\mathbf{s} = dr \cos \theta$ olur; burada θ açısı Şekil 25.5 deki gibi $\hat{\mathbf{r}}$ ile $d\mathbf{s}$ arasındaki açıdır. Ayrıca $ds \cos \theta$ değeri, ds nin \mathbf{r} üzerindeki izdüşümüdür. Buna göre $ds \cos \theta = dr$ olur. Yani, A noktasından B noktasına giden herhangi bir yol boyunca ds yer değiştirmesi, \mathbf{r} 'nin büyüklüğünde bir dr değişimi oluşturur. \mathbf{r} , alanı oluşturan yükle olan radyal (işinsal) uzaklıktır. Bunları yerine yazarsak $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = (k_e q / r^2) dr$ elde ederiz. Böylece potansiyel farkı ifadesi

$$V_B - V_A = - \int E_r dr = -k_e q \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} = \frac{k_e q}{r} \Big|_{r_A}^{r_B}$$

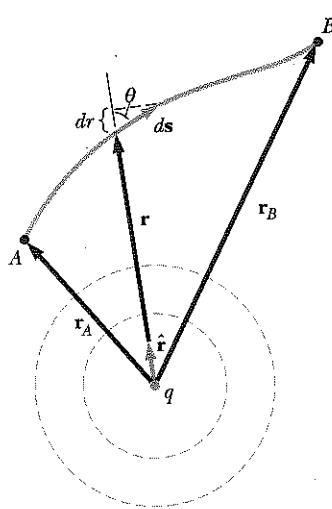
$$V_B - V_A = k_e q \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right] \quad (25.10)$$

olur. Olması gerekiği gibi $- \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ integrali A ve B noktaları arasındaki yol dan bağımsızdır. Çünkü, bir nokta yükün elektrik alanı korunumlu bir alandır. Ayrıca, 25.10 Eşitliğinin önemli bir sonucu daha vardır: A ve B gibi herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı, yalnızca r_A ve r_B radyal koordinatlara bağlıdır. $r_A = \infty$ da, referans elektriksel potansiyelini sıfır olarak seçmek adettir. Böyle bir seçime dayanarak, bir noktasal yükün kendisinden herhangi bir uzaklıkta oluşturduğu potansiyel

$$V = k_e \frac{q}{r} \quad (25.11)$$

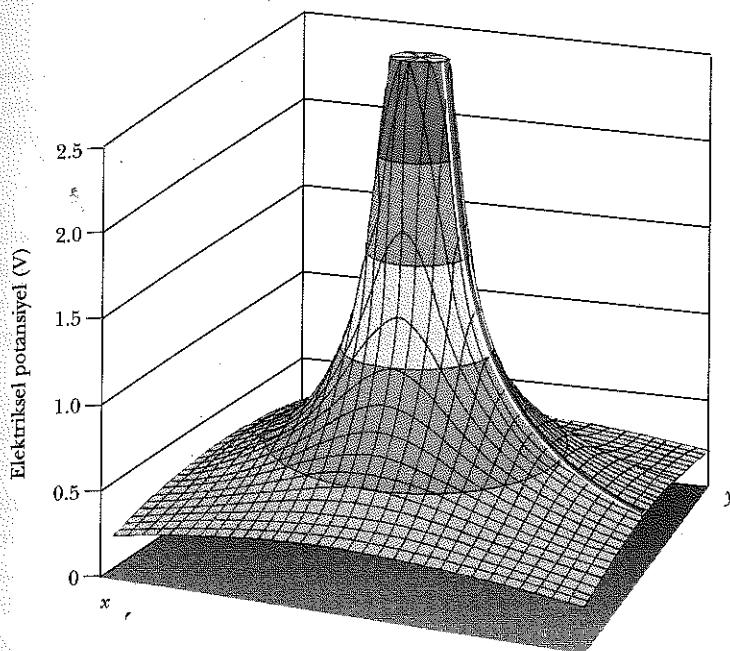
olarak verilir.

$x-y$ düzleminde bulunan bir pozitif yükten r radyal uzaklığın fonksiyonu olarak elektriksel potansiyelin grafiği Şekil 25.7'de gösterilmiştir. Kütle-çekim potansiyeli ile olan benzerliği bakanım: Şekil 25.7a'ya benzeyen bir tepenin en tepesine doğru bir bilyenin yuvarlanması istendiğini düşünün. Bilyenin maruz kaldığı kütle-çekim kuvveti, iki pozitif yüklü cisim birbirine yaklaşırken ortaya çıkan itici kuvvette benzer. Benzer olarak, herhangibir negatif yüklü cisim çevresindeki bölgenin elektriksel potansiyeline ait grafik, birbirine yaklaşan pozitif yüklü cisimlere göre bir "delik"e benzer. Yüzeyin "düzlemleri" elektriksel potansiyelin sıfır olduğu durumda yüklü cisim diğer yükten soruz uzaklıkta bulunmak zorundadır.

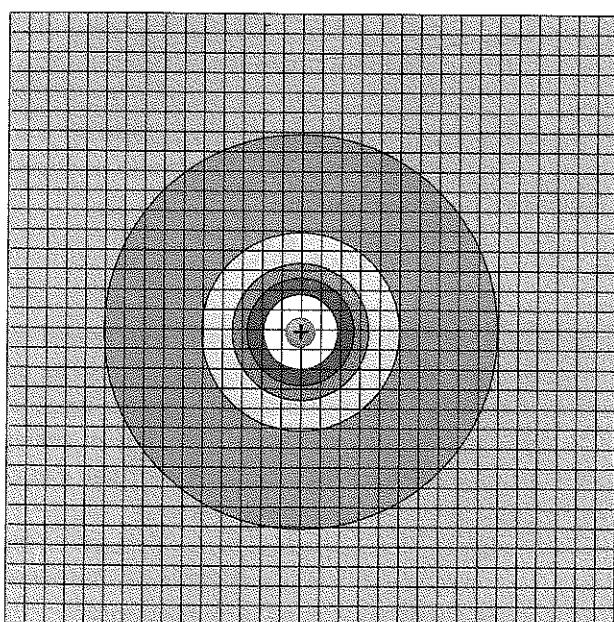


Şekil 25.6 Bir q nokta yükten kaynaklanan A ve B noktaları arasındaki potansiyel farkı, sadece başlangıç r_A ve bitiş r_B radyal koordinatlara bağlıdır. Kesik çizgilerle gösterilmiş iki daire eş potansiyelli yüzeylerin kesitlerini belirler.

Bir nokta yükün oluşturduğu potansiyel



(a)



(b)

Şekil 25.7 (a) Bir tek pozitif yükün çevresindeki elektriksel potansiyel düşey eksen almarak düzlemdeki görünümü. (Bir negatif yükün elektriksel potansiyel fonksiyonu bir tepedeki çukura benzer.) Kırmızı çizgiler, Eşitlik 25.11 ile verilen elektriksel potansiyelin $1/r$ karakterini göstermektedir. (b) Düşey eksen üzerine çizilen (a)'daki grafiğin üstten görünüsü. Burada eş-merkezli daireler elektriksel potansiyelin sabit olduğunu göstermektedir. Bu daireler, merkezdeki yükün oluşturduğu eş-potansiyelli kürelerin kesitleridir.

Sınaması Sorusu 25.3

Küresel bir balonun merkezinde pozitif yüklü bir cisim bulunsun. Yüklü cisim merkezde iken balon şişirilerek hacmi genişletilsin, balon yüzeyindeki elektriksel potansiyel artar mı, azalır mı, sabit mi kalır? Elektriksel alanın ve elektrik akısının büyüklüğü ne kadardır?

İki veya daha fazla yükün bir noktada oluşturduğu elektriksel potansiyel üst-üste binme ilkesi uygulanarak elde edilir. Yani, birçok nokta yükün bir P noktasında oluşturduğu toplam elektriksel potansiyel, her bir yükün bu noktada oluşturduğu potansiyellerin cebirsel toplamıdır. Bir noktasal yük grubu için P noktasındaki toplam potansiyel

Bir çok nokta yükün elektriksel potansiyeli

$$V = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (25.12)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada yine sonsuzdaki potansiyel sıfır ve q_i yüklerinden P noktasına olan uzaklık r_i olarak alınmıştır. Eşitlik 25.12'deki toplamın vektörel toplamdan ziyade (yük grubunun bir noktada oluşturduğu elektrik alanın hesaplanması sırasında kullanılan) skaler sayıların *cebirsel toplamı* olduğuna dikkat ediniz. Böylece, V 'nin değerini bulmak, E 'nin değerini bulmaktan çok daha kolay olur. Bir dipolün çevresindeki elektriksel potansiyel Şekil 25.8'de gösterilmiştir.

Şimdi, iki yüklü parçacık sisteminin potansiyel enerjisini ele alalım. Bir P noktasında, q_1 yükü nedeniyle oluşan potansiyel V_1 ise, o zaman ikinci bir q_2 yükünü sonsuzdan bu P noktasına ıvmelendirmeden getirmek için yapılması gereken iş $q_2 V_1$ ile verilir. Parçacıklar birbirinden r_{12} uzaklıği kadar ayrı iken (Şekil 25.9), tanım gereğince bu iş, iki-parçacıklı sistemin potansiyel enerjisine (U) eşit olur. Buna göre potansiyel enerjiyi,

$$U = k_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad (25.13)$$

şeklinde ifade edebiliriz.² Yükler aynı işaretli ise U 'nun pozitif olacağına dikkat ediniz. Bu, aynı işaretli yüklerin birbirlerini ittiği gerçeği ile uyuşur. O halde iki yükten birini diğerinin yanına getirmek için sistem üzerinde pozitif bir iş yapılmalıdır. Bunun tersine, yükler zıt işaretli ise, kuvvet çekicidir ve U negatif olur. Bu da farklı işaretli yükleri birbirine yaklaştırmak için çekici kuvetlere karşı negatif iş yapmak gerektiği anlamına gelir.

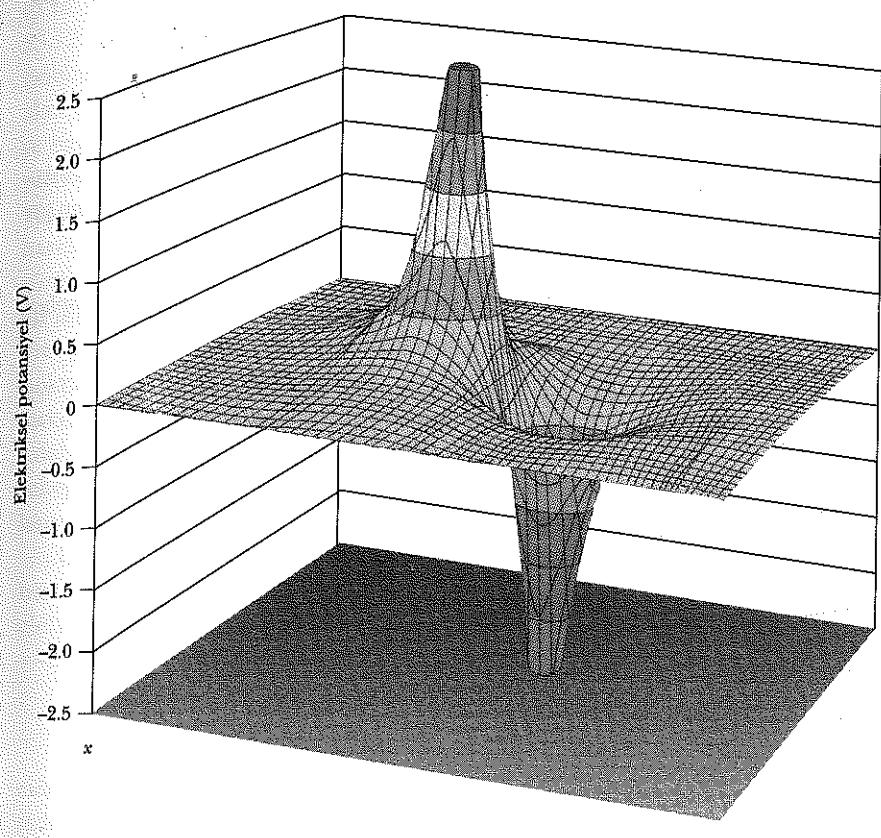
Sistemde ikiden fazla yük varsa, toplam potansiyel enerji *her bir yük çifti* için U ayrı ayrı hesaplanıp sonuçlar cebirsel olarak toplanır. Bir örnek olarak, Şekil 25.10'da gösterilen üç yükün toplam potansiyel enerjisi

$$U = k_e \left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} \right) \quad (25.14)$$

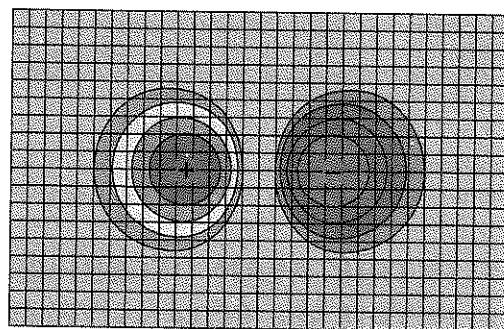
olarak verilir. Fizikselli olarak bunu şu şekilde açıklayabiliriz: Şekil 25.10'daki q_1 yükünün sabit olduğunu düşünelim fakat q_2 ve q_3 sonsuzda bulunurlar. q_2 yükünü sonsuzdan q_1 in yakınında bir yere getirmek için $k_e q_1 q_2 / r_{12}$ işini yapmak gereklidir; bu da eşitlik 25.14'teki birinci terimdir. Eşitlik 25.14'teki son iki terim, q_3 yükünü sonsuzdan q_1 ve q_2 nin yakında bulunan bir konuma getirmek için yapılması gereken iştır (Sonuç, yüklerin taşınma sırasından bağımsızdır.)

İki yükün elektriksel potansiyel enerjisi

² Eşitlik 25.13'teki iki noktasal yük için elde edilen elektriksel potansiyel enerji ifadesi, $Gm_1 m_2 / r^2$ ile verilen iki noktasal kütlelerin gravitasyonel potansiyel enerjisinin ifadesi ile aynı biçimdedir (Bölüm 14). Her ikisi de ters-kare kuvvet yasasından türetildiğinden, bu benzerlik şartı gereklidir.

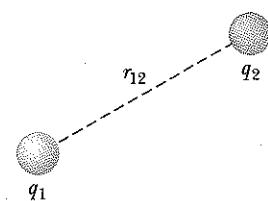


(a)

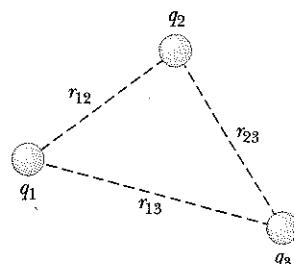


(b)

Şekil 25.8 (a) Bir düzlemdeki dipolenin elektriksel potansiyeli. (b) (a)'daki grafiğin üstten görünüşü.



Şekil 25.9 İki noktasal yük birbirinden r_{12} uzaklığında ayrılmışsa, bu yük çiftinin potansiyel enerjisi $k_e q_1 q_2 / r_{12}$ ile verilir.



Şekil 25.10 Üç noktasal yük, gösterilen konumlarda sabittir. Bu yük sisteminin potansiyel enerjisi Eşitlik 25.14 ile verilir.

ÖRNEK 25.3 İki Nokta Yükün Elektriksel Potansiyeli

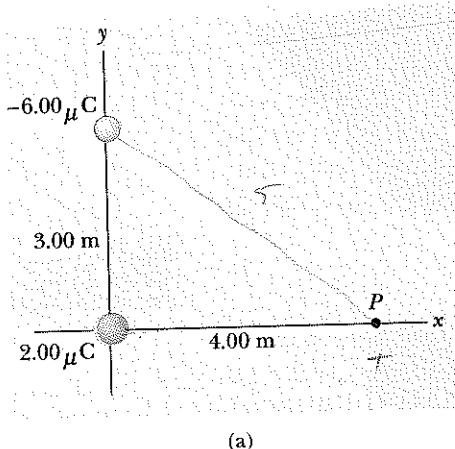
Şekil 25.11a'da görüldüğü gibi, $q_1 = 2,00 \mu\text{C}$ 'luk yük orijinde, $q_2 = -6,00 \mu\text{C}$ 'luk yük $(0; 3,00) \text{ m}$ 'dedir. (a) Bu yüklerin $(4,00; 0) \text{ m}$ koordinatındaki P noktasında oluşturduğu toplam elektriksel potansiyeli bulunuz.

Çözüm İki yükün P noktasında oluşturduğu toplam potansiyeli

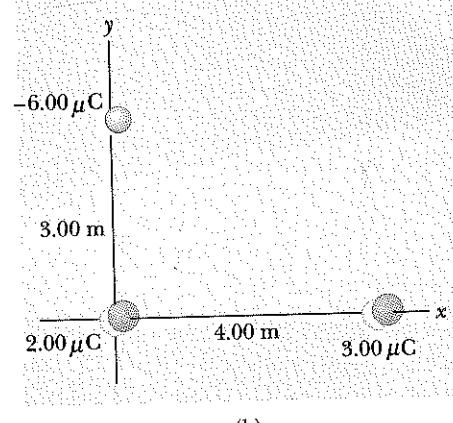
$$\begin{aligned} V_P &= k_e \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right) \\ &= 8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \left(\frac{2,00 \times 10^{-6} \text{ C}}{4,00 \text{ m}} + \frac{-6,00 \times 10^{-6} \text{ C}}{5,00 \text{ m}} \right) \\ &= -6,29 \times 10^3 \text{ V} \end{aligned}$$

olarak buluruz.

(b) Sonsuzdan P noktasına getirilen $3,00 \mu\text{C}$ 'luk yükün potansiyel enerjisindeki değişmeyi bulunuz (Şekil 25.11b).



(a)



(b)

Şekil 25.11 (a) İki noktasal yükün P noktasında oluşturduğu elektriksel potansiyel, her bir yükün ayrı ayrı oluşturduğu potansiyelin cebirsel toplamıdır. (b) Üç yük sisteminin potansiyel enerjisi ne kadardır?

25.4

ELEKTRİK ALAN DEĞERİNİN ELEKTRİKSEL POTANSİYELDEN ELDE EDİLMESİ

E Elektriksel alan ve Velektriksel potansiyel, Eşitlik 25.3'te gösterildiği gibi verilir. Şimdi, belirli bir bölgede elektriksel potansiyel biliniyorsa, elektriksel alan değerinin nasıl hesaplanacağını gösterelim.

Eşitlik 25.3'e göre aralarındaki uzaklık ds olan iki nokta arasındaki dV potansiyel farkı

$$dV = -\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (25.15)$$

olarak ifade edilebilir. Elektrik alan yalnız E_x bileşenine sahipse, $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E_x ds$ tır. Böylece 25.15 Eşitliği $dV = -E_x dx$ veya

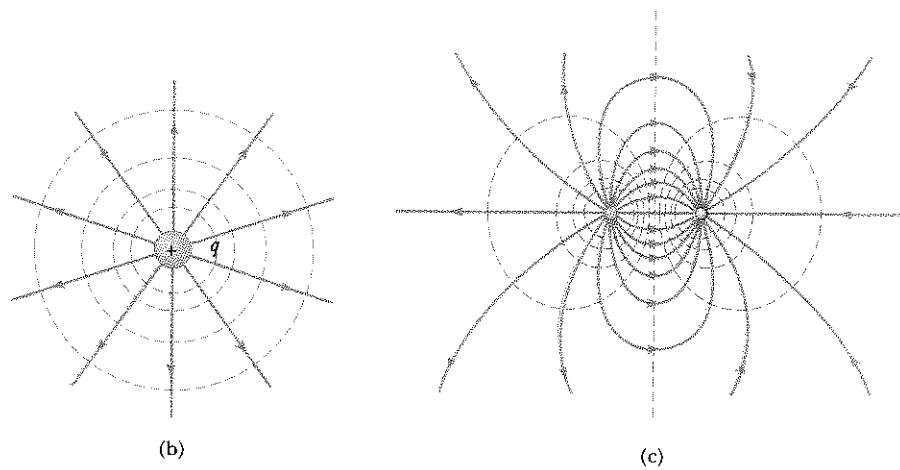
$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad (25.16)$$

olur. Yani bir koordinat ekseni doğrultusundak elektrik alanın büyüklüğü, bu koordinata göre elektriksel potansiyelin türevinin negatifine eşittir. Eşitlik 25.8'i izleyen tartışmayı hatırlarsak, elektrik alana dik doğrultulardaki herhangi bir yerdeğistirmede elektriksel potansiyel değişmemektedir. Bu da, Şekil 25.12'de gösterildiği gibi, eşpotansiyelli yüzeylerin alana dik olması durumu, Bölüm 25.2'de geliştirilen notasyonla tutarlıdır. Bir küçük pozitif yük, elektrik alan çizgileri üzerine durgun halde bırakılırsa, \mathbf{E} yönü boyunca hareket etmeye başlar. Çünkü \mathbf{E} 'nin yönü, elektrik alanı oluşturan yük dağılımı tarafından yük üzerine uygulanan kuvvetin yönündedir. (dolayısı ile \mathbf{a} 'nın yönündedir). Yük sıfır hızla harekete başladığından, hız değişimi yönünde (yani \mathbf{a} yönünde) hareket eder. Şekil 25.12a ve 25.12b'de yük bir doğru boyunca hareket eder, çünkü onun ivme vektörü daima hız vektörüne paraleldir. \mathbf{v} 'nin büyüklüğü artar fakat yönü değişmez. Şekil 25.12c'de durum farklıdır. Bir pozitif yük, dipolinin çok yakınındaki bir noktaya konulursa, yükün ilk hareketinin yönü bu noktadaki \mathbf{E} 'ye paralel olacaktır. Fakat elektrik alamın yönü farklı yerlerde farklı olduğundan, yük üzerine etkiyen kuvvetin yönü değişir ve \mathbf{a} artık \mathbf{v} 'ye paralel olmaz. Bu durum, hareket eden yükün hızında ve yönünde değişimlere sebep olur, fakat elektrik alan çizgilerini takip etmek zorunda değildir. Hatırlanmalıdır ki, bu hız vektörü değil, kuwetle orantılı olan ivme vektöridür.

Eğer elektrik alanı oluşturan yük dağılımı küresel simetriye sahipse, yani hacimce yük yoğunluğu yalnız r radyal (yarıçapsal) uzaklığa bağlı ise; o zaman elektrik alanı da radyalıdır. Bu durumda, $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E_r dr$ olur ve böylece dV 'yi $dV = -E_r dr$ biçiminde ifade edebiliriz. Buradan da

$$E_r = -\frac{dV}{dr} \quad (25.17)$$

elde edilir. Örneğin, bir noktasal yükün elektriksel potansiyeli $V = k_e q / r$ dir. V , sadece r 'nin fonksiyonu olduğundan, potansiyel fonksiyonu küresel simetriye sahip olur. 25.17 Eşitliği uygulandığında noktasal yükün oluşturduğu elektrik alanı, bilindiği biçiminde $E_r = k_e q / r^2$ olarak buluruz. Burada potansiyelin r 'ye



Sekil 25.12 Eş potansiyelli yüzeyler (kesikli mavi çizgiler) ve Elektrik alan çizgileri (kırmızı çizgiler) (a) Sonsuz tabakadaki yük tarafından üretilen düzgün elektriksel alan için, (b) Bir noktasal yük için ve (c) bir elektrik dipol için. Bütün bu durumlarda, eş-potansiyel yüzeyleri her noktadaki elektrik alan çizgilerine *diktir*. Bu çizimleri Şekil 25.2, 25.7b ve 25.8b ile karşılaştırınız.

Eşpotansiyel yüzeyleri elektrik alan çizgilerine dikdir

dik herhangi bir doğrultuda değil, yalnızca radyal (yarıçap boyunca) doğrultuda değiştiğine dikkat ediniz. O halde $V(E_r$ gibi) yalnız r 'nin bir fonksiyonudur. Yine bu durum, eşpotansiyelli yüzeyler alan çizgilerine dikdir düşüncesi ile uyuşur. Bu durumda eşpotansiyelli yüzeyler, küresel simetrik yük dağılımları na sahip aynı merkezli küre ailesi olmaktadır (Şekil 25.12b).

Şekil 25.12c, bir elektrik dipolünün eşpotansiyel yüzeylerini gösteriyor. Bir deneme yükü, eşpotansiyelli yüzeyde bir ds yerdeğiştirmesilığında, $dV=0$ olur, çünkü eşpotansiyelli yüzeyde potansiyel sabittir. O zaman 25.15 Eşitliğine göre $dV = -\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 0$ 'dır. O halde \mathbf{E} , eşpotansiyelli yüzey boyunca alan yerdeğiştirmeye dik olmak zorundadır. Bu sonuç, eşpotansiyelli yüzeylerin *her zaman* elektrik alan çizgilerine *dik* olduğunu gösterir.

Genel olarak elektriksel potansiyel, üç uzaysal koordinatın fonksiyonudur. $V(r)$, bir dik koordinat sisteminde verilirse, E_x , E_y ve E_z elektrik alan bileşenleri, $V(x, y, z)$ 'nin kısmi türevlerinden kolayca bulunabilir³:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

Örneğin $V = 3x^2y + y^2 + yz$ ise o zaman,

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (3x^2y + y^2 + yz) = \frac{\partial}{\partial x} (3x^2y) = 3y \frac{d}{dx} (x^2) = 6xy$$

oları.

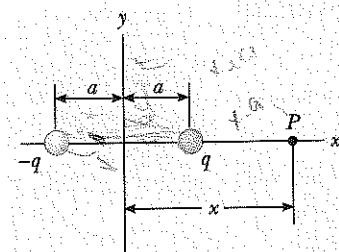
ÖRNEK 25.4

Bir Dipolün Elektriksel Potansiyeli

Bir elektrik dipol, Şekil 25.13'teki gibi, birbirinden $2a$ uzaklığıyla ayrılmış bulunan eşit ve zıt işaretli iki yükten oluşur. Dipol, x ekseni boyunca uzanmaktadır ve dipolün merkezi eksemplerin kesim noktasındadır. (a) P noktasındaki elektriksel potansiyeli hesaplayınız.

Çözüm Şekil 25.13'teki P noktası için,

$$V = k_e \sum \frac{q_i}{r_i} = k_e \left(\frac{q}{x-a} - \frac{q}{x+a} \right) = \frac{2k_e q a}{x^2 - a^2}$$



Şekil 25.13 x ekseni üzerinde bulunan bir elektrik dipolü.

(P noktası, negatif yükün sol tarafında olsa iddi sonucu nasıl değişirdi?

(b) Dipolden çok uzak bir noktada V ve E_x 'i hesaplayınız.

Çözüm P noktası dipolün merkezinden çok uzakta yani $x \gg a$ ise, o zaman $x^2 - a^2$ terimindeki a ihmal edilebilir ve V potansiyeli,

$$V \approx \frac{2k_e q a}{x^2} \quad (x \gg a)$$

oları. Bu sonucu ve Eşitlik 25.16'yi kullanarak P noktasındaki elektrik alanı,

$$E_x = -\frac{dV}{dx} = \frac{4k_e q a}{x^3} \quad (x \gg a)$$

olarak bulunur.

(c) P noktası, iki yük arasında herhangi bir yerde bulunuyorsa, E_x ve V 'yi hesaplayınız.

Çözüm

$$V = k_e \sum \frac{q_i}{r_i} = k_e \left(\frac{q}{a-x} - \frac{q}{x+a} \right) = -\frac{2k_e q x}{x^2 - a^2}$$

$$E_x = -\frac{dV}{dx} = -\frac{d}{dx} \left(-\frac{2k_e q x}{x^2 - a^2} \right) = 2k_e q \left(\frac{-x^2 - a^2}{(x^2 - a^2)^2} \right)$$

³ Vektörel gösterimde \mathbf{E} çoğu zaman

$$\mathbf{E} = -\nabla V = -\left(\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \right) V$$

olarak yazılır. Burada ∇ 'ye *gradient işlemcisi (operatörü)* denir.

Dipolün merkezindeki durumu inceleyerek bu sonucun sağlanmasını yapabiliriz. Burada $x = 0$, $V = 0$ ve $E_x = -2k_e q/a^2$ dir.

Aşırıma İki yükün orijinde oluşturduğu bireysel elektrik alan vektörlerinin toplamını hesaplayarak, (c) şekildeki elektrik alan sonucunu doğrulayınız.

25.5 SÜREKLİ YÜK DAĞILIMININ OLUŞTURDUĞU ELEKTRİKSEL POTANSİYEL

Sürekli yük dağılımının oluşturduğu elektriksel potansiyel iki yolla hesaplanabilir. Yük dağılımı biliniyorsa, bir noktalı yükün potansiyelini veren Eşitlik 25.11 ile işe başlayabiliriz. O zaman çok küçük bir dq yük elemanının oluşturduğu potansiyeli göz önüne alabiliriz. Bu yük elemanı bir noktalı yük gibi işlemeye girer (Şekil 25.14). Herhangi bir P noktasında bu dq yük elemanının oluşturduğu dV potansiyeli,

$$dV = k_e \frac{dq}{r} \quad (25.18)$$

ile verilir. Burada r , yük elemanından P noktasına olan uzaklığıdır. P noktasındaki toplam potansiyeli elde etmek için, yük dağılımının bütün elemanlarının katkısını içermesi için Eşitlik 25.18'in integralini alırız. Genellikle her bir yük elemanı P noktasından farklı uzaklıklarda ve k_e sabit olduğundan V potansiyelini,

$$V = k_e \int \frac{dq}{r} \quad (25.19)$$

şeklinde yazabilirmiz. Gerçekte, Eşitlik 25.12'deki toplam yerine integral yazdık. Viçin bulunan bu ifadenin belirli bir referans seçiminde geçerli olacağına dikkat ediniz. Çünkü yük dağılımından sonsuz uzaklıkta bulunan P noktasının elektriksel potansiyeli sıfır alındı.

Gauss yasası gibi, diğer yollardan elektrik alanın değeri daha önceden bulunmuşsa, Eşitlik 25.3 kullanarak sürekli yük dağılımının oluşturduğu elektriksel potansiyeli hesaplayabiliriz. Yük dağılımı yüksek bir simetriye sahipse önce verilen bir noktadaki E elektrik alanı Gauss yasası yardımıyla hesaplarız, sonra bulunan bu elektrik alan değerini Eşitlik 25.3'te yerine yazarak iki nokta arasındaki ΔV potansiyel farkını buluruz. Bundan sonra da herhangi bir uygun noktada V 'yi sıfır olarak seçeriz.

Bu iki yöntem birkaç örnekle gösterelim.

ÖRNEK 25.5 Düzgün Olarak Yüklenmiş Bir Halkanın Potansiyeli

- (a) Toplam yükü Q ve yarıçapı a olan düzgün yüklenmiş bir halkanın merkezinden geçen capına dik eksen üzerindeki bir P noktasındaki elektriksel potansiyeli bulunuz.

Çözüm Halkayı, merkezi orijinde bulunacak ve halka düzlemi x eksenine dik olacak şekilde yerlestirelim. Şekil 25.15'teki gibi, halkanın merkezinden x uzaklıktaki bir P noktası alalım. dq yük elemanı P noktasından $\sqrt{x^2 + a^2}$ kadar uzaklıktadır. Böylece V potansiyelini,

$$V = k_e \int \frac{dq}{r} = k_e \int \frac{dq}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

olarak ifade edebiliriz. Bu durumda her bir dq elemanı P

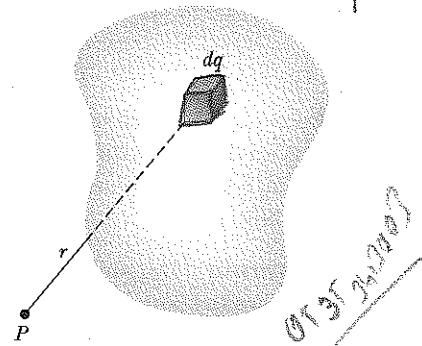
noktasından aynı uzaklıktadır. Buna göre $\sqrt{x^2 + a^2}$ terimini integralin dışına çıkarabiliriz; o zaman V ifadesi,

$$V = \frac{k_e}{\sqrt{x^2 + a^2}} \int dq = \frac{k_e Q}{\sqrt{x^2 + a^2}} \quad (25.20)$$

şeklini alır. V 'nin bu ifadesinde yalnız bir tek değişken vardır o da x 'dır. Bu sizi şaşırtmasın, çünkü hesaplarımıza sadece x ekseni boyunca olan noktalar için geçerlidir; burada y ve z sıfırdır.

(b) P noktasındaki elektrik alanın büyüklüğü için bir ifade bulunuz.

Çözüm Şeklin simetrisinden, E 'nin sadece x bileşeni bulunduğuunu görüyoruz. O halde Eşitlik 25.16'yi kullan-



Şekil 25.14 Sürekli yük dağılımının bir P noktasında oluşturduğu elektriksel potansiyeli, yüklü cisim çok küçük dq elemanlarına bölgerek ve bütün bu yük elemanlarının potansiyele katkılarını toplayarak hesaplayabiliriz.

5.09
5.30
10.51

5.09
5.30
10.51

biliriz:

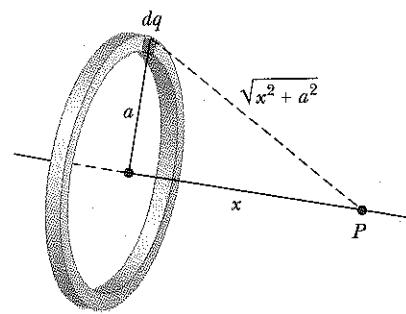
$$\begin{aligned}
 E_x &= -\frac{dV}{dx} = -k_e Q \frac{d}{dx} (x^2 + a^2)^{-1/2} \\
 &= -k_e Q \left(-\frac{1}{2}\right) (x^2 + a^2)^{-3/2} (2x) \\
 &= \frac{k_e Q x}{(x^2 + a^2)^{3/2}}
 \end{aligned} \tag{25.21}$$

Bu sonuç, doğrudan integrasyon yolu ile elde edilen sonuçla (Örnek 23.8'e bakınız) uyushur. $x = 0$ da (halka merkezinde) $E_x = 0$ 'dır. Coulomb yasasından bunu tahmin edebilir miydiniz?

Aliştırma Düzgün yüklenmiş bir halkanın merkezindeki elektriksel potansiyel ne kadardır? Merkezdeki V nin değeri hakkında, merkezdeki alanın değeri size ne söyler?

Cevap $V = k_e Q/a$ dir. Çünkü, merkezde $E_x = -dV/dx = 0$

olduğundan, V maksimum veya minimum değerde olmalıdır. Gerçekte V maksimumdur.



Şekil 25.15 a yarıçaplı düzgün olarak yüklenmiş bir halkanın düzlemi x eksenine dikdir. Halka üzerinde alınan bütün küçük parçalardaki dq yükleri x eksen üzerinde alınan herhangi bir P noktasından aynı uzaklıktadır.

ÖRNEK 25.6 Düzgün Yüklenmiş Bir Diskin Potansiyeli

Yüzeyindeki yük yoğunluğu σ , yarıçapı a olan düzgün yüklenmiş bir diskin merkezinden dik geçen eksen boyunca (a) Elektriksel potansiyeli ve (b) Elektrik alanının büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm Yine, disk düzleme dik x eksenini üzerinde ve disk merkezinden x uzaklığı bir P noktası alalım. Diski bir takım dairesel yüklü halkalara bölgerek problemi basitleştirebiliriz. Her bir dairesel yüklü halkanın potansiyeli Eşitlik

25.20 ile verilir. Şekil 25.16'da görüldüğü gibi, dr kahnlığında, r yarıçaplı dairesel bir halka göz önüne alalım. Halkanın alanı $dA = 2\pi r dr$ (çevrenin kalınlığı ile çarpımı) ve yüzeyce yük yoğunluğunun tanımından (bakınız Kesim 23.5) halka üzerindeki yük $dq = \sigma dA = \sigma 2\pi r dr$ dir. Böylece, bu dairesel halkanın P noktasında oluşturduğu potansiyel,

$$dV = \frac{k_e dq}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{k_e \sigma 2\pi r dr}{\sqrt{r^2 + x^2}}$$

ile verilir. P deki *toplam* potansiyeli bulmak için diskin oluşturan bütün yüklü dairesel ince halkalar üzerinden toplam alırız. Yani, $r = 0$ dan $r = a$ 'ya kadar dV 'nin integrali ahnır:

$$V = \pi k_e \sigma \int_0^a \frac{2r dr}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \pi k_e \sigma \int_0^a (r^2 + x^2)^{-1/2} 2r dr$$

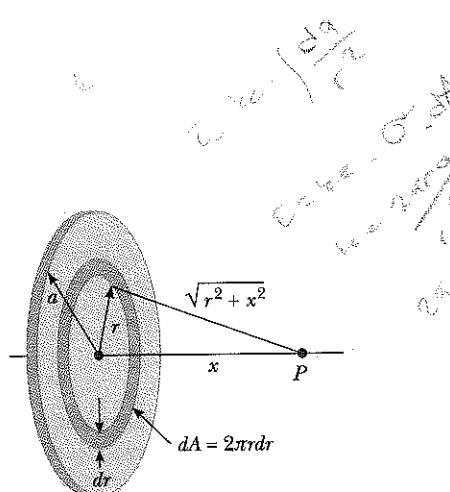
Bu integral $u^n du$ biçimindedir ve bunun değeri $u^{n+1}/(n+1)$ dir. Burada $n = -\frac{1}{2}$ ve $u = r^2 + x^2$ alınmıştır. Buradan,

$$V = 2\pi k_e \sigma [(x^2 + a^2)^{1/2} - x] \tag{25.22}$$

sonucunu elde ederiz.

(b) Örnek 25.5'te olduğu gibi, eksen üzerinde herhangi bir noktada elektrik alanı

$$E_x = -\frac{dV}{dx} = 2\pi k_e \sigma \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}}\right) \tag{25.23}$$



Şekil 25.16 a yarıçaplı, düzgün yüklenmiş bir disk. Diskin düzlemi x eksenine dikdir. Eksen üzerinde bir P noktasındaki elektriksel potansiyeli hesaplarken, disk 2 $\pi r dr$ alanlı ince halkalarla bölmek işlemi basitleştirir.

olur. Eksen dışında rastgele bir noktada E ve V 'nin değerlerini hesaplamak oldukça zordur. Bu durumu burada yapmayacağız.

ÖRNEK 25.7 Sonlu Çizgisel Yükün Elektriksel Potansiyeli

ℓ uzunluklu bir çubuk, x ekseni boyunca yerleştiriliyor. Çubukta toplam yük Q dır ve birim uzunluk başına düzgün dağılmış yük yoğunluğu $\lambda = Q/\ell$ dır. y ekseni boyunca, orjinden a uzaklığındaki P noktasında elektriksel potansiyeli bulunuz (Şekil 25.17).

ÇÖZÜM dx uzunluk elemanın yükü $dq = \lambda \cdot dx$ dir. Bu dx elemanın P noktasından $r = \sqrt{x^2 + a^2}$ kadar uzakta olduğunu dq elemanın P noktasında oluşturduğu potansiyel,

$$dV = k_e \frac{dq}{r} = k_e \frac{\lambda dx}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

olarak ifade edilebilir. P noktasındaki toplam potansiyeli elde etmek için, bu ifadeyi $x = 0$ dan $x = \ell$ sınır değerleri arasında integre ederiz. k_e , λ ve a 'nın sabit oluşuna dikkat ederek

$$V = k_e \lambda \int_0^\ell \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = k_e \frac{Q}{\ell} \left(\int_0^\ell \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right)$$

bulturuz.

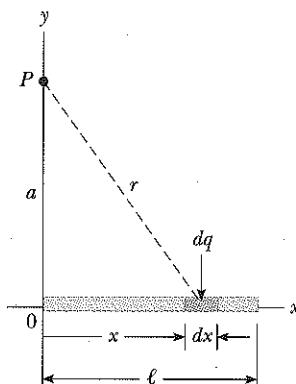
Bu integral, integral tablolarının çoğunda bulunur; (bakınız Ek B) değeri,

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \ln(x + \sqrt{x^2 + a^2})$$

dir. V 'nin değerini hesaplayarak

$$V = \frac{k_e Q}{\ell} \ln \left(\frac{\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2}}{a} \right) \quad (25.24)$$

bulturuz.



Şekil 25.17 ℓ uzunluğunda düzgün dağılmış çizgisel yük olan bir çubuk x ekseni boyunca yerleştirilmiştir. P 'deki potansiyeli hesaplamak için, çizgisel yük her biri $dq = \lambda dx$ yüküne sahip dx uzunluklu parçacıklara bölünür.

ÖRNEK 25.8 Düzgün Yüklenmiş Bir Kürenin Potansiyeli

Düzgün dağılmış pozitif bir yük yoğunluğuna sahip, toplam yük Q olan R yarıçaplı yalıtkan bir küre veriliyor. (a) Kürenin *dışındaki* bir noktası, yani $r > R$ de elektriksel potansiyeli bulunuz. $r = \infty$ da potansiyeli sıfır olarak alınız.

ÇÖZÜM Örnek 24.5'te, Gauss yasasından faydalananarak, düzgün yüklü R yarıçaplı bir kürenin *dışındaki* bir noktasıda elekrik alanın büyüklüğünü,

$$E_r = k_e \frac{Q}{r^2} \quad (r > R \text{ için})$$

olarak bulmuştuk. Burada Q pozitif olduğunda elektrik alan radyal olarak dışarı doğrudur. Şekil 25.18'deki gibi, daha dışardaki bir B noktasında elektriksel potansiyeli elde etmek için, E 'nin bu değerini Eşitlik 25.4'te yerine yazarsız. $E \cdot ds = E_r dr$ olduğundan,

$$V_B = - \int_{\infty}^r E_r dr = - k_e Q \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2}$$

$$V_B = k_e \frac{Q}{r} \quad (r > R \text{ için})$$

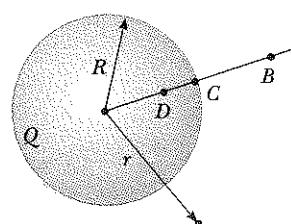
elde ederiz. Bu sonucun, bir noktalı yükün elektriksel potansiyeline eşdeğer olduğunu dikkat ediniz. (Eşitlik 25.11)

$r = R$ 'de potansiyel sürekli olması gerektiğinden, bu eşitliği, kürenin yüzeyindeki potansiyeli elde etmede kullanabiliriz. Yani, Şekil 25.18'deki gibi örneğin bir C noktasındaki potansiyel,

$$V_C = k_e \frac{Q}{R} \quad (r = R \text{ için})$$

ile verilir.

(b) Yüklü kürenin *icindeki* bir noktasıda elektriksel potansiyeli bulunuz. Yani $r < R$ için.



Şekil 25.18 Toplam yük Q olan R yarıçaplı düzgün olarak yüklenmiş izole bir küre. B ve C noktalarındaki elektriksel potansiyel, küre merkezinde bulunan noktalı Q yükünün oluşturduğu potansiyele eşdeğerdir, fakat bu D noktası için doğru değildir.

Çözüm Örnek 24.5'te, düzgün yüklü, yalıtkan bir kürenin *içindeki* elektrik alanı,

$$E_r = \frac{k_e Q}{R^3} r \quad (r < R \text{ için})$$

olarak bulmuştuk.

Bu sonucu ve Eşitlik 25.3'ü kullanarak kürenin *içindeki* bir D noktasında, $V_D - V_C$ potansiyel farkını hesaplayabiliriz:

$$V_D - V_C = - \int_R^r E_r dr = - \frac{k_e Q}{R^3} \int_R^r r dr = \frac{k_e Q}{2R^3} (R^2 - r^2)$$

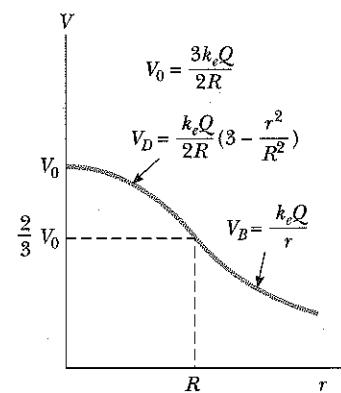
$V_C = k_e Q/R$ değerini bu ifadede yerine koymak V_D 'yi çözüdüğümüzde,

$$V_D = \frac{k_e Q}{2R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (r < R \text{ için}) \quad (25.25)$$

elde ederiz. $r = R$ de bu ifade, yüzeydeki potansiyel için bulunan V_C değeri ile tam olarak uyuşur. Bu yük dağılımı için V 'nin r 'ye göre grafiği Şekil 24.19'daki gibidir.

Aliştirma Düzgün yüklü bir kürenin merkezindeki elektrik alan ve elektriksel potansiyel ne kadardır?

Cevap $r = 0$ da $E = 0$ ve $V_0 = 3k_e Q/2R$.

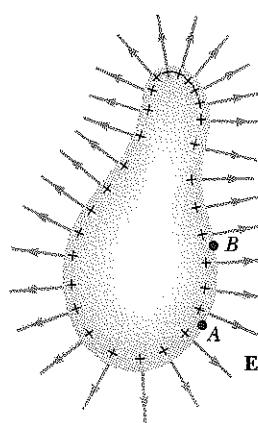


Şekil 25.19 Ryarçaklı, yalıtkan, yükleri düzgün dağılmış bir kürenin merkezinden olan r uzaklığına göre V potansiyelinin grafiği. Küre içindeki V_D 'nın eğrisi parabolik olup, kürenin dışındaki V_B 'nın hiperbolik eğrisi ile yumuşak bir şekilde birleşir. Kürenin merkezinde potansiyel V_0 maksimum değerine sahiptir, bu grafiği, düşey eksen etrafında döndürerek (Şekil 25.7 ve 25.8'e benzenen) üç boyutlu yapabiliyordık.

25.6 YÜKLÜ BİR İLETKENİN POTANSİYELİ

Bölüm 24.4'te, denge durumundaki bir katı iletken net bir yük taşıdığı zaman, yükün, iletkenin daima dış yüzünde toplandığını bulmuştuk. Dahası, denge durumundaki bir iletkenin yüzeyinin hemen dışında elektrik alanın, yüzeye dik olduğunu; fakat iletkenin *içinde* sıfır olduğunu gösterdik.

Şimdi, denge durumundaki **yüklü bir iletkenin yüzeyi üzerindeki her bir noktanın aynı potansiyelde** olduğunu gösterelim. Bir yüklü iletkenin yüzeyi üzerinde A ve B gibi iki nokta alalım Şekil 25.20. Yüzey üzerinde bu noktaları birleştiren bir yol boyunca \mathbf{E} her zaman ds yerdeğiştirmesine diktir. Dolayısıyla



Şekil 25.20 Rastgele biçimde pozitif yük taşıyan bir iletken. iletken elektrostatik dengede iken, bütün yükler iletken yüzeyinde toplanır. iletkenin içinde $\mathbf{E} = 0$ dir ve iletkenin hemen dışındaki elektrik alan, iletken yüzeyine diktir. iletkenin içindeki potansiyel sabittir ve yüzeydeki potansiyele eşittir. Yüzeydeki yük yoğunluğunun düzgün olmadığını gösteren + işaretler arasındaki uzaklıklara dikkat edin.

$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 0$ olur. Bu sonucu ve Eşitlik 25.3'ü kullanarak, A ve B noktaları arasındaki potansiyel farkının sıfır olduğu sonucuna varız. Yani,

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

olur. Bu sonuç, yüzey üzerindeki *herhangi* iki noktaya da uygulanabilir. Buna göre, denge durumunda, yüklü bir iletkenin yüzeyinin her yerinde V potansiyeli sabittir. Yani,

denge durumundaki herhangi bir yüklü iletkenin yüzeyi, espotansiyel yüzeydir. Dahası, iletkenin içindeki elektrik alan sıfır olduğundan iletkenin içindeki her yerde $E_r = -dV/dr$ bağıntısından, potansiyelin sabit ve yüzeydeki değere eşit olduğu sonucuna varız.

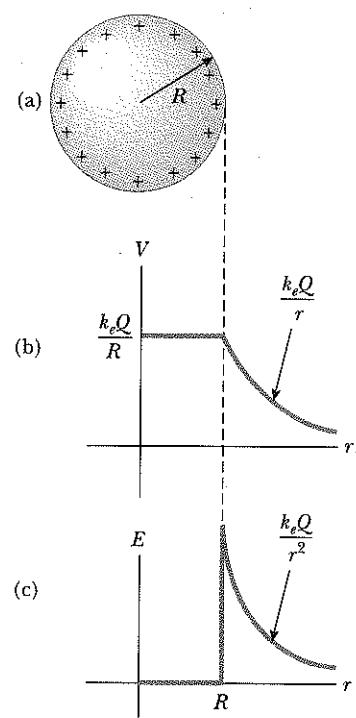
Bir yüklü iletkenin yüzeyi, espotansiyelli bir yüzeydir.

Bu, elektrik alan için doğru olduğundan, bir deneme yükünü, yüklü bir iletkenin içinden yüzeyine götürmek için hiç bir iş yapılması gerekmekz.

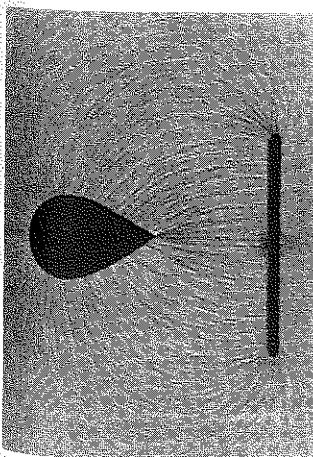
Şekil 25.21a'da görüldüğü gibi toplam Q pozitif yüküne sahip R yarıçaplı bir metal iletken küreyi inceliyoruz. Yüklenen kürenin dışında elektrik alan $k_e Q/r^2$ dir ve dışarıya yönelikdir. Örnek 25.8'i izleyerek kürenin içinde ve yüzeyindeki potansiyelin sonsuzdaki bir noktaya göre $k_e Q/R$ olması gerektiğini görüyoruz. Kürenin dışındaki potansiyel $k_e Q/r$ dir. Şekil 25.21b, r 'nin fonksiyonu olarak potansiyelin grafiğidir, Şekil 25.21c ise, elektrik alanın r 'ye göre değişimi gösterir.

Şekil 25.21a'da görüldüğü gibi, küresel iletken üzerine net bir yük konulduğum zaman, yüzey yük yoğunluğu düzgün olur. Ama, iletken, Şekil 25.20'deki gibi küresel değilse, eğrilik yarıçapının küçük ve tümsek olduğu yerlerde yüzey yük yoğunluğu büyük (Bölüm 24.4 devredildiği gibi), eğrilik yarıçapının küçük ve çekirdek olduğu yerlerde yüzey yük yoğunluğu küçüktür. Yüklü bir iletkenin hemen dışında elektrik alan yüzeyel yük yoğunluğu (σ) ile orantılı olduğundan, küçük tümsek eğrilik yarıçapı olan yerlerde elektrik alan büyük olur ve sıvı noktalarda çok daha yüksek değerlere ulaşır.

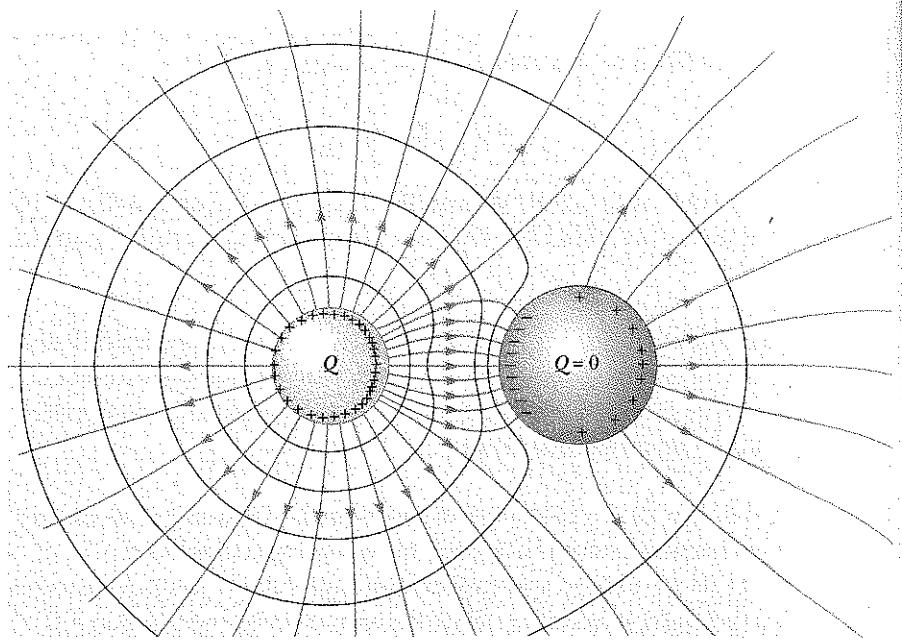
Şekil 25.22, birinin net yük Q ve diğerinin net yük sıfır olan iki küresel iletkenin çevresindeki elektrik alanı göstermektedir. Burada da yüzeyel yük yoğunluğu her iki iletken kure üzerinde de *düzgün değildir*. Net yük sıfır olan büyük iletken kurenin (sağ taraftaki) yüklü kureye bakan yüzü indüklenme (tesirle elektriklenme) nedeniyle negatif olarak, karşı (arka) yüzü ise pozitif



Şekil 25.21 (a) Ryaricaklı iletken bir kure üzerindeki fazla yükler, yüzeyde düzgün olarak dağılırlar. (b) elektriksel potansiyelin, yüklü iletken kurenin merkezinden olan uzaklığa göre eğrisi (c) Elektrik alan şiddetinin, yüklü iletken kurenin merkezinden olan r uzaklığına göre grafiği.



Yüklü bir iletken plakanın yakınında, zit yüklerle yüklenmiş bir iletkenin elektrik alan deseni. Yağ içinde asılı küçük iplik parçaları elektrik alan çizgileri gibi dizilirler. iletkenin sıvı kısmı yakınında elektrik alan çok yoğundur, diğer noktalarda ise elektrik alan zayıftır. (Harold M. Waaga, Princeton University'nin izniyle)



Şekil 25.22 İki iletken küre etrafındaki elektrik alan çizgileri (kırmızı çizgiler). Küçük iletken küre üzerinde net yük Q ve büyük küre üzerinde net yük sıfırdır. Mavi çizgiler, eşpotansiyel yüzeylerin kenarlarını temsil eder.

olarak yüklenir. Şekil 25.22'de gösterilen mavi çizgiler, bu yük düzeni için eş potansiyel yüzeylerin sınırlarını belirtir. Elektrik alan çizgileri her zaman iletken yüzeylerine her noktada dikdir ve alan çizgileri de her yerde eş potansiyelli yüzeylere dik olur. Bu iletkenlerin bölgesinde bulunan bir pozitif yükü hareket ettirmeye çalıştığımızda yükün hareketi, düz bir tepe üzerinden (soldaki iletkenin temsili) düşen ve diğer düz yüzeye sahip tepenin alt kısmındaki kenarından (sağdaki iletkenin temsili) tırmanan bir bilyanın yuvarlanması benzer.

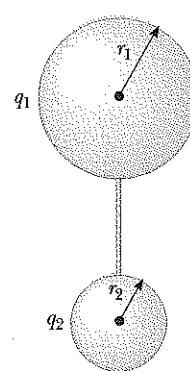
ÖRNEK 25.9 Birbirine Bağlı İki Yüklü Küre

Yarıçapları r_1 ve r_2 olan iki iletken küre, her ikisinin yarıçapından daha büyük bir uzaklıkta, birbirinden ayrılmıştır. Küreler Şekil 25.23'teki gibi, bir iletken telle birbirlerine bağlıdır. Denge durumunda küreler üzerindeki düzgün dağılmış yükler sırasıyla q_1 ve q_2 ise, kürelerin yüzeyindeki elektrik alan şiddetlerinin oranını bulunuz.

Çözüm Küreler bir iletken telle birbirlerine bağlı olduğundan her ikisi de aynı V potansiyelinde olmalıdır, ya-

$$V = k_e \frac{q_1}{r_1} = k_e \frac{q_2}{r_2}$$

dir. Buna göre yüklerin oranı,



Şekil 25.23 İletken bir telle bağlı iki yüklü küresel iletken. Kürelerin her ikisi de aynı V potansiyelindedir.

$$(1) \quad \frac{q_1}{q_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

olur. Küreler birbirlerinden çok uzakta olduğundan yüzeyleri düzgün olarak yüklenir ve bunların yüzeyindeki elektrik alanları

$$E_1 = k_e \frac{q_1}{r_1^2} \quad \text{ve} \quad E_2 = k_e \frac{q_2}{r_2^2}$$

şeklinde yazılabilir. Bu iki alanın oranı alınıp (1) ifadesini kullanarak,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

buluruz. Böylece, küçük kürenin çevresinde alan çok daha kuvvetli iken, her iki kürenin elektriksel potansiyeli aynıdır.

İletken İçindeki Bir Oyuk

Sekil 25.24'teki gibi, içinde bir oyuk bulunan rastgele bir iletkeni ele alalım. Oyuk içinde yük bulunmadığını varsayıyalım. İletkenin dış yüzeyindeki yük dağılımına bakmaksızın, bu durumda oyugun içindeki elektrik alanın sıfır olması gerektiğini göstereceğiz. Biraz daha ileri giderek, bu iletkenin dışında bir elektrik alan bulunsa bile, oyugun içindeki alan sıfırdır.

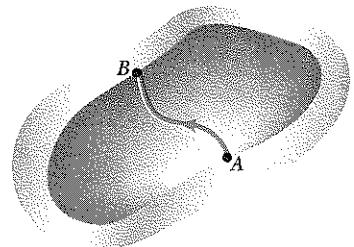
Bu durumu ispat etmek için, iletken üzerinde her noktanın aynı potansiyelde olduğu gerçekliğini kullanacağımız; çünkü bu durumda oyugun yüzeyi üzerinde A ve B gibi iki noktanın potansiyeli aynı olmalıdır. Şimdi, oyugun içinde bir \mathbf{E} elektrik alanı bulunduğuunu varsayıarak Eşitlik 25.3'teki $V_B - V_A$ potansiyel farkını,

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

tanımından hesaplayalım. \mathbf{E} sıfır değilse, A ve B arasında $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ 'yi her zaman pozitif yapacak bir yol ($d\mathbf{s}$) bulunabilir; o zaman integral de pozitif olmalıdır. Fakat, $V_B - V_A = 0$ olduğundan iletken üzerindeki herhangi iki nokta arasında tüm yollar için $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ integrali de sıfır olmalıdır. Bu da \mathbf{E} 'nin her yerde sıfır olduğunu ima eder. Çelişkili durum ancak, oyugun içinde $\mathbf{E} = 0$ olması durumunda giderilebilir. O halde, oyuk içinde hiç bir yük bulunmadıkça, iletken duvarlarla çevrilen bir oyukta alan olamayacağı sonucuna varız.

Korona Boşalması

Korona yük boşalması denen bir olay, çoğu kez yüksek-voltaj güç hatları gibi iletkenlerin yakınında gözlenir. İletkenin yakınındaki elektrik alan yeterince büyüğse, elektronlar hava moleküllerinden ayrılır. Bu durum moleküllerin iyonlaşmasına neden olduğundan havanın iletkenliği artar. Gözlenen ışma (veya Korona boşalması), ionize olmuş hava molekülleri ile serbest elektronların tekrar birleşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. İletken düzensiz biçimli ise, elektrik alan iletkenin kenarlarında veya sıvı uçları yakınında çok yüksek değerler almaktır ve sonuçta muhtemelen iyonizasyon olayı ve Korona boşalmasında bu noktaların civarında meydana gelmektedir.



Sekil 25.24 Bir oyuk içeren elektrostatik dengedeki bir iletken. İletken üzerinde yük bulunmasına karşın oyugun içindeki elektrik alan sıfırdır.

Sinama Sorusu 25.4

- (a) Elektriksel potansiyelin sıfır olmadığı bir yer yerde elektrik alanın büyüklüğünün sıfır olması mümkün müdür? (b) Elektrik alanın sıfırdan farklı olduğu bir yerde, elektriksel potansiyel sıfır olabilir mi?

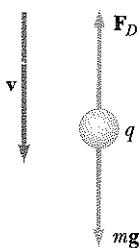
Seçmeli Kesim**MILLIKAN'IN YAĞ DAMLASI DENEYİ**

1909 ile 1913 tarihleri arasında, Robert Millikan bir seri mükemmel deney yaptı. Bu deneylerde, elektronun elemanter yükü e 'yi ölçtü ve elektronik yükün kuantize doğasını belirledi. Millikan'ın kullandığı deney düzeneği, iki paralel metal plakadan ibarettir ve Şekil 25.25'te gösterilmiştir. Bir püskürtücü ile yüklenmiş yağ damlacıkları, üst plakadaki bir delikten geçmesi sağlanır. Yağ damlacıklarını aydınlatmak için yatay doğrultuda (şekilde gösterilmemiş) bir ışık demeti kullanılır. Damlalar, bir teleskopla gözlenir. Teleskopun ekseni, ışık demetiyle dik açı yapar. Damlacıklar bu düzende gözlendiğinde, karanlık zeminde parlayan bir yıldız gibi görünürler. Dolayısıyla damlaların düşüş hızı tayin edilebilir.⁴

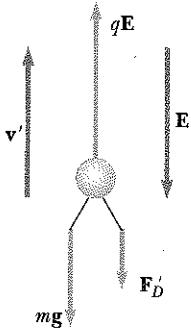
Kütlesi m , taşıdığı yük q olan bir tek damyanın gözlendiğini varsayılmı. Damlanın yükü negatif olsun. Levhalar (plaka) arasında bir elektrik alan yoksa, Şekil 25.26a'da gösterildiği gibi, yük üzerine etki eden iki kuvvet vardır. Aşağı doğru damlacığın mg ağırlığı ve yukarı doğru F_D viskos sürüklenme kuvvetidir. Sürüklenme kuvveti damyanın hızı ile orantılıdır. Damlı v limit hızına ulaşınca her iki kuvvet birbirlerini dengeler ($mg = F_D$).

Şimdi, üstteki plaka daha yüksek potansiyelde olacak şekilde plakaları bateraya bağlayarak plakalar arasında bir elektrik alan oluşturunu farzedelim. Bu durumda üçüncü bir kuvvet qE , yüklü damla üzerine etkir. q negatif ve E aşağı yönlü olduğundan, elektriksel kuvvet Şekil 25.26b'deki gibi yukarı yönündür. Bu kuvvet yeterince büyükse, damla yukarı doğru hareket edecektir ve F'_D sürüklenme kuvveti aşağı yönde etkiyecektir. Yukarı yönündeki qE elektriksel kuvvet aşağı yönlü olan sürüklenme kuvveti ile ağırlığın toplamını dengelediğinde damla, yeni bir v' limit hızına ulaşır.

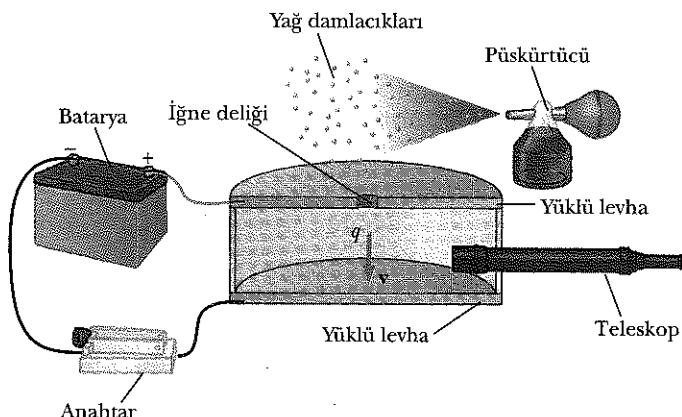
Alan kurulduğunda (varken) damla, saniyede yaklaşık santimetrenin *yüzde biri* kadar bir hızla yavaşça yukarı doğru hareket eder. Bu değer alanın olmadığı durumda düşüş hızına yakındır. Böylece, elektrik alanı basitleştirerek kapatarak sabit kütle ve yarıçaplı damlacığın yukarı yada aşağı yönlü hareketi saatlerce takip edilebilir.



(a) Alan yokken



(b) Alan varken

**Şekil 25.25** Millikan yağ daması deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Şekil 25.26 Millikan deneyinde negatif yüklü yağ damlacığına etkiyen kuvvetler

⁴ Bir zamanlar yağ damlacıklarına "Millikan'ın parlayan yıldızları" denildi. Bu tanımlama belki de güncelliliğini kaybetti. Çünkü yeni nesil Fizik öğrencileri Millikan deneyini tekrarlarken, sancıları, az görme ve başağrıları v.s. tutar.

Binlerce damlacık üzerinde yapılan ölçümelerden sonra, Milikan ve çalışma arkadaşları, bütün damlacıkların $\%1$ hata ile, e elementer yükünün tam katları kadar yükle sahip olduğunu buldular. Yani,

$$q = ne \quad n = 0, -1, -2, -3, \dots$$

dir. Burada, $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C'dir. Milikan deneyi, yükün kuantımlı oluşumun kesin bir delilidir. Milikan, 1923 yılında bu çalışmasından dolayı Nobel ödüllü ile ödüllendirilmiştir.

Seçmeli Kesim

25.8 ELEKTROSTATİĞİN UYGULAMALARI

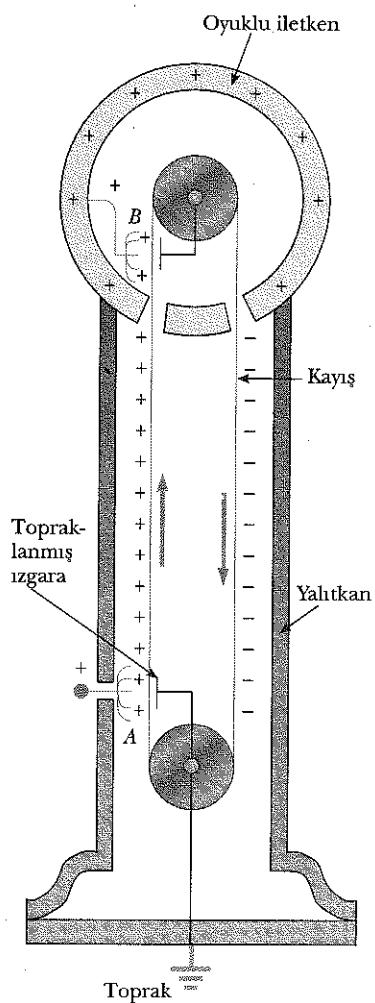
Elektrostatığın pratik uygulamaları, paratoner ve elektrostatik çökelticiler gibi benzer aletlerde ve xerography (fotokopinin özü) ve otomobilin boyanması gibi aygıtlarda görülmektedir. Elektrostatik ilkelerini temel alan bilimsel aygıtlardan bazıları, elektrostatik jeneratörler, alan-iyon mikroskopu ve iyon-sürücülü roket motorlarıdır.

Van de Graaff Üreteci

Bölüm 24.5'te, içi boş bir iletkeye yük aktarma yöntemini gösteren bir deneyi (Faraday'ın buz-kovası deneyi) tanıttık. Yükli bir iletken, içi boş (oyuklu) bir iletke içinden temas edecek şekilde konulduğunda birinci iletkenin bütün yükü boş iletkeye aktarılır. İlke olarak, içi boşluk olan iletkenin yük ve bu yükün elektriksel potansiyeli, böyle bir işlem tekrarlanarak sınırsız bir şekilde artırılabilir.

1929 yılında Robert J. Van de Graaff, (1901-1967) bu prensibi kullanarak elektrostatik jeneratörü (üreteci) tasarladı ve yaptı. Bu tür jeneratörler nükleer fizik araştırmalarında yoğun bir şekilde kullanılır. Van de Graaff jeneratörünün ana fikri Şekil 25.27'de tanıtılmıştır. Yağlıkan bir maddeden yapılan hareketli bir kayış üzerindeki yüksek voltaj elektroduna sürekli olarak yük verilir. Yüksek voltaj elektrod, yağlıkan bir destek sütun üzerine monte edilen içi boş olan bir iletken küredir. Kayış, topraklanmış bir kafes ve tarak şekilli metalik parça arasında corona deşarjı yolu ile yüklenir. Tarak veya firça şekilli metalik parçalar kayışı yaklaşık olarak 10^4 V'luk pozitif bir potansiyede tutarlar. Hareketli kayış üzerindeki bu pozitif yük, B'deki ikinci metalik tarak vasıtasyyla yüksek voltaj elektroduna aktarılır. İçi boş olan iletken içinde elektrik alan ihmali edilebilir olduğundan kayış üzerindeki pozitif yük, potansiyeline bakılmaksızın kolayca yüksek voltaj elektroduna aktarılır. Pratikte, hava ortamına elektriksel boşalma oluncaya kadar, yüksek voltaj elektrodunun potansiyelini yükseltmek mümkündür. Hava içinde "boşalım" elektrik alanı yaklaşık 3×10^6 V/m'ya 1 m yarıçapındaki kürenin en fazla 3×10^6 V'luk potansiyele kadar yükseltiliblir. Bu potansiyel, sistemin tamamı yüksek basınçlı bir gaz ile doldurulmuş kap içine konarak ve içi boş iletkenin yarıçapını büyüterek daha da yüksek değerlere çıkartılabilir.

Van de Graaff üreteçleri, 20 milyon volta kadar potansiyel farkı üretebilirler. Böyle bir potansiyel farkına kadar hızlandırılan proton'lar yeterli miktarda enerji alarak, protonlarla çeşitli hedef çekirdekleri arasında nükleer reaksiyonları başlatırlar. Daha küçük jeneratörler ekseriya fen laboratuvarlarında ve müzelerde görülebilir. Yerden yalıtılmış durumda olan bir kişi, Van de Graaff jeneratörünün küresine dokunursa, vücudu da jeneratördeki yüksek elektriksel potansiyele erişir. Saçları da net pozitif yükle yüklenir ve saç telleri bir-



Şekil 25.27 Van de Graaff jeneratörünün şematik görünüsü. Üstteki içi boş iletkenin hareketli kayış vasıtasyıyla yük aktarılır. Yük A'da kayış üzerinde toplanır ve B noktasındaki içi boş iletkenin aktarılır.

birini iterek diken diken olur. Böyle bir durum, bu bölümün ilk sayfasında Jennifer'in fotoğrafında görülmektedir. Bu gösterimde kişi yerden yalıtılmış olması kaydı ile, küredeki ($1\mu\text{C}$ mertebesinde) toplam yük oldukça küçük olduğundan küreyi elleryle tutan kişi emniyetteştir. Eğer bu miktardaki yük, kaza rüyameye dokunan kişi üzerinden yere akarsa, bu miktardaki akım hiç bir zarar vermez.

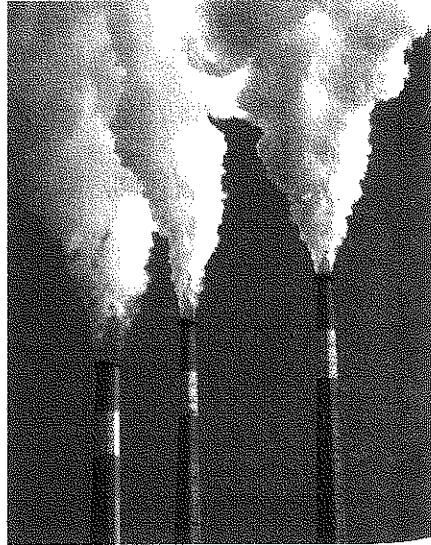
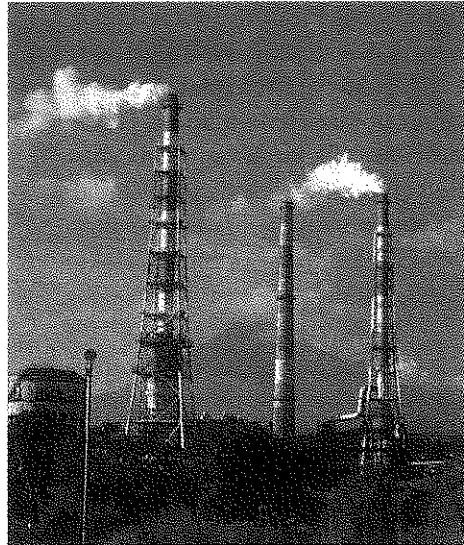
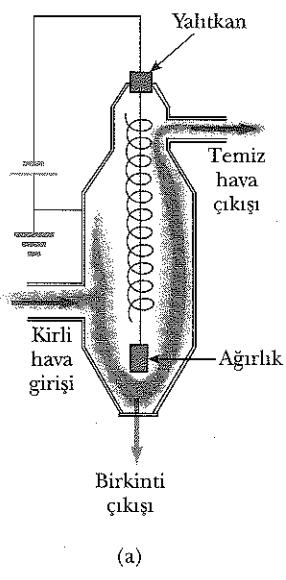
Elektrostatik Çökeltici

Ev Deneyi

Açık bir kabin içine bir miktar biber ve tuz serpin ve ikisini beraberce karıştırın. Şimdi bir tarakla saçınızı bir kaç defa çekerek tarayın ve tarağı 1 cm kadar biber ve tuz karışımına yapıştırın. Ne olur? Bir elektrostatik çökelticinin çalışması ile ilgili burada nasıl ve ne olmuştu?

Gazlardaki elektriksel boşalının önemli bir uygulaması da *elektrostatik çökeltici* denilen aygıtlardır. Bu aygıtlar, yanıcı gazlardan bazı belirli maddeleri ayırmakta kullanılır. Bu suretle hava kirliliği azaltılır. Bunlar, fazla miktarda duman üreten endüstriyel fabrikalarda ve bilhassa kömür yakılarak elektrik üreten santrallerde çok yararlıdır. Şu anda kullanılan sistemler, duman içinde bulunan toz küllerin ağırlıkca %99'dan daha fazlasını süzebilmektedir.

Şekil 25.28a elektrostatik çökelticiyi şematik olarak göstermektedir. Yüksek voltaj (40 kV dan 100 kV'a kadar), borunun (kanalın) merkezinden aşağı doğru inen çiplak bir telle, topraklanmış dış duvar arasına uygulanır. Tel duvara göre negatif potansiyelde tutulur, böylece elektrik alan tele doğru yönelir. Telin etrafındaki elektrik alan yeterince yüksek bir değere ulaşırsa, teli çevresinde bir corona elektrik boşalması meydana gelir ve pozitif iyonlar, elektronlar ve O_2^- gibi negatif iyonlar oluşur. Elektronlar ve negatif iyonlar, düzgün olmayan elektrik alan tarafından kanalın dış duvarına doğru hızlanırken, akan gaz içindeki kirli parçacıklar, çarpışmalarla ya da iyon yakalamak suretiyle yüklenirler. Yüklü kirli parçacıkların çoğu negatif olduğundan, bunların çoğu elektrik alan tarafından dış duvara doğru çekilirler. Periyodik olarak kanalın sarsılması sonucu bazı parçacıklar aşağı düşer ve alta toplanır.



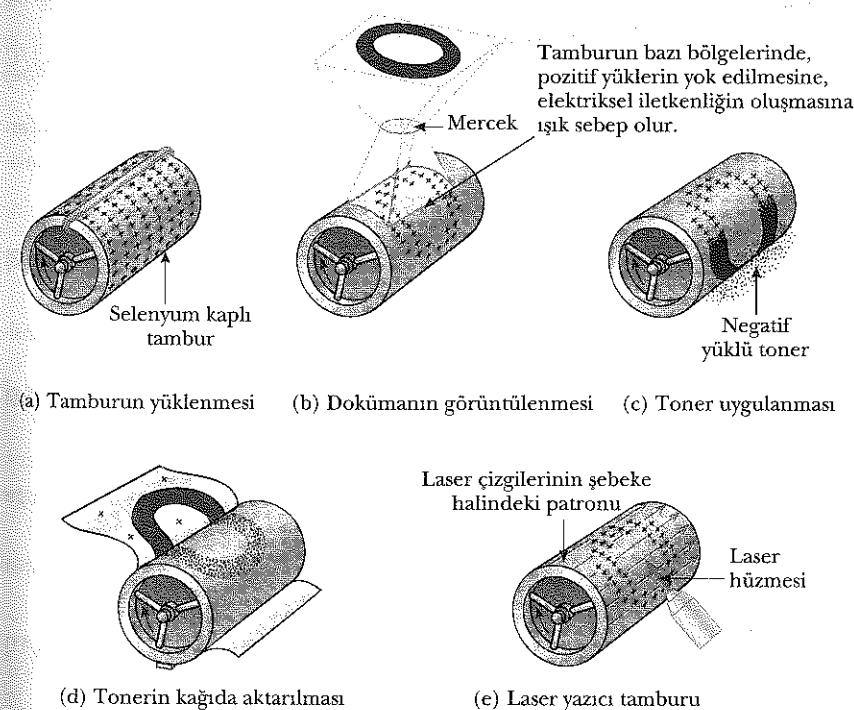
Şekil 25.28 (a) Elektrostatik çökelticinin şematik çizimi. Merkezdeki tele uygulanan negatif yüksek voltaj, teli civarında elektrik boşalımı (deşarj) yaratır. Elektrostatik çökelticinin (b) çalışığında, (c) çalışmadığında, hava kirliliğini karşılaştırınız. (b, Rei O'Hara/Black Star/PNI; c, Greg Cranna/Stock, Boston/PNI)

Elektrostatik çökeltici, atmosferdeki belirli maddelerin miktarını azaltması yanında (Şekil 25.28b ve c'yi karşılaştırın), altta toplanan metal oksit yapıdaki değerli maddelerin yeniden elde edilmesini de sağlar.

Xerografi

Xerografinin⁵ temel fikri Chester Carlson tarafından geliştirilerek 1940 yılında xerografi gelişiminin patentini almıştır. Bu gelişimi eşsiz kılan, görüntü oluşturmak üzere bir foto-iletken madde kullanılmasıdır. (Foto-iletken, karanlıkta zayıf bir iletkeendir, fakat üzerine ışık düşürüldüğünde iyi bir elektriksel iletken olan maddedir.)

Xerografik süreç Şekil 25.29a ile d arasında gösterilmiştir. Önce bir silindir veya plakanın yüzeyi karanlıkta ince film halindeki foto-iletken madde ile (genellikle selenyum veya selenyum birleşikleri) kaplanır ve bu foto-iletken yüzeye pozitif elektrostatik yük verilir. Sonra kopye edilecek sayfanın görüntüsü bir mercek vasıtısıyla yük verilmiş yüzey üzerine (aydınlatılma) düşürülür. Foto-iletken yüzey, sadece ışığın çarptığı alanda iletken olur. Bu alanlarda, ışık, fotoiletken yüzey üzerinde yüklü taşıyıcılar oluşturur. Bu yüklü taşıyıcılar



Şekil 25.29 Xerografik süreç (a) Foto-iletken tanbur yüzeyi pozitif olarak yüklenir. (b) Işık kaynağı ve mercek kullanarak yüzeyde, gizli (saklı) pozitif yükler biçiminde görüntü oluşturulur. (c) Görüntü içeren yüzey, yalnız görüntünün bulunduğu alana yapışan yüklü bir tozla (toner) ile kaplanır. (d) Boş bir kağıt üzerine konularak pozitif yük verilir. Bu, görünen görüntüyü negatif yüklü toz parçacıklarının hareketi ile kağıda aktarır, en sonunda, tozun kağıtta "kalıcı" olması için isıl-islem yapılır. (e) Açılıp ve kapanan laser hüzmesinin, dönen selenyum kaplı tambur boyunca süpürüp geçerek görüntüyü oluşturmaması dışında, bir laser yazıcısı benzer şekilde çalışır.

⁵Bu kelimenin başındaki *xero* terimi yunanca "kuru" anlamına gelir. Xerografinin hiç bir yerinde sıvı mürekkebin kullanılmadığına dikkat ediniz.

da pozitif yüklü fotoiletken yüzeyi nötürleştirir. Fakat ışığın düşmediği veya ışıkla aydınlatılamayan karanlık alanlardaki foto-iletken üzerinde daima yükler kahr. Pozitif yüzey yükü biçiminde dağılan bu kalan yükler, geride cismin gizli bir görüntüsünü bırakırlar.

Bundan sonra, foto-iletken yüzey üzerine toner denilen negatif yüklü toz kaplanır. Bu yüklü toz sadece pozitif yüklü görüntü içeren yüzey bölgesine yapışır. Bu durumda görüntü, görünür hale gelir. Daha sonra toner (bu görüntü) pozitif yüklü beyaz bir tabaka kağıdın yüzeyine aktarılır.

Son olarak beyaz kağıt tabaka üzerindeki toner maddesi, kağıt yüzeyine uygulanan ısıl işlemle "sabit" (kalıcı) hale getirilir. Bu süreç, orjinalin kalıcı bir kopyesi ile sonuçlanır.

Fotoiletkeni aydınlatmada bir mercek yerine bilgisayardan yönlendirilen laser hüzmesinin kullanılması hariç, bir lazer yazıcısı (Şekil 25.29e) aynı ilke ile çalışmaktadır.

ÖZET

Bir \mathbf{E} elektrostatik alan içinde pozitif q_0 deneme yükü A ve B noktaları arasında hareket ettiğinde, potansiyel enerjideki değişim

$$\Delta U = -q_0 \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (25.1)$$

olarak verilir. $V = U/q_0$ elektriksel potansiyel skaler bir niceliktir ve birimi J/C olarak tanımlanan 1 volt (V)'dur. Burada $1 \text{ J/C} \equiv 1 \text{ V}$.

Bir \mathbf{E} elektrostatik alanında A ve B noktaları arasındaki ΔV potansiyel farkı, potansiyel enerjideki değişimin q_0 deneme yüküne bölümü olarak tanımlanır:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (25.2)$$

Düzgün bir \mathbf{E} elektrik alan içinde A ve B gibi iki nokta arasındaki potansiyel farkı,

$$\Delta V = -Ed \quad (25.6)$$

olarak verilir. Burada d , \mathbf{E} 'ye paralel doğrultuda yerdeğiştirmidir.

Eşpotansiyel yüzeyler: her noktasında elektriksel potansiyelin sabit olduğu yüzeylerdir. Eşpotansiyel yüzeyler daima elektrik alan çizgilerine diktr.

$r_A = \infty$ 'da $V = 0$ olarak tanımlanırsa noktalı bir q yükünün, kendisinden herhangi bir r uzaklıkta oluşturduğu potansiyel,

$$V = k_e \frac{q}{r} \quad (25.11)$$

ile verilir. Bir grup noktalı yüklerin oluşturduğu potansiyel, yüklerin tek tek oluşturduğu potansiyelin toplamı alınarak elde edilir.

Birbirinden r_{12} uzaklığı ile ayrılan bir çift nokta yükün potansiyel enerjisi,

$$U = k_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad (25.13)$$

ile verilir. Bu eşitlik, yükler birbirinden sonsuz uzakta iken, aralarındaki uzaklığı r_{12} yapmak için gereken işi temsil eder. Noktalı yük dağılımının potansiyel enerjisi, Eşitlik 25.13'e benzeyen terimleri bütün parçacık çiftleri üzerinden toplayarak elde edilir.

TABLO 25.1 Çeşitli Yük Dağılımının Oluşturduğu Potansiyeller

Yük Dağılımı	Elektriksel Potansiyel	Durumu
a yarıçaplı düzgün yükülü dairesel bir halka.	$V = k_e \frac{Q}{\sqrt{x^2 + a^2}}$	Halka ekseni üzerinde, merkezden x uzaklıkta
a yarıçaplı düzgün yükülü dairesel disk	$V = 2\pi k_e \sigma [(\bar{x}^2 + a^2)^{1/2} - \bar{x}]$	Diskin ekseni boyunca, merkezden x uzaklıkta
Toplam yük Q yarıçapı R olan düzgün yükülü yalıtkan bir küre	$\begin{cases} V = k_e \frac{Q}{r} & r \geq R \\ V = \frac{k_e Q}{2R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2} \right) & r < R \end{cases}$	
Toplam yük Q yarıçapı R olan yatılmış iletken bir küre	$\begin{cases} V = k_e \frac{Q}{r} & r > R \\ V = k_e \frac{Q}{R} & r \leq R \end{cases}$	

Elektriksel potansiyel, x , y , z koordinatlarının fonksiyonu olarak biliniyorsa, elektrik alan bileşenleri, bu koordinatlara göre potansiyelin türevinin negatifini alarak elde edilebilir. Örneğin, elektrik alanın x bileşeni

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad (25.16)$$

olar.

Sürekli yük dağılımının oluşturduğu elektriksel potansiyel

$$V = k_e \int \frac{dq}{r} \quad (25.19)$$

ile verilir.

Elektrostatik dengedeki yükülü bir iletkenin yüzeyindeki her nokta aynı potansiyeldedir. Dahası, potansiyel iletkenin içindeki her noktada sabittir ve yüzeyindeki değerine eşittir.

Bir çok yük dağılımının oluşturduğu potansiyel Tablo 25.1'de liste özetlenmiştir.

Problem Çözümünde İpuçları

Elektriksel Potansiyelin Hesaplanması

- Potansiyelin skaler bir büyüklük olduğunu (elektrik alanı gibi vektörel bir nicelik değil) unutmayın. Böylece potansiyelin hiç bir bileşeni bulunmaz. Buna göre, noktalı yüklerden oluşan bir sistemin bir noktada oluşturduğu elektriksel potansiyeli üst-üste binme ilkesini kullanarak hesaplamak için, basitçe her bir yükün oluşturduğu potansiyelin cebirsel toplamını alınız, fakat, yükün işaretine muhakkak dikkat ediniz. Her bir pozitif yükün potansiyeli ($V = k_e q/r$) pozitif, her bir negatif yükün potansiyeli negatifdir.
- Aynen yerçekimi potansiyel enerjisinde olduğu gibi, elektriksel potansiyeldeki *degisme* anlamlıdır, dolayısıyla potansiyelin sıfır olduğu

noktayı seçmek keyfidir. Noktasal yükler veya sonlu büyüklükteki yük dağılımı ile ilgilenirken çokukere yüklerden sonsuz uzaklıktaki bir noktanın potansiyelini $V = 0$ olarak tanımlarız.

- Sürekli yük dağılımlarının bir P noktasında oluşturduğu potansiyel, yük dağılımı P noktasından r uzaklıkta bulunan sonsuz küçük dq yük elemanlarına bölünerek hesaplanabilir. Sonra, bu dq yük elemanını bir noktaya yük gibi kabul edip, P noktasında oluşturduğu potansiyeli $dV = k_e dq/r$ olarak alın. P noktasındaki toplam potansiyel, bütün yük dağılımı üzerinden dV integré edilerek elde edilir. Bir çok problemdede integral alabilmek için, dq ve r 'yi tek bir değişkenle ifade etmek gereklidir. Integral almayı basitleştirmek için, problemdeki geometrik yapıyı dikkatle göz önünde tutmak gereklidir. Bu metodu kullanmak için Örnek 25.5'ten Örnek 25.7'ye kadar yapılan çözümleri dikkatlice gözden geçirmelisiniz.
- Sonlu-sürekli yük sağılmının oluşturduğu potansiyeli bulmada kullanılan başka bir metod da Eşitlik 25.3 ile verilen potansiyelin tanımı ile basmaktadır. \mathbf{E} biliniyorsa ya da kolaylıkla elde edilebiliyorsa (Örneğin Gauss yasasından) o zaman $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ 'nin çizgi integrali hesaplanabilir. Bu metodun bir uygulaması Örnek 25.8'de verilmiştir.
- Bir noktadaki elektriksel potansiyel biliniyorsa, elektrik alan, bir koordinata göre potansiyelin türevinin negatifine eşit olduğunu hatırlayarak, o noktadaki elektrik alanı elde etmek mümkündür. Bu yöntem Örnek 25.4'te gösterilmiştir.

SORULAR

1. Elektriksel potansiyel ile elektriksel potansiyel enerji arasındaki farkı kendi ifadeinizle belirtiniz.
2. Düzgün bir elektrik alan yönünde negatif bir yük hareket etmektedir. Bunun potansiyel enerjisi azalır mı yoksa artar mı? Elektriksel potansiyel azalır mı yoksa artar mı?
3. Bir çift benzer yükün potansiyel enerjisini pozitif, bir çift farklı işaretli yükün potansiyel enerjisini negatif olduğu gerçeğini fiziksel bir açıklamasını yapınız.
4. Düzgün bir elektrik alanı x eksenine paraleldir. Yük üzerinde hiç bir dış iş yapmadan yük, bu alan içinde hangi yönde yerdeğiştirme yapar?
5. Eşpotansiyel yüzeylerin elektrik alan çizgilerinin niçin her zaman dik olduğunu açıklayınız.
6. (a) Sonsuz bir çizgisel yük ve (b) düzgün yüklü küre için eşpotansiyel yüzeyleri tanıtın.
7. Statik şartlarda, iletken içindeki bütün noktaların niçin aynı potansiyelde bulunmak zorunda olduğunu açıklayınız.
8. Düzgün yüklenmiş bir kürenin içindeki boşlukta elektrik alan sıfırdır. Bu, küre içindeki potansiyelin de sıfır olduğu anlamına mı gelir? Açıklayınız.
9. Sonsuz uzaklıktaki bir noktasal yükün potansiyeli sıfır olarak tanımlanır. $r = \infty$ da, niçin sonsuz çizgisel yükün potansiyelini sıfır olarak tanımlayamayız?
10. Şekil 25.23'teki gibi, farklı yarıçapta iki iletken küre, bir iletken telle birbirlerine bağlanmıştır. Hangi küre daha büyük bir yük yoğunluğuna sahiptir?
11. Van de Graaff üreticisinin topuzundaki maksimum potansiyel nasıl artırılabilir?
12. Yüksek voltaj güç hatlarının kabloları etrafında bazeen gözlenen kızıl ışığın sebebini açıklayınız.
13. Yüksek voltaj aletlerinde kullanılan iletkenlerin çok keskin kenarlı veya sıvı ucu olmalarından sakınmak neden önemlidir?
14. Rastgele oluşan elektrik alanlarında, elektronik devreleri ya da laboratuvarları nasıl perdeleyelim? Niçin bu iş yapılır?
15. Çok şimşekli, yıldırımlı, fırtınalı bir havada metal gördeli bir otomobil içinde oturmak dışarıya göre neden daha emindir?
16. Bir yün halı üzerinde dolaştıktan sonra bir kimseye dokunmak şok yaratabilir. Bunun neden olduğunu açıklayınız.

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

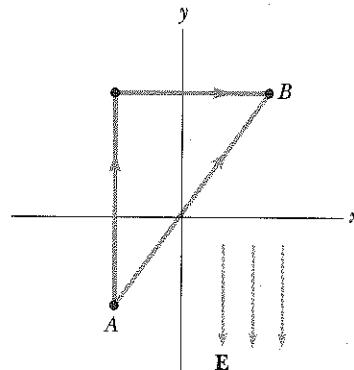
= Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

Kesim 25.1 Potansiyel Farkı ve Elektriksel Potansiyel

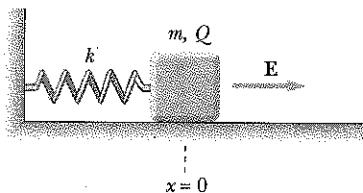
1. 9 V'luk elektriksel potansiyeldeki başlangıç noktasından, -5 V'luk potansiyele sahip bir noktaya Avagadro sayısı kadar elektron hareket ederse (bir baterya, jeneratör ya da diğer bir enerji kaynağı) tarafından ne kadarlık iş yapılır? (her bir durumda potansiyel, ortak referans noktasına göre ölçülüyor)
2. 115 V'luk potansiyel farkına kadar hızlandırılan bir iyonun, potansiyel enerjisindeki artışı $7,37 \times 10^{-17}$ J oluyor. İyonun yükünü hesaplayınız.
3. (a) Durgun halden 120 V'luk potansiyel farkına kadar ivmeleştirilen bir proton'un süratini hesaplayınız. (b) Aynı potansiyel farkına kadar ivmeleştirilen bir elektronun süratini hesaplayınız.
4. **Tarama Problemi.** Sükûnetten harekete başlayacak bir elektronu ışık hızının %40'ına kadar hızlandırmak için, ne kadarlık bir potansiyel farkına ihtiyaç vardır? ($c = 3 \times 10^8$ m/s)
5. $4,2 \times 10^5$ m/s lik bir ilk hızı olan elektronu durdurmak için ne kadarlık bir potansiyel farkı gerekir?

Kesim 25.2 Düzgün Bir Elektrik Alandaki Potansiyel Farkları

6. 250 V/m şiddetindeki düzgün bir elektrik alan pozitif x doğrultusundadır. $+12 \mu\text{C}$ luk bir yükün, orijinden $(x, y) = (20 \text{ cm}, 50 \text{ cm})$ noktasına hareket ettiğini varsayıñız. (a) Bu yük hangi potansiyel-enerji farkında hareket etmiştir? (b) Yük, hangi potansiyel farkında hareket etmiştir?
7. Bir TV cihazında hızlandırıcı levhalar arasındaki potansiyel farkı yaklaşık 25 000 V'dur. Bu levhalar arasındaki uzaklık 1,50 cm ise, bu bölgedeki düzgün elektrik alanın büyüklüğü ne olur?
8. $5,9 \times 10^3$ V/m şiddetteki düzgün bir elektrik alan içinde bir elektron durgun halden serbest bırakıldıgını varsayıñ (a) 1 cm lik hareketinden sonra ne kadarlık potansiyel farkına ulaşır? (b) Elektron 1 cm lik hareketin sonunda ne kadarlık hızza ulaşır?
9. x eksene paralel hareket eden bir elektronun orijindeki hızı $3,7 \times 10^6$ m/s dir. Elektronun hızı, $x = 2$ cm de azalarak $1,4 \times 10^5$ m/s değerini alıyor. $x = 2$ cm noktası ile orijin arasındaki potansiyel farkını hesaplayınız. Hangi nokta daha yüksek potansiyelidir?
10. Şekil P25.10'da düzgün elektrik alan *negatif* y ekseni doğrultusunda ve 325 V/m şiddetindedir. A noktasının koordinatları $(-0,2; -0,3)$ m ve B noktasının koordinatları $(0,4; 0,5)$ m dir. Mavi çizgileri kullanarak $V_B - V_A$ potansiyel farkını hesaplayınız.

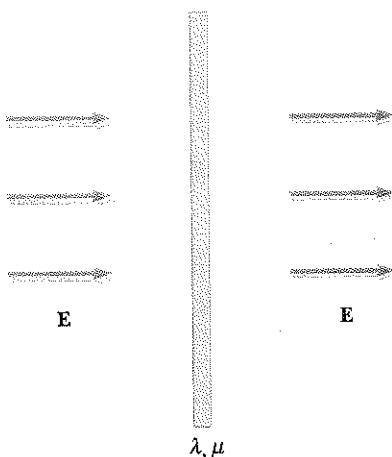
**Şekil P25.10**

11. Yay sabiti $k = 100 \text{ N/m}$ olan bir yaya bağlı $4,00 \text{ kg}$ 'lık bir blok üzerinde $Q = 50 \mu\text{C}$ yük bulunmaktadır. Blok sürüünmesiz yatay bir düzlem üzerinde olup, sisteme, Şekil P25.11'de gösterilen yönde $E = 5,00 \times 10^5 \text{ V/m}$ 'lik düzgün elektrik alan içinde bulunmaktadır. Blok, yayın gerilmemiş durumunda ($x = 0$ 'da) durgun halden serbest bırakılır, (a) Yay en fazla ne kadar ular? (b) Bloğun yeni denge durumu nedir? (c) Bloğun basit harmonik hareket yaptığı gösteriniz ve periyodunu bulunuz. (d) Blok ve yüzey arasındaki kayma sürtünme katsayısı 0,2 ise, (a) şıklını tekrarlayınız.
12. m kütleyeli ve Q yüklü bir blok, yay sabiti k olan bir yaya bağlıdır. Blok sürüünmesiz yatay bir düzlem üzerinde kayabilemektedir ve sisteme Şekil P25.11'de gösterilen yönde E büyüklüğündeki düzgün elektrik alan uygulanmaktadır. Blok, durgun halden yayın gerilmemiş durumda ($x = 0$ da) serbest bırakılırsa, (a) Yay en fazla ne kadar ular? (b) Bloğun yeni denge durumu nedir? (c) Bloğun basit harmonik hareket yaptığı gösteriniz ve periyodunu bulunuz. (d) Blok ve yüzey arasındaki kayma sürtünme katsayısı μ_k ise, (a) şıklını tekrarlayınız.

**Şekil P25.11** Problem 11 ve 12

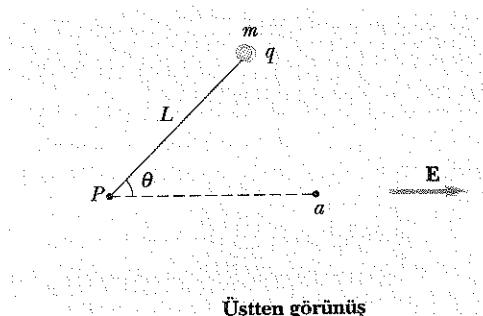
13. Tehar uydusundaki çekim ivmesi dünyadaki yerçekimi ivmesi ile aynıdır, fakat uyu yüzeyine çok yakın bölgede, çok kuvvetli aşağıya doğru düzgün bir elektrik alan bulunmaktadır. $5,00 \mu\text{C}$ 'luk yük taşıyan $2,00 \text{ kg}$ 'lık top, yukarı doğru $20,1 \text{ m/s}$ hızla fırlatılıyor ve $4,10 \text{ s}$ 'lik bir aradan sonra uyu yüzeyine çarıyor. Atış hareketinin başlangıç ve tepe noktaları arasındaki potansiyel farkı ne kadardır?

14. Boyca yük yoğunluğu $\lambda = 40,0 \mu\text{C}$ ve boyca kütle yoğunluğu $\mu = 0,100 \text{ kg/m}$ olan yarıtlımsı bir çubuk (Şekil P25.14'deki gibi), kendisine dik doğrultudan $E = 100 \text{ V/m}$ 'lik düzgün elektrik alan içinde ilk hızsız serbest bırakılmıştır. (a) $2,00 \text{ m}$ hareket ettikten sonra çubuğun hızını bulunuz. (b) Elektrik alan çubuğa dik değilse, (a) şıklının yanıtını nasıl değiştirebilirsiniz? Açıklayınız.



Şekil P25.14

15. Yükü $q = +2,00 \mu\text{C}$ ve külesi $m = 0,010 \text{ kg}$ 'lık bir parçacık Şekil P25.15'deki gibi $L = 1,50 \text{ m}$ uzunluğundaki ipe bağlanmış ve ipin diğer ucu P noktasındaki eksene tutturulmuştur. Parçacık, ip ve eksen yatay durumda masa üzerindedir. Parçacığın ipi $E = 300 \text{ V/m}$ büyütüğündeki düzgün elektrik alanla $\theta = 60^\circ$ 'lik açı yaptığı zaman, parçacık sükünet halinde serbest bırakılırsa, ipin elektrik alana paralel olduğu zaman parçacığın (Şekil P25.15'teki a noktasındaki) hızını bulunuz.



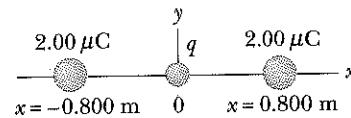
Şekil P25.15

Kısmı 25.3 Noktasal Yüklerin Oluşturduğu Elektriksel Potansiyel ve Potansiyel Enerji

Not: Problemlerde aksi söylenmemişde potansiyelin referans seviyesini $r = \infty$ da $V = 0$ olarak alınız.

16. (a) Bir protondan $1,00 \text{ cm}$ uzaklıktaki potansiyeli bulunuz. (b) Bir protondan $1,00 \text{ cm}$ ve $2,00 \text{ cm}$ uzaklıktaki iki nokta arasındaki potansiyel farkı ne kadardır? (c) Bir elektron için (a) ve (b) şıklarını tekrarlayınız.

17. Şekil P25.17'de görüldüğü gibi, iki tane $2 \mu\text{C}$ luk yük ve orijinde $q = 1,28 \times 10^{-18} \text{ C}$ luk pozitif bir deneme yükü veriliyor. (a) İki tane $2 \mu\text{C}$ luk yükün q yükü üzerine uyguladığı net kuvvet nedir? (b) İki tane $2 \mu\text{C}$ luk yükün orijinde oluşturduğu elektrik alan potansiyeli ne kadardır? (c) İki tane $2 \mu\text{C}$ luk yükün orijinde oluşturduğu elektriksel potansiyel ne kadardır?



Şekil P25.17

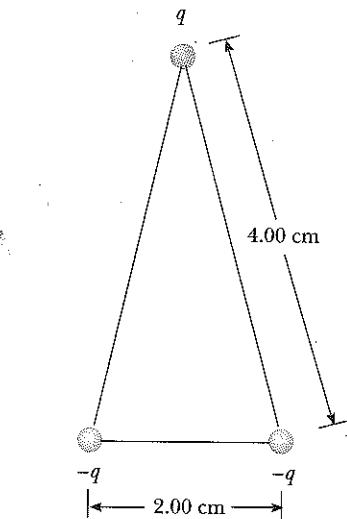
18. $+q$ yükü orijindedir. $-2q$ yükü de x ekseni üzerinde $x = 2,00 \text{ m}$ 'dedir. x 'in hangi sonlu değeri için; (a) elektrik alan sıfır olur? (b) Elektriksel potansiyel sıfır olur?

19. Hidrojen atomunun Bohr modeli, elektronun yalnızca belirli izinli yörüngelerde bulunacağını söyler. Her bir Bohr yörungesinin yarıçapı $r = n^2 (0,0529 \text{ nm})$ ifadesiyle verilir. Burada $n = 1, 2, 3, \dots$ dir. Hidrojen atomunun elektriksel potansiyel enerjisini, elektron (a) Birinci ($n = 1$) yörungede (b) İkinci ($n = 2$) yörungede ve (c) elektron atomu terk edip $r = \infty$ a gittiğinde hesaplayınız. Cevapları elektron volt cinsinden ifade ediniz.

20. $Q_1 = +5 \text{ nC}$ ve $Q_2 = -3 \text{ nC}$ luk iki noktasal yükün arasındaki uzaklık 35 cm dir. (a) Bu yük çiftinin potansiyel enerjisi nedir? Cevabınızda cebirsel işaretin anlamı nedir? (b) Yükler arasındaki orta yerde elektriksel potansiyel ne kadardır?

21. Şekil P25.21 de gösterilen ikizkenar üçgenin köşelerinde üç tane yük vardır. $q = 7 \mu\text{C}$ alarak, üçgenin tabanının tam orta noktasında elektriksel potansiyeli hesaplayınız.

22. Bu problemi Bölüm 23'teki Problem 55 ile karşılaştırınız. Dört eşdeğer ($q = +10,0 \mu\text{C}$) noktasal yük Şekil 23.55'teki gibi bir dikdörtgenin köşelerine yerleştirilmiştir. Dikdörtgenin boyutları $L = 60,0 \text{ cm}$ ve $W = 15,0 \text{ cm}$ 'dir. Diğer üç yükün varlığı yüzünden sol alt köşedeki yükün elektriksel potansiyel enerjisini hesaplayınız.

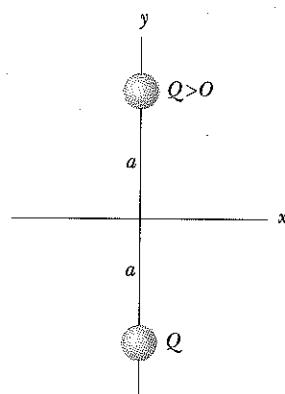


Şekil P25.21

23. Bir kenarı s olan bir karenin köşelerine Q büyüklüğünde özdeş yükler yerleştirebilmek için, $5,41 k_e Q^2/s$ kadarlık bir iş yapmak gerektiğini gösteriniz.
24. Bu problemi Bölüm 23'teki Problem 18 ile karşılaştırınız. x ekseninde biri $x = 1,00$ m'de ve diğeri $x = -1,00$ m'de bulunan iki noktalı yükten her birinin büyülüğu $2,00 \mu\text{C}$ dur. (a) y ekseninde $y = 0,50$ m'deki elektriksel potansiyeli bulunuz. (b) y ekseninde $y = 0,50$ m konulan üçüncü $-3,00 \mu\text{C}$ luk yükün elektriksel potansiyel enerjisini hesaplayınız.
25. Bu problemi Bölüm 23'teki Problem 22 ile karşılaştırınız. Yarıçaplı bir dairenin çevresine simetrik olarak beş eşit negatif $-q$ yük konulmuştur. Dairenin merkezindeki elektriksel potansiyeli hesaplayınız.
26. Bu problemi Bölüm 23'teki Problem 17 ile karşılaştırınız. Bir kenarı a olan Şekil P23.17'de gösterilen eşkenar üçgenin her bir köşesine üç tane eşit pozitif q yük konulmuştur. (a) yüklerin bulunduğu düzlemede elektriksel potansiyelin sıfır olduğu bir nokta var mıdır? Varsa nerededir? (b) Bu üçgenin tabanındaki iki yükün P noktasında oluşturacağı potansiyel ne olur?
27. **Tarama Problemi.** İki yalıtılmış kürenin yarıçapları $0,30$ cm ve $0,50$ cm olup kütleleri $0,100$ kg ve $0,700$ kg'dır ve üzerlerindeki yükler $-2,00 \mu\text{C}$ ve $3,00 \mu\text{C}$ dur. Küreler, merkezleri arasındaki uzaklık, $1,00$ m iken serbest bırakılıyor. (a) Çarpıştığı anda hızları ne kadardır? (İpucu: Doğrusal momentum ve enerji korunumunu göz önüne alınır.) (b) Eğer küreler iletkense, bunların hızları (a) şekilde hesaplanan hızdan küçük mü, büyük mü olur? Açıklayınız.
28. **Tarama Problemi.** Merkezleri arasındaki uzaklık d iken serbest bırakıldığında, iki yalıtılmış kürenin yarıçapları r_1 ve r_2 olup, kütleleri m_1 ve m_2 'dir ve üzerlerindeki yükler $-q$ ve q 'dur. (a) Her birinin çarpıştığı andaki hızları ne kadardır? (İpucu: Doğrusal momentum ve enerji korunumunu göz önüne alınır.)

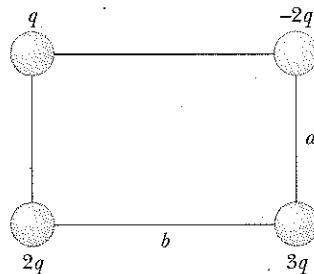
(b) Küreler iletkense, bunların hızları (a) şekilde hesaplanan hızdan küçük mü büyük mü olur? Açıklayınız.

29. Bir küçük küresel cisim 8 nC luk yük taşımaktadır. Bu cismin merkezinden hangi uzaklıkta potansiyel 100 V , 50 V , 25 V değerlerindedir? Esptansiyeller arasındaki uzaklık, V deki değişme ile orantılı mıdır?
30. Şekil P25.30'da görüldüğü gibi, x ekseninin altında ve üstündeki eşit uzaklıklara y eksenin boyunca eşit büyülüklükte iki noktalı yük yerleştiriliyor. (a) x eksenin boyunca, $3a < x < 3a$ aralığında yer alan noktalının potansiyelinin grafiğini çiziniz. Potansiyelin grafiğini $k_e Q/a$ birimleriyle çizin. (b) $-a$ noktasındaki yükü negatif alarak, y eksenin boyunca $-4a < y < 4a$ aralığında potansiyelin grafiğini çiziniz.



Şekil P25.30

31. Atomun gezegen modeline yol açan Rutherford'un ünlü saçılma deneyinde, altın çekirdeği üzerine (yükü $+79e$) bir alfa parçası (yükü $+2e$, kütlesi $= 6,64 \times 10^{-27}$ kg) gönderilir. Başlangıçta altın çekirdeğinden çok uzakta olan alfa parçası, çekirdeğin merkezine doğru $2,00 \times 10^7$ m/s hızla gönderiliyor. Bu alfa parçası, merkez civarında sapmadan önce merkeze ne kadar yaklaşı? Altın çekirdeğinin durgun kaldığını varsayıınız.
32. Düzgün yüklenmiş, toplam yükü, $1,00 \text{ nc}$ olan, yalıtılmış $2,00$ cm yarıçaplı kürenin merkezinden $3,00$ cm uzaklıktaki bir elektron durgun halden harekete geçiyor. Elektron, kürenin yüzeyine ulaştığında hızı ne olur?
33. Şekil P25.33'te gösterilen yükleri bulundukları yere getirmek için gereken enerjiyi hesaplayınız. Burada $a = 0,20$ m, $b = 0,40$ m ve $q = 6 \mu\text{C}$ dur.
34. Özdeş dört parçasının her birinin yükü q , kütlesi m 'dir. Yükler, L kenarlı bir karenin köşelerinden ilk hızsız serbest bırakılmıştır. Karenin merkezinden olan uzaklıklar iki katına çıktığında hızları ne kadar olur?



Şekil P25.33

35. Bir kenarı s olan kübün köşelerine, herbiri q büyükliğinde olan sekiz tane özdeş noktasal yükü yerleştirmek için ne kadarlık bir iş gereklidir?

Kısim 25.4 Elektriksel Potansiyelden Elektrik Alan Elde Edilmesi

36. $x = 0$ ve $x = 6$ m arasındaki bölgede potansiyel $V = a + bx$ olarak veriliyor. Burada $a = 10$ V ve $b = -7$ V/m dir. (a) $x = 0$, 3 m ve 6 m deki potansiyeli (b) $x = 0$, 3 m ve 6 m deki elektrik alanın yönünü ve büyüklüğünü belirleyiniz.

WEB 37. Uzayın belirli bir bölgesi üzerinde elektriksel potansiyel $V = 5x - 3x^2y + 2yz^2$ olarak veriliyor. Bu bölgede, elektrik alanın x , y ve z bileşenlerine ait ifadeleri bulunuz. Koordinatları metre cinsinden- $(1, 0, -2)$ olarak verilen P noktasındaki elektrik alanın büyüklüğünü nedir?

38. R yarıçaplı bir küresel iletkenin içindeki elektriksel potansiyel $V = k_e Q/R$, dışındaki potansiyel $V = k_e Q/r$ ile verilmiştir. $E_r = -dV/dr$ ifadesini kullanarak (a) Bu yük dağılımının içinde ($r < R$), (b) dışındaki ($r > R$) elektrik alanı ifadesini türetiniz.

39. Örnek 25.7'de belirtildiği gibi, x eksen boyunca uzanan ℓ uzunluklu düzgün yüklü bir çubukun bir ucundan a uzaklığındaki P noktasında elektriksel potansiyel,

$$V = \frac{k_e Q}{\ell} = \ln \left(\frac{\ell + \sqrt{\ell^2 + a^2}}{a} \right)$$

ifadesi ile verildiği gösterilmiştir. Bu sonucu kullanarak P noktasındaki elektrik alanın y bileşeni için bir ifade türetiniz. (İpucu: a yerine y koynuz.)

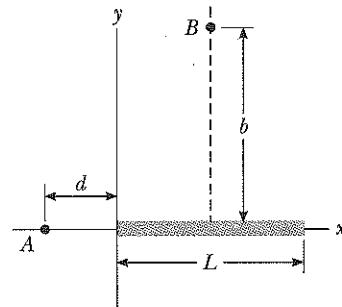
40. a yarıçaplı yüksüz iletken bir küre, xyz koordinat sisteminin merkezine konulduğunda, başlangıçta düzgün $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{k}$ şeklinde bir elektrik alanında bulunuyor olsun. Kürenin dışındaki noktalar toplam elektriksel potansiyel,

$$V(x, y, z) = V_0 - E_0 z + \frac{E_0 a^3 z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

oluyor. Burada V_0 iletken üzerindeki (sabit) elektriksel potansiyeldir. Bu ifadeyi kullanarak toplam elektriksel alanın x , y ve z bileşenlerini elde ediniz.

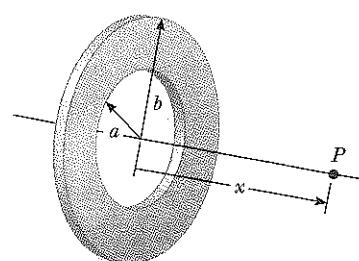
Kesim 25.5 Sürekli Yük Dağılımının Oluşturduğu Elektriksel Potansiyel

41. R yarıçaplı bir halkanın çevresi üzerinde düzgün dağılmış toplam Q yükünün bulunduğu varsayımlı. Halka merkezinden $2R$ uzaklıkta halka eksenindeki bir nokta ile, halka merkezindeki nokta arasında potansiyel farkı ne kadar olur?
42. Bu problemi Bölüm 23'teki Problem 33 ile karşılaştırınız. Düzgün yüklenmiş 14 cm uzunluktaki yalıtkan bir çubuk Şekil P23.33'te gösterildiği gibi yarımdaire şeklinde kıvrılmıştır. Çubugun toplam yükü $-7,50 \mu\text{C}$ ise, yarımdairenin merkezi olan O noktasındaki elektriksel potansiyeli bulunuz.
43. Sol ucu orjinde bulunan x eksen boyunca uzanmış L uzunluklu bir çubugun (Şekil P25.43) üzerinde düzgün olmayan $\lambda = \alpha x$ yük yoğunluğu bulunmaktadır. (Burada α pozitif bir sabittir.) (a) α sabitinin birimi nedir? (b) Çubugun sol ucundan d uzaklığındaki A noktasında elektriksel potansiyeli hesaplayınız.



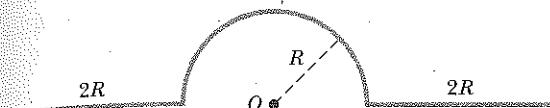
Şekil P25.43 Problem 43 ve 44.

44. Bir önceki probleme belirtilen durumda, x eksen boyunca bulunan çubugun tam ortasından çıkan dikme üzerinde, b uzaklığındaki B noktasında elektriksel potansiyeli hesaplayınız.
45. Şekil P25.45'de gösterilen düzgün dağılmış σ yük yoğunluğu bulunan levhanın eksenindeki bir P noktasında elektriksel potansiyeli hesaplayınız.



Şekil P25.45

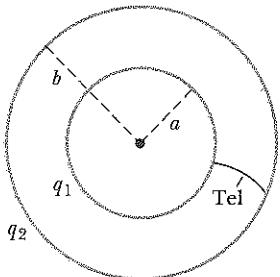
46. Düzgün yük yoğunluğu λ olan sonlu uzunluktaki bir tel, Şekil P25.46'da gösterildiği biçimde kıvrılmıştır. O noktasındaki elektriksel potansiyeli bulunuz.



Şekil P25.46

Kesim 25.6 Yüklü Bir İletkenin Potansiyeli

47. 0,3 m yarıçaplı, başlangıçta yüksüz bir küresel iletkenin kaç tane elektron uzaklaştırılmalı ki, bu kürre yüzeyinde 7,5 kV luk bir potansiyel oluşsun?
48. Uzun bir iletken telle iki yüklü küresel iletken birbirlerine bağlanmıştır. Bu iki kürre bileşimi üzerindeki toplam yük $+20 \mu\text{C}$ dur. (a) Birinin yarıçapı 4 cm, ötekinin yarıçapı 6 cm ise, her bir kürrenin yüzeyi yakınındaki elektrik alan ne kadardır? (b) Her bir kürrenin elektriksel potansiyeli ne kadardır?
- WEB** 49. Küresel bir iletkenin yarıçapı 14 cm ve üzerindeki yük $+26 \mu\text{C}$ dur. Bu iletkenin merkezinden aşağıdaki uzaklıklar için elektriksel potansiyeli ve elektrik alanı hesaplayınız. (a) $r = 10$ cm, (b) $r = 20$ cm ve (c) $r = 14$ cm.
50. Yarıçapları $a = 0,40$ m ve $b = 0,50$ m olan aynı merkezli iki küresel iletken kabuk Şekil P25.50'deki gibi ince bir iletken telle birleştirilmiştir. Sisteme $Q = 10,0 \mu\text{C}$ toplam yük verilirse, her bir kürre üzerindeki yük ne olur?



Şekil P25.50

(Seçmeli)

Kesim 25.7 Millikan'ın Yağ Damlası Deneyi

(Seçmeli)

Kesim 25.8 Elektronik Uygulamalar

51. 30 cm çapında külesi (oyuk iletken) bulunan Van de Graaff jeneratörünün kuru havada bulunduğu düşünün. (a) Küresinin maksimum potansiyeli ne kadardır? (b) Küresinin üzerindeki maksimum yük ne kadardır?
52. Küresel kubbeli Van de Graaff jeneratörü maksimum 600 kV'luk bir potansiyele yükseltebiliyor. Bundan büyük yükler, kubbe çevresindeki kuru havayı bozarak kivircım atlamasına neden olur. Küresel kürmin, (a) üzerindeki yükü, (b) yarıçapını bulunuz.

EK PROBLEMLER

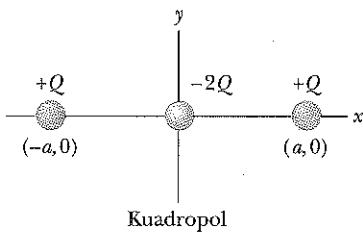
53. Çekirdeklerin sıvı-damlası modeline göre, belli bir çekirdek, yüksek enerjili titresimlerle parçalanarak bir kaç nötronla birlikte birbirine eşit olmayan iki kürme ayrılabilir. Ayrılan kürmeler karşılıklı Coulomb itmesi sonucu kinetik enerji kazanırlar. Yarıçapı $5,5 \times 10^{-15}$ m, yükü $+38e$ ve yarıçapı $6,2 \times 10^{-15}$ m, yükü $+54e$ şeklinde oluşan iki küresel kürme parçalanan Uranyum çekirdeklерinin Coulomb potansiyel enerjisini (MeV cinsinden) hesaplayınız. Parçalanan her bir küresel kürmenin hacminde yük dağılımının düzgün olduğunu ve başlangıçta durgun haldeki yüzeylerinin birbirlerine temas ettiğini varsayınız. (Çekirdeği çevreleyen elektronları da savaşlayın.)
54. Kuru bir kişi gününde, deri-tabanlı ayakkabı ile ayağını sürerek hali üzerinden geçer ve metal kapı koluna doğru bir parmağınızın ucunu uzatırsanız şoka uğrayabilirsiniz. Bazen, karanlık odada 5 mm uzunluğunda kivircım atlaması görürsünüz. (a) Üzerindeki elektriksel potansiyelin, (b) kapı koluna değişmeden önce vücudundaki yükün büyüklük mertebesini tahmin ediniz. Çözümünüzü açıklayınız.
55. Şekil P25.55'te gösterilen yük dağılımına, bir çizgisel kuadropol olarak bakılabilir. (a) x eksenin üzerinde $x > a$ noktasındaki potansiyelin

$$V = \frac{2k_e Q a^2}{x^3 - x a^2}$$

olduğunu gösteriniz. (b) $x \gg a$ olduğu zaman (a) şıklından elde edilen bağıntının

$$V = \frac{2k_e Q a^2}{x^3}$$

'ye indirgeneceğini gösteriniz.

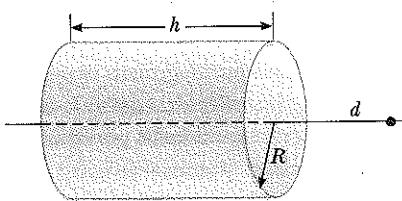


Şekil P25.55

56. (a) Problem 55'ten elde edilen tam sonucu kullanarak, $x > a$ için, çizgisel kuadropole'un x eksenin boyunca herhangi bir noktada elektrik alanını bulunuz. (b) $a = 2$ mm ve $Q = 3 \mu\text{C}$ ise, $x = 3a$ 'daki E yi hesaplayınız.
57. Bir noktalı yükten belirli bir uzaklıkta elektrik alan şiddeti 500 V/m , elektriksel potansiyel -3000 V dur. (a) Bu yükten olan uzaklık ne kadardır? (b) Yükün büyüklüğü ne kadardır?
58. Düzgün pozitif yüklenmiş halkanın eksenin üzerinde, halka merkezinden 0,10 m uzaklıktan bir elektron

durgun halden serbest bırakılmıştır. Halkanın çizgisel yük yoğunluğu $+0,100 \mu\text{C}/\text{m}$ ve yarıçapı $0,02 \text{ m}$ ise, elektron halka merkezine ulaşığı zaman hızı ne kadardır?

59. Toplam yükü Q yarıçapı R ve yüksekliği h olan düzgün yüklenmiş silindirik bir kabuğu göz önüne alınınız. Şekil P25.59'da görüldüğü gibi, silindirin sağ kenarından d uzaklıktaki elektriksel potansiyeli bulunuz. (İpucu: Silindiri yük topluluğu gibi düşünerek Örnek 25.5'in sonucunu kullanınız.) (b) Bir dolu silindir için Örnek 25.6'nın sonucunu kullanarak aynı problemi çözünüz.



Şekil P25.59

60. 12,0 cm ile aralıklı iki paralel plaka eşit büyüklükte zıt işaretli yüklerle sahiptir. Her bir plakanın üzerindeki yüzeyel yük yoğunluğu $36,0 \text{ nC}/\text{m}^2$ dir. Durgun bir proton pozitif plakadan serbest bırakılmıştır. (a) Plakalar arasındaki potansiyel farkını, (b) Proton'un negatif plakaya ulaşığı zamanki enerjisini, (c) Proton'un negatif levhaya çarpmadan önceki hızını, (d) Proton'un ivmesini, ve (e) proton üzerindeki kuvveti bulunuz. (f) Bu kuvvetten, elektrik alanın büyüklüğünü bulunuz ve bunun plakalar üzerindeki yük yoğunluğundan bulunan eşit olduğunu gösteriniz.

61. R yarıçaplı küresel bir kabuğu Q kadar yüklemek için yapılması gereken işi hesaplayınız.

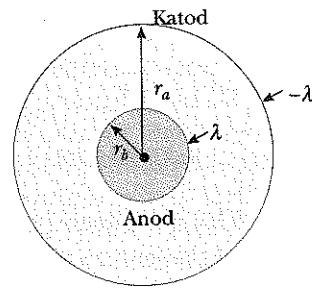
62. Geiger-Müller sayıcısı, bir tür ışınım (radyasyon) ölçme dedektörü olup, esasında iç yarıçapı r_a olan boş bir iç silindir (Katod) ve yarıçapı r_b olan aynı eksenli kafes şeklinde tellerden oluşan (Anot) silindirden ibarettir (Şekil 25.45). Anot üzerindeki birim uzunluktaki yük λ , katod üzerinde birim uzunluktaki yük $-\lambda$ dir. (a) dedektörün duyarlı bölgesinde yer alan silindirle teller arasındaki potansiyel farkının

$$\Delta V = 2k_e \lambda \ln\left(\frac{r_a}{r_b}\right)$$

şeklinde olduğunu gösteriniz. (b) Bu bölgenin dışında elektrik alanının büyüklüğünün

$$\Delta E = \frac{V}{\ln(r_a/r_b)} \left(\frac{1}{r}\right)$$

ifadesi ile verileceğini gösteriniz. Burada r , anot merkezinden elektrik alanının hesaplandığı noktaya olan uzaklıktır.



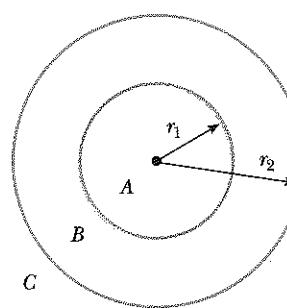
Şekil P25.62

63. Düzgün dağılmış çizgisel bir yükün elektrik alanı, Gauss yasasına göre

$$\mathbf{E} = \left(\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \right) \hat{\mathbf{r}}$$

ile verilmektedir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$, çizgisel yükten çapsal doğrultuda uzaklaşan birim vektör, λ çizgi boyunca metre başına yüktür. $r = r_1$ ve $r = r_2$ arasındaki potansiyel farkı için bir ifade türetiniz.

64. Noktasal bir $+q$ yük $x = -R$ de, başka bir $-2q$ noktasal yük orijinde bulunuyor. Sıfır potansiyeldeki eşpotansiyel yüzeyin, yarıçapı $r = 2R/3$ ile verilen ve merkezi $(-4R/3, 0, 0)$ da bulunan bir küre olduğunu ispatlayınız.
65. Şekil P25.65'teki gibi, iki ince, iletken küresel kabuk göz önüne alınız. İçteki kabuğun yarıçapı $r_1 = 15 \text{ cm}$ ve üzerindeki yük $+10 \text{ nC}$ dur. Dıştaki kabuğun yarıçapı $r_2 = 30 \text{ cm}$ ve yükü -15 nC dur. Aşağıdaki bölgelerde (a) E elektrik alanı ve (b) A , B ve C bölgelerinde V elektriksel potansiyeli bulunuz. $r = \infty$ da $V \equiv 0$ dir.



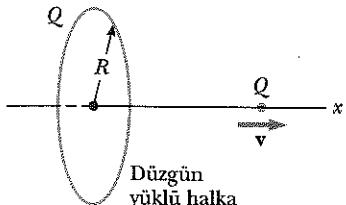
Şekil P25.65

66. x ekseni, Q yükünde ve R yarıçaplı düzgün yüklenmiş bir halkanın simetri eksenidir. (Şekil P25.66). Halka merkezine M küteli bir Q noktasal yükü konuluyor. Noktasal yük x ekseni hafifçe yerdeğiştirdi-

günde hızlanarak sonsuz uzaklığa gitmesi halinde, noktasal yükün en son süratinin

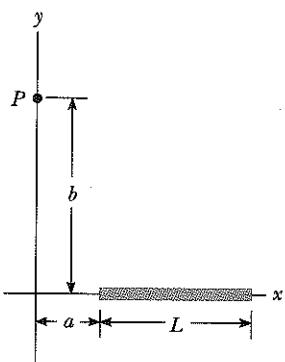
$$v = \left(\frac{2k_e Q^2}{MR} \right)^{1/2}$$

olduğunu gösteriniz.



Şekil P25.66

67. $25,0 \text{ nC/m}^2$ yüzeyel yük yoğunluğuna sahip sonsuz büyülükteki bir yüklü tabakası orijinden geçenek şekilde xy düzleminde bulunmakta ve $z = 0$ ve $y = 0$ 'da potansiyeli $1,00 \text{ kV}$ 'dur. Çizgisel yük yoğunluğu $80,0 \text{ nC/m}$ olan uzun bir tel, y eksenine平行 olarak konulmuş olup, x eksenini $x = 3,00$ 'da kesmektedir. (a) x eksen boyunca tel ve tabaka arasında potansiyeli x 'in fonksiyonu olarak elde ediniz. (b) $x = 0,80 \text{ m}'ye 2,00 \text{ nC}'luk bir yükün konulması halinde potansiyel enerji ne olur?$
68. Şekil P25.68'de gösterilen düzgün yüklü ince çubukun çizgisel yük yoğunluğu λ dir. P noktasında elektriksel potansiyel için bir ifade bulunuz.

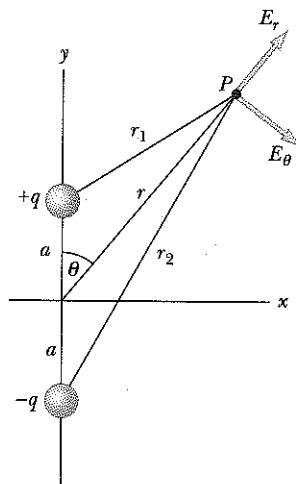


Şekil P25.68

69. Bir dipol Şekil P25.69'daki gibi y eksen boyunca yerleştirilmiştir. (a) Dipolden oldukça uzakta ($r \gg a$) bir P noktasındaki elektriksel potansiyel

$$V = k_e \frac{p \cos \theta}{r^2}$$

ile verilmektedir. Burada $p = 2qa$ dir. Elektrik alanın radyal bileşeni E_r ve dik bileşeni E_θ yi hesaplayınız. E_θ



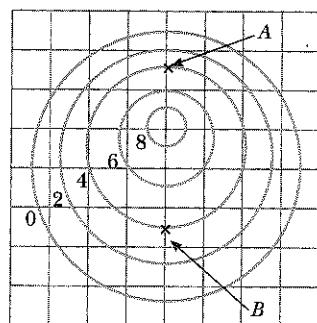
Şekil P25.69

$= -(1/r)(\partial V / \partial \theta)$ olacağına dikkat edin. Bu sonuç $\theta = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $r = 0$ için uygun mudur? (b) Bu dipol düzenlemesi için,

$$\cos \theta = \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}}$$

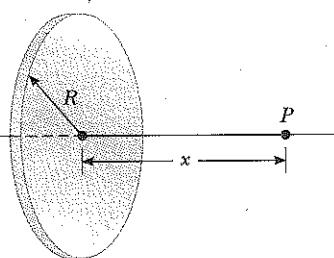
ve $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ yi kullanarak V yi, (r, θ) koordinatları cinsinden ifade ediniz. Bu sonucu kullanarak ve $r \gg a$ alarak elektrik alanın E_x ve E_y bileşenlerini hesaplayınız.

70. Şekil 25.42; herbirinin potansiyeli volt olarak üzerinde yazılan bir çok eşpotansiyel çizgilerini gösteriyor. Karesel ağırlık iki çizgi arasındaki uzaklık 1 cm yi belirlemektedir. (a) E elektrik alan şiddeti A noktasında mı, B noktasında mı daha büyütür? Niçin? (b) B deki E ne kadardır? (c) en az 8 tane alan çizgisi çizilirse elektrik alan neye benzer?



Şekil P25.70

71. R yarıçaplı bir diskin düzgün olmayan yüzeyce yük yoğunluğu $\sigma = Cr$ dir. Burada C bir sabittir r , diskin merkezinden olan uzaklıktır (Şekil P25.71). Disk ekseri üzerinde merkezden x uzaklıktaki bir P noktasındaki potansiyeli (integral yolu ile) bulunuz.



Şekil P25.71

72. Toplam yükü Q olan R yarıçaplı içi dolu bir kürenin düzungün dağılmış yük yoğunluğu ρ dur. Bu yüklü kürenin *toplam* potansiyel enerjisi için bir ifade türeti-

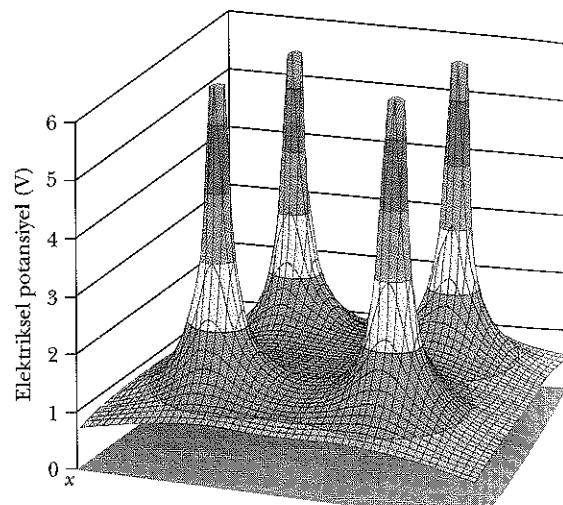
niz. (*İpucu:* Kürenin, birbiri üzerine oturtulmuş her biri $dq = (4\pi r^2 dr)\rho$ yüküne sahip eşmerkezli küresel kabuklardan yapıldığını düşünün ve $dU = V dq$ ifadesini kullanınız.)

73. Problem 62'nin sonuçlarını, elektrostatik çökelticiye uygulayınız (bakınız Şekil 25.28a ve Şekil P25.62). Merkezdeki tele $\Delta V = V_a - V_b = 50,0$ kV potansiyel üretilmesi sırasında üzerindeki elektrik alanın büyüklüğü 5,50 MV/m oluyor. Silindirik düzgün dış duvarın yarıçapı $r_a = 0,85$ m'dir. (a) Merkezdeki telin r_b yarıçapı ne olmalıdır? Burada transcendental bir denklemin çözümünü bulmaya gereksinim duyacaksınız. (b) Dış duvardaki elektrik alanın büyüklüğü ne kadarır?

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 25.1 Elektriksel alan düzungünse fraketimez. (Bunu sonraki kesimde ayrıntılı işleyeceğiz) Fakat genel olarak, elektrik alan her bir yerde farklı olabilir.
- 25.2 $B \rightarrow C$, $C \rightarrow D$, $A \rightarrow B$, $D \rightarrow E$. B 'den C 'ye harekette elektriksel potansiyel 2 V kadar azalır ve böylece, her bir kulonluk yükün hareketinde elektrik alan 2 J'lük iş yapar. C den D 'ye harekette elektriksel potansiyel 1 V azalır, böylece alan tarafından 1 J iş yapılır. Yükün A 'dan B 'ye hareketinde elektriksel potansiyel değişmediğinden hiç bir iş yapılmaz. D 'den E 'ye harekette elektriksel potansiyel 1 V artar ve böylece alan -1 J iş yapar. Bu durum, bir kütlenin yükseğe kaldırılmasındaki yerçekimine karşı alanının kütle zerine negatif iş yapması gibidir.
- 25.3 Elektriksel potansiyel yarıçapla ters orantılı olarak azalır (bakınız Eşitlik 25.11). Elektrik alanın büyüklüğü yarıçapın karesinin tersi ile azalır (bakınız Eşitlik 23.4). Çünkü yüzeysel alan r^2 ile artarken, elektrik alanın büyüklüğü $1/r^2$ ile azalır ve yüzeyden geçen elektrik akısı sabit kahr (bakınız Eşitlik 24.1).
- 25.4 (e) Evet. Dört eşit yükün, bir karenin köşelerine yerleştirildiğini düşününüz. Bu durumda elektriksel potansiyelin grafiği şekilde gösterilmiştir. Karenin merkezinde elektrik alan sıfırdır, çünkü bu dört yükten her birinin merkezde oluşturduğu alan birbirlerini yok eder, fakat potansiyel sıfır olmaz. Yüklü iletkenin içinde de durum böyle olur. (b) Yine evet.

Örneğin Şekil 25.8'de, bir dipolun merkezinde elektriksel potansiyel sıfır olur, fakat bu noktada alanın büyüklüğü sıfır değildir. (Dipoldeki iki yük zit işaretli olarak tanımlanmıştır, böylece iki yük tarafından oluşturulan elektrik alan çizgileri pozitif yükten negatif yük'e doğru uzanır ve hiç bir yerde yok olmaz.) Bu, Örnek 25.4c'deki durum olup, elde edilen denklemlerden $V = 0$ ve $E \neq 0$ olur.





DANGER

HAZARDOUS VOLTAGE INSIDE. DO NOT OPEN.
GEFAHRLICHE SPANNUNG. ABDECKUNG NICHT ÖFFNEN.
TENSION DANGEREUSE À L'INTÉRIEUR. NE PAS OUVRIR.
VOLTAJE PELIGROSO EN EL INTERIOR. NO ABRA.
TENSIONE PERICOLOSA ALL'INTERNO. NON APRIRE.
FARLIG ELEKTRISK SPAENDING INDENI, LUK IKKE OP.
HIERBINNEN GENAARLIJK VOLTAGE. NIET OPENMAKEN.
SISÄPUOLELLA VAARALLINEN JÄNNITE. ÄLÄ AVAA.
FARLIG SPENNING. MÅ IKKE ÅPNES.
NÃO ABRA. VOLTAGEM PERIGOSA NO INTERIOR.
FARLIG SPÄNNING INNUTI. ÖPPNAS EJ.
DIKKAT: YÜKSEK VOLTAJ!! AÇMADAN ÖNCÉ FİŞİ PİRİZDEN ÇIKARTINIZ.

101-7931

SİZCE NEDEN? *

Böyle uyarıcı etiketler çok sayıda elektronik aletlerde vardır. Bu aletlerin içinde neler vardır ki bunları son derece tehlikeli hale sokmaktadır? Aletin kasasını açmadan önce onun fışını prizden çıkartmak, neden sizin emniyette olmanızı sağlar? (George Semple)

b ö / ü m

Sığa ve Dielektrikler

26

Bölüm içeriği

- | | |
|---|--|
| 26.1 Sığa'nın Tanımı | 26.5 Dielektrikli Kondansatörler |
| 26.2 Sığa'nın Hesaplanması | 26.6 (Seçmeli) Bir Elektrik Alanındaki Elektrik Dipol |
| 26.3 Kondansatörlerin Bağlanması | 26.7 (Seçmeli) Dielektriklerin Atomik Düzeyde Tanıtımı |
| 26.4 Yüklü Kondansatörde Depolanan Enerji | |

Bu bölümde, yük depolayan bir aygit olan *kondansatörlerin* özelliklerini inceleyeceğiz. Kondansatörler çeşitli elektrik devrelerinde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, radyo alıcılarının frekans ayarında, güç kaynaklarında filtre olarak, otomobil ateşleme sistemindeki kivircimleri yok etmede ve elektronik flaş unitelerinde enerji depolayan bir aygit olarak kullanılır.

Bir kondansatör, esas olarak iki iletken arasına konulan bir yalıtkandan ibarettir. Göreceğiz ki böyle bir kondansatörün sığası, geometrisine ve yüklü iletkenleri ayıran *dielektrik* denilen maddeye bağlıdır.

26.1 Sığa'nın Tanımı

13.5 Şekil 26.1 de görüldüğü gibi, iki iletkenin eşit büyüklükte fakat zıt işaretli yük taşıdığını varsayıyalım. İki iletkenin böyle birleşimine **kondansatör** denir. Her bir iletkenin plaka (levha) denir. İletkenler arasında yükler yüzünden ΔV kadar potansiyel farkı meydana gelir. Potansiyel farkının birimi volt'tur ve çoğunlukla da potansiyel farkına **voltaj** denir. Bir devre elemanı boyunca veya uzayda iki nokta arasındaki potansiyel farkını anlatırken bu terimi kullanacağız.

Verilen bir voltajda, bir *kondansatörün* plakaları üzerinde ne kadarlık bir yük bulunduğunu hangi nicelik belirler? Başka bir deyişle, belirli bir ΔV potansiyelinde yük depolamak için aletin sığa'sı ne olmalıdır? Deneyler gösteriyor ki, bir kondansatör¹ üzerindeki Q yükünün miktarı, iletkenler arasındaki potansiyel farkıyla doğru orantılıdır, yani $Q \propto \Delta V$ dir. Oranti sabiti, iletkenlerin sekline ve birbirlerinden olan uzaklığa bağlıdır.² Eğer sığayı aşağıdaki şekilde tanımlarsak, bu bağıntıyı $Q = C \Delta V$ şeklinde yazabiliriz:

Sığa tanımı

Bir *kondansatörün* C sığası, iletkenlerden biri üzerindeki yükün büyüklüğünün, bunlar arasındaki potansiyel farkının büyüklüğünne oran olarak tanımlanır:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (26.1)$$

Tanıma göre, *sığanın her zaman pozitif bir nicelik* olacağına dikkat ediniz. Daha si, Eşitlik 26.1 ile verilen ΔV potansiyel farkı her zaman bir pozitif niceliktir. Biriken yük arttıkça potansiyel farkı da artacağından, verilen bir kondansatör için Q/V oranı sabittir. Bu nedenle, bir kondansatörün sığası, onun depoladığı yük miktarı ve elektriksel potansiyel enerjisinin bir ölçüsüdür.

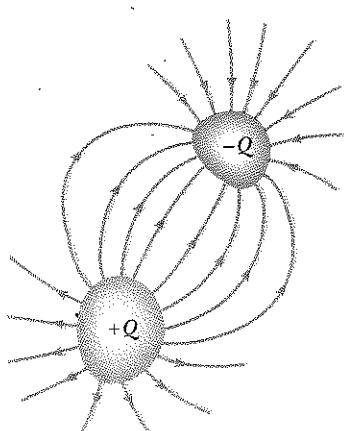
Eşitlik 26.1 den kolayca görülebilir ki, SI birimlerinde sığa volt başına Coulomb'dur. Sığanın SI birimindeki adı Michael Faraday'ın onuruna (F) yani, **farad**'dır. Yani

$$1 F = 1 C/V$$

dur. Farad çok büyük bir sığa birimidir. Pratikte pek çok aygitin sığası, mikrofarad (10^{-6}) ile pikofarad ($10^{-12} F$) arasında değerler alır. Üreticiler, kondansatörlerin üzerine sığalarını mikrofarad (mF) ve pikofarad (pf) veya mikropikofarad (mmF) olarak yazarlar.

¹ Her ne kadar kondansatörün toplam yükü sıfırsa da, (çünkü iletkenin biri üzerinde fazladan pozitif yük bulunuyorsa, diğeri üzerinde de fazladan o miktarda negatif yük bulunacaktır). iletkenlerden birinin üzerindeki yükün büyüklüğü, genellikle pratikte "kondansatörün yükü" olarak kullanılır.

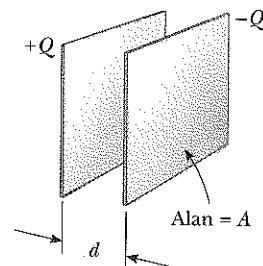
² Q ve ΔV arasındaki orantılık, Coulomb yasası veya deneyel yollardan ispatlanabilir.



Şekil 26.1 Bir Kondansatör, iki iletkenin ibaret olup, eşit fakat zıt işaretli yükler taşır.



Çeşitli yerlerde kullanılan kondansatörlerden bir koleksiyon (Henry Leap ve Jim Lehman)



Şekil 26.2'de görüldüğü gibi, bir çift paralel plakadan oluşan bir kondansatör inceleyelim. Her bir plaka, potansiyel farkı kaynağı gibi rol oynayan (Şekil 26.2'de gösterilmeyen) bir üretecin (pilin) her bir kutubuna bağlanmış olsun. Başlangıçta kondansatör yüksek ise, üretece bağıntı yapıldığında elektrik alan bağıntı telleri üzerinden kurulur. Önce üretecin negatif kutubuna bağlanmış olan plakaya bakanım. Bu plakanın hemen dışında oluşturulan elektrik alan tel içindeki elektronlar üzerine bir kuvvet uygular, bu kuvvet, elektronların plaka üzerine doğru hareketine sebep olur. Bu hareket, plaka, tel ve üreteç kutubunun aynı elektriksel potansiyele gelinceye kadar devam eder. Bu denge durumu bir defa kurulduğunda, artık batarya (üreteç) kutbu ile plaka arasında potansiyel farkı bulunmaz ve bu yüzden de tel içinde elektrik alanı olamaz ve elektronların hereketi durur. Böylece plaka negatif yüklenmiş olur. Kondansatörün diğer plakasında da benzer bir olay oluşur. Burada, plakadan doğru hareket eden elektronlar, plakayı pozitif olarak yüklerler. Bu son durumda, kondansatörün plakaları arasında potansiyel farkı, bataryaının kutupları arasındaki kadardır.

4 pF lik bir kondansatörümüz olsun. Bu değer, iki iletken arasındaki her bir voltlu potansiyel farkı için kondansatörde 4 pC luk yük depo edilebileceğini gösterir. Kondansatörün 9 V'luk bir bataryaya bağlandığını düşünürsek, kondansatörün uçlarından biri -36 pC , diğerinin de $+36 \text{ pC}$ luk net yüklemecektir.

26.2 Sığa'nın Hesaplanması

Bir çift zıt işaretli yüklerle yüklenmiş iletkenin sığasını aşağıdaki şekilde hesaplayabiliriz: Yükün büyülüüğünü Q farzederek, önceki bölümde anlatılan teknik kullanarak potansiyel farkını hesaplarız. Sonra sığa, $C = Q/V$ ifadesinden kolayca hesaplanır. Kondansatörün geometrisi basitse bekleniği gibi hesaplaması çok daha kolay olur.

Yarıçapı R ve üzerindeki yükü Q olan yalıtılmış bir iletkenin sığasını hesaplayalım. İkinci iletkeni, aynı merkezli sonsuz yarıçaplı içi boş bir küre olarak alalım.) R yarıçaplı kürenin elektriksel potansiyeli basitçe $k_e Q/R$ olduğundan (sonsuzda $V=0$) bu kürenin sığası

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{k_e Q/R} = \frac{R}{k_e} = 4\pi\epsilon_0 R \quad (26.2)$$

olur. Bu ifade yalıtılmış, yüklü bir kürenin sığasının, küre üzerindeki yük ve potansiyel farkının her ikisinden bağımsız, yalnızca kürenin yarıçapı ile oran-

Şekil 26.2 Paralel plakali bir kondansatör, her birinin alanı A olan ve birbirlerinden d uzaklı ile ayrılan iki paralel plakadan oluşur. Kondansatör yükleniği zaman plakalar eşit miktarda yükler taşırlar. Bir plaka pozitif yük taşıarken diğerini negatif yük taşır.

Ev Deneyi

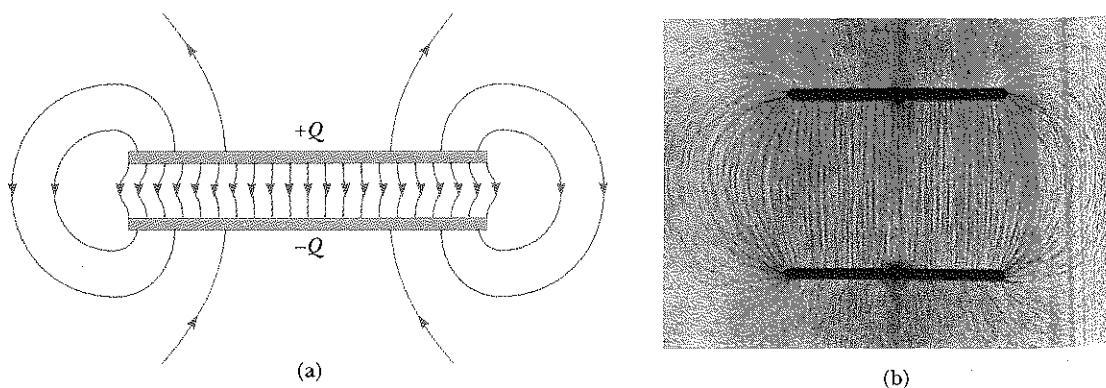
Bazı çoraplarınızı yuvarlayarak top yapın ve onları bir ayakkabı kutusuna tıkın. Kutu içine kaç tane çorabın sığlığı neyi belirtir? Çorapların zorlukla itilmesi, bir kondansatördeki ΔV ile ilişkilidir. Kutunun boyutları "çorap kapasitesini" nasıl etkiler?

ılı olduğunu gösterir. Bir çift iletkeninden oluşan kondansatörün sağsı iletkenlerin geometrisine bağlıdır. Bunu, herkesçe çok iyi bilinen üç geometrik şekilde gösterelim. Bunlar, iki paralel plaka, iki aynı eksenli silindir ve iki aynı merkezli küre olsun. Bütün bu örneklerde yüklü iletkenlerin birbirlerinden vakkum (boşluk)la ayrıldığını varsayılmı. İletkenler arasındaki dielektrik maddenin etkisi kesim 26.5 de inceleneciktir.

Paralel Plakalı Kondansatörler

Eşit A yüzey alanlarına sahip iki paralel metal plaka, Şekil 26.2 deki gibi d uzaklığı ile birbirlerinden ayrılsınlar. Plakalardan birinin yükü $+Q$, ötekinin yükü $-Q$ dır. Sistemin yük depolamasında, bu iletkenlerin geometrisinin siğay nasıl etkilediğini inceleyelim. Bu arada aynı işaretli yüklerin birbirini ittiğini de hatırlayalım. Kondansatör, bir batarya tarafından yüklenirken, elektronlar pozitif plakadan çıkıp, negatif plakaya doğru akar. Kondansatörün plakaları büyükse, toplanan yükler plaka yüzeyinin her tarafına kendi kendine dağılır ve plaka alanı arttığında, verilen potansiyel farkında plaka üzerindeki miktarı da artar. Buradan siğanın, plaka alanı A ile orantılı olmasını bekleriz.

Şimdi plakalar arasındaki bölgeyi ele alalım. Eğer bataryanın kutupları arasındaki potansiyel farkı sabitse, plakalar arasındaki elektrik alan d aralığı arttıkça artmak zorundadır. Şimdi plakaları birbirlerine yaklaştırıldığımızı düşünelim ve bu yer değiştirmeye cevap verecek şekilde yük düzeneinde bir değişme olmadan önceki durumu inceleyelim. Yükler hareket etmemiş olduğundan, plakalar arasındaki elektrik alan aynı değerdede kalmıştır, fakat plakalar arasında daha dar bir alanı kapsamıştır. Böylece, plakalar arasındaki potansiyel farkının büyülüüğü $\Delta V = Ed$ (Eşitlik 25.6) şimdi küçülmüştür. Batarya kondansatöre bağlayan bağıntı telleri boyunca ortaya çıkan potansiyel farkı, şimdi bataryanın kutupları arasındaki voltaj ile bu yeni kondansatörün voltaj arasındaki fark kadardır. Bu potansiyel farkı tellerde bir elektrik alan oluşturur ve bu alan da plakalar üzerinde daha fazla yük birikimine yol açarak, plakalar arasındaki potansiyel farkını artırır. Plakalar arasındaki potansiyel farkı tekrar batarya ile denk olduğunda, teller boyunca potansiyel farkı azalarak sıfır olur ve yük hareketi durur. Böylece, plakalar hareket ettirilerek birbirlerine yaklaştırıldığında kondansatör üzerindeki yükün artmasına sebep olunur. Eğer d açıklığı artarsa yük azalır. Sonuç olarak, aletin siğasının d ile ters orantılı olarak değişmesini bekleriz.



Şekil 26.3 (a) Paralel plakalı bir kondansatörün plakaları arasındaki elektrik alan, merkez yakın yerlerde düzgün, fakat plakaların kenarlarına yakın bölgelerde düzgün değildir. (b) Zityüklü iki iletken paralel plakanın elektrik alan deseni. Bir yağ yüzeyi üzerinde küçük iplik parçacıkları elektrik alan tarafından sıraya dizilir. (b) Harold M. Waage, Princeton Üniversitesi izniyle).

Şimdi bu fiziksel tartışmayı matematiksel olarak doğrulayabiliriz. Her plaka üzerinde birim alan başına yük $\sigma = Q/A$ dir. Plakalar birbirlerine çok yakın ise, (uzunluk ve genişliklerine kıyasla) plakalar arasında düzgün bir elektrik alan bulunduğu ve buranın dışında her yerde elektrik alanın sıfır olduğunu varsayıyalım. Örnek 24.8 in son parağrafına göre plakalar arasındaki elektrik alan,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

ifadesi ile verilir. Plakalar arasındaki elektrik alan düzgün ve plakalar arasındaki potansiyel farkı Ed ye eşit olduğundan (bakınız Eşitlik 25.6);

$$\Delta V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

elde edilir. Bunu Eşitlik 26.1 de yerine koyarsak, kondansatörün sığasını,

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{Qd/\epsilon_0 A}$$

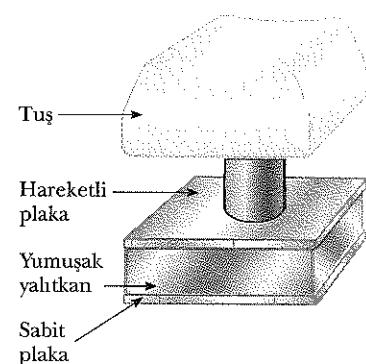
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (26.3)$$

olarak elde ederiz. Yani, **bir paralel plakalı kondansatörün sığası, plakanın birinin yüzey alanı ile doğru orantılı, levhalar arasındaki uzaklığa ters orantılıdır.** Bu beklediğimiz bir sonuçturdur.

Paralel plakalı kondansatörün elektrik alan çizgileri dikkatle incelendiğinde (Şekil 26.3a) plakalar arasındaki merkezi bölgede düzgün bir elektrik alan bulunduğu görülür. Fakat plakaların kenarlarında elektrik alan düzgün değildir. Şekil 26.3b'deki fotoğraf, paralel plakalı kondansatörün elektrik alan deseninin fotoğrafıdır. Kenarlarında düzgün olmayan elektrik alan çizgilerinin bulunduğuuna dikkat ediniz. Bu tür kenar etkiler, plakaların uzunluğuna kıyasla plakalar arasındaki uzaklığın çok küçük olması halinde ihmäl edilir.

Sinama Sorusu 26.1

Bir çok bilgisayar klavyelerinin düğmeleri Şekil 26.4 de görüldüğü gibi kondansatörlerden yapılmıştır. Harf tuşuna aşağı doğru bastırıldığı zaman sabit plaka arasındaki yumuşak yalıtkan sıkıştırılmış olur. Tuşa basıldığı zaman, sığa (a) artar mı? (b) azalır mı? veya (c) tesbit edemeyeceğimiz bir yolla değişir mi? Çünkü ΔV deki değişmeye neden olabilecek çok karışık elektrik devreleri klavye tuşlarına bağlanmıştır.



Şekil 26.4 Bir bilgisayar klavye tuşu

ÖRNEK 26.1 Paralel Plakalı Kondansatör

$A = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ yüzeye sahip bir paralel plakalı kondansatörün plakaları arasındaki uzaklık $d = 1 \text{ mm}$ dir. Bu kondansatörün sığasını bulunuz.

Cözüm Eşitlik 26.3 den,

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1,00 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$= 1,77 \times 10^{-12} \text{ F} = 1,77 \text{ pF}$$

olarak buluruz.

Alıştırma Bu kondansatörün plaka aralığı 3 mm ye çikartılırsa sığasını bulunuz.

Cevap 0,59 pF.

Silindirik ve Küresel Kondansatörler

İlke olarak, siğanın tanımından, herhangi bir geometrik şekile sahip iletkenin siğasını bulabiliriz. Aşağıdaki örnekler, tanımı kullanarak, silindir ve küre gibi belki geometrilere sahip kondansatörlerin siğalarının hesaplanması göstermektedir.

ÖRNEK 26.2 Silindirik Kondansatör

Dolu bir silindirik iletkenin yarıçapı a ve yükü $+Q$ dur. Aynı eksenli, daha büyük ve ihmali edilebilecek kalınlıkta silindirik bir kabuğun yarıçapı $b > a$ ve yükü $-Q$ dur (Şekil 26.5a). ℓ uzunluklu bu silindirik kondansatörün siğasını bulunuz.

ÇÖZÜM Bu düzeneğe fiziksel düşüncüsü uygulamak oldukça zordur. Buna rağmen, paralel plakalı kondansatörlerde siğanın plaka yüzeyinin alanı ile orantılı olması ve depolanan yükün geniş bir yayılma alanına sahip olması gibi, silindirin uzunluğu ℓ ile orantılı olduğunu beklemek akla uygundur. a ve b ile karşılaştırıldığında ℓ çok büyük ise, kenar etkileri ihmali edebiliriz. Bu durumda elektrik alan, silindirlerin eksenine diktir ve iki silindir arasındaki bölgede hapsedilmişdir. (Şekil 26.5b). İlk olarak iki silindir arasındaki potansiyel farkını hesaplamalıyız. Bu da,

$$V_b - V_a = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

genel ifadesi ile verilir. Burada \mathbf{E} , $a < r < b$ bölgesindeki elektrik alandır. Bölüm 24 de Gauss yasasını kullanarak gösterdi ki, silindirin birim uzunluğu başına yükünü λ olarak aldığımızda, silindirin elektrik alanı $E_r = 2k\lambda/r$ dir (Eşitlik 24.7). Gauss yasasına göre, dıştaki silindirin içteki elektrik alana hiç bir katkısı bulunmadığından aynı sonuç burada da kullanılır. Bu sonucu kullanarak ve Şekil 26.5b de \mathbf{E} 'nin r boyunca olduğuna dikkat ederek

$$V_b - V_a = - \int_a^b E_r dr = -2k\lambda \int_a^b \frac{dr}{r} = -2k\lambda \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

buluruz. Bunu Eşitlik 26.1 de yerine koyar ve $\lambda = Q/\ell$ gerçeğini kullanarak

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{\frac{2k\lambda}{\ell} \ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \frac{\ell}{2k_e \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (26.4)$$

elde ederiz. ΔV potansiyel farkının büyüklüğü $\Delta V = |V_b - V_a|$

ÖRNEK 26.3 Küresel Kondansatör

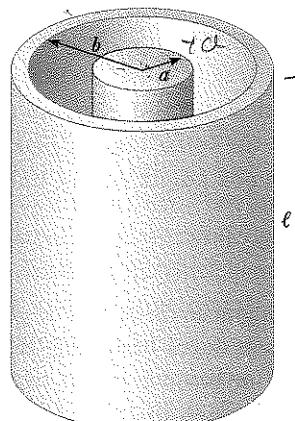
Küresel bir kondansatör, $-Q$ yüklü b yarıçaplı küresel bir iletken ile aynı merkezli daha küçük a yarıçaplı $+Q$ yüklü bir küre ile oluşturuluyor (Şekil 26.6). Bu kondansatörün siğasını bulunuz.

$= 2k\lambda \ln(b/a)$ ile verilir ve pozitif bir niceliktir. Bulunan bu değer, beklenildiği gibi siğanın silindirin uzunluğu ile doğrudu orantılı olduğunu göstermektedir. Eşitlik 26.4'e göre, bir koaksiyel kablonun birim uzunlığundaki siğanın

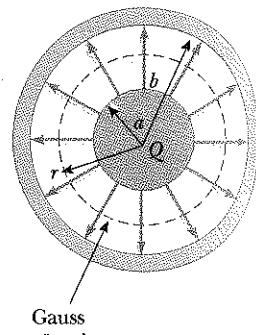
$$\frac{C}{\ell} = \frac{1}{2k_e \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (26.5)$$

şeklinde olacağını görüyoruz. Bir yalıtkan ile birbirlerinden ayrılmış a ve b yarıçaplı, aynı eksenli silindirik iletkenlerin oluşturduğu koaksiyel kablo buna tipik bir örnektir. Böyle bir kablo içteki ve dıştaki iletkenlerde zit yönde bir akım taşıyabilir. Böyle bir geometri, özellikle bir elektriksel sinyali harici dalgalanmalardan (parazitlerden) korumak için yararlıdır.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$



(a)



(b)

Şekil 26.5 (a) Bir silindirik kondansatör, a yarıçaplı ve ℓ uzunluklu silindirik bir iletkenin çevresine aynı eksen ve uzunlukta b yarıçaplı bir silindirik kabuğun geçirilmesiyle oluşur. (b) Silindirik kondansatörün kesit görünümü. Kesitteki kesikli mavi çizgi r yarıçapı ve ℓ uzunluklu silindirik Gauss yüzeyini temsil eder.

ÇÖZÜM Bölüm 24 de gösterildiği gibi, küresel simetrik bir yük dağılımının dışındaki elektrik alan işansal doğrultuda ve $k_e Q/r^2$ ifadesi ile verilir. Bu durumda bu ifade küreler arasındaki ($a < r < b$) elektrik alanına uygulanabilir.

Gauss yasasına göre yalnızca içteki küre bu alana katkıda bulunacaktır. O halde küreler arasındaki potansiyel farkı

$$V_b - V_a = - \int_a^b E_r dr = -k_e Q \int_a^b \frac{dr}{r^2} = k_e Q \left[\frac{1}{r} \right]_a^b$$

$$= k_e Q \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right)$$

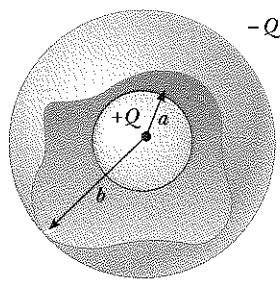
ile verilir. Potansiyel farkının büyüklüğü ise

$$\Delta V = |V_b - V_a| = k_e Q \frac{(b-a)}{ab}$$

olar. Bu ΔV değerini Eşitlik 26.1'de yerine koyarsak

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{ab}{k_e(b-a)}$$
 (26.6)

buluruz.



Şekil 26.6 Bir küresel kondansatör, yarıçapı a olan kürenin etrafına aynı merkezli b yarıçaplı bir küresel kabuk geçirilmesi ile elde edilir. İçteki küre pozitif yüklenmişse, küreler arasındaki elektrik alan, yarıçap doğrultusunda içерiden dışarı doğrudur.

Aliştırma Dıştaki kürenin b yarıçapı sonsuza yaklaşıken siğanın da $a/k_e = 4\pi\epsilon_0 a$ değerine yaklaşacağını gösteriniz.

Sinama Sorusu 26.2

Örnek 26.3 deki küresel kondansatörün dışındaki bölgede elektrik alanın büyüklüğü ne kadardır?

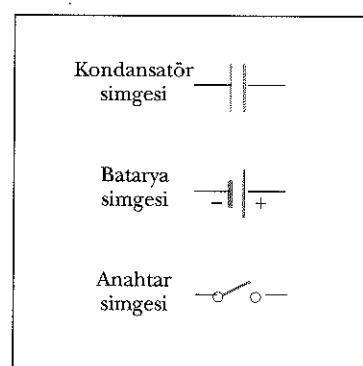
26.3 KONDANSATÖRLERİN BAĞLANMASI

Bir elektrik devresinde iki veya daha fazla kondansatör çoğunlukla birbirleri ne bağlanırlar. Belirli bir şekilde bağlanmış kondansatörlerin eşdeğer sıgası, bu kesimde anlatılan yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. Kondansatör ve baryaların devre simgeleri ve renk kodları Şekil 26.7 de gösterilmiştir. Kondansatörün simgesi, en yaygın geometriye sahip olan bir çift plakayı yansıtır. Baryalarda pozitif kutup yüksek potansiyeldedir ve barya simgesinde uzun, düşey çizgi ile gösterilir.

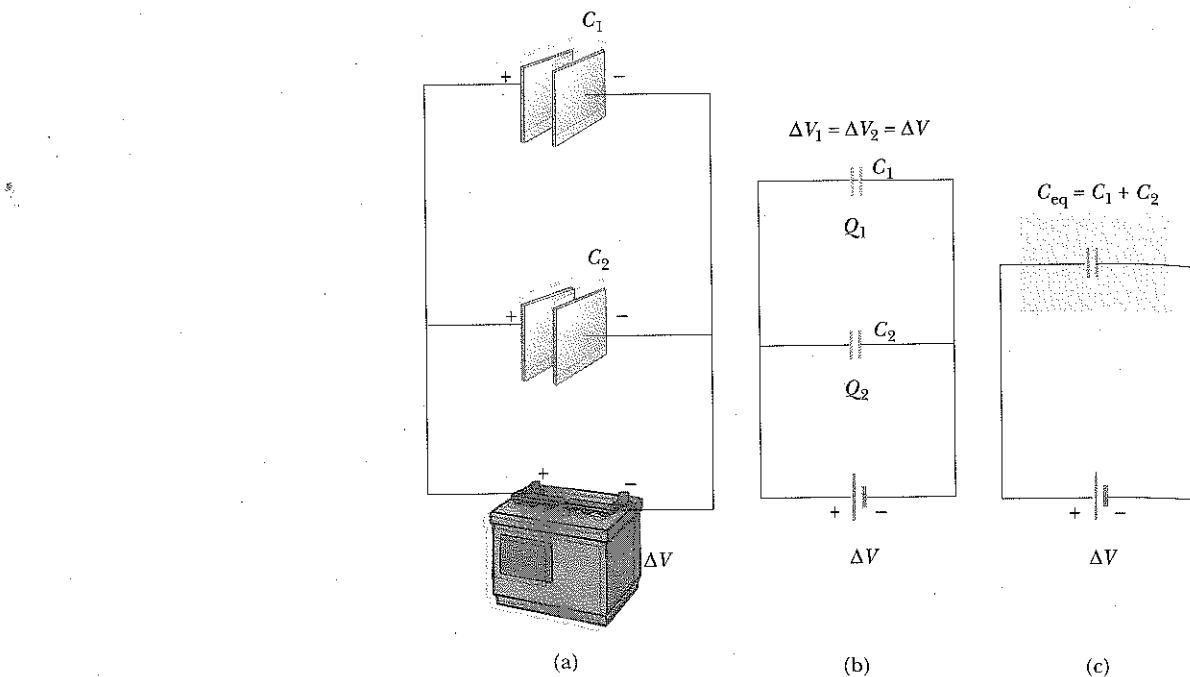
Paralel Bağlama

İki kondansatörün Şekil 26.8a daki gibi birleştirilmesi, *kondansatörlerin paralel bağlanması* olarak bilinir. Şekil 26.8b, paralel bağlı kondansatörlerin devre şemasını göstermektedir. Kondansatörlerin sol taraftaki plakası iletken bir telle baryanın pozitif kutbuna bağlanır ve böylece plakalar baryanın pozitif kutbu ile aynı potansiyelde olur. Aynı şekilde, sağ taraftaki plakalar baryanın negatif kutbuna bağlanır ve bu plakalar da baryanın negatif kutbu ile aynı potansiyelde olur. Böylece paralel bağlı her bir kondansatörün ucları arasındaki potansiyel farkı hepsinde aynıdır ve bağlantının tümüne uygulanan potansiyel farkı eşittir.

Şekil 26.8'de gösterilen devrede bağlantının uçlarına uygulanan voltaj, baryanın kutupları arasındaki voltajdır. Bu durum diğer devre elemanları ile



Şekil 26.7 Batarya, kondansatör ve anahtarın devre simgeleri. Kondansatörün mavi, baryanın kırmızı renkte olduğunu dikkat ediniz.



Şekil 26.8 (a) Paralel bağlı iki kondansatör (b) Paralel bağlama için devre diyagramı, (c) Her bir kondansatörün uçlarındaki potansiyel farkı aynıdır ve eşdeğer sığa $C_{\text{es}} = C_1 + C_2$ dir.

devredeki paralel bağlanmada oluşur ve benzer durumda tüm devrenin iç celenmesi ile de bağlantı boyunca potansiyel farkı belirlenir.

Şekil 26.8'de gösterilen devrede kondansatör ilk defa devreye bağlandığında, elektronlar batarya üzerinden sol plakadan sağ plakaya doğru akarlar ve sol plakayı pozitif, sağ plakayı da negatif yüklü hale getirirler. Bu yük transferinin enerji kaynağı, batarya içinde depolanan kimyasal enerjidir. Bağlama gerçekleştiğinde, bu enerji elektriksel potansiyel enerjiye dönüşür. Yük akışı batarya voltajı kondansatör voltajına eşit olduğu zaman durur. Yük akışı darduğu zaman, kondansatörler maksimum yüke ulaşır. Bu iki kondansatörün maksimum yüklerine Q_1 ve Q_2 diyalim. O zaman her iki kondansatörde depolanan *toplam* Q yük,

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (26.7)$$

olur. Yani, **paralel bağlı kondansatörlerde toplam yük, her bir kondansatörün üzerindeki yüklerin toplamına eşittir**. Kondansatörlerin uçları arasındaki potansiyel farkı aynı olduğundan, her birinin taşıdığı yük,

$$Q_1 = C_1 \Delta V \quad Q_2 = C_2 \Delta V$$

olur.

Bu iki kondansatör yerine bir tane C_{es} eşdeğer sığaya sahip, Şekil 26.8c'de gösterildiği gibi bir kondansatör konduğunu düşünelim. Bu eşdeğer kondansatör, devrede iki kondansatörün gösterdiği etkinin aynısını göstermek zorundadır. Yani bataryaya bağlandığında, Q kadar yük depolamak zorundadır. Şekil 26.8c te görüldüğü gibi, eşdeğer kondansatör bataryanın kutularını

doğrudan bağlandığından eşdeğer kondansatörün uçları arasındaki voltaj da ΔV dir. O halde eşdeğer kondansatör için

$$Q = C_{es} \Delta V$$

$$C_{es} = \frac{Q}{\Delta V}$$

olur. Yüklerle ilgili bu üç denklemi Eşitlik 26.7 de yerine yazarsak,

$$C_{es} \Delta V = C_1 \Delta V + C_2 \Delta V$$

veya,

$$C_{es} = C_1 + C_2 \quad (\text{Paralel bağlama})$$

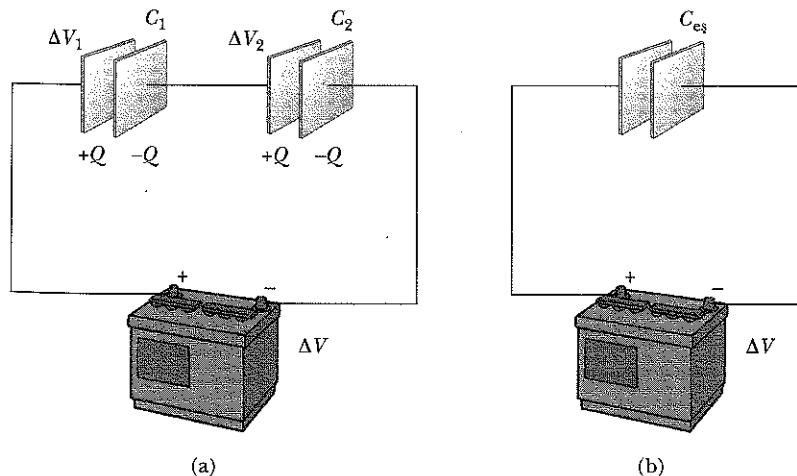
buluruz. Bu işlemi üç veya daha fazla paralel bağlı kondansatörlere genişletirsek, eşdeğer sığayı

$$C_{es} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (\text{Paralel bağlama}) \quad (26.8)$$

olarak buluruz. O halde, **paralel bağlı kondansatörlerin eşdeğer sığası, her bir kondansatörün sığasından daha büyük olur.** Bu anlamlıdır, çünkü iletken tellerle birleştirmekle, aslında tüm kondansatör plakalarının yüzey alanlarını birleştirmiştir.

Seri Bağlama

Şekil 26.9 da gösterildiği gibi, iki kondansatörün bağlanışına kondansatörlerin *seri bağlanması* denir. Soldaki 1inci kondansatörün sol plakası ve sağdaki 2inci kondansatörün sağ plakası bataryanın kutularına bağlanmıştır. Diğer iki plaka sadece birbirlerine bağlıdır, dolayısıyla bunlar yalıtılmış bir iletken oluştururlar, yani başlangıçta yüksüzdürler ve hep net yükleri sıfır olarak kalacaktır. Bu bağlanmayı biraz ayrıntılı inceleyelim. Önce yüksüz kondansatörlerle işe başlayalım ve devreye bir batarya bağlandıktan hemen sonra ne olacağını izleyelim. Batarya bağlandığında elektronlar, batarya üzerinden geçerek,



Şekil 26.9 (a) Seri bağlanmış iki kondansatör. Her bir kondansatör üzerindeki yük ayndır
 (b) Kondansatörler tek bir eşdeğer kondansatörle yer değiştirmiştir. Eşdeğer sıga aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$\frac{1}{C_{es}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

soldaki C_1 plakasından sağdaki C_2 plakasına nakledilirler. Sağdaki C_2 plakası üzerine negatif yükler toplandıkça, C_2 nin sol plakası üzerindeki eşit miktarda negatif yükler, geride pozitif artık yükler bırakarak orayı terke zorlanır. Soldaki C_2 plakasını terk eden negatif yükler, iletken teller üzerinden akarak C_1 'in sağ plakası üzerinde toplanır. Bunun sonucunda, sağdaki bütün plakalar $-Q$ yükü kazanırken, soldaki tüm plakalar $+Q$ yükü sahip olurlar. **O halde seri bağlı, kondansatörlerin üzerindeki yükler aynıdır.**

Şekil 26.9a ya göre baryanın uçları arasındaki ΔV potansiyel farkı, iki kondansatör arasında paylaştırılır:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 \quad (26.9)$$

Burada ΔV_1 ve ΔV_2 , C_1 ve C_2 kondansatörlerinin uçlarındaki potansiyel farkıdır. Genel olarak, seri bağlı herhangi bir sayıdaki kondansatörlerin uçları arasındaki potansiyel farkı, bireysel kondansatörlerin uçları arasındaki potansiyel farklarının toplamına eşittir.

Eşdeğer kondansatörün, seri bağlananlarla aynı görevi yaptığına varsayılm. Yüklenme tamamlandıktan sonra, eşdeğer kondansatörün sağ plakası üzerinde $-Q$, sol plakası üzerinde $+Q$ yükleri bulunmalıdır. Şekil 26.9b deki devreye siğanın tanımı uygulandığında

$$\Delta V = \frac{Q}{C_{es}}$$

bulunur.

$Q = C\Delta V$ ifadesi her bir kondansatore uygulanabileceğinden, Şekil 26.9a da gösterilen her bir kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı,

$$\Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \Delta V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

olur. Bu ifadeleri Eşitlik 26.9'da yerine yazıp ve $\Delta V = Q/C_{es}$ olduğuna dikkat edersek

$$\frac{Q}{C_{es}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

bulunur. Q 'leri kısaltarak,

$$\frac{1}{C_{es}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \left(\begin{array}{l} \text{seri} \\ \text{bağlama} \end{array} \right)$$

bağıntısına varız. Bu analiz, üç veya daha fazla seri bağlı kondansatöre uygulanırsa, eşdeğer sığa için

$$\frac{1}{C_{es}} = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} = \dots \quad \left(\begin{array}{l} \text{seri} \\ \text{bağlama} \end{array} \right) \quad (26.10)$$

buluruz. Bu da, **seri bağlı kondansatörlerin eşdeğer sığasının, her bir kondansatörlerin sığasından çok daha küçük olduğunu gösterir.**

ÖRNEK 26.4

Eşdeğer Sığa

Şekil 26.10a'da görülen kondansatörlerin a ve b noktaları arasındaki eşdeğer sığasını bulunuz. Bütün birimler μF 'dır.

ÇÖZÜM Eşitlik 26.8 ve 26.10'u kullanarak verilen bilimi adım adım şekilde gösterilene indirgeyebiliriz. $1\mu F$ ve $3\mu F$ lik kondansatörler paralel bağlı olduğundan, $C_{es} = C_1 + C_2 = 4\mu F$

$+ C_2$ 'dir ve eşdeğer siğ 4 μF olur. Aynı şekilde 2 μF ve 6 μF lik kondansatörler de paraleldir ve eşdeğer siğası 8 μF 'dır. Şekil 26.10b'de üstteki kolda seri bağlı iki tane 4 μF lik kondansatör bulunmaktadır. Bunlar için,

$$\frac{1}{C_{\text{es}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{4,0 \mu\text{F}} + \frac{1}{4,0 \mu\text{F}} = \frac{1}{2,0 \mu\text{F}}$$

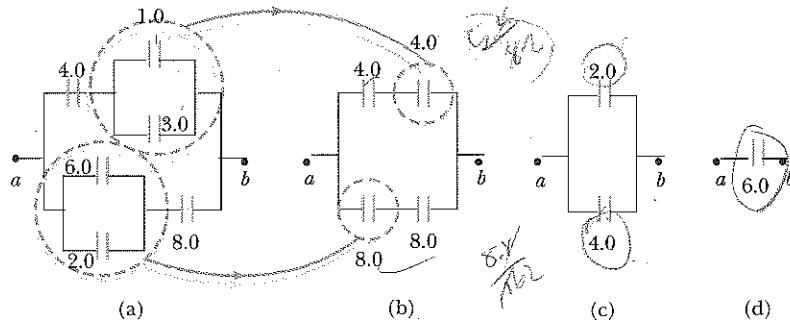
$$C_{\text{es}} = \frac{1}{1/2,0 \mu\text{F}} = 2,0 \mu\text{F}$$

olur. Aynı şekilde, 26.10b'de alttaki kolda iki tane 8 μF lik

kondansatör seri bağlıdır. Bunlar 4 μF lik eşdeğer siğ 4 μF olur. Son olarak, 2 μF ve 4 μF lik kondansatörler Şekil 26.10c de paralel bağlıdır ve bunların eşdeğer siğası 6 μF dir. Buradan, devrenin toplam eşdeğer siğası 6 μF olarak bulunur.

Aliştirma 3 μF , 6 μF ve 12 μF siğalara sahip üç kondansatör veriliyor. Bunlar (a) Paralel (b) seri bağlı iseler eşdeğer siğayı bulunuz.

Cevap (a) 21 μF , (b) 1,71 μF .



Şekil 26.10 Kondansatörlerin eşdeğer bağlanması bulmak için, (a) daki çeşitli karışık bağlamalar (b), (c) ve (d) de gösterildiği gibi, metin içinde verilen seri ve paralel bağlama kuralları ile adım adım indirgenir.

26.4 YÜKLÜ KONDANSATÖRDE DEPOLANAN ENERJİ

Hemen hemen tüm elektronik cihazlarla uğraşan bir çok kimse bir kondansatörün enerji depolayabildiğini görmüştür. Yüklü bir kondansatörün plakaları bir iletkenle, örneğin bir telle, birbirlerine temas ettirilirse, her iki plaka yüksüz hale gelinceye kadar yükler bir plakadan ötekine aktarılır. Bu elektriksel boşalma bazen görünür bir kırılcım olarak gözlenir. Yüklü bir kondansatörün zit işaretli plakalarına istemeden dokunacak olsanız, parmaklarınız, boşalacağı bir yol gibi davranışacak ve bir elektrik şoku maruz kalacaktınız. Şokun derecesini, siğaya ve kondansatöre uygulanan voltaja bağlı olarak hissedecetiniz. Böyle bir şok, yüksek voltaj varsa öldürücü olabilir. Örneğin televizyonların güç kaynakları oldukça tehlikelidir. Çünkü yükler kondansatörlerde depollanmış halde bulunduğuundan, anahatları kapalı ve hatta fişten çıkarılmış bile olsa televizyonun arka kapağını açmak ve içindeki parçalara dokunmak güvenli değildir.

Başlangıçta yüksüz olan paralel plakalı bir kondansatörü ele alalım; başlangıçta levhaları arasındaki potansiyel farkı sıfır olsun. Şimdi kondansatörün bir baryanın uçlarına bağlandığını düşünelim ve maksimum Q yüküne ulaşın. Kondansatörün yavaşça dolduguunu (yüklediğini) varsayacağız. O durumda problem bir elektrostatik sistem gibi incelenebilir. Kondansatör baryaya bağlandığında, negatif kutuplu olan plakanın dışındaki teldeki elektronlar plaka ya doğru hareket ederek plakayı negatif olarak yüklerler. Pozitif kutba bağlı plakadaki elektronlar, plakayı terkedip tel içinden geçip gittiğinden plaka pozitif olarak yüklenir. Böylece, yükler tel içinde çok kısa bir uzaklık kat ederler.

Kondansatörlerin enerjisini hesaplamada farklı bir sürecin olduğunu farzedebiliriz. Bu süreç gerçekten oluşmasa da aynı doğru sonucu verir. Böyle

Ev Deneyi

İşte, bataraya değiştirme esnasında programları veya yazdığınıza değerleri korumak için sizin hesap makinasınızın bir kondansatöre sahip olduğunu anlamanın yolu: Hesap makinasının pillerini çıkartın ve tekrar hızlı bir şekilde yerlerine takın. Hesap makinasının pilleri çıkartılıp takıldıktan sonra hafizaya kadetığınız numara hâlâ saklı durmaktadır? (Bunu denemeden önce, hesap makinasının hafızasında olan herhangi bir önemli numara veya programı bir yere yazmanız tavsiye olunur?)

Yüklü kondansatörde depolanan enerji

bir yaklaşım yapabiliriz, çünkü en son durumda enerji, gerçek yük transferi sürecine bağlı değildir. Negatif kutba bağlı plaka üzerinde çok küçük miktar, daki bir pozitif yükle ulaşıp yakalayalım ve bu pozitif yük plaka üzerinden ayrıracak bir kuwert uygulayarak pozitif kutba bağlı plakaya götürdüğümüzü kabul edelim. Böylece, yük bir plakadan diğer plakaya götürmek için yük üzerine bir iş yapmış oluruz. İlk olarak, bir levheden diğer levhaya çok küçük miktar, daki dq yükünü götürmede işe ihtiyaç yoktur.³ Bununla beraber bir defa bu yük nakledildiğinde, plakalar arasında küçük bir potansiyel farkı var olmuştur. Onun için, bu potansiyel farkında ek bir yükün bir yerden diğer yere hareketinde iş yapılması zorunludur. Daha çok yük bir plakadan diğer plakaya götürürdüükçe, potansiyel farkı da arttıkça artar ve daha çok işe ihtiyaç duyulur.

Yüklenme sürecinin herhangi bir anında kondansatör üzerindeki yükün olduğunu varsayıyalım. Aynı anda kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı $\Delta V = q/C$ dir. Kesim 25.2 den biliyoruz ki, bir dq yükünü $-q$ yüklü plakadan $+q$ yüklü plakaya (daha yüksek potansiyelli) nakletmek için gerekli iş,

$$dW = \Delta V dq = \frac{q}{C} dq$$

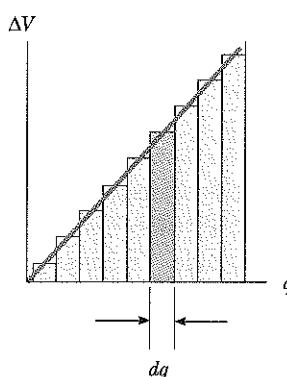
ile verilir. Böylece, Şekil 26.11 de gösterilen kondansatörü $q = 0$ dan herhangi bir $q = Q$ yüküne kadar doldurmak için gereken toplam iş

$$W = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C}$$

olur. Kondansatörün yüklenmesinde yapılan bu iş, kondansatörde depolanan potansiyel enerji (U) olarak alınabilir. Yüklü bir kondansatörde depolanan elektrostatik enerjiyi aşağıdaki biçimlerde

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 \quad (26.11)$$

yazabiliz. Bu sonuç, kondansatörlerin geometrisine bakılmaksızın herhangi bir kondansatöre uygulanabilir. Bu ifadeye göre sığa ve potansiyel enerji arttıkça potansiyel farkı da artar. Pratikte, depolanabilen maksimum enerjinin



Şekil 26.11 Bir kondansatörde, potansiyel farkının yüze göre değişimini gösteren bir grafiği, eğimi $1/C$ olan bir doğrudur. Mavi küçük gölgeli dikdörtgen alan, kondansatör plakaları arasındaki ΔV potansiyel farkı boyunca dq yükünü hareket ettirmek için gereken işi gösterir. Kondansatöre son Q yükünü yüklemek için gerekli toplam $W = \frac{1}{2} Q \Delta V$ işi, doğrusal eğrinin altındaki üçgenin alanına eşittir. ($1V = 1J/C$ olduğunu unutmayın.)

³ Yükleme durumunda, kondansatör üzerindeki yük değişimi için küçük q harfini kullanınız. Tämamen yüklenikten sonraki durumu ayırmak için, kondansatör üzerindeki toplam yükü büyük Q harfi ile gösteriniz.

(ya da yükün) bir sınırı vardır. Çünkü, ΔV yeterince büyük değerlerine ulaşınca kondansatörün plakaları arasında eninde sonunda bir elektrik boşalması oluşur. Bundan dolayı, genellikle kondansatörlerin üzerine maksimum çalışma voltajı yazılır.

Sınamma Sorusu 26.3

Bir batarya ve üç kondansatöre sahipsiniz. Mümkün olan en fazla enerjinin kondansatörlerde depollanması için, bir devrede batarya ve kondansatörleri nasıl bağlamalısınız?

Bir kondansatörde depolanan enerji, elektrik alanda depalanmış gibi düşünülebilir, buradaki elektrik alan, kondansatör yüklenirken plakalar arasında oluşan alandır. Bu anlatım akla uygundur; çünkü elektrik alan kondansatör üzerindeki yükle orantılıdır. Bir paralel plakalı kondansatörde potansiyel farkı elektrik alana $V = Ed$ bağıntısı ile bağlıdır. Dahası kondansatörün siğası $C = \epsilon_0 A/d$ ile verilir (Eş. 26.3). Bu ifadeler Eşitlik 26.11'de yerine konduğunda

$$U = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d} (E^2 d^2) = \frac{1}{2} (\epsilon_0 Ad) E^2 \quad (26.12)$$

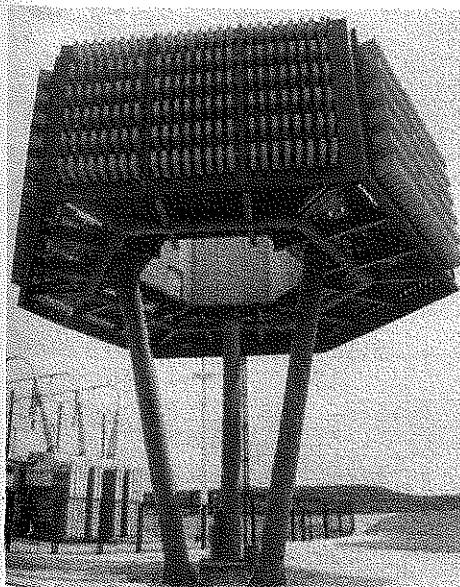
Paralel plakalı kondansatörde depolanan enerji

elde edilir. Bir kondansatörün plakası arasındaki V hacmi (Voltaj değil, Hacim) Ad , elektrik alan tarafından doldurulduğunda, *birim hacimdeki enerji* $u_E = U/V = U/Ad$ olur ve buna *enerji yoğunluğu* denir:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (26.13)$$

Elektrik alanda enerji yoğunluğu

Eşitlik 26.13 paralel plakalı kondansatörler için türetilmesine karşın, her türden kondansatör için geçerlidir. Yani, **herhangi bir elektrostatik alandaki enerji yoğunluğu, verilen bir noktadaki elektrik alan şiddetinin karesi ile orantıdır.**



Chicago'nun dışında kurulmuş FermiLab'da parçacıklar hızlandırılmıştır elektrik enerjisini depolamada kullanılan kondansatör yığını. Elektrik enerjisi dağıtımlı yapan firma, aletlerin çalışmasında kullanılan oldukça büyük bir patlama enerjisini sağlayamadığından, bu kondansatörler yavaşça doldurulmakta ve hızlandırıcı içinde aniden enerji "boşalımı" oluşturmaktadır. Bu durum, bir binanın tepesinde yanından korunmak için kurulan su deposuna benzetilebilir. Bilindiği gibi, çok kısa zamanda çok fazla suya gerek duyulduğunda kullanılmak üzere, depoda su bulundurulur (*FermiLab Visual Media Services*).

ÖRNEK 26.5 İki Yüklü Kondansatörün Yeniden Bağlanması

C_1 ve C_2 (Burada $C_1 > C_2$) gibi iki kondansatör aynı ΔV_i potansiyel farkında fakat zit işaretli yükleniyorlar. Yükli kondansatörler baryadan ayrılarak, bunların plakaları Şekil 26.12a'da gösterildiği gibi birbirlerine bağlanıyor. Sonra S_1 ve S_2 anahtarları Şekil 26.12b deki gibi kapatılıyor. (a) Anahtarlar kapatıldıkten sonra a ve b noktaları arasındaki ΔV_s son potansiyel farkını bulunuz.

Çözüm Kondansatörlerin sol plakaları yalıtılmış bir sistem gibidir, çünkü iletkenlerle sağ plakalara bağlı değildirler. Anahtar kapatılmadan önce, kondansatörlerin sol plakalarının üzerindeki yükler,

$$Q_{1i} = C_1 \Delta V_i \quad \text{ve} \quad Q_{2i} = -C_2 \Delta V_i$$

dur. Q_{2i} için negatif işaret kullanmak gereklidir. Çünkü C_2 sığalı kondansatörün sol plakası üzerindeki yük negatiftir. Sistemdeki toplam Q yükü,

$$(1) \quad Q = Q_{1i} + Q_{2i} = (C_1 - C_2)\Delta V_i$$

dir. Anahtarlar kapatıldıkten sonra sisteme toplam yük aynı kalındırdır.

$$(2) \quad Q = Q_{1s} + Q_{2s}$$

olur. Tüm sistem ΔV_s potansiyeline gelinceye kadar yükler yeniden düzenlenir. Böylece, C_1 in potansiyel farkı, C_2 nin potansiyel farkına eşittir. Bu şartın sağlanması için kapatıldıktan sonra kondansatörlerin üzerindeki yükler

$$Q_{1s} = C_1 \Delta V_s \quad \text{ve} \quad Q_{2s} = C_2 \Delta V_s$$

olur. Birinci denklemi ikinci denkleme böldüğümüzde,

$$(3) \quad \frac{Q_{1s}}{Q_{2s}} = \frac{\frac{C_1}{C_2} \Delta V_s}{\frac{C_2}{C_1} \Delta V_s} = \frac{C_1}{C_2}$$

bulunur. (2) ve (3) eşitlikleri birleştirildiğinde,

$$Q = Q_{1s} + Q_{2s} = \frac{C_1}{C_2} Q_{2s} + Q_{2s} = Q_{2s} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right)$$

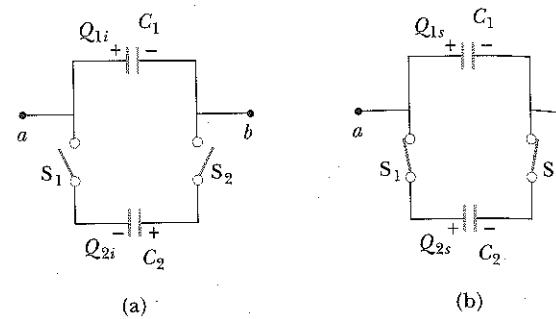
$$Q_{2s} = Q \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

bulunur. (3) Eşitliğini kullanarak Q cinsinden Q_{1s} yükünü,

$$Q_{1s} = \frac{C_1}{C_2} Q_{2s} = \frac{C_1}{C_2} Q \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) = Q \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

olarak buluruz. Son olarak, her bir kondansatörün uçları arasındaki voltajı 26.1 Eşitliğini kullanarak

$$\Delta V_{1s} = \frac{Q_{1s}}{C_1} = \frac{Q \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)}{C_1} = \frac{Q}{C_1 + C_2}$$



Şekil 26.12

$$\Delta V_{2s} = \frac{Q_{2s}}{C_2} = \frac{Q \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)}{C_2} = \frac{Q}{C_1 + C_2}$$

olarak buluruz. Daha önce de $\Delta V_{1s} = \Delta V_{2s} = \Delta V_s$ olduğuna dikkat ediniz. ΔV_s yi C_1 , C_2 ve ΔV_i cinsinden yazmak için Denklem (1) deki Q nün değeri yerine konursa

$$\Delta V_s = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right) \Delta V_i$$

elde edilir.

(b) Anahtarlar kapatılmadan önce ve kapatıldıktan sonra kondansatörlerde depolanan toplam enerjiyi bulunuz.

Çözüm Anahtarlar kapatılmadan önce kondansatörlerde depolanan toplam enerji,

$$U_i = \frac{1}{2} C_1 (\Delta V_i)^2 + \frac{1}{2} C_2 (\Delta V_i)^2 = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) (\Delta V_i)^2$$

dir. Anahtar kapatıldıktan sonra kondansatörlerde depolanan toplam enerji,

$$U_s = \frac{1}{2} C_1 (\Delta V_s)^2 + \frac{1}{2} C_2 (\Delta V_s)^2 = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) (\Delta V_s)^2$$

$$= \frac{1}{2} (C_1 + C_2) \left(\frac{Q}{C_1 + C_2} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1 + C_2}$$

dir. (1) Eşitliği kullanırsak toplam enerji

$$U_s = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} \frac{(C_1 - C_2)^2 (\Delta V_i)^2}{(C_1 + C_2)}$$

olur. Buna göre depolanan son enerjinin ilk enerjiye oranı söyle olur:

$$\frac{U_s}{U_i} = \frac{\frac{1}{2} \frac{(C_1 - C_2)^2 (\Delta V_i)^2}{(C_1 + C_2)}}{\frac{1}{2} (C_1 + C_2) (\Delta V_i)^2} = \frac{\left(\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right)^2}{\left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 + C_2} \right)^2}$$

Bu oran birden küçük olduğundan, son enerjinin ilk enerjiden daha az olduğunu gösterir. İlk bakişta enerji korunum yasasının ihlal edilmiş olduğunu düşünübilirsiniz, fa-

kat öyle olmaz; "Kaybolan" enerji Bölüm 34 de görüleceği gibi elektromanyetik dalgalar biçiminde yayılır.

Sinama Sorusu 26.4

Paralel plakalı bir kondansatörü bir bataryada yükledikten sonra bataryadan ayırm ve plakaların uçlarına bağlı olan tellerin birbirlerine değmesini önleyin. Plakalar birbirinden çekilerek ayrıldığı zaman, aşağıdaki nicelikler artar mı, azalar mı, aynı mı kalır? (a) C siğası; (b) Q yükü; (c) Plakalar arasındaki E ; (d) ΔV potansiyel farkı; (e) Kondansatörde depolanan enerji.

Sinama Sorusu 26.5

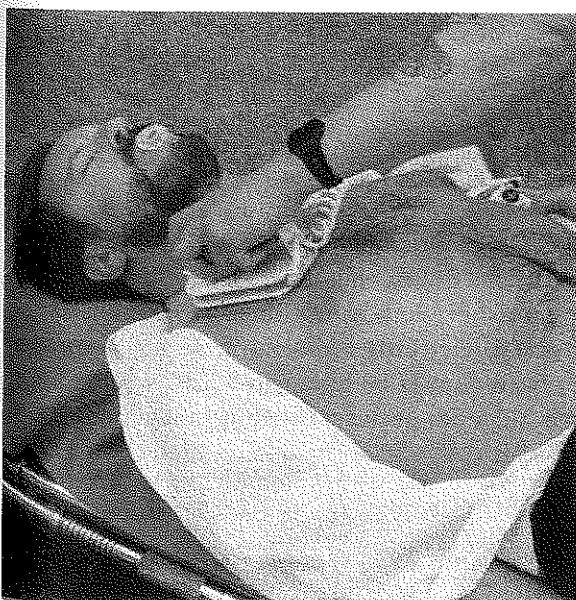
Bu defa Sinama Sorusu 26.4'ü, bataryalar birbirlerinden ayrılırken, kondansatörün batarya bağlı olduğunu varsayıarak cevaplandırın.

Kondansatörlerin önemli rol oynadığı aletlerden biri de (Şekil 26.13 deki) defibrillator (elektroşok) cihazıdır. Elektroşok cihazı tam olarak yüklenliğinde, büyük bir kondansatörün elektrik alan içinde 360J kadar bir enerji depolanır. Bu aygit tüm bu enerjiyi hastanın vücutuna yaklaşık 2ms de verir. (Bu değer, yaklaşık 60W lk lambanın çıkış gücünün kabaca 3 000 katına eşdeğerdir.). Ani elektrik şoku, çoğunlukla kalp krizine eşlik eden kalpteki kasılmayı (gelişi güzel büzülmeyi) durdurur ve düzenli bir kalp atış ritmini sağlar.

Bir fotoğraf makinası flaş ünitesi de kondansatör kullanılır, bunlarda depolanan toplam enerji miktarı, elektroşok cihazında depolanan enerjiden çok daha azdır. Fotoğraf makinasının flaş ünitesindeki kondansatör yüklenikten sonra, makinanın düğmesine basıldığda kameranın mercek kapağı hareket ettirilerek depollanmış enerjinin özel ışık lambasına gönderilmesi sağlanır, böylece fotoğrafı çekilecek cisim kısa bir süre kuvvetlice aydınlatılır.



Defibrillatör (elektroşok)lar hakkında daha fazla bilgi için www.physiocontrol.com sitesine giriniz.



Şekil 26.13 Hastanede veya acil servisde, belki bir hastanın elektroşok cihazı ile yeniden hayatı döndürildüğünü görmüşsünüzdür. Elektroşok plakaları hastanın göğsüne konulur ve elektrik şoku göğüs boşluğu boyunca gönderilir. Bu tekniğin amacı kalbin normal ritmini yeniden elde etmektir. (Adam Hart-Davis/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc. izniyle)

26.5 DİELEKTRİKLİ KONDANSATÖRLER

Dielektrik, lastik, cam veya mumlu kağıt gibi iletken olmayan maddelerdir. Bir dielektrik madde, kondansatörün plakaları arasına konulduğunda kondansatörün sığası artar. Dielektrik, plakalar arasındaki boşluğu tamamen doldurursa, kondansatörün sığası boyutsuz κ çarpanı kadar artar. Bu κ çarpanına dielektrik sabiti denir. Dielektrik sabiti bir maddenin doğal özelliğidir ve maddeden maddeye göre değişir. Bu kesimde, siğadaki değişimini elektriksel parametreler cinsinden örneğin; elektrik yükü, elektrik alan ve potansiyel farkına bağlı olarak inceleyeceğiz. Bu değişimlerin mikroskopik temelini Kesim 26.7 de tartışacağız.

Bir kondansatördeki dielektriğin etkisini göstermek için aşağıdaki deney yapılabilir. Bir dielektrik yokken paralel plakalı kondansatörün yükü Q_0 , sığası C_0 olsun. Kondansatörün uçlarındaki potansiyel farkı $\Delta V_0 = Q_0 / C_0$ olur. Bu durum Şekil 26.14a da gösterilmiştir. Potansiyel farkı, Bölüm 28 de ayrıntılı olarak inceleyeceğimiz *voltmetre* ile ölçülür. Şekilde hiçbir baryanın bulunduğuna ve Kesim 28.5 de öğreneceğimiz ideal voltmetrenin içinden yük akımının olmadığına dikkat ediniz. O halde yük akışını sağlayacak ve kondansatör üzerindeki yükü değiştirecek bir yol yoktur. Şimdi Şekil 26.14b'deki gibi plakalar arasına bir dielektrik konulursa, voltmetreden okunan ΔV değeri κ çarpanı kadar azalır. Dielektrikli ve dielektriksiz kondansatördeki voltajlar κ çarpanına

$$\Delta V = \frac{\Delta V_0}{\kappa}$$

şeklinde bağlı olur. $\Delta V < \Delta V_0$ olduğundan, $\kappa > 1$ olacaktır.

Kondansatörün üzerindeki Q yükü değişmemiştir olduğundan, sığanın değerinin

$$C = \frac{Q_0}{\Delta V} = \frac{Q_0}{\Delta V_0 / \kappa} = \kappa \frac{Q_0}{\Delta V_0}$$

$$C = \kappa C_0$$

(26.14)

şeklinde değişmesi gerektiği sonucuna varırız.

Burada C_0 dielektrik yokken sığanın değeridir. Plakalar arasındaki bölge tam olarak dielektrikle dolduğu zaman, sığa κ çarpanı kadar artar.⁴ Paralel plakalı kondansatörün $C_0 = \epsilon_0 A / d$ sığası (Eşitlik 26.3), kondansatör, bir dielektrikle doldurulduğunda

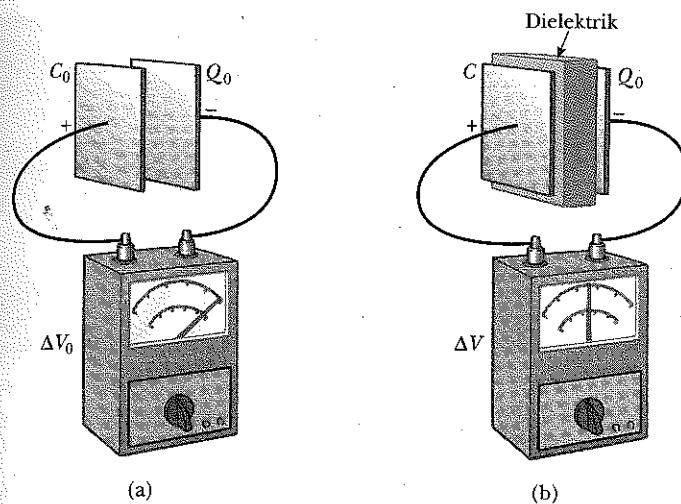
$$C = \kappa \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (26.15)$$

olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 26.3 ve 26.15 de görüldüğü gibi, plakalar arasındaki d uzaklığı azaldıkça sığa çok büyük değerler alabilir. Pratikte d 'nin alacağı en düşük değer, plakalar arasındaki dielektrik ortama doğru olabilecek elektrik boşalması nedeniyle sınırlıdır. Verilen bir d uzaklığının boşalma olmaksızın kondansatöre uygulanabilecek maksimum voltaj, **dielektriğin dielektrik sertliğine** (maksimum elektrik alan şiddetine) bağlı olur; ki bu hava için 3×10^7 V/m dir. Ortamdağı alan şiddeti dielektrik şiddeti geçerse, ortamın yalıtkanlık özelliği bozulup iletken olmaya başlar. Bir çok yalıtkan maddenin dielektrik sabiti κ

⁴ Bir batarya yardımıyla potansiyel farkı sabit tutularak dielektriğin içine sokulduğu bir deney yapılırsa, yük $Q = \kappa Q_0$ değerine kadar artar. İlave yük batarya tarafından sağlanır ve sığa yine κ çarpanı kadar artar.

Dielektrikle dolu bir kondansatörün sığası boş olamadan κ çarpanı kadar büyük olur.



Şekil 26.14 Yüklü bir kondansatörün plakaları arasına bir dielektrik; (a) yerleştirmeden önce, (b) yerleştirildikten sonraki durum. Plakalar üzerindeki yük değişmeden kahr fakat potansiyel farkı ΔV_0 iken, azalarak $\Delta V = \Delta V_0/\kappa$ olur. Böylece, siğa artarak C_0 iken κC_0 olur.

birden büyük ve dielektrik şiddetide havaninkinden büyük olduğu Tablo 26.1 de görülmektedir. Buna göre dielektrik aşağıdaki avantajları sağlar.

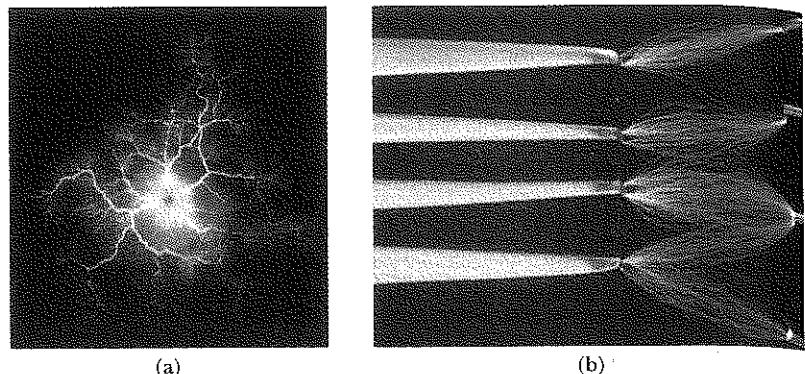
- Dielektrik, kondansatörün siğasını arttırmır.
- Dielektrik, kondansatörün maksimum çalışma voltajını arttırmır.
- Dielektrik, iletken plakalar arasında mekanik bir destek sağlayabilir.

Bu da, plakaların birbirlerine dokunmadan yaklaşmasını sağlar ve böylece d azalır, C artar.

TABLO 26.1 Oda Sıcaklığında Çeşitlik Madde-lerin Dielektrik Sabiti ve Dielektrik Siddeti

Madde	Dielektrik Sabiti κ	Dielektrik Sertlik* (V/m)
Hava (kuru)	1,00059	3×10^6
Bakalit	4,9	24×10^6
Eritilmiş kuartz	3,78	8×10^6
Neoprene lastik	6,7	12×10^6
Naylon	3,4	14×10^6
Kağıt	3,7	16×10^6
Polistirene	2,56	24×10^6
Porselen	6	12×10^6
Polyvinyl klorür	3,4	40×10^6
Pyrex Cam	5,6	14×10^6
Silikon yağı	2,5	15×10^6
Strontium titanate	233	8×10^6
Teflon	2,1	60×10^6
Boşluk	1,00000	—
Su	80	—

* Dielektrik şiddet (sertlik), elektriksel bozulma olmadan dielektrikte bulunabilecek maksimum elektrik alana eşittir. Bu değerlerin madde içindeki kusur ve kirliliklere sıkıca bağlı olduğuna dikkat ediniz.



(a)

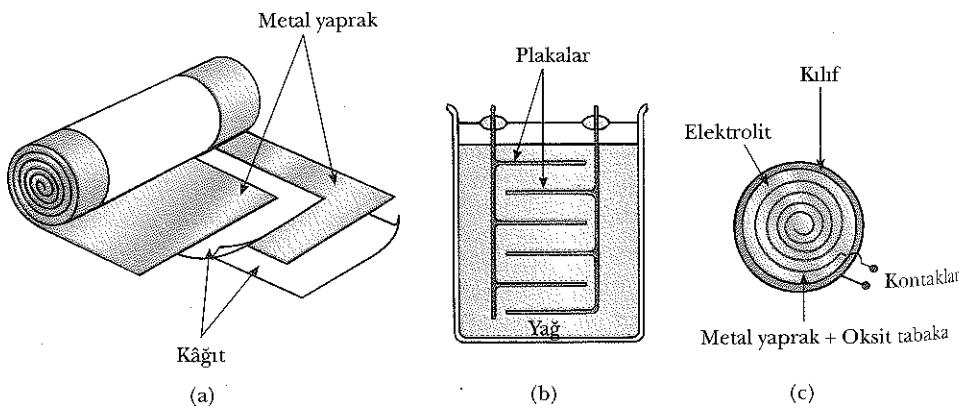
(b)

(a) Kirlian fotoğrafı, yüksek enerjili bir elektrik alanına çelik bir topun düşürülmesi ile elde edilir. Kirlian fotoğrafı elektrotoograf olarak bilinir. (b) Çatal ve dört elektrot arasında durgun yük boşalmasından oluşan kivilcimler. Bu resim, herbir boşalma bir kivilcime karşılık geldiği için çok sayıda kivilcimla elde edildi. Çatalın altından sağdaki iki elektronda boşalma olduğunu dikkat ediniz. Her kivilcim ışığı, yol üzerindeki gaz atomlarının uyarılmasıyla meydana gelir (a, Henry Duden/ Fen Fotoğraf Kütüphanesi; b, Adam Hart-Davis/ Fen Fotoğraf Kütüphanesi)

Kondansatör Tipleri

Ticari kondansatörler çoğunlukla metal yaprak kullanarak yapılır. Dielektrik madde görevini yapraklar arasına konan parafin emdirilmiş kağıt tabakaları veya Mylar gibi plastik dielektrik maddeler yapar. Ardışık sarılan metal yaprak ve dielektrik tabakalar silindir şeklinde yuvarlanıp, kıvrımlar küçük bir paket haline (Şekil 26.15a) getirilir. Yüksek-voltaj kondansatörleri genellikle çok sayıda, iç içe geçmiş silikon yağ içinde birbirlerine temas etmeyen plakalarдан oluşur (Şekil 26.15b). Küçük kondansatörler çoğunlukla seramik maddelerden yapılır. Değişken kondansatörler, (10 - 500 pF arasında) genellikle, hava ortamında birbiri içine geçmiş ve birbirlerine değişmeyen, biri sabit diğerinin hareketli bir seri paralel levhalardan oluşur. Hava, dielektrik madde görevini yapar.

Elektrolit kondansatörler çoğunlukla düşük voltajda büyük miktarda yük depolamada kullanılır. Bu aygit, Şekil 26.15c'de görüldüğü gibi bir *elektrolit* eriyikle kontak yapan metal yapraktan oluşur. Elektrolit, içinde bulunan iyonların hareketi nedeniyle elektriği ileten bir çözeltidir. Elektrolit ve metal yaprak arasına voltaj uygulandığında, metal yaprak üzerinde çok ince bir metal oksit (yalıtkan) tabaka oluşur ve bu oksit tabaka bir dielektrik görevi yapar. Dielektrik



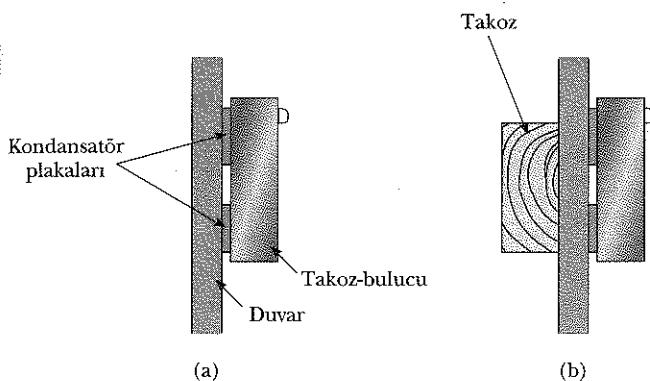
Şekil 26.15 Üç çeşit ticari kondansatör modeli. (a) Plakaları bir yağı kağıt ile birbirlerinden ayrılmış silindir şeklinde kıvrımlar oluşturulan tüp şekilli kondansatör. (b) Yağtan yağı birbirlerinden ayrılan tarak şeklinde birçok plakadan oluşan yüksek-voltaj kondansatörü. (c) Bir elektrolitik kondansatör.

rik tabaka çok ince ve plakalar arasındaki uzaklık çok küçük olduğundan elektrolit kondansatörlerde çok büyük siğra değerleri elde edilebilir.

Elektrolitik kondansatörler, diğer bir çok kondansatörlerde olduğu gibi, geri dönüşlü (tersinir) değildir ve üzerlerinde artı ve eksi işaretli açıkça kutupları gösterir. Bir devrede elektrolitik kondansatör kullanıldığında polariteye (aygit üzerindeki artı ve eksi işaretler) özenle uymalıdır. Uygulanan voltajın polaritesi olması, gerekenin tersi yapılmışsa oksit yalıtkan tabaka kolayca kaybolur ve kondansatör, yükü depolamak yerine elektriği iletir.

Sinama Sorusu 26.6

Duvara bir resim asmayı denemişseniz, içine vida veya çivinizi çakacağınız odundan bir takozun yerini belirlemektedeki güçlüğü bilirsiniz. Marangozun "takoz-bulucu" aleti, aslında Şekil 26.16 da gösterildiği gibi, plakaları yüzüze değilde yan yana yerleştirilen bir kondansatördür. Alet, takozun üstünde dolaştırıldığında, siğra artar mı, azalır mı?



Şekil 26.16 Bir takoz bulucusu. (a) Kondansatörün plakaları arasındaki madde duvar kaplaması (siva) ve havadır. (b) Kondansatör, duvardaki takoz üzerinde hareket ettirildiği zaman, plakalar arasındaki madde duvar kaplaması ve odun olmaktadır. Dielektrik sabitindeki bir değişme, iletin işaret lambasının yanmasına neden olur.

ÖRNEK 26.6 Kağıtlı Doldurulmuş Kondansatör

Bir paralel plakali kondansatörün plakalarının boyutları $2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ dir. Plakalar birbirlerinden 1 mm kalınlıkta bir kağıt ile ayrılmıştır. (a) Siğasını bulunuz.

Çözüm Kağıt için $\kappa = 3,7$ olduğundan (Tablo 26.1)

$$C = \kappa \frac{\epsilon_0 A}{d} = 3,7 (8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{6,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1,0 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$= 20 \times 10^{-12} \text{ F} = 20 \text{ pF}$$

(b) Kondansatör üzerinde toplanan maksimum yük ne kadardır?

Çözüm Tablo 26.1 den kâğıdın dielektrik şiddeti $16 \times 10^6 \text{ V/m}$ dur. Kâğıdın kalınlığı 1 mm olduğundan, elektrik alan bozulmadan önce uygulanacak maksimum voltaj

$$\Delta V_{\text{maks}} = E_{\text{maks}} d = (16 \times 10^6 \text{ V/m}) (1,0 \times 10^{-3} \text{ m})$$

$$= 16 \times 10^3 \text{ V}$$

dir. Buradan maksimum yük

$$Q_{\text{maks}} = C \Delta V_{\text{maks}} = (20 \times 10^{-12} \text{ F}) (16 \times 10^3 \text{ V}) = 0,32 \mu\text{C}$$

Alişturma Kondansatörde biriktirilebilecek maksimum enerji nedir?

Cevap $2,6 \times 10^{-3} \text{ J}$

ÖRNEK 26.7**Once ve Sonra Depolanan Enerji**

Bir paralel plakalı kondansatör, Şekil 26.17a daki gibi, bir batarya ile Q_0 yüküne kadar yükleniyor. Sonra batarya kondansatörden ayrılarak, plakalar arasına dielektrik sabiti κ olan kalın bir dilim Şekil 26.17b deki gibi yerleştiriliyor. Dielektrik konulmadan önce ve konulduktan sonra kondansatörde biriken enerjiyi bulunuz.

Çözüm Dielektrik yokken kondansatörde depolanan enerji, (Bakınız Eşitlik 26.11)

$$U_0 = \frac{Q_0^2}{2C_0}$$

olarak yazılabilir. Batarya ayrılp plakalar arasına dielektrik yerleştirildikten sonra, *kondansatör üzerindeki yük aynı kalmıştır*. Böylece dielektrik varken depolanan enerji,

$$U = \frac{Q_0^2}{2C}$$

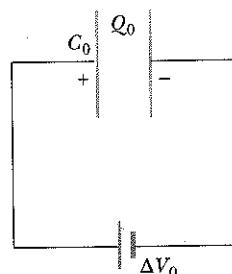
olur. Fakat dielektrik varken kondansatörün siğası $C = \kappa C_0$ olduğundan, depolanan enerji

$$U = \frac{Q_0^2}{2\kappa C_0} = \frac{U_0}{\kappa}$$

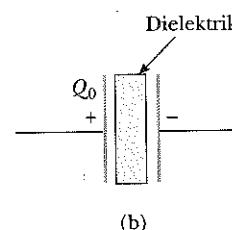
olur. $\kappa > 1$ olduğundan, son enerji ilk enerjiden $1/\kappa$ çarpanı kadar daha az olduğunu görüyoruz. Kayıp enerji, dielektrik kondansatör içine yerleştirilirken, aygıt doğrularak çileğine dikkat ederek açıklanabilir (aşağıdaki tartışmaya ve Şekil 26.18'e bakınız). Dış etken, dilimin ivmelenmesi için negatif iş yapmalıdır. Bu iş basitçe $U - U_0$ farkıdır. (Başa söyleyse, sistem tarafından dış etken üzerinde yapılan pozitif iş $U_0 - U$ ile verilir)

Alişturma Farzedelim ki dielektrik yokken sığa $8,50 \text{ pF}$ ve bu kondansatör $12,0 \text{ V}$ 'luk potansiyel farkında yüklenmiştir. Kondansatör bataryadan ayrılp levhaları arasına Polystyrene ($\kappa = 2,56$) dilimi yerleştirilirse $U - U_0$ enerji farkı ne olur?

Cevap 373 pJ



(a)



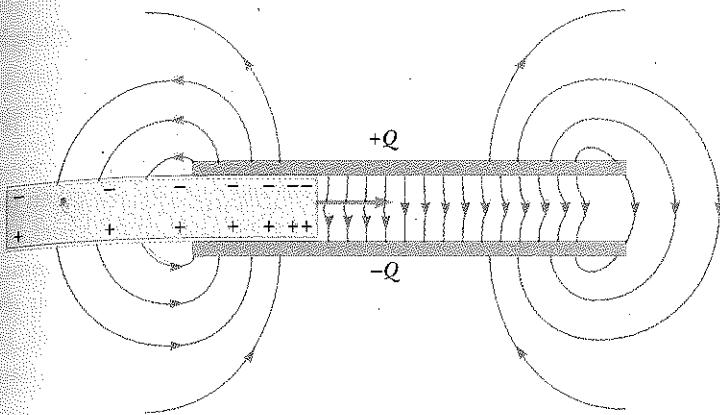
(b)

Şekil 26.17

Bataryaya bağlı olmayan kondansatörün plakaları arasına dielektrik konulduğunda enerjisinin azaldığı görülmektedir. Bunun anlamı, kondansatörün içine dielektrik yerleştirildiğinde dış kuvvetler tarafından dielektrik üzerine negatif bir iş yapılmasıdır. Bunun tersi ise, kuvvetin dielektrik üzerine etki ederek onu kondansatörün içine çekmesini ima eder. Bu kuvvet, Şekil 26.18'de gösterildiği gibi, kondansatörün kenarlarına yakın uçlarda düzgün olmayan elektrik alanın doğasından kaynaklanır. Dielektrik yüzey üzerinde indüklenen yükler, üzerine etkiyen bu *sacak alanının* yatay bileşeni, kondansatörün içine doğru yönelen net bir yatay kuvvet oluşturur.

Sınav Sorusu 26.7

Bir bataryaya bağlı halde iken, tam olarak yüklenmiş paralel levhalı bir kondansatörün plakaları arasındaki bir dielektrik maddeyi kaydırıyzorsunuz. Aşağıdaki nicelikler artar mı, azalır mı, aynı mı kalır? (a) C ; (b) Q ; (c) plakalar arasındaki E ; (d) ΔV ; (e) kondansatörde depo edilen enerji



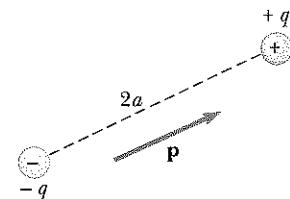
Şekil 26.18 Paralel levha kondansatörün kenarlarına yakın yerlerdeki düzgün olmayan elektrik alan, dielektriğin kondansatör içine çekilmesine neden olur. Alanın, Dielektrik üzerinde gelişen gizel dağılan indüklenmiş yüzey yüklerine etkidiğine dikkat ediniz.

Seçmeli Kesim

26.6 BİR ELEKTRİK ALANDAKİ ELEKTRİK DİPOLÜ

Bir kondansatörün plakaları arasında dielektrik madde konulduğunda sağası üzerinde oluşan etkileri tartıştık. Bu etkilerin mikroskopik temelini de Kesim 26.7 de tanıtacağız. Fakat bunu yapmadan önce, Kesim 23.4'te (bakınız Örnek 23.6) başlattığımız elektrik dipol hakkında tartışmayı burada genişletmeye ihtiyaç vardır. Elektrik dipol, Şekil 26.19 da görüldüğü gibi birbirinden $2a$ uzaklılığı ile ayrılmış eşit büyüklükte, zit işaretli iki yükden oluşur. Bu düzenin **elektrik dipol momentini**, $-q$ dan $+q$ ya doğru yükleri birleştiren bir çizgi boyunca ve $2aq$ büyüklüğünde sahip bir \mathbf{p} vektörü olarak tanımlarız. Yani \mathbf{p} nin büyülüğu:

$$\mathbf{p} \equiv 2aq \quad (26.16)$$



Şekil 26.19 Bir elektrik dipol $2a$ uzunuğu ile birbirlerinden ayrılmış iki eşit ve zit yüklerden meydana gelmiştir. \mathbf{p} elektrik dipol momenti vektörünün yönü $-q$ dan $+q$ ya doğrudur.

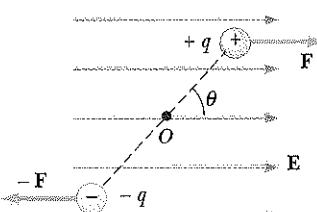
Simdi, varsayıalım ki bir elektrik dipol, Şekil 26.20 deki gibi düzgün bir \mathbf{E} elektrik alan içine konulsun. Kesim 23.4 de anlatıldığı gibi, \mathbf{E} yi dipolün kendi alanından aynı, dipole uygulanan bir dış alan olarak alalım. \mathbf{E} alanı, başka yük dağılımları tarafından oluşturulmaktadır ve bu alanın içine dipolü yerleştiriyoruz. Dipol momenti, elektrik alan ile θ açısı yapsın.

Bu iki yük üzerine etki eden kuvvet Şekil 26.20 de gösterildiği gibi, eşit büyüklükte (her birinin büyüklüğü $F = qE$), zit doğrultulardadır. Buna göre dipol üzerindeki net kuvvet *sıfır* olur. Fakat, bu iki kuvvet dipol üzerinde net bir döndürme momenti (tork) oluşturur ve bunun neticesinde dipol, ekseni elektrik alana paralel olacak şekilde döndürmek ister. Pozitif yük üzerindeki kuvvetin, Şekil 26.20 deki O dan geçen eksene göre torku $Fa \sin \theta$ ile verilir. Buradaki $a \sin \theta$, O ya göre F nin moment koludur. Bu kuvvet, dipolü saat yönünde döndürmek ister. Negatif yük üzerindeki tork da $Fa \sin \theta$ 'dır ve yine buradaki kuvvet dipolü saat yönünde dönmeye zorlar. O halde O ya göre net tork

$$\tau = 2Fa \sin \theta$$

olar. $F = qE$ ve $p = 2aq$ oduğundan τ yu

$$\tau = 2aqE \sin \theta = pE \sin \theta \quad (26.17)$$



Şekil 26.20 Düzgün bir dış elektrik alan içindeki elektrik dipol. Dipol momenti \mathbf{p} elektrik alanla θ açısı yapmakta ve dipol bir dönmeye sahip olmaktadır.

Dış bir elektrik alanındaki elektrik dipoluna etkiyen tork

olarak ifade edebiliriz. Torku (dönme momenti) \mathbf{P} ve \mathbf{E} vektörlerinin vektörel çarpımı olarak ifade etmek daha uygundur:

$$\tau = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$

(26.18)

Bir elektrik dipol sisteminin potansiyel enerjisini, dış alana göre yönelimin fonksiyonu olarak belirleyebiliriz. Bunu yapmak için, bir dış etken tarafından elektrik alanındaki dipolu verilen bir açı boyunca döndürmek için bir iş yapmak gerektiğini bilmek zorundasınız. O zaman yapılan iş, sistemde potansiyel enerji olarak depo edilir; yani dipol ve dış alanda. Dipolu bir $d\theta$ açısına kadar döndürmek için gerekli olan dW 'sı $dW = \tau d\theta$ ile verilir (Eşitlik 10.22); $\tau = pE \sin \theta$ ve iş, U potansiyel enerjisine dönüştüğünden, dipolun θ_i dan θ_s kadar dönmesi halinde potansiyel enerjideki değişim,

$$\begin{aligned} U_s - U_i &= \int_{\theta_i}^{\theta_s} \tau d\theta = \int_{\theta_i}^{\theta_s} pE \sin \theta d\theta = pE \int_{\theta_i}^{\theta_s} \sin \theta d\theta \\ &= pE \left[-\cos \theta \right]_{\theta_i}^{\theta_s} = pE (\cos \theta_i - \cos \theta_s) \end{aligned}$$

olur. $\cos \theta_i$ içeren terim sabit ve dipolun başlangıç yönelimine bağlıdır. $\theta_i = 90^\circ$ almak uygun olur, böylelikle $\cos \theta_i = \cos 90^\circ = 0$ olur. Dahası, $\theta_i = 90^\circ$ da $U_i = 0$ potansiyel enerji referansımız olarak alınabilir. Böylece $U = U_s$ ifadesi

$$U = -pE \cos \theta$$

(26.19)

şeklinde yazılabilir. Bu, \mathbf{p} ve \mathbf{E} vektörlerinin skaler çarpımı şeklinde de yazılabılır:

$$U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$$

(26.20)

Bir elektrik alanındaki dipolun potansiyel enerjisi

Eşitlik 26.19 daki kavramın daha iyi anlaşılması için, yerin çekim alanındaki bir cismin potansiyel enerjisi $U = mgh$ (bakınız Bölüm 8) ifadesi ile, bu ifadeyi karşılaştırılmı. Yerçekimi alanının enerji ifadesi, alan içindeki cisimde ait m kütlesi gibi bir değişken içermektedir. Yerçekimi ifadesinde, yerçekimi alanının g büyüklüğü bulunmaktadır. Benzer olarak, Eşitlik 26.19 ifadesinde de E elektrik alan büyülüğu bulunur. O halde, potansiyel enerji ifadelerinde görülen bu iki katkı benzerlik göstermektedir. Bununla beraber son katkı iki bakımından biraz farkıdır. Yerçekimi enerjisi ifadesinde potansiyel enerji cismin hangi h yüksekliğine kaldırılacağına bağlıdır. Eşitlik 26.19 daki potansiyel enerji ise, dipolun dönüşünü gösteren θ açısına bağlıdır. Her iki halde de sistemde bir değişim olmaktadır. Kütle-çekim halinde, cisimde *öteleme* anlamında bir değişim gerekmekte, elektriksel durumda ise cisim hareketindeki değişim bir eksen etrafındaki *dönme* hareketi olmaktadır. Bununla beraber, her iki durumda da, cisimler serbest bırakıldığı anda sistem başlangıcındaki eski düzene dönerken bir değişim meydana gelir; bu değişim, m küteli bir cisimde yere düşme şeklinde, bir dipolde ise, ileri geri dönerken salınım hareketi sonunda alana paralel doğrultuya gelmesi şeklinde olur. O halde hareket tipleri farklı da olsa, her iki durum için potansiyel enerji ifadeleri benzerdir.

Molekülün pozitif ve negatif yüklerinin “ortalama konumları” arasında bir uzaklık varsa, moleküle *polarize* olmuştur denir. Su molekülünde olduğu gibi, bazı moleküllerde daima böyle durum olabilir. bunlara **kutuplu (polar) moleküller** denir. Moleküller kalıcı kutuplama (polarizasyon) sürecine sahip değilse bunlara **kutupsuz (nonpolar) moleküller** denir.

Suyun kalıcı polarizasyonu, su molekülünün geometrisini inceleyerek anlaşılabilir. Su molekülü oksijen atomu ile hidrojen atomlarının iki bağı arasında 105° lik açı bulunacak şekilde düzenlenir (Şekil 26.21). Negatif yük merkezi oksijen atomunun yakınındadır; halbuki pozitif yük merkezi, hidrojen atomlarını birleştiren çizgi boyunca tam orta noktada bulunur (Şekil 26.21 deki X noktası). Bu tür moleküllerden oluşan maddelerin dielektrik sabiti de büyük olur; ayrıca sürekli polarize kalırlar. Suyun molekülü ve diğer kutuplu moleküller dipoller gibi düşününebiliriz. Çünkü pozitif ve negatif yüklerin kütle merkezleri bir noktasal yük gibi davranışları. Sonuç olarak, dipoller üzerindeki tartışmalarımızı polar moleküllerin davranışına da uygulabiliyoruz.

Mikrodalga fırınları, su molekülünün kutuplu davranışını kullanırlar. Mikrodalga fırınları çalışırken çok hızlı değişen bir elektrik alan üretirler. Bu da, polar moleküllerin ileri – geri salınım yapmasına ve bu süreçte enerji sağlumasına sebep olur. İtişip kakaşan moleküller birbirleriyle çarpışırlar ve elektrik alandan soğurdukları enerji iç enerjiye dönüşür ve bu enerji yiyeceklerin sıcaklığının artmasına neden olur.

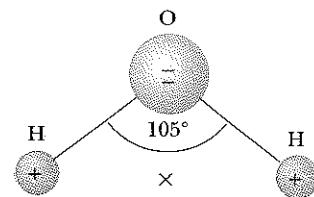
Suyun dipol yapısının kullanıldığı diğer bir yer de sabun ve su ile yıkamadır. Genellikle suyla bir çekiciliği olmayan, yağ ve petrol gibi maddeler kutupsuz moleküllerden yapılmıştır. Deriye bulaşmış bu tip kirleri çıkartmak için yalnız su yeterli değildir. Sabun, *surfactant* denilen uzun moleküller içerir. Uzun moleküllerin bir ucunda belirli bir kutup bulunurken diğer ucunda farklı kutup olabilir. Sabun (Surfactant) molekülünün bir ucu kutupsuz molekülü, diğer ucu da (kutuplu uç) su moleküllerini çeker. Böylece sabun, kirleri ve su moleküllerini bağlayarak bir zincir görevi yapar. Sabunlu su çalkalanıp gittiği zaman, yağ ve petrol kirleride onunla gider.

Simetrik moleküller (Şekil 26.22a), sürekli polarizasyona (kutuplanma) sahip olmayabilirler. Fakat bunlara bir dış elektrik alan tarafından polarizasyon indüklenebilir. Şekil 26.22b de görüldüğü gibi, bir çizgisel molekül x ekseni boyunca bulunuyorsa, negatif x ekseni doğrultusundaki bir dış elektrik alan, bu pozitif yük merkezinin başlangıç konumundan sola doğru, negatif yük merkezinin de sağa doğru kaymasına sebep olur. Bu *indüklenmiş kutuplanma* (polarizasyon), kondansatörlerde dielektrik olarak kullanılan maddelerin coğunda ağır basan bir etkidir.

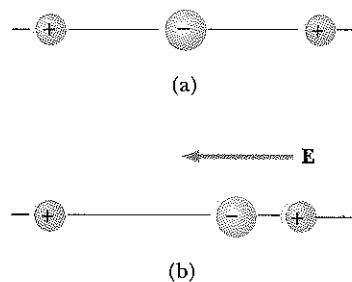
ÖRNEK 26.8 H₂O Molekülü

H₂O molekülünün dipol momenti $6,3 \times 10^{-30}$ C·m dir. 10^{21} tane bu tür molekül içeren bir numunenin dipol momentlerinin tümü $2,5 \times 10^5$ N/C luk bir elektrik alan doğrultusundadır. Bu şekilde yönelmiş ($\theta = 0^\circ$) dipollerin döndürerek bütün dipol momentleri elektrik alana dik duruma ($\theta = 90^\circ$) getirmek için ne kadar iş yapmak gereklidir?

Cözüm Bir molekülü 90° döndürmek için gereklili iş, 90° ve 0° lik yönelimler arasındaki potansiyel enerji farkına eşittir. Eşitlik 26.19'u kullanarak,



Şekil 26.21 Su molekülü (H₂O), geometrisinden kaynaklan sürekli kutuplanmaya sahiptir. Pozitif yük dağılımının merkezi X noktasındadır.



Şekil 26.22 (a) Simetrik bir molekül sürekli bir kutuplanmaya sahip değildir. (b) Bir dış elektrik alan, molekülde kutuplanma yaratır.

$$\begin{aligned} W &= U_{90} - U_0 = (-pE \cos 90^\circ) - (-pE \cos 0^\circ) \\ &= pE = (6,3 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}) (2,5 \times 10^5 \text{ N/C}) \\ &= 1,6 \times 10^{-24} \text{ J} \end{aligned}$$

bulunur.

Numunede 10^{21} tane molekül bulunduğuundan, gereklili *toplam iş*

$$\begin{aligned} W_{\text{toplam}} &= (10^{21}) (1,6 \times 10^{-24} \text{ J}) = 1,6 \times 10^{-3} \text{ J} \\ &\text{olur.} \end{aligned}$$

Seçmeli Kesim



DIELEKTRİKLERİN ATOMİK DÜZEYDE TANITIMI

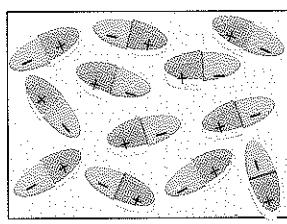
Kesim 26.5 de, bir kondansatörün levhaları arasına κ sabitli bir dielektrik ko-nulduğu zaman, ΔV_0 potansiyel farkının $\Delta V_0/\kappa$ çarpanı kadar azaldığını gör-dük. Levhalar arasındaki potansiyel farkı, elektrik alanla d uzaklığının çarpımı olduğundan, elektrik alan da κ çarpanı kadar azalır. Buna göre dielektriksiz ortamda elektrik alan E_0 ise, dielektrikli halde elektrik alan

$$E = \frac{E_0}{\kappa} \quad (26.21)$$

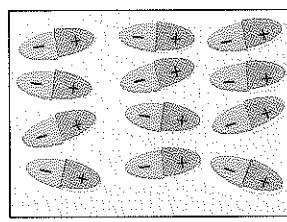
olur.

İlk olarak, bir kondansatörün plakaları arasındaki elektrik alan içine ku-tuplu moleküllere sahip bir dielektriğin konulduğunu düşünelim. Dipoller (yani, dielektriği oluşturan kutuplu moleküller) Şekil 26.23a da görüldüğü gi-bi elektrik alan yokken gelişen güzel yönelerler. Kondansatör plakalarındaki yüklerin oluşturduğu dış E_0 elektrik alanı uygulandığı zaman, dipoller üzeri-ne etkiyen tork, dipollerin kısmen Şekil 26.23b de görüldüğü gibi alan doğrultusunda sıraya dizilmesine neden olur. Şimdi polarize dielektriği anlatabiliyoruz. Dipollerin sıraya dizilme derecesi, elektrik alanın büyüklüğe ve sıcaklığı bağlıdır. Bu sıraya dizilme genellikle, elektrik alan şiddeti arttıkça ve sıcaklık azaldıkça artar. Dielektriğin molekülleri kutupsuzsa, bu durumda plakalar arasındaki dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur ve bunun so-nucunda da *indüklelenmiş dipol momenti* oluşur. İndüklenen bu dipol momen-tler, dış alan ile aynı doğrultuda sınırlanma eğilimini gösterirler ve dielektrik kutuplanmış olur. O halde, moleküllerin kutuplu veya kutupsuz olmasına ba-kılmaksızın, bir dış elektrik alan yardımıyla dielektrikleri polarize edebiliriz.

Bunları akhımızda tutarak, Şekil 26.24'deki kondansatörün plakaları arasında düzgün bir E_0 elektrik alan içindeki bir dielektrik madde dilimini in-celeyelim. Moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde negatif kısmı da alana zıt yönlü olacak şekilde yönelir. Böylece, uygulanan elektrik alan dielektriği polarize eder. Burada, dielektrik üzerindeki net etki, Şekil 26.24b de gö-rülüdüğü gibi, sağ yüzey üzerinde indüklelenmiş σ_{ind} pozitif yüzeysel yük yoğun-luğuna eşit miktarda sol yüzey üzerinde indüklemiş $-\sigma_{\text{ind}}$ negatif yüzeysel yük yoğunluğunun oluşmasıdır. Dielektrik üzerinde indüklenen bu yüzey yükleri, E_0 dış alanına karşı koyan indüklelenmiş E_{ind} elektrik alanının oluşmasına

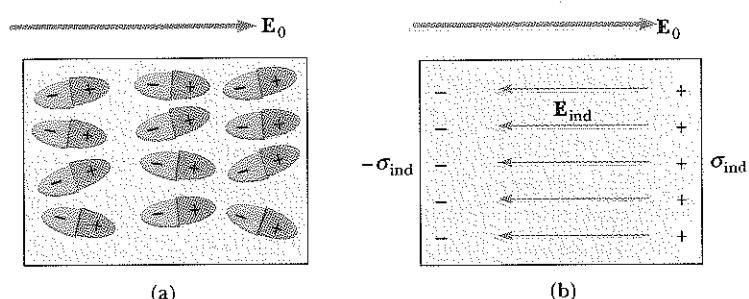


(a)



(b)

Şekil 26.23 (a) Daimi dipol momentine sahip olan moleküller, bir dış alan yok iken rastgele yönelikler. (b) Bir dış elektrik alan uygulanlığında dipoller, kısmen alanla aynı doğrultuda sıraya dizilirler.



Şekil 26.24 (a) Dielektrik polarize olduğunda, dielektrikteki moleküller dipol momentler E_0 dış alan doğrultusunda sıraya dizilirler. (b) Bu polarizasyon, dielektriğin bir yüzünde negatif yüzeysel yükü öteki yüzünde de eşit miktarda pozitif yüzeysel yük indüklenmesine sebep olur. Yüklerin bu dağılımı dielektrik içinde elektrik alanın azalmasına yol açar.

sebep olurlar. Böylece dielektrik içindeki net E elektrik alanının büyüklüğü

$$E = E_0 - E_{\text{ind}} \quad (26.22)$$

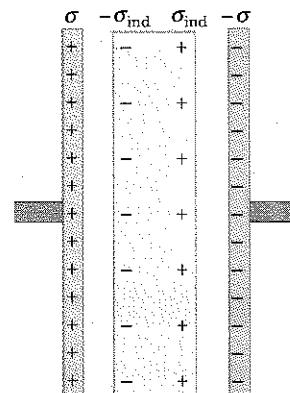
olarak verilir.

Şekil 26.25 te gösterilen paralel plakalı kondansatörlerde, plakalar üzerindeki σ serbest yük yoğunluğu, E_0 elektrik alanına $E_0 = \sigma/\epsilon_0$ ile bağlıdır. Dielektrik içindeki indüklenen elektrik alanı, indüklenmiş σ_{ind} yük yoğunluğununa $E_{\text{ind}} = \sigma_{\text{ind}}/\epsilon_0$ bağıntısı ile bağlı olur. $E = E_0/\kappa = \sigma/\kappa\epsilon_0$ olduğundan bunu Eşitlik 26.22 de yerine koyarsak

$$\frac{\sigma}{\kappa\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_{\text{ind}}}{\epsilon_0}$$

$$\sigma_{\text{ind}} = \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right) \sigma \quad (26.23)$$

olur. $\kappa > 1$ olduğundan bu ifade, dielektrik üzerinde indüklenen σ_{ind} yük yoğunluğunun kondansatörün plakaları üzerindeki σ serbest yük yoğunluğundan küçük olduğunu gösterir. Örneğin $\kappa = 3$ ise, dielektrik üzerinde indüklenen yük yoğunluğu plakalar üzerindeki serbest yük yoğunluğunun üçte ikisi kadardır. Hiç bir dielektrik yoksa, beklenildiği gibi $\kappa = 1$ ve $\sigma_{\text{ind}} = 0$ olur. Bu na karşın, dielektrik yerine bir *iletken* yerleştirilirse, $E = 0$ olur; o zaman Eşitlik 26.22 den $E_0 = E_{\text{ind}}$ elde edilir ki bu, $\sigma_{\text{ind}} = \sigma$ a karşılık gelir. Yani, iletken üzerinde indüklenen yük, plakalar üzerindeki yükle eşit büyüklükte ve zit işaretli olacak, dolayısıyle iletkendeki net alan *sıfır* olacaktır.



Şekil 26.25 Yüklü bir kondansatörün plakaları arasına konan dielektrik üzerindeki indüklenmiş yük. Dielektrik üzerinde indüklenmiş yük yoğunluğunun, plakalar üzerindeki serbest yük yoğunluğundan daha az olduğuna dikkat edin.

ÖRNEK 26.9 Bir Metal Dilimin Etkisi

Bir paralel-plakalı kondansatörün plakaları arasındaki uzaklık d , bir plakasının alanı A dir. Kalınlığı a olan yüksüs bir metal dilim, levhalar arasındaki orta yere konuluyor. (a) Bu aygıtın sıgasını bulunuz.

Çözüm Bu problem, kondansatörün bir plakasının yüklenmesi halinde, metal dilimin kenarları üzerinde *eşit* ve *zit* bir yükün indüklenmesi gerektigine dikkat ederek çözülebilir Şekil 26.26a. Sonuçta metal dilim üzerindeki net yük sıfır olur, hatta dilimin içindeki alan da sıfırdır. Böylece kondansatör, Şekil 26.26b de görüldüğü gibi her birinin plakaları arasındaki uzaklık $(d - a)/2$ olan seri bağlı iki kondansatöre eşdeğer olur. İki kondansatörün seri bağlanmasına ait kuralı (Eşitlik 26.10) kullanarak,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \frac{1}{(d-a)/2} + \frac{1}{\epsilon_0 A} \frac{1}{(d-a)/2}$$

olur. Buradan C yi çözdüğümüzde,

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d-a}$$

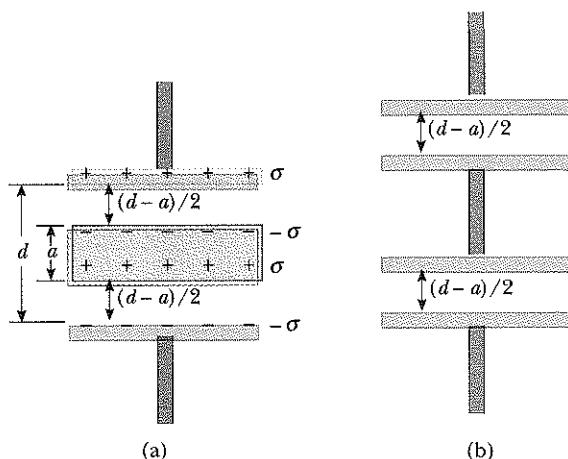
bulunur. a, d 'ye yaklaştığında C nin sonsuza gideceğine dikkat ediniz. Niçin?

(b) Eğer metalik dilimin kalınlığı ihmal edilebilecek derecede küçükse, kondansatörün sıgasında hiçbir değişikliğin olmadığını gösteriniz.

Çözüm (a) şıklında bulunan *sığa* ifadesinde $a \rightarrow 0$ olursa,

$$C = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\epsilon_0 A}{d-a} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

olur. Buda başlangıçtaki sıganın değeridir.



Şekil 26.26 (a) Kalınlığı a olan bir metal dilimle plaka aralığı d olan paralel plakalı kondansatör kısmen doldurmuştur. (b) (a) daki aygıtın eşdeğer devresi, her birinin plaka aralığı $(d - a)/2$ olan seri bağlı iki kondansatörden ibarettir.

(c) Diliminin konulduğu yerin (a) daki sonuca bir etkisi olmadığını gösteriniz.

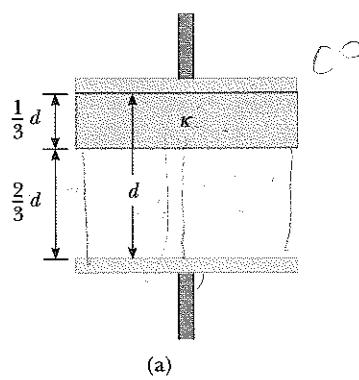
Çözüm Şekil 26.26a daki dilimi yukarı hareket ettiğimizde, dilimin üst yüzü ile üstteki plaka yüzeyi arasındaki uzaklığın b olduğunu kabul edelim. Bu durumda, alttaki plaka yüzeyi ile dilimin alt yüzü arasındaki uzaklık $d - b - a$ olur. (a) daki gibi, seri bağlamadaki eşdeğer sığayı,

$$\begin{aligned}\frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{\frac{\epsilon_0 A}{b}} + \frac{1}{\frac{\epsilon_0 A}{d-b-a}} \\ &= \frac{b}{\epsilon_0 A} + \frac{d-b-a}{\epsilon_0 A} = \frac{d-a}{\epsilon_0 A} \\ C &= \frac{\epsilon_0 A}{d-a}\end{aligned}$$

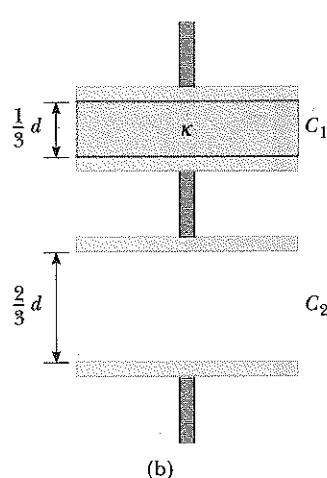
bulunur. Bu (a) şıkkında bulunan sonucun aynıdır. Bu değer b den bağımsızdır, o halde dilimin plakalar arasında k_0 noluğu yer fark yaratmamıştır.

ÖRNEK 26.10 Kısmen Dolu Kondansatör

Dielektrik yokken bir paralel plakalı kondansatörün plakaları arasındaki uzaklık d ve sığası C_0 dir. Dielektrik sabiti κ ve kalınlığı $(1/3)d$ olan bir dielektrik madde dilimi, kondansatörün plakaları arasına (Şekil 26.27a) konulduğunda kondansatörün sığası ne olmuştur?



(a)

C₂

Şekil 26.27 (a) Plakaları arasındaki uzaklık d olan paralel plakalı kondansatörün $d/3$ kalınlığı bir dielektrikle kısmen doldurulmuştur. (b) Kondansatörün eşdeğer devresi seri bağlı iki kondansatörden oluşur.

Çözüm Örnek 26.9 da, bir kondansatörün plakaları arasına iletken bir dilim konulduğunda sistemin seri bağlı iki kondansatör gibi gözönüne alınacağını bulduk. Bulunan sığa değeri de, dilimin konulduğu yerden bağımsızdır. Üstelik, dilimin kalınlığı sıfır giderse, sistemin sığısı, dilimin bulunmadığı zamanki kondansatörün sığasına eşit olmaktadır. Buradan, bir kondansatörün plakaları arasındaki herhangi bir yere kalınlığı ihmali edilebilecek derecede küçük bir iletken yerleştirildiğinde, kondansatörün sığasının değişmeyeceği sonucunu çıkartılır. O halde Şekil 26.27a da gösterilen dielektrikin alt yüzü boyunca ihmali edilebilecek derecede ince bir metal tabakanın kaplandığını düşünelim. Bu sistemi, Şekil 26.27b de gösterilen seri bağlı iki kondansatör gibi göz önüne alabiliriz. Bunlardan biri dielektrik maddesi ile dolu, plakaları arasındaki uzaklık $d/3$ ve diğerinin arasında hava bulunan ve plakaları arasındaki uzaklık $2d/3$ olan iki paralel plakalı kondansatöre özdeş olur.

Eşitlik 26.3 ve 26.15 e göre bu iki sığa

$$C_1 = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d/3} \quad \text{ve} \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 A}{2d/3}$$

olarak verilir. Seri bağlı bu iki sığa için Eşitlik 26.10 u kullanarak eşdeğer sığayı

$$\begin{aligned}\frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} = \frac{d/3}{\kappa \epsilon_0 A} + \frac{2d/3}{\epsilon_0 A} \\ &= \frac{d}{3\epsilon_0 A} \left(\frac{1}{\kappa} + 2 \right) = \frac{d}{3\epsilon_0 A} \left(\frac{1+2\kappa}{\kappa} \right)\end{aligned}$$

$$C = \left(\frac{3\kappa}{2\kappa+1} \right) \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

olarak buluruz. Dielektriksiz sığa $C_0 = \epsilon_0 A/d$ olduğundan

$$C = \left(\frac{3\kappa}{2\kappa+1} \right) C_0$$

olur.

ÖZET

Bir kondansatör zıt işaretli fakat eşit miktarda yükler taşıyan iki iletkeden oluşur. Herhangi bir kondansatörün *C* siğası, iletkenlerden biri üzerindeki *Q* yükünün büyüklüğünün iletkenler arasındaki ΔV potansiyel farkına oramıdır:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (26.1)$$

Bu bağıntı, üç değişkenden herhangi ikisinin bilinmesi durumunda kullanılabilir. Bu oran iletkenlerin verilen düzeni için sabittir, çünkü kondansatörün siğasının, potansiyel farkı veya bir dış kaynak üzerindeki yükle bağlı olmadığı ve yalnız iletkenlerin geometrisine bağlı olduğunu hatırlamak önemlidir.

Sığanın *SI* birimi Coulomb başına volt veya **farad** (*F*)dır ve $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$ dir.

Cesitli geometride kondansatörün siğası Tablo 26.2 de özetlenmiştir.

İki veya daha fazla kondansatör *paralel* bağlanırsa, bunların uçları arasındaki potansiyel farkı aynı olmalıdır. Paralel bağlı kondansatörlerin eşdeğer siğası

$$C_{\text{es}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (26.8)$$

olur.

İki veya daha fazla kondansatör *seri* bağlanırsa, her bir kondansatörün üzerindeki yük aynı olur ve seri bağlı kondansatörlerin eşdeğer siğası

$$\frac{1}{C_{\text{es}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (26.10)$$

olarak verilir. Bu iki denklem, çok sayıdaki kondansatör yerine bir tek eşdeğer kondansatörün kullanılması ile birçok elektrik devresinin basitleştirilmesine olanak sağlar.

Bir kondansatörü yüklemek için iş yapmak gereklidir. Çünkü, yükleme süresi, düşük potansiyelli bir iletkeden yüksek potansiyelli başka bir iletkeye yük aktarılmasıdır. *Q* yükünü kondansatöre yüklemek için yapılan iş, kondansatörde depolanan *U* elektrostatik potansiyel enerjiye eşittir. Burada,

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 \quad (26.11)$$

dir.

TABLO 26.2 Sığa ve Geometri

Geometri	Sığa	Eşitlik
Yalıtlı <i>R</i> yarıçaplı kür (ikinci yüklü iletken sonsuzda kabul edilmişdir)	$C = 4\pi\epsilon_0 R$	26.2
A yüzeyli ve <i>d</i> aralıklı paralel plakalı kondansatör	$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$	26.3
İç ve dış yarıçapları <i>a</i> ve <i>b</i> olan <i>ℓ</i> uzunluğunda silindirik kondansatör	$C = \frac{\ell}{2k_e \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$	26.4
İç ve dış yarıçapları <i>a</i> ve <i>b</i> olan küresel kondansatör	$C = \frac{ab}{k_e(b-a)}$	26.6

Kondansatörün plakaları arasına dielektrik bir madde konulduğunda, genellikle sığa, **dielektrik sabiti** denen birimsiz bir κ çarpanı kadar artar. Yani,

$$C = \kappa C_0 \quad (26.14)$$

dir. Burada C_0 dielektriğin olmadığı durumda岐igadaki artı, dielektrik varken elektrik alanının azalmasından ve dolayısıyla plakalar arasındaki potansiyel farkının azalmasından kaynaklanır dielektrik sokulmadan önce yükleyici bataryanın davreden çıkarıldığı farzediliyor. E deki azalmaya, dielektrik madde içinde sıraya dizilen dipollerin oluşturduğu iç elektrik alan sebeplidir. Dipollerce oluşturulan bu iç-alan, uygulanan kondansatör plakaları arasındaki alana karşı koyar (zit yönlü) ve net elektrik alanın azalmasına yol açar.

Bir elektrik dipolinin elektrik dipol momenti p nin büyüklüğü

$$p = 2aq \quad (26.16)$$

olarak verilir. Elektrik dipol momenti vektörünün yönü negatif yükden pozitif yüke doğrudur.

Düzungün bir E elektrik alanı içindeki elektrik dipolü üzerine etkiyen tork (**döndürme momenti**)

$$\tau = p \times E \quad (26.18)$$

ile verilir.

Düzungün bir E elektrik alanındaki elektrik dipolinin **Potansiyel enerjisi**

$$U = -p \cdot E \quad (26.20)$$

dir.

Problem Çözümünde İpuçları

Kondansatör

- Birimleri seçerken dikkatli olunuz. Sığayı farad olarak hesaplarken uzunluğu metre ve ϵ_0 nin değerini SI birimlerinde kullandığınızdan emin olunuz. Birimlerin birbirlerine uygunluğunu kontrol ederken elektrik alan için birimlerin ya N/C veya V/m olarak kullanılabileceğini unutmayın.
- İki veya daha fazla kondansatör paralel bağlandığı zaman, her birinin üçleri arasındaki potansiyel farkı aynıdır. Her bir kondansatör üzerindeki yük, kondansatörlerin sığaları ile orantılıdır. Böylece, paralel bağlanma da sığaların doğrudan toplamı eşdeğer sığayı verir. Eşdeğer sığa, daima bağlanan her bir kondansatörün sığasından daha büyük olur.
- İki veya daha fazla kondansatör seri bağlandığı zaman yükleri aynı, fakat potansiyel farkları, bireysel kondansatörlerin potansiyellerinin toplamına eşit olur. Sığaların terslerinin toplamı, eşdeğer sığanın tersine eşittir. Bu bağlanmada her zaman eşdeğer sığanın en küçük bireysel sığadan *daha küçük* olacağına dikkat ediniz.
- Dielektrik, plakaları arasında hava bulunan kondansatörün sığasının bir κ (dielektrik sabit) çarpanı kadar artmasına sebep olur.
- Bir bataryaya kondansatörün bağlanması veya bataryadan kondansatörün çıkarılmasına ait problemlerde çok dikkatli olunuz. Kondansatör batarya dan çıkarıldıkten sonra veya bataryaya bağlı iken, kondansatörde bir değişme olup olmadığını dikkat etmek önemlidir. Kondansatör bataryaya bağlı olduğu sürece kondansatörün uçları arasındaki voltaj aynı kalır (ba-

tarya voltajına eşit); ve sığa değişse bile (levhalar arasına dielektrik konularak) yük sığa ile doğru orantılıdır. Öte yandan, kondansatörde herhangi bir değişiklik yapmadan önce, kondansatör bataryadan ayrılmışsa, kondansatör üzerindeki yük aynı kalır. Bu durumda sığa değiştirilirse, $\Delta V = Q/C$ ye göre levhalar arasındaki voltaj sığa ile ters orantılı olarak değişir.

SORULAR

1. Sizden küçük boyutlu ve büyük sığalı bir kondansatör tasarlamanız istenseydi, tasarıminızda hangi etkenler önemli olacaktı?
2. Bir kondansatörün plakaları bir bataryaya bağlıdır. Bağlantı telleri bataryadan ayrılsa, plakalar üzerindeki yük ne olur? Bağlantı telleri bataryadan ayrılarak birbirlerine bağlanırsa yük ne olur?
3. Farad çok büyük bir sığa birimidir. Plakalar arası uzaklık 1 metre ve arada hava olan, kare şeklinde, 1 farad sığalı kondansatörün bir kenarının uzunluğunu hesaplayınız.
4. Bir çift kondansatör paralel bağlı iken, buna eşdeğer başka bir çift seri bağlanmıştır. Aynı voltaj kaynağna bağlandıktan sonra bu kondansatör çiftinin hangisinin ucharına dokunmak tehlikeli olur? Açıklayınız.
5. C_1 , C_2 , C_3 , gibi üç farklı kondansatör verilirse, kondansatörlerin kaç çeşit farklı bağlanması elde edebilirsiniz.
6. Tek başına bir kondansatör kullanılması yerine, paralel bağlı iki eşdeğer kondansatöre, seri olarak başka bir paralel bağlı eşdeğer kondansatör çifti bağlanırsa nasıl bir avantaj sağlanabilir?
7. Burada geliştirdiğimiz kurallara göre kondansatörleri bağlayarak bir eşdeğer kondansatöre indirmek her zaman mümkün müdür? Cevabınızı açıklayınız.
8. Bir kondansatördeki net yük daima sıfır olduğuna göre kondansatör ne depolar?
9. Paralel plakalı kondansatörün plakaları üzerindeki yükler eşit ve zit olduğunda plakalar birbirlerini çekerler. Buna göre plaka aralığını artırmak için pozitif bir iş yapılacaktır. Bu sürede yapılan dış iş ne olur?
10. Bir ΔV potansiyeli altında bir Q yükünü hareket ettir-

mek için $W = Q\Delta V$ kadar iş yapılması gereklidir, yükü bir kondansatörde depolanan enerjinin $U = \frac{1}{2}Q\Delta V$ ile verilişinin nedenini açıklayın. Buradaki $\frac{1}{2}$ çarpanı nereden gelir?

11. Bir kondansatörün potansiyel farkı iki kat arttırılırsa, depolanan enerji kaç kat artar?
12. Bir yüksek voltaj kondansatöründe, voltaj uygulanıp kapatıldıktan sonra bile ucharına dokunmak niçin tehlikelidir? Voltaj kaynağından çıkartıldıktan sonra kondansatöre güvenle dokunmak için ne yapılmalıdır?
13. Paralel plakalı kondansatörün maksimum çalışma voltajını yükseltmek isterseniz, plakalar arası uzaklıği sabit tutarak bunu nasıl yapacağınızı anlatınız.
14. Plakalar arası hava dolu bir kondansatör yüklenildikten sonra güç kaynağından ayrılarak bir voltmetreye bağlanıyor. Kondansatörün plakaları arasında bir dielektrik konulduğunda voltajda okunan değerin nasıl ve niçin değiştiğini açıklayınız.
15. Polar molekül anlatımını kullanarak bir dielektriğin kondansatör içindeki elektrik alanı nasıl etkilediğini açıklayınız.
16. Fiziksel boyutu değişmediği halde, dielektriğin bir kondansatörün maksimum çalışma voltajını niçin artırdığını açıklayınız.
17. Dielektrik sabiti ile dielektrik şiddet arasındaki fark nedir?
18. Su molekülleri niçin sürekli polarizedir? Açıklayınız. Ne tür molekülün sürekli polarizasyonu olmaz?
19. Dielektrikle doldurulmuş bir kondansatör usulürlü, kondansatörün sığası nasıl değişecektir? (İsisal genleşmeyi ihmal ediniz ve dipoldeki yönelimlerin sıcaklığına bağlı olduğunu varsayıınız.)

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorla; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

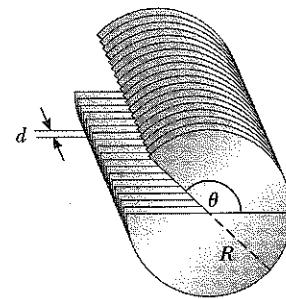
Kesim 26.1 Sığa'nın Tanımı

1. (a) $4,00\mu\text{F}$ kondansatör $12,0\text{ V}$ 'luk bataryaya bağlandığı zaman her bir plakada ne kadarlık yük bulunur? (b) Aynı kondansatör $1,50\text{ V}$ 'luk bataryaya bağlanırsa ne kadar yük depolar?

2. $10,0\text{ V}$ 'luk potansiyel farkına sahip iki iletken $+10,0\mu\text{C}$ ve $-10,0\mu\text{C}$ 'luk net yükler taşımaktadır. (a) Sistemin sığasını bulunuz ve (b) Her birinin üzerindeki yük $+100\mu\text{C}$ ve $-100\mu\text{C}$ değerine çıkartırsa, bu iki iletken arasındaki potansiyel farkı en olur?

Kesim 22.2 Sığa'nın Hesaplanması

3. 10,00 cm yarıçapında yalıtılmış, yüklü iletken bir kürenin merkezinden 21,0 cm uzaklıkta oluşturduğu elektrik alan $4,90 \times 10^4 \text{ N/C}$ dur. Bu kürenin; (a) Birim yüzeydeki yük yoğunluğu ne kadardır? (b) Sığası ne kadardır?
4. (a) Bir damla sıvının sığası $1,00 \text{ pF}$ ise, bunun yarıçapı ne kadardır? (b) Diğer bir dammanın yarıçapı $2,00 \text{ mm}$ ise sığası ne kadardır? (c) Küçük damların potansiyeli 100 volt ise, üzerindeki yük ne kadardır?
5. Çapları $0,40 \text{ m}$ ve $1,00 \text{ m}$ olan iki küresel iletken, çaplarına kıyasla birbirlerinden çok uzaktadır. Küreler iletken bir telle bağlanıyor ve $7,00 \mu\text{C}$ yük veriliyor. Toplam yük, küreler arasında ne şekilde paylaşılır? (teldeki yükü ihmâl ediniz.) (b) Referans potansiyeli, $r = \infty$ da $V = 0$ olarak alındığında, küre sisteminin potansiyeli ne olur?
6. Yer ile, yeryüzünden yaklaşık 800 m yukarıdaki bulut tabakası bir kondansatör olarak alınabilir. Bulut tabakasının alanının $1,00 \text{ km}^2$ olarak sıgasını hesaplayınız. Bulut ve yeryüzü arasındaki havanın kuru ve temiz olduğunu varsayıyorsunuz. Yeryüzü ve bulut arasında düzgün elektrik alan oluşturunaya kadar yüklerin yoğunlığını ve bu alan uzayın her tarafında $3,00 \times 10^6 \text{ N/C}$ büyülüğüne ulaştığında havanın dielektrikliğinin kirildiğini ve yıldırım şeraresi (atlaması) yaparak elektriği iletişimi farzedin. Bu durumda bulut en fazlı ne kadar yük taşırlı?
- WEB** 7. Aralarında hava bulunan bir kondansatör, iki paralel plakadan oluşmakta, her birinin alanı $7,60 \text{ cm}^2$ ve plakalar arasındaki açıklık $1,80 \text{ mm}$ dir. Bu plakalarara 20 V potansiyel farkı uygulanırsa; (a) plakalar arasındaki elektrik alanı, (b) yüzeyel yük yoğunluğunu, (c) sıgasını ve (d) her bir plakadaki yükü hesaplayınız.
8. 1-megabitlik bilgisayar hafıza chip'i çok sayıda 60 fF lik kondansatör içerir. Her bir kondansatör plakasının alanı $21 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ dir. Böylece bir kondansatörün plakaları arasındaki uzaklığını belirleyiniz. (Paralel plakalı kabul edin). Karakteristik atomik çap $10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$ dur. Plaka arasındaki uzaklığını nanometre cinsinden veriniz.
9. Bir paralel-plakalı kondansatörün plakalarına 150 V luk bir potansiyel farkı uygulandığı zaman, plakaların yüzeyce yük yoğunluğu 30 nC/cm^2 lik oluyor. Levhalar arasındaki mesafe ne kadardır?
10. Devre ayarında (tuning) kullanılan bir değişken havası ortaklı kondansatör, N tane yarı yarıme plakadan oluşmuştur. Plakaların her birinin yarıçapı R ve birbiri arasındaki uzaklık d dir. Şekil P26.10 da görüldüğü gibi, birinciye eşdeğer olan ikinci plaka serisi, birincinin plakalarının yarı uzaklısına kadar döndürülüyor. İkinci plaka serisi bir tam dönme hareketi yapabiliyor. Maksimum sığa $\theta_0 = 0$ da olduğuna göre, θ dönme açısının fonksiyonu olarak sığayı elde ediniz.
- WEB** 11. 50 m uzunluğundaki koaksiyel kablonun içindeki iletkenin çapı $2,58 \text{ mm}$ ve üzerindeki yük $8,1 \mu\text{C}$



Şekil P26.10

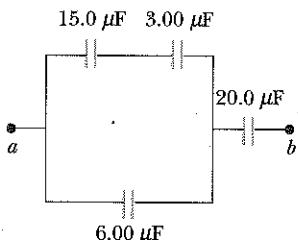
dur. Bunu saran iletkenin iç çapı $7,27 \text{ mm}$ ve üzerindeki yük $-8,1 \mu\text{C}$ dur. (a) Bu kablonun sığası ne kadardır? (b) İki iletken arasındaki potansiyel farkı nedir? İletkenler arasındaki bölgede hava bulunduğu kabul ediniz.

12. $20,0 \mu\text{F}$ lik küresel bir kondansatör, birinin yarıçapı diğerinden iki katı olan iki matematik küreden oluşmuştur. Kureler arasındaki bölge boşluk ise, bu bölgenin hacmini bulunuz.
13. 350 mg kütleyeli küçük bir cisim 30 nC luk bir yük taşıyor ve paralel plakalı kondansatörün düşey plakaları arasına bir iplikle bağlanarak sarkıtılıyor. Plakalar arasındaki uzaklık 4 cm dir. İplik, düşeye 15° lik bir açı yaparsa, levhalar arasındaki potansiyel farkı ne olur?
14. Üzerinde q yükü bulunan düşey, m kütleyeli küçük bir cisim paralel plakalı kondansatörün plakaları arasındaki açıklığa bir ipliğe bağlı olarak sarkıtılıyor. Plakalar arasındaki uzaklık d dir. İplik düşeye θ açısı yaparsa, levhalar arasındaki potansiyel farkı ne olur?
15. İçi hava dolu küresel kondansatör, iç kabuğun yarıçapı 7 cm , dış kabuğun yarıçapı 14 cm olacak şekilde yapılmıştır. (a) bu aygıtın sıgasını hesaplayınız. (b) Her bir iletken üzerindeki $4 \mu\text{C}$ luk yük, kureler arasında ne kadarlık bir potansiyel farkı meydana getirir?
16. Yerin sıgasını hesaplayınız. (İpucu: "Küresel kondansatörün" dış iletkenini, sonsuz uzaklıkta, $V = 0$ olan bir yerde küresel bir iletken kabul ediniz.)

Kesim 26.3 Kondansatörlerin Bağlanması

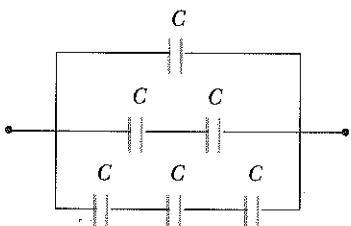
17. $C_1 = 5,00 \mu\text{F}$ ve $C_2 = 12,0 \mu\text{F}$ sığalı iki kondansatör paralel bağlı iken $9,00 \text{ V}$ luk bataryaya bağlanmıştır. (a) Bu bağlanmada eşdeğer sığa ne kadardır? (b) Her bir kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı, (c) her bir kondansatörün depolandığı yük ne kadardır?
18. Problem 17 deki iki kondansatör şimdi seri bağlandıktan sonra $9,00 \text{ V}$ luk bataryanın uçlarına bağlanıyor. (a) Bu bağlanmada eşdeğer sığanın değerini, (b) her bir kondansatörün uçları arasındaki voltajı, (c) her bir kondansatörün üzerindeki yükü bulunuz?

19. İki kondansatör paralel bağlandığı zaman eşdeğer siğaları $9,00 \mu\text{F}$, seri bağlandığı zaman eşdeğer siğası $2 \mu\text{F}$ oluyor. Her bir kondansatörün siğası nedir?
20. İki kondansatör paralel bağlandığı zaman eşdeğer siğası C_p , seri bağlandığı zaman eşdeğer siğası C_s oluyor. Her bir kondansatörün siğası ne kadardır?
21. Dört kondansatör Şekil 26.21 de görüldüğü gibi bağlanmıştır (a) a ve b noktaları arasındaki eşdeğer siğayı bulunuz. (b) $V_{ab} = 15 \text{ V}$ ise, her bir kondansatör üzerindeki yükü bulunuz.



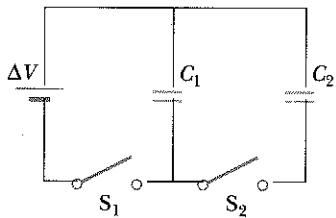
Şekil P26.21

22. Şekil 26.22 de gösterilen kurulumun etkin siğasını hesaplayınız. Kondansatörler özdeş ve aynı C siğası na sahiptir.



Şekil P26.22

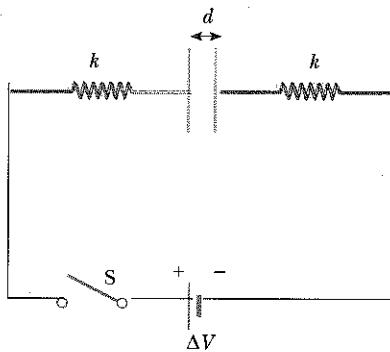
23. Şekil 26.23 te gösterilen devreyi göz önüne alınız. Burada $C_1 = 6 \mu\text{F}$ $C_2 = 3 \mu\text{F}$ ve $\Delta V = 20 \text{ V}$ dur. S_1 anahtarları kapatılarak ilk olarak C_1 kondansatörü yükleniyor. Sonra S_1 anahtarları açılır ve yüklenmiş kondansatör S_2 anahtarları kapatılarak yüksüz kondansatöre bağlanıyor. C_1 kondansatörünün başlangıçta kazandığı yükü ve kondansatörlerin her birindeki son yükü hesaplayınız.



Şekil P26.23

24. Özel olarak planlanıp hazırlanan bir zamanlama devresi, A ve B gibi iki nokta arasında $32,0 \mu\text{F}$ siğaya sahip asansör kapısının kapanmasında bir geçikme yaptıracaktır. (a) Böyle bir devre yapılrken, bu iki nokta arasına $34,8 \mu\text{F}$ lik ucuz kondansatörler bulunarak yerleştirilmiştir. Gereken özelliği karşılaması için bu iki nokta arasına bir tane ilave kondansatör yerleştirilebilir. $34,8 \mu\text{F}$ lik kondansatör seri mi, yoksa paralel mi bağlanmalıdır? Siğası ne olmalıdır? (b) Sonraki devre A ve B arasında $29,8 \mu\text{F}$ kondansatör ile montaj hattını ucuzlatıyor. İstenilen özelliği karşılaması için devreye ne kadarlık ek bir kondansatör seri veya paralel yerleştirilmelidir?

25. Şekil P26.25 deki devrede, iki özdeş paralel metalik plaka, özdeş metalik yayla 100 V 'lik baryataya bağlanmıştır. Anahtar açık durumda, plakalar yüksüz, aralarındaki açılık $d = 8,00 \text{ mm}$ ve siğası $2,00 \mu\text{F}$ dır. Anahtar kapatıldığında, plakalar arasındaki uzaklık $0,500$ kat azaltılıyor. (a) Her bir plaka ne kadarlık yük toplar? (b) her bir yayın yay sabiti nedir? (İpucu: Problem 35 deki sonuçları kullanınız.)



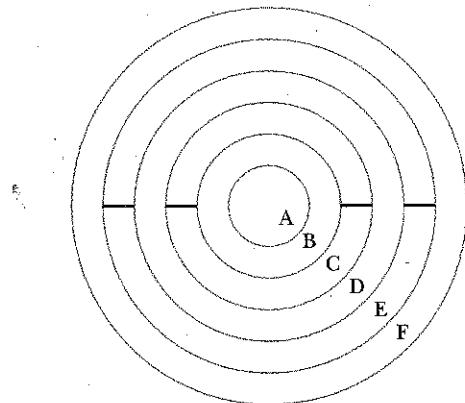
Şekil P26.25

26. Şekil P26.26da, A, B, C, D, E ve F ile işaretlenmiş altı adet aynı merkezli R , $2R$, $3R$, $4R$, $5R$ ve $6R$ yarıçaplı, iletken käreler gösterilmektedir. B ile C ve D ile E iletken tellerle birbirine bağlanmıştır. Bu sistemin eşdeğer siğasını bulunuz.

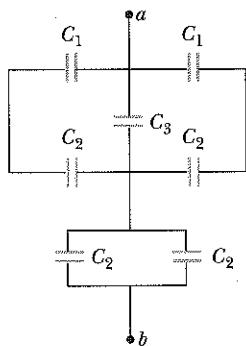
27. Bir grup özdeş kondansatör ilk önce seri, sonra da paralel bağlanmıştır. Paralel bağlı kondansatörlerin siğası, seri bağlı kondansatörlerin siğasından 100 kat daha fazla olmuştur. Grupta kaç tane kondansatör vardır?

28. Şekil 26.31 deki gibi bağlanan bir grup kondansatör için, a ve b noktaları arasındaki eşdeğer siğayı bulunuz. $C_1 = 5 \mu\text{F}$, $C_2 = 10 \mu\text{F}$ ve $C_3 = 2 \mu\text{F}$ dir.

29. Bir önceki soruda verilen devrede a ve b noktaları arasındaki potansiyel farkı 60 V ise C_3 kondansatörü üzerinde biriken yük ne kadardır?

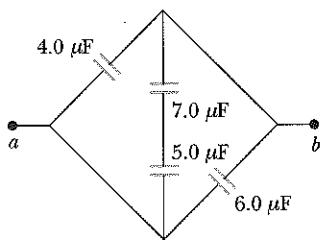


Şekil P26.26



Şekil P26.28 Problemler 28 ve 29

30. Şekil P26.30 de gösterilen kondansatör sisteminde *a* ve *b* noktaları arasındaki eşdeğer sığayı bulunuz.



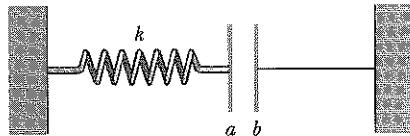
Şekil P26.30

Kesim 26.4 Yüklü Kondansatörde Depolanan Enerji

31. (a) $3,00 \mu\text{F}$ lik kondansatör $12,0 \text{ V}$ luk bataryaya bağlanıyor. Kondansatörde ne kadarlık bir enerji depolanmıştır? (b) Kondansatör, $6,00 \text{ V}$ luk bataryaya bağlanırsa iddi ne kadarlık bir enerji depolanır di?
32. $C_1 = 25 \mu\text{F}$ ve $C_2 = 5 \mu\text{F}$ lik iki kondansatör paralel bağlanarak 100 V luk güç kaynağından yüklenmiştir.

(a) Devre grafiğini çiziniz ve bu iki kondansatörde depolanan toplam enerjiyi hesaplayınız. (b) Bu iki kondansatörün seri bağlanması durumunda (a) da ki kadar enerji depolanması için kondansatörün uçları arasında ne kadarlık bir potansiyel farkı gereklidir?

33. Paralel plakalı bir kondansatör bir bataryada yüklenmekten sonra bataryadan ayrılmıyor. Plakaları arasındaki açıklık iki katına çıkarılırsa depolanan enerji, deki değişme (artma veya azalma) oranı nedir?
34. Belirli bir bölge içinde $E = 3000 \text{ V/m}$ lik düzgün bir alan bulunmaktadır. Uzayın ne kadarlık bir hacmi $1,00 \times 10^{-7} \text{ J}$ e eşit bir enerji içerir? Cevapları metre-küp ve litre cinsinden veriniz.
35. Bir paralel plakalı kondansatörün üzerindeki yük Q ve plaka alanı *A* dir. Her bir plakanın ötekine uyguladığı kuvvetin $F = Q^2/2\epsilon_0 A$ olduğunu gösteriniz. (İpucu: Keyfi bir plaka x aralığı için $C = \epsilon_0 A/x$ alın, sonra, iki yüklü levhayı ayırmak için yapılması gereken $W = \int F dx$ işini bulun?)
36. Hava ortamında, bir paralel plakalı kondansatörün *a* plakası, kuvvet sabiti *k* olan bir yaya, *b* plakası da sabit bir yere bağlıdır. Bunun sukunetteki masada üstten görünüşü Şekil P26.36 gösterilmiştir. Eğer $+Q$ yükü *a* plakasına ve $-Q$ yükü *b* plakasına yüklenirse yay ne kadar uzar?

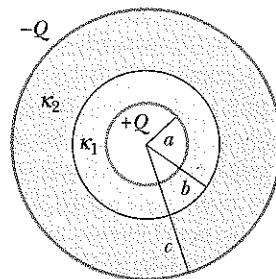


Şekil P26.36

37. Tarama Problemi. Belirli bir firtına bulutu, yerdeki ağaçca göre, $1,00 \times 10^8 \text{ V}$ 'luk potansiyel farkına sahiptir. Şimşek çakışı sırasında, bu potansiyel farkına $50,0 \text{ C}$ luk yük nakledilirse ve enerjinin $\%1,00$ ağaç tarafından soğrulursa, başlangıçta $30,0 \text{ }^\circ\text{C}$ da bulunan sudan (ağaçtaki özsü) ne kadar kaynarak uçar? Suyun özgül ısısı $4,186 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$, kaynama noktası $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ve buharlaşma ısısı $2,26 \times 10^6 \text{ J/kg}$ dir.
38. Yarıçapı *R* ve yükü *Q* olan iletken bir kürenin çevresi boşluk ise, enerjisinin $U = kQ^2/2R$ olduğunu gösteriniz.
39. Einstein, meşhur $E = mc^2$ bağıntısında kütlenin enerji ile ilişkili olduğunu söylemiştir. *R* yarıçaplı bir kürenin yüzeyi üzerinde yüklerin düzgün olarak dağıldığını varsayararak elektronun yarıçapını tahmin ediniz. Ayrıca, elektronun kütle-enerji eşdeğerini, sonsuz ve *R* arasındaki elektrik alanda (sifirdan farklı) depolanan toplam enerjiye eşit alınız. (Problem 38 bakınız. DeneySEL olarak, bir elektron bir noktalı parçacık olarak gözükür. Ashında, elektrik alanın sardığı elektronlar bizim burada incelediğimiz klasik elektrodinamik ile değil, kuantum elektrodinamikle analizlilik).

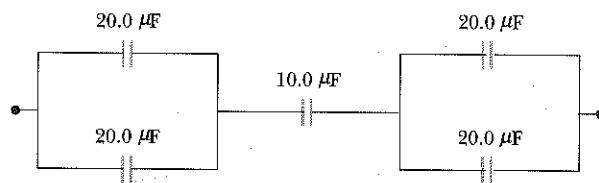
Kesim 26.5 Dielektrikli Kondansatörler

40. Her bir plakanın alanı $5,00\text{cm}^2$ ve plakalar arasında açıklık 2,00 mm olan paralel plakalı kondansatörde, bakalit'in bir dielektrik olarak kullanılması durumunda sigasını bulunuz.
41. Yalıtkan kalınlığı 0,04 mm ve levha yüzeyi $1,75\text{ cm}^2$ olan teflon doldurulmuş paralel plakalı kondansatörün (a) sigasını ve (b) uygulanacak maksimum voltajı tayin ediniz (dielektrik özellik için tablo 26.1 e bakınız).
42. (a) her bir plakasının alanı $5,00\text{cm}^2$ olan bir kondansatöre ne kadarlık bir yük verilmeli ki plakalar arasında kivilcim atlaması olmasın? (Plakalar arasında, hava yerine polystrene bulunursa maksimum yük ne olur?
43. Bir ticari kondansatör Şekil 26.15a da görüldüğü gibi yapılmıştır. Bu özel kondansatör, iki aliminyum tabakanın iki parafinli kağıt tabaka ile ayrılarak bir-biri üzerine konup "yuvarlanması" ile oluşur. Metal yaprak ve kağıt tabakanın eni 7 cm dir. Metal yaprakın kalınlığı 0,004 mm, dielektrik sabiti 3,7 olan kağıt tabakanın kalınlığı 0,025 mm dir. $9,5 \times 10^{-8}\text{ F}$ lik bir kondansatör elde etmek istenirse, tabakaların uzunluğu ne kadar olmalıdır? (paralel-plaka formülü kullanınız.)
44. Süpermarketler rulo halinde aliminyum ince tabaka (foil), plastik örtü ve yağlı kağıt satmaktadır. Bu maddelerle bir kondansatörün nasıl yapılacağını anlatınız. Onun sigasını ve kivilcim atlama voltajının büyüklik mertebesini sayısal olarak tahmin ediniz.
45. Plakaları arasında hava bulunan bir kondansatör $12,0\text{ V}$ 'luk potansiyel farkına bağlıyor ve $48,0\text{ }\mu\text{C}$ yük depo ediyor. Sonra da yüklü durumda kaynatırılarak çıkarılıyor. (a) Kondansatörün sigasını bulunuz. (b) Bir küçük teflon parçası kondansatörün plakaları arasında sokuluyor. Kondansatörün yeni sigasını bulunuz. (c) Yeni kondansatör üzerindeki yükü ve voltajı bulunuz.
46. Aralarında hava olan bir paralel plakalı kondansatörün plaka alanı $25,0\text{cm}^2$ ve plakalar arasındaki açıklık 1,50 mm dir. Plakalar 250 V luk potansiyel farkında yükleniyor ve kaynaktan çıkarılıyor. Sonra da kondansatör damıtık suyun içine batırılıyor. (a) Suya batırmadan önce ve sonra plakalar üzerindeki yükü, (b) batırıldıktan sonraki siga ve voltajı, (c) kondansatörün enerjisindeki değişimyi bulunuz. Sivinin iletkenliğini önemsemeyiniz.
47. İletken bir küresel kabuğun iç yarıçapı a ve dış yarıçapı c dir. Bu iki yüzey arasındaki bölge dielektrik maddesi ile dolduruluyor. a ile b arasındaki dielektriğin kat sayısı κ_1 ve b ile c arasındaki dielektriğin katsayı κ_2 dir (Şekil P26.47). Bu sistemin sigasını bulunuz.
48. Çok ince titanyum oksit ($\kappa = 173$) tabakanın alanı 1 cm^2 ve kalınlığı 0,1 mm dir. Bu tabakanın yüzlerine alüminyum buharlaştırılarak bir paralel plakalı kondansatör oluşturuluyor. (a) Sigasını hesaplayınız. (b) Bu kondansatör 12 V luk bir batarya ile yükleniği zaman, her bir plakaya verilen yükün büyülüğü ne kadardır? (c) (b) deki durum için serbest ve induklınen yüzeyce yük yoğunlukları ne kadardır? (d) E elektrik alanı ne kadardır?



Şekil P26.47

49. Şekil P26.49 da gösterilen karışık bağlamada her bir kondansatörün kivilcim atma (bozulma) voltajı $15,0\text{ V}$ dur. Tüm şeklärin kivilcim atma voltajı ne kadardır?



Şekil P26.49

(Seçmeli)

Kesim 26.6 Bir Elektrik Alan İçindeki Elektrik Dipolü

50. Küçük bir katı cisim pozitif ve negatif $3,50\text{ nC}$ yükler taşımaktadır. Bunlardan pozitif yük ($-1,20\text{ mm}$, $1,10\text{mm}$), negatif yük ($1,40\text{ mm}$, $-1,30\text{ mm}$) noktalarda bulunmaktadır. (a) Bu cisim elektrik dipol momentini bulunuz. Cisim $\mathbf{E} = 7\ 800\mathbf{i} - 4\ 900\mathbf{j}$ ile verilen bir elektrik alan içine konuluyor. (b) Cisme etki eden torku bulunuz. (c) Bu yönelimdeki cisim potansiyel enerjisini bulunuz. (d) Cismin yenelimi değişirse, maksimum ve minimum potansiyel enerjileri arasındaki farkı bulunuz.
51. Elektrik dipol momenti \mathbf{p} olan küçük bir cisim, düzgün olmayan $\mathbf{E} = E(x)\mathbf{i}$ gibi bir elektrik alan içinde bulunmaktadır. Yani, alan x doğrultusunda ve büyülü x koordinatına bağlıdır. Dipol moment ile x doğrultusu arasındaki açı θ olsun. (a) Dipole, elektrik alanın artışı yönünde net bir $F = p(dE/dx) \cos\theta$ kuvvetinin uygulanacağını ispatlayınız. (b) Alan, orijinde bulunan bir küresel balon tarafından oluşturulursun. Balonun yarıçapı $15,0\text{ cm}$ ve taşıdığı yük $2,00\text{ }\mu\text{C}$ dir. $(16\text{ cm}, 0, 0)$ noktasındaki dE/dx değerini elde ediniz. Bu noktada bir su damlasının $(6,30\text{i})\text{nC}$ luk induklınenmiş dipol momentine sahip olduğunu varsayıarak, üzerinde etki eden kuvveti bulunuz.

(Seçmeli)

Kesim 26.7 Dielektriğin Atomik Tanımı

52. Geiger-Muller sayacı denilen radyasyon dedektörü, içi boş, kapalı bir iletken silindir ile bunun ekseni

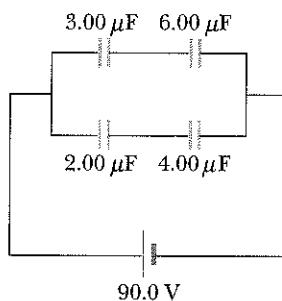
- boyunca uzanan ince bir iletken telden oluşmaktadır. Silindirin iç çapının $2,5\text{ cm}$ ve eksen boyunca uzanan telin çapının da $0,2\text{ mm}$ olduğunu kabul ediniz. Silindir ve eksendeki tel arasındaki gazın dielektrik şiddeti $1,2 \times 10^6\text{ V/m}$ ise, gaz içinde elektriksel atlama olmadan önce silindir ve tel arasına uygunlanacak olan maksimum voltajı, V_{\max} , hesaplayınız.
53. Gauss yasasının genel ifadesi, bir yükün, boşlukta ve bir madde içinde elektrik alanı nasıl oluşturacağını gösterir, yani,

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon}$$

dir. Burada $\epsilon = \kappa\epsilon_0$ maddenin dielektrik geçirgenlidir. (a) Bir Q yükü, dielektrikle çevrilmiş bir A yüzeyli levhanın bütün yüzeyine dağılmıştır. Levhanın, dışındaki bir noktada oluşturduğu düzgün bir elektrik alanının $E = Q/2A\epsilon$ değerinde olduğunu gösteriniz. (b) Zıt işaretli eşit büyüklükte Q yükleri taşıyan A yüzeyli iki büyük levha, küçük bir d uzaklığı ile ayrılmıştır. Levhaların arasında oluşan düzgün elektrik alanın $E = Q/A\epsilon$ değerinde olduğunu gösteriniz. (c) Negatif plakanın sıfır potansiyelde olduğunu varsayıp, pozitif plakanın potansiyelinin $Qd/A\epsilon$ olduğunu gösteriniz. (d) Bu plaka çiftinin sigasının $A\epsilon/d = \kappa A\epsilon_0/d$ olduğunu gösteriniz.

EK PROBLEMLER

54. Şekil 26.54 te gösterilen kondansatör sistemi için, (a) sistemin esdeğer sigasını, (b) her bir kondansatörün uçlarındaki potansiyeli, (c) her bir kondansatör üzerindeki yükü, (d) sistemde biriken toplam enerjiyi bulunuz.



Şekil P26.54

55. Merkezleri birbirinden D kadar ayrı olan d yarıçaplı, zıt yüklü, uzun ve paralel iki teli göz önüne alınır. Her bir telin yüzeyi üzerinde düzgün yük dağılımı bulunduğuunu varsayıp, bu iki tel çiftinin birim uzunluk başına sigasının

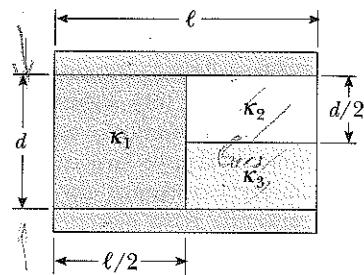
$$\frac{C}{\ell} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D-d}{d}\right)}$$

olduğunu gösteriniz.

56. 2 nF lik paralel plakalı kondansatör, başlangıçta $\Delta V = 100\text{ V}$ luk potansiyel farkında yüklenmiş ve sonra yahutlmıştır. Plakalar arasındaki dielektrik maddesi mika ($\kappa = 5$) dir. (a) Mika tabakayı plakalar arasında çıkarmak için ne kadarlık iş gereklidir? (b) Mika çıkarıldıkten sonra kondansatörün uçları arasında ki potansiyel farkı ne olur?

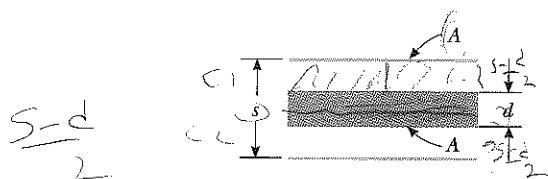
57. Paralel-plakalı bir kondansatör dielektrik sabiti 3 ve dielektrik şiddeti $2 \times 10^8\text{ V/m}$ olan dielektrik bir madde kullanarak yapılmıştır. İstenen sığa $0,25\text{ }\mu\text{F}$ dir ve kondansatör 4000 V luk maksimum potansiyel farkına dayanabilmelidir? Kondansatör plakalarının minimum yüzey alanını bulun.

58. Bir paralel-plakalı kondansatör Şekil P26.58 de gösterildiği gibi üç farklı dielektrik maddeler kullanılarak yapılmıştır. $\ell \gg d$ olduğunu kabul ederek; (a) Plaka yüzeyi A , ve $d, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$, terimleri cinsinden bu aytılışın sıgası için bir ifade bulunuz. (b) $A = 1\text{ cm}^2, d = 2\text{ mm}, \kappa_1 = 4,9, \kappa_2 = 5,6$ ve $\kappa_3 = 2,1$ alarak kondansatörün sıgasını hesaplayın.



Şekil P26.58

59. A alanlı ve d kalınlıkta iletken bir dilim Şekil P26.59 da görüldüğü gibi, A alanlı s aralıklı paralel-plakalı kondansatörün levhaları arasına yerleştiriliyor. Sistemin sıgasının değeri ne kadardır?



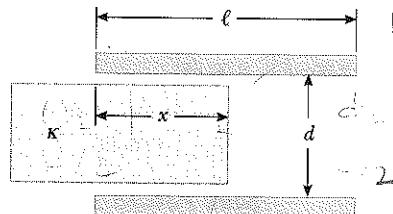
Şekil P26.59

60. (a) Yarıçapları a ve b olan iki kürenin merkezleri arasındaki uzaklık d dir. a ve b ye göre d çok büyük ise, bu sistemin sıgasının

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{2}{d}}$$

- olduğunu gösteriniz. (İpucu: Küreler arasındaki uzaklık çok büyük farzedildiğinden, bir küre üzerindeki yükün, diğer küre üzerindeki yük dağılımını bozmadığı kabul edilir. Böylece, her bir kürenin potansiyeli $V = k_e Q/r$ ve küredeki toplam potansiyel de, her bir kürede oluşan potansiyellerin toplamıdır) (b) d son-suza giderse, yukarıdaki sonuç, seri haldeki iki yalıtlımiş küre ifadesine indirgeneceğini gösteriniz.
61. Hava ortamında paralel plakalı bir kondansatör bir baryanın uçlarına bağlandığında q_0 yükünü (her bir plaka) kazanıyor. Baryya bağlı iken, plakalar arasına açlığını tamamen dolduran bir dielektrik dilimi konuluyor. Bu durumda her bir plaka üzerinde ϵ_0 bir q yükü depolanır. Bu dilimin dielektrik katsayısı nedir?

62. Bir kondansatör kenar uzunluğu ℓ ve plaka aralığı d olan iki kare plakadan yapılmıştır. Şekil P26.62 deki gibi Dielektrik sabiti κ olan bir madde kondansatör içine bir x uzaklığında yerleştirilmiştir. (a) Aygıtın eşdeğer siğasını bulunuz. (b) Potansiyel farkı ΔV ise, kondansatörde depolanan enerjiyi bulunuz. (c) ΔV potansiyel farkının sabit olduğunu varsayıarak, dielektrik üzerine etki eden kuvvetin yön ve büyüklüğünü bulunuz. Sürtünme ve kenar etkilerini ihmal edin. (d) $\ell = 5 \text{ cm}$, $\Delta V = 2000 \text{ V}$, $d = 2 \text{ mm}$ ve camın (dielektrik sabiti $\kappa = 4,50$) kullanarak kuvvet için sayısal bir değer elde ediniz. (İpucu: Sistemi paralel bağlı iki kondansatör olarak düşününüz.)



Şekil P26.62 Problem 62 ve 63

63. Bir kondansatör, Şekil P26.63 deki gibi, ℓ uzunluklu d açıklıklı iki kare plakadan yapılmıştır. d , ℓ den çok küçük olduğu fizediliyor. Plakalar $-Q$ ve $+Q$ yüklerini taşımaktadır. Eni ℓ , boyu ℓ ve kalınlığı d den çok az küçük olan bir metal blok, bu kondansatör içine x uzaklığ kadar sokuluyor. Bloğun sokulması sırasında plakalar üzerindeki yükler değişmektedir. Durgun durumda, metal, içine sızmak isteyen elektrik alanını örter. Buna göre metal, dielektrik katsayısi $\kappa \rightarrow \infty$ olan, kusursuz bir dielektrik gibi düşünürlür. (a) Depolanan enerjiyi x fonksiyonu olarak bulunuz. (b) Metal blok üzerine etki eden kuvvetin yönünü ve büyüklüğünü bulunuz. (c) Bloğun ilerleyen ve yüzünün alanı esasen ℓd ye eşittir. Blok üzerinde etkiyen kuvvetin bu yüzey üzerine etki ettiğini düşünerek, yüzey üzerindeki zoru (birim yüzeydeki kuvveti) bulunuz. (d) Karşılaştırma yapmak için, kondansatör plakaları arasındaki elektrik alanındaki enerji yoğunluğunu Q_0 , ℓ , d ve ϵ terimleri ile ifade ediniz.

64. Bir otomobilin enerji kaynağı göz önüne alındığında, kaynağın birim kütledeki enerjisi önemli bir parametre olur. Aşağıdaki verileri kullanarak, Benzin, Kurşun-asit bataryası ve kondansatörün birim kütle başına enerjilerini (J/Kg) olarak karşılaştırınız. Bölüm 27 de tanımlanacak olan A amper, SI sistemindeki elektrik akımı birimidir. $1\text{A} = 1\text{C/S}$

Benzin: $126\,000 \text{ Btu/gal}$; yoğunluk = 670 kg/m^3

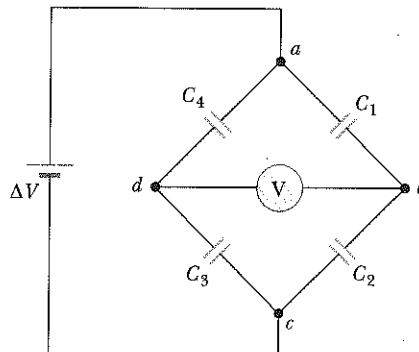
Kurşun-asit Batarya: 12 V ; 100 A . saat; kütle = 16 kg

Kondansatör: Tam yüklü durumda potansiyel farkı 12 V ; sığası = $0,1 \text{ F}$; kütlesi $0,1 \text{ Kg}$.

65. Sığası bilinmeyen yalıtlı bir kondansatör 100 V luk potansiyel farkında yüklenmiştir? Yüklü kondansatör daha sonra, $10 \mu\text{F}$ lik yüksüz bir kondansatörle paralel bağlandığında sistemin uçları arasındaki voltaj 30 V oluyor. Bilinmeyen sığayı hesaplayınız.

66. Belirli bir elektronik devre, $1,2 \text{ pF}$ sığa ve kesilme potansiyeli 1000 V olan bir kondansatör gerektiriyor. Elimizde her biri $6 \mu\text{F}$ lik, 200 V kesilme potansiyeline sahip kondansatörler varsa, istenen bu devreyi nasıl oluşturursunuz?

67. Şekil P26.67 de sisteme bir ΔV potansiyeli uygulanıyor. C_1 kondansatörü öyle ayarlanıyor ki b ve d noktaları arasındaki elektrostatik voltmetre sıfır okuyabilsin. Bu "denge" $C_1 = 4 \mu\text{F}$ iken oluşuyor. $C_3 = 9 \mu\text{F}$ ve $C_4 = 12 \mu\text{F}$ ise, C_2 nin değerini hesaplayın.



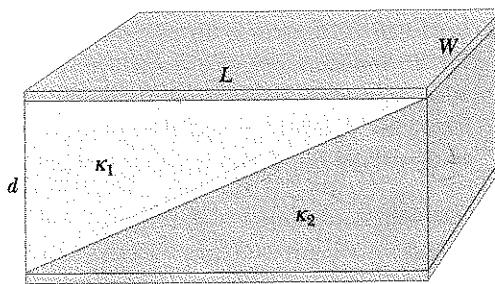
Şekil P26.67

68. Paralel bağlı bir grup kondansatörü önce yükleyip sonra bir anahtar düzeni ile birbirlerinden ve yükleyici kaynaktan ayrdıktan sonra yeniden seri bağlıarak büyük potansiyel farkları elde etmek mümkündür. Böylece, yüklü kondansatör grubu seri bağlı durumda boşalır. 800 V yükleyici kaynak ve herbiri $500 \mu\text{F}$ lik on tane kondansatör kullanarak, bu şekilde ne kadarlık maksimum potansiyel farkı elde edilebilir?

69. Plaka açıklığı d olan paralel-plakalı bir kondansatör ΔV_0 potansiyel farkında yükleniyor. Kondansatörün

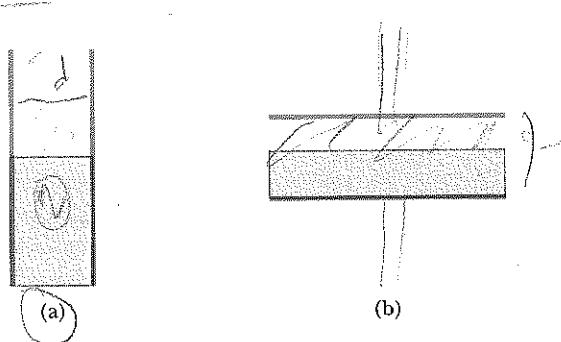
plakalarının bатarya bağlı iken, plakalar arasında dielektrik sabiti κ ve kalınlığı d olan bir dielektrik dilim yerleştiriliyor. (a) Dielektrik varken kondansatörde depolanan enerjinin, dielektrik yokken depolanan enerjiye oranının $U/U_0 = \kappa$ olduğunu gösteriniz. Depolanan enerjideki bu artışın fiziksel açıkmasını yapın. (b) Kondansatör üzerindeki yük ne olmuştur? (Bu durum, kondansatöre dielektrik konulmadan önce kondansatörün bатaryadan ayrılmaması durumuna ait Örnek 26.7 ye benzemediğine dikkat ediniz.)

70. A yüzeyi ve plakalar arasındaki açıklık d olan paralel plakalı bir kondansatörün plakalar arasındaki bölge, Şekil P26.70 deki gibi, iki dielektrik madde ile doldurulmuştur. $d \ll L$ ve $d \ll W$ olduğunu kabul ediniz. (a) Sığayı bulun ve (b) $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$ olduğunda sonucunuzun kondansatörünüzün tek bir dielektrik içerdigindeki $C = \kappa\epsilon_0 A/d$ ile aynı olacağını gösteriniz.



Şekil P26.70

71. Paralel plakalı düşey bir kondansatör, plakalarının yarısına kadar dielektrik katsayı 2.00 olan bir dielektrik madde ile dolduruluyor (Şekil P26.71a). Bu kondansatör yatay duruma getirildiği zaman (Şekil P26.71b), düşey durumdaki sığasına eşit sığaya sahip olması için, aynı dielektrik madde ne oranda doldurulmalıdır?

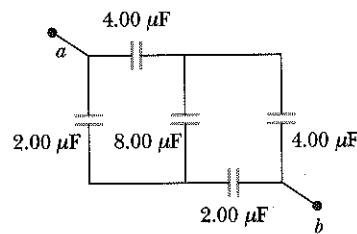


Şekil P26.71

72. $C_1 = 6 \mu\text{F}$ ve $C_2 = 2 \mu\text{F}$ lik kondansatörler 250 V luk bатaryaya paralel bağlanarak yükleniyor. Sonra kon-

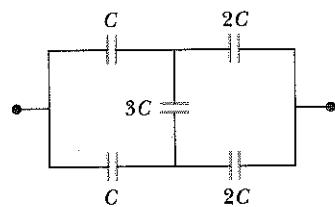
dansatörler birbirlerinden ve bатaryadan ayrılmıyor. Daha sonra, kondansatörlerden birinin pozitif plakaşı ötekinin negatif plakasına bağlanıyor. Her bir kondansatör üzerindeki son yükü hesaplayınız.

73. Bir koaksiel kablonun içindeki iletkeninin yarıçapı $0,8$ mm, dışındaki iletkenin iç yarıçapı $3,0$ mm dir. iletkenler arasında dielektrik sabiti $2,3$ ve dielektrik şiddeti 18×10^6 V/m olan polietilen dolduruluyor. Bu kablonun dayanabileceği maksimum potansiyel farkı ne kadardır?
74. Büyüük bir fabrikada üretilmek üzere en uygun koaksiel kablo tasarımları yapmanız isteniyor. b yarıçaplı dış iletkenin maksimum potansiyel yeteneğine erişebilmesi için içteki iletkenin yarıçapının $a = b/e$ ile verileceğini gösteriniz. Burada e doğal logaritmının tabanıdır.
75. Şekil P26.75 de a ve b noktaları arasındaki esdeger sığayı hesaplayınız. Bunun seri ya da paralel bağlanma olmadığını dikkat ediniz. (İpucu: a ve b noktaları arasındaki potansiyel farkının ΔV olduğunu varsayıyın. Birbirlerine bağlı kondansatör plakaları için yük korunumunu kullanın, a ve b ye gidilen çeşitli yollar için sığa ve yükler yardımını ile ΔV_{ab} nin ifadelerini yazınız.)



Şekil P26.75

76. Şekil 26.76 da gösterilen bağlanmaya ait etkin sığa bulun. (İpucu: Şeklin simetrisinden yararlanın)



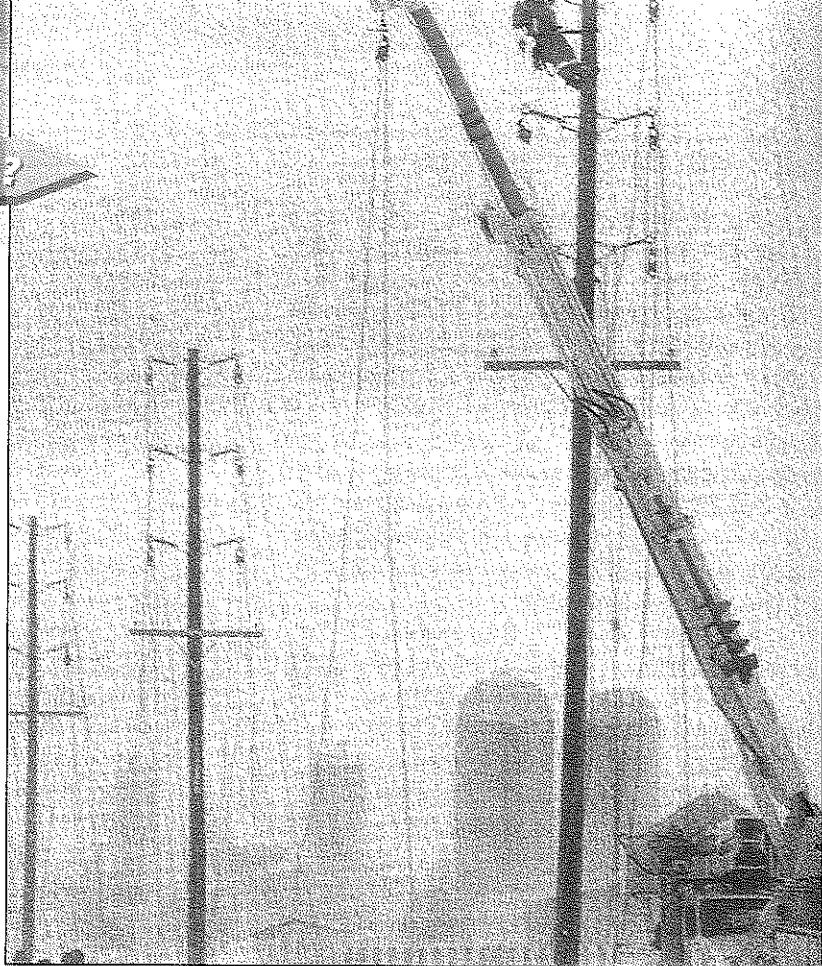
Şekil P26.76

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 26.1** (a) Artar, çünkü plaka açılığı azalır. Siğsa, yalnızca bir kondansatörün nasıl yapıldığına bağlıdır, dış devreye bağlı değildir.
- 26.2** Sıfırdır. Kondansatör ile aynı merkezli, yüzey dışında küresel gauss yüzeyi oluşturulduğunda yüzeyin içindeki net yük sıfırdır. Bu düzene Gauss yasası uygulandığında, kondansatörün dışındaki bir noktada $E = 0$ olarak buluruz.
- 26.3** Verilen bir voltajda kondansatörde depolanan enerji $U = C(\Delta V)^2/2$, C ile orantılıdır. Eşdeğer siğanın (dolayısı ile enerjinin) maksimum olması istendiğinden, bunu yapmak için üç kondansatör paralel bağlanmalıdır, ani siğalar toplanmalıdır.
- 26.4** (a) C azalır (Eşitlik 26.3). (b) Q aynı kalır, çünkü yük gideceği bir yer yoktur. (c) E sabit kalır (Eşitlik 24.8 ve onu takip eden paragraflara bakınız). (d) ΔV aratar, çünkü $\Delta V = Q/C$ de Q sabittir (b şıkları): ve C azalır (a şıkları). (e) Kondansatörde depolanan enerji Q ve ΔV 'nin her ikisiylede orantılıdır (Eşitlik 26.11) o halde aratar. İki plakayı ayırdığımızda, ek enerji yapılan işten kaynaklanır.
- 26.5** (a) C azalır (Eşitlik 26.3). (b) Q azalır. Batarya devamlı sabit ΔV potansiyel farkı sağlar. O halde $C = Q/\Delta V$ azalacaksa, yük kondansatörden dışarı akmaktadır. (c) E azalır, çünkü plaka üzerindeki yük yoğunluğu azalır. (d) Batarya varken ΔV sabit kalır. (e) Kondansatörde depolanan enerji azalır (Eşitlik 26.11).
- 26.6** Artar. Tahtanın (ve buna benzer diğer bütün yalıtkanların) dielektrik sabiti 1 den büyütür, buna göre siğsa artar (Eşitlik 26.14). Bu artışı hissedeni takoz bulucunun özel hassas devresi, cihazın lambasını yakarak işaret vermesine neden olur.
- 26.7** (a) Cartar (Eşitlik 26.14). (b) Q artar, çünkü batarya sabit ΔV sağlar. $C = (Q/\Delta V)$ artarsa, Q de artmak zorundadır. (c) Plakalar arasında E sabit kalır, çünkü $\Delta V = Ed$ dir ve ne ΔV ne de Q değişir. Plakalar üzerindeki yüklerin oluşturduğu elektrik alan aratır, çünkü çok sayıda yük plakalar üzerine akar. Dilektrik üzerinde induklenen plakaların üzerindeki yükün yüzey yükleri bir artışının sebep olduğu alandaki artışa karşı koyar ve ters yönlüdür. (d) Batarya sabit bir ΔV sağlar. (e) Kondansatörde depolanan enerji artar (Eşitlik 26.11). Tıpkı bir kütleyi kaldırarak onun yer çekimi potansiyel enerjisini artırmak için pozitif bir iş yapmanız gibi, kondansatörün içine de dielektrik maddeyi sokmanız gerekecektir.

* SİZCE NEDEN?

Fotografta, aşırı dondurucu fırtınadan dolayı Ocak 1998'de birkaç gün elektriksiz kalan Isadora eyaletinin Doğu Ontario Kasabasının elektrik nakil hattını tamir eden elektrik işçileri görülmektedir. Güç nakil hâtına dokunmak çok tehlikelidir, çünkü, hattın elektriksel potansiyeli yere göre yüz binlerce volt olabilir. Eğer bu kadar tehlikeyyse, niçin güç naklinde böyle yüksek potansiyel farkı kullanılıyor ve niçin teller üzerine konan kuşlar elektriğe çarpmazlar? (AP/Wide World Fotografları/Fred Chartrand)



b ö l ü m

27

Akim ve Direnç

Bölüm İceriği

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 27.1 Elektrik Akımı | 27.4 Direnç ve Sıcaklık |
| 27.2 Direnç ve Ohm Kanunu | 27.5 (Seçmeli) Süperiletkenler |
| 27.3 Elektriksel İletkenlik İçin bir Model | 27.6 Elektrik Enerjisi ve Güç |

Elektriksel olaylarla ilgili buraya kadar yaptığımiz tartışmalarımız, durgun yüklerle veya *elektrostatikle* sınırlı kalmıştır. Şimdi, elektrik yüklerinin hareket halinde olduğu durumları inceleyeceğiz. *Elektrik akımı* ve *ya basitçe akım*, uzayın herhangi bir bölgesine doğru yüklerin akış hızını belirlemek için kullanılmaktadır. Elektriğin en pratik uygulamaları, elektrik akımlarıyla ilişkili olanlardır. Örneğin, el fenerinin düğmesi açıldığında fenerin pilin ampulün fitilinden akım geçmesini sağlar. Ev aletlerinin çoğu alternatif akımla çalışır. Bu genel durumlarda, yük akışı bakır tel gibi bir iletken içinden olur. Bununla beraber, bir iletkenin dışında da akımın mevcut olması mümkündür. Örneğin bir TV resim tüpündeki elektron demeti de bir akım oluşturur.

Bu bölümde, ilk olarak sürekli akım kaynaklarından biri olan pili ele alacağız. Akımın mikroskopik tanım verilecek ve iletkenlerde yük akışını zorlaşuran bazı etmenler (direnç) tartışılmaktadır. Metallerdeki elektriksel iletkenliği tanımlamak için klasik model kullanılacak ve bu modelin bazı sınırlamalarından söz edilecektir.

ELEKTRİK AKIMI

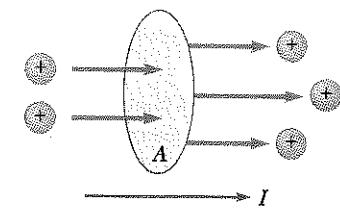
Suyun akışı ve akım arasında karşılaştırma yapmak öğreticidir. Pek çok yerde, su tasarrufu amacıyla, evlerde su akımını düşüren baryalar konulmak suretiyle yavaş akan duş sistemi yapmak yaygın bir işlemidir. Bu ve benzeri sistemlerde verilen zaman aralığında akan su miktarını tayin ederek, suyun akışını ölçeriz ve bunu yaygın olarak dakikada litre olarak belirleriz. Büyük bir ölçek üzerinde, özel bir yeri geçen su akışlarının hızını tanımlayarak nehir akımını karakterize edebiliriz. Örneğin, Niagara şelalesinde kıyı üzerindeki su akış hızı $1\ 400\ m^3/s$ ile $2\ 800\ m^3/s$ arasında değişmektedir.

Şimdi hareket halindeki elektrik yüklerinin oluşturduğu bir sistemi ele alalım. Belirli bir bölgede net bir yük akışı olduğunda, **akımın** mevcut olduğu söylenir. Akımı daha iyi tanımlamak için, yüklerin Şekil 27.1 de gösterildiği gibi A alanlı bir yüzeye doğru dik olarak hareket ettiklerini farz edelim. (Örneğin bu alan, bir telin dik kesit alanı olabilir.) **Akım bu yüzeyden geçen yüklerin akış hızıdır.** Bir Δt zaman aralığında bu alandan geçen yük miktarı ΔQ ise, ortalama akım (I_{or}), yükün bu zaman aralığına oranına eşittir:

$$I_{\text{or}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (27.1)$$

Yükün akış hızı zamanla değişirse, akım da zamanla değişir. Bu durumda yukarıdaki ifadenin diferansiyel limiti olan **ani akım** (I)

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (27.2)$$



Şekil 27.1 Bir A alanından geçen yükler. Alandan çıkan yüklerin zamana göre değişimi, I akımı olarak tanımlanır. Akımın yönü artı yüklerin serbest olarak geçtiği yöndür.

olarak tanımlanır. Akımın (SI) deki birimi **ampere** (A) dir. Ve

$$1\ A = \frac{1\ C}{1\ s} \quad (27.3)$$

dir. Yani, 1 A lik akım, yüzeyden 1 s de 1 C luk yük geçmesine özdeştir.

Şekil 27.1 deki yüzeyden akan yükler pozitif, negatif veya her ikisi de olabilir. **Pozitif yükün akış yönünü, alıṣılıgelmış olarak akım yönü olarak seçmek adettir.** Bakır gibi bir iletkende akım, negatif yüklü elektronların hareketiyle oluşur. Bu nedenle, sıradan **basit bir iletkendeki akımdan söz ederken, akım yönü, elektronların akış yönüne zıt olacaktır.** Öte yandan, bir hızlandırıcıda

Elektrik akımı

Akımın yönü

pozitif yüklü proton demeti söz konusu ise akım, protonların hareketi yönündedir. Gaz ve elektrolit içeren bazı durumlarda olduğu gibi akım, hem pozitif hem de negatif yük akşının bir sonucudur. Örneğin, yarıiletken ve elektrolitlerde böyledir.

Sayıt bir iletken telin uçları bir ilmek (halka) şeklinde bağlanırsa, ilmek üzerindeki bütün noktalar aynı elektrik potansiyelindedirler ve böylece iletkenin yüzeyinde ve içinde elektrik alan sıfırdır. Elektrik alan sıfır olduğu için, tel içerisinde net bir yük iletimi yoktur, dolayısıyla akım da yoktur. İletken üzerinde fazlalık yük olsa bile iletkendeki akım sıfırdır. Bununla birlikte, sayıt iletken telin uçları bir pile bağlanırsa, ilmek üzerindeki bütün noktalar aynı potansiyelde değildir. Pil, tel içinde elektrik alanı meydana getirerek ilmeğin uçları arasında potansiyel farkı oluşturur. Elektrik alanı tel içindeki iletkenlik elektronları üzerine kuvvet uygulayarak onların ilmek etrafında hareket etmesine ve böylece akım oluşmasına sebep olur.

Hareket eden yükü (pozitif veya negatif) hareketli **yük taşıyıcısı** olarak ifade etmek yaygındır. Örneğin, metaldeki hareketli yük taşıyıcıları elektronlardır.

Akımin Mikroskopik Modeli

Metal içinde iletkenlik için mikroskopik bir model tanımlayarak yük taşıyıcılarının hareketiyle akımın ilişkisini kurabiliriz. Bu ilişkiyi göstermek için kesit alanı A olan bir iletkeni (Şekil 27.2) ele alalım. Δx uzunluğundaki iletken elemanının hacmi (Şekil 27.2 deki koyu renkli kısım) $A \Delta x$ dir. Şayet n birim hacim başına düşen hareketli yük taşıyıcılarının sayısını gösterirse, bu hacim elemanındaki hareketli yük taşıyıcılarının sayısı $nA\Delta x$ ile verilir. Dolayısıyla, bu parçadaki ΔQ yükü

$\Delta Q = \text{Taşıyıcıların sayısı} \times \text{parçacık başına düşen yük} = (nA\Delta x)q$ olarak verilir. Burada q , her bir parçacık üzerindeki yüktür. Şayet, yük taşıyıcıları v_s hızıyla hareket ederlerse, Δt süresinde alacakları yol $\Delta x = v_s \Delta t$ ile verilir. Dolayısıyla, ΔQ yükü

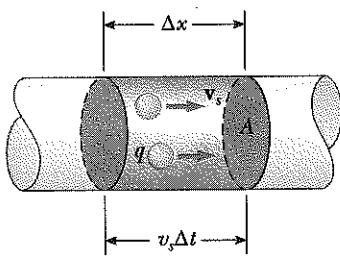
$$\Delta Q = (nAv_s \Delta t)q$$

şeklinde yazabiliriz. Bu eşitliğin her iki tarafını Δt ye bölersek iletkendeki akımın

$$I_{\text{or}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_s A \quad (27.4)$$

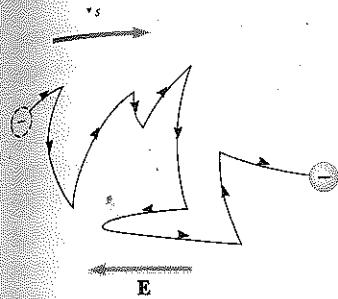
ile vereceğini görürüz.

Yük taşıyıcılarının v_s hızı, gerçekte ortalama bir hızdır ve buna **sürüklendirme hızı** denir. Sürüklendirme hızının manasını anlamak için, içindeki yük taşıyıcıları elektronları olan bir iletken düşünelim. Yalnızca bir iletkende bu elektronlar, gaz moleküllerinin yaptığı gibi, rasgele bir hareket yaparlar. Daha önce tartıştığımız gibi, iletkenin uçlarına bir potansiyel fark uygulandığında (diyalitik bir batarya ile) iletkende bir elektrik alan oluşur. Bu alan, elektronları üzerinde bir elektriksel kuvvet uygular ve dolayısıyla bir akım oluşur. Gerçekte elektronlar, iletken boyunca basitçe doğrusal olarak hareket etmezler. Bunu yerine, metal atomlarıyla peş peşe çarpışarak karmaşık zıpkızak hareketler yaparlar (Şekil 27.3). Elektronlardan metal atomlarına aktarılan enerji, atomların titreşim enerjilerinin artmasına ve dolayısıyla iletkenin sıcaklığının yükselmesine sebep olur. Fakat bu çarpışmalara rağmen, elektronlar, iletken boyunca (E ye ters yönde), sürüklendirme hızı v_s adı verilen bir ortalama hız ile yavaşa hareketine devam eder.



Şekil 27.2 Dik kesit alanı A olan bir düzgün iletken parçası. Yük taşıyıcıları v_s hızıyla hareket etmekte ve Δt süresinde aldığıları yol $\Delta x = v_s \Delta t$ olmaktadır. Δx uzunlukta, hareketli yük taşıyıcılarının sayısı $nAv_s \Delta t$ ile verilir. Buradaki n , birim hacim başına düşen taşıyıcı sayısıdır.

Bir iletkende ortalama akım

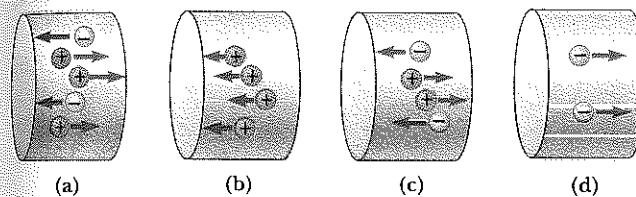


Şekil 27.3 Bir iletkende elektronun zik-zak hareketinin sematik bir gösterimi. Yondeki değişimler, iletkendeki atomlarla olan çarpışmalar yüzündendir. Elektronların net hizelerinin elektrik alanının tersi yönünde olduğunu dikkat ediniz. Zik-zak yollar gerçekte parabolik kısımlardır.

İletken içinde atom-elektron çarpışmaları, etkin bir iç sürtünme (veya sürümme kuvveti) olarak düşünülebilir. Bu durum, yün keçe ile doldurulan bir borunun içine doğru akan sıvı moleküllerinin maruz kaldığı kuvvette benzer. Çarpışma süresince, elektronlardan metal atomlarına aktarılan enerji, atomların titreşim enerjilerinin artmasına ve dolayısı ile iletkenin sıcaklığının artmasına sebep olur.

Sınamaya Sorusu 27.1

Şekil 27.4 te gösterilen dört bölge içerisinde yatay olarak hareket eden pozitif ve negatif yükleri inceleyiniz. Bu dört bölgede akımı en düşükten yükseğe doğru sıralayınız.



Şekil 27.4

ÖRNEK 27.1

Bakır Teldeki Sürüklendirme Hızı

Binalarda kullanılan tipik bir 12 ayar bakır tel $3,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ kesit alanına sahiptir. Şayet bakır tel 10,0 A'lık akım taşırsa, elektronların sürüklendirme hızı ne olur? Her bir bakır atomunun akıma bir serbest elektron ile katkıda bulunduğu kabul ediniz. Bakırın yoğunluğu $8,95 \text{ g/cm}^3$ tür.

Çözüm Ek C'deki periyodik tablodan bakırın molar kütlesini $63,5 \text{ g/mol}$ olarak buluruz. Herhangi bir maddeinin 1 molu Avagadro sayısı ($6,02 \times 10^{23}$) kadar atom ihtiyaç eder. Bakırın yoğunluğunu bildiğimizden bakırın $63,5 \text{ g}$ 'ının kapladığı hacmi hesaplayabiliriz.

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{63,5 \text{ g}}{8,95 \text{ g/cm}^3} = 7,09 \text{ cm}^3$$

Her bir bakır atomu akıma bir serbest elektron ile katkıda bulunduğu için,

$$\begin{aligned} n &= \frac{6,02 \times 10^{23} \text{ elektron}}{7,09 \text{ cm}^3} (1,00 \times 10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3) \\ &= 8,49 \times 10^{28} \text{ elektron/m}^3 \end{aligned}$$

şeklinde elde ederiz. Eşitlik 27.47'den sürüklendirme hızı

$$v_s = \frac{I}{nqA}$$

olarak buluruz. Burada q elektron başına yükün mutlak değeridir. Sonuç olarak

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{I}{nqA} \\ &= \frac{10,0 \text{ C/s}}{(8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} \\ &= 2,22 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

olur.

Ağustırma Şayet bakır tel 80,0 mA lik akım taşırsa, 10,0 dakikada bakır telin verilen kesit alanından ne kadar elektron akar?

Cevap $3,0 \times 10^{20}$ elektron

Örnek 27.1, sürüklendirme hızlarının oldukça küçük olduğunu gösteriyor. Mesela $2,46 \times 10^{-4}$ m/s hızıyla hareket eden elektronlar 1 m yol almak için yaklaşık 68 dakika geçmesi gereklidir. Hız bu kadar küçük olunca, düğmeye basılır basılmaz ışığın nasıl hemen yandığını merak ediyor olabilirsiniz. Bir iletkende, serbest elektronları sürüklendiren elektrik alan, iletken boyunca ışık hızına yakın bir hızla hareket eder. Böylece, ışık düğmesine bastığınızda, tel içerişinde elektronların harekete başlaması için gerekli mesaj (elektrik alan) 10^8 m/s mertebesinde bir hızla ulaşır.

27.2 DİRENÇ VE OHM KANUNU

Bölüm 24'te, bir iletken içinde elektrik alan olamayacağını bulmuştuk. Bu 13.3 nünlü beraber, bu ifade *ancak* iletkenin statik dengede olması halinde doğrudur. Bu bölümün amacı, iletken içinde yüklerin hareket etmesine izin verilmesi halinde neler olacağını anlamaktır.

Bir iletken içinde akım üretmek üzere, yükler, iletken içindeki elektrik alanının etkisi ile hareket ederler. Bu durumda iletken içinde elektrik alan mevcuttur. Çünkü biz hareketli yüklerle, yani *elektrostatik olmayan* durumlarda ilgileniyoruz.

A kesit alanlı ve I akım taşıyan bir iletkeni ele alalım. İletken içindeki J akım yoğunluğu, birim alan başına düşen akım olarak tanımlanır. $J = nqv_s$ olduğundan, akım yoğunluğu,

$$J = \frac{I}{A} = nqv_s \quad (27.5)$$

ile verilir. Burada J , SI da A/m^2 birimindedir. Bu ifade sadece, akım yoğunluğunun düzgün ve yüzeyin akım yönüne dik olması halinde geçerlidir. Genelde akım yoğunluğu vektörel bir niceliktir. Yani,

$$\mathbf{J} = nqv_s \quad (27.6)$$

dir. Bu tanımdan bir daha anlıyoruz ki; akım yoğunluğu da, akım gibi pozitif yük taşıyıcılar söz konusu iken yüklerin hareketi yönünde, negatif yük taşıyıcılar söz konusu iken yüklerin hareketinin aksi yönündedir.

Bir iletkenin uçları arasına bir potansiyel farkı uygulanırsa, iletken içinde bir J akım yoğunluğu ve bir E elektrik alanı meydana gelir. Şayet potansiyel farkı sabitse, iletken içindeki akım da sabit olacaktır. Bazı maddelerde akım yoğunluğu, elektrik alanla doğru orantılıdır. Yani,

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (27.7)$$

şeklindedir. Buradaki σ oranti katsayısına iletkenin **iletkenliği** adı verilir.¹ Eşitlik 27.7 ye uyan maddelerde, Georg Simon Ohm (1787-1854) ismine izafeten **Ohm kanunu**na uydukları söylenir. Daha özel olarak, ohm kanunu;

bir çok madde için (ki buna çoğu metaller dahildir) akım yoğunluğunun elektrik alana oranının sabit (σ) olduğunu söyler. Bu sabit, akımı üreten elektrik alandan bağımsızdır.

Ohm kanunu uyan, dolayısıyle E ile J arasında lineer (doğrusal) bir ilişki gösteren maddelerin *omik* (*ohmic*) oldukları söylenir. Bütün maddelerin bu özelliğe sahip olmadığı deneySEL olarak bulunabilir. Ohm kanunu uymayan

Akim yoğunluğu

Ohm Kanunu

¹ İletkenlikle aynı sembolle gösterilen σ yüzey yük yoğunluğunu karıştırmamayın

maddelere *omik olmayan* maddeler denir. Ohm kanunu doğanın temel bir kanunu *değildir*; fakat sadece belli maddeler için geçerli olan deneysel bir bağıntıdır.

Sinama Sorusu 27.2

Telin bir ucundan diğer ucuna doğru derece, derece daha küçük olan bir kesit alanına sahip akım taşıyan omik bir metal tel düşününüz. Sürüklenme hızı, akım yoğunluğu ve elektrik alan tel boyunca nasıl değişir? Yükler herhangi bir noktada toplanmadığı için, akımın, telin her yerinde aynı değere sahip olması gerektiğini kabul ediniz.

Ohm kanununun pratik uygulamalarda daha kullanışlı bir biçim, Şekil 27.5 te görüldüğü gibi, A kesitine ve ℓ boyuna sahip doğrusal bir tel parçasının incelenmesinden elde edilebilir. Telin uçlarına, telde bir elektrik alan ve akım meydana getiren bir $V_b - V_a$ potansiyel farkı uygulanır. Teldeki elektrik alanın düzgün olduğu kabul edilirse, $\Delta V = V_b - V_a$ potansiyel farkı elektrik alan ile²

$$\Delta V = E\ell$$

şeklinde bağlıdır. Bu yüzden akım yoğunluğunun büyüklüğü

$$J = \sigma E = \sigma \frac{\Delta V}{\ell}$$

şeklinde ifade edilebilir. $J = I/A$ olduğundan, potansiyel faktı

$$\Delta V = \frac{\ell}{\sigma A} J = \left(\frac{\ell}{\sigma A} \right) I$$

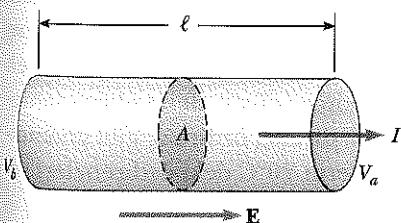
olarak yazılabilir. Burada $\ell/\sigma A$ niceliğine iletkenin ***R* direnci** adı verilir:

$$R = \frac{\ell}{\sigma A} = \frac{\Delta V}{I} \quad (27.8)$$

Bir iletkenin direnci

Bu sonuçtan anlaşılabileceği üzere, direnç SI de amper başına volt birimine sahiptir. Amper başına 1 volt, bir **ohm** (Ω) olarak tanımlanır:

$$1 \Omega \equiv \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} \quad (27.9)$$

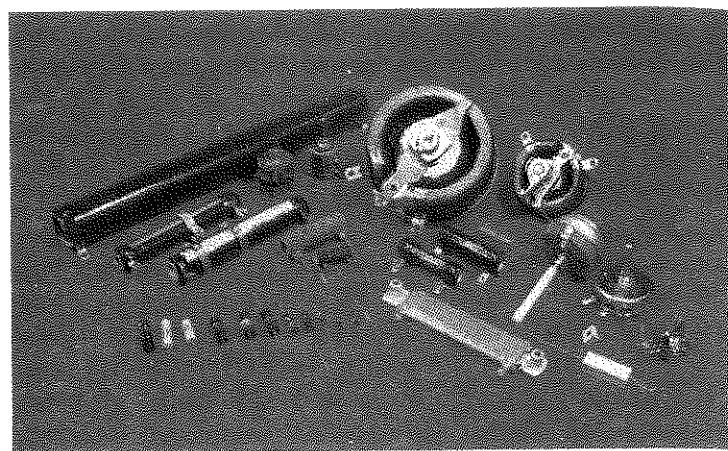


Şekil 27.5 Kesit alanı A olan ve boyu ℓ olan bir iletken. İletkenin uçları arasında uygulanan $V_b - V_a$ potansiyel farkı, iletkende bir E elektrik alanı meydana getirir ve bu da bir akım oluşturur. Dolayısıyla teldeki akım, potansiyel farkı ile orantılıdır.

²Bu sonuç, potansiyel farkının

$$V_b - V_a = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E \int_0^\ell dx = E\ell$$

önünden elde edilir.



Elektrik devrelerinde kullanılan direnç çeşitleri (Henry Lea^p ve Jim Lehman'ın izniyle)

Yani bir iletkenin uçları arasındaki bir voltluk bir potansiyel farkı, 1 A lik bir akıma sebep olursa iletkenin direnci 1Ω olur. Örneğin, 120 V luk bir kaynağa bağlı elektrik aleti, 6 A lik bir akım taşırsa, bu aletin direnci 20Ω dur.

~~Eşitlik 27.8 in~~ $(\Delta V = \mathcal{R}/\sigma A)$ potansiyel farkı için çözümü, bölüm başında resim kısmını açıklar; yüksek voltajlı tellere konan kuşlar neden yanmaz? Toprakla teller arasında yüzbinlerce volt potansiyel farkı olsa bile, kuşun ayakları arasında çok küçütür (kuştan ne kadar akım geçeceği hesaplanabilir).

Bir maddenin iletkenliğinin tersine **özdirenç**³ (ρ) denir:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (27.10)$$

Bu tanım ve (27.8) Eşitliğinden, düzgün bir blok halindeki maddenin direnci

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (27.11)$$

olarak ifade edilebilir. Burada ρ , ohm-m ($\Omega \cdot m$) birimindedir. Her omik malzeme özel bir özdirence sahiptir ve bu parametre malzemenin özelliklerine ve sıcaklığına bağlıdır. İyi elektrik iletkenler çok küçük özdirenç (veya yüksek iletkenlige), iyi yalıtkanlar ise çok büyük özdirenç (düşük iletkenlige) sahiptir. Ayrıca, Eş. 27.11'den de görüleceği gibi, direnç, özdirenç gibi geometrisine de bağlıdır. Tablo 27.1 de çeşitli maddelerin $20^\circ C$ deki özdirençleri verilmiştir. Çok küçük değerleri olan gümüş ve bakır gibi iyi iletkenlerden, çok büyük değerleri olan cam ve plastik gibi çok iyi yalıtkanlara kadar geniş bir aralıkta bulunur. İdeal iletken sıfır dirençli, ideal yalıtkan da sonsuz dirençli kabul edilir.

Eşitlik 27.11'den anlaşılıyor ki, silindirik bir iletkenin direnci, boyuya doğru orantılı, dik kesit alanı ile ters orantılıdır. Buna göre telin boyu ikiye katlanırsa, direnci ikiye katlanır. Hatta, kesit alanı ikiye katlanırsa, direnci ya-

³ Aynı sembolle gösterilen özdirençle kütte yoğunluğunu veya yük yoğunluğunu karıştırmayın.

Ozdirenç

Düzgün bir maddenin direnci

TABLO 27.1 Çeşitli Malzemelerin Özdirenci ve Özdirencin Sıcaklık Katsayıları

Malzeme	Özdirenç ($\Omega \cdot m$)	Sıcaklık Katsayısı $\alpha [({}^{\circ}\text{C})^{-1}]$
Gümüş	$1,59 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Bakır	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Altın	$2,44 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-3}$
Alüminyum	$2,82 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Demir	10×10^{-8}	$5,0 \times 10^{-3}$
Platin	11×10^{-8}	$3,92 \times 10^{-3}$
Kurşun	22×10^{-8}	$3,9 \times 10^{-3}$
Nikrom ^b	$1,50 \times 10^{-6}$	$0,4 \times 10^{-3}$
Karbon	$3,5 \times 10^{-5}$	$-0,5 \times 10^{-3}$
Germanium	0,46	-48×10^{-3}
Silisyum	640	-75×10^{-3}
Cam	$10^{10}-10^{14}$	
Sert plastik	$\sim 10^{13}$	
Kükürt	10^{15}	
Kuarts (erimiş)	75×10^{16}	

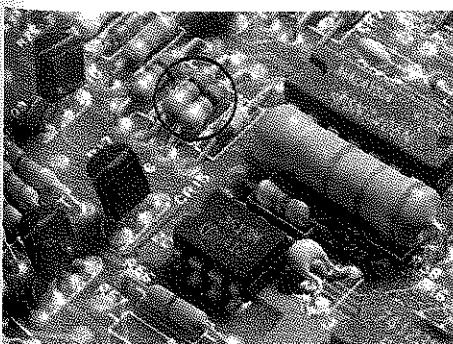
a Bütün değerler $20 {}^{\circ}\text{C}$ dendir.

b Nikel-Krom alaşımı, ısıtma elemanlarında yaygın olarak kullanılır.

nya düşer. Bu durum, bir boru boyunca sıvının akışına benzer. Borunun uzunluğu arttığında, sıvı akışına mukavemet artar. Borunun dik kesit alanı artırılırsa, sıvı daha hızlı nakledilir.

Bir çok elektrik devresinde, devrenin çeşitli kısımlarındaki akım seviyesini kontrol etmek için **rezistans** adı verilen aygit kullanılır. Rezistansların iki yaygın tipi, karbon ihtiva eden "kompozit" rezistans (ki bu bir yarıiletkeidir), bobin şeklinde sarılan *tel sargılı rezistans*'dır. Dirençlerin ohm cinsinden değerleri, Şekil 27.6 de gösterildiği gibi, genelde renk kodlu olarak verilir. Renk kodlarını, belirli direnç değerlerine Tablo 27.2 yi kullanarak çevirebilirsiniz.

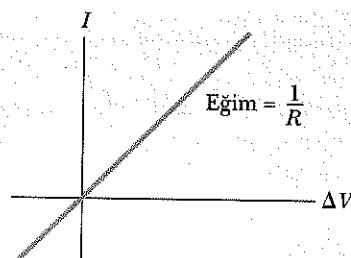
Bakır gibi omik maddeler, uygulanan geniş bir voltaj aralığında lineer bir akım-voltaj ilişkisine sahiptirler (Şekil 27.7a). I 'nin ΔV ye göre çizilen eğrisinin doğrusal bölgedeki eğimi, $1/R$ için bir değer verir. Omik olmayan madde-ler doğrusal olmayan bir akım-voltaj ilişkisine sahiptir. Çok kullanılan yarıilet-



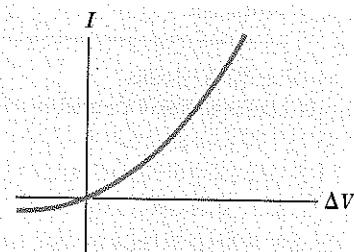
Şekil 27.6 Bir direnç üzerindeki renkli bantlar, bu direncin değerinin belirlenmesinde kullanılan kodları gösterir. İlk iki renk, direnç değerindeki ilk iki rakamı verir. Üçüncü renk, direnç değerindeki çarpanı on'un üssü olarak temsil eder. Son renk ise direnç değerinin toleransıdır. Bir örnek olarak, şayet dört renk, kırmızı (= 2), siyah (= 0), turuncu ($= 10^3$) ve altın ($= \%5$). Direncin değeri $20 \times 10^3 \Omega = 20 \text{ k}\Omega$ olur ve $\%5$ 'lik toleransı $= 1 \text{ k}\Omega$. (Renklerin değerleri Tablo 27.2'den almıştır.)

TABLO 27.2 Direnceler İçin Renk Kodu

Renk	Sayı	Çarpan	Tolerans
Siyah	0	1	
Kahverengi	1	10^1	
Kırmızı	2	10^2	
Turuncu	3	10^3	
San	4	10^4	
Yeşil	5	10^5	
Mavi	6	10^6	
Mor	7	10^7	
Gri	8	10^8	
Beyaz	9	10^9	
Altın		10^{-1}	%5
Gümüş		10^{-2}	%10
Renksiz			%20



(a)



(b)

Şekil 27.7 (a) Omik bir malzeme için akım voltaj eğrisi. Eğri, lineer (doğrusal) dir ve eğim, iletkenin direncini verir. (b) Yarı-iletken bir diyon için, doğrusal olmayan akım-voltaj eğrisi. Bu aygit ohm kanunu uymaz.

ken bir aygit olan *diyodda*, I 'nın ΔV ye göre eğrisi (karakteristiği) doğrusal değildir (Şek. 27.8b). Bu aygitin etkin direnci (I - V eğrisinin eğimiyle ters orantılıdır), bir yöndeki akım (pozitif ΔV) için büyük ters yöndeki akım (negatif ΔV) için küçuktur. Aslında, transistör gibi en modern elektronik aygitlar, lineer olmayan akım-voltaj ilişkileri ne sahiptirler. Bunlarda Ohm kanunu geçerli olmaz.

Sınamaya Hazırlanın 27.3

Şekil 27.7b deki eğri çizginin eğimi neyi temsil eder?

Sınamaya Hazırlanın 27.4

Patronunuz sizden düşük dirençli otomobil aküsü için ara kablo tasarlamınızı istiyor. Eş. 27.11'e bakarak tasarıminızda hangi etmenleri göz önünde bulundurursunuz?

ÖRNEK 27.2 Bir İletkenin Direnci

Boyu 10 cm ve dik kesit-alanı $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ olan silindirik bir alüminyum parçasının direncini hesaplayınız. İşlemleri, $3 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ lik özdirence sahip bir cam için tekrarlayınız.

Çözüm Alüminyum cubuğun direncini Eş. 27.11 ve Tablo 27.1 den yararlanarak hesaplayabiliriz:

$$R = \rho \frac{\ell}{A} = (2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \left(\frac{0,100 \text{ m}}{2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right) \\ = 1,41 \times 10^{-5} \Omega$$

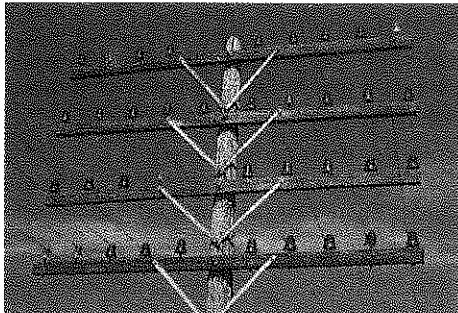
Benzer şekilde, cam için

$$R = \rho \frac{\ell}{A} = (3,0 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}) \left(\frac{0,100 \text{ m}}{2,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right) \\ = 1,5 \times 10^{13} \Omega$$

bulunur.



Beklendiği üzere alüminyum, camdan çok düşük bir dirence sahiptir. Cam silindirin direnci, alüminyumun direncinden 18 kat daha büyütür.



Telefon direkleri üzerindeki elektriksel yalıticılar düşük elektrik iletkenliğinden dolayı camdan yapılr. (J. H. Robinson/Foto Araştırılan izniyle)

ÖRNEK 27.3 Nikrom Telin Direnci

(a) Yarıçapı 0,321 mm olan 22 ayar bir nikrom telin birim uzunluğu başına düşen direncini hesaplayınız.

Çözüm Bu telin kesit alanı

$$A = \pi r^2 = \pi (0,321 \times 10^{-3} \text{ m})^2 = 3,24 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Nikromun özdirenci $1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ dir (Tablo 27.1). Böylece birim uzunlık başına düşen direnci bulmak için 27.11 Eşitliğini kullanabiliriz:

$$\frac{R}{\ell} = \frac{\rho}{A} = \frac{1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}}{3,24 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 4,6 \Omega/\text{m}$$

(b) Bu nikrom telin 1 m'lik kısmına 10 V luk bir potansiyel farkı uygulanırsa telden geçen akım ne olur?

Çözüm Bu telin 1 m'si $4,6 \Omega$ luk dirence sahip olduğundan, 27.8 Eşitliğinden

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{10 \text{ V}}{4,6 \Omega} = 2,2 \text{ A}$$

bulunur.

Nikrom telin direncinin bakır telinkinden hemen hemen 100 kere daha büyük olduğunu dikkat ediniz (Tablo 27.1). Dolayısıyla, aynı çaplı bir bakır tel, birim uzunlık başına sadece $0,052 \Omega/\text{m}$ lik bir dirence sahip olacaktır. Aynı yarıçaplı bakır telin 1 m lik kısmı, sadece 0,11 V luk bir voltaj uygulanmasıyla, aynı akımı (2,2 A) taşıyacaktır.

Yüksek özdirencinden ve oksitlenmeye mukavemetinden dolayı nikrom, tost makinaları, ütüler ve elektrik satıcılarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ağıştırma 6 m uzunluğundaki 22 ayar nikrom telin direnci ne kadardır? Bu, 120 V luk bir kaynağı bağlandığında ne kadar akım taşırl?

Cevap 28Ω ; $4,3 \text{ A}$

Ağıştırma 2,2 A akım taşıdığını farz ederek telin içindeki elektrik alanını ve akım yoğunluğunu hesaplayınız.

Cevap $6,8 \times 10^6 \text{ A/m}^2$; 10 N/C

ÖRNEK 27.4 Koaksiel Kablonun Radyal Direnci

Koaksiel kablolar, kablolu TV ve diğer elektronik araçlarla yaygın olarak kullanılır. Koaksiel kablo, iki silindirik iletkenin ibarettir. İletkenlerin arasındaki boşluk, Şekil 27.8'a da görüldüğü gibi, silisyumla tamamen doldurulmuştur ve silisyum içinde kaçak akım bulunması isten-

mez. (Akım, kablo boyunca geçecek şekilde tasarlanır). Tüpün iç yarıçapı $a = 0,5 \text{ cm}$ dış yarıçapı $b = 1,75 \text{ cm}$ ve boyu $L = 15,0 \text{ cm}$ dir. İki iletken arasında ölçüm yapıldığında silisyumun direnci ne olur?

Çözüm Bu tip problemlerde, iletkeni küçük dr kalınlıklı elemanlara bölmeliyiz. O zaman, eşmerkezli, dr kalınlıklı elemanların direncini hesaplamak kolay olur (Şekil 27.8b). Eşitlik 27.11 in diferansiyel biçimini çözüme başlayabiliriz. Uzunluk değişkeni ℓ değil de r olsun. O zaman: $dR = \rho dr/A$ olur. Burada dR , alanı A , kalınlığı dr olan silisyum iletken parçasının direncidir. Bu örnekte Şekil 27.8'de görüldüğü gibi, eleman olarak dr et kalınlığında ve L boyunda bir oyuk silindir aldık. İç iletkenden dış iletkene geçen herhangi bir akım, böyle “elemanlardan da geçmelidir; bu geçişte söz konusu olan (geçilen) alan $A = 2\pi rL$ dir. (Bu, alt ve üst alanlar ihmali edilmek suretiyle silindirin yüzey alanı olacaktır.) Böylece, silisyumlu oyuk silindirin direncini

$$dR = \frac{\rho}{2\pi rL} dr$$

şeklinde yazabiliz. Silisyumun toplam direncini bilmek is-

tedigimizden, bu ifadenin $r = a$ dan $r = b$ ye kadar dr üzerinden integral almalıyız: Bu da

$$R = \int_a^b dR = \frac{\rho}{2\pi L} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

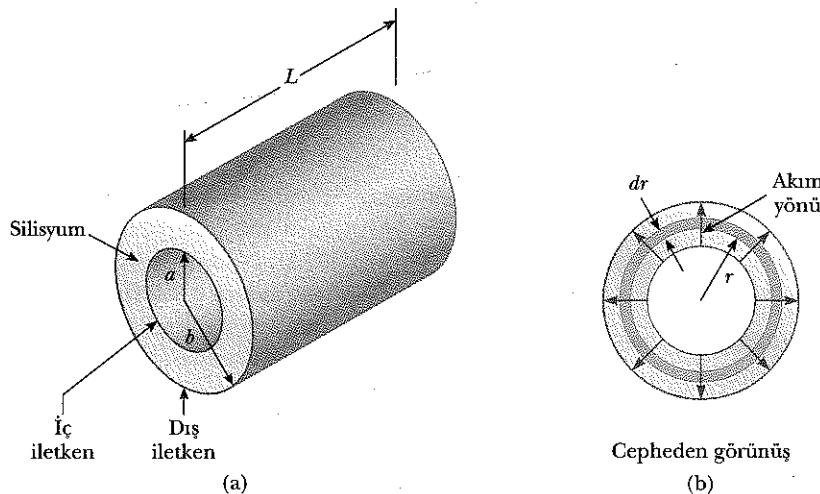
olur. Verilen değerleri yerine koyarak ve silisyum için $\rho = 640 \Omega \cdot \text{m}$ kullanarak

$$R = \frac{640 \Omega \cdot \text{m}}{2\pi (0,150 \text{ m})} \ln\left(\frac{1,75 \text{ cm}}{0,500 \text{ cm}}\right) = 851 \Omega$$

elde edilir.

Aliştırma İç ve dış bakır tüpler arasında 12,0 V lük bir potansiyel farkı uygulandığında, bunlar arasından geçen toplam akım ne olur?

Cevap 14,1 mA.



Şekil 27.8 Bir koaksiyel kablo. (a) Silisyum iletkenlerin iç ve dış yüzeylerindeki akım yönleri gösterilmiştir. (b) Cepheden görünüş, akım yönünü göstermektedir.



ELEKTRİKSEL İLETKENLİK İÇİN BİR MODEL

Bu kesimde, ilk defa Paul Drude tarafından 1900 yılında önerilen metalerde elektriksel iletkenliğin klasik bir modelini tanımlıyoruz. Bu model bizi Ohm kanununa götürür ve özdirencin, metaldeki elektronların hareketleriyle ilişkili olabileceğiğini gösterir. Drude modelinin sınırlamaları olsa da, o halde çok ayrıntılı incelemeler için bile fikir verir.

Bir iletkenin, serbest elektronlar (bazen *iletkenlik* elektronları da denir) ve düzgün sıralanmış atomlar oluştuguunu düşünelim. İletkenlik elektronları, atomlar henüz katı oluşturmadan kendi atomlarına bağlı oldukları halde, serbest atomlar katı oluşturduklarında, elektronlar bir mobilite (hareketlilik)

kazanırlar. Serbest elektronlar, elektrik alanı yokken iletken içinde 10^6 büyüklüğünde ortalama hızlarla rastgele yönlerde hareket ederler. Bu durum, bir kaba kapatılmış gaz moleküllerinin hareketine benzemektedir. Esasen, bazı bilim adamları metaldeki iletkenlik elektronlarına *elektron gazi* demektedirler. Elektriksel alan yokken, serbest elektronların sürüklendirme hızı sıfır olduğundan, iletkende akım olamayacağına dikkat edilmelidir. Yani, ortalama olarak bir yönde ne kadar elektron hareket ediyorsa, aksi yönde de o kadar elektron hareket eder ve böylece net bir yük akışı olmaz.

Bir elektrik alan uygulandığında durum değişmektedir. Serbest elektronlar, burada anlatılan rastgele ısıl (termal) harekete ilaveten, elektrik alanın zıt yönünde ortalama bir sürüklendirme hızıyla (v_s) yavaşça sürüklendirler. Bu sürüklendirme hızı (tipik olarak 10^{-4} m/s), çarpışmalar arasındaki ortalama hızdan (tipik olarak 10^6 m/s) çok küçüktür.

Şekil 27.9, bir iletkendeki serbest elektronların hareketinin kaba bir tanımı vermektedir. Elektrik alan yokken, bir çok çarpışma sonucunda net bir yer değiştirmeye olmaz (Şekil 27.9a). \mathbf{E} elektrik alanı bu rastgele hareketi değiştirir ve elektronların \mathbf{E} ye zıt yönde sürüklendirmelerine sebep olur (Şekil 27.9b). Şekil 27.9b de görülen yollardaki hafif kavis, uygulanan elektrik alanın çarpışmalar arasında elektrona kazandırdığı ivmeden kaynaklanmaktadır.

Modelimizde, elektronun çarpışmadan sonraki hareketinin çarpışmadan önceki hareketine bağlı olmadığını kabul edeceğiz. Bunun yanında, elektrik alanındaki elektronlar tarafından kazanılan fazla enerjinin çarpışmalarla iletkenne verildiğini de kabul edeceğiz. Çarpışmalarla atomlara verilen enerji, atomların titreşim enerjilerini artırır. Böylece ekmek kızartma aleti ve diğer benzerlerinde olduğu gibi iletkenin ısınmasına sebep olur.

Şimdi sürüklendirme hızı için bir ifade elde edebileceğimiz durumdayız. Yükü $q (= -e)$, kütlesi m_e olan hareketli bir elektron, \mathbf{E} elektrik alanında bulunduğunda bir $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ kuvvetine maruz kalır. $\sum \mathbf{F} = m_e \mathbf{a}$ olduğundan parçacığın ivmesi

$$\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m_e} \quad (27.12)$$

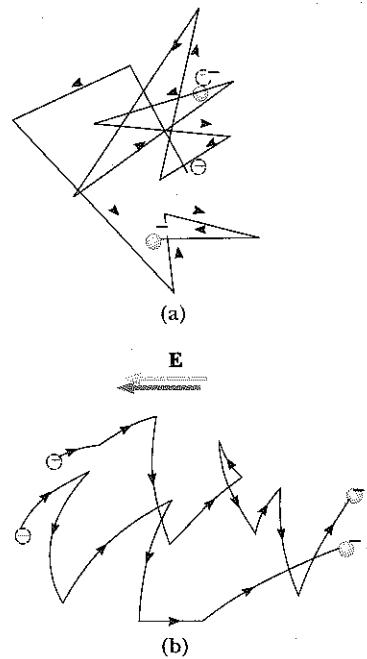
ile verilir. Bu ivme sadece çarpışmalar arasındaki çok kısa zaman için söz konusu olup, elektrona küçük bir sürüklendirme hızı kazandırabilir. Şayet t , son çarpışmadan geçen zaman, \mathbf{v}_i ilk hız ise, t zaman sonunda elektronun hızı

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_i + \mathbf{a}t = \mathbf{v}_i + \frac{q\mathbf{E}}{m_e} t \quad (27.13)$$

ile verilir. Şimdi, bütün mümkün zamanlar (t) ve bütün mümkün \mathbf{v}_i değerleri üzerinden \mathbf{v} ortalama değerini alalım. Şayet ilk hızların uzayda rastgele olarak dağılıklarını farz edersek, \mathbf{v}_i in ortalama değerinin sıfır olacağını görürüz. $(q\mathbf{E}/m_e)t$ terimi, atomlar arasındaki hareket sonunda alan tarafından kazandırılan ilave hızıdır. Şayet elektron sıfır hızıyla başlarsa, 27.13 eşitliğinin ikinci teriminin ortalama değeri $(q\mathbf{E}/m_e)\tau$ olur; burada τ çarpışmalar arasındaki ortalama zamanıdır. \mathbf{v} nin ortalaması, sürüklendirme hızına eşit olduğundan⁴

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_s = \frac{q\mathbf{E}}{m_e} \tau \quad (27.14)$$

elde ederiz.



Şekil 27.9 (a) Elektriksel alan yokken, bir iletkendeki yük taşıyıcılarının rastgele hareketlerinin şematik bir diyagramı. Sürüklendirme hızı sıfırdır. (b) Elektriksel alan varken, bir iletkendeki yük taşıyıcının hareketi. Rastgele hareketin, alan tarafından değiştirildiğine ve yük taşıyıcının bir sürüklendirme hızına sahip olduğunu dikkat ediniz.

⁴Çarpışma işlemi rastgele olduğundan, her bir çarpışma olayı daha önce olanlardan bağımsızdır. Bu bir zar atışı işleminin rastgeleliği ile kıyaslanabilir. Bir atışta belli bir sayının gelme ihtimali, daha önceki atışın sonucundan bağımsızdır. Herhangi bir keyfi zamandan başlamak suretiyle o sayının gelmesi, ortalama olarak, zarın altı kere atulmasını gerektirir.

Sürüklenme hızının bu ifadesini, iletken içindeki akım ile ilişkilendirelim. 27.14 Eşitliğini 27.6 Eşitliğinde kullanarak, akım yoğunluğu büyüğünü

Akım yoğunluğu

$$J = nqv_s = \frac{nq^2 E}{m_e} \tau \quad (27.15)$$

ile verilebileceğini buluruz. Burada n birim hacimdeki yük taşıyıcıların sayısıdır. Bu ifade $J = \sigma E$ ile verilen Ohm yasası ile kıyaslanırsa iletkenlik ve özdirenç için aşağıdaki bağıntıları elde ederiz:

$$\sigma = \frac{nq^2 \tau}{m_e} \quad (27.16)$$

İletkenlik

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{nq^2 \tau} \quad (27.17)$$

Özdirenç

Bu klasik modele göre, iletkenlik ve özdirenç, elektrik alanına bağlı değildir. Bu özellik, Ohm yasasına uygun bir iletkenin ayırt edici özelliğiidir.

Carpışmalar arasındaki ortalama zaman τ , çarpışmalar arası ortalama mesafesi ℓ (*ortalama serbest yol*, bak. Bölüm 21.7) ve ortalama sürate (\bar{v})

$$\tau = \frac{\ell}{\bar{v}} \quad (27.18)$$

ifadesi ile bağlıdır.

ÖRNEK 27.5 Bir Telde Elektron Çarpışmaları

(a) Örnek 27.1'in veri ve sonuçları ile klasik elektron iletim modelini kullanarak, 20°C deki bakırda elektronların çarpışmaları arasındaki ortalama zamanı bulunuz.

Çözüm 27.17 Eşitliğinden

$$\tau = \frac{m_e}{nq^2 \rho}$$

olduğunu görürüz. Burada bakır için $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ve 27.1 örneğinde verilen tel için taşıyıcı yoğunluğu $n = 8,49 \times 10^{28} \text{ elektron/m}^3$ tür. Bunlar yukarıdaki bağıntıda kullanılırsa

$$\tau = \frac{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})^2 (1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^2)}$$

$$= 2,5 \times 10^{-14} \text{ s}$$

olarak bulunur.

(b) Bakırda serbest elektronlar için ortalama termal sürat $1,6 \times 10^6 \text{ m/s}$ olduğunu kabul ederek ve (a)'da bulunan sonucu kullanarak, bakırda elektronlar için ortalama serbest yolu hesaplayınız.

Çözüm

$$\begin{aligned} \ell &= \bar{v} \tau = (1,6 \times 10^6 \text{ m/s}) (2,5 \times 10^{-14} \text{ s}) \\ &= 4,0 \times 10^{-8} \text{ m} \end{aligned}$$

ki bu 40 nm ye denktir. (0,2 nm dolayındaki atomlar arasındaki mesafeyle kıyaslayın). Sonuç olarak, çarpışmalar arasındaki zaman çok kısa olmasına rağmen, elektronlar bir atomla çarpışmadan önce, atomlar arası mesafenin hemen, hemen 200 katı kadar yol giderler.

İletkenliğin bu klasik modeli Ohm Yasası ile uyuşmasına rağmen, bazı önemli olayları açıklamakta yeterli değildir. Örneğin, ideal gaz modeli kullanılarak \bar{v} için yapılan klasik hesaplamalar, doğru değerlerden (Bak Bölüm 21.6) 10 kere kadar daha düşük sonuçlar vermektedir. Ayrıca, 27.17 Eşitliğinde τ yerine ℓ/\bar{v} alarak payı yeniden düzenlersek paya \bar{v} geldiği görülür ki, özdirençin \bar{v} ile orantılı olduğunu görürüz. Ideal-gaz modeline göre \bar{v}, \sqrt{T} ile orantılıdır, öyleyse $\rho \propto \sqrt{T}$ doğru olmalıdır. Bu saf metaller için, özdirençin sıcaklık bağımlılığının lineer oluşu ile uyuşmamaktadır. Bu gözlemler sadece kuantum mekanik model kullanılarak hesaba katılabilir. Bu modeli özetle anlatacağız.

Kuantum mekanığine göre, elektronlar dalga benzeri özelliklere sahiptirler. Sayet, atomların sırası düzgün aralıklı (yani, periyodik) ise, elektronların dalga benzeri karakteri onların iletken boyunca serbestçe hareket etmelerini ve bir atomla çarpışmasının söz konusu olmamasını mümkün kılar. İdealleştirilmiş bir iletkende çarpışma olmayacağı, ortalama serbest yol sonsuz olacak ve direnç de sıfır olacaktır. Elektron dalgaları sadece atomik dizilişlerin düzensiz (periyodik olmaması) olması halinde yapısal kusurlar ve safsızlıkların varlığı sonucu saçılırlar. Düşük sıcaklıklarda, metallerin özdirencine elektronla safsızlıklar arasındaki çarpışmaların sebep olduğu saçılımların katkısı baskın olur. Yüksek sıcaklıklardaki özdirenç, termal uyarma sonucu sürekli yer değiştiren iletken atomlar ile elektronlar arasındaki çarpışmaların sebep olduğu saçılımların katkısı baskın olur. Atomların termal hareketleri (durgun olan atomik sıralamalara kıyasla) yapının düzensiz olmasına yol açar ve bunun sonucu olarak da elektronun ortalama serbest yolu kısaltır.

27.4 DİRENÇ VE SICAKLIK

Bir iletkenin özdirençi, belli bir sıcaklık aralığında yaklaşık olarak sıcaklıkla aşağıdaki gibi lineer (doğrusal) olarak değişir:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.19)$$

ρ nın sıcaklıkla değişimi

Burada ρ herhangi bir ($^{\circ}\text{C}$ cinsinden) T sıcaklığındaki özdirenç, ρ_0 bir T_0 referans sıcaklığındaki (bu sıcaklık genellikle $20\ ^{\circ}\text{C}$ olarak alınır) özdirençtir; α ise özdirençin sıcaklık katsayısı olarak bilinir. 27.19 Eşitliğinden görürüz ki özdirençin sıcaklık katsayısı

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (27.20)$$

Özdirençin sıcaklık katsayısı

şeklinde de ifade edilebilir. Burada $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ ve $\Delta T = T - T_0$ sıcaklık aralığında özdirençteki değişmedir.

Çeşitli maddelerin özdirenç ve sıcaklık katsayıları Tablo 27.1 de verilmiştir. α 'nın biriminin Celcius^{-1} [$(^{\circ}\text{C})^{-1}$] olduğuna dikkat ediniz. iletkenin direnci 27.11 Eşitliğine göre özdirençle doğru orantılı olduğundan, direncin sıcaklıkla değişimi

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.21)$$

olarak yazılabilir. Hassas sıcaklık ölçümleri için, aşağıdaki örnekte görüldüğü üzere, bu özelliği kullanmak uygun değildir.

ÖRNEK 27.6 Platin Dirençli Termometre

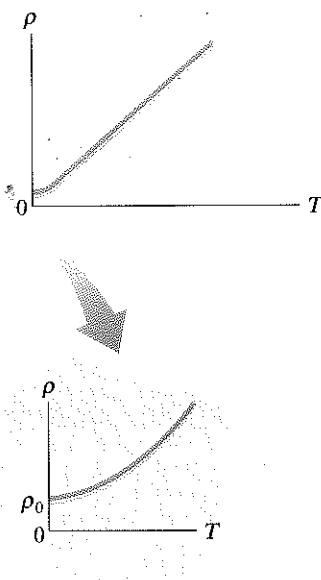
Platinden yapılmış bir direnç termometresi $20\ ^{\circ}\text{C}$ de $50,0\ \Omega$ luk bir dirence sahiptir. Termometre, erimiş indiyum ihtiyaç eden bir kaba daldırıldığında, direnci $76,8\ \Omega$ 'a çıkmaktadır. Bu bilgilerden indiyumun erime noktasını bulunuz. Platin için $\alpha = 3,92 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$.

Cözüm 27.21 Denklemini ΔT için çözersek,

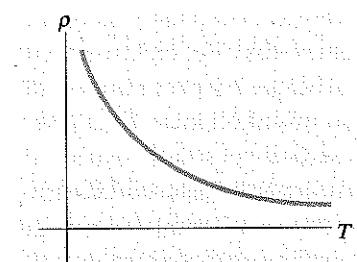
$$\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{76,8\ \Omega - 50,0\ \Omega}{[3,92 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}] (50,0\ \Omega)} = 137\ ^{\circ}\text{C}$$

elde ederiz. $\Delta T = T - T_0$ ve $T_0 = 20\ ^{\circ}\text{C}$ olduğundan

$$T = 157\ ^{\circ}\text{C}$$
 buluruz.



Şekil 27.10 Bakır gibi bir metal için sıcaklığı karşı özdirenç. Eğri, sıcaklığın geniş bir aralığında doğrusaldır ve sıcaklık arttıkça ρ artmaktadır. T nin mutlak sıfıra ulaşmasıyla, özdirenç sonlu bir ρ_0 değerine ulaşır.



Şekil 27.11 Silisyum ve Germanium gibi saf bir yarıiletken için özdirençin sıcaklıkla değişimi.

Bakır gibi birçok omik maddenin direnci, Şekil 27.10 da görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça yaklaşık olarak lineer (doğrusal) artar. Bununla beraber, gerçekde düşük sıcaklıklarda daima lineer olmayan bir bölge vardır ve özdirenç mutlak sıfır yakınında genellikle, sonlu bir değere yaklaşır. Mutlak sıfır civarındaki bu artık özdirençin sebebi, elektronların metaldeki safsızlıklar ve kusurlarla olan çarpışmalarıdır. Halbuki, yüksek sıcaklık özdirencinde (lineer bölge) ise, esas olarak elektronların metal atomlarıyla çarpışmaları baskındır.

Tablo 27.1'den görüldüğü gibi, üç α değeri negatiftir. Bu bize yarıiletkenlerin özdirençinin, sıcaklık arttıkça azaldığını söyler (Şekil 27.11). Bu durum, daha yüksek sıcaklıklarda yük taşıyıcılarının yoğunluğunun artmasından kaynaklanır.

Bir yarıiletkeindeki yük taşıyıcılar genellikle safsızlık ortamlarına ait olduklarından, özdirenç bu tür safsızlıkların konsantrasyonu ve tipine çok duyarlıdır. Yarıiletkenlerin incelenmesine, kitabın ilerdeki kısımlarında (Bölüm 43 te) yeniden doneceğiz.

Sınamma Sorusu 27.5

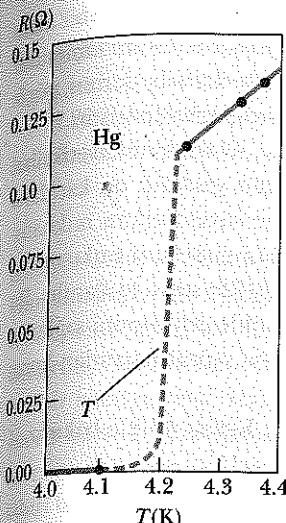
Elektrik ampulu açıldıktan sonra, ne zaman daha fazla akım taşı? Filemanın kızarıklığının arttığı ilk anda mı yoksa kızarıklığın birkaç milisaniye sonra kararlı bir hale gelmekten sonra mı?

Seçmeli Kesim

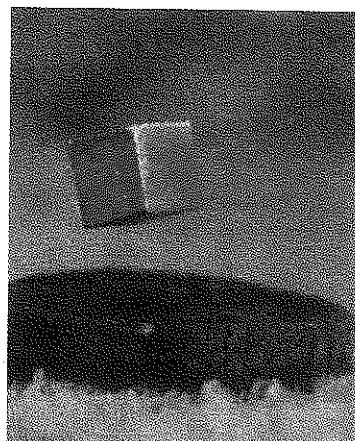
27.5 SÜPER-İLETKENLER

Bir takım metal ve bileşikler var ki, bunların dirençleri *kritik sıcaklık* denilen belli bir T_c sıcaklığının altında gerçekten *sıfıra* gider. Bu maddeler **süper iletkenler** olarak bilinirler. Bir süper iletkenin direnç-sıcaklık grafiği, T_c nin üzerindeki sıcaklıklarda normal bir metalinkine gibidir (Şekil 27.12). Sıcaklık T_c ye eşit veya onun altında olduğunda, özdirenç birden bire sıfıra düşer. Bu gerçek 1911 de Alman fizikçi H. Kamerlingh-Onnes (1853-1926) tarafından civa ile çalışırken keşfedilmiştir. (Civa 4,2 K nin altında süper iletkendir). Son ölçümle göstermiştir ki T_c nin altında süper iletkenlerin özdirençleri $4 \times 10^{-25} \Omega \cdot m$ den daha küçüktür. Bu değer, bakırın özdirencinden hemen hemen 10^7 kere daha küçük olup pratikte sıfır kabul edilmektedir.

Bugün binlerce süper iletken bilinmektedir. Tablo 27.3'de birkaç süper iletkenin kritik sıcaklıklarını listelenmiştir. Son zamanlarda keşfedilen süper iletkenlerin kritik sıcaklıklarını, başlangıçta mümkün olduğu düşünülenlerden daha yüksektir. İki çeşit süper iletken bulunmuştur. Kamerlingh-Onnes tarafından bulunan süper iletkenler metal olmalarına rağmen, çok yakın bir zaman-



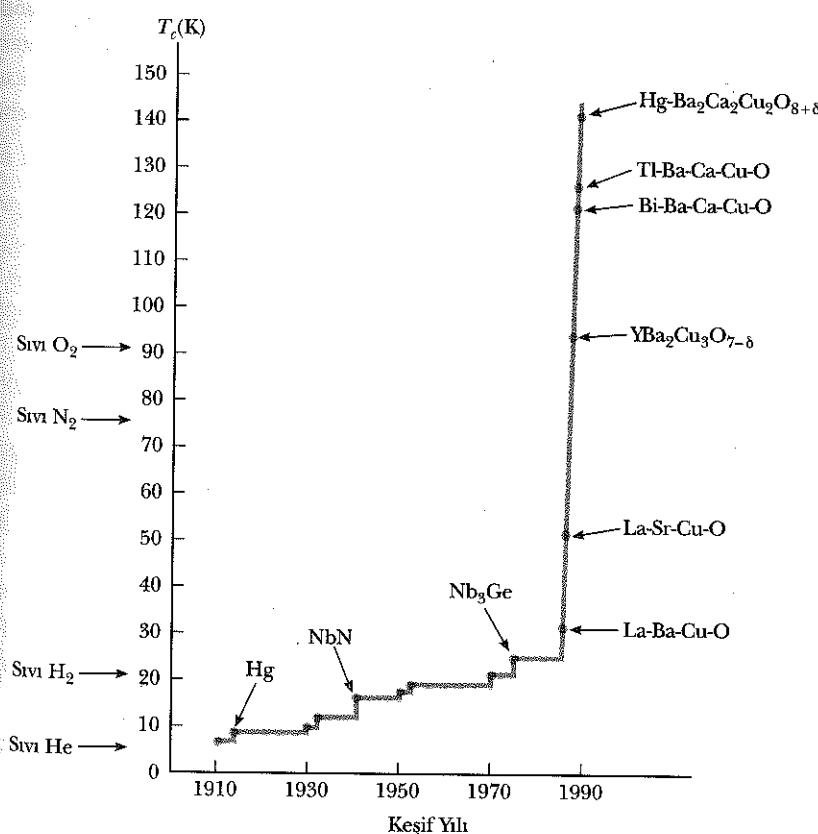
Şekil 27.12 Civada, sıcaklığı göre direnç. T_c kritik sıcaklığının üzerinde eğri bir normal metalinki gibidir. Direnç kritik sıcaklıkta (civa için 4,2 K dir) sıfıra düşer.



77 K de süper iletken $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ diskü üzerinde duran küçük bir sürekli mıknatısın fotoğrafı (IBM Research Laboratory'nın izniyle)

da bulunan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ seramik yapının yüksek kritik sıcaklığa sahip olduğu görülmüştür. Eğer oda sıcaklığında bir süperiletken bulunacak olursa, onun teknolojiye çok büyük katkısı olacaktır.

T_c nin değeri, kimyasal bileşime, basınç ve moleküler yapıya duyarlıdır. Son derece iyi iletken olan bakır, gümüş ve altının süperiletkenlik göstermeleri ilginçtir.



Şekil 27.13 Süperiletkenliğin keşfinden beri, kritik sıcaklığın yıllara göre gelişimi.

Süper iletkenlerin önemli özelliklerinden biri, bunlarda bir kere bir akım elde edildikten sonra, bu akımın artık *voltaj uygulanmaksızın* devam etmesidir. (Çünkü $R = 0 \Omega$ dur). Gerçekten de, süper iletkenlerde kararlı akımın, görülebilir hiçbir azalmaya uğramadan birkaç yıl devam ettiği gözlenmiştir!

Süperiletkenliğin önemli ve yararlı bir uygulaması, içindeki manyetik alan şiddetinin, en iyi normal elektromagnitlerininkinden yaklaşık on kat daha büyük süper iletken mıknatısların yapılmasıdır. Böyle süperiletken mıknatıslar enerji depolama aracı olarak düşünülmektedir. Süperiletken mıknatıslar, tipta manyetik rezonans görüntüleme birimlerinde (MRI) sıkça kullanılır. Bu yöntem iç organların yüksek kalitede görüntülerinin elde edilmesini sağlar ve x-ışınları veya diğer tıhrip edici radyasyonların hastayı yipratmasından korumış olur.

Süperiletkenlik konusuna daha ayrıntılı bilgi için Kesim 43.8'e bakınız.

27.6 ELEKTRİK ENERJİSİ VE GÜC

Bir iletkende elektrik akımı oluşturmak için bir batarya kullanılırsa, bataryada 13.3 depolanan kimyasal enerji, yük taşıyıcıların kinetik enerjisine sürekli olarak dönüşür. Bu kinetik enerji, yük taşıyıcıları ile örgü iyonları arasındaki çarpışmalar sonucu süratle kaybedilir ve neticede iletkenin sıcaklığı artar. Böylece, bataryada depolanan kimyasal enerjinin sürekli olarak ısıl (termal) enerjiye dönüştüğünü görürüz.

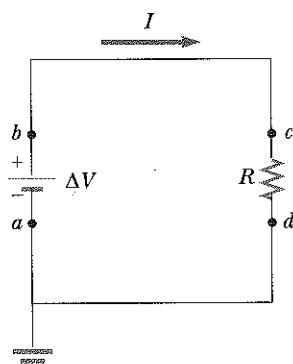
Şekil 27.14 te görüldüğü gibi, uçları R direncine bağlanmış bir bataryadan oluşan basit bir elektrik devresini ele alalım. $\text{---} + \text{---}$ simbolü bataryayı (veya herhangi bir doğru akım kaynağını) göstermek için kullanılır ve dirençler de $\text{---} \text{W} \text{---}$ ile gösterilir. Bataryanın pozitif ucu (uzun bacak) yüksek potansiyelde, negatif uc (kısa bacak) ise düşük potansiyeldedir. Şimdi ΔQ miktarındaki pozitif yükün, devreyi a dan başlayıp bataryadan ve dirençten geçerek tekrar a 'ya gelmek suretiyle tamamlandığını düşünelim. a noktası referans noktası olup topraklanmıştır ($\text{---} \text{G} \text{---}$ toprak simbolüdür) ve potansiyeli sıfır olarak alınmıştır. Yük a 'dan b 'ye batarya üzerinden hareket ederken bataryada kimyasal enerji $\Delta V \Delta Q$ kadar *azalırken*, yükün elektriksel potansiyel enerjisi aynı miktarda *artar* (Bölüm 25.9'dan hatırlayınız ki $\Delta U = q\Delta V$ dir.) Bununla beraber yük, direnç üzerinden c den d ye giderken, dirençteki atomlarla yaptığı çarpışmalar sonucu elektriksel potansiyel enerjisini *kaybeder*. Dolayısıyla termal enerji oluşur. Şayet, bağlantı tellerinin direncini ihmali edersek, bc ve da yolunda enerji kaybı olmayacağına dikkat ediniz. Yük a 'ya döndüğünde başlangıçtaki (sıfır) enerjisine sahip olmalıdır.⁵ Herhangi bir noktada yük artışı olmadığı için devrenin her yerinde akımın aynı olduğuna dikkat edilmelidir.

Direnç üzerinden giderken, ΔQ yükünün potansiyel enerji kaybetme hızı,

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \Delta V = I \Delta V$$

ile verilir. Burada I , devredeki akımdır. Tersine, yük bu enerjiyi bataryadan geçerken yeniden kazanır. Yük enerji kaybetme hızı, dirençteki P güç kaybına eşit (-ki bu içenerji alarak görülür-) olacağından

$$P = I \Delta V \quad (27.22)$$



Şekil 27.14 Potansiyel farkı ΔV olan bir batarya ile R direncinden oluşan bir devre. Pozitif yük, bataryanın negatif ucundan pozitif ucuna doğru, saat yönünde akar. a ve d noktaları topraklanmıştır.

⁵ Akım kararlı durum değerine ulaştığında, akımı meydana getiren yük taşıyıcısının kinetik enerjisinde zamanla değişme olmadığına dikkat ediniz.

olur. Bu durumda, güç dirence batarya tarafından verilmektedir. Bununla birlikte, uçları arasına V potansiyel farkı uygulanan ve I akımı taşıyan *herhangi* bir ayağa verilen gücün belirlemek için 27.22 Eşitliğini kullanabilir.

27.22 Eşitliğini ve bir dirence ait $V = IR$ gerektiğini kullanarak çeşitli şekilde kaybedilen gücü

$$\mathcal{P} = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \quad (27.23)$$

Dirençte harcanan güç

şeklinde ifade edebiliriz. Bölüm 7'de tartıştığımız gibi I amper, ΔV volt ve R ohm cinsinden alındığında, SI birimlerinde güç watt (w) biriminde olacaktır. R direncine sahip bir iletkende ısı olarak kaybedilen güç *joule ısısı*⁶ olarak adlandırılır, fakat bundan daha ziyade $I^2 R$ kaybı olarak söz edilir.

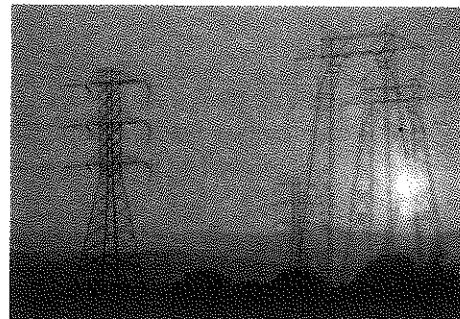
Bir batarya veya herhangi bir elektriksel enerji sağlayan ayağa *elektromotor kuvvet kaynağı* veya daha genel bir ifadeyle *emk kaynağı* denilmektedir. Emk kavramı daha ayrıntılı olarak, Bölüm 28 de incelenecaktır (*elektromotor kuvvet* tabiri bir kuvveti değil, fakat gerçekte, volt cinsinden bir potansiyel farkını gösterdiğinde şanssız bir deyimdir.). Bataryanın iç direnci ihmali edilirse, a ve b noktaları arasındaki potansiyel farkı Şekil 27.14'teki bataryanın \mathcal{E} emk'sına eşittir. Yani, $\Delta V = V_b - V_a = \mathcal{E}$ olup devredeki akım $I = \Delta V / R = \mathcal{E} / R$ dir. $\Delta V = \mathcal{E}$ olduğundan, emk kaynağı tarafından verilen güç $\mathcal{P} = I\mathcal{E}$ şeklinde ifade edilebilir; ki bu dirençteki güç kaybına ($I^2 R$ ye) eşittir.

Şekil 27.15 de görüldüğü gibi, güç hatları boyunca elektrik enerjisi iletilirken, kamu hizmeti veren şirketler hatlardaki iç enerjiye aktarılan gücün minimum etmenin ve tüketiciye verilen enerjiyi maksimum yapmanın yollarını ararlar. Çünkü $\mathcal{P} = I\Delta V$ olduğundan, aynı miktar güç ya yüksek akımlar, düşük potansiyel farkları ya da düşük akımlar ve yüksek potansiyel farkları ile iletiler. Ekonomik olması açısından, bu şirketler elektrik enerjisini öncelikle düşük akımlar ve yüksek potansiyel farkları ile taşımayı tercih ederler. Bakır tel çok pahalıdır ve bu yüzden daha yüksek dirençli tel kullanmak daha ucuzdur (Yani, Eş. 27.11 de görüldüğü üzere, küçük tesir kesit alanına sahip bir tel). Böylece dirençte tüketilen güç için $\mathcal{P} = I^2 R$ ifadesindeki telin direnci ekonomik düşüncelerden dolayı izafî olarak yüksek değerde sabit tutulur. $I^2 R$ kaybı I akımı mümkün olduğu kadar düşük tutularak azaltılabilir. Örneğin, güç 765 kV gibi büyük potansiyel farkıyla iletilir. Bir kere şehrinize ulaşan elektrik, *transformatör* denilen sistemler yardımıyla potansiyel farkı genellikle 4 kV'a düşürülür. Elektrik evinize ulaşmadan önce, başka bir transformatör yardımıyla potansiyel farkı 240 V'a düşürülür. Elbette ki her seferinde potansiyel farkı azaltırken aynı değerde akım artar ve güç aynı kalır. Bölüm 33 te transformatörleri daha ayrıntılı olarak tartışacağız.

Sinama Sorusu 27.6

Şekil 27.16 da gösterildiği gibi iki elektrik ampulüne aynı potansiyel farkı uygulanmaktadır. Aşağıdaki durumlardan hangisi doğrudur?

- 30 W'lık ampul daha büyük dirence sahiptir ve daha büyük akım taşır.
- 30 W'lık ampul daha büyük akım taşır, fakat 60 W'lık ampul daha büyük dirence sahiptir.

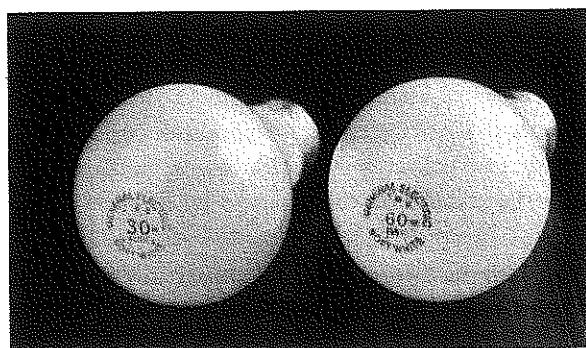


Şekil 27.15 Elektrik enerjisi, yüksek potansiyel farkında iletilir (Comstock)

Evet Deneyi

Eğer ohmmetreniz varsa, Sinama Sorusu 27.6'nın cevabını yeteri kadar ampul üzerinde deneyerek verebilirsiniz.

⁶ Boyutu, birim zaman başına düşen enerji olmasına rağmen, buna *Joule Isısı* denir ve bunların her kisi de güç birimindedir.



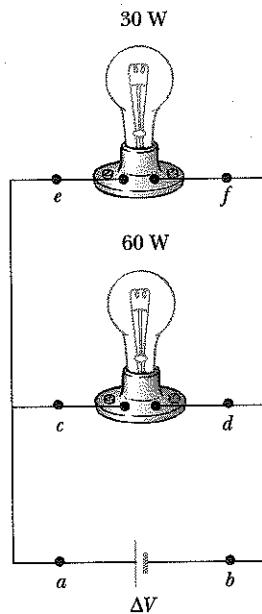
Ev Deneyi

Suç kurutma makinası, televizyon ve teyp gibi ev aletlerinizin üzerlerindeki yazınlardan faydalananarak onların çalışmalarının maliyetini bulunuz.

- c) 30 W'lik ampul daha büyük dirence sahiptir, fakat 60 W'lik ampul daha büyük akım taşır.
d) 60 W'lik ampul daha büyük dirence sahip ve daha büyük akım taşır.

Sınaması Sorusu 27.7

Şekil 27.17 de gösterilen iki ampul için f noktasından a noktasına doğru akım değerlerini en büyüğten en küçüğe doğru sıralayınız.



Şekil 27.17 İki ampul aynı potansiyel farkına sahipolararasınabağlanmıştır. Bu ampuller sadece 120 V'luk kaynağa bağlandıkları zaman üzerlerindeki kadar güç çekerler.

ÖRNEK 27.7

Elektrik Isıtıcısındaki Güç

Bir elektrik ısıtıcısı, toplam direnci 8Ω olan bir nikrom telle 120 V potansiyel farkı uygulayarak yapılmıştır. Tel vasıtayla taşınan akımı ve ısıtıcının harcadığı gücünü bulunuz.

Çözüm $\Delta V = IR$ olduğundan

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{120 \text{ V}}{8 \Omega} = 15,0 \text{ A}$$

elde edebiliriz. $P = I^2 R$ ifadesini kullanarak harcadığı gücü

$$P = I^2 R = (15,0 \text{ A})^2 (8 \Omega) = 1,80 \text{ kW}$$

olarak bulabiliriz. Uygulanan potansiyel farkını iki katına çıkarırsak akım iki katına fakat güç dört katına çıkar. Çünkü $P = (\Delta V)^2 / R$ dir.

ÖRNEK 27.8 Akşam yemeği yapmanın fiyatı

Sürekli olarak 20.0 A ve 240 V ta çalışan bir firında 4 saatte pişirilen hindinin fiyatını tahmin ediniz.

Çözüm Fırın tarafından harcanan güç,

$$\mathcal{P} = I\Delta V = (20.0 \text{ A}) (240 \text{ V}) = 4800 \text{ W} = 4.80 \text{ kW} \text{ tır.}$$

Tüketilen enerji, güç \times zaman olduğu için ödemeniz gereken enerjinin miktarı,

$$\text{Enerji} = \mathcal{P}t = (4.80 \text{ kW}) 4 \text{ sa} = 19.2 \text{ kWsa tır.}$$

Sayıt kilowat saat başına ödenmesi gereken bedel tahmini olarak 8,00 ¢ ise

$$\text{Fiyat} = (19.2 \text{ kWsa}) (8,00 \text{ ¢}) = 1,54 \text{ $}$$

Bizim azalan enerji kaynaklarımıza talepler, elektrik cihaz-

larının cihazlarımızın enerji tüketiminin farkında olmamızı gerekli kılmıştır. Her elektrik aleti harcadığı gücün miktarını hesaplamak için ihtiyaç duyduğunuz bilgiyi ihtiyac eden bir etiket taşır. Pek çok durumda, güç tüketimi tipki elektrik ampullerinde olduğu gibi watt biriminde doğrudan belirtilir. Bunun dışındaki durumlarda, alet tarafından kullanılan akımın miktarı ve çalıştığı potansiyel farkı verilir. Bu bilgi ve Es. 27.22 herhangi bir elektrik cihazının çalışma maliyetini hesaplamak için yeterlidir.

Alıştırma Sayet dağıtım şirketi elektriği 0,08 \$/kWsa olarak satıyorsa, 100 W lik bir ampul 24 saat çalıştırmanın bedeli nedir?

Cevap 0,19\$.

ÖRNEK 27.9 Elektron demetindeki akım

Bir parçacık hızlandırıcıda, elektronlar 40.0 MeV lik enerjile çıkıyor ($1\text{MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$). Elektronlar kararlı bir demet şeklinde çıkmazlar, fakat daha ziyade 250 atma/s lik hızlarda bir atma şeklindedirler. Bu Şekil 27.18 deki atmalar arasındaki zaman 4 ms'ye karşılık gelir. Her bir atma 200 ns durumunu muhafaza eder ve bu atmalardaki elektronlar 250 mA lik akım meydana getirir. Akım, atmalar arasında sıfırdır. (a) Atma (puls) başına hızlandırıcı tarafından ne kadar elektron çıkartılır?

Çözüm $dQ = Idt$ biçimindeki 27.2 denklemini kullanarak atma (puls) başına yük miktarını bulmak için integral alırız. Atma mevcutken akım sabittir. O halde,

$$Q_{\text{atma}} = I \int dt = I\Delta t = (250 \times 10^{-3} \text{ A}) (200 \times 10^{-9} \text{ s}) \\ = 5,00 \times 10^{-8} \text{ C}$$

elde edilir. Atma başına yük miktarını elektron yüküne bölgerek atma başına elektron sayısını buluruz. Yani;

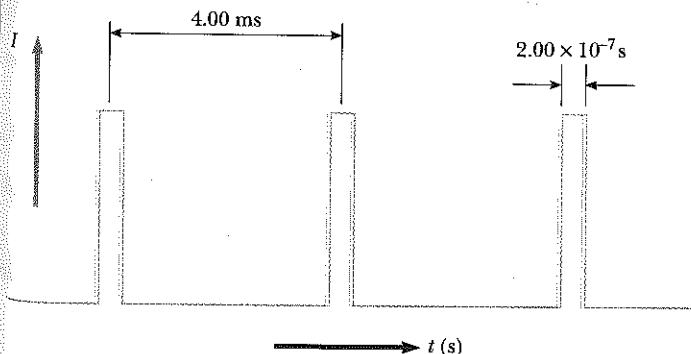
$$\text{Atma başına elektron sayısı} = \frac{5,00 \times 10^{-8} \text{ C}/\text{atma}}{1,60 \times 10^{-19} \text{ C}/\text{elektron}} \\ = 3,13 \times 10^{11} \text{ elektron/atma}$$

(b) Hızlandırıcı tarafından oluşturulan atma başına ortalama akım nedir?

Çözüm Ortalama akım, Es. 27.1'de $I_{\text{or}} = \Delta Q/\Delta t$ şeklinde verilir. Atmalar arasındaki zaman aralığı 4,00 ms olduğuna ve (a) şıkkından atma başına yükü bildiğimize göre,

$$I = \frac{Q_{\text{atma}}}{\Delta t} = \frac{5,00 \times 10^{-8} \text{ C}}{4,00 \times 10^{-3} \text{ s}} = 12,5 \mu\text{A}$$

elde ederiz, ki bu da 250 mA dir ve sadece pik akımının %0,005'i kadardır.



Şekil 27.18 Akımın elektron demetinin atma zamanına karşı grafiği.

(c) Elektron demeti tarafından sağlanan maksimum güç nedir?

Çözüm Tanıma göre güç, birim zaman başına harcanan enerjidir. Böylece maksimum güç atma ile harcanan enerjinin atma zamanına oranıdır:

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= \frac{E}{\Delta t} \\ &= \frac{(3,13 \times 10^{11} \text{ elektron /atma}) (40,0 \text{ MeV/elektron})}{2,00 \times 10^{-7} \text{ s/atma}} \end{aligned}$$

$$= (6,26 \times 10^{19} \text{ MeV/s}) (1,60 \times 10^{-13} \text{ J/MeV})$$

$$= 1,00 \times 10^7 \text{ W} = 10,0 \text{ MW}$$

sonucu bulunur. Bu gücü doğrudan hesaplayabildik, ~~ka~~ bul edelim ki her bir elektron hızlanmadan önce sıfır enerjiye sahipti. O halde tanımdan faydalanan her bir elektron 40.0 MeV lik son enerjiyi kazanmak için 40.0 MV lik potansiyel farkı altında gitmeliydi. Buna göre,

$$\mathcal{P} = I\Delta V = (250 \times 10^{-3} \text{ A}) (40,0 \times 10^6 \text{ V}) = 10,0 \text{ MW}$$

elde edilir.

ÖZET

Bir iletkendeki elektrik akımı

$$I \equiv \frac{dQ}{dt} \quad (27.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada dQ iletkenin kesit alanından dt süresinde geçen yüktür. SI biriminde akım **amper** (A) cinsinden verilir ve $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ dir.

Bir iletkendeki ortalama akım, yük taşıyıcılarının hareketine

$$I_{\text{or}} = nqv_s A \quad (27.4)$$

şeklinde bağlıdır. Burada n yük taşıyıcılarının yoğunluğu, q bunların yükü, v_s sürüklendirme hızı, A ise kesit alanıdır.

Akım yoğunluğu J 'nin büyüklüğü, birim alan başına düşen akımdır:

$$J \equiv \frac{I}{A} = nqv_s \quad (27.5)$$

Bir iletkendeki akım yoğunluğu, elektrik alanla

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (27.7)$$

şeklinde orantıldır. Buradaki σ sabitine maddenin **iletkenliği** denir. σ 'nın tersine **özdirenç** denir ve ρ ile gösterilir. Yani $\rho = 1/\sigma$ dir. 27.7 Eşitliği Ohm kanunu olarak bilinir ve iletkenliği, uygulanan alandan bağımsız olan maddenin ohm kanununa uyduğu söylenir.

Bir iletkenin **direnci**, ya iletkenin boyu ya da iletkenin uçları arasındaki potansiyel farkına bağlı olarak tanımlanır:

$$R \equiv \frac{\ell}{\sigma A} \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad (27.8)$$

Burada ℓ iletkenin boyu, σ malzemenin iletkenliği, A kesit alanı, ΔV iletkenin uçları arasındaki potansiyel farkı ve I taşınan akımdır.

SI birimlerde direncin birimi amper başına volt olup, bu 1 ohm (Ω) olarak tanımlanır. Yani, $1\Omega = 1 \text{ V/A}$ dir. Direnç uygulanan potansiyelden bağımsız ise iletken Ohm Yasasına uyar.

Bir metaldeki elektrik iletkenliğinin klasik modelinde, elektronlar bir gazın molekülleri gibi düşünülür. Elektrik alanı yokken, elektronların ortalama hızı sıfırdır. Bir elektrik alan uygulandığında, elektronlar bir (ortalama) v_s , **süreklenme hızı** ile hareket ederler. Bu hızın yönü, elektrik alanın yönüne zittir. Süreklenme hızı,

$$v_s = \frac{qE}{m_e} \tau \quad (27.14)$$

ile verilir. Burada τ , metalin atomları ile elektronların çarpışmaları arasında ortalama zaman, m_e elektron kütlesi ve q yüküdür. Bu modele göre madde nin özdirenci

$$\rho = \frac{m_e}{nq^2\tau} \quad (27.17)$$

ile verilir. Burada n birim hacim başına düşen serbest elektron sayısıdır.

Bir iletkenin özdirenci, sıcaklıkla yaklaşık, lineer bir şekilde

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (27.19)$$

gibi değişir. Burada α özdirençin sıcaklık katsayısı, ρ_0 ise herhangi bir T_0 referans sıcaklığındaki özdirençtir.

Bir rezistansın uçları arasına ΔV potansiyel farkı uygulandığında, güç veya rezistansa enerji verilme hızı,

$$P = I \Delta V \quad (27.22)$$

dir. Bir rezistansın uçları arasındaki potansiyel farkı $\Delta V = IR$ ile verildiğinde, rezistans üzerinde harcanan güç,

$$P = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \quad (27.23)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bir rezistansa verilen elektriksel enerji, rezistansta iç enerji olarak ortaya çıkar.

SORULAR

- Gazete makaleleri sık sık "kurbanın vücutundan 10000 V luk elektrik akımı geçti" gibi deyimler ihtiyaç eder. Bu deyimde yanlış olan nedir?
- Dirençle özdirenç arasındaki fark nedir?
- Dairesel dik kesitli A ve B telleri aynı metalden yapılmış ve aynı boydadırlar; fakat A telinin direnci B nin kinden 3 kat daha büyütür. Bunların dik kesitlerinin oranı nedir? Yarıçaplarını kıyaslayınız?
- Bir iletkende kararlı bir akım geçirmek için ne gereklidir?
- Tüm iletkenler Ohm kanununa uyar mı? Cevabınızı doğrulayan örnekler veriniz?
- Belli bir iletkenin uygulanan voltaj iki katına çıkarıldığında, akının 3 katına çıktıığı gözlenmektedir. İletken hakkında ne söylersiniz?
- Elektrik devresini su şebekesiyle kıyasladığınızda, güç kaynağının, direncin, yükün ve potansiyel farkının karşılıkları nelerdir?
- Neden, "iyi" bir elektrik iletkeni aynı zamanda "iyi" bir termal iletken olmalıdır?
- Bir maddenin direnci arttıkça, sıcaklığının da artması gerektiğini açıklamak için maddenin atomik teorisini kullanınız.
- Bakır ve silisyum için direnç, sıcaklıkla nasıl değişir? Bunlar neden farklıdır?
- Bir süper iletkende, uygulanan herhangi bir voltaj olmaksızın, akımın nasıl var olabildiğini açıklayınız.
- Süper iletken aygıtın çalışmasını pahali kılan bir gerekçe söyleyin. Prensipte bu kısıtlamanın üstesinden gelinebilir mi?

13. Bir tel içinde elektronlar dirence karşılaşmadan serbestçe hareket edebilse idi, elektronların telin içindeki sürüklendirme hızı ve teldeki akım ne olurdu?
14. Yükler bir metalden yavaş akiyorsa neden bir düğmeyi açığınızda ışığın size gelmesi birkaç saatı gerektirmiyor?
15. Bir iletkende, elektronları iletken boyunca süren elektrik alanına, ışık hızına yakın bir hızla yayılmasına rağmen, elektronların sürüklendirme hızı çok küçüktür. Bu ikisinin birden nasıl doğru olabileceğini açıklayın. Aynı elektron, iletkenin bir ucundan öteki ucuna hareket eder mi?
16. Aynı uzunluk ve yarıçapa sahip iki iletken, aynı potansiyel farkına bağlanmışlardır. Bunlardan biri, diğerinin iki katı dirence sahiptir. Hangi iletken daha çok güç çekerdir?
17. Araba akülerini genellikle Amper-saat şeklinde sınıflandırırlar. Akım, güç, enerji veya aküden sürülen yükün miktarını bu terim tanımlar mı?
18. Nikrom kullanarak bir elektrik ısıtıcı tasarlasaydınız 1000 W gibi özel bir güç çekisi elde etmek için telin hangi parametresini değiştirdiniz?
19. Tipik bir aylık elektrik kullanım ücreti şu şekilde tespit edilmiştir. İlk 16 kWh için 2 \$; daha sonraki 34 kWh için 8,00 cent/kWh; daha sonraki 50 kWh için 6,5 cent/kWh; daha sonraki 100 kWh için 5 cent/kWh, bundan sonraki 200 kWsa için 4 cent/kWh; ve 400 kWh'i aşan tüketimde her kilowat-saat için 3,5 cent/kWh tir. Bu ücretlendirmeye göre, 327 kWh'ın bedeli nedir?

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çözmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

Kesim 27.1 Elektrik Akımı

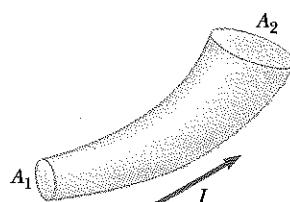
1. Bir özel katot işini "tüpünde, demetin ölçülen akımı 30.0 μ A dir. Her 40 s de tüp ekranına kaç elektron çarpar?
2. 700 cm^2 yüzey alanına sahip gümüş kaplı bir çay demliği, gümüş nitrat (Ag^+NO_3^-) ihtiya eden elektrolit kabının negatif elektrotuna bağlanmıştır. Sayet $1,8 \Omega$ dirence sahip olan kap 12 V luk bir bataryaya bağlanırsa, çay demliğini $0,133 \text{ mm}$ kalınlıklı bir gümüş tabaka ile kaplamak için ne kadar beklemek gereklidir? (Gümüşün yoğunluğu $10.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.)
- WEB** Farz edelim ki bir iletkenin geçen akım, $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$ bağıntısına uygun şekilde zamanla exponansiyel olarak azalmaktadır. Burada I_0 ($t = 0$ daki) ilk akım, τ ise zaman biriminde bir sabittir. İletken içinde sabit bir gözleme noktası ele alalım. (a) $t = 0$ ile $t = \tau$ aralığında bu noktadan ne kadar yük geçer? (b) $t = 0$ ile $t = 10\tau$ aralığında (c) $t = 0$ ile $t = \infty$ aralığında bu noktadan ne kadar yük geçer?
4. Hidrojen atomunun Bohr modelinde, en düşük enerji halindeki bir elektron protondan $5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$ mesafede dairesel bir yol izler. (a) Elektronun hızının $2,19 \times 10^6 \text{ m/s}$ olduğunu gösteriniz. (b) Yörüngedeki bu elektronun sağladığı etkin akım nedir?
5. 8 nC luk yük taşıyan küçük bir küre, yahtkan bir çubuğu ucundaki bir cemberde dönmektedir. Dönme frekansı $100\pi \text{ rad/s}$ dir. Bu dönen yük, ne kadarlık bir ortalama akımı temsil eder?

6. Küçük bir küre q yükü taşımaktadır ve dairesel yahtkan bir ipin etrafında hızla döndürülmemektedir. Dönmenin açısal frekansı w dir. Bu dönen yükün temsil ettiği ortalama akım nedir?

7. 2 cm^2 lik bir yüzeyden geçen q (C cinsinden) yükünün miktarı zamanla $q = 4t^3 + 5t + 6$ şeklinde değişmektedir. (Burada t saniye cinsindendir.) (a) $t = 1,0 \text{ s}$ için yüzeyden geçen ani akım ne kadardır? (b) Akım yoğunluğunun değeri ne kadardır?

8. Bir elektrik akımı $I(t) = 100\sin(120\pi t)$ dir. Burada I amper, t ise saniyedir. $t = 0$ dan $t = (1/240)$ s ye kadar akım vasıtıyla taşınan toplam yük nedir?

9. Şekil P27.9, çapı düzgün olmayan dairesel bir iletkenin bir kısmını göstermektedir. İletken 5 A lik akım taşımaktadır. A_1 dik kesitin yarıçapı $0,4 \text{ cm}$ dir. (a) A_1 deki akım yoğunluğunun büyüklüğü ne kadardır? (b) A_2 deki akım yoğunluğu A_1 dekinin dörtte biri ise, iletkenin A_2 deki yarıçapı ne kadardır?



Şekil P27.9

10. Van de Graaff üretici 2,00-MeV lik bir proton ve bir nötron ihtiya eden ağır hidrojen çekirdeği olan döteron demeti üretiyor. (a) Şayet demet akımı $10.0 \mu\text{A}$ ise, döteronlar ne kadar uzaklaşır? (b) Döteron demetini kararlı yapan elektrostatik geri püskürtme faktöründür? Açıklayınız.
11. Belli bir yüksek enerjili hızlandırıcıdan çıkan elektron demeti $1,00 \text{ mm yarıçaplı dairesel kesit alanına sahiptir}$. (a) Eğer akım demeti $8,00 \mu\text{A}$ ise, demetin düzgün olduğunu kabul ederek demetteki akım yoğunluğu nedir? (b) Elektronların hızı ışık hızına çok yakındır. Öyle ki onların hızını ihmali edilebilir bir hata ile $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ alabiliriz. Demetteki elektron yoğunluğunu bulunuz. (c) Hızlandırıcıdan Avagadro sayısı kadar elektron çıkıştı ne kadar zaman alır?
12. $4,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ kesit alanına sahip bir alüminyum tel $5,00 \text{ A}$ lik akım taşımaktadır. Teldeki elektronların sürüklene hızını bulunuz. Alüminyumun yoğunluğu $2,70 \text{ g/cm}^3$ tür. (Her bir atomun bir elektron sağlandığını varsayıñ.)
- Kesim 27.2 Direnç ve Ohm Yasası**
13. 240Ω dirence sahip bir ışık ampulune 120 V luk bir potansiyel farkı uygulanırsa ampulden geçen akım nedir?
14. Bir direnç, düzgün kesit alanı $5,00 \text{ mm}^2$ olan bir karbon çubuktan yapılmıştır. Çubugun uçlarına 15 V luk bir potansiyel farkı uygulandığında çubuktan $4 \times 10^{-3} \text{ A}$ lik bir akım geçmektedir. (a) Çubugun direncini, (b) çubugun uzunluğunu bulunuz
- WEB 15. Dik kesit alanı $0,600 \text{ mm}^2$ ve boyu $1,5 \text{ m}$ olan bir tungsten tele $0,900 \text{ V}$ luk bir potansiyel farkı uygulanıyor. Teldeki akım ne kadardır?
16. $1,2 \text{ cm}$ yarıçaplı düzgün bir iletken, 120 V/m lik bir elektrik alanı tarafından üretilen 3 A lik bir akım taşımaktadır. Maddenin özdirenci ne kadardır?
17. 1 g bakırda düzgün bir tel imal etmek istediğiniz varsayıñ. Bakırın hepsini kullanmak şartıyla telin direncinin $R = 0,5 \Omega$ olması için, (a) Telin boyu, (b) Telin çapı ne kadar olmalıdır?
18. (a) Lastik bir şeridin uçları arasındaki direncinin mertebesini tahmini olarak bulunuz. (b) Peninin (İngiliz bakır parası) heriki tarafında başı ve kuyrukları arasındaki direncin tahmini mertebesini bulunuz. Her bir durumda, onlar için tahmin ettiğiniz veya ölçügünüz değerler ve veri olarak aldiğinizni belirtiniz. (c) Şayet 120 V luk bir güç kaynağına bağlanırsa her bir taşıyıcıdaki akımın mertebesi ne olacaktır? (DİKKAT! Bunu evde denemeyiniz!)
19. Bir parça kübik gümüşün ($\text{yoğunluğu} = 10.5 \text{ g/cm}^3$) kütlesi 90 g dir. (a) Küpün zıt yüzleri arasındaki direnç ne kadardır? (b) Her bir gümüş atomu başına bir iletkenlik elektronu varsa, zıt yüzeyler arasına 10^{-5} V luk bir potansiyel farkı uygulandığında, elektroların ortalama sürüklene hızı ne olur? Gümüşün atom numarası 47 ve atomik kütlesi $107,8$ dir.
20. R dirençli bir metal tel üç eşit parçaya kesilmiş ve yeni bir biçimde yan yana bağlanmıştır. Boyu orijinal telin üçte birine eşit olan yeni telin direnci nedir?
21. R direncine sahip bir tel, küçük bir delikten çekilmek suretiyle ilk boyunun $1,25$ katına uzatılmıştır. Uzatılmadan sonra telin direncini bulunuz.
22. Aynı uzunlukta alüminyum ve bakır tellerin, aynı dirence sahip oldukları bulunmuştur. Yarıçaplarının oranı ne kadardır?
23. Atmosferde, (yüklü ve hareketli bulutlardan dolayı) elektrik alanının 100 V/m olduğu bir yerde $6 \times 10^{-13} \text{ N/m}^2$ lik akım yoğunluğu mevcuttur. Dünya atmosferinin böyle bir bölgesinde elektrik iletkenliğini hesaplayınız.
24. Şekil P27.24 teki çubuk (ölçekli çizilmemiştir) iki maddeden yapılmıştır. Her ikisi de bir kenarı $3,0 \text{ mm}$ olan bir kare biçimine sahiptir. Birinci madde $4,00 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ dirence ve 25.0 cm uzunluğunda sahipten, ikinci madde $6,00 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ dirence ve 40.0 cm uzunluğunda sahiptir. Çubugun uçları arasındaki direnç nedir?



Şekil P27.24

Kesim 27.3 Elektriksel İletkenlik İçin Bir Model

- WEB 25. Bir bakır teldeki serbest elektronların sürüklene hızı $7,84 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ise iletkendeki elektrik alanını hesaplayınız.
26. Bir iletkendeki akım iki katına çıkarılırsa (a) yük taşıyıcı yoğunluğu, (b) akım yoğunluğu (c) elektron sürüklene hızı ve (d) çarpışmalar arasındaki ortalama zaman ne olur?
27. İletkenlik elektronlarının ortalama termal hızları $8,6 \times 10^5 \text{ m/s}$ ise, Örnek 27.1 deki verileri kullanarak, bakırda elektronların çarpışmalar arası ortalama serbest yolunu hesaplayınız.

Kesim 27.4 Direnç ve Sıcaklık

28. Death Valley'de sıcaklığın 58°C olduğu bir günde fotoğraf çekerken, Bill Hiker bir bakır tele belli bir gerilim uygulandığında 1 amperlik akım elde edildiğini bulur. Daha sonra Bill Antartika'ya seyahat eder ve aynı tele aynı gerilimi uygular. Şayet sıcaklık -88°C ise ne kadar akım kaydeder? Telin biçiminin ve boyunun değişmediğini kabul ediniz.
29. Belli bir tungsten filamantı ampul soğukken 19Ω ve sicakken 140Ω dirence sahiptir. Burada Eş. 27.21 in büyük sıcaklık aralığında kullanılabılır olduğunu

- varsayıñ. Filamanın sıcak olduğu durumdaki sıcaklığını bulunuz. (İlk sıcaklığı 20°C alınız.)
- 30.** Bir karbon ve bir nikrom tel seri olarak bağlanmışdır. Şayet 0°C de eşdeğer direnç $10.0 \text{ k}\Omega$ ise her bir telin direnci nedir? Eşdeğer direnç sıcaklıkla değişir mi? (Seri şekilde bağlı iki direncin eşdeğeri o dirençlerin toplamıdır.)
- 31.** 0,1 mm çapında bir alüminyum tel, uzunluğu boyunca yer alan $0,2 \text{ V/m}$ lik bir düzgün elektrik alanına sahiptir. Telin sıcaklığı 50°C dir, Atom başına bir serbest elektron olduğunu kabul ediniz. (a) Tablo 27.1 deki bilgileri kullanarak özdirenci bulunuz. (b) Teldeki akım yoğunluğu ne kadardır? (c) Teldeki toplam akım ne kadardır? (d) İletkenlik elektronlarının sürüklendirme hızı ne kadardır? (e) Telin 2 m lik kısmının uçları arasında ne kadarlık bir potansiyel farkı olmalı ki, $0,2 \text{ V/m}$ lik elektrik alanı şiddetini meydana getirebilse?
- 32. Tarama Problemi.** Bir alüminyum çubuk 20°C de $1,234 \Omega$ luk dirence sahiptir. Çubuğu boyutlarında ve özdirencindeki değişikleri dikkate alarak çubuğu 120°C deki direncini hesaplayınız.
- 33.** Sicaklığı 25°C den 50°C ye çıkarılan bir demir fıtılın direncinde meydana gelen kesirsel değişim ne kadardır?
- 34.** Platin bir telin direnci düşük sıcaklık ölçümü için kalibre edilmiştir. 20°C de direnci 1Ω olan bir platin tel, 77 K (-196°C) deki sıvı azot içine daldırılmıştır. Platin tel' in sıcaklıkla değişimi lineer ise -196°C de platin telin beklenen direnci ne kadardır? ($\alpha_{\text{platin}} = 3,92 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)
- 35.** Hangi sıcaklıkta tungsten, bakırdan dört kat fazla özdirence sahip olur? (Bakırın 20°C de olduğunu kabul ediniz.)
- 36.** Nikrom telin bir parçası başlangıçta 20°C dendir, Tablo 27.1 deki verileri kullanarak, direncini iki katına çıkaracak olan sıcaklığı hesaplayınız.
- 40.** **Tarama Problemi.** 110 V ta çalışan bir daldırmalı su ısıticisinin, $1,5 \text{ kg}$ suyu sıcaklığını 10.0 dk içinde 10°C den 50°C ye çıkarması için direnci ne olmalıdır?
- 41.** Bir anlık 140 V üreten bir kaynak düşününüz. 120 V ve 100 W lik bir ampulün çıkış gücü yüzde olaraq ne kadar artar? (Ampulün direncinin değişmediğini kabul ediniz.)
- 42.** 110 V ta çalışması için tasarlanmış 500 W lik bobin şeklindeki ısıtıcı $0,500 \text{ mm}$ çaplı nikrom telden yapılmıştır. (a) Nikromun özdirencinin 20°C deki değerinde sabit kaldığını kabul ederek kullanılan telin uzunluğunu bulunuz. (b) Şimdi sıcaklıkla özdirençin değiştiğini düşününüz. (a) İlkündeki bobin 1200°C ye kadar ısıtıldığında çektiği güç ne kadardır?
- 43.** Nikrom telden yapılmış bir bobin 25.0 m uzunluğundadır. Tel, $0,400 \text{ mm}$ çapına sahiptir ve 20°C sıcaklığındadır. Şayet bobinden $0,500 \text{ A}$ lik akım geçerse, (a) teldeki elektrik alanın genliği, (b) çektiği güç, (c) şayet telin sıcaklığı 340°C ye çıkarılırsa ve uçlar arasındaki potansiyel farkı sabit kalırsa çektiği güç nedir?
- 44.** Bir akü Amper-Saat (A.sa) olarak karakterize edilmiştir. Örneğin, batarya $3,00 \text{ sa}$ boyunca $2,00 \text{ A}$ lik akım ürettiğinde, $6,00 \text{ A.sa}$ şeklinde karakterize edilir. (a) Batarya 12.0 V ve 55.0 A.sa ta tutulurken kilowatt saat cinsinden sağlayacağı enerji nedir? (b) Kilowatt-saat $6,00$ sent ise batarya tarafından üretilen elektrik enerjisinin değeri nedir?
- 45.** 10.0 V luk bir batarya, 120Ω luk bir dirence bağlanmıştır. Bataryanın iç direncini ihmal ederek, dirençteki güç kaybını hesaplayınız.
- 46.** Birleşik Devletlerde herkesin bir elektrik saatı olduğu ve her bir saatin $2,50 \text{ W}$ oranında enerji kullandığı tahmin edilmektedir. Bu enerji kaynağına ulaşmak için, ortalama $\%25.0$ verimde bitkilerin kömür ateşinde yakılmasıyla elektrik enerjisini üreten bir sisteme yaklaşık olarak saat başına kaç ton kömür yakılır? (Kömürün yanma isisi 33.0 MJ/kg dir.)
- 47.** 110 V luk şebekeden $1,70 \text{ A}$ çekeni bir lambanın masrafını, elektrik enerjisinin fiati 6 sent/kWsa olması halinde hesaplayınız?
- 48.** Kahve pişiren bir ısıtıcı, 120 V 'ta çalışıyor ve 2 A lik akım çekiyor. Üretilen isının tamamının su tarafından aldığı varsayıarak, $0,5 \text{ kg}$ 'lik suyu oda sıcaklığından (23°C) kaynama noktasına çıkarmak için gerekli süreyi bulunuz?
- 49.** Belli bir tost makinası Nikrom direnç telinden yapılmış bir ısıtıcıya sahiptir. Bu ısıtıcı 120 V luk bir kaynağa ilk takıldığından (tel 20°C dendir) ilk akım $1,8 \text{ A}$ dir. Ancak, direnç elemanı ısındıkça akım düşmeye başlamaktadır. Tost makinası son çalışma sıcaklığına ulaştığı zaman, akım $1,53 \text{ A}'e$ düşmektedir. (a) Çalışma sıcaklığında iken tost makinasının çektiği gücü bulunuz. (b) Isıtıcı elemanın son sıcaklığı ne kadardır?

Kesim 27.6 Elektriksel Enerji ve Güç

- 37.** Bir tost makinası 120 V luk bir güç kaynağına bağlandığında 600 W ta çalışıyor. Tost makinasının direnci nedir ve taşıdığı akım ne kadardır?
- 38.** Bir hidroelektrik santralde, türbin jeneratöre 1500 BG sağlıyor ve bu mekanik enerjinin $\% 80$ i elektrik enerjisine dönüştürülyor. Bu şartlar altında 2000 V luk bir potansiyel farkıyla jeneratörün sağlayacağı akım ne kadardır?
- WEB 39. Tarama Problemi.** 110 V ta çalışan bir daldırmalı su ısıticisinin, $1,5 \text{ kg}$ suyu sıcaklığını 10.0 dk içinde 10°C den 50°C ye çıkarması için direnci ne olmalıdır?

50. 80 ft yüksekliğindeki bir tavanı ısıtmak için, foot kare başına yaklaşık 10.0 W lik güç gerekmektedir. Elektriğin fiyatı 80 sent/kWh olmak şartıyla, $10.0\text{ft} \times 15.0\text{ ft}$ büyülüğündeki bir odayı ısıtmak için kullanılması gereken elektriğin bir günlük fiyatı nedir?
51. Bir kişinin rutin olarak kullandığı saç kurutucusunun bir yıllık maliyetini tahmin ediniz. Şayet kendiniz kurutucu kullanmıyorsanız, kullanan birisinin görüşünü alınız. Böylece onların değerlerini ve sizin tahminlerinizi belirtiniz.

EK PROBLEMLER

52. Bir ışık ampulu "25 W 120 V" şeklinde, bir diğeri "100 W ve 120 V" şeklinde etiketlidir; bunun manası her bir ampul, sabit 120 V ta çalıştırıldığında her biri ayrı, ayrı kendi gücünü dönüştürür. (a) Her bir ampulün direncini bulunuz. (b) Zayıf ışıklı bir ampul içinden 1 C luk yükün geçmesi ne kadar sürer? Giriş zamanıyla çıkış zamanı kıyaslandığında bu yük farkı nasıldır? (c) Bu zayıf ışıklı ampulden 1 J lük enerji geçmesi ne kadar sürer? Giriş zamanıyla çıkış zamanı kıyaslandığında bu enerji farkı nasıldır? (d) Şayet elektrik şirketi kWh ini 70 sent'e satarsa, zayıf ampulün 30 gün sürekli olarak çalışmasının fiyatını bulunuz. Elektrik şirketi ne ürününü satar? Bu niceliğin SI birimlerinde fiyatı nedir?
53. 200 km uzunluğunda ve 2,00 cm çaplı bir yüksek gerilim nakil hattı 1000 A lik sabit akım taşıyor. Şayet iletken $8,00 \times 10^{28}$ elektron/m³ serbest elektron ihtiyaca eden bakır tel ise, bir elektronun tüm kablo boyunca hareketi ne kadar sürer?
54. Bir yüksek gerilim nakil hattı 100 millik mesafede 700 KV da 1000 A lik akım taşıyor. Şayet telin direnci 0,500 Ω/m ise, direnç kayıplarından dolayı ne kadar güç kaybı olur?

55. Özdirencin sıcaklık katsayısının daha genel tanımı

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

dir. Burada ρ , T sıcaklığındaki özdirençtir. (a) α yi sabit kabul ederek,

$$\rho = \rho_0 e^{\alpha(T - T_0)}$$

- olduğunu gösteriniz. Burada ρ_0 , T_0 sıcaklığındaki özdirençtir. (b) ($e^x \approx 1 + x$; $x \ll 1$) seri açılımını kullanarak, $\alpha(T - T_0) \ll 1$ için özdirencin yaklaşık olarak $\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$ ifadesiyle verilebileceğini gösteriniz.
56. Bir bakır kablo yalnızca 2,00 W/m lik güç kaybıyla 300 A lik akım taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Buna göre bakır kablonun çapı ne olmalıdır?

57. Farklı uzunluk ve dik kesitlere sahip nikrom tellerin elektriksel özdirençlerinin ölçülmesi için bir deney hazırlanıyor. Ölçü takımı için, bir öğrenci $7,3 \times 10^{-3}$ m² dik kesit alanlı #30 ayarlı tel kullanıyor. Telin uçları arasındaki voltaj ve teldeki akım bir voltmetre ve bir ampermetre ile ölçülüyor. Üç farklı uzunluktaki tellerle alınan ölçüler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Tellerin dirençlerini ve karşılık gelen özdirenç değerlerini hesaplayınız? Özdirencin ortalama değeri ne kadardır? Bunu Tablo 27.1 de verilen değerlerle kıyaslayınız.

$L(\text{m})$	$\Delta V(\text{V})$	$I(\text{A})$	$R(\Omega)$	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$
0,54	5,22	0,500		
1,028	5,82	0,276		
1,543	5,94	0,187		

58. Bir elektrik dağıtım firması evlere bir ana şebekeyeden (120 V) iki bakır telle elektrik sağlamaktadır. Bu tellerin her biri 50 m boyunda ve 300 m başına 0,108 Ω luk bir dirence sahiptir. (a) 110 A'lik akım için evdeki voltajı bulunuz. Bu akım için (b) kullanımının satın aldığı gücü bulunuz, (c) bakır tellerde harcanan gücü bulunuz.
59. x ekseni boyunca uzanan düzgün silindirik bir tel 0,500 m uzunluğunda ve 0,200 mm çapındadır. Bu, $\rho = 4,00 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ özdirençli ohm kanuna uyan bir maddeden yapılmıştır. $x = 0$ da potansiyel farkının 4,00 V ve $x = 0,500$ m de $V = 0$ olduğunu kabul ederek, (a) teldeki \mathbf{E} elektrik alanını, (b) telin direncini, (c) teldeki akımı, (d) teldeki \mathbf{J} akım yoğunluğunu bulunuz. (e) $\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$ olduğunu gösteriniz.
60. x ekseni boyunca uzanan düzgün silindirik bir tel L uzunluğunda ve d çapındadır. Bu, ρ özdirençli ohm kanuna uyan bir maddeden yapılmıştır. $x = 0$ da potansiyel farkının V ve $x = L$ de $V = 0$ olduğunu kabul ederek, L , d , V , ρ ve fiziksel sabitler terimleri cinsinden, (a) teldeki elektrik alanını, (b) telin direncini, (c) teldeki akımı, (d) teldeki akım yoğunluğu ifadeğerini vektör notasyonunda türetiniz. (e) $\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$ olduğunu gösteriniz.
61. Denge sıcaklığına ulaşıldığında, bir lambanın fitilinin uçları arasındaki potansiyel farkı sabit bir düzeyde kararlı kalır. Bu kararlı halde lambanın çektiği akım, lambanın ilk açıldığı andakinin sadece onda biri kadardır. Lambanın, 20 °C de özdirencinin sıcaklık katsayıısı 0,0045 (°C)⁻¹ ise ve direnç sıcaklıkla lineer olarak artırılıyorsa, fitilin son çalışma sıcaklığı ne kadardır?
62. Bir rezistansa uygulanan voltaj 12 V'tan 6 V'a düşünece, rezistansdaki akım 3 A azalmaktadır. Rezistansın direncini bulunuz.

- 63.** Bir elektrikli araba, $2 \times 10^7 \text{ J}$ lük toplam enerjisi 12 V lik bir batarya takımı ile sağlıyor. (a) Elektrik motoru, 8 kW güç çekiyorsa, motorun verdiği akım ne kadardır? (b) Araba, 20 m/s lik kararlı hızla giderken elektrik motoru 8 kW çekiyorsa, arabanın "pili bitmeden önce" gidebileceği uzaklık ne kadardır?

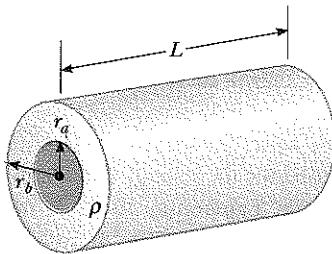
- 64. Tarama Problemi.** Düzgün bir tel ısıtıldığı zaman, onun direnci E_s . 27.21 e göre $R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$ ifadesiyle verilmektedir. Burada α özdirençin sıcaklık katsayısıdır. (a) Tel ısıtıldığı zaman, telin alanının ve uzunluğunun değişimini hesaba katarak direncin

$$R = \frac{R_0[1 + \alpha(T - T_0)][1 + \alpha'(T - T_0)]}{[1 + 2\alpha'(T - T_0)]}$$

- şeklinde olacağını gösteriniz. Burada α' lineer genleşme katsayısıdır (bölüm 19'a bakınız). (b) İlk sıcaklığı 20.0°C den 100.0°C ye ısıtıldığı zaman, 2,00 m uzunluklu ve 0,100 mm yarıçaplı bakır tel için iki ifadenin sonucunu karşılaştırınız.

- 65.** Tablo 27.1 deki özdirenç sıcaklık katsayıları 20°C sıcaklık için tayin edilmiştir. Bu değerler 0°C de ne olacaktır? (İpucu: 20°C deki sıcaklık katsayısı $\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$ ifadesini sağlar. Burada ρ_0 maddenin 20°C deki özdirencidir. 0°C deki α' özdirençin sıcaklık katsayısı, $\rho = \rho'_0[1 + \alpha' T]$ ifadesini sağlamalıdır. Burada ρ'_0 maddenin 0°C deki sıcaklık katsayısidır.)

- 66.** Bir rezistans ρ öz dirençli bir maddeden içi boş silindir şeklinde yapılmıştır. Silindirin boyu L , iç ve dış yarıçapları r_a ve r_b dir (Şekil P27-66). Eksene paralel bir akım üretmek için, silindirin uçları arasına bir potansiyel farkı uygulanıyor. (a) Böyle bir aletin direnci için L , ρ , r_a ve r_b cinsinden genel bir ifade bulunuz. (b) $L = 4 \text{ cm}$ $r_a = 0,5 \text{ cm}$, $r_b = 1,2 \text{ cm}$ ve özdirenç $\rho = 3,5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ için R nin nümerik değerini elde ediniz?



Şekil P27.66

- 67.** Belli bir stereo sistemde, her bir hoparlörün direnci $4,00 \Omega$ dur. Her bir mikrofon devresi ve her bir kanalda 60W lik güç çeken sistem $4,00 \text{ A}$ lik sigorta ihtiyac etmektedir. Bu sistem yüklemeye karşı layık le korunur mu? Muhakemenizle açıklayınız.

- 68.** Sicaklıktan kaynaklanan SI akışı ile (Kesim 20.7) potansiyel farkından kaynaklanan elektrik yük akışı arasında yakın bir benzerlik vardır. Hem dQ/dt termal enerji, hem de dq elektrik yükü iletken madde içindeki serbest elektronlar tarafından taşınır. Bunun sonucu olarak elektriği iyi ileteler genellikle ısını da iyi iletirler. dx kalınlığında ince bir iletken dilimini dikkate alalım. Bunun alanı A , elektrik iletkenliği (J) ve zit yükler arasında dV potansiyel farkı olsun. $I = dq/dt$ akımının

Yük iletimi

İşı iletimindeki karşılığı
(Eş. 20.15)

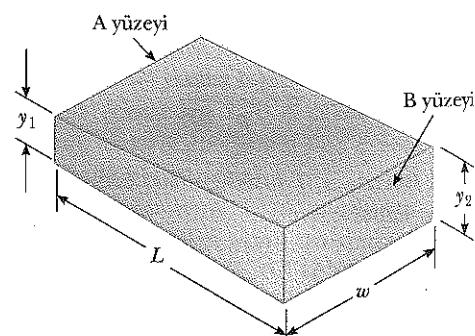
$$\frac{dq}{dt} = \sigma A \left| \frac{dV}{dx} \right| \quad \frac{dQ}{dt} = kA \left| \frac{dT}{dx} \right|$$

ile verildiğini gösteriniz. İşı iletiminde, termal iletkenliği k olan maddede ısı akış hızı dQ/dt (SI da saniye başına joule olarak), dT/dx sıcaklık gradienti yüzünden ortaya çıkar. Yük iletimi eşitliğindeki eksik işaret nereden kaynaklanmaktadır?

- 69.** ρ düzgün özdirençli bir madde, Şekil 27.69 da görüldüğü gibi bir kesik karna şeklinde biçimlendirilmiştir. Bu kamanın A ve w yüzleri arasındaki direncin

$$R = \rho \frac{L}{w(y_2 - y_1)} \ln \left(\frac{y_2}{y_1} \right)$$

ile verilebileceğini gösteriniz.



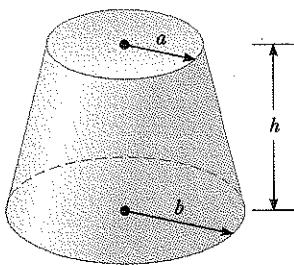
Şekil P27.69

- 70.** ρ özdirençli bir madde, Şekil 27.70 de görüldüğü gibi, h yüksekliğinde kesik bir koni şeklinde biçimlendirilmiştir. Konı kesitinin tabanının yarıçapı b , tava

ninki ise a dir. Koninin herhangi bir dairesel kesiti boyunca akım yoğunluğunun düzgün olduğunu kabul ederek tabanla tavan arasındaki direncin

$$R = \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{h}{ab} \right)$$

olduğunu gösteriniz.



Şekil P27.70

SINAMA SORULARARININ CEVAPLARI

27.1 d, b = c, a. d'deki akım, iki pozitif yükün sola doğru hareketine özdeştir. b ve c'de, dört pozitif yükün yan yönde hareketine özdeştir çünkü negatif yüklerin sol tarafa hareketi, pozitif yüklerin sağ tarafa hareketine karşılık gelir. (a)'daki akım ise, beş pozitif yükün sağa doğru hareketine özdeştir.

27.2 Tel sıkışsa da, her parçası aynı akımı taşıır. Dik kesit alan azalırsa sabit akımı sağlamak için Denklem 27.4'e göre sürüklendirme hızı artar. 27.5 ve 27.6 Denklemlerine göre akım yoğunluğu da artar. Elektrik alanının artması, Eş. 27.7'de görüldüğü gibi akım yoğunluğunun artmasına sebep olur. Bu açıklamaları takip ederek, küçük bölgelerde elektrik alan çizgilerinin sıkıştığını ve sonuçta elektrik alan büyülüüğünü arttığını görürsünüz.

27.3 $1/R$. Çizginin eğriliği maddenin omik olmadığını (direncin potansiyel farkı ile değiştiği) gösterir. Direncin tanımı bu durumlar içinde geçerli olduğu için eğrinin farklı noktaları için farklı R değerleri ile 27.8 Denklemi hala uygulanabilir.

27.4 Kablo bir arabadan diğerine ulaşabilecek kadar en kısa ℓ uzunlığında, oldukça kalın (büyük A) ve küçük ρ özdirençli maddeden yapılmalı. Tablo 27.1'den görüleceği gibi, bakır veya alüminyumu düş-

- 27.1 Sıcaklığın fonksiyonu olarak bir yarıletken diyonut akım voltaj karakteristiği

$$I = I_0(e^{\Delta V/k_B T} - 1)$$

denklemiyle verilir. Burada ilk simbol e logaritmının tabanını temsil eder. İkinci e elektron yükündür. k_B Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklığıdır. $R = \Delta V/I$ ve I 'yı hesaplamak için, ΔV yi 0,005 V luk aralıklarla $\Delta V = 0,400$ V tan 0,600 V a kadar artırarak bir tablo yapınız. $I_0 = 1,00$ nA olarak kabul ediniz ve R ye karşı ΔV 'nin grafiğini $T = 280$ K, 300 K ve 320 K için çiziniz.

şük özdirençli olduklarından seçmelisiniz. Gümüş ve altın bu tür bir iş için oldukça pahalı olur.

27.5 Ampül açıldığtan hemen sonra. Filament oda sıcaklığında olduğunda direnci düşük ve dolayısı ile akım ($I = \Delta V/R$) büyük olur. Filament ısındığında, direnç artar ve akım düşer. Eski lambalar genellikle ışık açıldığtan hemen sonra patlarlar, çünkü başlangıçta akım "pik" oluşturur ve sıcaklık çok hızla artar ve bu da filamentte bir gerilme oluşturur.

27.6 (c). İki ampüllerde potansiyel farkı aynı olduğundan ve iletkenlere güç aktarımı $P = I\Delta V$ ile verilir. 60-W'lık ampül, yüksek güce sahip olması ile daha çok akım çeker, 30-W'lık ampül büyük dirençli olması ile aynı potansiyelde daha az akım çeker.

27.7 $I_a = I_b > I_c = I_d > I_e = I_f$ bataryanın pozitif ucundan çıkan akımdır ve ikiye ayrılarak ampüllere dağılır, yanı $I_a = I_c + I_e$. Sınamalar 27.6'dan biliyoruz ki 60-W'lık ampülden geçen akım 30-W'lık ampülden geçenden daha büyüktür (bütün akımın "küçük dirençli yoldan" yani 60-W'lık ampülden akmayıcağını not edelim.). Ampüllerde yeni yük oluşmadığından, giren akımlar çıkan akımlara eşittir, yanı $I_c = I_d$ ve $I_e = I_f$. Ampüllerden geçen akımlar toplanarak geri batarya gelirler, $I_f + I_d = I_b$.

SİZCE NEDİR?

Bütün bu aletler birlikte çalıştırılırsa, devre kesici muhtemelen tehlikeli durumu önleremeye yetmeyecektir. Bir devrede pek çok elektrik cihazının fisi prizde takıldığı zaman, devre kesicinin devreye girmesinin sebebi nedir? (George Simple)



b ö l ü m

28

Doğru Akım Devreleri

Bölüm İçeriği

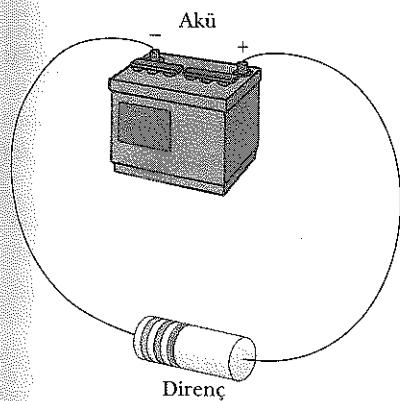
- 28.1** Elektromotor Kuvveti
- 28.2** Seri ve Paralel Bağlı Dirençler
- 28.3** Kirchhoff Kuralları
- 28.4** RC Devreleri
- 28.5** (Seçmeli) Elektrik Ölçen Aygıtlar
- 28.6** (Seçmeli) Ev Elektrik Tesisatı ve Emniyeti

Bu bölüm, çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanmış baryalar, dirençler ve kondansatörlerden oluşan bazı basit devrelerin incelenmesi ile ilgilidir. Bu tür devrelerin analizi, *Kirchhoff kuralları* olarak bilinen iki kurallın kullanılması ile iyice basitleşir. Bu kurallar, enerji ve yükün korunumu kanularından çıkmaktadır. Analiz edilen devrelerin çoğunun *kararlı durumda* olduğu kabul edilecektir; yani bu durumda akım, büyüklük ve yön bakımından sabittir. Bu bölümdeki Kesim 28.4 te, akımın zamanla değiştiği dirençler ve kondansatörlerden oluşan devreleri tartışacağız. Son olarak akım, potansiyel farkı, direnç ve elektromotor kuvvet (*emk*) ölçümlerinde kullanılan çeşitli elektrik cihazları ve teknikler tanıtılacaktır.

28.1 ELEKTROMOTOR KUVVETİ

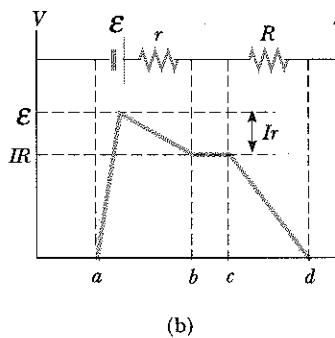
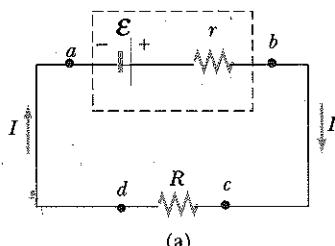
Kesim 27.6'da, **elektromotor kuvvet** (*emk*) denilen bir enerji kaynağı kullanmak suretiyle kapalı bir devrede sabit bir akımın kurulabileceğini gördük. *emk* kaynağı, devrede dolaşan yüklerin potansiyel enerjisini *artıracak* olan (baryaya veya jeneratör benzeri) herhangi bir aygıttır. *emk* kaynağını bir "yük pompası" olarak düşünebiliriz. İki nokta arasında bir elektriksel potansiyel farkı olduğunda, kaynak, yükleri düşük potansiyelden yüksek potansiyele "tepeye doğru" hareket ettirir. Bir kaynağın *emk'sı*, \mathcal{E} , birim yük başına yapılan iş olarak tanımlanır ve *emk*'nın SI deki birimi volt'tur.

Bir dirence bağlı bir baryadan (akü) ibaret olan Şekil 28.1 deki devreyi inceleyelim. Burada, bağlantı kablolarının direncinin olmadığını kabul edeceğiz. Baryanın pozitif ucu, negatif ucundan daha yüksek potansiyele sahiptir. Şayet baryanın kendi iç direncini ihmali edebilseydik, baryanın uçları arasındaki potansiyel farkı (çıkış voltajı), onun *emk'sına* eşit olurdu. Ancak, gerçek bir barya her zaman r ile göstereceğimiz bir iç dirence sahip olduğundan, baryanın çıkış voltajı *emk'sına* eşit değildir. Şekil 28.1'de gösterilen devre, Şekil 28.2(a)'daki devre şeması ile anlatılabilir. Noktalı çizgilerle gösterilen dikdörtgen içerisindeki barya, \mathcal{E} kaynağına seri bağlı olan r iç direnci ile birlikte temsil edilmektedir. Şimdi, Şekil 28.2(a)'da a noktasından b noktasına pozitif bir yükün hareket ettiğini düşünelim. Akünün negatif ucundan pozitif ucuna geçildiğinde, yükün potansiyeli \mathcal{E} kadar *artar*. Fakat yük, r direnci içerisinde gezerken, potansiyeli Ir kadar *azalır*. Burada I devredeki akımdır. Böylece baryanın uçları arasındaki $\Delta V = V_b - V_a$ voltajı,



Şekil 28.1 Bir akünün uçlarına bağlı dirençten ibaret devre.

Bu durumda baryanın çıkış voltajı *emk*'dan Ir kadar düşüktür. Bazı durumlarda çıkış voltajı, *emk*'yi Ir kadar *asabilir*. Bu durum, akım yönü, *emk*'nın yönüne *zit* olduğunda meydana gelir; ki bu olay, bir akünün diğer bir *emk* kaynağı ile şarj edildiği (doldurulduğu) durumda gözlenir.



Şekil 28.2 (a) İç direnci r olan bir emk, \mathcal{E} kaynağının (bu durumda batarya), R dış direncine bağlanması gösteren devre şeması (b) (a) ile gösterilen devredeki potansiyel değişimini gösteren grafik. (a) daki seri devrede akım saat yönündedir.

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir \quad (28.1)$$

ile verilir.¹ Bu ifadeye göre, \mathcal{E} 'nin açık devre voltajına, yani, akımın sıfır olduğu durumda bataryanın kutuların arasındaki voltaja eşdeğer olduğuna dikkat ediniz. emk, batarya üzerindeki etiketlenmiş gerilimdir. Örneğin, D pilinin emk'si 1,5 V'tur. Bataryanın uçları arasındaki gerçek potansiyel farkı, Eş. 28.1 de tanıtılandığı gibi, batarya içerisinde geçen akıma bağlıdır.

Şekil (28.2b) devrede, saat yönünde dolaşıldığında, potansiyel değişimlerini temsil eden bir grafiktir. Şekil 28.2a'yı incelediğimizde görürüz ki; çıkış voltajı ΔV dış direnç R 'nın uçları arasındaki potansiyel farkına eşit olmalıdır. Bu R dış dirence genellikle **yük direnci** denir. Bu yük direnci Şekil 28.1 de görüldüğü gibi basit dirençli bir devre elamanı veya bataryaya bağlı bazı elektrik cihazlarının direnci olabilir (tost makinesi, elektrik ısıtıcısı veya ampul gibi). Direnç batarya üzerindeki yükü temsil eder, çünkü, batarya cihaza enerji sağlamlıdır. Burada, yük direncinin uçları arasındaki potansiyel farkı, $\Delta V = IR$ dir. Bunu 28.1 eşitliğiyle birleştirirsek

$$\mathcal{E} = IR + Ir \quad (28.2)$$

olduğunu görürüz. Bu eşitlikten akımı çözersek,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (28.3)$$

elde ederiz. Buradan görülüyor ki, bu basit devreden geçen akım, hem bataryaya bağlı dış dirence hem de bataryanın iç direncine bağlıdır. Yük direnci R , iç direnç r den çok büyükse, hesaplarda r yi bir çok gerçek devrede olduğu gibi ihmal edebiliriz. 28.2 Eşitliğini I akımı ile çarparsak aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r \quad (28.4)$$

Bu eşitlik bize şunu söyler: güç $\mathcal{P} = I\Delta V$ olduğu için (Bak. Eş. 27.22) emk kaynağının toplam çıkış gücü, $I\mathcal{E}$; yük direncinde joule ısısı olarak harcanan I^2R gücü, *artı* iç dirence harcanan I^2r gücüne dönüşmektedir. Yine, $r \ll R$ ise, batarya tarafından sağlanan gücün çoğu yük direncine aktarılmaktadır.

ÖRNEK 28.1 Bataryanın Çıkış Voltajı

Bir batarya, 12 V'luk emk ve 0,05 Ω 'luk iç dirence sahiptir. Bataryanın uçları 3 Ω 'luk bir yük direncine bağlanıyor. (a) Devredeki akımı ve bataryanın çıkış voltajını bulunuz.

Çözüm Önce Eş. 28.2 sonra Eş. 28.3 ü kullanırsak

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} = \frac{12,0 \Omega}{3,05 \Omega} = 3,93 \text{ A}$$

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir = 12,0 \text{ V} - (3,93 \text{ A})(0,05 \Omega) = 11,8 \text{ V}$$

elde ederiz. Bu sonucun doğruluğunu kontrol için, R yük direnci üzerindeki voltaj düşmesini hesaplayabiliriz:

$$\Delta V = IR = (3,93 \text{ A})(3 \Omega) = 11,8 \text{ V}$$

(b) Yük direncinde ve bataryanın iç direncinde harcanan gücü hesaplayınız. Batarya tarafından sağlanan güç ne kadardır?

Çözüm Yük Direnci tarafından harcanan güç,

$$\mathcal{P}_R = I^2R = (3,93 \text{ A})^2(3 \Omega) = 46,3 \text{ W}$$

ve iç direnç tarafından harcanan güç

$$\mathcal{P}_r = I^2r = (3,93 \text{ A})^2(0,05 \Omega) = 0,772 \text{ W}$$

olar. O halde batarya tarafından sağlanan güç, her iki direnç üzerinde harcanan güçlerin toplam yani 47,1 W olmaktadır. Bu sonuç $\mathcal{P} = I\mathcal{E}$ ifadesi kullanılarak kontrol edilebilir.

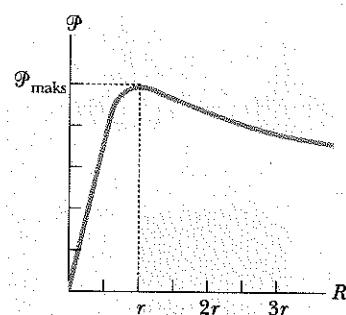
ÖRNEK 28.2 Yük Eşleşmesi

Sekil 28.2'deki R yük direncinde kaybolan gücün, $R = r$ olduğunda maksimum olacağını gösteriniz.

Cözüm Yük direncinde harcanan güç $I^2 R$ ye eşittir. Burada I , Eş. 28.3 ile verilir. O halde

$$\mathcal{P} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}$$

dir. Sekil 28.3'de görüldüğü gibi, \mathcal{P} 'nin R ye göre grafiğini çizersek, \mathcal{P} 'nin, $R = r$ de $\mathcal{E}^2 / 4r$ olan bir maksimum değere ulaştığını görürüz. Bu sonuç \mathcal{P} 'nin R ye göre türevini alıp, çıkan sonucu sıfıra eşitleyip, bu eşitlikten R yi çözerek de ispat edilebilir. Ayrıntılar problem olarak bırakılmıştır (Problem 57).



Şekil 28.3 Bir yük direncine verilen \mathcal{P} gücünün R 'nin fonksiyonu olarak grafiği. R ye verilen güç, $R = r$ olduğu zaman maksimum olduğuna dikkat ediniz.

28.2 SERİ VE PARALEL BAĞLI DIRENCİLER

Varsayıñız ki, siz ve arkadaşlarınız spor salonunda kalabalık bir basketbol oyunundasınız ve erken ayrılmaya karar verdiniz. Bu durumda iki seçenekiniz vardır. (1) Sizin grubunuzun tamamı tek bir kapıdan dışarı çıkabilir ve yiyecek ve benzeri kulübelerin bulunduğu ve her biri büyük bir insan kalabalığı tarafından çevriliş duraklar ihtiva eden uzun bir koridoru yürüyebilirsiniz. veya, (2) sizin grubunuzun her bir üyesi sahanın ana koridorunda ayrı kapılarından çıkışabilir. Burada her biri kendi koridoru üzerindeki ayakta duran insanların tek bir grubunu kapıya doğru itmek zorunda kalacaktır. Sizin grubunuzun sahayı terk etmesi için gerekli olan zaman hangi durumda daha azdır?

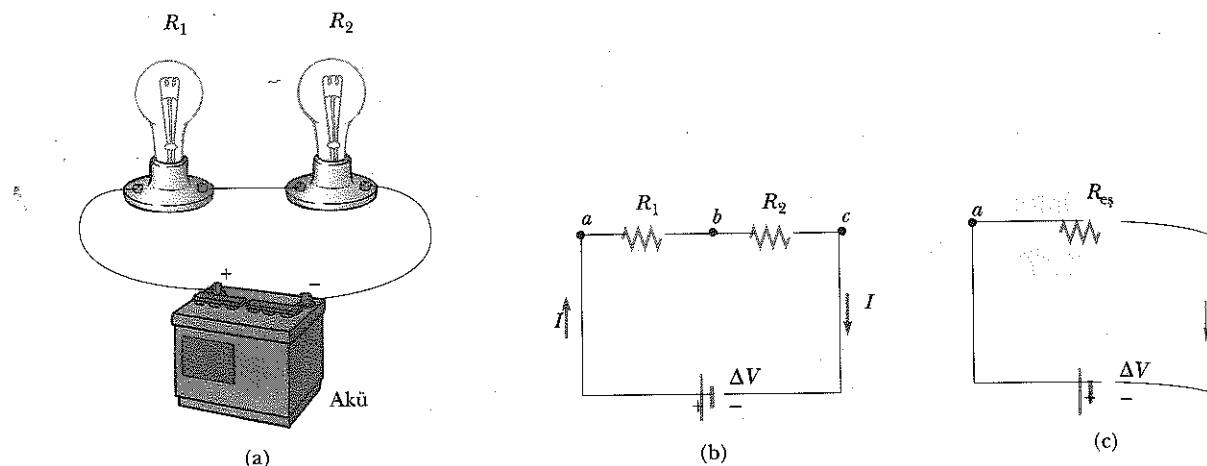
Açıkça, sizin grubunuz sizin her birinizin diğer bir çok insanı itmek zorunda kalarak takip ettiği yoldakinden ziyade ayrı kapılardan salonu daha hızlı terk edebilecektir. Tek koridorda hareket eden insan grubunu *seri* olarak tanımlayabiliriz. Çünkü sizin her biriniz yol üzerindeki bütün grupları itmek zorunda kalacaktır. Sahadaki kapılar etrafındaki insan gruplarını *paralel* hareket eden şeklinde tanımlayabiliriz. Sizin grubunuzun her bir üyesi insan gruplarının yalnızca birisini itmelidir. Bu basit benzetme bir dirençten daha fazlasını ihtiva eden elektrik devrelerinde akımın davranışını anlamamıza yardım edecektir.

İki veya daha fazla direnç, çift başına sadece tek bir ortak noktaya sahip olacak şekilde, Sekil 28.4a daki gibi birbirlerine bağlanmışsa, bu dirençlerin *seri* bağlı oldukları söylenir. Sekil 28.4b, seri bağlı iki direnci gösteriyor. Seri bağlantıarda, bir direnç içerisinde hareket eden bütün yükler ikinci direnç içinden de geçmelidir. (Bu, spor salonunun tek koridorunda kalabalık içerisinde geçen sizin grubunuzun bütün üyelerine benzerdir.) Aksi takdirde, yük, dirençler arasında toplanacaktır. O halde,

dirençlerin seri bağlanmasında, R_1 direncinden akan bir yük, R_2 direncinden akan yüke eşit olması gereğinden, her iki direnç içerisinde geçen akımın aynı olacağına

dikkat ediniz. Seri bağlı dirençlerin uçları arasına uygulanan potansiyel farkı dirençler arasında bölünecektir. Sekil 28.4b'de², a noktası ile b noktası arasın-

²Potansiyel düşmesi terimi bir direncin uçları arasındaki elektriksel potansiyeldeki azalmaya eş anlamlıdır ve elektrik devreleriyle çalışırken sık sık kullanılır.



Şekil 28.4 (a) İki tane R_1 ve R_2 dirençlerinin seri olarak bağlanması. Bu dirençlerden geçen akım aynıdır. (b) İki dirençli devrenin devre diyagramı. (c) $R_{\text{es}} = R_1 + R_2$ şeklinde, eşdeğer dirence sahip olan tek bir dirence indirgenmiş devre.

daki potansiyel düşmesi IR_1 'e ve b noktası ile c noktası arasındaki potansiyel düşmesi IR_2 'ye eşit olduğundan, a ile c arasındaki potansiyel düşmesi

$$\Delta V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

ile verilir. Bu nedenle iki direnci, tek bir *eşdeğer direnç* (R_{es}) ile yer değiştirbiliriz. R_{es} 'in değeri, dirençlerin toplamına eşittir; yani

$$R_{\text{es}} = R_1 + R_2 \quad (28.5)$$

olur. R_{es} direnci, $R_1 + R_2$ seri bağlı dirençlere şu anlamda eşdeğerdir: $R_1 + R_2$ direnci yerine R_{es} direnci kullanıldığında devredeki akım değişmez. Seri bağlı üç veya daha fazla dirence karşılık gelen eşdeğer direnç de basitçe

$$R_{\text{es}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (28.6)$$

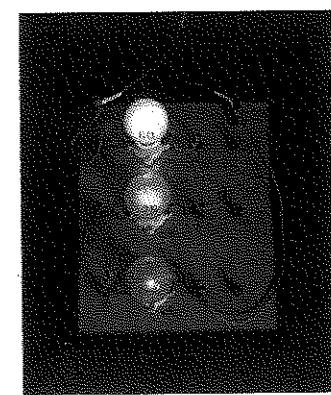
olur. O halde, seri bağlı dirençlerin eşdeğer direnci, devredeki herhangi bir direncin değerinden daima büyüktür.

Sınamma Sorusu 28.1

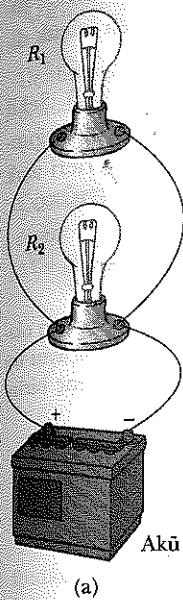
Bir tel parçası Şekil 28.4b deki b ve c noktalarına bağlamak için kullanılrsa, R_1 direnci ampulün parlaklığını artar mı, azaltır mı yoksa aynı mı kalır? R_2 dirençli ampulün parlaklığuna ne olur?

Şimdi, Şekil 28.5'de görüldüğü gibi *paralel* bağlı iki direnci inceleyelim. I akımı a noktasına (bu noktaya *düğüm* denir) vardığında iki kola ayrıılır. Buralar, R_1 'den geçen I_1 ve R_2 'den geçen I_2 'dir. R_1 , R_2 'den daha büyükse I_1 , I_2 'den daha küçük olur. Bir düğüm, akımın bölündüğü direç üzerinde bir noktadır. Önce anlatıldığı gibi, alanı terketmek için grubunuzun kapılara bölündüğü gibi. Bu bölünmenin bir sonucu olarak, her bir dirençteki akım, bataryadan çıkan akımdan daha azdır. Yük korunması gereğinden a noktasına giren I akımı, bu noktayı terkeden toplam akıma eşit olmalıdır:

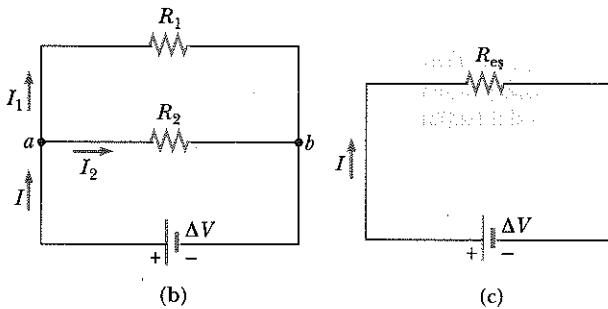
$$I = I_1 + I_2$$



60W, 75 W ve 200 W'lik güçlere sahip seri bağlı üç lamba. Uygulanan toplam voltaj 120 V tur. Lambaların ışık şiddetleri neden birbirlerinden farklıdır? Hangi lamba en büyük dirence sahiptir? Bu lambalar paralel olarak bağlan-salardı, birbirlerine göre ışık şiddetleri nasıl değişirdi? (Henry Leop ve Jim Lehman'in izniyle)



(a)



(b)

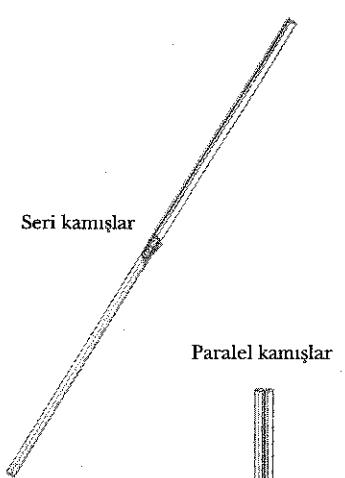
(c)

Şekil 28.5 R_1 ve R_2 gibi iki direncin paralel bağlanması. Her bir direncin uçları arasındaki potansiyel farkı aynıdır ve bileşik devrenin eşdeğer direnci $R_{es} = R_1^{-1} R_2^{-1} / (R + R)^{-1}$ ile verilir.

Ev Deneyi

Bir çift kamışı üç uca ve diğer çifti yan yana bağlayınız. Hangi çiftin içinden üflemek daha kolaydır. Şayet yan yana bağlanmış üç kamış ile üç uca bağlanmış üç kamış karşılaştırıldığınız ne olurdu?

Seri kamışlar



Şekil 28.5 te görüleceği gibi, iki direnç de doğrudan bataryanın uçlarına bağlanmıştır. Buna göre,

dirençler paralel bağlanırsa, üzerindeki potansiyel farkları aynı olur.

Her bir direncin uçları arasındaki potansiyel düşmesinin aynı olması gereklidir, $\Delta V = IR$ ye göre

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \Delta V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{\Delta V}{R_{es}}$$

yazabilirmiz. Buradan, paralel bağlı iki dirence ait eşdeğer direncin

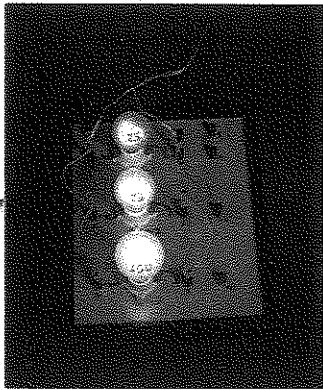
$$\frac{1}{R_{es}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (28.7)$$

$$R_{es} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

olarak verileceğini görüyoruz. Bu analiz paralel bağlı üç veya daha fazla dirence genelleştirilirse,

$$\frac{1}{R_{es}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (28.8)$$

Paralel bağlı dirençlerin eşdeğer direnci



Yaklaşık 100 V'luk bir voltaj kaynağına paralel bağlı 25 W, 75 W ve 150 W'lık güçlere sahip üç lamba. Bütün lambalar aynı voltaja sahiptirler. Lambaların verdiği ışık şiddetleri neden farklıdır? Hangi lamba en çok akım çeker? Hangisi en düşük dirence sahiptir. (Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle)

ifadesi yazılabilir. Buradan görülmektedir ki; paralel bağlı iki veya daha fazla dirençten oluşan bir devrenin eşdeğer direnci, gurup içerisindeki en küçük dirençten daha küçüktür.

Binaların elektrik donanımlarında lambalar (veya aletler v.b.) Şekil 28.5'a daki gibi paralel bağlanır. Bu durumda her bir alet birbirinden bağımsız olarak çalışır. Yani, birisinin çalışma anahtarı kapatılırsa diğerleri açık kalır. Ayrıca her bir alet aynı voltajda çalışır.

Sinama Sorusu 28.2

Şekil 28.1'deki bataryanın iç direncinin 0 olduğunu varsayıyorsunuz. Şayet birinciye seri olarak ikinci bir direnç ilave edersek, bataryadaki akım artar mı, azalır mı yoksa aynı mı kalır? Bataryanın uçları arasındaki potansiyel farkı nasıldır? Şayet ikinci direnç birinciyle paralel bağlanırsa cevabınızı değiştirmeyi mi?

Sinama Sorusu 28.3

Otomobil farları paralel mi yoksa seri mi bağlanırlar? Bunu nasıl açıklarsınız?

ÖRNEK 28.3 Eşdeğer Direncin Bulunması

Dört direnç Şekil 28.6'a daki gibi birbirlerine bağlanmışlardır. (a) a ve c noktaları arasındaki eşdeğer direnci bulunuz.

Çözüm Devre, Şekil 28.6'daki adımlar takip edilerek indirgenebilir. $8,0\Omega$ 'luk ve $4,0\Omega$ 'luk dirençler seri bağlıdır. Böylece a ve b arasındaki eşdeğer direnç $12,0\Omega$ 'dur. (Eşitlik 28.5'e bakınız) $6,0\Omega$ ve $3,0\Omega$ 'luk dirençler paralel bağlıdır ve böylece Eşitlik 28.7'den b ve c arasındaki eşdeğer direncin $2,0\Omega$ olduğunu buluruz. Buradan a ve c arasındaki eşdeğer direnç $14,0\Omega$ olur.

(b) a ve c arasına 42-V'luk bir potansiyel farkı uygulanırsa her bir dirençteki akım ne olur?

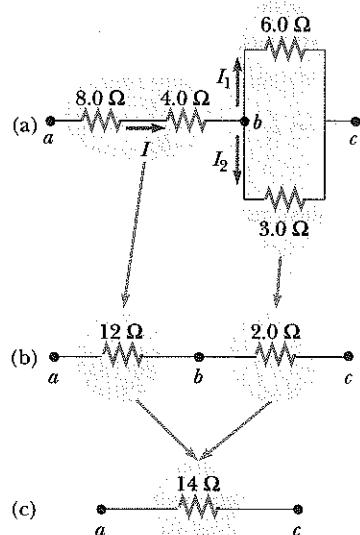
Çözüm $8,0\Omega$ ve $4,0\Omega$ 'luk dirençler seri bağlı olduklarından, bu dirençlerden geçen I akımı aynıdır. Eş. 27.8 ($R = \Delta V/I$) ve (a) da bulduğumuz sonuçları kullanırsak

$$I = \frac{\Delta V_{ac}}{R_{es}} = \frac{42 \text{ V}}{14 \Omega} = 3,0 \text{ A}$$

elde ederiz. Bu 4Ω ve 8Ω luk dirençlerdeki akımdır. Bu akım, b deki düğüm noktasına geldiğinde birisi 6Ω luk dirençten geçen I_1 akımı, diğeri 3Ω luk dirençten geçen I_2 akımı olmak üzere iki kısma ayrılır. Bu dirençlerin uçları arasındaki potansiyel farkı V_{bc} aynı olduğundan (çünkü bu dirençler paralel bağlıdır), $6I_1 = 3I_2$ veya $I_2 = 2I_1$ olduğu görülür. Bu sonucu ve $I_1 + I_2 = 3 \text{ A}$ olduğu gerçeğini kullanırsak, $I_1 = 1 \text{ A}$ ve $I_2 = 2 \text{ A}$ elde ederiz. Bunu başlangıçtan beri tahmin edebiliyoruz. Şöyle ki; 3Ω 'luk dirençten geçen

akım, 6Ω 'luk dirençten geçen akımın iki katı olmak zorundadır. Çünkü bu dirençlere uygulanan voltajlar aynıdır ve dirençlerden biri diğerinin iki katıdır.

Çözümün son bir sağlaması için, $V_{bc} = (6\Omega)I_1 = (3\Omega)I_2 = 6 \text{ V}$ ve $\Delta V_{ab} = (12\Omega)I = 36 \text{ V}$ olduğuna ve böylece $\Delta V_{ac} = \Delta V_{ab} + \Delta V_{bc} = 42 \text{ V}$ olması gerekligine dikkat ediniz.



Şekil 28.6

ÖRNEK 28.4 Paralel Bağlı Üç Direnç

Üç direnç, Şekil 28.7'deki gibi paralel bağlanıyor. a ve b noktaları arasında 18 V'luk bir potansiyel farkı uygulanıyor.

(a) Her bir dirençteki akımı bulunuz.

Çözüm Dirençler paralel bağlıdır ve böylece her bir direncin uçları arasındaki potansiyel farkı 18 V olmalıdır. $\Delta V = IR$ eşitliğini her bir dirence uygularsa,

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{18 \text{ V}}{3,0 \Omega} = 6,0 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{18 \text{ V}}{6,0 \Omega} = 3,0 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{\Delta V}{R_3} = \frac{18 \text{ V}}{9,0 \Omega} = 2,0 \text{ A}$$

(b) Her bir dirence harcanan gücünü ve üç direnç tarafından harcanan toplam gücünü hesaplayınız.

Çözüm $P = (\Delta V)^2 / R$ 'yi her bir direnç için uygularsak,

$$P_1 = \frac{(\Delta V)^2}{R_1} = \frac{(18 \text{ V})^2}{3,0 \Omega} = 110 \text{ W}$$

$$P_2 = \frac{(\Delta V)^2}{R_2} = \frac{(18 \text{ V})^2}{6,0 \Omega} = 54 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{(\Delta V)^2}{R_3} = \frac{(18 \text{ V})^2}{9,0 \Omega} = 36 \text{ W}$$

olur. Buradan görüldüyür ki, en küçük direnç en çok akımı taşıdığından, en büyük gücü harcamaktadır. Üç niceliğin toplamı 200 W olur.

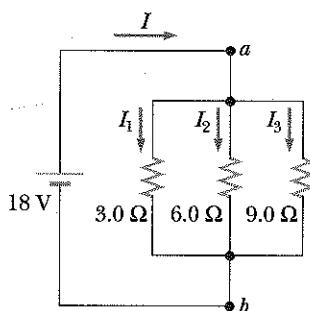
(c) Devrenin eşdeğer direncini hesaplayınız.

Çözüm R_{eq} direncini bulmak için 28.8 Eşitliğini kullanabiliriz:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{eq}}} &= \frac{1}{3,0 \Omega} + \frac{1}{6,0 \Omega} = \frac{1}{9,0 \Omega} \\ &= \frac{6}{18 \Omega} + \frac{3}{18 \Omega} + \frac{2}{18 \Omega} = \frac{11}{18 \Omega} \\ R_{\text{eq}} &= \frac{18 \Omega}{11} = 1,6 \Omega \end{aligned}$$

Aliştırma Batarya tarafından üretilen gücünü bulmak için R_{eq} i kullanınız.

Cevap 200W

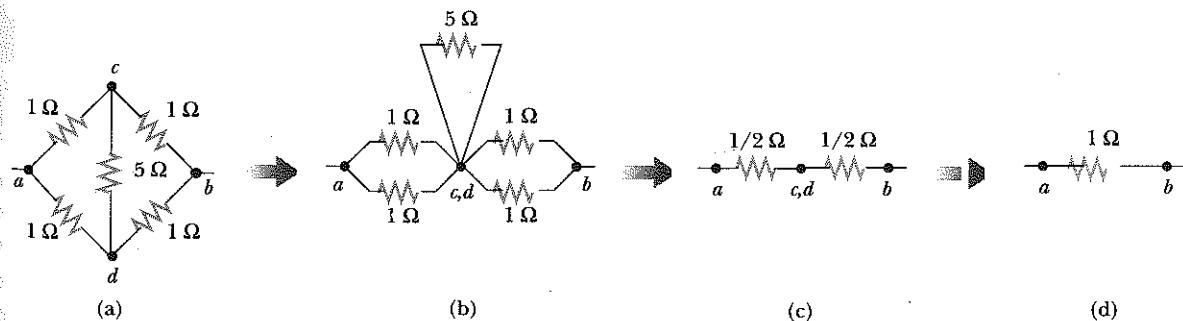


Şekil 28.7 Paralel bağılı üç direnç. Her bir direncin uçları arasındaki potansiyel farkı 18 V'tur.

ÖRNEK 28.5 Simetri Metodu ile R_{eq} 'in bulunması

Şekil 28.8a da gösterildiği gibi bağlanan beş adet direnç veriliyor. a ve b noktaları arasındaki eşdeğer direnci bulunuz.

Çözüm Bu tip problemlerde, a düğüm noktasına giren bir akımın var olduğunu farz etmek ve daha sonra simetri özelliğini uygulamak uygundur. Devredeki simetri-



Şekil 28.8 Bu devredeki simetriden dolayı, 5 Ω luk direnç a ve b noktaları arasındaki dirence katkıda bulunmaz ve dikkate alınmamayılsır.

den dolayı (dış ilmekteki bütün dirençler 1Ω 'dur.) devrenin ac ve ad kollarındaki akımlar birbirine eşit olmalıdır. Bu nedenle c ve d noktalarındaki potansiyeller de eşit olmalıdır. $\Delta V_{cd} = 0$ olduğundan, c ve d noktaları, Şekil 28.8bdeki gibi, devreyi etkilemeksiz birbirlерine bağlanabilirler. Böylece 5Ω luk direnç devreden çıkarılabilir ve devre Şe-

kil 28.8c ve 28.8d'de gösterilenlere indirgenebilir. Şekil 28.8d'deki indirgenmiş devreden görüldüğü gibi, bilesenin eş değer direnci 1Ω 'dur. Burada dikkat edilmeli dir ki, c ve d noktaları arasındaki direncin değeri ne olursa olsun sonuç 1Ω 'dur.

KAVRAMSAL ÖRNEK 28.6

Üç Farklı Şekilde Çalışan Ampul

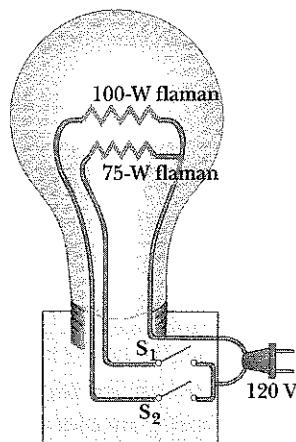
Şekil 28.9, ışık şiddetini üç farklı seviyede elde etmek için düzenlenmiş bir ampul düzeneğini gösterir. Ampulün soketi seçilen farklı ışık şiddetleri için üçlü anahtarlarla dizayn edilmiştir. Ampul iki filaman ihtiyaç eder. Ampul 120 V'luk kaynağa bağlandığı zaman, filamanın birisi $100W$ 'lık diğer $75W$ 'lık güç çeker. Üç farklı ışık şiddetini elde etmek için iki filamanın nasıl kullanılacağını açıklayınız.

Çözüm Üç farklı ışık şiddeti her bir filamanda tek başına, veya diğer filamana tek başına, veya iki filamana paralel olarak $120V$ uygulayarak mümkün olur. S_1 anahtarları kapalı S_2 anahtarları açıkken, akım yalnızca $75W$ 'lık filament içerisinde geçer. S_1 anahtarları açık S_2 anahtarları kapalıken, akım yalnızca $100W$ 'lık flaman içerisinde geçer. Her ikisi kapalıken, akım her iki flaman içerisinde geçer ve toplam güç $175W$ olur.

Şayet flamanlar seri bağlandıysa ve onlardan birisi kesilseydi, filamanların hiç birinden akım geçmezdi ve ampul, anahtar hangi pozisyonunda olursa olsun ışık vermeyecekti. Bununla beraber, paralel bağlı filamanlar durumunda, şayet onlardan birisi (örneğin $75W$ 'lık filaman) kesilirse, diğerinin içerisinde akım geçerek her iki anahtar pozisyonunda da halâ çalışacaktır.

Aliştırma İki flamanın direncini ve paralel eşdeğer direncini tayin ediniz.

Cevap 144Ω , 192Ω , $82,3 \Omega$



Şekil 28.9 Üç farklı ışık veren ampul

UYGULAMA

Işıklı Şeritler

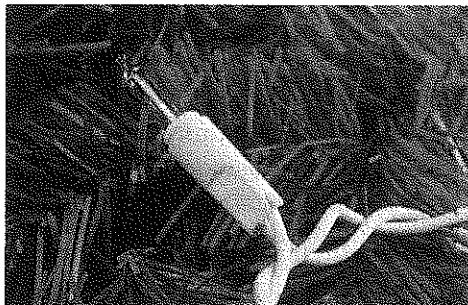
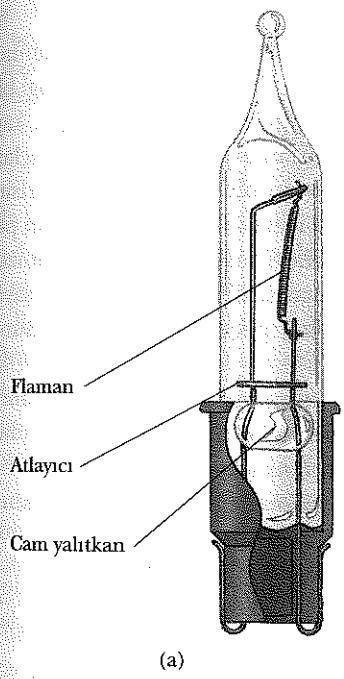
Yılbaşı ağaçlarını dekore ederken pek çok süsleme işlemesinde ışıklı şeritler kullanılır. Yillardır hem paralel hem de seri bağlantılar $120V$ 'luk³ kaynakla beslenen çoklu ışıklı şeritler için kullanılmaktadır. Seri bağlı ampuller, ev içinde yapılan yılbaşı ağacı için paralel bağlı ampullerden daha emniyetlidir. Çünkü, seri bağlı ampuller ampul başına daha az ışıkla çalışır ve daha düşük sıcaklıktadır. Bununla beraber, tek flamanlı ampul düşerse (veya ampul soketten çökarsa) ip üzerindeki bütün ışıklar söner. Seri bağlı ışıklı şeritlerin popüleritesi azaldı. Çünkü, düşen ampulün verdiği aksaklılığı gidermek için, kusurlu ampulü buluncaya kadar ip boyunca her bir soketteki sağlam ampulü deneyerek bağlama can sıkıcı ve zaman alıcı bir işlemidi.

Paralel bağlı iplerde her bir ampul $120V$ la çalışır. Böyle bir dizaynda, ampuller seri bağlı olanlarındaki daha parlak ve daha sıcakırlar. Sonuç olarak, bu ampuller tabii olarak daha tehlikelidir (yakın çıkışmasına daha meyilli), fakat şayet paralel bağlı telde bir ampul düşer veya çökarsa, ampullerin geri kalanlarının işaması sürekli olur. ($4W$ lk 25 ampul toplam $100W$ lk güç sahiptir; çok şerit kullanıldığı zaman toplam güç önemli olur.)

Tam bir ipin kopması ile bir ampulün çalışmamasını önlemek için, seri bağlanmış ışıklı iplerden oluşan ve "minyatür" olarak isimlendirilen yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Çözüm devredeki bir sıkıktan sonra filamanın çapraz bağlantısını (atlayıcı olarak isimlendirilen) meydana getir-

³Bunlar ve diğer ev cihazları ile ilgili olan Örnek 28.6 daki gibi ve bu bölümün ilk resminden gösterilen mutfak uygulamaları gerçekle alternatif akımla (ac) çalışır. ac'ye Bölüm 33 te girilecektir.

mekitir. (Şayet, devredeki başarısızlıktan önce flaman üzerindeki karşı tarafa geçecek alternatif bağlantı mevcutsa, her bir ampul paralel bir devreyi temsil edecektir. Bu devrede, akım kısa devre biçiminde alternatif bağlantı içerisinde akacak ve ampul işmeyecektir.) Bu minyatür, ampullerinin birisinde flaman kesilirse, ampulün uçları arasında 120V görünür. Çünkü ampulde akım yoktur ve bu yüzden diğer ampullerde potansiyel düşmesi meydana gelmez. Ampulün iç kısmında, yalıtkan bir malzemeyle çevrilmiş küçük bir ilmek şeklinde flaman etrafı bağlantı telleriyle sarılmıştır. Ampulün üzerinde 120V göründüğünde, yani flaman çalışmadığı zaman, yay şeklinde olan bir tel yalıtkanı ve bağlantı flamanını alev alev yakar. Bu kısa devre şimdilik olmayan bu ampul üzerinden devreyi tamamlar. (Şekil 28.10)



Şekil 28.10 (a) "Minyatür" bir yılbaşı lambası resmi; flaman bozulursa akımı sağlayacak atlayıcısı ile birlikte. (b) Christmas ağacı lambası (George Semple)



KIRCHHOFF KURALLARI

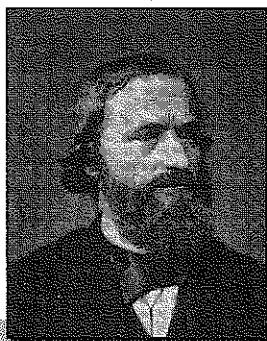
Bir önceki kesimde gördüğümüz gibi, basit devreler, $\Delta V = IR$ eşitliği ve dirençlerin seri ve paralel bağlanması ait kurallar kullanılarak çözümlenebilir. Bir devreyi tek bir kapalı devreye indirmek her zaman mümkün değildir. Daha karmaşık devrelerin analizi, **Kirchhoff kuralları** olarak bilinen iki basit kuralın kullanılmasıyla büyük ölçüde basitleştirilebilir. Bu kurallar şöyledir:

- Herhangi bir düğüm noktasına gelen akımların toplamı, bu düğüm noktasından çıkan akımların toplamına eşit olmalıdır:

$$\sum I_{\text{gel}} = \sum I_{\text{çık}} \quad (28.9)$$

Minyatür, ışıklı ipteki 50 ampulün hepsinin çalıştığını kabul ediniz. Her bir ampul üzerinde 2,4 V'luk potansiyel düşmesi meydana gelir. Çünkü ampuller seri bağlıdır. Ampulün bu tipinde güç girişi 0,34 W'tır, böylece tel üzerinde uygulanan toplam güç yalnızca 17W'tır. Biz çalışma sıcaklığında filamanın direncini $(2,4 \text{ V})^2 / (0,34 \text{ W}) = 17 \Omega$ olarak hesaplarız. Ampul bozulduğu zaman onun hattı üzerindeki çapraz direnç, önceki paragrafta bahsedilen alternatif atlayıcı bağlantıdan dolayı sıfır indirgenir. Diğer bütün ampuller yalnızca çalışır kalmaz, toplam direncin azalmasından dolayı her bir ampul üzerindeki akımın artması neticesinde daha parlak bir şekilde ışma yapar.

Farz edelim ki, ampulün sıcaklığı arttıkça, çalışma direnci 17Ω da sabit kalıyor. Şayet bir ampul kesilirse, değişmeyen ampullerin her biri üzerindeki potansiyel düşmesi 2,45 V'a çıkar ve akım değeri 0,142 A'den 0,145 A'ye yükselir ve böylece güç 0,54 W'a çıkar. Daha fazla ışık kesilirken, akım her zaman için yükselir, her bir ampulün flamanı daha yüksek sıcaklıkta çalışır ve ampulün dayanma zamanı azalır. Bütün ampullerin dayanma zamanını maksimum yapmak için, onları mümkün olduğu kadar kısa süre için yerleştirmek ve seri bağlı ipteki gibi ampullerin kesik olup olmadığını kontrol etmek iyi bir fikirdir.



Gustav Kirchhoff (1824-1887)

Almanya, Heidelberg'te profesör olan Kirchhoff ve Robert Bunsen spektroskopı icat ettiler ve Bölüm 40 da göreceğimiz spektroskopı bilimini kurdular. Sez-yum ve rubidyum elementlerini keşfettiler ve astronomi ile ilgili spektroskopı icat ettiler. Kirchhoff ayrıca, soğuk bir madde-nin ısıtılmasıyla yayılacağı aynı dalga boylu ışığı yine kendisi tarafından soğrulaçığını belirten Kirchhoff kuralını formüle etti. (AIP ESVA/W.F. Maggers Koleksiyonundan)

Ev Deneyi

Kendi kendini kesmeyen keyfi biçimli kapalı bir ilmek çiziniz. İlmek üzerinde a , b , c , d ve gibi beş nokta işaretleyiniz ve her bir noktaya rastgele sayılar veriniz. Şimdi a noktasından çalışmaya başlayınız ve belirlediğiniz her bir çift arasındaki potansiyel farkını ilmek üzerinde hesaplayınız. Bu potansiyel farklarının bazıları pozitif, bazıları negatif olacaktır. Cebirsel işaretleri hassas bir şekilde dikkatle takip ederek potansiyel farklarını toplayınız. İlmek boyunca potansiyel farklarının tümünün toplamı nedir?

2. Herhangi bir kapalı devre boyunca bütün devre elemanlarının uçları arasındaki potansiyel farklarının cebirsel toplamı sıfır olmalıdır.

$$\sum_{\text{Kapalı ilmek}} \Delta V = 0 \quad (28.10)$$

Birinci kural, yük korunumunun bir ifadesidir. Yani, herhangi bir noktada yük birikmesi olamayacağından, devredeki verilen bir noktaya ne kadar akım girerse o kadar akım bu noktayı terk etmek zorundadır demektir. Bu kuralı Şekil 28.11a'ya uygularsak,

$$I_1 = I_2 + I_3$$

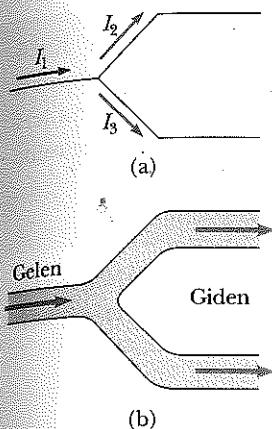
eşitliğini elde ederiz. Şekil 28.11b, bu durumun mekanik bir benzerini temsil etmektedir. Burada su, kollara ayrılan borulardan hiçbir kayıp olmadan akmaktadır. Boruya giren akış hızı, iki koldan çıkan akış hızlarının toplamına eşittir.

İkinci kural enerjinin korunumundan gelmektedir. Enerji korunumuna göre, bir devrede kapalı bir ilmek (halka) boyunca hareket eden herhangi bir yük, başladığı noktaya tekrar geldiğinde, kazandığı enerjilerin toplamı, kaybettiği enerjilerin toplamına eşit olmalıdır. Yükün enerjisi, bir direncin uçları arasında $-IR$ potansiyel düşmesi şeklinde azalır veya bir emk kaynağı içerisinde ters yönde geçirildiğinde azalır. Yük batarya içerisinde negatif uçtan pozitif uca geçtiğinde potansiyel enerji artar. Kirchoff'un ikinci kuralı yalnızca her bir noktada tanımlanabilen elektriksel potansiyel için uygulanır; şayet elektromanyetik alanlarda değişme varsa, bu kriter geçerli olmayabilir. Bunu Bölüm 31 de göreceğiz.

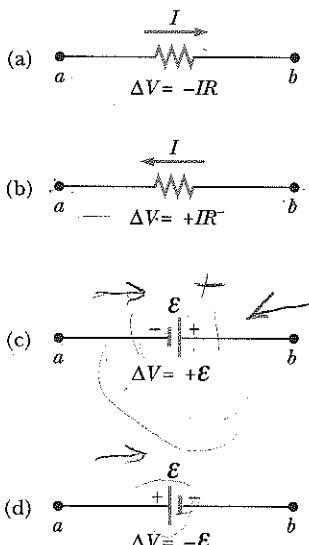
Kirchhoff'un ikinci kuralı, enerjinin korunumuna ilişkindir iddiamızı doğrularken, bir ilmekte yükün taşındığını tasavvur ettik. Bu kuralı uygularken, bir ilmek boyunca *seyahatini* ve *elektriksel potansiyeldeki değişimini* inceleriz, bir önceki paragrafta tanımlanan *potansiyel enerjideki değişimleri* değil. Ikinci kuralı uygularken, aşağıdaki işaret anlaşmalarına dikkat edilmelidir:

- Yükler, direncin yüksek potansiyelli ucundan düşük potansiyelli ucuna doğru hareket ettiği için, bir direnç akım yönünde geçiriliyorsa, direncin uçları arasındaki ΔV potansiyel değişimi $-IR$ dir (Şekil 28.12a).
- Direnç akımla ters yönde geçiriliyorsa, direncin uçları arasındaki ΔV potansiyel değişimi $+IR$ dir (Şekil 28.12b).
- Bir emk kaynağı, emk yönünde ($-$ uçtan $+$ uca doru) geçiriliyorsa, potansiyel değişimi $+E$ 'dir (Şekil 28.12c).
- Bir emk kaynağı (iç direnci sıfır farzediyor) emk'nın ters yönünde ($+$ uçtan $-$ uca doru) geçiriliyorsa potansiyeldeki değişim $-E$ dir (Şekil 28.12d). Bu durumda bataryanın emk'si, içinden geçen elektriksel potansiyeli azaltır.

Düğüm noktası ve kapalı devrenin kullanımında bazı sınırlamalar vardır. Her defasında düğüm noktasına ait bir eşitlik yazdımızda, bu eşitlikte kullanacağımız akım, bir önceki düğüm noktası eşitliğinde kullanmadığımız akım olduğu sürece, düğüm noktası kural gereken sıklıkla kullanılabilir. Genel olarak, bir devrede düğüm noktası kuralının kullanım sayısı, devredeki düğüm noktası sayısından bir azdır. Her bir yeni eşitlikle, yeni bir devre elemanı (Direnç veya akü gibi) veya yeni bir akım bulunduğu sürece, bu kural gereken sık-



Şekil 28.11 (a) Kirchhoff'un düğüm kuralı. Yük korunumuna göre, düğüm noktasına ne kadar akım girerse o kadar akım da terk etmelidir. Bu nedenle, $I_1 = I_2 + I_3$ olur. (b) Düğüm kuralının mekanik benzeri: Tek bir kolan giren akışkan miktarı kollardan çıkan akışkan miktarına eşittir.



Şekil 28.12 Bir direnç ve bir batarmanın uçları arasındaki potansiyel değişimlerini belirleme kuralları. Burada baryamın iç direncinin olmadığını varsayıyoruz. Her devre elemanı soldan sağa doğru geçiriliyor.

likla kullanılabilir. Genel olarak, belirli bir devre problemini çözmek için ihtiyac duyacağınız bağımsız denklemlerin sayısı, en azından bilinmeyen niceliklerin sayısına eşit olmalıdır.

Birçok ilmek ve düğüm noktası bulunan karmaşık şebekelerde çok sayıda bağımsız lineer denklemler ve bunlara karşılık gelen çok sayıda bilinmeyenler bulunur. Böyle durumların üstesinden gelebilmek için uygun matris cebiri kullanılır. Devredeki bilinmeyenleri çözmek için bilgisayar programları da kullanılabilir.

Aşağıdaki örnekler devre analizinde Kirchhoff kurallarının nasıl kullanılacağını göstermektedir. Bütün durumlarda devrenin kararlı -durum şartlarına ulaşlığı varsayılmıyor. Yani akım, devredeki çeşitli kollarda sabittir. Şayet bir kondansatör devrenin kollarından birine bir devre elemanı olarak bağlanırsa, bu bir açık devre gibi rol oynar. Yani, kondansatör bulunduran koldaki akım, kararlı -durumda sıfır olacaktır.

Problem Çözümünde İpuçları

Kirchhoff Kuralları

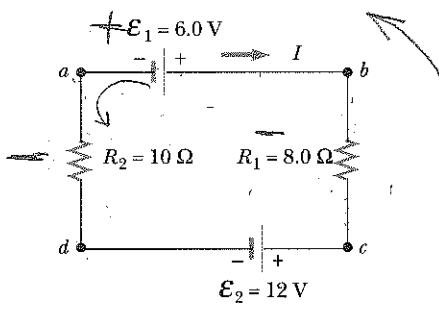
- İlk olarak bir devre diyagramı çiziniz ve bilinen, bilinmeyen bütün nicelikleri bu diyagram üzerinde işaretleyiniz. Devrenin her bir kısmındaki akım için bir yön belirlemelisiniz. Bir akımın yönünü yanlış tahmin ederseniz hemen paniğe kapılmayıınız. Zira sonuç, bulduğunuz değerin negatif olacaktır; fakat *büyüklik bakımından sonucunuz doğrudur*. Her ne kadar akım yönünün belirlenmesi keyfi olsa da Kirchhoff kurallarını uygularken yön belirlemeyi ciddi bir iş olarak görmelisiniz.
- Düğüm kuralı (Kirchhoff'un birinci kuralı), devredeki çeşitli akımlar arasındaki ilişki kurabileceğiniz herhangi bir düğüm noktasına uygulanır.

- Şimdi, bilinmeyenlerin çözümü için ihtiyacınız kadar ilmege Kirchhoff'un ikinci kuralını uygulayın. Bu kuralı uygulamak için, kapalı ilmeği her bir devre elemanı boyunca geçerken (saat yönünde veya tersi yönde), potansiyeldeki değişimleri doğru bir şekilde belirlemelisiniz. İşaretlere çok dikkat ediniz.
- Bilinmeyen nicelikleri elde etmek için denklemeleri çözünüz.

ÖRNEK 28.7**Tek ilmekli Bir Devre**

Tek-ilmekli bir devre, Şekil 28.13'de gösterildiği gibi iki tane direnç ve iki tane emk kaynağı içermektedir. Bataryanın iç-direncini ihmal ediniz. (a) Devredeki akımı bulunuz.

Çözüm Bu basit devreyi analiz etmek için Kirchhoff kurallarına ihtiyaç duyulmaz, fakat nasıl uygulandıklarını görmek üzere kullanmak isteyelim. Bu tek-ilmekli devrede düşüm noktası yoktur. Bu nedenle akım, bütün devre elemanlarında aynıdır. Akımın Şekil 28.13'de gösterildiği gibi saatin dönme yönünde olduğunu farz edelim. Devreyi, *a* noktasından başlayarak saatin dönme yönünde dolaşırıksak, *a* → *b* arası + \mathcal{E}_1 kadarlık bir potansiyel değişimini temsil eder. *b* → *c* arası $-IR_1$ kadarlık bir potansiyel değişimini, *c* → *d* arası $-\mathcal{E}_2$ kadarlık bir potansiyel değişimini ve *d* → *a* arası da $-IR_2$ kadarlık bir potansiyel değişimini temsil eder. Kirchhoff'un ikinci kuralını uygularsak,



Şekil 28.13 İki batarya ve iki dirençten oluşan bir devre. Burada bataryaların kutupları birbirlerine zittir.

ÖRNEK 28.8**Kirchhoff Kurallarının Uygulanması**

Şekil 28.14 te gösterilen devredeki I_1 , I_2 ve I_3 akımlarını bulunuz.

Çözüm Bu devreyi, dirençleri seri veya paralel bağlayarak basit bir şekele indirgeyemeyeceğimize dikkat ediniz. Bu devreyi çözebilmek için Kirchhoff kurallarını uygulamamız gerekmektedir. Akımların yönlerini Şekil 28.12 de gösterildiği gibi seçelim. Kirchhoff'un birinci kuralının *c* düşüm noktasına uygularsak şöyle yazabiliriz:

$$(1) \quad I_1 + I_2 = I_3$$

$$\Sigma \Delta V = 0$$

$$\mathcal{E}_1 - IR_1 - \mathcal{E}_2 - IR_2 = 0$$

elde edilir. Bu denklemi I 'ya göre çözüp Şekil 28.13 de verilen değerleri kullanırsak,

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{R_1 + R_2} = \frac{6.0 \text{ V} - 12 \text{ V}}{8.0 \Omega + 10 \Omega} = -0.33 \text{ A}$$

buluruz. I 'nın negatif olması, akım yönünün kabul edilen yönün tersi olduğunu göstermektedir.

(b) Her bir dirençte kaybolan güç nedir? 12-V'luk bir bataryanın verdiği güç nedir?

$$\mathcal{P}_1 = I^2 R_1 = (1/3 \text{ A})^2 (8 \Omega) = 0.87 \text{ W}$$

$$\mathcal{P}_2 = I^2 R_2 = (1/3 \text{ A})^2 (10 \Omega) = 1.1 \text{ W}$$

O halde dirençlere verilen toplam güç $\mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 = 2 \text{ W}$ tr. 12 V'luk bataryanın $I\mathcal{E}_2 = 4 \text{ W}$ lik güç verir. Bu gücün yarısı dış dirençlere verilmektedir. Diğer yarısı da, 12 V'luk batarya tarafından 6 V'luk bataryanın şarj edilmesi için harcanmaktadır. İç dirençleri de dahil etseydik, gücün bir kısmı bataryalar içerisinde ısı olarak harcanırdı ve 6 V'luk bataryaya daha az güç verilmiş olurdu.

Üç tane bilinmeyenimiz I_1 , I_2 ve I_3 akımlarıdır. Bu devrede *abcda*, *befcb* ve *aefda* (dış devre) olmak üzere üç tane ilmek görülmektedir. Bilinmeyen akımları bulmak için sadece *iki tane* ilmek denklemine ihtiyaç vardır. (Üçüncü ilmek denklemi bize yeni bir bilgi vermez.) Kirchhoff'un ikinci kuralı *abcd*a ve *befcb* kapalı devrelerine uygular ve bu kapalı devreleri saat yönünde dolaşırıksak, aşağıdaki ifadeleri elde ederiz:

$$(2) \quad \text{abcda ilmeği: } 10 \text{ V} - (6 \Omega) I_1 - (2 \Omega) I_3 = 0$$

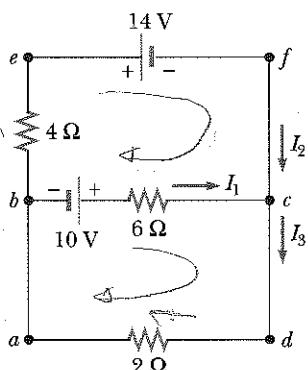
$$(3) \quad \text{befcb ilmeği: } -14 \text{ V} - 10 \text{ V} + (6 \Omega) I_1 - (4 \Omega) I_2 = 0$$

befeb ilmeğinde 6Ω 'luk direnç geçilirken, pozitif işaret elde edileceğine dikkat ediniz. Çünkü burada izlenen yolu yörenin I_1 akımının yönüyle zittir. (1), (2) ve (3) ifadeleri, üç tane lineer bağımsız denklemidir ve üç bilinmeyeni vardır. (1)'i (2)'de yerine koysak,

$$10V - 6I_1 - 2(I_1 + I_2) = 0 \quad (4)$$

$$10V = (8\Omega)I_1 + (2\Omega)I_2$$

elde ederiz. (3)'deki her terimi 2'ye bölüp, eşitliği tekrar düzenlersek



Şekil 28.14 Üç ilmek içeren bir devre.

$$(5) \quad -12V = -(3\Omega)I_1 + (2\Omega)I_2$$

bulunur. (4)'ten (5)'i çıkarıp I_2 'yi yok edersek

$$22V = (11\Omega)I_1$$

$$I_1 = 2A$$

elde edilir. I_1 'in bu değerini (5)de kullanırsak, I_2 için

$$(2\Omega)I_2 = (3\Omega)I_1 - 12V = (3\Omega)(2A) - 12V = -6V$$

$$I_2 = -3A$$

elde ederiz. Son olarak,

$$I_3 = I_1 + I_2 = -1A$$

olduğu görülür. I_2 ve I_3 'ün her ikisinin de negatif işaretli olması, sadece bu akımların yönünü yanlış seçmemizden kaynaklanmaktadır. Fakat sayısal değerler doğrudur. Akım yönünü Şekil 28.14'teki gibi alıp, halkaları (ilmekleri) ters yönde dolaşmış olsa idik ne olurdu?

Aliştırma b ve c noktaları arasındaki potansiyel farkını bulunuz.

Cevap 2V.

ÖRNEK 28.9 Çok İlmekli Devre

(a) Şekil 28.15'deki çok-ilmekli devrenin I_1 , I_2 ve I_3 akımlarını kararlı durumda değerlerini bulunuz.

Çözüm İlk olarak kondansatörün bir açık devreyi temsil ettiğine ve böylece kararlı durum şartları altında g ve b arasında *ghab* yolu boyunca akımın olmadığına dikkat edelim. Bu yüzden I_1 ile ilgili yükler g ye geldiğinde, onlar 8V luk batarya üzerinden b ye doğru giderler. Dolayısıyla $I_{gb} = I_1$ dir. Akımları Şekil 28.15'de görüldüğü gibi işaretler ve Kirchhoff'un birinci kuralını c düğüm noktasına uygularsak,

$$(1) \quad I_1 + I_2 = I_3$$

elde ederiz. Kirchhoff'un ikinci kuralını (Eş. 28.10 u) $defcd$ ve $cfgbc$ kapalı devrelerine uygulanırsa (saatin dönme yönünde)

$$(2) \quad defcd \text{ ilmeği: } 4V - (3\Omega)I_2 - (5\Omega)I_3 = 0$$

$$(3) \quad cfgbc \text{ ilmeği: } 8V - (5\Omega)I_1 + (3\Omega)I_2 = 0$$

bulunur. (1) ifadesinden $I_1 = I_3 - I_2$ olur. Bunu (3)de yerine yazılırsa

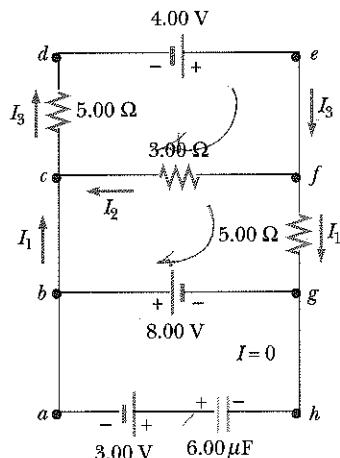
$$(4) \quad 8V - (5\Omega)I_3 + (8\Omega)I_2 = 0$$

elde edilir. (2)'den (4)'ü çıkarıp, I_3 'ü yok edersek

$$I_2 = -\frac{4,00V}{11,0\Omega} = -0,364A$$

buluruz. I_2 negatif olduğundan I_2 akımının, 3Ω 'luk direnç

üzerinden c den f 'ye doğru olduğu sonucuna varırız. Fakat aynı akım yönünün bu izahına rağmen, daha sonraki hesaplamalarda, I_2 'nin bulunan bu negatif değeri kullanılma-ya devam edilmelidir; çünkü eşitliklerimiz ilk yön seçimimize göre kurulmuştur. $I_2 = -0,364A$ değerini (3) ve (1)'de



Şekil 28.15 Çok-ilmekli devre. Kirchhoff'un ilmek kuralı biri kondansatörü içermek üzere *herhangi bir* kapalı devreye uygulanabilir.

kullanırsak, I_1 ve I_3 için aşağıdaki değerleri elde ederiz:

$$I_1 = 1,38 \text{ A}$$

$$I_3 = 1,02 \text{ A}$$

Kararlı durumda kondansatör bir açık devreyi temsil eder, ve bu yüzden ghab kolundan hiç akım geçmez.

(b) Kondansatör üzerindeki yük nedir?

Çözüm Kondansatörün uçları arasındaki ΔV_c potansiyel farkını bulmak için *bıghab* kapalı ilmeğine (veya kondansatör ihtiya eden herhangi bir kapalı devreye) Kirchhoff'un ikinci kuralını uygulayabiliriz. Bu potansiyel farkını işaret anlaşmasına bakmadan denkleme ekleriz çünkü yük, sadece potansiyel farkının büyüklüğüne bağlıdır. Saat yönünde ilmeği dolaşırıksak,

$$-8 \text{ V} + \Delta V_c - 3 \text{ V} = 0$$

$$\Delta V_c = 11,0 \text{ V}$$

olur. $Q = C\Delta V_c$ olduğundan (bakınız Eşitlik 26.1), kondansatör üzerindeki yükü

$$Q = (6 \mu\text{F})(11,0 \text{ V}) = 66,0 \mu\text{C}$$

olarak buluruz. Neden kondansatörün sol tarafı pozitif olarak yüklenmiştir?

Alıştırma Bir başka ilmek üzerinden dolaşırısa (en düşük ilmek gibi) kondansatörün uçları arasındaki gerilimi bulunuz.

Cevap 11,0V

Alıştırma 3,00V'luk bataryanın uçlarını ters çeviriniz ve (a) ve (b) şıklarını cevaplayınız

Cevap (a) $I_1 = 1,38 \text{ A}$, $I_2 = -0,364 \text{ A}$ ve $I_3 = 1,02 \text{ A}$
(b) $30 \mu\text{C}$

28.4 RC

DEVRELERİ

Su ana kadar *kararlı-durum devreleri* ya da sabit akımlı devrelerle ilgilendik. Şimdi, akımın zamanla değişebildiği kondansatörlü devreleri inceleyeceğiz. Bir kondansatör ve bir direncin seri bağlanması ile oluşan devreye **RC devresi** denir.

Bir Kondansatörün Yüklenmesi

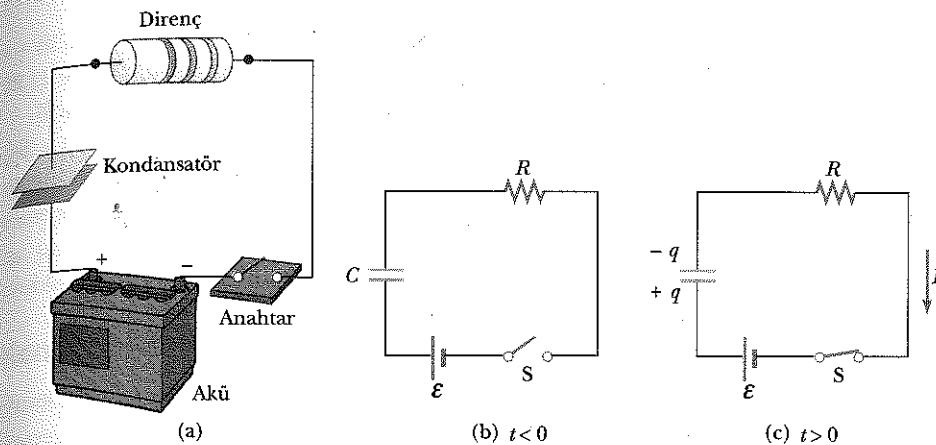
Sekil 28.16'daki devrede başlangıçta kondansatörün yüksüz olduğunu varsayılm. S anahtarı açık iken akım yoktur (Sekil 28.16b). Anahtar $t = 0$ anında kapatılırsa, yükler akmeye başlayarak devrede bir akım meydana getirecek ve kondansatör yüklenmeye başlayacaktır.⁴ Yüklenme işlemi esnasında, kondansatör levhaları arasındaki boşluk bir açık devreyi temsil ettiğinden, yüklerin levhalar arasındaki boşluğu atlayıp karşı levhaya geçemeyeceklerine dikkat ediniz. Fakat bir levhadan diğerine yük transferi, kondansatör tamamen yüklenene kadar, direnç, anahtar ve batarya üzerinden sağlanır. Levhalar yüklenirken, kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı artar. Maksimum yükün değeri bataryanın emk'ine bağlıdır. Maksimum yüze ulaşıldığından devredeki akım sıfır olur; çünkü kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı, bataryadan sağlanan kadardır.

Bu tartışmayı nicel bir temele oturtmak için, anahtar kapatıldıktan sonra *ki* durum için Kirchhoff'un ikinci kuralını uygulayalım. O zaman

$$\mathcal{E} - \frac{q}{C} - IR = 0 \quad (28.11)$$

yazılabilir. Buradaki IR direncin uçları arasında, q/C de kondansatörün uçla-

⁴Kondansatörlerle ilgili önceki tartışmada, kararlı hal durumunda kondansatörün bulunduğu kolun akımın geçmeyeceğini kabul ettik. Şimdi, kararlı hal durumunun gerçekleştirilmeden önceki durumu düşünüyoruz; bu durumda, yükler hareket edecek ve kondansatörün bağlı olduğu tellerde akım oluşacaktır.



Şekil 28.16 (a) Bir direnç, bir batarya ve bir anahtar ile seri bağlı bir kondansatör. (b) Anahtar kapatulmadan önce ($t < 0$), bu sistemi temsil eden devre diyagramı. (c) Anahtar kapatıldıktan sonra ($t > 0$) devre diyagramı.

ri arasındaki potansiyel düşmesidir. \mathcal{E} ve IR nin işaretlerinin nasıl olacağını daha önce tartıştık. Kondansatör için, pozitif plakadan negatif plakaya doğru gidilmesi, potansiyelin düşmesini temsil eder. Sonuca Eş. 28.11 de potansiyelin işaretini negatif olur. I ve q kondansatör yükleniyorkenki anî değerlerdir (kararlı durumun tersine) ve zamana bağlıdır.

Eş. 28.11, devredeki akımın başlangıç değerini ve kondansatör üzerindeki maksimum yükü bulmak için kullanabilir. Anahtar kapatıldığı anda, yani $t = 0$ anında, kondansatör üzerindeki yük sıfırdır ve 28.11 Eşitliğinden, akımın I_0 başlangıç değerinin maksimum ve

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R} \quad (t = 0 \text{ daki akım}) \quad (28.12)$$

\mathcal{E}
 Q

Maksimum akım

olduğu görülür. Bu anda, potansiyel düşmesi tümüyle direncin uçları arasında oluşur. Daha sonra kondansatör maksimum Q değerine kadar yüklenildiğinde, yük akışı durur yani devredeki akım sıfır olur ve potansiyel düşmesi bu defa tümüyle kondansatörün uçları arasında oluşur. $I = 0$ 'ı Eş. 28.11'de yerine koyarsak Q için aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

$$Q = C\mathcal{E} \quad (\text{maksimum yük}) \quad (28.13)$$

Kondansatördeki maksimum yük

Yük ve akımın zamana bağlı analitik ifadelerini bulmak için, q ve I 'yı içeren 28.11 Denklemini çözmeliiz — q ve I gibi iki değişkeni olan tek bir denklem. Seri devrelerin bütün kısımlarında akım aynı olmalıdır. O halde R direncindeki akım, kondansatör plakalarına giren ve çıkan akımla aynı olmalıdır. Bu akım kondansatör levhaları üzerindeki yükün zamana göre değişimi ne eşittir. Buna göre, $I = dq/dt$ yi Eş. 28.11 de yerine yazar ve düzenlersek,

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC}$$

eşitliğini elde ederiz. q için bir ifade bulmak üzere, eşitliğin sağ tarafının payalarını eşitlez:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC} = -\frac{q - C\mathcal{E}}{RC}$$

Şimdi bu denklemi dt ile çarpar $q - C\mathcal{E}$ ile bölersek,

$$\frac{dq}{q - C\mathcal{E}} = -\frac{1}{RC} dt$$

denklemini elde ederiz. $t = 0$ da $q = 0$ gerçeğini kullanarak bu ifadenin integralini alırsak,

$$\int_0^q \frac{dq}{q - C\mathcal{E}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

$$\ln \left(\frac{q - C\mathcal{E}}{-C\mathcal{E}} \right) = -\frac{t}{RC}$$

elde ederiz. Doğal logaritmanın tanımından bu ifadeyi,

$$q(t) = C\mathcal{E} (1 - e^{-t/RC}) = Q (1 - e^{-t/RC}) \quad (28.14)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada e , doğal logaritmanın tabanıdır ve Eş. 28.13'teki $C\mathcal{E} = Q$ değerini kullandık.

28.14 Eşitliğinin zamana göre diferansiyelini alarak, yüklenme akımı için bir ifade bulabiliriz. $I = dq/dt$ yi kullanarak,

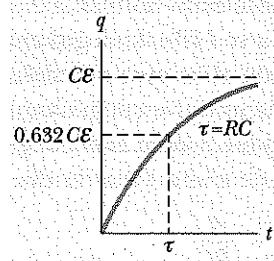
$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC} \quad \text{ve} \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/\tau} \quad (28.15)$$

buluruz.

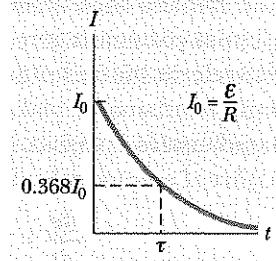
Kondansatör yükünün ve devre akımının zamana göre grafikleri Şek. 28.17'de gösterilmiştir. Yükün, $t = 0$ 'da sıfır olduğuna ve $t \rightarrow \infty$ olurken, $C\mathcal{E}$ maksimum değerine yaklaşmasına dikkat ediniz. Bunun yanı sıra, akım $t = 0$ 'da $I_0 = \mathcal{E}/R$ maksimum değerindedir ve $t \rightarrow \infty$ olurken üstel olarak sıfıra doğru azalmaktadır. Eş. 28.14 ve Eş. 28.15'in üstel terimlerinde ortaya çıkan RC niceğine devrenin τ zaman sabiti denir. Bu, akımın, başlangıç değerinin $1/e$ katına düşmesi için geçen zamanı gösterir. Yani τ zamanında $I = e^{-1} I_0 = 0,368 I_0$ olması demektir. 2τ zamanında, $I = e^{-2} I_0 = 0,135 I_0$ olur ve azalma böyle gider. Benzer şekilde yük de, τ zamanında sıfırdan $C\mathcal{E}(1 - e^{-1}) = 0,632 C\mathcal{E}$ değerine yükselecektir.

Aşağıdaki boyut analizi, τ 'nın zaman biriminde olduğunu göstermektedir:

$$[\tau] = [RC] = \left[\frac{\Delta V}{I} \times \frac{Q}{\Delta V} \right] = \left[\frac{Q}{Q/\Delta t} \right] = [\Delta t] = T$$



(a)



(b)

Şekil 28.17 (a) Şekil 28.16'da gösterilen devre için kondansatör yükünün zamana göre grafi. τ zaman sabiti süre sonra yük, $C\mathcal{E}$ maksimum değerinin % 63,2'si olur. Yük maksimum değerine, t sonsuza giderken yaklaşır. (b) Şekil 28.16'da gösterilen RC devresi için akımın zamana göre grafiği. $t = 0$ 'da akım $I_0 = \mathcal{E}/R$ maksimum değerine sahiptir ve t sonsuza yaklaşırken üstel olarak sıfıra düşer. Bir τ zaman sabiti süre sonra akım, ilk değerinin %36,8'ine düşer.

$\tau = RC$ zaman birimine sahip olduğundan, t/RC boyutluudur. Es. 28.14 ve Es. 28.15 teki e 'nin üssü de böyledir.

Kondansatörün yüklenmesi tamamlandığında bataryanın verdiği enerji, $QE = C\mathcal{E}^2$ dir. Kondansatör tamamen yüklenikten sonra, kondansatör içerisinde depolanan enerji, $\frac{1}{2}QE = \frac{1}{2}C\mathcal{E}^2$ dir ki bu, batarya tarafından sağlanan enerjinin tam olarak yarısıdır. Batarya tarafından sağlanan enerjinin geri kalan yarısının, direnç içerisinde iç enerji olarak görüneceğini göstermek, bir problem olarak bırakılmıştır (Problem 60).

Kondansatörün Boşalması

Şimdi başlangıçtaki yük Q olan bir kondansatör, bir direnç ve bir anahtardan ibaret olan Şekil 28.18'deki devreyi inceleyelim. Kondansatör tam olarak doluduktan sonra, yük boşalması olmadıkça (daha önce anlatıldığı gibi), *başlangıç* Q yükü, önceki tartışmadaki *maksimum* Q yükü ile aynı değildir. Anahtar açıkken, kondansatörü uclarında Q/C kadarlık bir potansiyel farkı vardır ve $I = 0$ olduğundan direncin uçlarındaki potansiyel farkı sıfırdır. $t = 0$ 'da anahtar kapatılırsa, kondansatör direnç üzerinden boşalmaya başlar. Boşalma esnasındaki herhangi bir anda, devredeki akım I ve kondansatör üzerindeki yük q dür (Şekil 28.18b). Bataryanın yokluğu hariç, Şekil 28.18'deki devre, Şekil 28.16'daki devreyle aynıdır. O halde, Şekil 28.18'deki devre için uygun ilmek denklemi elde etmek üzere Es. 28.11'den \mathbf{E} emk'sini ortadan kaldırırız. Yani

$$-\frac{q}{C} - IR = 0 \quad (28.16)$$

olmalıdır. $I = dq/dt$ yi bu ifadede yerine koyarsak,

$$\begin{aligned} -R \frac{dq}{dt} &= \frac{q}{C} \\ \frac{dq}{q} &= -\frac{1}{RC} dt \end{aligned}$$

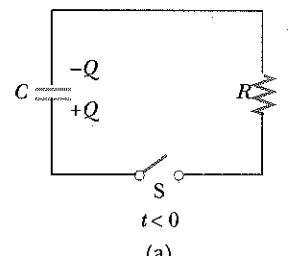
yazılabilir. $t = 0$ da, $q = Q$ başlangıç şartını kullanarak, bu ifadenin integrali alınırsa,

$$\begin{aligned} \int_Q^q \frac{dq}{q} &= -\frac{1}{RC} \int_0^t dt \\ \ln\left(\frac{q}{Q}\right) &= -\frac{t}{RC} \\ q(t) &= Q e^{-t/RC} \end{aligned} \quad (28.17)$$

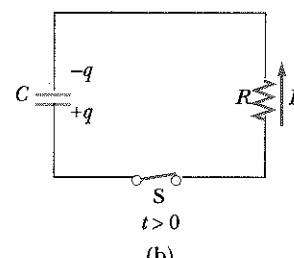
Bu ifadenin zamana göre türevini alarak, zamana bağlı (anî) akım ifadesi elde edilir:

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} (Q e^{-t/RC}) = -\frac{Q}{RC} e^{-t/RC} \quad (28.18)$$

Burada $I_0 = Q/RC$ başlangıçtaki akımdır. Burada negatif işaret, kondansatör dolarkenki akımın yönü, kondansatör boşalırkenki akımın yönüne zıt olduğunu gösterir. (Şekil 28.16c akımın yönü ile Şekil 28.18b'deki akımın yönünü karşılaştırınız.) Böylece kondansatör üzerindeki yük ve akımın, $\tau = RC$ zaman sabiti ile belirlenen bir hızla üstel olarak değiştğini görüyoruz.



(a)



(b)

Şekil 28.18 (a) Bir direnç ve bir anahtara bağlı, yüklü bir kondansatör, $t < 0$ da anahtar açıktır. (b) Anahtar kapatıldıkten sonra, gösterilen yönde kararsız bir akım meydana gelir ve kondansatör üzerindeki yük zamanla eksponansiyel olarak azahr.

Boşalan kondansatör için yükün zamana bağlılığı

Boşalan kondansatör için akımın zamana bağlılığı

KAVRAMSAL ÖRNEK 28.10 Aralıklı Oto Cam Silicileri

Pek çok otomobil hafif yağış sırasında aralıklı olarak çalışabilen oto cam silicileriyle donatılmıştır. Silicilerin bu şekilde çalışması kondansatörün dolması ve boşmasına nasıl bağlıdır?

Çözüm Siliciler, çok kademeli anahtar içerisindeki R 'nin farklı değerleri seçerek zaman sabiti değiştirilebilen

RC devresinin bir parçasıdır. Zaman geçtikçe, zaman sabitindeki kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı silicilerin tetikleyen bir noktaya ulaşır ve başka bir yüklenme devresi oluşturmak üzere boşalır. Her bir kademe arasındaki zaman aralığı, zaman sabitinin değeriyle tayin edilir.

ÖRNEK 28.11 RC Devresindeki Bir Kondansatörün Yüklenmesi

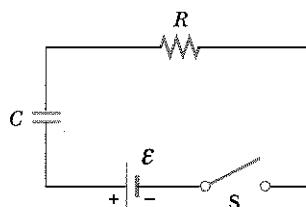
Yüksüz bir kondansatör ve bir direnç Şekil 28.19'daki gibi seri olarak bağlanıyor. $\mathcal{E} = 12,0 \text{ V}$, $C = 5,00 \mu\text{F}$ ve $R = 8 \times 10^5 \Omega$ ise, devrenin zaman sabitini, kondansatör üzerindeki maksimum yükü ve devredeki maksimum akımı bulunuz. Yük ve akımı zamanın fonksiyonu olarak ifade ediniz.

Çözüm Devrenin zaman sabiti $\tau = RC = (8,00 \times 10^5 \Omega)(5,00 \times 10^{-6} \text{ F}) = 4,00 \text{ s}'dir. Kondansatör üzerindeki maksimum yük $Q = C\mathcal{E} = (5 \times 10^{-6} \text{ F})(12 \text{ V}) = 60 \mu\text{C}$ ve devredeki maksimum akım $I_0 = \mathcal{E}/R = (12 \text{ V})/(8 \times 10^5 \Omega) = 15,0 \mu\text{A}$ dir. Bu değerleri ve Eş. 28.14 ve Eş. 28.15'i kullanırsak$

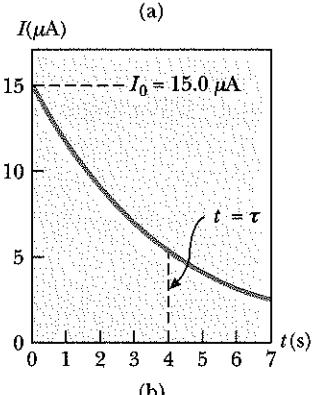
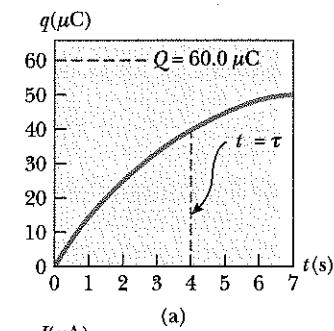
$$q(t) = (60,0 \mu\text{C}) (1 - e^{-t/4\text{s}})$$

$$I(t) = (15,0 \mu\text{A}) e^{-t/4\text{s}}$$

elde edilir. Bu fonksiyonların grafikleri Şekil 28.20'de verilmiştir.



Şekil 28.19 Bu seri RC devresinin anahtarı $t < 0$ anında açık, $t = 0$ 'da kapatılıyor.



Şekil 28.20 Şekil 28.19'da gösterilen, $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$, $R = 8 \times 10^5 \Omega$ ve $C = 5 \mu\text{F}$ değerlerine sahip RC devresine ait (a) zamana göre yük ve (b) zamana göre akım grafikleri.

ÖRNEK 28.12 Bir RC Devresindeki Kondansatörün Boşalması

Şekil 28.18'deki gibi R direnci üzerinden boşalan bir C kondansatörü veriliyor. (a) Kaç zaman sabitinden sonra kondansatör üzerindeki yük azalması, başlangıç değerinin dörtte birine eşit olacaktır?

Çözüm Kondansatör üzerindeki yük zamanla, Eş. 28.17 ye göre değişir. Yani $q(t) = Q e^{-t/RC}$ dir. Burada Q kondansatör üzerindeki yükün başlangıç değeridir. q 'nın başlangıç değerinin dörtte birine düşmesi için geçen zamanı bulmak için, bu ifadede $q(t) = Q/4$ 'ü yerine yazıp, t 'yi çözersek,

$$\frac{Q}{4} = Q e^{-t/RC}$$

$$\frac{1}{4} = e^{-t/RC}$$

elde ederiz. Her iki tarafın logaritmasını alarak,

$$2 \ln 4 = -\frac{t}{RC}$$

$$t = RC (\ln 4) = 1,39 RC = 1,397$$

buluruz.

(b) Kondansatörde depo edilen enerji, kondansatör boşalırken zamanla azalır. Kaç zaman sabitinden sonra bu depo edilmiş olan enerji, başlangıç değerinin dörtte birine düşer?

Cözüm Es. 26.11 ($U_0 = Q^2/2C$) ve Es. 28.17 yi kullanarak, herhangi bir anda kondansatörde depolanan enerjiyi,

$$U = \frac{q^2}{2C} = \frac{(Q e^{-t/RC})^2}{2C} = \frac{Q^2}{2C} e^{-2t/RC} = U_0 e^{-2t/RC}$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada $U_0 = Q^2/2C$, kondansatörde başlangıçta depo edilen enerjidir. (a) şıklındaki gibi $U = U_0/4$ için t 'yi çözersek

$$\frac{U_0}{4} = U_0 e^{-2t/RC}$$

$$\frac{1}{4} = e^{-2t/RC}$$

elde edilir. Yine her iki tarafın logaritmasını alır ve t 'yi çözersek

$$t = \frac{1}{2} RC (\ln 4) = 0,693 RC = 0,693\tau$$

bulunur.

Aşırma Kaç zaman sabitinden sonra RC devresindeki akım ilk değerinin yarısına düşecektir?

Cevap $0,693 RC = 0,693\tau$

ÖRNEK 28.13 Bir Dirence Verilen Enerji

$5 \mu F$ lik bir kondansatör, $800 V$ 'luk bir potansiyel farkı ile yüklenmekte ve sonra $25 k\Omega$ 'luk bir direnç üzerinden boşalmaktadır. Kondansatör tamamen boşaldığı zaman, dirençte harcanan toplam enerji ne kadardır?

Cözüm Bu problemi iki yolla çözeceğiz. Gerçekten de oldukça basit olan birinci yol, sistemin başlangıçtaki enerjinin, $C\mathcal{E}^2/2$ ile verilen kondansatörde depo edilen enerjiye eşit olduğuna dikkat etmekten ibarettir (Es. 26.11'e bakınız). Kondansatör tamamen boşaldığında, içerisinde depo edilen enerji sıfırdır. Enerji korunduğundan, kondansatörde depo edilen başlangıç enerjisi, dirençte harcanan iç enerjiye dönüşür. Cve \mathcal{E} 'nin verilen değerlerini kullanırsak,

$$\text{Enerji} = \frac{1}{2} C \mathcal{E}^2 = \frac{1}{2} (5,00 \times 10^{-6} F) (800 V)^2 = 1,60 J$$

bulunur.

İkinci metod daha zor, fakat belki daha öğreticidir. Bu, kondansatör direnç üzerinden boşalırken, dirençte enerjinin harcanma hızının $I^2 R$ ile verileceğine dikkat etmektedir. Burada I , Eşitlik 28.18 ile verilen anı akımdır. Güç, enerjinin değişim hızı olarak tanımlandığından, dirençteki enerji kaybını $I^2 R dt$ 'nın zaman integraline eşitlemeyecek

$$\text{Enerji} = \int_0^\infty I^2 R dt = \int_0^\infty (I_0 e^{-t/RC})^2 R dt$$

olması demektir. Bu integrali hesaplamak için akımın başlangıç değerinin $I_0 = \mathcal{E}/R$ ve t hariç bütün parametrelerin sabit olduğunu dikkat edelim. O halde,

$$(1) \quad \text{Enerji} = \frac{\mathcal{E}^2}{R} \int_0^\infty e^{-2t/RC} dt$$

bulunur. Bu ifadedeki integral $RC/2$ değerine sahiptir. Böylece,

$$\text{Enerji} = \frac{1}{2} C \mathcal{E}^2$$

olar. Bu bekleniği üzere daha basit olan birinci metodla uyum içerisindeştir. İkinci yaklaşımı, anahtar kapatıldıkten sonraki herhangi bir anda kaybolan enerjiyi bulmak için kullanabileceğine dikkat ediniz. Bunun için integraldeki üst sınır yerine t 'nin özel değeri yazılır.

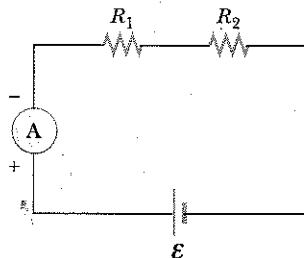
Aşırma Eşitlik (1) deki integralin $RC/2$ değerine eşit olduğunu gösteriniz.

Seçmeli Kesim

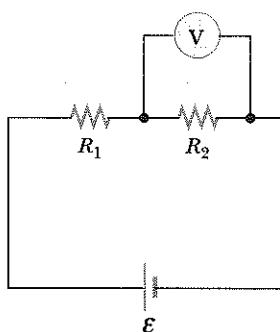


ELEKTRİK ÖLÇEN AYGINLAR

Akim ölçen aygıt **ampermetre** denir. Ölçülecek olan akım, ampermetre içinden doğrudan (direkt olarak) geçmelidir. Yani, ampermetre, Şekil



Şekil 28.21 Bir devredeki akım bir direnç ve bir bataryaya seri bağlı bir ampermetre ile ölçülebilir. Bir ideal ampermetre sıfır dirence sahiptir.



Şekil 28.22 Bir direncin uçlarındaki potansiyel farkı, bu dirence paralel bağlı bir voltmetre ile ölçülebilir. İdeal bir voltmetre, sonsuz dirence sahiptir ve devreyi etkilemez.

28.21'deki gibi, devredeki ölçülmesi istenilen öteki elemanlarla seri bağlanmalıdır. Bir ampermetre kullanarak doğru akım ölçerken, akının, aletin pozitif ucundan girip, negatif ucundan çıkacak şekilde bağlandığından emin olmalısınız.

İdeal halde, bir ampermetrein ölçülen akımı değiştirmeyecek şekilde sıfır dirence sahip olması gereklidir. Şekil 28.21'de gösterilen devrede bu şart, ampermetrein direncinin, $R_1 + R_2$ ile karşılaştırıldığında küçük olmasını gerektirir. Bütün ampermeterler bir miktar dirence sahip olduğundan, devrede ampermetre varken, ampermetrein olmadığı duruma göre akımın değeri biraz daha düşük olacaktır.

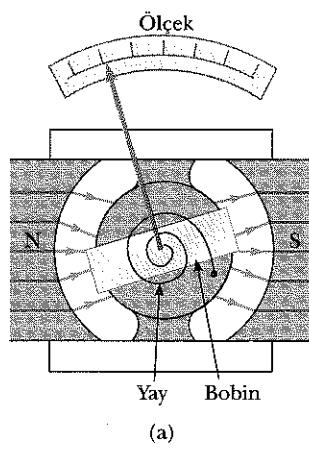
Voltmetre

Potansiyel farkını ölçen alete **voltmetre** denir. Devredeki herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı, Şekil 28.22'deki gibi, devreyi kesmeden bu noktalar arasına bir voltmetrenin uçlarını tutturarak ölçülebilir. R_2 direncinin uçları arasındaki potansiyel farkı, voltmetreyi R_2 ile paralel bağlamak suretiyle ölçülür. Yine, aletin kutuplarına dikkat etmek gereklidir. Voltmetrenin pozitif ucu, direncin daha yüksek potansiyelle sahip ucuna, negatif ucu da direncin düşük potansiyelli ucuna bağlanmalıdır.

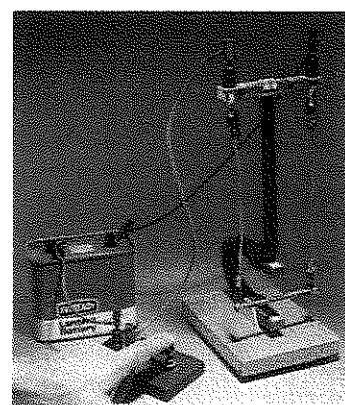
İdeal bir voltmetre içerisindeki akım geçmeyecek kadar sonsuz büyük bir dirence sahiptir. Şekil 28.22'de, bu şart, voltmetrenin R_2 ile karşılaştırıldığında çok büyük dirence sahip olmasını gerektirir. Pratikte, bu şart sağlanmazsa, voltmetrenin bilinen direnci için düzeltme yapılmalıdır.

Galvanometre

Galvanometre, voltmetre ve ampermetrelerin yapımında kullanılan ana parçadır. D'Arsonval galvanometresi denilen ve çok rastlanan bir çeşit galvanometrenin ana hatları, Şekil 28.23'a'da gösterilmiştir. Bu, bir daimi mıknatıs tarafından sağlanan manyetik alan içerisindeki bir mil üzerinde serbestçe dönebilecek şekilde yerleştirilen, iletken tel bir bobinden ibarettir. Galvanometrenin temel çalışma ilkesi, bir manyetik alanda akım ilmine üzerine etki eden döème momenti (tork) gerçeğini kullanır (Bölüm 29). Bobinin maruz kaldığı döème momenti (tork), ondan geçen akımla doğru orantılıdır. Bu, daha bü-

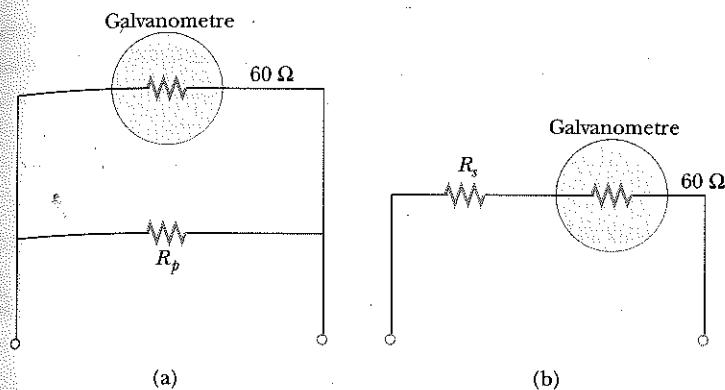


(a)



(b)

Şekil 28.23 (a) Bir D'Arsonval galvanometresinin ana parçaları. Akım, manyetik alana yerleştirilmiş bobinden geçtiğinde, manyetik döème momenti bobinin dönmesine sebep olur. Bobinin dönme açısı, yayın döème momentinden dolayı, bobin içerisinde geçen akımla orantılıdır. (b) Galvanometre için kaba bir model. Anahtar kapatulunca bobin, düşey ekseni etrafında neden döner? (Jim Lehman'in izniyle)



Şekil 28.24 (a) Bir galvanometre bir ampermetre olarak kullanıldığında, bir R_p direnci galvanometre ile paralel bağlanır. (b) Galvanometre bir voltmetre olarak kullanıldığında, bir R_s direnci galvanometre ile seri bağlanır.

yük akım daha büyük dönmeye momenti demektir ve büyük bir tork da yayın yerince gerilip dönmeye işlemini durduruncaya kadar bobinin daha fazla dönmeye anlamına gelir. Böylece, sapma miktarı akım ile orantılıdır. Alet uygun bir şekilde kalibre edildiğinde, diğer devre elemanları ile birlikte bağlanarak devredeki akımları veya potansiyel farklarını ölçmek için kullanılabilir.

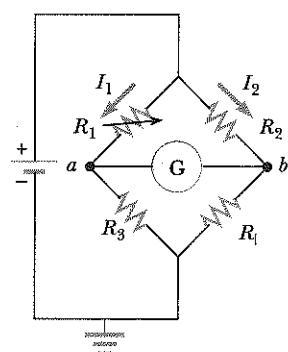
Klasik galvanometreleri, bir ampermetre olarak kullanmak genellikle uygun değildir. Bunun başlıca nedenlerinden biri, tipik bir galvanometrenin yaklaşık $60\ \Omega$ 'luk bir dirence sahip olmasıdır. Böyle büyük bir dirence sahip ampermetre, bağlı olduğu devredeki akımı dikkate değer bir ölçüde değiştirir. Bu durum aşağıdaki örneği inceleyerek kolayca anlaşılabılır. Farz edelim ki 3 V luk bir batarya ve $3\ \Omega$ luk bir dirençle seri bir devre kurmak istiyorsunuz. Böyle bir devredeki akım, 1 A 'dır. Fakat, akım ölçmek üzere, $60\ \Omega$ 'luk bir galvanometreyi devreye sokarsanız, devrenin toplam direnci bu sefer $63\ \Omega$ olacaktır ve akım $0,048\text{ A}$ 'e düşecektir.

Bir galvanometrenin bir ampermetre olarak kullanılmasını sınırlayan ikinci faktör şudur: Tipik bir galvanometre, 1 mA veya daha düşük mertebedeki akımlar için tüm ölçek boyunca saparlar. Sonuç olarak, bu tür bir galvanometre bu mertebeden daha büyük akımları ölçmek için doğrudan kullanılamaz. Ancak, bir galvanometre, Şekil 28.24'a daki gibi ona paralel bir R_p direnci bağlayarak basit bir şekilde bir ampermetyere dönüştürülebilir.

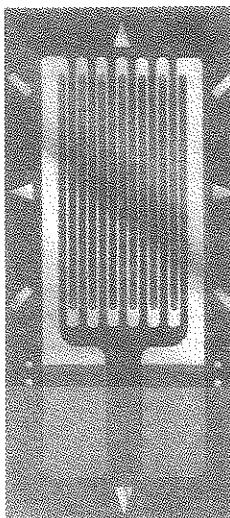
Bir galvanometre, Şekil 28.24b'deki gibi, seri bağlı bir R_s dış direnci eklemek suretiyle voltmetre olarak da kullanılabilir. Bu durumda dış direnç, galvanometrenin direnci ile kıyaslandığında çok büyük bir değere sahip olmalıdır. Bu, ölçülen voltajın önemli ölçüde değişimmemesini sağlayacaktır.

Wheatstone Köprüsü

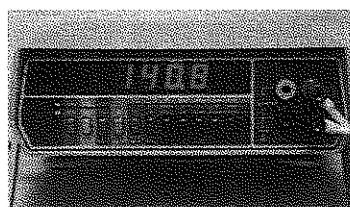
Bilinmeyen dirençler, Wheatstone köprüsü olarak bilinen bir devre kullanılarak hassas olarak ölçülebilir (Şekil 28.25). Bu devre, R_x bilinmeyen direnç, R_1 , R_2 ve R_3 bilinen dirençler (burada R_1 kalibre edilmiş değişken bir dirençtir), bir galvanometre ve bir emk kaynağından ibarettir. Bilinen R_1 direnci, galvanometre sıfır akım gösterene kadar değiştirilir yani, a 'dan b 'ye doğru olan akım sıfırdır. Bu şartlar altında, köprü dengedendir denir. Köprü dengelendiğinde, a noktasındaki potansiyel b noktasındaki potansiyele eşit olması gereklidir.



Şekil 28.25 Wheatstone köprüsünün devre şeması. Bu devre genellikle bir R_x bilinmeyen direncinin, bilinen R_1 , R_2 ve R_3 dirençleri yardımı ile ölçülmesi için kullanılır. Köprü dengelendiğinde, galvanometreden geçen akım sıfır olur. R_1 direnci üzerindeki ok, direncin elle değiştirilebileceğini gösterir.



Deneysel zor analizleri için kullanılan zor-ölçer, plastik bir tabla üzerine yerleştirilmiş, bobin şeklinde ince bir telden ibarettir. Zorlar, bobindeki sarmımlar eğildiğinde meydana gelen direnç değişikliklerini gözleyerek ölçülür. Wheatstone köprüsünün bir elemanı olarak bir zorlanmaölçer bağlanıp direnç ölçümleri yapılır. Bu aletler, genellikle modern elektronik tezazilerde cisimlerin kütelerini ölçmek için kullanılırlar.



Şekil 28.26 Şekildeki gibi dijital multimetrelerle gerilim, akım ve direnç ölçülür. (Henry Leap ve Jim Lehman'ın Izniyle)

tiğinden, R_1 'nin uçlarındaki potansiyel farkı, R_2 'nin uçlarındaki potansiyel farkına eşit olmalıdır. Benzer şekilde, R_3 'ün uçlarındaki potansiyel farkı, R_x 'nın uçlarındaki potansiyel farkına eşit olmalıdır. Bu düşüncelerden,

$$(1) \quad I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$(2) \quad I_1 R_3 = I_x R_x$$

olduğunu görürüz. Akımları yok etmek için (1)'i (2) ile bölüp R_x 'i çözersek

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (28.19)$$

olduğunu buluruz.

Bu tür denge ölçümü yapan pek çok benzer aygit vardır; örneğin kondan satör köprüsü (bu, bilinmeyen siga değerlerini ölçmede kullanılır). Bu aletler kalibre edilmiş ölçü aletlerinin kullanımını gerektirmez ve herhangi bir emk kaynağı ile kullanılabilir.

Cök yüksek dirençler ($10^5 \Omega$ dan büyük), ölçmek istendiğinde, teknik nedenlerle Wheatstone köprüsü metodunun uygulanması zor olur. Modern elektronik aletler $10^{12} \Omega$ 'a kadar yüksek dirençlerin ölçümünü mümkün kılmaktadır. Bu tür aletler, giriş terminalleri arasındaki etkin direnç çok yüksek olacak şekilde tasarılanır. Örneğin, voltaj, akım ve direnç ölçmek için kullanılan dijital multimetrelerin çoğunda $10^{10} \Omega$ 'luk giriş dirençleri bulunur. (Şekil 28.26)

Potansiyometre

Potansiyometre, bilinen bir emk ile kıyaslayarak bilinmeyen \mathcal{E}_x emk'ni ölçmek için kullanılan bir devredir. Şekil 28.27, potansiyometrenin esas kısımlarını göstermektedir. d noktası, a ve d noktaları arasındaki direnci (dolayısıyla potansiyel farkını) değiştirmek üzere düzenlenmiş, sürgülü bir kontağı temsil eder. Bu devrede gerekli diğer parçalar, bir galvanometre, \mathcal{E}_0 emk'ne sahip bir güç kaynağı (standart bir pil) ve bilinmeyen \mathcal{E}_x emk kaynağıdır.

Şekil 28.27'de gösterilen yönlerdeki akımlar için, Kirchhoff'un birinci kuralına göre, R_x direncinden geçen akımın $I - I_x$ olduğunu görürüz. Burada I alt koldaki (\mathcal{E}_0 emk'li pilden geçen) akım ve I_x , üst koldaki akımdır. Kirchhoff'un ilmek kuralı $abcta$ kapalı devresine uygulanır.

$$-\mathcal{E}_x + (I - I_x) R_x = 0$$

yazılabilir. Burada R_x , a ve d noktaları arasındaki dirençtir. d noktasındaki sürgülü kontak, galvanometre sıfırı gösterinceye kadar (yani devre dengeleninceye kadar) ayarlanır. Bu şartlar altında, bilinmeyen güç kaynağındaki ve galvanometredeki akım sıfırdır ($I_x = 0$) ve a ve d noktaları arasındaki potansiyel farkı bilinmeyen \mathcal{E}_x emk'ine eşittir. Yani:

$$\mathcal{E}_x = IR_x$$

Daha sonra, bilinmeyen emk'ya sahip pil yerine bilinen \mathcal{E}_s emk'lı standart bir pil yerleştirilir ve yukarıdaki işlem tekrarlanır. Dengeye ulaşıldığında, a ve d arasındaki direnç R_s ise, o zaman

$$\mathcal{E}_s = IR_s$$

olur. Burada I 'nin aynı kaldığı varsayıyor. Bu ifadeyi, daha önceki $\mathcal{E}_x = IR_x$ eşitliği ile birleştirirsek,

$$\mathcal{E}_x = \frac{R_x}{R_s} \mathcal{E}_s \quad (28.20)$$

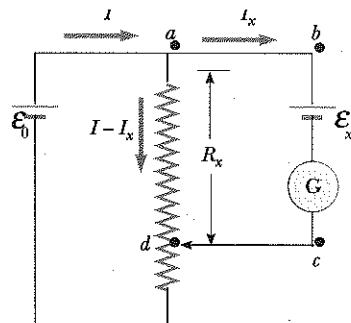
olduğunu görürüz.

Devredeki direnç, ρ özdirençli bir tel ise, telin direnci, L uzunluğunu değiştirmek üzere sürgülü kontaklar kullanılarak değiştirilebilir. $R_s = \rho L_s / A$ ve $R_x = \rho L_x / A$ yi yerine koyarak Eş. 28.20

$$\mathcal{E}_x = \frac{L_x}{L_s} \mathcal{E}_s \quad (28.21)$$

ifadesine indirgenir. Bu sonuca göre, bilinmeyen \mathcal{E}_x emk'in değeri, iki telin uzunluğu ve standart \mathcal{E}_s emk'in büyüklüğünün ölçülmesiyle ede edilebilir.

Şekil 28.27 deki bilinmeyen emk nin olmadığı sürgülü devre ve galvanometreye bazen *voltaj bölücü* denir. Bu devre, direncin uzunluğunu ayarlayarak, \mathcal{E}_0 emk'nin daha az bir kısmını kullanmayı mümkün kılar.



Şekil 28.27 Bir potansiyometre ait devre şeması. Bu devre, bilinmeyen bir \mathcal{E}_x emk'nin, bir pilin sağladığı bilinen bir \mathcal{E}_s emk'si cinsinden ölçmek için kullanılır.

Seçmeli Kesim

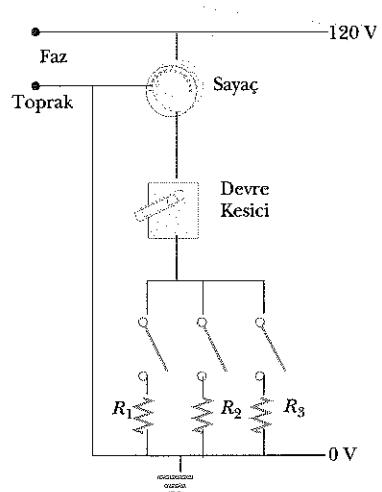
28.6 EV ELEKTRİK TESİSATLARI VE EMNİYETİ

Elektrikli ev aletleri, bu bölümde sunulan devre analizleri ile ilgili bazı fikirlerin pratik uygulamasını temsil eder. Bizim açısından önemli olan, geleneksel elektriksel sistemlerin güç koşullarını ve zayıf taraflarını ve kazaları önlemek için alınması gereken emniyet tedbirlerini anlamaktır.

Elektrik şebekelerini işleten kurumlar, bir çift güç hattı ile her eve elektrik gücünü dağıtır. Her abone, Şekil 28.28'de gösterildiği gibi bu elektrik hatlarına paralel olarak bağlıdır. Şekil 28.28 de gösterildiği gibi, tellerden *biri canlı uc (faz)*⁵, diğeri *nötr* olarak isimlendirilir. Bu kablolar arasındaki potansiyel farkı 120 V civarındadır (Ülkemizde bu, 220 V'tur.). Bu voltaj zamanla alternatif olarak değişir. Kablolardan biri (nötr) toprağa bağlıdır ve öteki "canlı" uçtaki (faz) potansiyel toprağa göre salınım yapar. Sabit emk(doğu akım) için şimdije kadar işyerlerine ve evlere dağıtım yapan şirketler alternatif akımı da uyguladıklarını öğrendik. (Alternatif voltaj ve akımlar Bölüm 33'te tartışılmaktadır.)

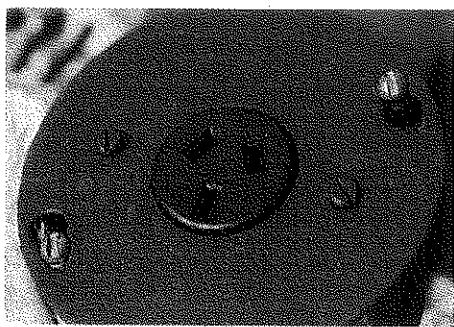
Elektrik sayacı evde kullanılan elektriği kaydetmek için eve gelen kabloya seri olarak bağlanır. Sayaçtan sonra, ev içerisinde paralel şekilde dağıtılmış devreleri ayırmak için teller kullanılır. Her devre, devre kesici (veya eski tesisatlarda kullanılan sigorta) ihtar eder. Her bir devre kesici ve tel akım taleplerini karşılamak için dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Şayet bir devre 30A'ye kadar bir akımı taşıyacaksa, bu akımı kaldırabilecek kalınlıkta tel ve uygun devre kesici seçilmelidir. Normal olarak, güç lambaları ve küçük ev aletleri için kullanılan tesisatlar, genellikle sadece 15 A'lık bir akıma ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, her bir devre, çeşitli yük şartlarına uyabilmesi için kendi devre kesicisi ne sahip olur.

Örnek olarak, bir tost makinası, bir mikrodalga fırın ve bir kahve makinası (bunların her biri Şekil 28.28'deki R_1 , R_2 , R_3 dirençlerine karşılık gelmektedir) bağlı olduğu bir devre düşünelim. Her bir aletten geçen akımı $P = I\Delta V$ ifadesini kullanarak hesaplayabiliriz. 1000 W'lik bir tost makinası, 1000 W/120 V = 8,33 A'lık bir akım çekecektir. 1300 W'lik bir mikrodalga fırın 10,8 A'lık ve 800 W'lik bir kahve makinası da 6,67 A'lık bir akım çekecektir. Bu üç alet



Şekil 28.28 Ev elektrik tesisatı. Dirençler, tesisata bağlı ev aletlerini gösterir ve 120 Volt'la çalışırlar.

Canlı uc, toprak seviyesinin üstünde veya altındaki elektrik potansiyelinde olan bir iletken için kullanılan meslekî bir terimdir.



Şekil 28.29 240 V'luk bir alet için güç bağlantıları (George Semple)



Şekil 28.30 120 V'luk bir alet için üçlü güç kablosu fisi (George Semple)

aynı anda çalıştırılırsa, toplam olarak 25,8 A'lık akım çekeceklerdir. Bu nedenle devre, en azından bu kadarlık yüksek bir akım çekecek şekilde düzenlenmemelidir. Şayet tesisatı koruyan devre kesicinin değeri çok küçükse, -20A gibi bir alet aynı anda çalıştırıldığında, bunların çalışmasını önleyecek şekilde devre kesici harekete geçecektir. Bu durumdan kaçınmak için, tost makinası ve kahve makinası aynı 20 A'lık tesisatta çalıştırılabilir ve mikro dalga fırın ayrı bir 20A'lık devreye bağlanır.

Kurutma makinaları gibi ağır iş aletleri 240 V'ta çalışırlar. Elektrik santrallerini işleten şirketler, toprak potansiyelinden 120 V daha *aşağıda* üçüncü bir canlı kablo ile bu voltajı sağlarlar (Şekil 28.29). Böylece, bu kablo ile diğer canlı kablo (bu toprak potansiyelinin 120 V üstündedir) arasındaki potansiyel farkı 240 V olur. 240 V'luk bir hatla çalışan alet, 120 V'luk bir hatla çalışan aynı aletin ihtiyaç duyacağı akımın yarısını çekecektir; böylece yüksek voltaj devresinde, aşırı ısınma bir problem olmaksızın daha ince kablolar kullanılabilir.

Elektrik Emniyeti

Bir elektrik prizinin canlı ucu direk olarak toprağa bağlandığında, devre *tamamlanır* ve bir kısa-devre durumu ortaya çıkar. Farklı potansiyellerdeki iki uc arasında hemen hemen sıfır direnç olduğu zaman *kısa devre* meydana gelir ve devre çok büyük akım çeker. Bu, kazara vukuu bulduğunda uygun şekilde çalışan devre kesici, devreyi "açacaktır." Diğer taraftan bir kimse, toprakla temasla iken yıpranmış bir kablonun canlı ucuna (faza) dokunur veya iletkeni tutarsa elektriğe çarpabilir. Toprakla çok iyi bir temas (kontak), kişinin bir su borusuna (ki bu normal olarak toprak potansiyelidir) dokunmasıyla veya ayağı yaşı iken toprak üzerinde durmasıyla (çünkü su iyi bir yalıtkan değildir) sağlanabilir. Bu gibi durumlardan ne olursa olsun sakınılmalıdır.

Elektrik şoku ciddi yanıklara ve kalp gibi hayatı organların hasar görmesine sebep olabilir. Vücuda verilen hasarın derecesi, akımın büyüklüğüne, şokun uygulandığı zamana, elektriksel temasın vücuttaki yerine ve akımın vücuttan geçtiği kısımlara bağlıdır. 5 mA veya daha az akımlar, şokun sadece hissedilmesine sebep olur. Normal olarak çok az hasar verir veya hiç vermez. Akım 10 mA'den büyükse, el kasları çekilir ve kişi, canlı uçtan zor kurtulur. 100 mA'lık bir akım, sadece birkaç saniye için vücuttan geçerse sonuç ölüm olabilir. Böyle büyük akımlar solunumla ilgili kasları felce uğratıp, nefes almayı engeller. Bazı durumlarda, 1 A civarındaki akımların vücuttan geçmesi, ciddi (ve bazen öldürücü) yanıklara sebep olabilir. Pratikte, 24 V'tan daha büyük voltaj olduğunda, canlı uçlarla temas etmek, güvenlikte olmak sayılır.

Birçok 120 V'luk priz Şekil 28.30 da görüldüğü gibi üç kollu güç teli içerrir. (Bu özellik tamamen yeni bir elektrik tesisatını gerektirir.) Bu kollardan biri canlı uç, diğer ikisi toprağa bağlanır. İlave toprak bağlantısı, güvenlik amaçlıdır. Birçok elektrikli alet, toprak kablolarından biri doğrudan aletin dış kutusuna bağlı olan, üç kollu, 120 V'luk güç kablosu içerir. Canlı uç, aletin dış kutusuna kazara kısa devre yaparsa (ki bu kabloların izolasyonunun sınırlı durumunda çok rastlanır) o zaman akım, aletin içerisindeki düşük dirençli yolu takip ederek toprağa iletilecektir. Tersi durumda, şayet aletin dış kutusu düzgün bir şekilde topraklanmamışsa ve bir kısa devre olursa, aletin dış kutusu ile temas eten bir kimsenin vücutu toprağa giden düşük dirençli bir yol gibi davranacağından, elektrik şokuna maruz kalacaktır.

Şimdilerde, *topraklama kusurlarını gideren* özel güç prizleri yeni evlerin mutfaklarında, banyolarında, bodrumlarında ve diğer tehlikeli kısımlarında kullanılmaktadır. Bu tür aygıtlar toprağa sızan küçük akımları ($\approx 5 \text{ mA}$) algılayarak, elektrik çarpmasına karşı insanları koruyacak şekilde Bölüm 31 de açıklandığı gibi dizayn edilirler. Fazla bir sızıntı akımı tesbit edildiğinde, akım bir milisaniyeden daha az bir zamanda kesilir.

Sınamaya Sorusu 28.4

Bir cihazda paralel bağlı bir devre kesici mi yoksa seri bağlı bir devre kesici mi devreyi koruyor?

ÖZET

Bir bataryanın **emk'sı** akım sıfır iken onun uçları arasındaki voltaj eşittir. Yani emk, bataryanın **açık-devre voltajına** eşdeğerdir.

Seri bağlı bir takım direncin **eşdeğer direnci**:

$$R_{\text{es}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (28.6)$$

Paralel bağlı bir takım direncin **eşdeğeri direnci**:

$$\frac{1}{R_{\text{es}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (28.8)$$

ile verilir. Dirençleri, paralel veya seri olarak birleştirmek mümkün olursa, dirençlerin, devrenin diğer kısımlarını nasıl etkilediğini belirlememizi kolaylaştırır.

Birden fazla kapalı ilmek ihtiiva eden karmaşık devreler, **Kirchhoff kuralları** kullanılarak incelenir. Bu kurallar:

- Herhangi bir düğüm noktasına giren akımların toplamı, bu düğüm noktasından çıkan akımların toplamına eşit olmalıdır:

$$\sum I_{\text{gi}} = \sum I_{\text{çık}} \quad (28.9)$$

- Kapalı bir ilmek (halka) boyunca, devre elemanlarının uçları arasındaki potansiyel farklarının toplamı sıfıra eşit olmalıdır:

$$\sum_{\substack{\text{kapalı} \\ \text{ilemek}}} \Delta V = 0 \quad (28.10)$$

Birinci kural yük korunumunun ifadesidir. İkinci kural enerjinin korunumu ifadesine eşdeğerdir.

Bir direnç, akım yönünde geçildiğinde, direncin uçlarındaki potansiyel değişimi $\Delta V = -IR$ dir. Direnç akımın ters yönünde geçiliyorsa $\Delta V = IR$ dir. Bir emk kaynağı, emk yönünde (negatiften pozitifte) geçirilirse, potansiyeldeki değişim $+E$ olur. emk'nin tersi yönünde (pozitiften negatifte) geçirilirse, potansiyeldeki değişim $-E$ olur. Bu kurallarla Eş. 28.9 ve 28.10 birlikte kullanılrsa, elektrik devrelerini analiz etmek mümkün olur.

Bir kondansatör, bir R direnci üzerinden E emk'li bir batarya ile yüklenirse, devredeki akım ve kondansatör üzerindeki yük zamanla,

$$q(t) = Q(1 - e^{-t/RC}) \quad (28.14)$$

$$I(t) = \frac{E}{R} e^{-t/RC} \quad (28.15)$$

ifadelerine göre değişir. Buradaki $Q = C\mathcal{E}$, kondansatörün üzerindeki maksimum yüktür. RC çarpımına devrenin **zaman sabiti** τ denir. Yüklü bir kondansatör, bir R direnci üzerinden boşalırsa, yük ve akım zamanla,

$$q(t) = Q e^{-t/RC} \quad (28.17)$$

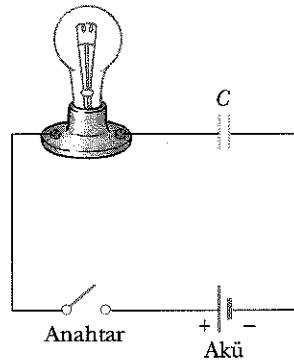
$$I(t) = -\frac{Q}{RC} e^{-t/RC} \quad (28.18)$$

ifadelerine göre üstel olarak azalır. Burada $I_0 = Q/RC$ devredeki başlangıç akımı, Q kondansatör üzerindeki başlangıç yükündür. Es. 28.14, 28.15, 28.17 ve 28.18, RC devresindeki akım ve potansiyel farkları ile, devredeki kondansatörde depolanan yük analiz etmenize olanak verir.

SORULAR

1. Bir bateryanın yük direnci ve iç direnci arasındaki farkı açıklayınız.
2. Hangi şartlar altında bir bateryanın uçları arasındaki potansiyel farkı, emk'ne eşittir? Bateria çıkış voltajı emk'ni aşabilir mi? Açıklayınız.
3. Bir baryadan geçen akımın yönü, her zaman negatif uçtan pozitif uca doru mudur? Açıklayınız.
4. Eşdeğer direncin, bu direnci oluşturan her bir dirençten daha büyük olması için, bu dirençleri nasıl bağlanınız? Üç dirençli bir örnek veriniz.
5. Eşdeğer direnç bu direnci oluşturan her bir dirençten daha küçük olması için, bu dirençleri nasıl bağlanınız? Üç dirençli bir örnek veriniz.
6. Üç lamba ve bir bateria veriliyor. Çizebildiğiniz kadar çok farklı elektrik devresi çiziniz.
7. Dirençler seri bağlı iken aşağıdakilerden hangisi her bir direnç için aynı olacaktır? Potansiyel farkı, akım, güç.
8. Dirençler paralel bağlı iken aşağıdakilerden hangisi her bir direnç için aynı olacaktır? Potansiyel farkı, akım, güç?
9. Paralel bağlı özdeş iki direncin, başka paralel bağlı özdeş çift ile seri bağlı olmasında, tek bir direnç kullanmaktan öte ne gibi avantaj olabilir?
10. Kısa kablolarla 120 V'luk bir kaynağına bağlı bir akkor lamba aynı kaynağa uzun kablolarla bağlı olduğu durumdan daha fazla ışık verecektir. Açıklayınız.
11. Bir direncin uçları arasındaki potansiyel farkı ne zaman pozitif olabilir?
12. Şekil 28.15 ile ilgili olarak g ve h noktaları arasındaki iletken tel yerine 10 Ω'luk bir direncin yerleştirildiğini düşünelim. Bu durumun, Örnek 28.9'da hesaplanan akımı neden etkilemeyeceğini açıklayınız.

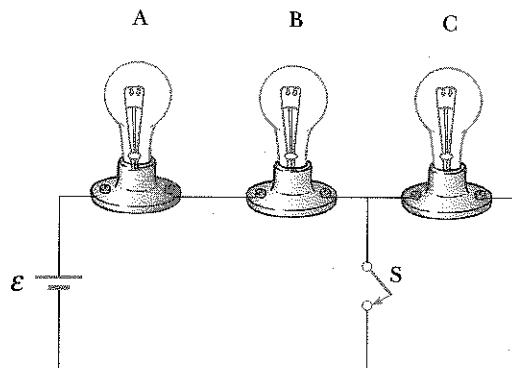
13. Şekil S28.13 ile ilgili olarak, anahtar kapatıldiktan sonra lambaya ne olacağını anlatınız. Kondansatörün büyük bir siga değerine sahip olduğunu ve başlangıçta yüksüz olduğunu varsayıyorsunuz ve lamba, doğrudan bateryanın uçlarına bağlandığında aydınlanacağını kabul ediniz.



Şekil S28.13

14. İdeal bir ampermetre ve voltmetrein iç direnci ne olur? Bunların neden ideal ölçü aletleri olacağını açıklayınız.
15. Potansiyometre uygulamasında (Kesim 28.5) bilinen ve bilinmeyen emk'ların iç dirençleri ihmal edilmesine rağmen, gerçekle bu kabulü yapmak gereksizdir. \mathcal{E}_x 'i ölçerken iç dirençlerin neden rol oynamadıklarını açıklayınız.

16. Banyo kütüentine iken ışığı yakmak neden tehlikelidir?
17. Bir binadan düşüğünüzü ve düşerken bir yüksek voltaj kablosundan tutunduğunuzu farz edin. Elektriğe çarpıhr mıydınız? Daha sonra kablo koparsa, düşerken kablonun ucundan tutmaya devam etmeli misiniz?
18. 120 V ile çalışma, 240V'a nazaran ne gibi avantajlar ve dezavantajlar getirir?
19. Elektrikçiler canlı uçları çalışığında, telleri hareket ettirmek için genellikle avuç içlerini ve parmaklarını kullanırlar. Bu tekniği kullanmaları hakkında ne düşünürünüz?
20. Canlı bir yüksek-voltaj teline yakalanmış bir kimseyi kurtarmak için, kendi hayatınızı tehlkiye atmadan ne gibi bir yol takip ederdiniz?
21. Elektrik çarpmasının ciddiyetini belirleyecek olan şey vücuttan geçen akımsa, elektrik çarpmasına karşı yapılan uyarılar, neden "yüksek akım"dan ziyade "yüksek voltaj"dır?
22. Uçurtma uçururken, uçurtmanızın yüksek voltaj teline çarptığını varsayıñız. Alacağınız elektrik şokunun büyülüğünü hangi faktörler belirler?
23. Aşağıdaki şekilde (Şekil Q28.23) görüldüğü gibi, bir seri devre baryaya bağlı üç özdeş lambadan ibarettir. S anahtarı kapatıldığında, (a) A ve B lambalarının şiddetlerine ne olur? (b) C lambasının şiddetine ne olur? (c) Devredeki akıma ne olur? (d) Üç lambanın uçları arasındaki potansiyel farklarına ne olur? (e) Devrede harcanan güç artar mı, azar mı yoksa aynı mı kalır?



Şekil Q28.23

24. Arabanızın farları açıkken, arabanızı ilk çalıştırdığınızda farlar niçin sönütür?
25. Kayak merkezi, vadide geçici bir dinlenme yerile, dağın bir tarafına yokuş aşağı yerleşmiş birkaç birbirine bağlı pist ve az sayıda teleferikten ibarettir. Teleferikler baryalara ve pistler dirençlere benzer. İki pistin seri şekilde birbirine nasıl bağlandığını tanımlayınız. Üç pistin paralel olarak nasıl bağlandığını tanımlayınız. İki pist ve bir teleferiğin bağlantı taşğını çiziniz. Kayak merkezi için Kirchhoff'un düğüm kuralını ifade ediniz. Yükseklik ölçen aleti taşıyan kayakçıların biri dinlenme tesisinden her geçtiğinde ayak parmaklarını ısıtmak için durur. Yükseklik için Kirchhoff'un ilmek kuralını ifade ediniz.

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorla; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

= Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalıdır
= "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

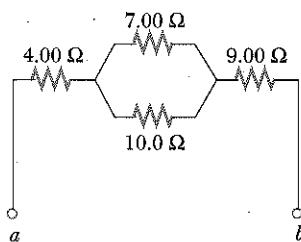
Kesim 28.1 Elektromotor Kuvveti

1. Bir baryaya 15 V'luk bir emk'ine sahiptir. R gibi bir dış yük direncine 20 W'lık bir güç sağlandığında baryanın çıkış voltajı 11,6 V oluyor. (a) R 'nin değeri nedir? (b) Baryanın iç direnci nedir?
2. (a) Çıkış voltajı 10 V ve iç direnci $0,2 \Omega$ olan baryaya bağlı $5,6 \Omega$ 'luk dirençten geçen akım nedir?
(b) Baryanın emk'i nedir?
3. 1,50 V'luk iki pil, pozitif uçları aynı yönde olacak şekilde bir lambaya seri olarak bağlanılmışlardır. Pillerden biri $0,255 \Omega$ 'luk diğer $0,153 \Omega$ 'luk iç dirence sahiptir. Anahtar kapatıldığından lambadan geçen akım $0,6 \text{ A}$ 'dır. (a) Lambanın direnci nedir? (b) Sıcaklıktaki artmayla temsil edildiği gibi, harcanan gücün ne kadarlık orani pillerde harcanmaktadır.
4. Bir otomobil aküsü $0,080 \Omega$ iç dirence ve $12,6 \text{ V}'$ lik emk'ya sahiptir. Farları toplam $5,00 \Omega$ (sabit kabul ediniz.) dirence sahiptir. (a) Yalnızca akünün yüklü

olduğu başlangıç halinde, (b) motor çalıştırınca sonra motordan ilave $35,0 \text{ A}$ 'lık akımla aküden beslenirken, farların ampullerinin uçları arasındaki potansiyel farkı nedir?

Kesim 28.2 Seri ve Paralel Bağlı Dirençler

5. R_1 direncine sahip bir ilmek devresindeki akım $2,00 \text{ A}$ 'dır. R_1 direncine seri olarak $R_2 = 3,00 \Omega$ 'luk bir direnç ilave edildiği zaman, akım $1,60 \text{ A}$ 'e indirgeniyor. R_1 'in değeri nedir?
6. (a) Şekil P28.6'daki a ve b noktaları arasındaki eşdeğer direnci bulunuz. (b) a ve b noktaları arasına $34 \text{ V}'$ luk bir potansiyel farkı uygulanmaktadır. Her bir dirençteki akımı hesaplayınız.
7. Bir televizyon tamircisinin 100Ω luk bir dirence ihtiyacı vardır. Fakat tamircinin bu değerde direnci yoktur. Alet kutusunda sadece bir tane 500Ω luk di-

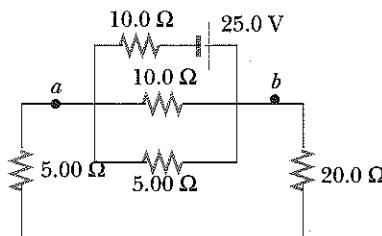


Şekil P28.6

renç ve iki tane $250\ \Omega$ luk direnç vardır. Eldeki dirençlerle, gereken direnç nasıl elde edilebilir?

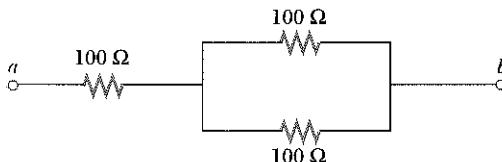
8. 120 V ve 75 W'lik bir ampul, her biri $0,800\ \Omega$ olan iki iletken telden yapılmış geniş uzun bir yaylı soketin bir ucuna vidalanmıştır. Geniş yaylı soketin diğer ucu 120 V'luk bir prize bağlanmıştır. Bir devre diyagramı çiziniz ve ampulün çektiği gerçek gücünü hesaplayınız.

9. Şekil P28.9'da gösterilen devre veriliyor. (a) $20\ \Omega$ luk dirençteki akımı ve (b) a ve b noktaları arasındaki potansiyel farkını bulunuz.



Şekil P28.9

10. Eşit uzunluklu dört bakır tel seri olarak bağlanmıştır. Tellerin kesit alımları, $1,00\ cm^2$, $3,00\ cm^2$ ve $5,00\ cm^2$ şeklidir. Bunlara 120 V'luk bir voltaj uygulandırsa $2,00\ cm^2$ 'lik telin uçları arasındaki potansiyel farkı nedir?
 11. Üç adet $100\ \Omega$ luk direnç, Şekil P28.11'de gösterildiği gibi bağlanılmışlardır. Dirençlerin herhangi birinde harcanabilecek maksimum güç $25\ W$ 'tur. (a) a ve b uçlarına uygulanabilecek maksimum voltaj nedir? (b) (a)'da bulunan voltaj için, her bir dirençte harcanan güç nedir? Harcanan toplam güç nedir?

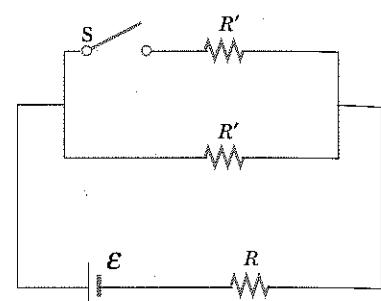


Şekil P28.11

12. Sadece $2\ \Omega$, $3\ \Omega$ ve $4\ \Omega$ luk üç direnç kullanarak, bir veya daha fazla dirençlerin çeşitli bileşimleriyle elde edilebilecek 17 farklı direnç değerini bulunuz. Gerek artan direnç değerlerini tablo halinde yazınız.

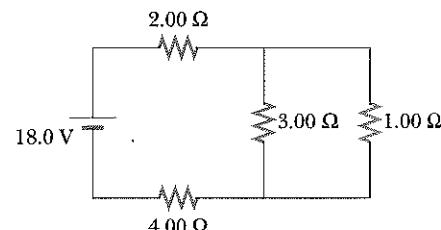
13. $500\ \Omega$ luk bir direnç, bir devredeki dirençle paralel bağlandığında devredeki akım üç kat artmaktadır. $500\ \Omega$ luk direnç bağlanmadan önce devrenin direnci nedir?

14. Şekil P28.14 te gösterilen devrenin üst kısmında harcanan güç anahtarın açık veya kapalı olmasına bağlı değildir. Şayet $R = 1,00\ \Omega$ ise R' nedir? Voltaj kaynağının iç direncini ihmal ediniz.



Şekil P28.14

15. Şekil P28.15 de gösterilen devredeki her bir dirençte harcanan gücünü hesaplayınız.



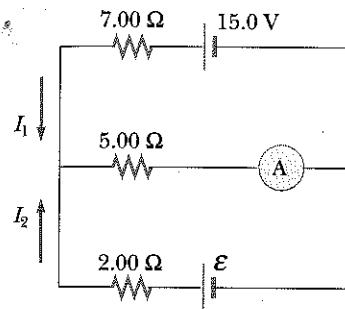
Şekil P28.15

16. Seri bağlı iki direnç, $690\ \Omega$ luk eşdeğer dirence sahiptir. Bunlar paralel olarak bağlandıklarında eşdeğer direnç $150\ \Omega$ olmaktadır. Her bir direncin değerini bulunuz.

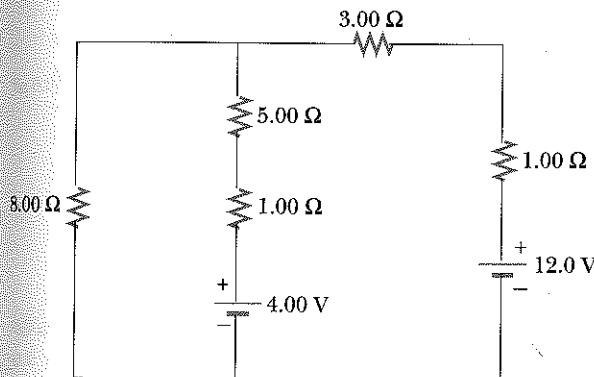
17. Şekil 28.4 ve 28.5'de $R_1 = 11\ \Omega$, $R_2 = 22\ \Omega$ ve batarya 33 V'luk bir çıkış voltajına sahip olsun. (a) Şekil 28.5'de gösterilen paralel devrede, hangi direnç daha fazla güç kullanır? (b) Her bir direnç tarafından kullanılan toplam gücün (I^2R) batarya tarafından sağlanan gücü (IV) eşit olduğunu gösteriniz. (c) Şekil 28.4'deki seri devrede, hangi direnç daha fazla güç kullanır? (d) her bir direnç tarafından kullanılan toplam gücün (I^2R), batarya tarafından sağlanan gücü ($P = IV$) eşit olduğunu gösteriniz. (e) Hangi devre düzeneinde fazla güç kullanılır?

Kesim 28.3 Kirchhoff Kuralları

18. Şekil P28.18 de gösterilen devrede ampermetre 2,00 A okuyor. I_1 , I_2 ve \mathcal{E} yi bulunuz.

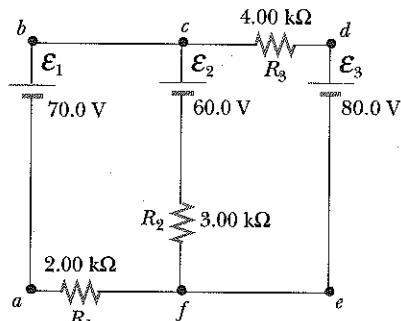
**Şekil P28.18**

19. Şekil P28.19'da gösterilen devrenin her bir kolundaki akımı hesaplayınız.

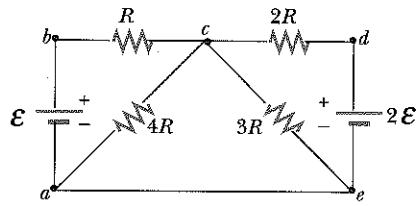
**Şekil P28.19, 20 ve 21**

20. Şekil P28.19 da, her farklı akımı ölçmek için yeterli sayıdaki ampermetreleri gösteriniz. Her bir direnç ve her bir bataryanın uçları arasındaki potansiyel farkını ölçmek için gereken yeterli sayıdaki voltmetreleri gösteriniz.
21. Şekil P28.19 da gösterilen ve problem 19 da düşünülen devre 2,00 dk bağlanmıştır. (a) Her bir batarya tarafından sağlanan enerjiyi bulunuz. (b) Her bir dirençte harcanan enerjiyi bulunuz. (c) Bataryadaki kimyasal enerjiden devre direncindeki iç enerjiye dönüştürülen enerjinin toplam miktarnı bulunuz.

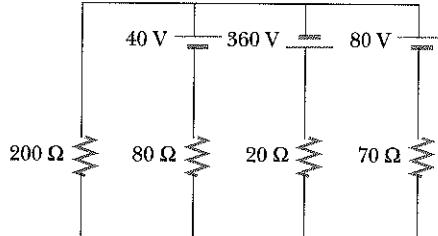
22. Kirchhoff kurallarını kullanarak, (a) Şekil P28.22'de gösterilen devrede her bir dirençteki akımı bulunuz. (b) c ve f noktaları arasındaki potansiyel farkını bulunuz. Bu noktaların hangisi daha yüksek potansiyeldedir?

**Şekil P28.22**

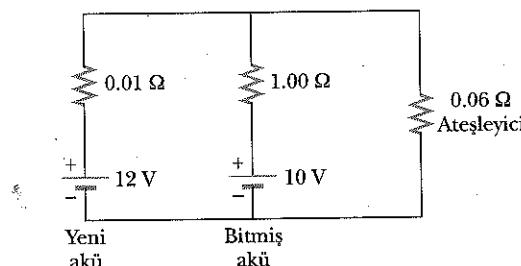
23. Şekil P28.23 deki devrede $R = 1,00 \text{ k}\Omega$ ve $\mathcal{E} = 250 \text{ V}$ ise, a ve e arasındaki yatay teldeki akımın yönünü ve şiddetini belirleyiniz.

**Şekil P28.23**

24. Şekil P28.24 teki devrede her bir dirençteki akımı ve 200Ω 'luk direncin uçları arasındaki voltajı hesaplayınız.

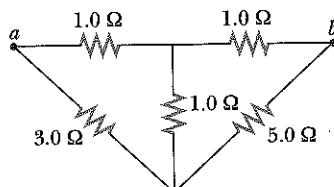
**Şekil P28.24**

25. "Bitmiş" bir akümülatör, başka bir arabanın yeni aküsüne ara kablolarla bağlanarak yüklenmektedir (Şekil P28.25). Bujideki (atesleyici) direnci ve bitmiş aküdeki akımı bulunuz.



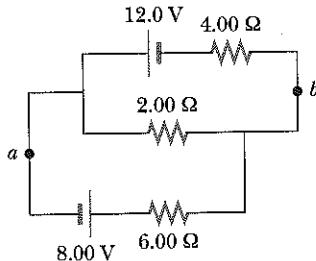
Şekil P28.25

26. Şekil P28.26'da gösterilen ağı için $R_{ab} = \frac{27}{17} \Omega$ olduğunu gösteriniz.



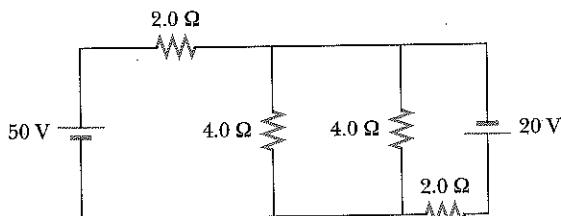
Şekil P28.26

27. Şekil P28.27'de gösterilen devre için (a) 2Ω luk dirençteki akımı ve (b) a ve b noktaları arasındaki potansiyel farkını hesaplayınız.



Şekil P28.27

28. Şekil P28.28'de görülen devrede, her bir dirence harcanan gücü hesaplayınız.



Şekil P28.28

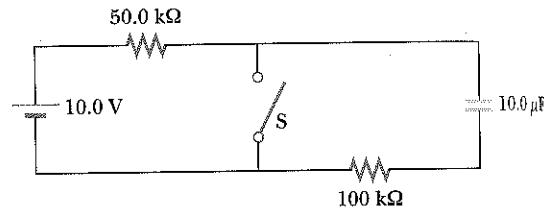
Kesim 28.4 RC Devreleri

WEB 29. $R = 1 \text{ M}\Omega$, $C = 5 \mu\text{F}$ ve $\mathcal{E} = 30 \text{ V}$ olan bir seri RC devresi (Şekil 28.16'ya bak) veriliyor. (a) Devrenin zaman sabitini ve (b) anahtar kapatıldıkten sonra kondansatör üzerindeki maksimum yükü bulunuz. (c) $t = 0$ da anahtar kapalıken, $10,0 \text{ s}$ sonra dirençteki akımı bulunuz.

30. $5,10 \mu\text{C}$ 'luk bir başlangıç yüküne sahip 2 nF 'lik bir kondansatör $1,30 \text{ k}\Omega$ 'luk bir direnç üzerinden boşalmaktadır. (a) Kondansatörün uçlarına bağlandığından $9 \mu\text{s}$ sonra dirençten geçen akımı hesaplayınız. (b) $8 \mu\text{s}$ sonra kondansatör üzerinde ne kadar yük birikir? (c) Direnç üzerindeki maksimum akım nedir?

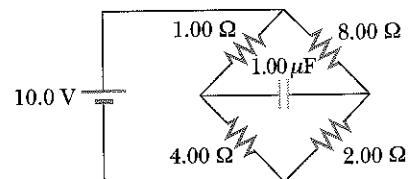
31. Tamamen yüklü bir kondansatörde $U_0 \text{ J}$ 'lık enerji depolanmıştır. Boşalma esnasında yük, ilk değerinin yarısına düşüğünde geride ne kadar enerji kalmıştır?

32. Şekil P28.32 de görülen devrede, S anahtarı uzun zamanlı açıktır. Anahtar ani olarak kapatılıyor. (a) Anahtar kapanmadan önce, (b) anahtar kapatıldıkten sonra, zaman sabitini bulunuz. (c) $t = 0$ da anahtar kapalısa, zamanın fonksiyonu olarak devredeki akımı hesaplayınız.



Şekil P28.32

33. Devre, Şekil P28.33'de gösterildiği gibi uzunca bir süre çalıştırılmıştır. (a) Kondansatörün uçları arasındaki voltaj ne kadardır? (b) Akü bağlantısı açılırsa, kondansatörün başlangıç voltajının $1/10$ ine boşalması için ne kadar süre gereklidir?



Şekil P28.33

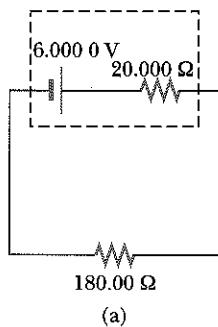
34. $4 \text{ M}\Omega$ 'luk bir direnç ve $3 \mu\text{F}$ 'lik bir kondansatör 19 V 'luk bir güç kaynağı ile seri olarak bağlanmıştır. (a) Devrenin zaman sabit nedir? (b) Devredeki akımı ve kondansatör üzerindeki yükü zamanın fonksiyonu olarak ifade ediniz.

35. Kondansatör üretiminde kullanılan dielektrik malzemeler, iletkenliklerinin küçük fakat sıfır olmaması ile tanınır. Bu nedenle yüklü bir kondansatör, yükünü dielektrik malzemeden yavaşça "sızdırarak" kaybedecektir. $3,6 \mu\text{F}$ 'lik bir kondansatör yükünü öyle sızdırmaktadır ki potansiyel farkı, $4,0 \text{ s}'de$ başlangıç değerinin yarısına düşmektedir. Dielektriğin eşdeğer direnci nedir?
36. Kondansatör üretiminde kullanılan dielektrik malzemeler, iletkenliklerinin küçük fakat sıfır olmaması ile tanınır. Bu nedenle yüklü bir kondansatör, yükünü dielektrik malzemeden yavaşça "sızdırarak" kaybedecektir. C sıgasına sahip bir kondansatör yükünü öyle sızdırmaktadır ki potansiyel farkı, t s'de başlangıç değerinin yarısına düşmektedir. Dielektriğin eşdeğer direnci nedir?
37. Bir RC devresindeki kondansatör, $0,900 \text{ s}$ içerisinde maksimum değerinin % 60'na kadar yükleniyor. Devrenin zaman sabiti nedir?

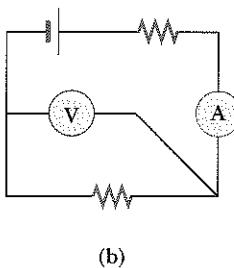
(Seçmeli)

Kesim 28.5 Elektrikli Aletler

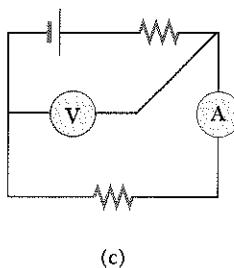
38. Tam skala sapması için $1,5 \text{ mA}'lik$ akım gereken ve 75Ω luk bir dirence sahip tipik bir galvanometre, bu akımları ölçmek için kullanılabilir. Hassas ölçü aletine hasar vermeden büyük akımları ölçmek için, Şekil 28.24a'dakine benzeyen nisbeten küçük değerli bir şönt direnci, ölçü aletine paralel olarak bağlanıyor. Böylece, akının çoğu şönt direnci üzerinden geçecektir. Aletin tam-skala sapmasında $1\text{A}'lik$ bir akım ölçülebilmesi için şönt direncinin değerini hesaplayınız. (İpucu: Kirchhoff kurallarını kullanınız.)
39. Önceki problemde kullanılan aynı galvanometre, voltaj ölçmek için de kullanılabilir. Bu durumda, Şekil 28.24b'deki gibi büyük bir direnç alet ile seri olarak bağlanır. Böylece, büyük voltaj uygulandığında aletten geçen akım sınırlanır. Potansiyel düşmesinin çoğu seri olarak bağlanan direnç üzerinde meydana gelir. Tam-skala saptığında alet, $25,0 \text{ V}'luk$ bir voltaj ölçülebilmesi için direnç değeri ne olmalıdır?
40. $1,00 \text{ mA}$ akıma tam-ölçek hassasiyete sahip bir galvanometreyi, çıkış uçlarına $1,00 \text{ V}'luk$ bir potansiyel uygulandığında tam-ölçek sapma gösterecek bir voltmetre yapmak için 900Ω luk bir seri direnç gerekmektedir. Aynı galvanometreyi 50 V (tam-skalalı) 'luk bir voltmetre yapmak için gereken seri direncin değeri nedir?
41. Bir galvanometrenin 60Ω luk iç dirence sahip olduğunu ve tam-ölçek sapması için $0,500 \text{ mA}'lik$ bir akıma ihtiyaç duyulduğunu varsayıy়iz. Şayet galvanometre-direnç ikilisinin, tam-ölçek sapmada $0,100\text{A}'lik$ bir akım ölçebilmesi için paralel olarak bağlanması gereken direncin değeri ne olur?
42. Şekil 28.25'de gösterilen tipteki bir Wheatstone köprüsü, bir bağlantı teli direncinin hassas bir ölçümünü yapmak için kullanılıyor. Devrede R_3 olarak gösterilen direnç $1 \text{ k}\Omega$ dur. Köprü, $R_1 = 2,5 R_2$ olacak şekilde R_1 ayarlanarak dengeleniyorsa, R_x nedir?
43. Şekil 28.25'de gösterilen Wheatstone köprüsünün dengede olmadığı durumu düşünün. Galvanometreden geçen akım, $R_x = R_3 = 7 \Omega$, $R_2 = 21 \Omega$ ve $R = 14 \Omega$ olduğu durumda hesaplayınız. Köprünün uçlarındaki voltajın 70 V olduğunu varsayıy়iz ve galvanometrenin direncini ihmal ediniz.
44. **Tarama Problemi.** Wheatstone köprüsü bir telin zorlanması ($\Delta L/L_i$) ölçmek için kullanılabilir. (Kesim 12.4'e bakınız.) Burada L_i telin zorlanmadan önceki uzunluğu, L zorlanmadan sonraki uzunluğu ve $\Delta L = L - L_i$ dir. $\alpha = \Delta L/L_i$ alalım. Herhangi bir uzunluk için direncin, $R = R_i(1 + 2\alpha + \alpha^2)$ olduğunu gösteriniz. Burada $R_i = \rho L_i/A_i$ dir. Telin direncinin ve hacminin sabit kaldığını kabul ediniz.
45. Şekil 28.27'de gösterilen potansiyometre devresi veriliyor. $1,0186 \text{ V}'luk$ standart bir pil kullanıldığından ve a ve d arasındaki direnç 36Ω olduğunda, galvanometre sıfır göstermektedir. Standart pil yerine bilinmeyen bir emk konup direnç 48Ω 'a ayarlanırsa galvanometre sıfır göstermektedir. Bilinmeyen emk'nin değeri nedir?
46. **Sayaç Yüklenmesi.** Virgülden sonra beş haneye kadar bu problemi yürütünüz. Şekil P28.46'ya göre, (a) İç direnci $20,000 \Omega$ ve emk'sı $6,000 \text{ V}$ olan bir bataryanın uçları arasında $180,00 \Omega$ 'luk direnç bağlandığı zaman, direncenin akan akım nedir? Direncin uçları



(a)



(b)



(c)

Şekil P28.46

arasındaki potansiyel farkı ne olacaktır? (b) Şekil P28.46 da gösterildiği gibi devreye $20\,000\,\Omega$ dirençli bir voltmetre ve $0,500\,00\,\Omega$ dirençli bir ampermetre ilave edildiğini kabul ediniz. Her birinin okuduğu değeri vulunuz. (c) Şekil P28.46 da gösterildiği gibi, telin bir ucu hareketlidir. Sayaçların yeni okuduğu değerleri bulunuz.

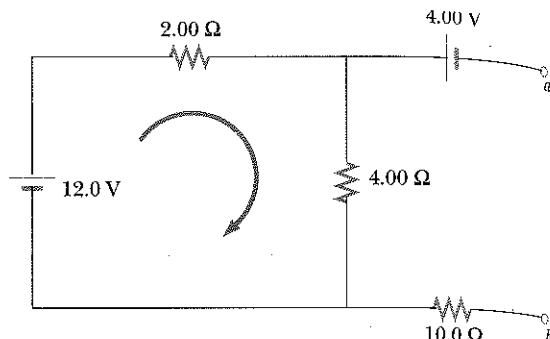
(Seçmeli)

Kesim 28.6 Elektrik Tesisatları ve Emniyeti

47. Bir elektrik ısıtıcısı 1500 W , bir tost makinası 750 W ve elektrikli bir kızartma aleti $1000\text{ W}'\text{l}ik$ güç sahiptir. Bu üç alet ortaklaşa $120\text{ V}'\text{l}uk$ bir devreye bağlıdır. (a) Her bir alet ne kadar akım çeker? (b) Bu durumda $25\text{ A}'\text{l}ik$ bir devre yeterli midir? Açıklayınız.
48. 8 fit uzunlukta bir uzatma kablosu, iki tane, her biri $1,024\text{ mm}$ çapında 18-ayar bakır telden oluşmuştur. (a) $1\text{ A}'\text{l}ik$ bir akım taşıdığında, bu kablodan harcanan güç (I^2R) ne kadardır? (b) $10\text{ A}'\text{l}ik$ bir akım taşıdığında ne kadar güç harcanır?
49. Ekonomik nedenlerle bazen bakır kablolar yerine alüminyum kablolar kullanılır. 12-ayar bakır kablo için maksimum izin verilebilir akım 20 A 'dır. Bakır kabloların birim uzunlığında harcanan gücün aynısını kullanmak için, 12-ayar alüminyum kabloda maksimum izin verilebilir akım ne olmalıdır?
50. Masa lambanızı yakınız. Başparmağınızla yayı kaldığınız ve onun genişliğini karınızla ölçünüz. (a) Elinizden akan akımın şiddetin tahmini olarak hesaplayınız. Lambanın içindeki yaya dokunan başparmağınızın $\sim 10^2\text{ V}$ ve iletke dokunan işaret parmağınızın toprak potansiyelindedir. (0 V) olduğunu kabul edebilirsiniz. Elinizin direnci sizin derinizin solmasının sonucu dış kısımlarının nemliliğine ve parmağınızın kalınlığına kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Baş parmağınızın ucu ve işaret parmağınızın ucu arasındaki direncin $\sim 10^4\,\Omega$ olduğunu kabul ediniz. Lastik izalatörlü bir yayla model kurabilirsiniz. Ölçüğünüz diğer nicelikleri veya tahmininizi ve onların değerlerini ifade ediniz. Sebebinizi izah ediniz. (b) Vücutundan diğeri yüklerden veya akımlardan izole olduğunu farz ediniz. Dokunan başparmağınızın ve işaret parmağınızın potansiyellerini tahmin ediniz.

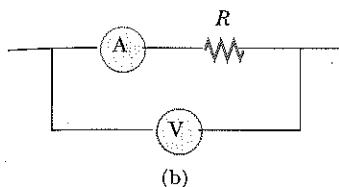
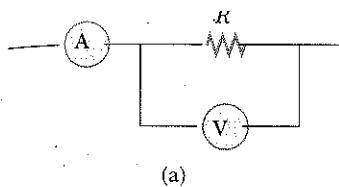
EK PROBLEMLER

51. Bir transistörlü radyoda seri olarak bağlı dört tane $1,50\text{-V}$ batarya kullanılmıştır. Bataryalar toplam $240\text{ C}'\text{l}ik$ yük üretebiliyorlarsa ve radyo $200\,\Omega$ dirence sahipse bataryalar ne kadar süre dayanır?
52. Bir batarya $9,20\text{ V}$ emk'ya ve $1,20\,\Omega$ içdirence sahiptir. (a) Bataryanın direnci $12,8\text{ W}'\text{l}ik$ güçten ne kadar çeker? (b) $21,2\text{ W}'\text{l}ik$ güçten ne kadar çeker?
53. Şekil P28.53'de gösterilen devrede a ve b noktaları arasındaki potansiyel farkını hesaplayınız ve hangi noktanın daha yüksek potansiyelde olduğunu belirleyiniz.



Şekil P28.53

54. $10\,\mu\text{F}'\text{l}ik$ bir kondansatör, $10\text{ V}'\text{l}uk$ bir batarya ile bir R direnci üzerinden yüklenmektedir. Yüklenme başladıkten 3 s sonra, kondansatör $4\text{ V}'\text{l}uk$ bir potansiyel farkına ulaşmaktadır. R 'nin değerini bulunuz.
55. İki tane bilinmeyen direnç seri bağlandığında, $5,00\text{ A}'\text{l}ik$ toplam bir akım ile $225\text{ W}'\text{l}ik$ bir güç harcanmaktadır. Dirençler paralel bağlandığında, aynı toplam akım için $50\text{ W}'\text{l}ik$ bir güç harcanmaktadır. Dirençlerin değerlerini tayin ediniz.
56. İki tane bilinmeyen direnç seri bağlandığında, 1 A toplam bir akım ile \mathcal{P}_t gücünü harcanmaktadır. Dirençler paralel bağlandığında, aynı toplam akım için \mathcal{P}_p gücü harcanmaktadır. Dirençlerin değerlerini bulunuz.
57. Bir batarya \mathbf{E} emk'i ve r iç direncine sahiptir. Bataryanın çıkış uçlarına bir R değişken direnci bağlanmıştır. Aşağıdakileri maksimum yapacak olan R değerini bulunuz. (a) Bataryanın çıkış uçlarındaki potansiyel farkını, (b) devredeki akımı ve (c) dirence verilen gücü.
58. Bir dc güç kaynağı, $40,0\text{ V}'\text{l}uk$ bir açık-devre emk'i ve $2,00\,\Omega$ luk bir iç dirence sahiptir. Bu kaynak, her biri $6,00\text{ V}'\text{l}uk$ emk'i ve $0,300\,\Omega$ luk iç dirence sahip seri bağlı iki aküyü şarj etmek için kullanılmaktadır. Şarj akımı $4,00\text{ A}$ ise, (a) seri olarak bağlanması gereken ilave direncin değeri ne olmalıdır? (b) güç kaynağı, aküler ve ilave dirençte kaybolan gücü (I^2R) bulunuz. (c) Ne kadarlık bir güç aküler içerisinde kimyasal enerjiye dönüştürülür?
59. Bir R direncinin değeri, Şekil P28.59'da gösterilen ampermetre-voltmetre sistemi ile tayin edilecektir. Ampermetre $0,500\,\Omega$, Voltmetre $20\,000\,\Omega$ luk bir dirence sahiptir. (a) Şekil P28.59a ve (b) Şekil P28.59b'de gösterilen devreler kullanılarak ölçülmüşse, R 'nin hangi gerçek değeri arasında en fazla $\% 5$ 'lik hata ile ölçüm yapılacaktır? Her bir devre için ayrı, ayrı tayin ediniz.

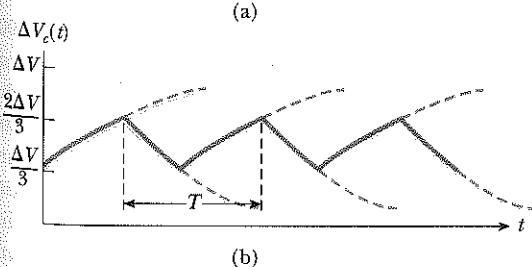
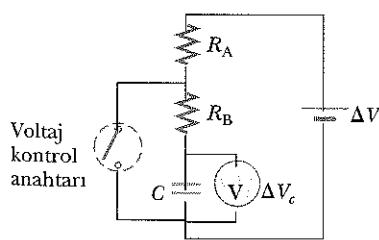


Şekil P28.59

60. Şekil 28.16'daki gibi, bir batarya bir kondansatörü, bir direnç üzerinden yüklemek için kullanılmaktadır. Kondansatörün yüklenme işleminde batarya tarafından sağlanan enerjinin yarısının dirençte enerji olarak harcandığını, yarısının da kondansatörde depolandığını gösteriniz.

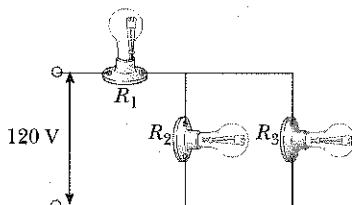
61. Basit bir RC devresinde (Şekil 28.16) bileşenlerin değerleri aşağıdaki gibidir: $C = 1,00 \mu\text{F}$, $R = 2,00 \times 10^6 \Omega$ ve $\mathcal{E} = 10,0 \text{ V}$. Devredeki anahtar kapatıldıkten 10 s sonra (a) Kondansatör üzerindeki yükü, (b) dirençteki akımı (c) kondansatörde enerjinin birikme hızını ve (d) batarya tarafından enerjinin verilme hızını hesaplayınız.

62. Şekil P28.62a'da gösterilen devredeki anahtar $V_c > 2V/3$ olduğunda kapatlıyor, $V_c < V/3$ olduğunda açılıyor. Voltmetre, Şekil 28.62b'de çizilen voltajı gösterecektir. Dalganın T periyodu R_A , R_B ve C cinsinden nedir?



Şekil P28.62

63. 60 W ve 120 V'luk üç lamba Şekil 28.63'de gösterildiği gibi 120 V'luk bir güç kaynağına bağlanmıştır. (a) Üç lambada harcanan toplam gücün ve (b) her bir lambanın uçlarındaki voltajının bulunuz. Her bir lambanın direncini (gerçekte direnç akım ile artmasına rağmen) Ohm kanununa uyduğunu varsayıy়iz.



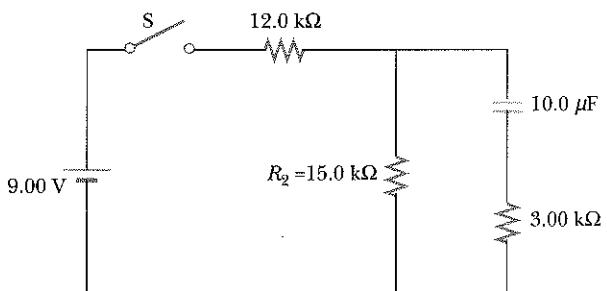
Şekil P28.63

64. Aşağıdaki verilen voltajlar için tam-ölçek sapma yapabilecek dc voltmetresi tasarlayınız: (a) 20,0 V, (b) 50,0 V ve (c) 100 V. Ölçü aletinin, 60Ω luk bir bobin direncine ve $1,00 \text{ mA}$ 'lik bir akım için tam-ölçek sapmaya sahip olduğunu varsayıy়iz.

65. Aşağıda verilen akımlar için tam-ölçek sapma yapabilecek bir dc ampermetersi tasarlayınız. (a) $25,0 \text{ mA}$, (b) $50,0 \text{ mA}$ ve (c) 100 mA . Ölçü aletinin 25Ω uk bir bobin direncine ve $1,00 \text{ mA}$ 'lik bir tam-ölçek sapmaya sahip olduğunu varsayıy়iz.

66. Bir galvanometre, 2500Ω luk bir dirençle seri olarak bağlandığında $2,00 \text{ V}$ 'luk tam-ölçek sapma yapabilen bir voltmetre olarak çalışmaktadır. Aynı galvanometre $0,22 \Omega$ 'luk bir direnç ile paralel olarak bağlandığında, $0,500 \text{ A}$ tam ölçek sapan bir ampermere olarak çalışmaktadır. Galvanometrenin iç direncini ve tam-ölçek sapmayı oluşturmak için gerekli akımı bulunuz.

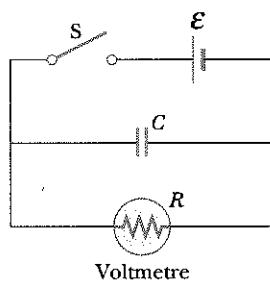
67. Şekil P28.67'de, anahtarın kondansatör tamamen yükleneceği kadar yeterince uzun bir süre kapatıldığı varsayıy়iz. (a) her bir direnç içerisindeki geçen kararlı durum akımını, (b) kondansatördeki yükü bulunuz. (c) Şimdi anahtar $t = 0$ anında açılıyor. R_2 'den geçen I_{R2} akımı için zamanın fonksiyonu olarak bir denklem yazınız, (d) kondansatör üzerindeki yük başlangıç değerinin $1/5$ 'ine düşmesi için gerek zaman bulunuz.



Şekil P28.67

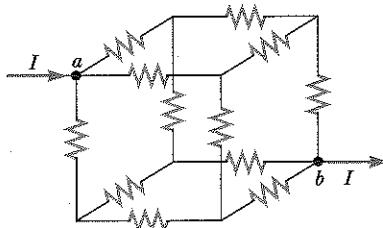
68. Şekil P28.68'de gösterilen devre, $10,0 \text{ M}\Omega$ lük dirence sahip bir voltmetre ve $6,19 \text{ V}$ 'luk emk'ya sahip bir batarşa kullanarak, laboratuvara bilinmeyen bir C sığasını ölçmek için kuruluyor. Aşağıdaki tabloda verilen değerler zamanın fonksiyonu olarak kondansatörün uçlarında ölçülen voltajlardır. Burada $t = 0$ anahtarın açıldığı zamanı temsil etmektedir. (a) Zamanla göre $\ln(\mathcal{E}/\Delta V)$ 'nin grafiğini çiziniz ve verilecek uygun bir denklem bulmak için en küçük kareler metodunu kullanınız. (b) Grafiğin eğiminden devrenin zaman sabitini ve sığanın değerini elde ediniz.

$\Delta V(\text{V})$	$t(\text{s})$	$\ln(\mathcal{E}/\Delta V)$
6.19	0	
5.55	4.87	
4.93	11.1	
4.34	19.4	
3.72	30.8	
3.09	46.6	
2.47	67.3	
1.83	102.2	



Şekil P28.68

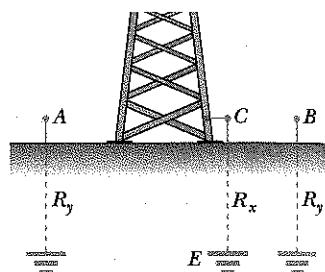
69. (a) Simetri yaklaşımını kullanarak, Şekil P28.69'daki düzenlemede herhangi bir dirençten geçen akımın, ya $I/3$ ya da $I/6$ olacağını gösteriniz. Bütün dirençler aynı r değerine sahiptir. (b) a ve b noktaları arasındaki eşdeğer direncin $(5/6)r$ olduğunu gösteriniz.



Şekil P28.69

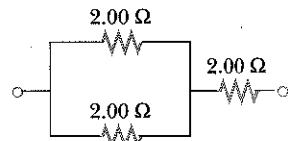
70. Radyo istasyon kampüsünün mühendislik öğrencisi anten kütlesi üzerinde yıldırım çubuğuunun tesiriini doğrulamak istiyorlar (Şekil P28.70). Bilinmeyen

R_x direnci C ve E noktaları arasındadır. E noktası gerçek bir toprak seviyesidir, fakat bu seviye yeryüzünün altında birkaç metreden olduğundan doğrudan ölçmek kolay değildir. Bilinmeyen R_x direncine genelde iki özdeş çubuk A ve B temel seviyesine bağlanmıştır. Aşağıdaki işlemleri takip ederek, kalın bir iletken telle A ve B bağlandığında A ve B noktaları arasındaki R_1 direncini ve A ve C noktaları arasındaki R_2 direncini ölçünüz. (a) Gözlemebilir R_1 ve R_2 cinsinden R_x için bir ifade türetiniz. (b) Yeterli miktarda temel direnç $R_x < 2,00 \Omega$ olacaktır. Şayet ölçümler $R_1 = 13,0 \Omega$ ve $R_2 = 6,00 \Omega$ değerlerini verirse, istasyonun temel seviyesi uygun mudur?



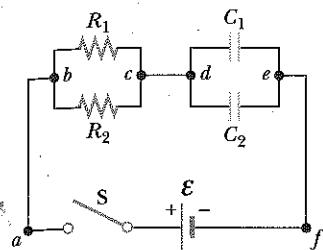
Şekil P28.70

71. Her biri 2Ω değerinde üç direnç, Şekil P28.71'de gösterildiği gibi düzenlenmiştir. Şayet her bir direnç için maksimum izin verilebilir güç $32,0 \text{ W}$ ise, devrede harcanabilecek maksimum gücün bulunuz.



Şekil P28.71

72. Şekil P28.72 deki devrede, iki direnç, $R_1 = 2,00 \text{ k}\Omega$ ve $R_2 = 3,00 \text{ k}\Omega$ ile iki kondansatör, $C_1 = 2,00 \mu\text{F}$ ve $C_2 = 3,00 \mu\text{F}$, $\mathcal{E} = 120 \text{ V}$ emk'lı bir aküye bağlıdır. Şayet S anahtarı kapanmadan önce kondansatörde yük bulunmuyorsa, anahtar kandıktan sonra sırasıyla C_1 ve C_2 kondansatörlerindeki q_1 ve q_2 yüklerini tayin ediniz. (İpucu: İlk devre, seri bağlı tek bir direnç ve tek bir kondansatörün bataryaya bağlanmasılarından oluşan basit bir RC devresidir. O zaman eşdeğer devrede depolanan yükü bulunuz.)



Şekil P28.72

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

28.1 R_1 dirençli ampül daha parlak olur. b , c 'ye bir telle bağlanırsa, R_2 devreden çıkarılmış olur ve direnç $R_1 + R_2$ değil R_1 olur. Direnç düşürügü için (uygulanan potansiyel farkı değişmez) batarya akımı artar. Buun anlamı R_1 'in akımı artar ve R_1 ampülü daha parlak yanar. R_2 ampülü devre dışı olmuştur. Çünkü bağlanan yeni telin akım için direnci yok gibidir ve sonuçta R_2 ampüllünden sıfır akım geçer.

28.2 Devreye seri olarak bir direnç eklenince, direnci artırıldığı için akım azalır. Bataryanın uçları arasındaki potansiyel artar çünkü, akım düşüncce küçük de olsa iç direnç üzerinde bir potansiyel düşmesine sebep olur.

- 73.** emk'sı \mathcal{E} olan bir bataryanız ve her biri sabit R dirençli aynı üç ampülünüz olduğunu kabul edin. Ampüller devreye (a) seri (b) paralel bağlandığında bataryadan çekilen güç ne olur? (c) Hangi bağlantıda ampüller daha parlak yanar?

Eğer ikinci direnç paralel bağlansa idi, devrenin toplam direnci azalacaktı ve sonucunda bataryanın akımı artacaktı. Kutupları arasındaki potansiyel farkı düşerdi, çünkü artan akım, iç direnç üzerinde büyük bir voltaj düşmesine sebep olurdu.

- 28.3** Biri yandığında diğerlerinin çalışmaya devam etmeleri için paralel bağlı olmaları gereklidir. Eğer seri bağlansalar idi, birinin bozulması ile devrenin tamamının akımı kesilirdi.
- 28.4** Devre kesici, akım, önceden belirlenmiş bir değeri aştığından devreye açarak akımı kesme görevi yapar. Dolayısı ile devre kesici, uygun bir devreye seri olarak bağlanmalıdır (Bkz. Şek. 28.28).

SİZCE NEDEN?

Kuzey Kutbu Fecir, başka bir deyişle, Kuzey İşinmlarının Alaska'da Fairbanks'a yakın bir yerde çekilmiş bir resmi. Böylese ne güzel fecir (tan yeri gibi) gösterimleriyle uzak kuzey ve güney enlemlerde sıkça, fakat orta enlemlerde nadiren karşılaşılır. Bu göz alıcı ışık perdelerinin nedeni nedir ve neden yalnız Dünya'nın kuzey ve güney kutuplarına yakın yerlerde görülebilirler? (George Lepp/Tony Stone Görüntüleri)



b ö l ü m

29

Manyetik Alanlar

29.0: İçerisi

- | | |
|---|--|
| 29.1 Manyetik Alan | Bir Manyetik Alan
İçerisindeki Hareketi |
| 29.2 Akım Taşıyan Bir İletkene
Etkiyen Manyetik Kuvvet | |
| 29.3 Düzgün bir Manyetik Alan
İçerisindeki Akım İlmeğine
Etkiyen Tork | 29.5 (Seçmeli) Bir Manyetik alan
İçerisinde Hareket Eden
Yüklü Parçacıklarla İlgili
Uygulamalar |
| 29.4 Yüklü Bir Parçacığın Düzgün | 29.6 (Seçmeli) Hall Olayı |

Bir çok bilim tarihçisi, Arab ya da Hind icadı olan ve manyetik bir iğne den oluşan pusulanın M.Ö 13 üncü asırda Çin'de kullanıldığına inanırlar. Yunanlıkların M.Ö 800 yıllarında manyetizma hakkında bilgileri vardı. Manyetit Taşının (Fe_3O_4) demir parçalarını çektigini keşfettiler. Efsaneye göre *Manyetit** adı, sürüsünü olatırken ayakkabısının çivileri ve sopasının ucu büyük manyetit parçalarına yapışıp kalan Magnes adlı çobandan gelmektedir.

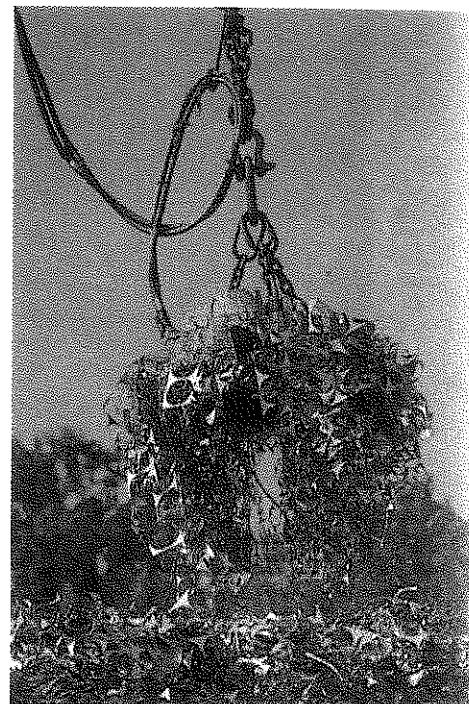
1269 da Pierre de Maricourt, doğal küresel bir mıknatıs yüzeyinin çeşitli noktalarına bir iğne yerleştirerek iğnenin aldığı yönlerin harmasını elde etti. Yonlerin, kürenin çap boyunca karşılıklı iki noktasından geçen ve küreyi kuşatan çizgiler oluşturduklarını gördü. Bu noktalara mıknatısın *kutupları* adını verdi. Daha sonraki deneyler, şekli ne olursa olsun her mıknatısın *kuzey* ve *güney kutup* denen iki kutbu olduğunu gösterdi. Bu kutuplar, elektrik yükleri gibi birbirleri üzerine kuvvet etki ettirirler. Bir başka deyişle benzer kutuplar birbirlerini iterler, zıt kutuplar ise birbirlerini çekerler. Kutuplar adlarını, bir mıknatısın Dünya'nın manyetik alanı içerisindeki davranış biçiminden aldı. Bir çubuk mıknatıs orta noktasından asılır ve yatay bir düzlemede serbestçe salınabilirse, kuzey kutbu Dünya'nın coğrafik Kuzey Kutbunu Güney Kutbu ise Dünya'nın coğrafik Güney Kutbunu gösterinceye kadar dönecektir.¹ (Aynı fikir basit bir pusulanın yapımında da kullanılır.)

1600'de William Gilbert (1540-1603) Maricourt'un deneylerini çeşitli maddeler kullanarak yaptı. Bir pusula iğnesinin belli bir hedefe yöneldiği gerçeğini kullanarak dünyanın büyük sürekli bir mıknatıs olduğunu önerdi. 1750'de deneyciler manyetik kutupların birbirleri üzerine çekici ya da itici kuvvetler etki ettiştiklerini ve bu kuvvetlerin etkileşen kutupların arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değiştigini göstermek için bir burulma terazisi kullandılar. İki manyetik kutup arasındaki kuvvet, iki elektrik yükü arasındaki kuvvete benzemekle birlikte önemli bir fark vardır. Elektrik yükleri birbirlerinden ayrılabilir. (elektron ya da proton gibi), buna karşın **şimdije kadar tek başına bir manyetik kutup oluşturulamadı**. Yani, **manyetik kutuplar her zaman çiftler halinde bulunurlar**. Şimdiye kadar yalıtılmış bir manyetik kutubu algılamak için yapılan tüm çabalar başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bir sürekli mıknatısın kaç kere kesildiği hiç önemli değildir, her parçanın mutlaka bir kuzey ve bir de güney kutbu vardır. (Manyetik *tek kutupların*-yalıtılmış kuzey ya da güney kutupların-doğada bulunabileceği konusunda kuramsal temelli bazı tahminler var ve onların var olup olmadığını algılama çabaları güncel araştırmaların deneysel yönünü oluşturmaktadır).

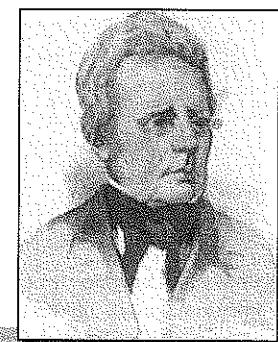
Elektrik ve manyetizma arasındaki ilişki, 1819 da Danimarkalı bilimadamı Hans Christian Oersted'in bir gösteri deneyi sırasında üzerinden elektrik akımı geçen bir telin yakınında duran bir pusula iğnesini saptırdığını bulması ile kesfedildi.² Bundan kısa bir süre sonra, André Ampère (1775-1836) akım taşıyan bir elektriksel iletkenin diğerine uyguladığı manyetik kuvveti hesaplamak için gerekli nicel yasaları elde etti. Aynı zamanda *tüm* manyetik olayların molekül büyülüüğündeki akım ilmeklerinden kaynaklandığını da önerdi.

1820'lerde, Faraday ve ondan bağımsız olarak Joseph Henry (1797-1878) elektrik akımı ile manyetizma arasındaki başka ilişkileri de gösterdiler. Bir

Dünyanın coğrafik Kuzey Kutbunu manyetik olarak bir güney kutup, buna karşın coğrafik Güney Kutbunun manyetik olarak Kuzey Kutup olduğuna dikkat ediniz. *Zıt* manyetik kutuplar birbirlerini çektileri için, mıknatısın Dünya'nın coğrafik kuzey kutubuna doğru çekilen kutbu manyetik kuzey kutubu ve Dünya'nın güney kutubuna doğru çekilen kutbu ise manyetik güney kutbudur. Aynı buluşum 1802'de bir İtalyan hukukçu, Gian Dominico Romognosi tarafından yayınlandı; fakat makale saygın bir dergi yerine *Gazzetta de Trentino* isimli bir gazetedede yayınladığı için önem verilmediğini belirtmek ilginç olur.



Tonlarca metal kirintılarını taşımak için bir elektro mıknatısın kullanımı (Jeffrey Sylvester/FPG Uluslararası)



Hans Christian Oersted

Danimarkalı fizikçi (1777-1851)
(North Wind Resim Arşivinden)

devre yakınında bulunan bir mıknatısi hareket ettirerek ya da yakınındaki bir devredeki akımı değiştirek bir elektrik akımı oluşturulabileceğini gösterdi. Bu gözlemler, değişen bir manyetik alanın bir elektrik alanı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Yıllarca sonra, Maxwell'in kuramsal çalışması, değişen bir elektrik alanının da bir manyetik alan oluşturduğunu gösterdi.

Elektrik ve manyetik olaylar arasındaki benzerlik, sürekli mıknatısları yapma yöntemlerini sağladı. Bölüm 23'de lastik ve yünün birbirlerine sürtüldüklerinde her ikisinin de yük edindiklerini — birinin pozitif ve diğerinin negatif — öğrendik. Benzer şekilde mıknatıslanmamış bir demir parçası, bir mıknatısla okşanarak mıknatıslanabilir. Manyetizma, demirde (ve diğer malzemelerde) başka yöntemlerle de oluşturulabilir. Örneğin, mıknatıslanmamış bir demir parçası kuvvetli bir mıknatısın yakınına dokunmayacak biçimde yerleştirilirse, sonunda mıknatıslanmış duruma geçer.

Bu bölüm, bir manyetik alan içerisindeki hareketli yüklerle akım taşıyan tellere etkiyen kuvvetleri incelemektedir. Manyetik alanın kendisinin kaynağı Bölüm 30'da tanıtılmaktadır.



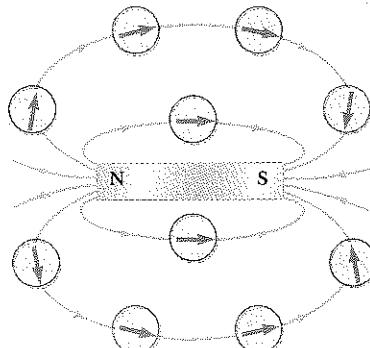
MANYETİK ALAN

12.2 Elektriği öğrenirken yüklü cisimler arasındaki etkileşimleri elektrik alanları ile betimedik. Herhangi bir duran ya da hareket eden yüklü parçacığın etrafını bir elektrik alanın sardığını anımsayın. Bölüm 30'da göreceğimiz gibi, herhangi bir *hareketli* elektrik yükünün çevresindeki uzay bölgesi elektrik alan ek olarak bir de manyetik alan içerir. Herhangi bir manyetik maddeyi de saran bir manyetik alan vardır.

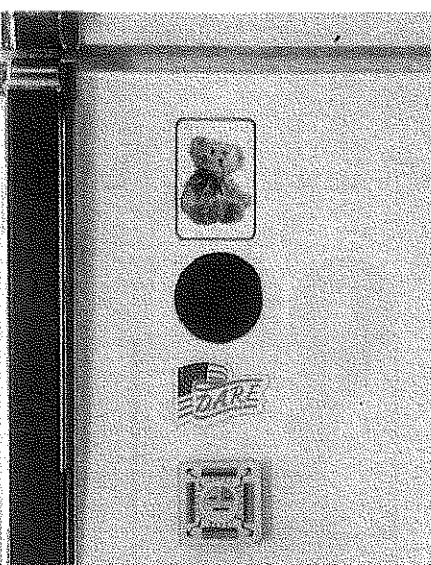
Tarihsel olarak, bir manyetik alanı temsil etmek için **B** harfi kullanılmış ve bu kitapta da kullandığımız gösterim budur. Herhangi bir yerdeki **B** manyetik alanının yönü oraya konan pusulanın gösterdiği yöndür. Şekil 29.1, bir çubuk mıknatısın manyetik alanının bir pusula yardımıyla nasıl izlenebileceğini göstermektedir. Mıknatısın dışındaki manyetik alan çizgilerinin kuzey kutbundan dışa doğru, güney kutbundan ise içe doğru yönlendiklerine dikkat ediniz. Şekil 29.2'de gösterildiği gibi, bir çubuk mıknatısın manyetik alan deşeni, küçük demir tozlarını kullanılarak görünür hale getirilebilir.

Uzayın bir noktasındaki **B** manyetik alanını, orada bulunan bir deneme cismine alanın uyguladığı F_B manyetik kuvveti cinsinden tanımlayabiliriz. Deneme cismimiz **v** hızıyla hareket eden yüklü bir parçacık olarak alınabilir. Similitik, yükün bulunduğu bölgede hiçbir elektrik ya da yerçekim alanı bulunmadığını varsayıyalım. Bir manyetik alan içerisinde hareket eden çeşitli yüklü parçacıkların hareketleri ile ilgili deneyler aşağıdaki sonuçları verir:

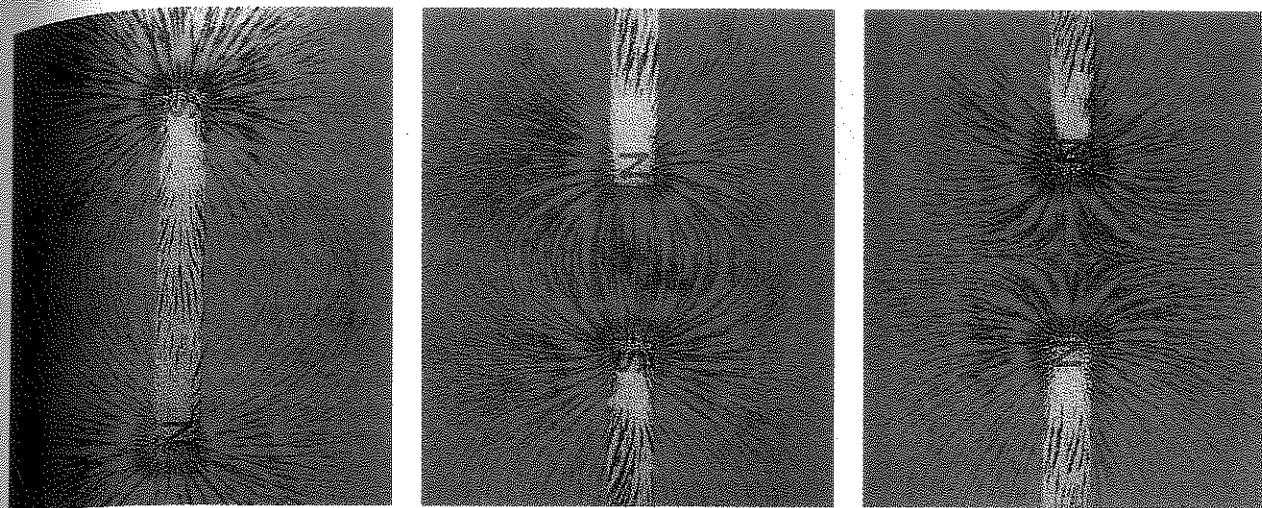
- Parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü F_B , parçacığın v süratini ve θ yükü ile orantılıdır.



Şekil 29.1 Bir çubuk mıknatısın manyetik alan çizgilerini izleyebilmek için pusula iğneleri kullanılabilir.



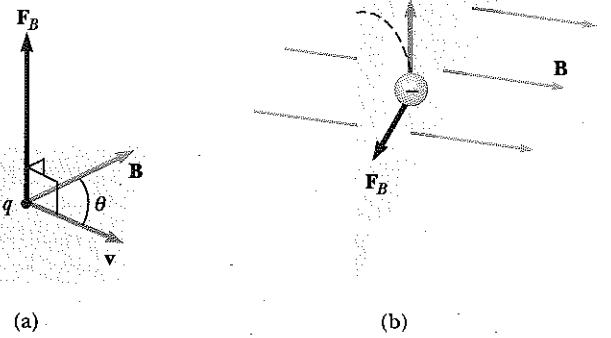
Bu buzdolabı, mıknatısları uç uca eklenen çok kısa çubuk mıknatıslara benzer. Eğer bir buzdolabı mıknatısının arkasını bir diğerinin arkasında çembersel bir yörüngede çizecek biçimde kaydırırsanız iki kuzey ve güney kutub birbirlerini geçeren bir titreme hissedebilirsiniz. (George Semple)



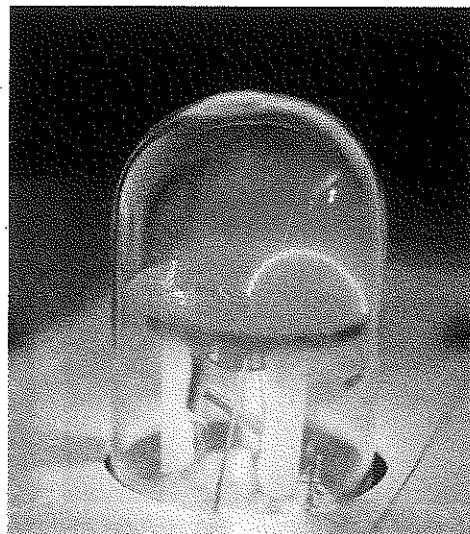
Şekil 29.2 (a) Bir cubuk mıknatısı çevreleyen manyetik alan deseninin (çizgilerinin) demir tozları ile görünür hale getirilmiş resmi. (b) İki cubuk mıknatısın *zit* kutupları arasındaki manyetik alan deseni. (c) İki cubuk mıknatısın *aynı cins* kutupları arasındaki manyetik alan deseni (Henry Leap ve Jim Lehman)

- \mathbf{F}_B Manyetik kuvvetinin büyüklüğü ve yönü, parçacığın hızına ve \mathbf{B} manyetik alanının büyüklüğü ve yönüne bağlıdır.
- Yüklü bir parçacık manyetik alan vektörüne *paralel* yönde hareket ettiği zaman ona etkiyen manyetik kuvvet *sıfırdır*.
- Parçacığın hız vektörü manyetik alanla bir $\theta \neq 0$ açısı yaptığı zaman, manyetik kuvvet hem \mathbf{v} , hem de \mathbf{B} ye dik yönde etki eder. Yani \mathbf{F}_B , \mathbf{v} ve \mathbf{B} nin oluşturduğu düzleme diktir (Şekil 29.3a).

Bir \mathbf{B} manyetik alanında hareket eden yüklü bir parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin özellikleri.



Şekil 29.3 Bir \mathbf{B} manyetik alanı içerisinde \mathbf{v} hızı ile hareket eden bir yüklü parçacığa etkiyen \mathbf{F}_B manyetik kuvvetin yönü. (a) \mathbf{v} , \mathbf{B} ile bir θ açısı yaptığı zaman manyetik kuvvet, hem \mathbf{v} ye ve hem de \mathbf{B} ye dikdir. (b) Bir manyetik alanı içerisinde aynı hızla hareket eden iki zit yüklü parçacık zit yönlü \mathbf{F}_B manyetik kuvvetleri etkir.



Bu resimdeki mavi beyaz yay, bir manyetik alan içerisinde hareket eden elektron demetinin izlediği çember biçimli yolu göstermektedir. Kap oldukça alçak basıncıda gaz içermektedir. Elektronlar, gaz atomlarına çarpınca atomların görünür bölgede ışık yaymalarına neden olurlar; böylece elektron demeti görünür hale gelir. Manyetik alan iki kanggal ile oluşturulmuştur (gösterilmemiştir). Aygit elektronun v/B oranını ölçmek amacıyla da kullanılabilir (CENCO'nun izniyle).

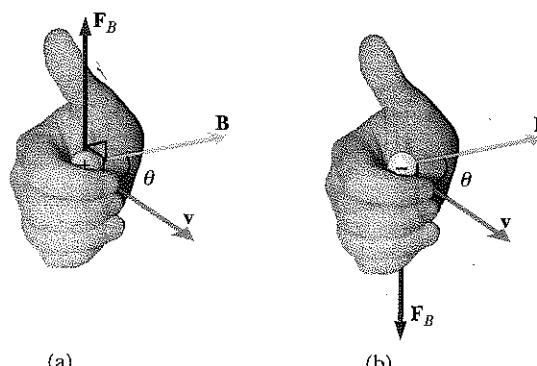
- Bir pozitif yükle etkiyen manyetik kuvvet, aynı yönde hareket eden bir negatif yükle etkiyen kuvvetin yönüne tersdir. (Şekil 29.3 b).
- Eğer parçacığın hız vektörü \mathbf{B} nin yönü ile bir θ açısı yaparsa, parçacığı etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü $\sin\theta$ ile orantılıdır.

Bu gözlemleri, manyetik kuvveti

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (29.1)$$

biçiminde yazarak özetleyebiliriz. Burada, q pozitif ise \mathbf{F}_B nin yönü, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönündedir. Bu kuvvetin yönü, vektörel çarpımın tanımı gereği (Kesim 11.2 ye bak) hem \mathbf{v} ye hem de \mathbf{B} ye diktir. Bu eşitlige, uzayın bir noktasındaki manyetik alanın işlemel bir tanımı gözüyle bakabilirim. Yani, manyetik alan hareteli bir yükü parçacığa etkiyen kuvvet cinsinden tanımlanabilir.

Şekil 29.4, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ vektör çarpımının yönünü bulmaya yarayan sağ-el kuralının kısa bir gösterimini vermektedir. Sağ elinizin dört parmağını avuç içi \mathbf{B} ye bakacak şekilde \mathbf{v} nin yönünde yöneltin ve sonra onları \mathbf{B} ye doğru bükün. O zaman diğer parmaklara dik olarak açılan başparmak $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönünü göster



Şekil 29.4 Bir \mathbf{B} manyetik alanı içerisinde \mathbf{v} hızı ile hareket eden q yüküne etkiyen manyetik kuvvet $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 'nin yönünü bulmaya yarayan sağ el kuralı. $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönü başparmağın işaret ettiği yönündedir. (a) Eğer q pozitif ise, \mathbf{F}_B başparmağın yönünde, yani, yukarıdır. (b) q negatif ise, \mathbf{F}_B aşağı yönde başparmağın işaret ettiği yönün tersindedir.

$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ olduğundan, q pozitifse \vec{F}_B , $\vec{v} \times \vec{B}$ nin yönünde (Şek. 29.4a), q negatif ise, $\vec{v} \times \vec{B}$ ile ters yönlüdür (Şekil 29.4b).

Manyetik kuvvetin büyüklüğü

$$F_B = |q|vB \sin \theta \quad (29.2)$$

bağıntısıyla verilir. Burada θ , \vec{v} ile \vec{B} nin arasındaki küçük açıdır. Bu eşitlikten, \vec{v} , \vec{B} ye paralel ya da antiparalel olduğunda ($\theta = 0$ veya 180°) \vec{F} 'nin sıfır olduğunu görürüz. Öte yandan, \vec{v} , \vec{B} ye dik olduğunda ($\theta = 90^\circ$) kuvvet, $F_{B,\text{maks}} = |q|vB$ ile verilen maksimum değerini alır.

Manyetik alan içerisinde hareket eden bir yükü parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü.

Sınamma Sorusu 29.1

Bir \vec{B} manyetik alanı içerisinde \vec{v} hızı ile hareket eden bir q yükü üzerinde manyetik kuvvetin yaptığı maksimum iş nedir?

Elektrik ve manyetik kuvvetler arasında birçok önemli farklar vardır:

- Elektrik kuvveti, her zaman elektrik alanına paralel, buna karşın manyetik kuvvet manyetik alana dik olarak etkir.
- Elektrik kuvveti, yüklü parçacığın hızından bağımsızdır. Halbuki, manyetik kuvvet yalnızca yüklü parçacık hareket halinde ise ona etki edebilir.
- Elektrik kuvveti yüklü bir parçacığın konumunu değiştirerek iş yapar, buna karşın kararlı bir manyetik alandan kaynaklanan manyetik kuvvet, parçacık yer değiştirdiğinde iş yapmaz.

Elektrik ve manyetik alanlar arasındaki farklar

Bu son ifadededen ve iş enerji teoreminden, yüklü bir parçacığın kinetik enerjisinin, yalnızca bir manyetik alanla değiştirilemeyeceği sonucuna ulaşırız. Başka bir deyişle,

\vec{v} hızı ile hareket eden bir yüke uygulanan manyetik alan onun hız vektörünün yönünü değiştirebilir fakat hızın büyüklüğünü veya kinetik enerjisini değiştiremez.

Manyetik alan bir parçacığın hızının büyüklüğünü değiştiremez.

Eşitlik 29.2 den manyetik alanın SI biriminin coulomb-metre/saniye başına Newton olduğu görülür, ki buna **tesla** (T) denir:

$$1 \text{ T} = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m}/\text{s}}$$

Saniye başına Coulomba bir amper dendiği için

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

dir.

Pratikte, manyetik alan birimi olarak cgs sisteminde **gauss** (G) da kullanılmaktadır. Gauss, teslaya $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ şeklinde bağlıdır. Manyetik alanların bazı tipik değerleri Çizelge 29.1 de verilmektedir.

Sınamma Sorusu 29.2

Bir çubuk mıknatısın kuzey kutup ucu pozitif yüklü bir plastik parçasının yakınına tutuluyor. Mıknatıs plastiği çeker mi, iter mi yoksa etkilemez mi?

TABLO 24.1 Bazı Yaklaşık Manyetik Alan Büyüklükleri

Alan Kaynağı	Alan Büyüklüğü (T)
Kuvvetli süperiletken laboratuvar mıknatısı	30
Kuvvetli sıradan laboratuvar mıknatısı	2
Tıpta kullanılan MRI birimi	1,5
Çubuk mıknatıs	10^{-2}
Güneşin yüzeyi	10^{-2}
Dünyanın yüzeyi	$0,5 \times 10^{-4}$
İnsan beyninin içi (sinir atımlarından kaynaklanan)	10^{-13}

ÖRNEK 29.1**Manyetik Alanda Hareket Eden Bir Elektron**

Bir televizyonun resim tüpündeki bir elektron x ekseni boyunca $8,0 \times 10^6 \text{ m/s}$ lik bir süratle tüpün önune (ekran) doğru ilerliyor (Şekil 29.5). Tüpün boynuna sarılan telden yapılmış kangallar $0,025 \text{ T}$ büyüğünde bir alan oluştururlar. Bu alan xy düzleminde olup x -ekseni arasındaki açı 60° dir. Elektrona etkiyen manyetik kuvveti ve elektronun ivmesini bulunuz.

Çözüm 29.2 Eşitliğini kullanarak manyetik kuvvetin büyüğünü bulabiliriz:

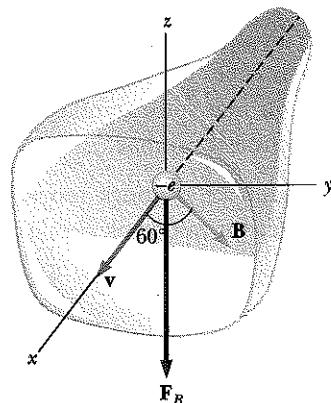
$$\begin{aligned} F_B &= |q|vB \sin\theta \\ &= (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) (8,0 \times 10^6 \text{ m/s}) (0,025 \text{ T}) (\sin 60^\circ) \\ &= 2,8 \times 10^{-14} \text{ N} \end{aligned}$$

$v \times B$ pozitif z yönünde (sağ el kuralına göre) ve yük negatif olduğundan, F_B negatif z yönündedir.

Elektronun kütlesi $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dir, bu nedenle ivmesi,

$$a = \frac{F_B}{m_e} = \frac{2,8 \times 10^{-14} \text{ N}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 3,1 \times 10^{16} \text{ m/s}^2$$

olup negatif z yönündedir.

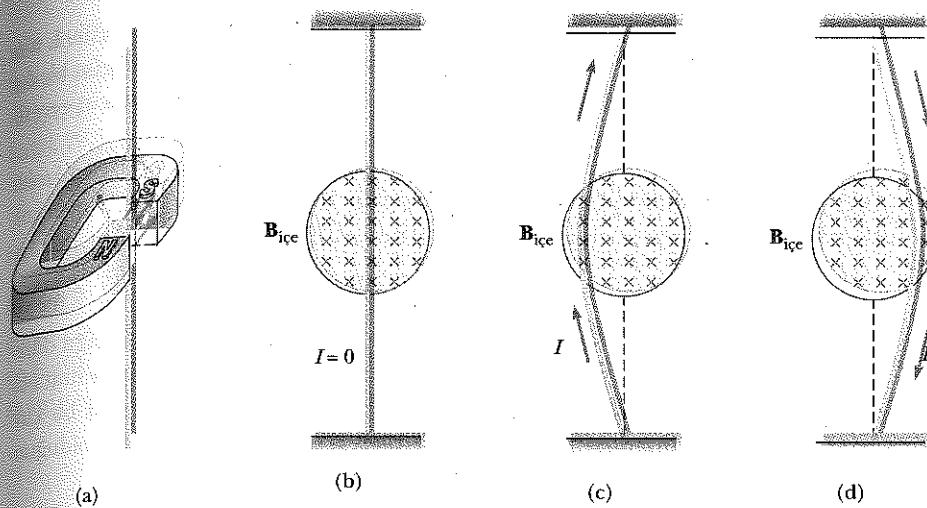


Şekil 29.5 v ve B xy düzleminde olduğunda elektrona etkiyen F_B manyetik kuvveti negatif z yönündedir.

29.2**AKIM TAŞIYAN BİR İLETKENE ETKİYEN MANYETİK KUVVET**

12.3 Tek bir yüklü parçacık, bir manyetik alan içinden geçerken bir kuvvet etkisi de kalıyorsa, üzerinden akım geçen bir tele de manyetik alan içinde kuvvet etkimesi sizce sürpriz olmamalıdır. Bu, akımın çok sayıda yüklü parçacıkta oluşanmasının bir sonucudur; bu yüzden, tele etkiyen net kuvvet, akımı oluşturan tüm yüklü parçacıklara etkiyen bireysel kuvvetlerin vektörel toplamıdır. Parçacıklara etkiyen kuvvet, parçacıklar teli oluşturan atomlara çarptıkları zaman tele ilettilmiş olur.

Tartışmalarımıza devam etmeden önce, bu kitapta kullanılan notasyonların bir açıklamasını vermenin zamanı geldi. Şekillerde B nin yönünü belirtmek için, bazen, Şekil 29.5, Şekil 29.6 ve 29.7 de olduğu gibi perspektif görünümler kullanırız. Düz şekillerde, Örneğin Şekil 29.6b'den d'ye kadar olanlar



Şekil 29.6 (a) Bir mıknatısın kutupları arasına düşey olarak asılmış bir tel (b) Mıknatısın kuzey kutubundan güney kutubuna doğru bakıldığından (a) şıklındaki kurgunun görünüşü olup manyetik alanın (mavi çarpı işaretli) sayfa düzleminin içine doğru olduğunu gösterir. Telde akım yukarı olduğunda, tel sola doğru sapar. (d) Akım aşağı yönde olduğunda ise tel sağa doğru sapar.

gibi, kağıt düzleminin içine doğru yönelmiş bir manyetik alanı mavi çarpı işaretle gösteririz. Çarpı işaretti sizden öteye doğru dik olarak atılan bir okun kuyruğunu temsil eder. Bu durumda, alanı $\mathbf{B}_{\text{İç}}$ ile gösteririz. Buradaki "in" veya "ice" alt indisi, alanın "sayfanın içine" doğru olduğunu belirtir. Eğer \mathbf{B} dik ve sayfa düzlemden dışa doğru yönelmiş ise, bir sıra mavi noktalarla temsil ederiz (Şekil P29.56 ya bakınız). Bu durumda alana $\mathbf{B}_{\text{Dış}}$ deriz. \mathbf{B} sayfa düzlemden ise, Şekil 29.7 de gösterildiği gibi, okuçları bulunan bir grup mavi alan çizgisi kullanırız.

Akim taşıyan bir iletke etkiyen kuvvet, Şekil 29.6a da olduğu gibi bir mıknatısın kutupları arasına bir tel asarak gösterilebilir. Görüş kolaylığı açısından Şekil 29.6 nin (b), (c) ve (d) kısımlarında güney kutup ucunun yüzünü gösterebilmek için (a) daki at nali mıknatıs kaldırılmıştır. Manyetik alan sayfanın içine doğru olup gölgeli dairenin içini kaplamaktadır. Teldeki akım sıfır olduğunda, Şekil 29.6b de olduğu gibi, tel düşey durumda kalır. Ancak, Şekil 29.6c de olduğu gibi, telde yukarı yönde bir akım oluşturulduğunda tel sola sapar. Şekil 29.6d de olduğu gibi akımın yönü ters çevrilirse tel sağa sapar.

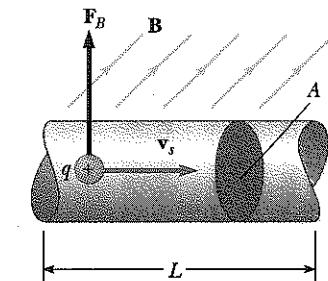
Bu tartışmayı, Şekil 29.7 deki gibi düzgün bir \mathbf{B} dış manyetik alanı içinde L kadar akım taşıyan, kesit alanı A ve uzunluğu L olan düz bir tel parçası düşünerken nicel hale getirelim. Bir v_s sürüklenme hızı ile hareket eden q yüküne etkiyen manyetik kuvvet $qv_s \times \mathbf{B}$ bağıntısıyla verilir. Tele etkiyen toplam kuvveti bulmak için, bir yüke etkiyen $qv_s \times \mathbf{B}$ kuvveti, tel parçasında bulunan yük sayısı ile çarpılır. Parçanın hacmi AL olduğu için içindeki yük sayısı nAL dir. Burada n birim hacimdeki yük sayısıdır. Sonuç olarak uzunluğu L olan tele etkiyen toplam manyetik kuvvet

$$\mathbf{F}_B = (qv_s \times \mathbf{B}) nAL$$

dir. Bu bağıntı, 27.4 Eşitliğine göre teldeki akımın $I = nv_s A$ olduğuna dikkat ederek daha kullanışlı bir biçimde yazılabılır. Bu nedenle,

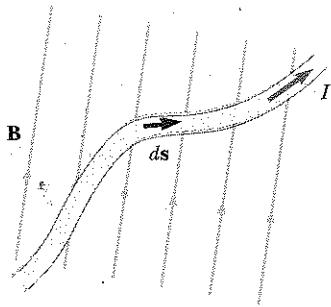
$$\mathbf{F}_B = IL \times \mathbf{B}$$

(29.3)



Şekil 29.7 Bir \mathbf{B} manyetik alanının içine yerleştirilmiş bir akım taşıyan tel parçası. Alanı oluşturan her bir yüke etkiyen manyetik kuvvet, $qv_s \times \mathbf{B}$ olup L uzunlığındaki parça ya etkiyen net kuvvet $IL \times \mathbf{B}$ dir

Düzgün bir manyetik alanındaki doğrusal bir tel parçasına etkiyen kuvvet



Şekil 29.8 Bir \mathbf{B} dış manyetik alan içerisinde I akımı taşıyan keyfi biçimli bir tel manyetik kuvvet etkisindedir. Herhangi bir ds parçasına etkiyen kuvvet, $I ds \times \mathbf{B}$ ile verilir ve sayfadan dışa doğru yönelmiştir. Bu kuvvetin yönünü sağ-el kuralını uygularak doğrulayabilmelisiniz.

biçimde ifade edilebilir. Burada \mathbf{L} , I akımının yönünde bir vektördür. \mathbf{L} nin büyüklüğü parçanın uzunluğuna yani L ye eşittir. Bu ifadenin, düzgün bir dış manyetik alan içerisinde bulunan yalnızca doğrusal bir tel parçası için geçerli olduğunu dikkat edelim.

Şimdi, Şekil 29.8 deki gibi bir dış manyetik alan içerisinde düzgün kesitli fakat keyfi biçimli bir tel gözönüne alalım. Bir \mathbf{B} alanı bulunduğu zaman çok küçük bir ds parçasına etkiyen manyetik kuvvet Eşitlik 29.3 gereği

$$d\mathbf{F}_B = I ds \times \mathbf{B} \quad (29.4)$$

bağıntısıyla verilir. Burada $d\mathbf{F}_B$, Şekil 29.8 de varsayılan yönler için kağıt düzleme dik ve dışa doğru yönelmiştir. Eşitlik 29.4 \mathbf{B} nin değişik bir tanımı olarak düşünülebilir. Yani, \mathbf{B} alanı, bir akım elemanına etkiyen ölçülebilir bir kuvvet cinsinden tanımlanabilir. Buradaki kuvvet, \mathbf{B} akım elemanına dik olduğunda maksimum, \mathbf{B} akım elemanına paralel olduğunda ise sıfırdır.

Şekil 29.8 de gösterilen tele etkiyen toplam \mathbf{F}_B kuvvetini elde etmek için, Eşitlik 29.4'ü telin uzunluğu boyunca integre ederiz:

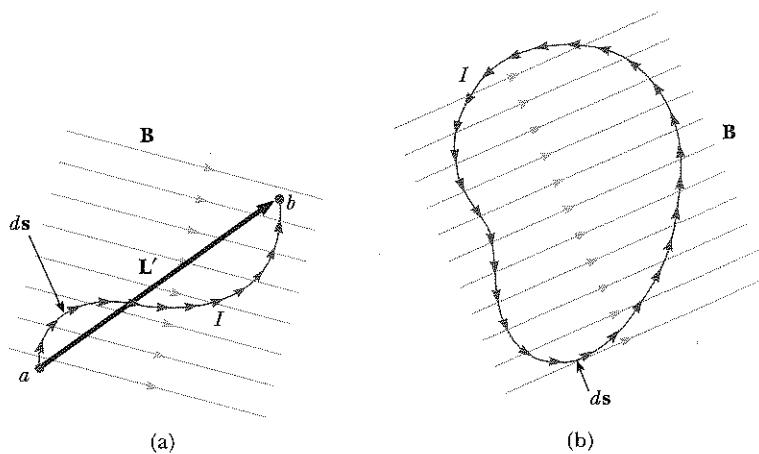
$$\mathbf{F}_B = I \int_a^b ds \times \mathbf{B} \quad (29.5)$$

Bu ifadede, a ve b telin uç noktalarını temsil etmektedir. Bu integral alınıırken her noktada manyetik alanın büyüklüğü ve ds vektörüne göre yönü (yani akım elemanına göre yönelimi) değişimelidir.

Şimdi 29.5 Eşitliğinin uygulanmasını içeren iki özel durumu ele alalım. Her iki durumda da dış manyetik alanın büyüklüğü ve yönü sabit kabul edilmektedir.

Durum 1 Şekil 29.9a daki gibi düzgün bir \mathbf{B} dış manyetik alanı içerisinde bulunan, I akımı taşıyan eğrisel bir tel gözönüne alalım. Alan düzgün (yani, \mathbf{B} iletkenin bulunduğu bölgenin tamamında aynı değere sahip) varsayıldığı için, 29.5 Eşitliğinde \mathbf{B} , integralin dışına alınabilir ve

$$\mathbf{F}_B = I \left(\int_a^b ds \right) \times \mathbf{B} \quad (29.6)$$



Şekil 29.9 (a) Düzgün bir manyetik alan içinde I akımı taşıyan eğri bir iletken. İletkenin etkiyen manyetik kuvvet, telin a ve b uçlarını birleştiren L' uzunluğunu düz parçaya etkiyen kuvvetin eşiğidir. (b) Düzgün bir manyetik alan içinde akım-taslayan keyfi biçimli bir ilmek. İlmek etkiyen kuvvet sıfırdır.

elde ederiz. Fakat $\int_a^b d\mathbf{s}$, niceliği a dan b ye kadar olan tüm yerdeğşim elemanlarının vektörel toplamını temsil eder. Birçok vektörün toplanması ile ilgili kural gereği toplam, a dan b ye doğru yönelen \mathbf{L}' vektörüne eşittir. Bu nedenle, Eşitlik 29.6

$$\mathbf{F}_B = I \mathbf{L}' \times \mathbf{B} \quad (29.7)$$

biçimine indirgenir.

Durum 2 I akımı taşıyan keyfi biçimli kapalı bir ilmek, Şekil 29.9b deki gibi düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanına yerleştirilmiş olsun. İlmeğe etkiyen kuvveti yine Eşitlik 29.6 biçiminde ifade edebiliriz. Fakat bu sefer uzunluk elemanları $d\mathbf{s}$ lerin vektörel toplamı kapalı ilmeğin tamamı boyunca yapılmalıdır:

$$\mathbf{F}_B = I \left(\oint d\mathbf{s} \right) \times \mathbf{B}$$

uzunluk elemanı vektörlerinin toplamı kapalı bir ilmek oluşturduğu için vektörel toplam *sıfır* olmalıdır. Bu sonuç, çokgen yöntemini kullanarak vektörlerin grafiksel süreçle toplanmasına dayanır. $\oint d\mathbf{s} = 0$ olduğundan, $\mathbf{F}_B = 0$ sonucuna ulaşırız. Yani,

Düzgün bir manyetik alan içerisindeki herhangi bir kapalı akım ilmeğine etkiyen net manyetik kuvvet sıfırdır.

ÖRNEK 29.2 Yarım-Çember Şeklindeki Bir İletkene Etkiyen Kuvvet

Yarıçapı R olan yarım çember biçiminde bükülmüş bir tel, kapalı bir devre oluşturuyor. Tel, I akımı taşımaktadır. Devre, Şekil 29.10 daki xy düzleminde olup pozitif y -yönündeki düzgün bir manyetik alanda bulunmaktadır. Telin doğru ve eğri parçalarına etkiyen manyetik kuvvetlerin büyüklük ve yönlerini bulunuz.

Cözüm Telin düz parçasına etkiyen kuvvetin büyüklüğü $F_1 = ILB = 2IRB$ dir. Çünkü $L = 2R$ ve bu parça \mathbf{B} ye dikdir. \mathbf{F}_1 in yönü kağıt düzlemine dik ve dışa doğrudur. Çünkü $\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ pozitif z ekseni yönündedir. (Yani, \mathbf{L} akımla aynı yönde sağa yönelmiş olduğundan vektörel çarpım kuralı gereği, $\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ dışa doğrudur.)

Eğrisel parçaya etkiyen F_2 kuvvetini bulmak için önce Şekil 29.10 da gösterilen, ds uzunluk elemanına etkiyen dF_2 kuvvetini veren bir ifade yazmalıyız. ds ile \mathbf{B} arasındaki açı θ ise dF_2 nin büyüklüğü

$$dF_2 = I |ds \times \mathbf{B}| = IB \sin \theta \, ds$$

ile verilir. Bu ifadenin integralini almak için, ds yi θ değişkeni cinsinden yazmalıyız. $s = R\theta$, $ds = Rd\theta$ olduğundan dF_2 ifadesi

$$dF_2 = IBR \sin \theta \, d\theta$$

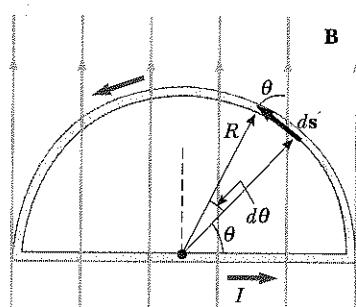
biçiminde yazılabilir. Eğri parçaya etkiyen *toplam* F_2 kuvvetini bulmak için, *tüm* elemanlardan gelecek katkılardın toplanması gereklidir. Bu da üstteki ifadeyi integre ederek sağlanır. Her elemana etkiyen kuvvetin yönü aynıdır; kağıt düzleminin içine doğru (çünkü $ds \times \mathbf{B}$ içe doğrudur). Bu nedenle, eğri tel üzerindeki toplam kuvvet F_2 de kağıt düzleminin

İçine doğru olmalıdır. $\theta = 0$ ile $\theta = \pi$ sınırları arasında (yani, yarım çemberin tamamı) dF_2 nin integrali,

$$F_2 = \int_0^\pi [IBR \sin \theta] \, d\theta = IRB \left[-\cos \theta \right]_0^\pi = -IRB (\cos \pi - \cos 0) = -IRB(-1 - 1) = 2IRB$$

olar.

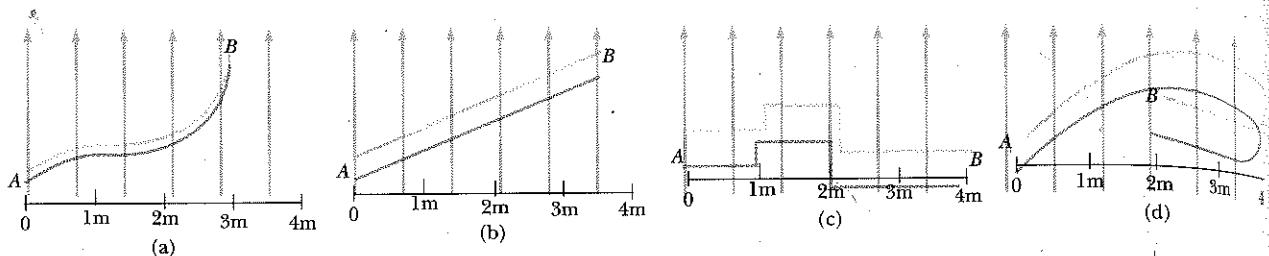
Düz tele etkiyen kuvvet $F_1 = 2IRB$, kağıt düzlemden dışa doğru iken $F_2 = 2IRB$ kağıt düzleminin içine doğru olduğundan, kapalı ilmeğe etkiyen net kuvvetin sıfır olduğunu görürüz. Bu sonuç, yukarıda açıklanan Durum 2 ile uyumludur.



Şekil 29.10 Düzgün bir manyetik alanın içinde bulunan kapalı bir akım ilmeğine etkiyen net kuvvet sıfırdır. Üstteki şekilde, düz parçaya etkiyen kuvvet $2IRB$ olup dışa doğru; öte yandan eğri parçaya etkiyen kuvvet ise yine $2IRB$ fakat içe doğrudur.

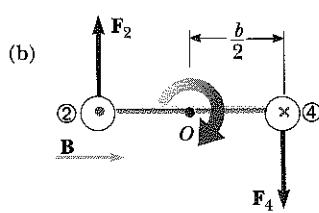
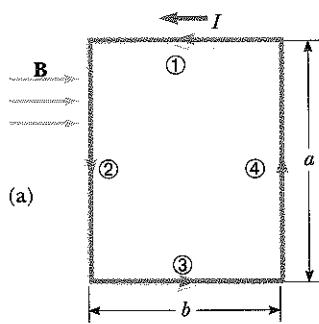
Sınamama Sorusu 29.3

Şekil 29.11 de gösterilen tellerin dördü de aynı manyetik alanın içinde A noktasından B noktasına aynı akımı taşımaktadır. Tellerin hissettiğleri kuvvetleri büyükten küçüğe doğru sıralayın.



Şekil 29.11 En büyük manyetik kuvveti hangi tel hisseder?

29.3 DÜZGÜN BİR MANYETİK ALAN İÇERİSİNDEKİ BİR AKIM İLMEĞİNE ETKİYEN TORK



Şekil 29.12 (a) Düzgün bir manyetik alan içerisindeki dikdörtgen biçimli bir akım ilmeğinin üstten görünüşü. ① ve ③ nolu kenarlar **B**'ye paralel olduklarından hiçbir kuvvet etkisini hissetmezler. Ancak ② ve ④ nolu kenarlara kuvvetler etkir. (b) İlmeğin ② ve ④ nolu kenarları boyuncaki yanından görünüşü, bu kenarlara etkiyen F_2 ve F_4 kuvvetlerinin ilmeği saat yönünde döndürmeye çalışan bir tork oluşturduklarını gösterir. Sol çemberin içindeki mor nokta ② telindeki akımın size doğru, sağdaki çemberin içindeki mor çarşının ise ④ telindeki akımın sizden içe doğru aktığını gösterir.

Onceki kesimde, akım-taşıyan bir iletken bir dış manyetik alan içine yerleştirildiğinde ona etkiyen kuvvet bulduk. Bunu bir hareket noktası olarak alıp, bir manyetik alan içerisine yerleştirilen bir akım ilmeğine bir tork etkidiğini göstereceğiz. Bu sonuçlar Bölüm 31 de motorları tartışırken, pratik açıdan son derece değerli olacaktır.

Şekil 29.12a da olduğu gibi düzleme paralel düzgün bir manyetik alan içinde bulunan ve I akımı taşıyan dikdörtgen bir ilmek alalım. ① ve ③ nolu kenarlara hiçbir kuvvet etkimez, çünkü bu kenarlar alana paralel ve bu nedenle bu kenarlar için $\mathbf{L} \times \mathbf{B} = 0$ dir. Öte yandan ② ve ④ nolu kenarlara manyetik kuvvetler etkir, çünkü bu kenarlar alana dikdir. Bu kuvvetlerin büyüklüğü, 29.3 Eşitliği gereğince,

$$F_2 = F_4 = IaB$$

ile verilir. Şekil 29.12a daki bakışa göre ② teline etkiyen F_2 kuvvetinin yönü sayfa düzleminden dışa, ④ teline etkiyen F_4 kuvvetinin yönü ise sayfa düzleminin içine doğrudur. Eğer ilmeğe ③ nolu kenar tarafından yatay olarak ② ve ④ nolu kenarlar boyunca bakarsak Şekil 29.12b deki manzarayı görürüz ve F_2 ve F_4 kuvvetleri gösterildiği gibi yönelmişlerdir. Bu iki kuvvetin zit yönlü olduğunu fakat etki çizgilerinin farklı olduğuna dikkat ediniz. Ilmek O noktası etrafında dönebilecek şekilde bir mil geçirilirse, bu iki kuvvet O ya göre bir tork oluştururlar ve söz konusu tork, ilmeğin saat yönünde döndürür. Bu torkun büyülüüğü τ_{maks} ,

$$\tau_{\text{maks}} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (IaB) \frac{b}{2} + (IaB) \frac{b}{2} = IabB$$

dir. Burada, O ya göre moment kolu her iki kuvvet için de, $b/2$ dir. İlmeğin içindeki alan $A = ab$ olduğundan maksimum tork,

$$\tau_{\text{maks}} = IAB \quad (29.8)$$

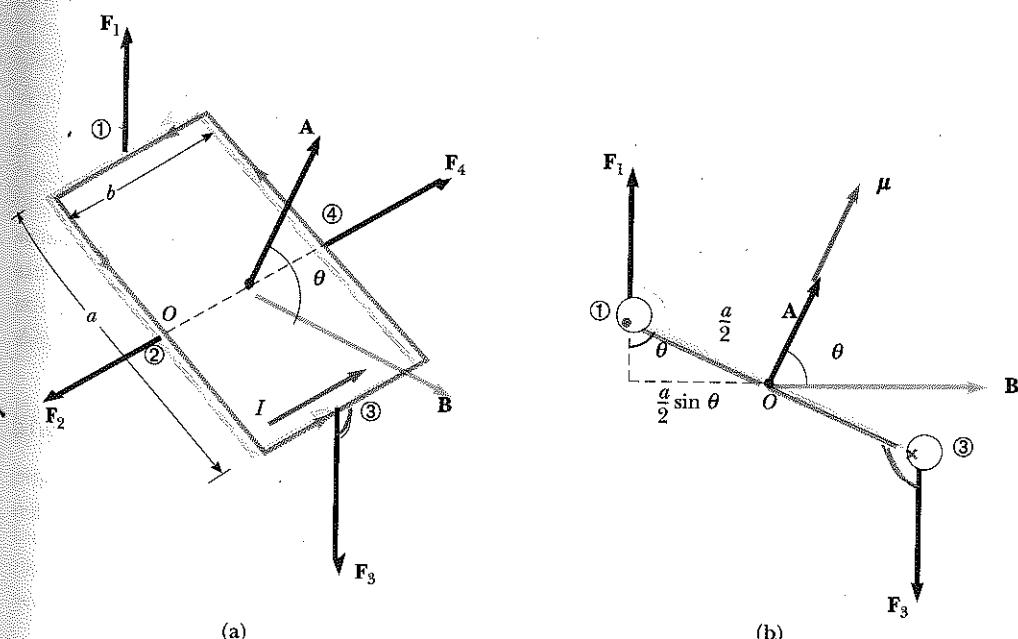
birimde ifade edilebilir. Bu sonucun, **B** alanı, ilmeğin düzleme yalnız paralel olduğu zaman, geçerli olduğunu unutmayınız. Şekil 29.12b de gösterildiği gibi, ③ nolu kenardan yatay olarak bakıldığı zaman dönme yönü saat yönünde ifade edilebilir.

nündedir. Akım ters yönde olsaydı, kuvvetlerin yönleri ters olacak ve dolayısıyla dönmeye eğilimi de saat yönünün tersi olacaktı.

Şimdi, düzgün manyetik alanın, Şekil 29.13a da olduğu gibi, ilmek düzlemini dik bir doğruyla $\theta < 90^\circ$ açısı yaptığı varsayıy়iz. Kolaylık açısından, B nin, ① ve ③ kenarlarına dik olduğunu varsayacağız. Bu durumda, ② ve ④ kenarlarına etkiyen F_2 ve F_4 kuvvetleri birbirlerini yok ederler ve tork oluşturamazlar. Çünkü ortak bir başlangıç noktasından geçerler. Öte yandan, ① ve ③ kenarlarına etkiyen F_1 ve F_3 kuvvetleri bir çift oluştururlar. Bu nedenle herhangi bir noktaya göre torkları vardır. Şekil 29.13b de gösterilen üçtan görünüşe bakılırsa O noktasına göre F_1 in moment kolumnun $(a/2) \sin\theta$ olduğu görülür. Benzer şekilde Oya göre F_3 nin moment kolu da $(a/2) \sin\theta$ dir. $F_1 = F_3 = IbB$ olduğundan O ya göre net torkun

$$\begin{aligned}\tau &= F_1 \frac{a}{2} \sin\theta + F_3 \frac{a}{2} \sin\theta \\ &= IbB \left(\frac{a}{2} \sin\theta \right) + IbB \left(\frac{a}{2} \sin\theta \right) = IabB \sin\theta \\ &= IAB \sin\theta\end{aligned}$$

ile verilen bir büyülüğe sahip olduğu görülür. Burada $A = ab$ ilmeğin alanıdır. Bu sonuç, torkun, manyetik alan, Şekil 29.12 yi tartışırken gördüğümüz gibi ilmek düzlemine paralel ($\theta = 90^\circ$) olduğu zaman IAB ile verilen maksimum değere ulaştığını ve dik olduğu zaman ($\theta = 0$) ise sıfır değerini gösterir. Şekil 29.13 te gördüğümüz gibi ilmek θ nin daha küçük değerlerine doğru dönmeye çalışır (başka bir deyişle, ilmek düzleminin normali olan A vektörü, manyetik alanın yönüne doğru döner).



Sekil 29.13 (a) Düzgün bir manyetik alan içerisindeki dikdörtgensel bir akım ilmeği. Ilmek düzlemine dik olan vektör A , manyetik alanla bir θ açısı yapmaktadır. ② ve ④ kenarlarına etkiyen manyetik kuvvetler birbirlerini götürürler, fakat ① ve ③ kenarlarına etkiyen kuvvetler ilmekte bir tork oluştururlar. (b) ① ve ③ kenarları boyunca bakıldığından ilmeğin kenardan görünen yüzü.

Sınaması Sorusu 29.4

Şekil 29.13 de, manyetik alan gösterildiği yönde yönelmiş fakat büyülüğü soldan sağa doğru gittikçe artiyorsa, dikdörtgensel akım ilmeğine etkiyen kuvvetleri betimleyiniz.

Düzungün bir **B** manyetik alanı içerisinde yerleştirilen bir akım ilmeğine etkiyen tork için kullanışlı bir tanım,

Bir akım ilmeği üzerindeki tork

Akım ilmeğinin manyetik dipol momenti

$$\tau = IA \times B \quad (29.9)$$

Burada **A**, Şekil 29.13 de gösterildiği gibi ilmek düzlemine dik bir vektör olup, büyülüğü ilmeğin çevrelediği alana eşittir. **A** nin yönü Şekil 29.14 te açıklanlığı gibi sağ-el kuralı ile saptanır. Sağ elin dört parmağı ilmekteki akım yönünde kıvrıldığı zaman, açılan baş parmak **A** nin yönünü gösterir. **IA** çarpımı ilmeğin **manyetik dipol momenti** **μ** olarak tanımlanır. Bir başka deyişle

$$\mu = IA \quad (29.10)$$

dir. Manyetik momentin SI sisteminde birimi amper-metre² ($A \cdot m^2$) dir. Bu tanımi kullanarak, bir **B** manyetik alanı içerisindeki akım taşıyan bir ilmeğe etkiyen torku,

$$\tau = \mu \times B \quad (29.11)$$

biriminde tanımlayabiliriz. Bu sonucun ortamda bir **E** elektrik alanı bulunduğu zaman bir elektrik dipol momente (**p** ye) etkiyen torka ($\tau = p \times E$) benzerliğine dikkat ediniz (Eşitlik 26.18).

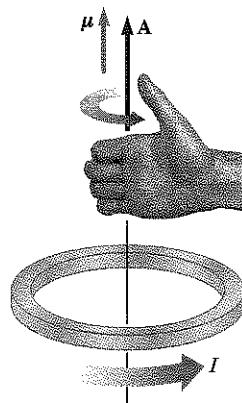
Yukarıda tork, ilmeğe göre **B** nin belirli bir yönelimi için bulunmuş olmasına rağmen, $\tau = \mu \times B$ eşitliği herhangi bir yönelim için de geçerlidir. Ayrıca, tork ifadesi dikdörtgen biçimli bir ilmek için elde edilmiş olmakla birlikte, sonuç ilmeğin şekli ne olursa olsun geçerlidir.

Eğer bir kangal (bobin), herbiri aynı akımı taşıyan ve aynı alanı çevreleyen N sarımdan oluşmuşsa, kangalın toplam manyetik dipol momenti, bir sarımlı manyetik dipol momentinin N katıdır. N -sarılı kangala etkiyen tork, bir-sarılı kangala etkiyenin N katıdır. Bu nedenle, $\tau = N\mu_{\text{ilemek}} \times B = \mu_{\text{bobin}} \times B$ biçiminde yazabilirmiz.

Kesim 26.6 da bir elektrik alan içerisindeki bir elektrik dipolünün potansiyel enerjisinin $U = -p \cdot E$ ile verildiğini bulmuştuk. Bu enerji dipolün elektrik alan içerisindeki yönelimine bağlıdır. Benzer şekilde, bir manyetik alan içerisindeki bir manyetik dipolun potansiyel enerjisi de dipolun manyetik alan içerisindeki yönelimine bağlı olup,

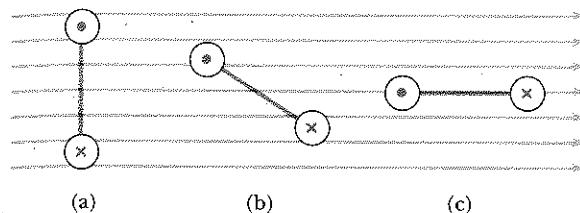
$$U = -\mu \cdot B \quad (29.12)$$

ile verilir. Bu ifadeden, **μ** , **B** ile aynı yöne yönelikinde en düşük enerjisine, yani $U_{\min} = -\mu B$ ye sahip olacağını görürüz. Öteyandan **μ** 'nın yönü **B**'ye ters yönde olduğunda dipol en yüksek enerjisine, $U_{\max} = +\mu B$, sahip olur.

Sınaması Sorusu 29.5

Şekil 29.14 A vektörünün yönünü saptamaya yarayan sağ-el kuralı. **μ** manyetik momenti de **A** nin yönündedir.

Şekil 29.15 de gösterilen dikdörtgensel ilmeklere etkiyen torkların büyüklüklerini, büyüğten küçüğe doğru sıralayınız. Tüm ilmekler özdeş ve aynı akımı taşımaktalar.



Şekil 29.15 En büyük torku hangi akım ilemgi (kenardan görünüş) hisseder?

ÖRNEK 29.3 Bir Kangalın Manyetik Dipol Momenti

Beyazları $5,40 \text{ cm} \times 8,50 \text{ cm}$ olan dikdörtgensel bir kangal (bobin), 25 sarımlı bir telden oluşmakta ve 15 mA lik bir akım taşımaktadır. (a) Kangalın manyetik momentinin büyüklüğünü hesaplayınız.

Çözüm Kangalın 25 sarımı olduğuna ve her sarının yüzey alanı A aynı varsayılabildiğine göre, Eşitlik 29.10 da değişiklik yaparak

$$\begin{aligned}\mu_{\text{kangal}} &= NIA = (25) (15 \times 10^{-3} \text{ A}) (0,054 \text{ m} \times 0,085 \text{ m}) \\ &= 1,72 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^2\end{aligned}$$

(b) İlmek düzlemine paralel olarak, büyülüğu $0,350 \text{ T}$ olan bir manyetik alan uygulanırsa etki eden torkun büyülüği nedir?

Çözüm \mathbf{B} , μ_{kangal} ye dik olduğundan, Eşitlik 29.11,

$$\begin{aligned}\tau &= \mu_{\text{kangal}} B = (1,72 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^2) (0,350 \text{ T}) \\ &= 6,02 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

Alıştırma $\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{T}$ birimlerinin $\text{N} \cdot \text{m}$ ile verilen tork birimine indirgendiğini kanıtlayınız.

Alıştırma μ ile manyetik alan arasındaki açı (a) 60° ve (b) 0° olduğu zaman kangala etkiyen torkun büyülüüğünü hesaplayınız.

Cevap (a) $5,21 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$ (b) sıfır

web

Tork oluşturucularla ilgili daha fazla bilgi edinmek için bu konuda NA-SA ya aygit üreten bazı firmaların Web Site'lerine girin:
<http://www.smad.com> veya
<http://www.itaco.com>

ÖRNEK 29.4 Uydu Davranış Kontrolü

Birçok uyduyun yönemlerini ayarlamak için *tork-oluşturucu* "torquers" denen kangallar kullanılır. Bu aygıtlar, Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşerek uzay aracı üzerinde x , y veya z yönünde bir tork oluştururlar. Bu tip bir davranış kontrol sisteminin en büyük avantajı, güneşin oluşturduğu elektriği kullanması ve bu nedenle hiçbir yakıt tüketmemesidir.

Eğer tipik bir aygıtın manyetik dipol momenti $250 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ise, Dünya'nın manyetik alanının $3,0 \times 10^{-5} \text{ T}$ olduğu bir yükseklikte uyduyun tork-oluşturucusu çalıştığı zaman o uyduya uygulanan maksimum tork ne olur?

Çözüm Maksimum torkun, Dünya'nın manyetik ala-

ni tork-oluşturucunun manyetik dipol momentine dik olduğu zaman olduğunu anımsayarak yine 29.11 Eşitliğini uygulayabiliriz:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{maks}} &= \mu B = (250 \text{ A} \cdot \text{m}^2) (3,0 \times 10^{-5} \text{ T}) \\ &= 7,5 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

Alıştırma Bir tork-oluşturucu, 28 V'luk bir potansiyel farkında $1,3 \text{ W}$ 'lik bir güçe gereksinim duyduğuna göre, çalışlığında ne kadar akım çeker?

Cevap 46 mA

ÖRNEK 29.5 D'Arsonval Galvanometresi

Bir D'Arsonval Galvanometresi'nin (Kes. 28.5'e bak) kesitten görünümü Şekil 29.16 da gösterilmektedir. Kangalı oluşturan tel sargıdan bir akım geçtiği zaman, mıknatısın oluşturduğu manyetik alan, kangala bir tork etki ettirir. Bu tork kangalı kendisine tutturulan göstergesiyle birlikte yaya karşı döndürür. Göstergenin sapma açısının kangaldaki akımla doğru orantılı olduğunu gösterelim.

Çözüm Manyetik alanın kangala uyguladığı τ_m torku bulmak için 29.11 Eşitliğini kullanabiliriz. Kangaldan geçen manyetik alanın kangal düzleminin normaline dik olduğunu varsayırsak, 29.11 Eşitliği

$$\tau_m = \mu B$$

olur. (Bu mantıklı bir varsayımdır, çünkü mıknatısın dairesel kesidi manyetik alan çizgilerinin yarıçapsal (radyal) olduğunu gösterir). Kangalın oluşturduğu tork, bu torka karşı koyar. Kangalın torku, Hooke yasasının dönmeyle ilgili şekli olup, $\tau_s = -\kappa\varphi$ dir. Burada κ yayın burulma sabiti ve φ dönme açısıdır. Gösterge durgun haldeyken kangalın açısal ivmesi olmadığından bu torkların toplamı sıfır olmalıdır:

$$(1) \quad \tau_m + \tau_s = \mu B - \kappa\varphi = 0$$

29.10 Eşitliği, telin N sarımının manyetik dipol momentini sarımlardan geçen akıma bağlamamızı sağlar:

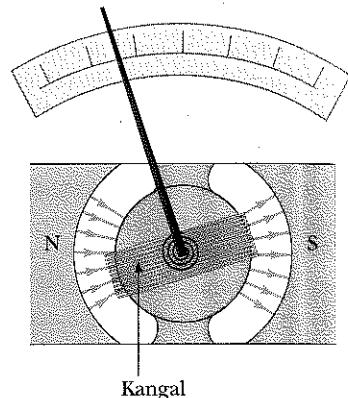
$$\mu = NIA$$

μ nün bu ifadesini Eşitlik (1) de yerine koyarak;

$$(NIA)B - \kappa\varphi = 0$$

$$\varphi = \frac{NAB}{K} I$$

elde ederiz. O halde, göstergenin sapma açısını kangalda akımla doğru orantılıdır. NAB/κ çarpımı, sapmanın mekanik tasarımına da bağlı olduğunu söylemektedir.



Şekil 29.16 Bir hareketli-kangal galvanometrenin kesit görünümü

29.4

YÜKLÜ BİR PARÇACIĞIN DÜZGÜN BİR MANYETİK ALAN İÇERİSİNDEKİ HAREKETİ

Kesim 29.1 de, bir manyetik alan içerisinde hareket eden yüklü bir parçacığın etkiyen kuvetin her zaman parçacığın hızına dik ve bu nedenle manyetik alanın parçacık üzerinde yaptığı işin sıfır olduğunu bulduk. Şimdi düzgün bir manyetik alan içerisinde hareket eden pozitif yüklü bir parçacık ele alalım ve bunun hız vektörünün başlangıçta alana *dik* olduğu özel durumu inceleyelim. Manyetik alan yönünün sayfanın *icine doğru* olduğunu varsayıyalım. Şekil 29.17 yüklü parçacığın, düzleme manyetik alana dik olan bir çember üzerinde hareket ettiğini göstermektedir.

Bunun nedeni, F_B manyetik kuvenin v ve B ile dik açı yapması ve qvB ye eşit sabit bir büyüklüğe sahip olmasıdır. Şekil 29.17 de gösterildiği gibi, F_B kuvesi parçacığı saptırıkça v ve F_B nin yönleri sürekli olarak değişir. F_B her zaman çemberin merkezine doğru baktığı için v nin yalnız yönünü değiştirebilir, büyüküğünü değiştiremez. Dönme yönü, şekil 29.17 de görüldüğü gibi pozitif bir yük için saat yönünün tersidir. q negatif olsaydı, dönme yönü saat yönünde olacaktı. Eşitlik 6.1 i kullanarak bu manyetik kuveni yüklü bir parçacığı çember üzerinde tutabilmek için gerekli merkezil kuveye eşitleyebiliriz.

Ey Deneyi

Bir çubuk mıknatısı, siyah-beyaz TV ekranına yaklaşıp uzaklaşırken resimde neler olduğunu gözleyin. Elektronlar manyetik alanda sapacaklar ve görüntüsünü bozacaklardır (DİKKAT: Bunu bir renkli TV veya bilgisayar ekranında denemeyiniz. Bu aletler, bir çubuk mıknatısı ile manyetik hale gelebilecek tipik metalik yüzeylere sahiptirler. Böyle durumlarda tamirhaneler, ekranı "manyetik mayın siperleri" yerleştirirler).

Bu kuvvet, m kütlesi ile v^2/r merkezil ivmesinin çarpımıdır. Newton'un ikinci yasasına göre,

$$\sum F = ma_r$$

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (29.13)$$

elde ederiz. Bir başka deyişle, yörüngenin yarıçapı parçacığın çizgisel (doğrusal) momentumu (mv) ile doğru, yükün ve manyetik alanın büyüklüğü ile ters orantılıdır. Dönen yüklü parçacığın açısal hızı, (Eşitlik 10.10 dan)

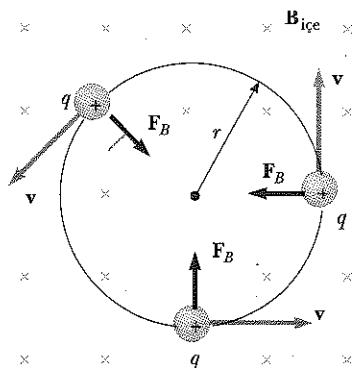
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qv}{m} \quad (29.14)$$

bağıntısı ile verilir. Parçacığın hareketinin periyodu (bir dolanım için geçen zaman), çemberin çevresinin parçacığın çizgisel hızına bölümüne eşittir:

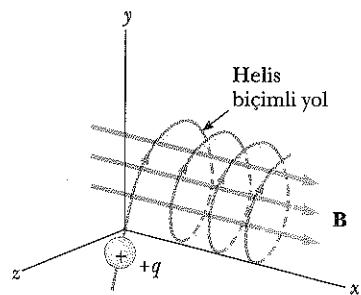
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (29.15)$$

Bu sonuçlar; dairesel hareketin açısal hızı ve periyodunun, parçacığın çizgisel hızına ve yörungesinin yarıçapına bağlı olmadıklarını göstermektedir. Açısal hız ω ya çoğu kez **siklotron frekansı** denir. Nedeni, Kesim 29.5 de tartışılan akan ve **siklotron** denen hızlandırıcıda yüklü parçacıkların bu açısal hızla dolanmalarıdır.

Yüklü bir parçacık, düzgün bir manyetik alan içerisinde, hızı, \mathbf{B} ile keyfi bir açı yapacak biçimde hareket ederse, yolu bir helistir. Örneğin, Şekil 29.18 de görüldüğü gibi, alan x yönünde ise kuvvetin x yönünde hiçbir bileşeni yoktur ve bu nedenle $a_x = 0$ ve hızın x bileşeni, v_x , sabit kalır. Öte yandan, manyetik kuvvet $qv \times \mathbf{B}$, v_y ve v_z bileşenlerinin zamanla değişimlerine neden olur ve bileske hareket, ekseni \mathbf{B} alanına paralel olan bir helistir. Yolun yz düzlemi üzerindeki izdüşümü (x ekseni boyunca bakıldığı zaman) bir çemberdir (yolun xy ve xz düzlemleri üzerindeki izdüşümleri ise birer "sinüzoid" dir!). Bu nedenle, v yerine $v_{\perp} = \sqrt{v_y^2 + v_z^2}$ konulduğu sürece, 29.13 den 29.15 ye kadar olan eşitlikler halâ geçerli olur.



Şekil 29.17 Yüklü bir parçacığın hızı düzgün bir manyetik alana dik olduğunda, parçacık, \mathbf{B} ye dik olan bir düzlemden çember biçimli bir yörüngede hareket eder. Yüke etkilen \mathbf{F}_B manyetik kuvveti, her zaman çemberin merkezine doğru yönelir.



Şekil 29.18 Düzgün bir manyetik alana paralel bir hız bileşeni olan yüklü parçacık, helis biçimli bir yol izler.

ÖRNEK 29.6

Düzgün Bir Manyetik Alana Dik Olarak Hareket Eden Proton

Bir proton, hızına dik 0,35 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan içerisinde 14 cm yarıçaplı bir çember üzerinden hareket ediyor. Protonun çizgisel hızını bulunuz.

Çözüm Eşitlik 29.13 den

$$v = \frac{qBr}{m_p} = \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C}) (0,35 \text{ T}) (14 \times 10^{-2} \text{ m})}{1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$= 4,7 \times 10^6 \text{ m/s}$$

Ağusturma Bir elektron, aynı çizgisel hızla aynı manyetik alana dik olarak girerse yörungesinin yarıçapı ne olur?

Cevap $7,6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

ÖRNEK 29.7 Bir Elektron Demetinin Bükülmesi

Düzgün bir manyetik alanın şiddetini ölçmek için tasarlanan bir deneyde, elektronlar 350 voltluk bir potansiyel farkı altında durgun halden hızlandırırlar. Elektronlar manyetik kuvvetin etkisiyle eğri bir yörunge boyunca hareket ederler. Yörunge yarıçapının 7,5 cm olduğu ölçülmüştür. (Şekil 29.19 böyle bir eğriliş elektron demetini gösterir.) Manyetik alanın elektron demetine dik olduğu varsayıldığında, (a) manyetik alanın büyüklüğü nedir?

Çözüm Öncelikle, enerjinin korunumu gereği, elektronların kinetik enerjilerindeki artışın potansiyel enerjilerindeki azalığı, $|e|\Delta V$, eşit olması gerektiğini kullanarak elektronların süratini bulmalıyız. $K_i = 0$ ve $K_s = mv^2/2$ olduğundan

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}m_e v^2 &= |e|\Delta V \\ v &= \sqrt{\frac{2|e|\Delta V}{m_e}} = \sqrt{\frac{2(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(350 \text{ V})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \\ &= 1,11 \times 10^7 \text{ m/s}\end{aligned}$$

elde ederiz.

$$\begin{aligned}B &= \frac{m_e v}{|e|r} = \frac{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1,11 \times 10^7 \text{ m/s})}{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(0,075 \text{ m})} \\ &= 8,4 \times 10^{-4} \text{ T}\end{aligned}$$

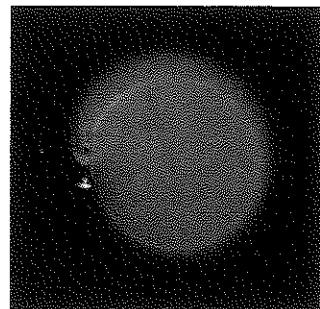
(b) Elektronların açısal hızı nedir?

Çözüm Eşitlik 29.14 ten

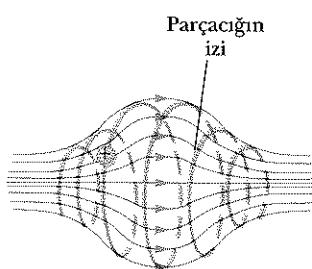
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{1,11 \times 10^7 \text{ m/s}}{(0,075 \text{ m})} = 1,5 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

Aliştırma Elektronların dolanım periyodu nedir?

Cevap 43 ns.



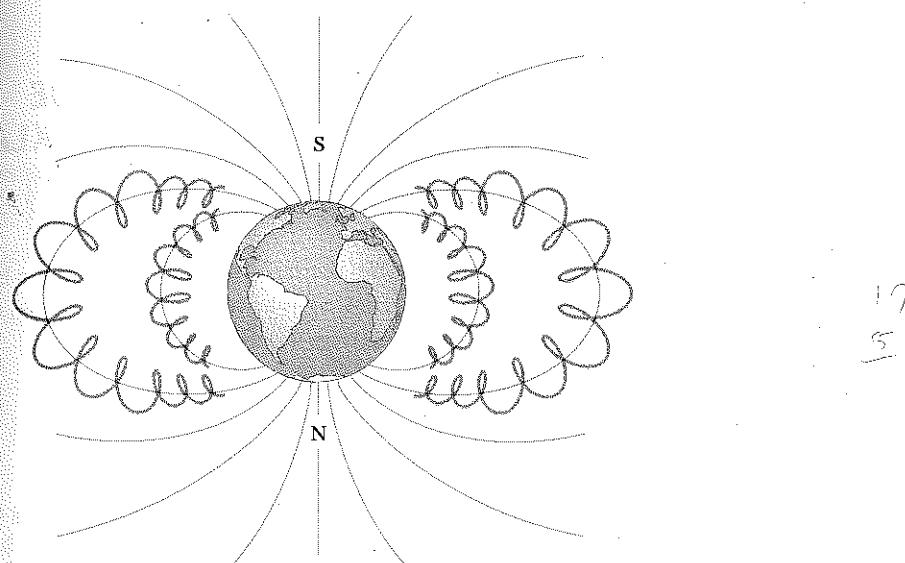
Şekil 29.19 Bir manyetik alanda bir elektron demetinin bükülmesi (Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle)



Şekil 29.20 Mavi çizgilerle temsil edilen düzgün olmayan bir manyetik alan (bir manyetik şise) içerisindeki bir yüklü parçacık, alanın etrafında spiral olarak üç noktalar arasında salınır yapar. Şişenin herhangi bir ucu yakınında parçacığa etkilenen manyetik kuvvet, parçacığın merkeze doğru spiral çizmesine neden olan bir bileşene sahiptir.

Yüklü parçacıklar, düzgün olmayan bir manyetik alanda hareket ettiklerinde, hareket oldukça karmaşıktır. Örneğin, Şekil 29.20 deki gibi, uçlarda kuvvetli ortada zayıf bir manyetik alan içerisindeki yüklü parçacıklar, üç noktalar arasında ileri geri salınım hareketi yapabilirler. Bir uçtan harekete geçen bir yüklü parçacık, diğer uca ulaşıcaya kadar alan çizgileri boyunca spiral çizer, diğer uca ulaşınca geri döner ve tekrar spiral çizer. Bu şekillenime *manyetik şise* denir. Çünkü yüklü parçacıklar içerisinde tuzaklanabilir. Bu manyetik şise, elektronlardan ve iyonlardan oluşan ve **plazma** adı verilen bir gazı hapsetmek amacıyla kullanılmaktadır. Böyle bir plazma-hapsetme yöntemi, kontrollü çekirdek birleştirme (**füzyon**) sürecini başarmada önemli bir rol oynayabilir. Füzyon reaksiyonu ile hemen hemen sonsuz bir enerji kaynağı elde etmek mümkündür. Ne yazık ki, manyetik şisenin kendi problemleri vardır. Çok sayıda parçacık tuzaklanırsa, parçacıkların birbirleri ile çarpışmaları onların sistemden "sızmalarına" neden olmaktadır.

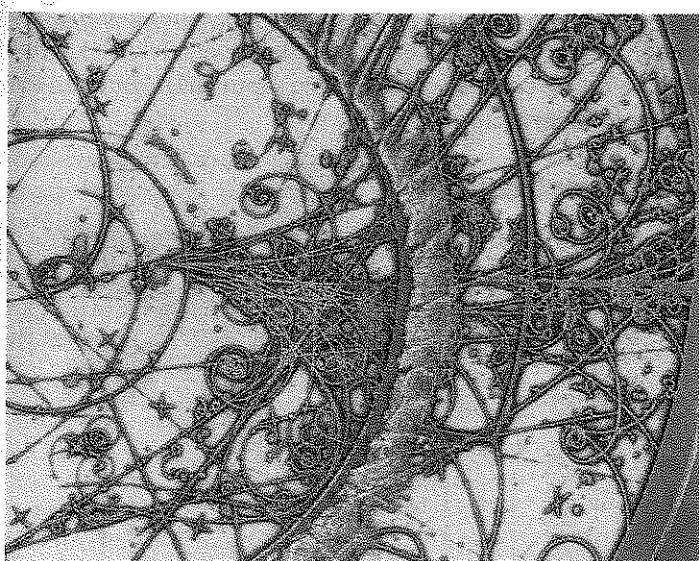
Van Allen ışınım kuşakları, yanlardan dünya'yi saran yüklü parçacıklardan (çoğunlukla elektronlar ve protonlar) oluşur (Şekil 29.21). Dünya'nın düzgün olmayan manyetik alanının tuzakladığı yüklü parçacıklar, Dünya'nın alan çizgilerinin etrafında kutupdan kutuba bir kaç saniye içerisinde spiral çizerler. Bu parçacıklar, genelde güneşten kaynaklanırlar, fakat bazıları yıldızlardan ve uzaydaki diğer gök cisimlerinden gelirler. Bu nedenle, bu parçacıklara *kozmik ışınlar* denir. Kozmik ışınlarının çoğunu Dünya'nın manyetik alanı sapırır ve bunlar hiç bir zaman atmosfere ulaşamaz. Buna rağmen, bazıları tuzaklanırlar ve bunlar Van Allen kuşaklarını oluştururlar. Bu yüklü parçacıklar kutupları



Şekil 29.21 (a) Dünya'nın düzgün olmayan manyetik alanının tuzakladığı yüklü parçacıklardan oluşan Van Allen kuşakları. Alan çizgileri mavi, parçacıkların yolları ise kırmızı renkle gösterilmiştir.

üzerinde olduklarında bazen Dünya atmosferindeki atomlarla çarpışırlar ve onların görünür ışık yaymalarına neden olurlar. Kuzey yarımkürede görülen Oğuzelim "Kuzey kutbu fecri" veya "Kuzey Işınımları"nın güney yarımkürede görülen "Güney kutbu fecri"nin kaynağı budur. Van Allan kuşaklarının Dünya yüzeyine en yakın oldukları yerler kutup bölgeleri olduğundan fecirler ^{12,1} buralarda görülür. Arasında, güneş aktiviteleri çok sayıda yüklü parçacığın kuşaklara girmelerine ve Dünya'nın doğal manyetik alan çizgilerinin bozulmasına neden olur. Bu durumlarda daha düşük enlemlerde de zaman zaman "fecir" görülebilir.

^{12,1}
8
_{12,11}



Bu renkçe zenginleştirilmiş fotoğraf, İsviçrede Geneva kenti yakınlındaki parçacık fiziği laboratuvarı CERN'de çekilmiş olup bir kabarcık odasında atom altı parçacıkların bıraktığı izlerin bir topluluğunu göstermektedir. Bir kabarcık odacığı aşırı derecede ısıtılmış sıvı hidrojenle dolu bir kabdır. Bu sıvı, kabatı basıncın anı düşmesi ile kısa sürede normal kaynama noktasının üzerine getirilir. Bu durumda sıvıdan geçen yüklü bir parçacık, yolu üzerindeki sıvı kaynarken, geçtiği yerde küçük kabarcıklardan oluşan bir iz bırakır. Bu kabarcıklar, farklı tiplerdeki parçacıkların karakteristik yollarını gösteren ince çizgisel izler halinde görülürler. Odacıkta kuvvetli bir manyetik alan bulunduğuundan yollar eğriseldir. Sıkıca sarılmış spiral çizgiler elektronlar ve pozitronlar dan kaynaklanır. (Patrice Loiez, CERN/SPL/Foto Araştırmacıları)

Seçmeli Kesim

29.5

BİR MANYETİK ALAN İÇERİSİNDE HAREKET EDEN YÜKLÜ PARÇACIKLARI İÇEREN UYGULAMALAR

Hem bir E elektrik alanı hem de bir B manyetik alanı içerisinde v hızı ile hareket eden bir yük, elektrik kuvveti qE ve manyetik kuvvet $qv \times B$ nin ikisinden etkisindedir. Yükle etkiyen toplam kuvvet (Lorentz kuvveti denir),

Lorentz kuvveti

$$\Sigma F = qE + qv \times B$$

(29.16)

dir.

Hız Seçici

Hareketli yüklü parçacıkları içeren pek çok deneyde, parçacıkların aynı hızla hareket ediyor olmaları oldukça önemlidir. Bu, yönleri Şekil 29.22'de olduğu gibi düzenlenmiş bir elektrik ve bir manyetik alan bileşimi uygulanarak başıralabilir. Düzgün bir elektrik alanı düşey olarak aşağıya doğru yönelmiş (Şekil 29.22a da sayfa düzleminin içinde) düzgün bir manyetik alan ise elektrik alana dik olarak (Şekil 29.22a da sayfa düzleminin içine doğru) uygulanır. q 'nın pozitif olduğu varsayırsa, manyetik kuvvet $qv \times B$ 'nin yukarı, elektrik kuvveti qE nin ise aşağı yönde olduğunu görürüz. İki alanın büyüklükleri $qE = qvB$ olacak şekilde seçilirse parçacık, alanların bulunduğu bölgede doğrusal bir yataç çizgi boyunca ilerler. $qE = qvB$ ifadesinden,

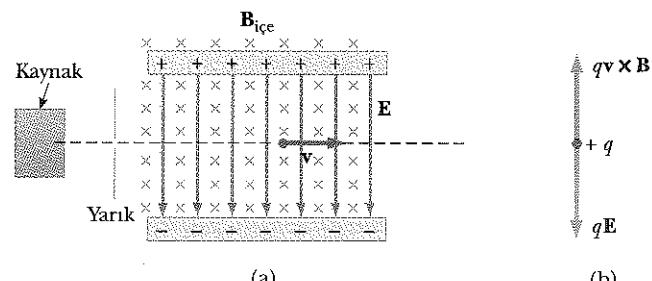
$$v = \frac{E}{B}$$

(29.17)

elde ederiz. Birbirine dik elektrik ve manyetik alanların içinden, ancak bu sürtüne sahip olan parçacıklar sapmadan geçebilirler. Bundan daha büyük sürtüne hareket eden parçacıklara etkiyen manyetik kuvvet, elektrik kuvvetinden daha şiddetlidir ve bu parçacıklar yukarı doğru saptırılırlar. Bundan daha küçük sürtünlere ise aşağı doğru saptırılırlar.

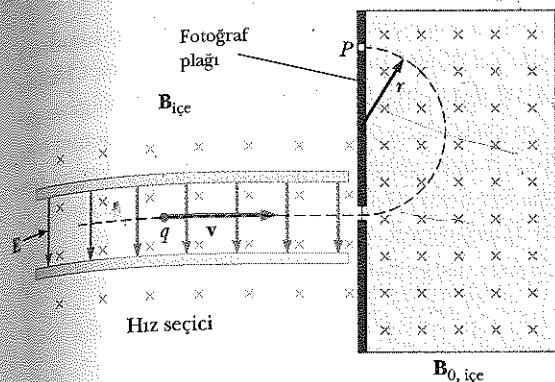
Kütle Spektrometresi

Kütle Spektrometresi, İyonları kütelerinin yüklerine oranına göre ayıran bir düzenektir. *Bainbridge kütle spektrometresi* denen bir tipde, bir iyon demeti önce bir hız seçiciden geçer ve sonra hız seçicideki manyetik alanla aynı yönde yönelmiş ikinci bir B_0 düzgün manyetik alanına girer (Şek. 29.23). B_0 manyetik alanının etkisiyle, iyonlar paralel bir düzlemede doğrusal bir yataç çizgi boyunca ilerler.



Şekil 29.22 (a) Bir hız seçici. Pozitif yüklü bir parçacık, içe doğru bir manyetik alan ile, aynı doğrudan bir elektrik alanının aynı anda etkileri altında olduğu zaman, hem aşağı yönlü bir $qv \times B$ manyetik kuvvetinin etkisindedir. (b) Bu kuvvetler birbirlerini dengelediklerinde, parçacık, alanların içinde yatay bir çizgi boyunca ilerler.

29.5 Bir Manyetik Alan İçerisinde Hareket Eden Yüklü Parçacıkları İçeren Uygulamalar



Şekil 29.23 Bir kütle spektrometresi. Pozitif yüklü parçacıklar, önce bir hız seçiciden geçirilir ve sonra içe doğru yönelmiş bir B_0 manyetik alanının bulunduğu bölgeye girerler ve burada manyetik alanının etkisi altında bir yarımdaire çizerek P deki fotoğraf filmine çarparlar.

üç alanına girince, iyonlar yarıçapı r olan bir yarımdaire çizerek P deki bir fotoğrafik flime çarparlar. Eğer iyonlar pozitif yüklü iseler, Şekil 29.23 ün gösterdiği gibi demet yukarı sapar. Öte yandan iyonlar negatif yüklü olurlarsa demet aşağı doğru sapacaktır. 29.13 Eşitliğinden m/q oranını,

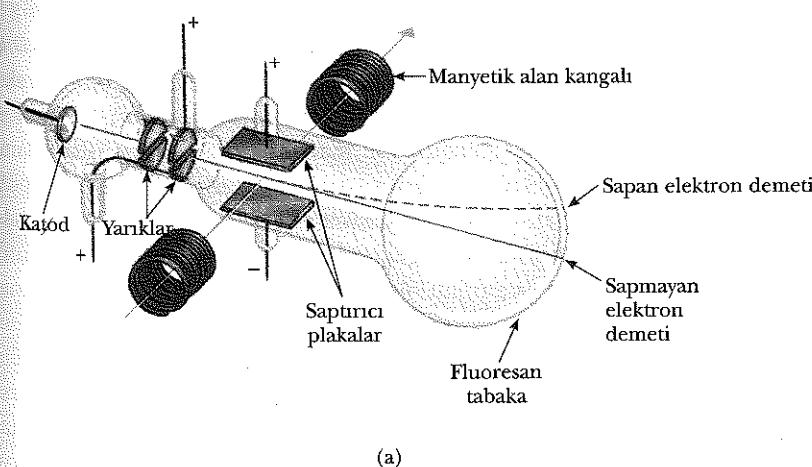
$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

birimde ifade edebiliriz. 29.17 Eşitliğini kullanarak

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0 B}{E} \quad (29.18)$$

elde ederiz. O halde B , B_0 ve E alanları biliindiğine göre eğrilik yarıçapını ölçerek m/q oranı bulunabilir. Uygulamada, genellikle verilen bir iyonun aynı q yüküne sahip çeşitli izotoplarının kütlesi ölçülür. Böylece, q bilinmese bile kütle oranları bulunabilir.

Bu yöntemin değişik bir biçimi, elektronların e/m_e oranlarını ölçmek için 1897 de Joseph John Thomson (1856–1940) tarafından kullanıldı. Şekil



(a)



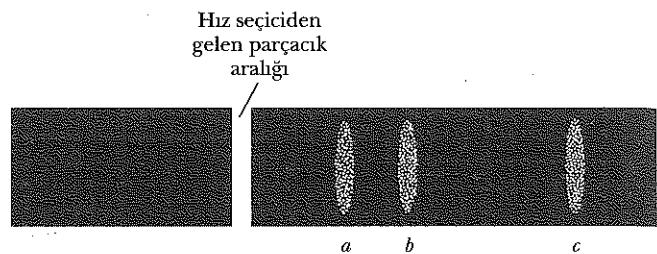
(b)

Şekil 29.24 (a) Thomson'un e/m_e yi ölçen aleti. Elektronlar katoddan hızlandırılır, iki yarımdaire geçerler, sonra hem bir elektrik alanı ve hem de bir manyetik alan (elektrik alana dik yönelik) etkisinde saparlar. Sapan elektron demeti daha sonra fosforlu bir ekrana çarpar. (b) J.J. Thomson, Cambridge Üniversitesi, Cavendish Laboratuvarında J.J. Thomson'un sağındaki adamın bu kitabı hazırlanmasında katkısı olan John W. Jewett'in uzak bir akrabası olan Frank B. Jewett olduğunu belirtmek ilginç olmaz.

29.24a, onun temel aygitını göstermektedir. Elektronlar katoddan anodlara doğru hızlandırılır, anodlardaki yarıklar bunları tek yönlü bir demet haline getirirler ve sonra dik elektrik ve manyetik alanların bulunduğu bölgeye geçerler. Aynı anda uygulanan E ve B alanları, önce, hiç sapmayan bir demet oluşturacak şekilde ayarlanırlar. Sonra B alanı kapatılırsa, E alanı yalnız başına fosforlu ekran üzerinde ölçülebilir bir demet sapması oluşturur. E ve B 'nin ölçülen değerleri ve sapmanın büyüklüğünden, yükün kütleye oranı, e/m_e , saptabilir. Bu ilginç deneyin sonuçları, doğanın temel bir parçası olarak elektronların keşfini temsil eder.

Şıhama Sorusu 29.6

Şekil 29.23 de gösterilen gibi bir kütle spektrometresinden alınan bir fotoğraf filmi tıedadında, Şekil 29.25 de gösterilen üç desen gözlenir. Desenleri oluşturan parçacıkları sürat ve m/q oranlarına göre sıralayınız.

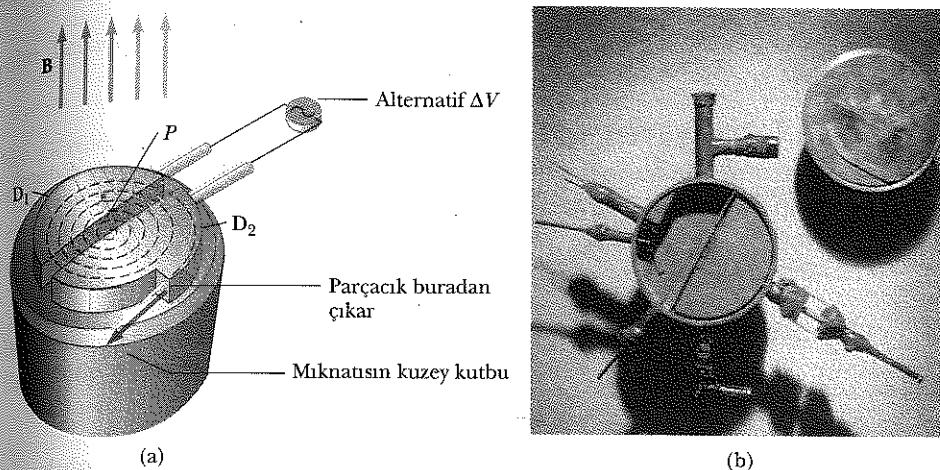


Şekil 29.25

Hızlandırıcı (Siklotron)

Siklotron, yüklü parçacıkları çok yüksek süratlara kadar hızlandıabilen bir makinedir. Elektrik ve manyetik kuvvetlerin her ikisi de bir anahtar rolü oynar. Siklotrondan çıkan yüksek enerjili parçacıklar, atomik çekirdekleri bombardamak ve böylece araştırmacıların gereksinim duyduğu çekirdek tepkimelemini oluşturmak için kullanılırlar. Birçok hastane, teşhis ve tedavide kullanılabilen radyoaktif maddeleri oluşturmak amacıyla, siklotron olanaklarını kullanmaktadır.

Bir siklotronun şematik çizimi Şekil 29.26 da görülmektedir. Yükler D ler (diler) denen iki yarı çember şeklindeki D_1 ve D_2 kaplarının içinde hareket ederler. D 'lere yüksek frekanslı bir değişken (alternatif) gerilim uygulanır ve bir elektromagnitmanın sağladığı düzgün bir manyetik alan D 'lere dik olarak yönlendirilir. Mıknatısın merkezine yakın yerdeki P 'de serbest bırakılan pozitif bir iyon yarı çember şeklindeki bir yörüngede dolanır (Şekildeki kesikli kırmızı çizgi) ve $T/2$ zaman sonra aralığa geri ulaşır. Burada T , iki D etrafında bir kere tur atmak için gereken zaman olup Eşitlik 29.15 ile verilir. Uygulanan V geriliminin frekansı, iyonların bir yarımdan dolanımı için geçen zaman içerisinde D 'lerin kutuplanması tersine dönecek şekilde ayarlanır. Uygulanan gerilim D_2 , D_1 den ΔV kadar daha düşük bir potansiyelde olacak biçimde ayarlanırsa, iyon, aralığı geçerken D_2 ye doğru hızlanır ve kinetik enerjisi $q\Delta V$ kadar artar. Bu nedenle iyon, daha sonra D_2 içerisinde daha büyük yarıçaplı bir yarı çember üzerinde hareketine devam eder. $T/2$ zaman sonra, yine aralığa ulaşır. Bu zamana kadar, D 'lerin arasındaki gerilimin yönü yine değişir (bu yüzden şimdi D_1 negatif olur) ve aralığı geçerken iyon bir başka itme verilir; hareket, her yarımdönde iyon $q\Delta V$ ye eşit bir ek kinetik enerji kazanacak biçimde devam eder. Yüksek enerjili iyonlar, yörüngelerinin yarıçapı hemen hemen D 'lerin yarıçapına ulaştığında, sistemi çıkış yarığından terk ederler. Siklotro-



Şekil 29.26 (a) Siklotron, bir iyon kaynağı, uçları arasına alternatif bir gerilim uygulanan iki düzgün bir manyetik alandan oluşur. (Şekilde mknatısın güney kutbu gösterilmemiş). Kırmızı eğri çizgiler parçacıkların yollarını temsil ederler. (b) 1934 de E. O. Lawrence ve M. S. Livingston'un icad ettiği ilk siklotron. (*California Üniversitesi, Lawrence Berkeley Laboratuvarının izniyle*)

nun çalışma ilkesinin, T nin, iyonun süratinden ve çembersel yörüngenin yarıçapından bağımsız olusuna dayandığını dikkat etmek gereklidir.

Iyonun siklotrondan çıktıgı zamanki kinetik enerjisini, D 'lerin R yarıçapı cinsinden elde edebiliriz. 29.13 Eşitliğinden $v = qBR/m$ bulunur. Böylece, kinetik enerji

$$K = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} \quad (29.19)$$

esitliği ile verilir.

Iyonların enerjisi yaklaşık 20 MeV' u geçtiği zaman, göreceli etkiler devreye girer. (Bu tür etkiler, Bölüm 39 da tartışılmak). Bu nedenle T artar ve dolanan iyonlar uygulanan gerilimle aynı fazlı kalmazlar. Dolanan iyonlarla aynı fazlı kalacak şekilde uygulanan gerilimin periyodunu değiştirmek suretiyle bu problemi ortadan kaldırın hızlandırıcılar yapılabilmektedir.

Seçmeli Kesim

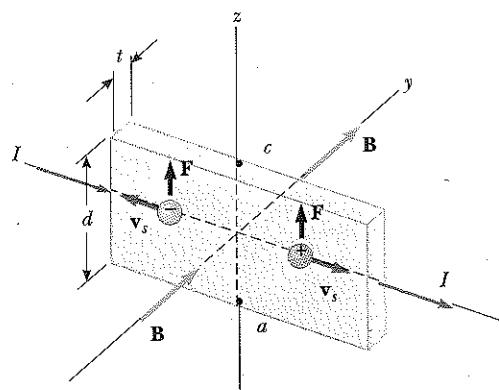
29.6 HALL OLAYI

Akım taşıyan bir iletken bir manyetik alan içine yerleştirildiğinde, hem akıma hem de manyetik alana dik yönde bir potansiyel farkı üretilir. Bu olay ilk olarak 1879 da Edwin Hall tarafından gözlemlendi ve *Hall olayı* olarak bilinir. Olay yük taşıyıcılarının manyetik alandan ötürü gördükleri manyetik kuvvet nedeniyle, iletkenin bir tarafına doğru sapmalarından kaynaklanır. Hall olayı, yük taşıyıcılarının işaret ve yoğunluğu hakkında bilgi verir ve manyetik alanların büyüklüklerini ölçmek için de kullanılabilir.

Hall olayını gözlemeye yarayan düzenek, Şekil 29.27 de görüldüğü gibi x yönünde bir I akımı taşıyan yassı şerit biçiminde bir iletkenden oluşur. y yönünde düzgün bir B manyetik alanı uygulanır. Yük taşıyıcıları, negatif x yönünde v_s sürükleme hızı ile hareket eden elektronlar ise, yukarı doğru bir

Web

Bu hızlandırıcılarla ilgili daha fazla bilgi için,
<http://www.fnal.gov> veya
<http://www.CERN.ch> sitesine girin. CERN 1990 lardan bu yana Dünya'nın her tarafından fizikçilerin oluşturduğu web'ler hakkında da bilgi verir.



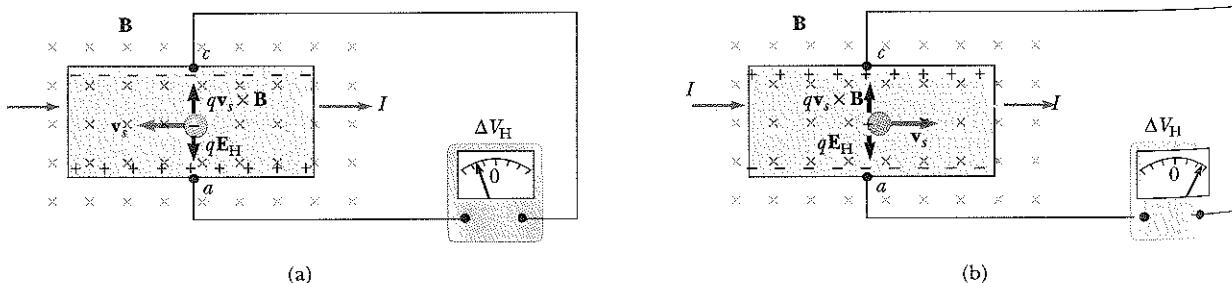
Şekil 29.27 Hall olayını gözlemek için, akım-taşıyan bir iletkenin bir manyetik alan uygulanır. Şekilde gösterildiği gibi, I , x yönünde ve \mathbf{B} , y yönünde olduğu zaman, hem pozitif ve hem de negatif yük taşıyıcıları manyetik alan içinde yukarı doğru saparlar. Hall gerilimi, a ve c noktaları arasında ölçülür.

$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ manyetik kuvvetinin etkisinde kalarak yukarı doğru saptırılırlar ve üst kenarda toplanırlar ve böylece alt kenarda da aynı sayıda pozitif yükler bırakılmış olurlar (Şek.29.28a). Kenarlarda yükün bu birikimi, yük ayrimından kaynaklanan elektrostatik alan nedeniyle yük taşıyıcılarının gördüğü kuvvet, manyetik kuvveti dengeleyinceye kadar sürer. Bu denge koşuluna ulaşıldığında, elektronlar artık yukarı doğru sapmazlar. Şekil 29.28 de gösterildiği gibi iletkenin kenarları arasına bağlanan hassas bir voltmetre ya da potansiyometre bu iki kenarı arasında oluşturulan ve **Hall gerilimi** denen potansiyel farkını ölçebilir. Yük taşıyıcıları pozitif ise ve bu nedenle Şekil 29.27 ve Şekil 29.28b deki gibi pozitif x yönünde hareket ediyorlarsa, bunlar da $q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ ile verilen *yük doğru* bir manyetik kuvvet etkisinde kalırlar. Bu kuvvet, pozitif yüklerin üst kenarda birikmesine ve alt kenarda negatif yük fazlalığına neden olur. Bu nedenle bu nümunede oluşan Hall geriliminin işaretini, elektronların sapmasından kaynaklanan gerilimin işaretinin tam tersidir. Bu nedenle, yük taşıyıcılarının işaretini, Hall geriliminin kutuplamasının ölçümünden yararlanılarak belirlenebilir.

Hall gerilimi için bir bağıntı bulurken, öncelikle yük taşıyıcılarına etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğünün $qv_s B$ olduğuna dikkat edilmelidir. Denge halinde, bu kuvvet elektrostatik kuvvet qE_H ile dengelenir. Burada E_H , yük ayrimından kaynaklanan elektrik alanın büyüklüğüdür. (Bazen *Hall alanı* da denir). Buna göre,

$$qv_s B = qE_H$$

$$E_H = v_s B$$



Şekil 29.28 (a) Bir Hall olayı aygıtında yük taşıyıcıları negatif olduğunda, üst kenar negatif yük hale gelir ve c noktası a dan daha düşük bir potansiyelde olur. (b) Yük taşıyıcıları pozitif olduğunda ise üst kenar pozitif yük hale gelir ve c noktası a dan daha yüksek bir potansiyelde olur. Her iki durumda da, kenarlar tam olarak yüklenikten sonra, yani; yükleri birleştirmeye çalışan elektrostatik kuvvet qE_H ile manyetik kuvvet qvB arasında bir denge oluştuğunda yük taşıyıcıları artık saptırılamazlar.

olur. İletkenin genişliği d ise Hall gerilimi

$$\Delta V_H = E_H d = v_s B d \quad (29.20)$$

dir. Görüldüğü gibi, d ve B bilindiği takdirde ölçülen Hall gerilimi, yük taşıyıcılarının sürüklendirme hızını verir. Yük taşıyıcıları yoğunluğu, n , nümunedeki akım ölçerelk bulunabilir. Eşitlik 27.4 den yararlanarak sürüklendirme hızı,

$$v_s = \frac{I}{nqA} \quad (29.21)$$

biriminde verilebilir. Burada A iletkenin kesit alanıdır. 29.21 Eşitliğini 29.20 Eşitliğinde yerine koyarak,

$$\Delta V_H = \frac{IBd}{nqA} \quad (29.22)$$

elde ederiz. $A = td$ olduğundan (burada t numunenin kalınlığıdır), Eşitlik 29.22,

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_H IB}{t} \quad (29.23)$$

Hall voltajı

birimde ifade edebiliriz. Burada $R_H = 1/nq$ niceliği **Hall katsayısı** dir. 29.23 Eşitliği, uygun biçimde kalibre edilen bir numunenin bilinmeyen bir manyetik alanın büyüklüğünü ölçmek amacıyla kullanılabileceğini gösterir.

Eşitlik 29.23 te, nq 'nın dışındaki tüm nicelikler ölçülebileceğinden Hall katsayısi için derhal bir değer elde edilebilir. R_H 'nin işaretini ve büyülüüğünü yük taşıyıcılarının işaretini ve yoğunluğunu verir. Metallerin çoğu yük taşıyıcılar elektronlardır. Hall olayı ölçümlerinden elde edilen yük yoğunlukları Li, Na, Cu ve Ag gibi yük taşıyıcı olarak atomları birer elektron veren metaller için, hesaplanan değerlerle iyi bir uyum içerisindeidir. Bu durumda n , yaklaşık olarak, birim hacimdeki iletim elektronlarının sayısına eşittir. Fakat, bu klasik model, Fe, Bi ve Cd gibi metaller ya da silisyum ve germanium gibi yarıiletkenler için geçerli değildir. Bu uyumsuzluklar, ancak katıların kuantum özelliği dayanan bir modelle açıklanabilir.

İncele

1980'de Klaus von Klitzing Hall geriliminin kuantize olduğunu keşfetti. 1985'te bu keşfinden ötürü Nobel Ödülü aldı. Kuantumlu Hall olayının tartışması ve sonuçlarını öğrenmek için aşağıdaki Web sitesine girin:

<http://www.saunderscollege.com/physics/>

ÖRNEK 29.8**Bakır İçin Hall Olayı**

1,5 cm genişliğinde ve 0,1 cm kalınlığında dikdörtgensel bir bakır şerit 5 A'lık bir akım taşımaktadır. 1,2 T değerinde bir manyetik alan, şeride dik olarak uygulandığına göre, oluşan Hall gerilimi (voltajını) bulunuz.

Çözüm İletim için atom başına bir elektron katısı olduğunu varsayırsak, yük yoğunluğunu $n = 8,49 \times 10^{28}$ elektron/m³ (Örnek 27.1) olarak alabiliriz. Bu değer ve verilen veriler Eşitlik 29.23 te yerlerine konulduğunda

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{(5,0 \text{ A})(1,2 \text{ T})}{(8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(0,001 \text{ m})}$$

$$\Delta V_H = 0,44 \mu\text{V}$$

bulunur. İyi iletkenlerde böylesine çok küçük bir Hall gerilimi beklenen bir olgudur. Bu hesaplamada, nümenenin genişliğinin gereksiz olduğunu dikkat ediniz.

Yarı iletkenlerde n , bir değerli metallerden (akıma atom başına bir elektron veren) çok daha küçuktur ve daha büyük Hall voltajı elde edilir. Çünkü ΔV_H , n ile ters orantılıdır. Bu tür maddeler için genellikle 1,0 mA mertebedeki akımlar yeterlidir. Bakır şeritle aynı ölçülerde bir silisyum parçası gözönüne alınır. $n = 1,0 \times 10^{20}$ elektron/m³ olduğundan $B = 1,2 \text{ T}$ ve $I = 0,1 \text{ mA}$ alırsa $\Delta V_H = 7,5 \text{ mV}$ elde edilir. Bu büyüklükte bir gerilim kolaylıkla ölçülebilir.

ÖZET

Bir \mathbf{B} manyetik alan içerisinde \mathbf{v} hızı ile hareket eden bir q yüküne etkiyen manyetik kuvvet

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (29.1)$$

bağıntısı ile verilir. Öyle ki, manyetik kuvvet, hem parçacığın hızına hem de alana dik yöndedir. Manyetik kuvvetin *büyüklüğü*,

$$F_B = |q|vB \sin \theta \quad (29.2)$$

ile verilir. Burada θ , \mathbf{v} ile \mathbf{B} arasındaki küçük açıdır. \mathbf{B} nin (SI) deki birimi tesla (T) dir, burada $1T = 1 \text{ N/A}\cdot\text{m}$

Yüklü bir parçacık bir manyetik alan içerisinde hareket ederse, manyetik kuvvetin parçacık üzerinde yaptığı iş sıfırdır. Çünkü yerdeğiştirme kuvvetinin yönüne her zaman diktir. Manyetik alan parçacığın hızının yönünü değiştirebilir fakat süratini asla değiştiremez.

Uzunluğu L olan düz bir iletken bir I akımı taşıırken, düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanı içerisinde konulduğunda etkiyen kuvvet,

$$\mathbf{F}_B = IL \times \mathbf{B} \quad (29.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada \mathbf{L} nin yönü akımın yönündedir. ve $|\mathbf{L}| = L$.

I kadar akım taşıyan keyfi biçimli bir tel, bir manyetik alan içerisinde konulursa, çok küçük bir $d\mathbf{s}$ elemanına etkiyen kuvvet,

$$d\mathbf{F}_B = I d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \quad (29.4)$$

ile verilir. Tele etkiyen toplam kuvveti bulmak için, her noktada \mathbf{B} ve $d\mathbf{s}$ nin değişebileceğini unutmamak kaydıyla, Eşitlik 29.4 ün integralini almak gereklidir.

Düzgün bir manyetik alan içerisindeki akım taşıyan keyfi biçimli bir iletkenne etkiyen kuvvet,

$$\mathbf{F} = IL' \times \mathbf{B} \quad (29.7)$$

eşitliği ile verildiğini gösterir. Burada \mathbf{L}' , iletkenin bir ucundan ötekine yönelik bir vektördür. İntegral işlemi, Eşitlik 29.4 ün kapalı bir ilmek boyunca integrali sıfır olduğu için düzgün bir $d\mathbf{s}$ manyetik alan içerisinde akım taşıyan herhangi bir *kapalı* ilmeğe etkiyen net kuvvet *sıfırdır*.

I akımını taşıyan bir ilmeğin **manyetik dipol momenti** (μ)

$$\mu = IA \quad (29.10)$$

dir. Burada alan vektörü \mathbf{A} , ilmeğin düzlemine dik olup, $|\mathbf{A}|$ ilmeğin yüzey alanına eşittir. μ nün SI sistemindeki birimi $\text{A}\cdot\text{m}^2$ dir.

Bir akım ilmeği, düzgün bir \mathbf{B} dış manyetik alanı içerisinde konulduğunda üzerine etkiyen tork (τ)

$$\tau = \mu \times \mathbf{B} \quad (29.11)$$

ve bir manyetik alan içerisindeki bir manyetik dipolun potansiyel enerjisi

$$U = -\mu \cdot \mathbf{B} \quad (29.12)$$

bağıntısı ile verilir.

Yüklü bir parçacık, başlangıç hızı alana dik olacak biçimde düzgün bir manyetik alana girerse, düzlemi, manyetik alana dik olan bir çember üzerinde hareket edecektir. ÇemberSEL yolun r yarıçapı;

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (29.13)$$

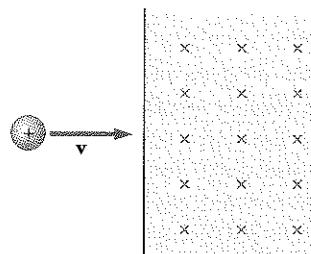
bağıntısı ile verilir. Burada m parçacığın kütlesi, q ise yüküdür. Yüklü parçacığın açısal hızı

$$\omega = \frac{qB}{m} \quad (29.14)$$

ile verilir.

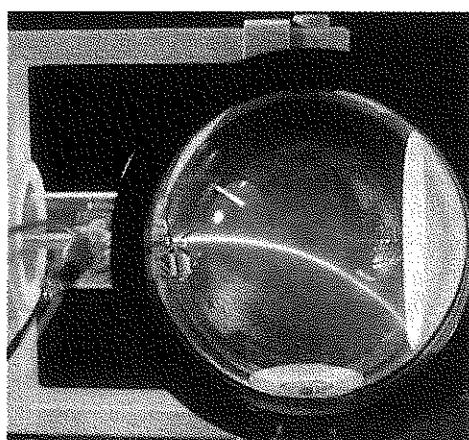
SORULAR

1. Negatif z yönünde manyetik alan bulunan bir bölgede belli bir anda, proton, pozitif x yönünde hareket etmektedir. Manyetik kuwvetin yönü nereye doğrudur? Proton, pozitif x yönündeki hareketine devam edecek midir? Açıklayınız.
2. Yukarı iki parçacık, hızlarına dik bir manyetik alana gönderiliyor. Parçacıklar zıt yönlerde sapırlarsa, bunlar hakkında ne söyleyebilirsiniz?
3. Yukarı bir parçacık uzayın herhangi bir bölgesinde doğru bir çizgi boyunca ilerleyebiliyorsa, o bölgede manyetik alanın sıfır olduğunu söyleyebilir misiniz?
4. Bir elektronun bir protonu bu sayfaya kadar izlediğini ve bu anda aniden kağıt düzleminin içine doğru dik bir manyetik alan uygulandığını varsayıy়iz. Parçacıklara ne olacaktır?
5. Bir manyetik alanla bir elektrik alanı birbirinden ayırtetmek için, hareketli bir yüklü parçacığın hareketi nasıl kullanılabilir? Tartışmanızı doğrulayan belirgin bir örnek veriniz.
6. Elektrik ve manyetik kuvvetlerin birçok benzerlik ve farklarını sıralayınız.
7. Şu ifadeyi doğrulayınız: "Yüklü bir parçacığın süratini sabit (yani, zamana bağlı olmayan) bir manyetik alanla, değiştirmek mümkün değildir."
8. Yukarıdaki ifadenin işliğinde, bir siklotronda manyetik alanın işlevi nedir?
9. Akım-taşyan bir iletken, düzgün bir manyetik alan içerisinde belirli bir biçimde yerleştirilirse, hiçbir manyetik kuwertkisinde kalmaz. Açıklayınız.
10. Düzgün bir manyetik alan içerisindeki bir akım ilmeğini dönenmeyecek biçimde yönlendirmek mümkün müdür? Açıklayınız.
11. Bir akım ilmeği, uzayın verilen bir bölgesindeki manyetik alanın varlığını belirlemek amacıyla nasıl kullanılabilir?
12. Düzgün bir manyetik alan içerisindeki bir pusula ighbine etkiyen net kuvvet nedir?
13. Bir manyetik dipole net bir kuvvet etki etirebilmek için, ne tür bir manyetik alan gereklidir? Bu net kuvvetin yönü nedir?
14. Şekil Q29.14 te gösterildiği gibi yatay olarak hareket eden bir proton, hızına dik olan düzgün bir manyetik alanın bulunduğu bölgeye girerse, daha sonraki hareketini açıklayınız. Aynı koşullar altında bir elektron nasıl davranışacaktı?
15. Bir manyetik şişede tutulan yüklü parçacıkların hızının yönünü, şişenin uçlarında ne geriye çevirir? (İpucu: Alan çizgilerinin birbirlerine iyice yaklaştığı bir bölge bu parçacıklara etkiyen manyetik kuvvetin yönünü bulunuz.)
16. Siklotronda, hızları farklı olan parçacıklar bir D içindeki yarıçemberlik yolculuğu için aynı sürede tamamlarlar?



Şekil Q29.14

17. Kabarcık odası, bir manyetik alan içerisinde daldırılan ve içerisinde geçen yüklü parçacıkların izlerini gözlemeye yarayan bir aygit. İzlerden bazıları spiral, diğerleri ise doğru çizgiler halinde ise parçacıklar hakkında ne söyleyebilirsiniz?
18. Bir sabit manyetik alan, duran bir elektronu harekete geçirilebilir mi? Nasıl?
19. Manyetik alanları ölçmek için Hall olayını kullanan bir manyetik algılayıcı (prob) tasarımladığınızı, yapım için verilen bir maddeyi kullanmak zorunda olduğumuzu ve algılayıcıyı zaten yeteri kadar ince yaptığımızı varsayıy়iz. Verilen bir manyetik alan şiddetini için, üretilen Hall geriliminin artırılması nasıl yapılabilir?
20. Şekil Q29.20 de gösterilen elektron demeti, sağa doğru gönderilmektedir. Demet akım-taşyan bir çift kangallın oluşturduğu bir manyetik alanın etkisiyle aşağı doğru sapar. (a) Manyetik alanın yönü nereye doğrudur? (b) Kangallardaki akımın yönü ters çevrilseydi demete ne olacaktı?



Şekil Q29.20 (Central Scientific Company'nin izniyle)

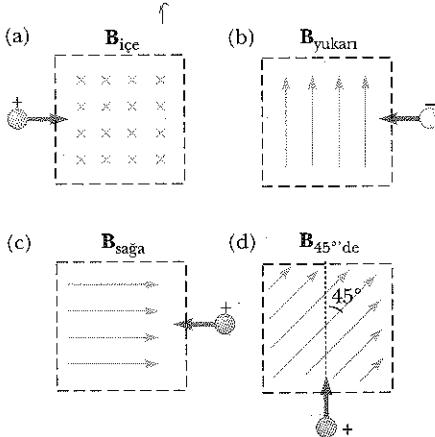
PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzunda* bulunabilir

= Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

Kesim 29.1 Manyetik Alan

- 1.** Şekil P29.1 de gösterildiği gibi, yüklü parçacıkların manyetik alanlara girerken başlangıçtaki sapma yönlerini bulunuz.

**Şekil P29.1**

- Dünya'nın ekvatoruna yakın bir elektron gözönüne alınız. Hizi (a) aşağı, (b) kuzeye, (c) batıya, ya da (d) güneydoğuya doğru yönelmişse hangi yöne doğru sapar?
- Bir manyetik alana dik olarak, pozitif x ekseni boyunca hereket eden bir elektron, negatif y yönünde bir manyetik sapma yaptığına göre bu bölgede manyetik alanın yönü nedir?
- Bir proton, $+y$ yönündeki $0,300\text{ T}$ 'lik bir manyetik alanın yönü ile $37,0^\circ$ açı yapan bir doğrultuda $3,00 \times 10^6\text{ m/s}^2$ süratla ilerlemektedir. (a) Protona etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü ve (b) protonun ivmesi nedir?
- Bir proton, $+y$ yönündeki $1,00 \times 10^7\text{ m/s}$ süratla hareket etmekte iken hızı $+z$ yönünde olduğu bir anda $+x$ yönünde $2,00 \times 10^{13}\text{ m/s}^2$ lik bir ivme hissettiğine göre alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.
- Bir elektron, durgun halden 2400 V luk bir gerilim altında hızlandırılır ve sonra $1,7\text{ T}$ büyüğünde düzgün bir manyetik alan bulunan bir bölgeye girer. Bu yükle etkiyen (a) maksimum ve (b) minimum manyetik kuvvetlerin değerleri nedir?
- Ekvatorda Dünya yüzeyine yakın yerlerde iyi bir havada manyetik alan yaklaşık olarak $50,0\text{ }\mu\text{T}$ olup kuzeye ve elektrik alanı ise 100 N/C olup aşağı doğrudur. Bu çevrede ani hızı doğuya doğru $6,00 \times$

10^6 m/s olan bir elektrona etkiyen, yerçekimi kuvvetini, elektrik ve manyetik kuvvetleri bulunuz.

- 8.** Net yükü $Q = 5,00\mu\text{C}$ olan $30,0\text{ g}$ küteli metal top, $v = 20,0\text{ m/s}$ lik bir süratla yatay olarak bir pencerenin dışarı fırlatılıyor. Pencere yerden $h = 20,0\text{ m}$ yukarıda ve büyülüğu $B = 0,010\text{ T}$ olan bir düzgün ve yatay manyetik alan topun yönüne düzleme dik olduğuna göre yere çarpmadan hemen önce topa etkiyen manyetik kuvveti bulunuz.

- 9.** $1,7\text{ T}$ lik bir manyetik alan içerisinde $4 \times 10^6\text{ m/s}$ lik bir hızla hereket eden bir proton, büyülü $8,2 \times 10^{-13}\text{ N}$ olan bir manyetik kuvvet etkisinde kaldığına göre alanla protonun hızı arasındaki açı nedir?

- 10.** Düzgün elektrik ve manyetik alanların içerisindeki bir elektronun hızı $1,20\text{ km/s}$ (pozitif x yönünde) ve ivmesi $2,00 \times 10^{12}\text{ m/s}^2$ (pozitif z yönünde) dir. Eğer elektrik alanı pozitif z yönünde ve $20,0\text{ N/C}$ büyüğünde ise, bölgedeki manyetik alan hakkında neyi bulabilirsiniz?

- 11.** Bir proton, manyetik alanın $\mathbf{B} = (i + 2j - 3k)\text{ T}$ ile verildiği bir bölgede $\mathbf{v} = (2i - 4j + k)$ hızı ile hareket ederse, bu yükle etkiyen manyetik kuvvetin büyülü nedir?

- 12.** Bir elektron $\mathbf{B} = (1,40i + 2,10j)\text{ T}$ ile verilen düzgün bir manyetik alanın içine atılıyor, hızı $\mathbf{v} = 3,70 \times 10^5\text{ m/s}$ olduğunda elektrona etkiyen kuvvetin vektörel ifadesini bulunuz.

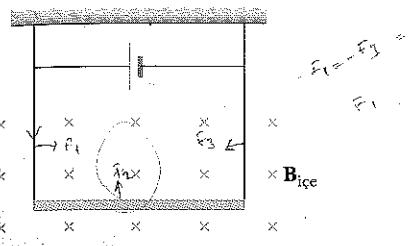
Kesim 29.2 Akım-Taşıyan Bir İletkene Etkiyen Manyetik Kuvvet

- 13.** Birim uzunluğunun kütlesi $0,500\text{ g/cm}$ olan bir teli yatay olarak güneşe doğru $2,00\text{ A}'lik$ bir akım taşımaktadır. Bu teli düşey olarak yukarı doğru kaldırılabilmek için gerekli manyetik alanın yön ve minimum büyülü nedir?

- 14.** Bir tel $2,4\text{ A}$ lik bir kararlı akım taşımaktadır. Telin x ekseni boyunca $0,75\text{ m}$ lik düz kısmı, $\mathbf{B} = 1,6\text{ kT}$ ile verilen düzgün bir manyetik alan içerisinde bulunduğu ve akım $+x$ yönünde geçtiğine göre, telin bu kısmına etkiyen kuvvet ne kadardır?

- 15.** Uzunluğu $2,80\text{ m}$ olan bir tel, büyülü $0,390\text{ T}$ olan düzgün manyetik alan bulunan bir yerde, $5,00\text{ A}'lik$ bir akım taşımaktadır. Manyetik alan ile akım yönü arasındaki açı (a) $60,0^\circ$, (b) $90,0^\circ$ ve (c) 120° ise tele etkiyen manyetik kuvvetin büyülü nedir?

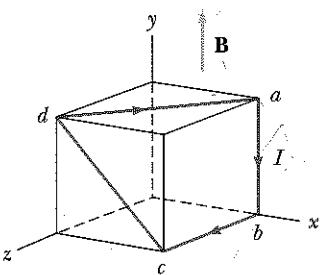
- 16.** Şekil P29.16 daki gibi, iki esnek telle asılan bir iletkenin birim uzunluğunun kütlesi $0,04\text{ kg/m}$ dir. İletkenin bulunduğu bölgede sayfa düzleminin içine doğru $3,6\text{ T}$ büyülüde bir manyetik alan var-



Şekil P29.16

sa, askı tellerindeki gerilmenin sıfır olabilmesi için iletkenindeki akımın büyüklüğü ve yönü ne olmalıdır? Çizisel yük yoğunluğu $1,00 \text{ g/m}$ olan bir çok uzun düzgün telin Dünya'yı manyetik ekvatora sardığını varsayıyın. Bu bölgede Dünya'nın manyetik alanı $50 \mu\text{T}$ ve yatay olarak kuzeeye doğru olsun. Teli yerin hemen üzerinde havada tutabilmek için telden geçmesi gereken akımın büyüklüğü ve yönü nedir?

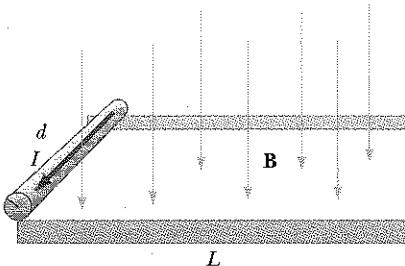
18. Şekil P29.18 deki kubün her kenarı 40 cm dir. Telin dört düz kısmı — ab , bc , cd ve da — gösterildiği gibi $I = 5 \text{ A}$ lik akım taşıyan kapalı bir ilmek oluşturmaktadır. Pozitif yönünde $B = 0,02 \text{ T}$ büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan bulunduguına göre, her kısma etkiyen kuvvetin yönünü ve büyüklüğünü bulunuz.



Şekil P29.18

Tarama Problemi. $0,720 \text{ kg}$ külteli ve $6,0 \text{ cm}$ yarıçaplı bir çubuk uzunlukları $45,0 \text{ cm}$ ve aralarındaki uzaklık $d = 12,0 \text{ cm}$ olan paralel iki ray üzerinde durmaktadır (Şekil P29.19). Çubuk gösterilen yönde $I = 48,0 \text{ A}$ 'lik bir akım taşımakta ve kaymaksızın raylar boyunca yuvarlanabilmektedir. Eğer çubuğa ve raylara dik olarak $0,240 \text{ T}$ büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan uygulanırsa durgun halden harekete geçen çubuğun rayları farkederkenki süratı ne olur?

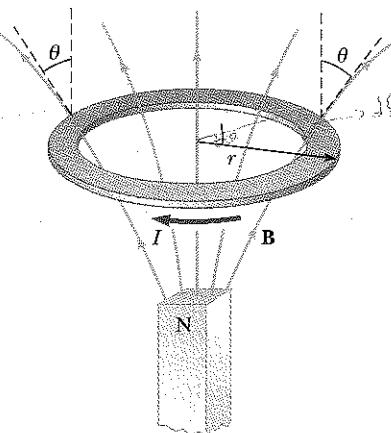
Tarama Problemi. Külesi m , yarıçapı R olan bir çubuk uzunlukları L ve aralarındaki uzaklık d olan iki paralel rayın üzerinde durmaktadır (Şekil P29.19). Çubuk gösterilen yönde $I = 48,0 \text{ A}$ 'lik bir akım taşımakta ve kaymaksızın raylar boyunca yuvarlanabilmekte. Eğer bir \mathbf{B} düzgün manyetik alanı hem çubuğa ve hem de raylara dik olarak uygulanırsa durgun halden harekete geçen çubuğun rayları terkederkenki süratı nedir?



Şekil P29.19 Problem 19 ve 20

WEB

Düzgün olmayan bir manyetik alan, bir dipole net bir manyetik kuvvet uygular. Şekil P29.21 de gösterildiği gibi, I akımı taşıyan r yarıçaplı yatay bir iletken halkanın altına kuvvetli bir manyetik alan yerleştiriliyor. \mathbf{B} manyetik alanı halkanın bulunduğu yerde düzseyle θ açısı yaparsa, halkaya etkiyen bileşke kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir?



Şekil P29.21

22. Georgia, Atlanta'da Dünya'nın manyetik alanı yatağın $60,0^\circ$ altında kuzeeye doğru $52,0 \mu\text{T}$ olsun. Kuzey-güney dik düzleminde bulunan bir dükkan penceresinin diagonal iki köşesi arasında uzanan bir neon tüpünden $35,0 \text{ mA}$ 'lik bir akım geçmektedir. Akım tüpe, pencerenin alt güney köşesinden girer, kuzeye doğru $1,40 \text{ m}$ ve yukarı doğru $0,850 \text{ m}$ de bulunan karşı köşeden çıkar. Bu iki nokta arasında, ışık yayan tüp DONUTS yazısını gösterir. "Durum 1" olarak tanıtlanan teoremi kullanarak tüpe etkiyen toplam vektörel manyetik kuvveti bulunuz.

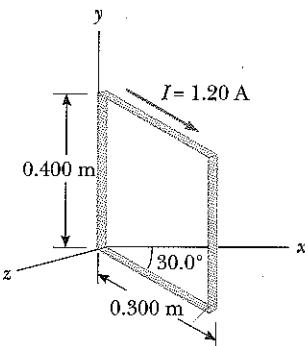
Kesim 29.3 Düzgün Bir Manyetik Alanda Akım İlmegi-ne Etkiye Tork

23. Çevresi 2 m olan çember biçimli tek bir ilmekten 17 mA lik bir akım geçerken, ilmek düzlemine paralel olarak $0,8 \text{ T}$ büyüklüğünde bir manyetik alan uygulanırsa, bu ilmekten etkiye neden olacak maksimum tork ne olur?

gulanıyor. (a) Akım ilmeğinin manyetik momentini hesaplayınız. (b) Manyetik alanın ilmeğe uyguladığı torkun büyüklüğü nedir?

24. Küçük bir çubuk mıknatıs, $0,25\text{ T}$ büyüklüğünde düzgün bir manyetik alanın içine asıldığında, etki eden maksimum tork $4,6 \times 10^{-3}\text{ N}\cdot\text{m}$ dir. Çubuk mıknatısın manyetik momentini hesaplayınız.

 Çok sıkı sarılmış 100 sarımdan oluşan dikdörtgen biçimli bir ilmeğin boyutları $0,4\text{ m}$ ve $0,3\text{ m}$ dir. İlmek, y eksenine boyunca menteşelenmiş olup, ilmek düzlemini x eksenile 30° açı yapmaktadır. (Şek. P29.25). Sarımlardan şekilde gösterildiği yönde $1,2\text{ A}$ değerinde akım geçtiği zaman, x eksenine boyunca uygulanan $0,8\text{ T}$ lik düzgün bir manyetik alanın ilmeğe etkidiği torkun büyüklüğü nedir? İlmeğin beklenen dönme yönü nedir?



Şekil P29.25

25. Kütlesi $0,100\text{ kg}$ ve toplam uzunluğu $4,00\text{ m}$ olan uzun bir tel parçasından bir kenarının uzunluğu $0,100\text{ m}$ olan küresel bir kangel yapılmış. Kangel yatay bir kenarı boyunca menteşelenmiş ve $3,40\text{ A}$ 'lık bir akım taşımakta iken büyüklüğü $0,0100\text{T}$ olan düşey bir manyetik alana yerleştirilmiş. (a) Kangel dengeye ulaştığında kangel düzleminin düşeye yaptığı açıyi bulun. (a) Denge halinde kangala etkiyen manyetik kuvvetten kaynaklanan torku bulunuz.
27. Uzunluğu $40,0\text{ cm}$ olan bir telden $20,0\text{ A}$ 'lık bir akım geçmektedir. Bu tel bir ilmek biçiminde büküldükten sonra normal şiddeti $0,520\text{T}$ olan bir manyetik alana dik olacak şekilde yerleştirilmiş. Eğer tel (a) bir eşkenar üçgen, (b) bir kare ve çember biçiminde bükülmüşse ilmeklere etkiyen torklar ne olur? (d) Hangi tork en büyuktur.
28. Dipol momenti μ olan bir akım ilmeği \mathbf{B} düzgün bir manyetik alana içerisinde yerleştirildiğinde potansiyel enerjisinin $U = -\mu \cdot \mathbf{B}$ ile verildiğini kanıtlayınız. Bir elektrik dipolünün bir elektrik alan içerisindeki potansiyel enerjisi ile ilgili tartışmadan (Bölüm 26) yararlanabilirsiniz.
29. Bir pusula işgesinin manyetik momenti $9,70\text{ mA} \cdot \text{m}^2$ dir. Bulunduğu yerde Dünya'nın manyetik alanı yatayin $48,0^\circ$ altında kuzeYE doğru $55,0\text{ }\mu\text{T}$ büyüklüğünde olduğuna göre, (a) Pusula işgesinin minimum ve maksimum potansiyel enerjiye sahip olduğu yönelimleri belirleyiniz. (b) Maksimum potansiyel

enerjiye sahip olduğu yönelime getirebilmek için ne kadar iş yapılmalıdır?

30. Bir tel, 10 cm çaplı bir çember haline getirilip $3,00\text{ mT}$ büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan içine yerleştiriliyor. Telden 5 A lik bir akım geçirildiğinde (a) akım taşıyan ilmeğe etki edebilen maksimum torku (b) farklı yönelimler için ilmeğin sahip olduğu potansiyel enerji aralığını bulunuz.

Kesim 29.4 Düzgün Bir Manyetik Alanda Yerleşen Bir Parçaçığın Hareketi

31. Yerin manyetik alanı belirli bir yerde, dik ve aşağı doğru yönelmiş olup $50,0\text{ }\mu\text{T}$ büyüklüğündedir. Bir proton $6,2 \times 10^6\text{ m/s}$ lik bir hızla bu alan içerisinde batıya doğru hareket ediyor. (a) Bu yüze alanın uyguladığı manyetik kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir. (b) Bu protonun izlediği çember şeklindeki yarıçapını nedir?
32. Bir tek elektronunu kaybetmiş pozitif bir iyonun kütlesi $3,2 \times 10^{-26}\text{ kg}$ dir. Durgun haldeki iyon 833 V luk bir potansiyel farkı ile hızlandırıldıktan sonra büyülü $0,92\text{ T}$ olan bir manyetik alana dik olarak giriyor. İyonun alan içerisindeki yörungesinin yarıçapını hesaplayınız.
33. **Tarama Problemi.** Bir elektron durmakta iken iki bir elektronla elektrik olarak çarpıştırdıktan sonra, yörungelerinin yarıçapları $1,00\text{ cm}$ ve $2,40\text{ cm}$ olarak ölçülüyor. Yörungeler, büyülü $0,0440\text{ T}$ olan bir düzgün manyetik alan'a dik olduklarına göre vuran elektronun enerjisini keV cinsinden bulun.
34. Sabit bir manyetik alana dik olarak çembersel bir yöründede hareket eden bir proton bir turunu $1,00\mu\text{s}$ de tamamladığına göre manyetik alanın büyünü bulunuz.
35. Bir proton (yükü $+e$, kütlesi m_p), bir döteron (yükü $+e$, kütlesi $2m_p$) ve bir alfa parçacığı (yükü $+2e$, kütlesi $4m_p$) ortak bir ΔV potansiyel farkı ile hızlandırıldıktan sonra hızları düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanına dik olacak biçimde giriyorlar. Yarıçapları r_d ve r_α 'yı r_p cinsinden bulunuz.
36. **Tarama Problemi.** Bir elektron, büyülü $1,00\text{ mT}$ olan bir sabit manyetik alana dik çembersel bir yöründede hareket etmektedir. Elektronun çemberin merkezine göre açısal momentumu $4,00 \times 10^{-25}\text{ J}\cdot\text{s}$ ise, (a) çembersel yöringenin yarıçapını (b) elektronun hızını bulunuz.
37. $5,2\text{ T}$ büyülü $1,00\text{ mT}$ olan protonun siklotron frekansını hesaplayınız.
38. Yükli ve m küteli bir iyon, ΔV potansiyel farkı ile durgun halden hızlandırıldıktan sonra düzgün bir manyetik alanın (iyonun hızına dik) etkisiyle R yarıçaplı bir yarıçember çizecek biçimde saptırılıyor. Kütlesi m' olan çift yükli bir iyon, aynı potansiyel farkı altında hızlandırılıp aynı manyetik alanda yarıçapı $R' = 2R$ olan bir yarıçember çizecek şekilde saptırılıyor. Bu verilere göre iyonların kütlelerinin oranı nedir?

39. Yıldızlararası uzayda, bir kozmik-ışın protonunun enerjisi 10 MeV olup bu proton, Merkürün'ün Güneş'in etrafındaki yörüngesinin yarıçapına ($5,8 \times 10^{10}$ m) eşit yarıçaplı bir çember şeklindeki yörünge de dolanmaktadır. Uzayın o bölgesindeki manyetik alan ne kadardır?

40. $4,6 \times 10^5$ m/s hızla hareket eden bir-değerli pozitif bir iyon kabarcık odasının bir resimde, 1,8 T lik manyetik alanına dik bir doğrultu boyunca 7,94 mm yarıçaplı bir çembersel-iz bırakmasına göre, bu iyonun kütlesini (atomik kütle birimi olarak) bulunuz ve bundan yararlanarak ne olduğunu belirtiniz.

(Seçmeli)

Kesim 29.5 Bir Manyetik Alanda Hareket Eden Yüklü Parçacıklara Ait Uygulamalar

41. Bir hız seçici, $E = Ek$ ve $B = Bj$ ifadesiyle verilen elektrik ve manyetik alanlardan oluşmaktadır. $B = 0,015$ T ise, pozitif x ekseni boyunca hereket eden 750 eV enerjili bir elektronun sapmadan gecebilmesi için E nin değeri ne olmalıdır?

42. Bir değerli uranyum -238 iyonları, 2 kV luk bir potansiyel farkı altında hızlandırılarak, hızlarına dik olan 1,2 T lik düzgün bir manyetik alana giriyorlar. (a) Bu iyonların izledikleri çembersel yolun yarıçapını bulunuz. (b) Aynı şeyi uranyum -235 için yapın. Bu yörünge yarıçaplarının oranı, hızlandırma gerilimine ve manyetik alan şiddetine nasıl bağlıdır?

43. Şekil 29.23 de şeması verilen kütle spektrometresini gözönüne alınız. Hız seçicinin plakaları arasındaki elektrik alanı 2500 V/m ve hem hız seçicideki ve hem de saptırma odasındaki manyetik alanın büyüğünü 0,035 T dir. Kütlesi $m = 2,18 \times 10^{-26}$ kg olan bir yüklü bir iyon için sistemdeki yörüngeyiin yarıçapını hesaplayınız.

44. 5,2 T lik bir manyetik alan kullanarak, protonları 34 MeV luk enerjilere hızlandırılmak amacıyla tasarımılanan bir siklotron için gereken yarıçap ne kadardır?

45. Protonları hızlandırmak için tasarlanan bir siklotronun manyetik alanı 0,45 T ve yarıçapı 1,2 m dir. (a) Siklotron frekansı ne kadardır? (b) protonların kazanabileceği maksimum sürat ne kadardır?

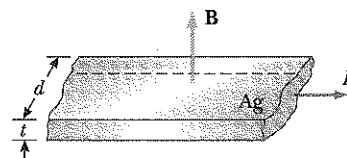
46. Illinois, Batavia'da bulunan Fermilab hızlandırıcısında, momentumu $4,8 \times 10^{-16}$ kg·m/s olan protonlar, yukarı yönlü bir manyetik alan sayesinde yarıçapı 1 km olan çember şeklindeki yörüngeye tutulur. Protonları bu yörüngeye tutan manyetik alan ne kadardır?

Web 47. Bir televizyondaki resim tübünde, elektrik saptırma plakalarından ziyade manyetik saptırma kangalları kullanılır. Bir elektron demetinin, 50 kV'luk bir potansiyel farkı altında hızlandırıldıktan sonra 1 cm genişlikte bir bölgede düzgün bir manyetik alandan geçtiğini varsayıy়iz. Ekran, kangalların merkezinden 10 cm uzağa yerleştirilmiş olup 50 cm genişliğtedir. Alan kapatıldığından, elektron demeti ekranın merkezine çarpar. Elektron demetini ekranın kenarına saptırabilmek için ne kadarlık bir alan şiddeti gereklidir?

(Seçmeli)

Kesim 29.6 Hall Olayı

48. Kalınlığı $t = 0,20$ mm olan yassi gümüş bir şerit, Şekil P29.48 de gösterildiği gibi şeride dik olan düzgün bir manyetik alanı, Hall olayı ile ölçmek amacıyla kullanılıyor. Gümüşün Hall katsayısı $R_H = 0,84 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{C}$ dur. (a) Gümüşteki yük taşıyıcılarının etkin yoğunluğu, n , nedir? (b) $I = 20$ A'lık bir akım, $\Delta V_H = 15 \mu\text{V}$ olan bir Hall gerilimi oluşturursa, uygulanan manyetik alanın büyüklüğü ne dir?



Şekil P29.48

49. Bir Hall olayı ölçümdünde, deneysel örnek olarak 0,4 cm kalınlığında bir iletken kullanılıyor. 1,8 T'lik bir manyetik alan içerisinde 21 A'lık bir akım kullanıldığında ölçülen Hall gerilimi $35 \mu\text{V}$ ise, iletkenin Hall katsayısını hesaplayınız.

50. 50 A'lık akım taşıyan 0,330 mm kalınlığında yassi bir bakır şerit, düzlemine dik 1,3 T büyüğündeki düzgün bir manyetik alanın içine yerleştirilmiştir. Şeridin enine, bir tarafından diğer tarafına $9,6 \mu\text{V}$ 'luk bir Hall gerilimi ölçülmüşse bakır şeritdeki serbest elektronların yük yoğunluğu nedir? Bu sonuç, atom başına serbest elektronların etkin sayısının kaç tanesi olduğunu göstermektedir?

51. Hall olayını kullanarak yerin manyetik alanını ölçmek amacıyla tasarımılanan bir deneye, kalınlığı 0,5 cm olan bakır bir çubuk doğu batı yönü boyunca yerleştirilmiştir. İletkendeki 8 A lik bir akım, $5,1 \times 10^{-12}$ V'luk bir Hall gerilimi oluşturuyorsa, yerin manyetik alanının büyüğünü nedir? ($n = 8,48 \times 10^{28}$ elektron/m³ ve çubugun düzleminin B'ye dik olacak biçimde döndürüldüğünü varsayıy়iz.)

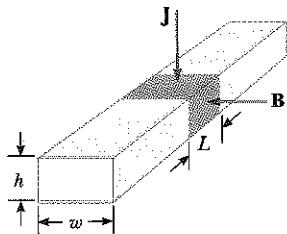
52. Bir Hall-olayı probu (algılayıcı), 120 mA lik bir akımda çalışmaktadır. Prob 0,08 T lik düzgün bir manyetik alana yerleştirildiğinde $0,7 \mu\text{V}$ değerinde bir Hall gerilimi oluşturmaktadır. (a) Bilinmeyen bir manyetik alanı ölçerken, Hall gerilimi $0,33 \mu\text{V}$ dur. Bilinmeyen alanın büyüğünü ne kadardır? (b) Nümunenin B yönündeki kalınlığı 2 mm ise, yük-taşıyıcı yoğunluğunu bulunuz (herbir yük e kadardır).

EK PROBLEMLER

53. Bir elektron büyüğü 0,100 T olan bir manyetik alanın bulunduğu bölgeye doğrusal sınırlına dik olarak girer. Alanın yönü elektronun hızına dik olduğuna göre; (a) Elektronun yörünge bir yarıçap şeklinde ise alanın bulunduğu bölgeyi ne kadar zamanda terkeder? (b) Alanın içine maksimum girme derinliği 2,00 cm ise elektronun kinetik enerjisini bulunuz.

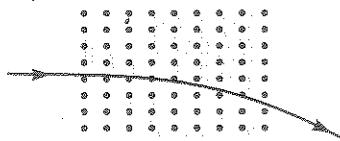
54. 10,0 A'lık akım taşımakta olan 0,200 kg'hk bir metal çubuk, aralarındaki uzaklık 0,500 m olan iki yatay ray üzerinde kaymaktadır. Eğer çubukla raylar arasındaki kinetik sürtünme katsayısi 0,100 ise, çubuğun sabit bir süratla hareket edebilmesi için nasıl bir dik manyetik alan gerekmektedir?

55. Sodyum 99°C de erir. Sıvı sodyum, mükemmel bir ısı iletkeni olup bazı nükleer reaktörlerin çekirdeğini soğutmak amacıyla kullanılır. Sıvı sodyum, bir manyetik alanda hareket eden yüklü bir parçacığa etkiyen kuvvet prensibine dayanan pompalarla borulardan geçirilebilir. Prensip şöyledir: sıvı sodyumun, genişliği w ve yüklekliği h olan bir dikdörtgensel kesit alanlı yalıtkan boruda olduğunu, boruya dik olan düzgün bir manyetik alanın L uzunlığında bir kesimini etkilediğini varsayıyalım (Şek. P29.55). Boruya ve manyetik alana dik olan bir elektrik akımı, sıvı sodyumda J ile gösterilen bir akım yoğunluğu oluşturur. (a) Bu düzeneğin, niçin sıvı üzerinde boru boyunca yönelen bir kuvvet oluşturduğunu açıklayınız. (b) Sıvının manyetik alan içerisinde kalan kesiminin JLB'ye eşit bir basınç artışı hissettiğini gösteriniz.



Şekil P29.55

- 56.** 5 MeV kinetik enerjili protonlar, pozitif x yönünde hareket etmekte iken Şekil P29.56 da gösterildiği gibi $x = 0$ dan $x = 1$ m ye kadar yayılan ve kağıt düzlemine dik olan $\mathbf{B} = (0,050 \text{ T}) \mathbf{k}$ manyetik alanına giriyor (a) manyetik alandan çıkışken protonların momentumunun y bileşenini hesaplayınız. (b) Proton demetinin başlangıçtaki hız vektörü ile alanı terk ettikten sonraki hız vektörü arasındaki α açısını bulunuz. (İpucu: Göreceli etkileri ihmäl ediniz ve $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$ olduğunu anımsayınız).



Şekil P29.56

57. (a) $\mathbf{v} = v_i \mathbf{i}$ hızı ile $+x$ yönünde hareket etmekte olan bir proton bir $\mathbf{F} = F_i \mathbf{j}$ manyetik kuvvetini hissettiğine göre bu bilgiden \mathbf{B} hakkında neyi söyleyip neyi söylemeyeceğinizi açıklayınız. (b) Aynı manyetik alan içerisinde $\mathbf{v} = -v_i \mathbf{i}$ hızı ile hareket eden bir protona etkiyen kuvvet F_i cinsinden ne olacaktır? (c) Aynı

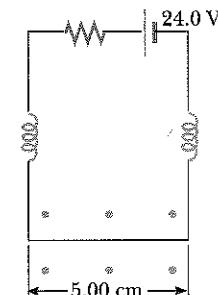
manyetik alan içerisinde $\mathbf{v} = v_i \mathbf{i}$ hızı ile hareket eden bir elektrona etkiyen kuvvet ne olacaktır?

- 58. Tarama Problemi.** Lineer kütle yoğunluğu 1 g/cm^3 olan bir tel, aralarındaki sürtünme katsayısi 0,2 olan yatay bir yüzey üzerinde durmaktadır. Telden doğruya doğru $1,5 \text{ A}$ akım geçmekte iken, kuzeye doğru yatay olarak hareket ettiğine göre, telin bu şekilde hareket etmesine olanak sağlayan en küçük manyetik alanın büyüklüğü ve yönü ne olmalıdır?

59. $q = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$ büyüklüğünde pozitif bir yük, düzgün bir manyetik alan ve düzgün bir elektrik alanın birlikte bulunduğu bölgede $\mathbf{v} = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j} - \mathbf{k}$ m/s hızla hareket etmektedir. (a) $\mathbf{B} = (2\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + \mathbf{k}) \text{ T}$ ve $\mathbf{E} = (4\mathbf{i} - \mathbf{j} - 2\mathbf{k}) \text{ V/m}$ ise hareket eden yüze etkiyen toplam kuvveti hesaplayınız. (b) Kuvvet vektörünün pozitif x ekseni ile yaptığı açı ne kadardır?

- 60.** Işık hızının yarısı bir hızla hareket eden bir kozmik ışın protonu, ekvator düzleminde dosdoğru dünyanın merkezine doğru ilerlediğine göre bu proton Dünya'ya çarpacak mı? Dünya'nın manyetik alanının ekvatorial düzlemede düzgün ve $50,0 \mu\text{T}$ olduğunu ve dünya yüzeyinden dışa doğru $1,3 \times 10^7 \text{ m/s}$ kadar yayıldığını varsayıy়iz. Bu manyetik alanda söz konusu protonun yörüngesinin eğrilik yarıçapını hesaplayınız. Göreceli etkileri ihmäl ediniz.

- 61.** Kütlesi 10 g ve uzunluğu 5 cm olan doğru bir tel, kendisiyle kapaklı bir devre oluşturan iki özdeş yayla asılıyor (Şek. P29.61). Telin ağırlığının etkisiyle yaylar $0,5 \text{ cm}$ kadar uzamaktadır. Devrenin toplam direnci 12Ω dur. Kağıt düzleminden dışa doğru bir manyetik alan uygulandığı zaman yayların $0,3 \text{ cm}$ daha uzadıkları gözleniyor. Manyetik alanın büyüklüğü ne kadardır? (Devrenin üst kısmı sabittir.)



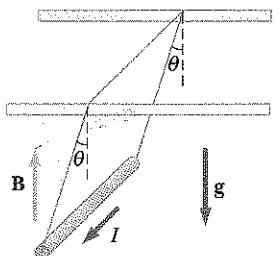
Şekil P29.61

- 62.** Bir ev-tipi elektrikli karıştırıcının (miksör) bir elektrik motoru vardır. Motoru, bir dış sürekli mıknatısın oluşturduğu bir manyetik alan bölgesinde elektrik akımı taşıyan yassi bir çemberşel kanggal olarak modelleyin. Motorun çalışmasını anlayabilmeniz için yalnız bir an düşünmeye gereksiniminiz var (motorları, Bölüm 31 de yine ele alacağız). Kesim 29.3 de betimlendiği gibi, kanggal, manyetik alan tork uygula-

dği için hareket eder. Manyetik alanın, kangala etkilenen torkun, kangaldaki akımın, kangalın yüzey alanı ve sarım sayısının 29.11 Eşitliği ile birbirlerine bağlı oluslarını dikkate alarak yaklaşık değerlerini hesaplayınız. Motora verilen giriş gücünün $P = IA$ ile tanımlanan elektrik, kullanışlı çıkış gücünün ise $P = \tau\omega$ ile verilen mekanik güç olduğuna dikkat ediniz.

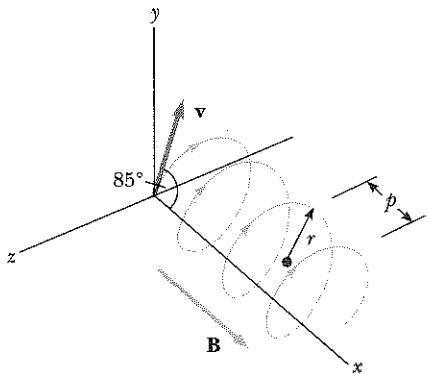
63. Birim uzunluğunun kütlesi $0,010 \text{ kg/m}$ olan bir metal çubuk, $I = 5,00 \text{ A}$ lik bir akım taşımaktadır. Çubuk, Şekil P29.63 de görüldüğü gibi düzgün bir düzey manyetik alan içerisinde iki telle asılmıştır. Denge halinde, teller düzeyeyle $\theta = 45.0^\circ$ lik bir açı yapar. Manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

64. Birim uzunluğunun kütlesi μ olan bir metal çubuk, yükü taşımaktadır. Çubuk Şekil P29.63 de gösterildiği gibi düzgün düzey bir manyetik alan içerisinde iki telle asılmıştır. Denge halinde, teller düzeyeyle θ açısı yaparsa, manyetik alanın büyüklüğünü veren bağıntıyı bulunuz.



Şekil P29.63 Problem 63 ve 64

65. Bir siklotron bazen Kesim 44.6 da ele alacağımız karbon tarihlendirmesi için de kullanılır. Karbon-14 ve Karbon-12 iyonları, tarihlendirilecek olan madde nin bir örneğinden elde edilmiş siklotronda hızlandırılırlar. Siklotronun manyetik alanının büyüklüğü $2,40 \text{ T}$ ise iki iyonun Siklotron frekansları arasındaki fark nedir?
66. $0,15 \text{ T}$ şiddetinde düzgün bir manyetik alan, pozitif x ekseni boyunca yönelmiştir. $5 \times 10^6 \text{ m/s}$ hızla hareket etmekte olan bir pozitronun x ekseni ile 85°



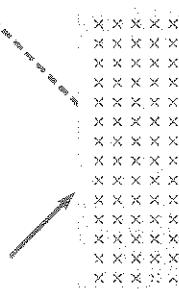
Şekil P29.66

açı yapan yönde alana girdiğini varsayılm (Şek. P29.66). Kesim 29.4 te açıklandığı gibi parçacığın hareketinin bir helis olması beklenmektedir. Yörün genin (a) $\dot{\phi}$ adımını ve (b) r yarıçapını hesaplayınız.

67. Aralarındaki Coulomb çekim kuvvetinin etkisiyle bir elektronun, bir protonun etrafında $R = 5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$ yarıçaplı değişmeyen bir yörüngede dolandığını varsayıyiz. Dolanan yükü bir akım ilmeği olarak değerlendirmek suretiyle, sistem, elektronun manyetik momentine dik olarak yönelmiş $0,400 \text{ T}$ büyülüğünde bir alanda bulunduğuunda, oluşan torku hesaplayınız.

68. Bir tek yükü olan ağır bir iyonun $1,5 \text{ ms}$ de büyülüğü $5 \times 10^{-2} \text{ T}$ olan düzgün bir manyetik alanda beş defa dolandığı gözlemeğe göre iyonun kütlesini kg cinsinden hesaplayınız (Yaklaşık).

69. Sayfa düzleminde hareket eden bir protunun kinetik enerjisi 6 MeV dir. Şekil P29.69 da gösterildiği gibi alanın doğrusal sınıriyla $\theta = 45^\circ$ açı yapacak biçimde büyülü $B = 1 \text{ T}$ olan içe doğru bir manyetik alana girerse (a) protonun alana girdiği nokta ile alandan çıkışacağı noktası arasındaki x uzaklığını bulunuz. (b) Protonun alani terk ettiği hız vektörü ile alanın sınırı arasındaki θ' açısını hesaplayınız.



Şekil P29.69

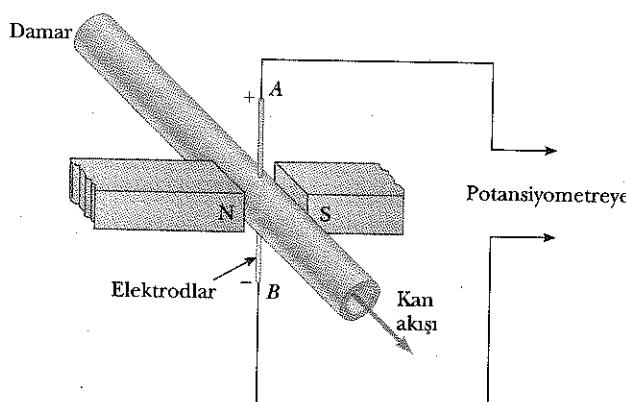
70. Tablo P29.70, manyetik alanları ölçmeye yarayan bir "prob" için, Hall gerilimi ve buna karşılık gelen manyetik alanının ölçümlerini göstermektedir. (a) Bu verilerin grafiğini çiziniz ve iki değişken arasında bir ilişki kurunuz. (b) Ölçümler $0,2 \text{ A}$ lik bir akımla

TABLO P29.70

$\Delta V_H (\mu\text{V})$	$B (\text{T})$
0	0,00
11	0,10
19	0,20
28	0,30
42	0,40
50	0,50
61	0,60
68	0,70
79	0,80
90	0,90
102	1,00

alınmışsa ve iletken, yük-taşıyıcı yoğunluğu $10^{26}/\text{m}^3$ olan bir maddeden yapılmışsa, örneğin kalınlığı ne kadardır?

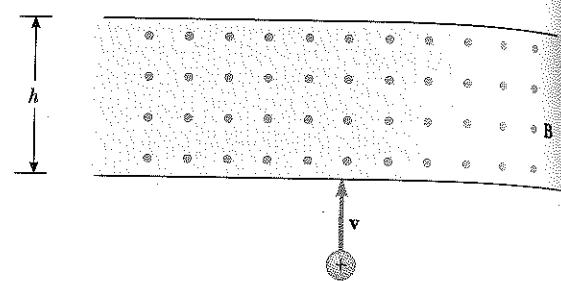
71. Bir kalp cerrahı, bir elektromenyetik akış metresi (Şekil P29.71) kullanarak bir ana damardan geçen kanın akış hızını ölçer. A ve B elektrodları iç çapı 3,00 mm olan kan damarının dış yüzeyine temas etmektedir. (a) Manyetik alanın büyüklüğü 0,040 T olduğunda elektrodlar arasında $160 \mu\text{V}$ luk bir emk oluştuğuna göre kanın süratini bulunuz. (b) Göste-



Şekil P29.71

rildiği gibi A elektrodunun pozitif olduğunu kanıtlınız. emk işaretini acaba kandaki hareketli iyonları, çoğunlukla pozitif veya negatif yüklü oluşlarına bağlı mıdır? Açıklayınız.

72. Şekil P29.72 de belirtildiği gibi kütlesi m ve yükü pozitif q olan bir parçacık başlangıçta v_0 hızı ile yukarı doğru hareket ediyor ve koordinatların başlangıcından $y = 0$ ile $y = h$ arasındaki bölgede bulunan ve sayfa düzleminden dışa doğru yönelmiş olan bir μ düzgün manyetik alanına giriyor. (a) Parçacığın $y = h$ ye ancak ulaşabildiği kritik v değeri nedir? Bu koşul altında parçacığın yörüngeğini betimleyin ve son hızını bulun. (b) Eğer v kritik değerinden azsa parçacığın yörüngeğini ve son hızını belirleyiniz. (c) Kritik değerinden büyükse, parçacığın yörüngeğini ve son hızını belirlemeye çalışın.



Şekil P29.72

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 29.1 Sıfır. Çünkü alanın yükle uyguladığı manyetik kuvvet her zaman yükün hızına diktir. Dolayısı ile manyetik alan yük üzerinde hiçbir zaman iş yapamaz: $W = \mathbf{F}_B \cdot d\mathbf{s} = (\mathbf{F}_B \cdot \mathbf{v}) dt = 0$. İş, kuvvetin hareket yönünde bir bileşeni olmasını gerektirir.
- 29.2 Etkilemez. Bir yükle bir manyetik alanın uyguladığı manyetik kuvvet, alana göre parçacığın hızı ile orantılıdır. Eğer yük durgunsu (problemdeki gibi), manyetik kuvvet yoktur.
- 29.3 (c), (b), (a), (d). Örnek 29.2'nin gösterdiği gibi, telin manyetik alana dik "etkin uzunluğu" ile ilgilenmeliyiz, bir başka deyişle, telin kesip attığı "manyetik alan gölgесinin" uzunluğu. (c) için, telin 4 m'si alana diktir. Kısa düşey parçalara hiç manyetik kuvvet etkilemez, çünkü onların akımları alana paraleldir. (b) deki tel alana peş peşe paralel ve dik kısa bir çok yatay ve düşey parçalara ayrıldığında, alana dik olan ve dolayısıyla kuvvet hissedilen yatay parçaların toplamının 3,5 m olduğunu görürüz. Sonra (a) gelir; telin 3 m'si etkin olarak alana diktir. Öte yandan (d) deki telin yalnız 2 m'si bir kuvvet hisseder. Çünkü 2 m ile 4 m arasındaki kısmı sayfa düzleminden dışa doğru bir kuvvet hissederken 4 m ile 2 m arasındaki kısmını e
- na eşit büyülükte fakat sayfa düzleminin içine doğru bir kuvvet etkir ve toplamları sıfır olur.
- 29.4 ③ kenarı daha kuvvetli bir manyetik alan bölgesinde olduğundan ① kenarından daha büyük bir kuvvet hisseder: $F_3 > F_1$. Bu nedenle bu iki kuvvetten kaynaklanan torkun yanı sıra ilmeğe aşağı doğru bir net kuvvet etkir.
- 29.5 (c), (b), (a). İlmeklerin hepsinde aynı yüzey alanını çevreledikleri ve aynı kısmı taşıdıkları için, hepsi içinde μ 'nın büyülüyü aynıdır. (c) için, μ yukarı doğru yönelmiş ve manyetik alana diktir ve $\tau = \mu B$ dir. Bu mümkün olabilen maksimum torkdur. μ ve B nin bundan sonra gelen büyük vektörel çarpımı (b) durumunda ortaya çıkar. Burada μ sağ yukarı doğru yönelmiş (Şekil 29.13 deki gibi). Son olarak (a)daki ilmeğin μ sü B yönünde yöneldiğinden tork sıfırdır.
- 29.6 Hız seçisi her üç tip parçacığında aynı sürata sahip olmalarını gerektirir. Kütelerin veya yüklerin bireysel değerlerini bulamayız, ancak parçacıkları m/q oranlarına göre sıralayabiliriz. Eşitlik 29.18, en büyük yarıçaplı çemberde hareket eden parçacığın en büyük m/q oranına sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle, en büyükten en küçüğe doğru m/q sıralaması c, b, a dir.

SİZCE NASIL?

Bu yaygın kullanılan aygıtların üçü de bilgi depolamak için manyetizmayı kullanır. Ka- set bir saatten fazla müziği depolayabilir, disket yüzlerce sayfalık bilginin eşdeğerini tutabilir ve videotype saatler alan televizyon programı kaydedilebilir. Bu aygıtlar nasıl çalışır? (George Semple)



b ö / ü m

Manyetik Alanın Kaynakları

30

Bölüm İçeriği

- 30.1 Biot-Savart Yasası
- 30.2 İki Paralel İletken Arasındaki Manyetik Kuvvet
- 30.3 Ampère Yasası
- 30.4 Bir Solenoidin Manyetik Alanı
- 30.5 Manyetik Açı
- 30.6 Manyetizmada Gauss Yasası
- 30.7 Yerdeğistirme Akımı ve Ampère Yasasının Genel Biçimi
- 30.8 (Seçmeli) Madde İçinde Manyetizma
- 30.9 (Seçmeli) Yerin Manyetik Alanı

Önceki bölümde manyetik alanda hareket eden yüklü bir parçacığa \vec{B} kiyen manyetik kuvvetlerle ilgili problemleri inceledik. Manyetik etkileşimin anlatımını tamamlamak için bu bölümde, manyetik alanın kaynağı, yani, hareketli yükler ya da elektrik akımları ele alınacaktır. Konuya, küçük bir akım elemanın uzayın bir noktasında oluşturduğu manyetik alan hesaplayabilmek için Biot ve Savart yasasının nasıl kullanıldığını göstererek başlayacağız. Sonra, bu yöntem ve üst-üste gelme ilkesini kullanarak çeşitli akım dağılımlarının oluşturduğu toplam manyetik alanı hesaplayacağız. Daha sonra, akım taşıyan iki iletken arasındaki kuvvetin nasıl bulunacağını göstereceğiz. Bu, bizi Amperin tanımına götürür. Ayrıca Ampère yasasını da tanıyalayacağız. Bu yasa kararlı akımlar taşıyan oldukça simetrik şekillerin manyetik alanlarını hesaplamak için çok kullanışlıdır.

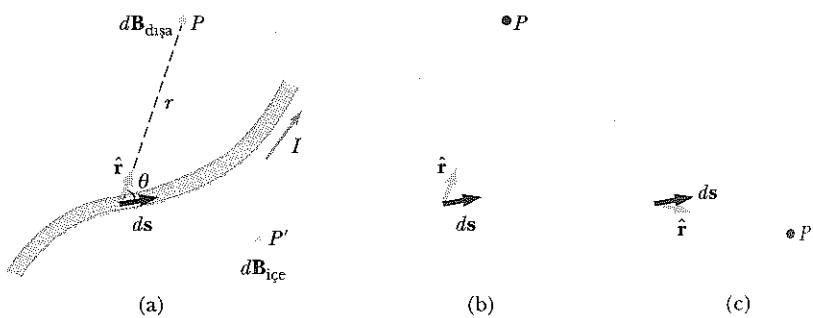
Bu bölüm, aynı zamanda, manyetik maddelerde oluşan karmaşık süreçler ile de ilgilenmektedir. Maddedeki tüm manyetik olaylar, atomik manyetik dipol momentlerle açıklanabilir. Bu atomik manyetik momentler, hem elektronların yörüngeSEL hareketlerinden, hem de *spin* denen "iç yapısal" özelliğinden kaynaklanır.

30.1 BIOT-SAVART YASASI

Oersted'in 1819'da akım taşıyan bir iletkenin bir pusula iğnesini saptardığı keşfinden kısa bir süre sonra, Jean Baptiste Biot (1774-1862) ve Felix Savart (1791-1841) bir elektrik akımının yakınındaki bir miknatısa uyguladığı kuvvetle ilgili nicel deneyler yaptılar. Biot ve Savart deneyler sonuclardan yola çıkararak uzayın bir noktasındaki manyetik alanı, bu alanı oluşturan akım cinsinden veren matematiksel bir ifade buldular. İfadede, kararlı bir I akımı taşıyan bir telin bir ds uzunluk elemanın P noktasında oluşturduğu $d\mathbf{B}$ manyetik alanı aşağıdaki deneyel gözlemlerine dayanır (Şekil 30.1):

- $d\mathbf{B}$ vektörü, hem ds (akım yönündedir) ye ve hem de P ye doğru yönelik $\hat{\mathbf{r}}$ birim vektörüne diktir.
- $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü r^2 ile ters orantılıdır. Burada r , ds nin P ye uzaklığıdır.
- $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü akıma ve ds uzunluk elemanın büyüklüğü, yani ds ile orantılıdır.
- $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü $\sin \theta$ ile orantılıdır. Burada θ , ds ve $\hat{\mathbf{r}}$ vektörleri arasındaki açıdır.

Bir elektrik akımının oluşturduğu manyetik alanın özellikleri.



Şekil 30.1 (a) Bir ds uzunluk elemanından geçen I akımının P noktasında oluşturduğu $d\mathbf{B}$ manyetik alanın Biot-Savart yasasıyla verilir. P deki manyetik alanın yönü sayfa düzleminde dışa ve P' deki ise içe doğrudur. (b) $\hat{\mathbf{r}}$, P ye doğru baktığında $ds \times \hat{\mathbf{r}}$ vektörel çarpımının yönü sayfa düzleminin dışına doğru olur. $\hat{\mathbf{r}}$, P' ye yönelikse $ds \times \hat{\mathbf{r}}$ sayfa düzleminin içine doğru olur.

Bugünlere bu gün, **Biot-Savart** yasası olarak bilinen aşağıdaki matematiksel bağlantıyla özetlenebilir:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (30.1)$$

Biot-Savart Yasası

Burada μ_0 , **serbest uzayın geçirgenliği** denen bir sabittir:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A} \quad (30.2)$$

Boş uzayın geçirgenliği

Eşitlik 30.1 deki $d\mathbf{B}$ alanının, iletkenin yalnız küçük bir $d\mathbf{s}$ uzunluk elemanın- daki akımın oluşturduğu alan olduğuna dikkat etmek son derece önemlidir. Sonlu büyüklükteki bir akımın, bir noktada oluşturduğu \mathbf{B} **toplam manyetik alanını** bulmak için, akımı oluşturan tüm Ids akım elemanlarından doğan katkıları toplamamız gereklidir. Yani, \mathbf{B}' yi Eşitlik 30.1 in integralini alarak bulmalıyız:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (30.3)$$

Burada integral akım dağılımının tamamı üzerinden alınır. Bu ifade özel bir dikkate kullanılmalıdır, çünkü integralin içinde vektörel bir nicelik bulunmaktadır. Örnek 30.1 de böyle integralli bir durumunu göreceğiz.

Biot-Savart yasası, bir akım-taşıyan tel için geliştirilmiş olmasına rağmen, bir televizyon setindeki elektron demeti gibi uzaya akan yüklerden oluşan bir akım için de geçerlidir. Bu durumda $d\mathbf{s}$, yükün aktığı uzayın küçük bir parçasının uzunluk elemanıdır.

Manyetizmanın Biot-Savart yasası ile elektrostatığın Coulomb yasası arasında ilginç benzerlikler vardır. Ids akım elemanı bir manyetik alan oluşturur buna karşılık bir q nokta yükü elektrik alan oluşturur. Ayrıca, nokta yükten kaynaklanan elektrik alanı gibi, manyetik alanın büyülüğu de akım elemanından uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değişir. Ancak, iki alanın yönleri oldukça farklıdır. Nokta yükün oluşturduğu elektrik alanı yükten çıkan doğrular boyuncadır (radyal). Fakat, bir akım elemanın oluşturduğu manyetik alan, Eşitlik 30.1 deki vektörel çarpım gereği hem $d\mathbf{s}$ akım elemanına ve hem de $\hat{\mathbf{r}}$ birim vektörüne diktir. Bu yüzden, iletken kağıt düzleminde bulunuyorsa, Sekil 30.1 de olduğu gibi, $d\mathbf{B}$, P noktasında kağıt düzleminden dışa ve P' de içe doğru yönelmektedir.

Elektrik ve manyetik alanlar arasındaki bir başka farklılık alanın kaynağı ile ilgilidir. Elektrik alanı, yalıtılmış bir elektrik yükü tarafından oluşturulur. Biot-Savart yasası yalıtılmış bir akım elemanın bir noktada oluşturduğu manyetik alanı verir, fakat böyle bir yalıtılmış akım elemanı, bir yalıtılmış yükün bulunabildiği şekilde bulunamaz. Bir akım elemanı, sürekli bir akım dağılımının bir parçası olmak **zorundadır**. Çünkü yüklerin akması için devremiz tam olmalıdır. Bu nedenle Biot-Savart yasası, bir manyetik alanı hesaplarken yalnız ilk adımdır. Bundan sonra akım dağılımı üzerinden integral almak gereklidir.

Aşağıdaki Örneklerde **hesaplanan manyetik alanın akım-taşıyan bir iletkenin oluşturduğu alan** olduğuna dikkat etmemiz önemlidir. Bunun, iletkenin yakınına konan, bir çubuk mıknatıs gibi diğer kaynakların iletken civarında oluşturduğu ek manyetik alanlarla karıştırılmaması gereklidir.

ÖRNEK 30.1 İnce Doğrusal Bir İletkeni Çevreleyen Manyetik Alan

Şekil 30.2 de olduğu gibi x ekseni boyunca yerleştirilen ve sabit bir I akımı taşıyan ince doğrusal bir tel veriliyor. Bu akımın P noktasında oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

Çözüm Biot-Savart yasası gereği, alanın büyüklüğünün teldeki akımla doğru orantılı olmasını ve telden P noktasına alan a uzaklığa arttıkça azalmasını bekleriz. İşe, tel üzerinde, P noktasından r uzaklıktaki bir ds uzunluk elemanı alarak başlayız. Bu elemandaki akımın P noktasında oluşturduğu manyetik alanın yönü, sayfa düzleminde dışa doğrudur. Çünkü $ds \times \hat{r}$ dışa doğrudur. Gerçekte, akım elemanlarının hepsi sayfa düzleminin içinde oldukları için P noktasında oluşturdukları alanlar sayfa düzleminden dışa doğrudur. Böylece, P noktasındaki toplam manyetik alanın yönü kağıt düzleminden dışa doğrudur ve geriye manyetik alanın büyüklüğünü hesaplamak kalır.

Başlangıcı O 'da ve P 'yi pozitif y ekseni üzerinde alarak, \mathbf{k} kağıt düzleminden dışa doğru olan bir birim vektör olmak koşuluyla,

$$ds \times \hat{r} = \mathbf{k} |ds \times \hat{r}| = \mathbf{k} (dx \sin \theta)$$

olduğunu Bölüm 3'ten biliriz. Burada, $|ds \times \hat{r}|$, $ds \times \hat{r}$ nin büyüklüğünü temsil eder. \hat{r} bir birim vektör olduğundan, vektörel çarpının birimi ds nin biriminin aynı, yani uzunluktur. İfade Eşitlik 30.1 de yerine konursa

$$d\mathbf{B} = (dB) \mathbf{k} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dx \sin \theta}{r^2} \mathbf{k}$$

elde edilir. Tüm akım elemanlarının manyetik alanları \mathbf{k} yönünde olduklarından, bir akım elemanından kaynaklanan alanın büyüklüğüne, yani

$$(1) \quad dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(dx \sin \theta)}{r^2}$$

bağıntısına bakalım. Bu ifadenin integralini almak için, θ , x ve r değişkenlerini birbirine bağlamalıyız. Yaklaşımardan biri x ve r 'yi θ cinsinden ifade etmektir. Şekil 30.2a daki geometriden

$$(2) \quad r = \frac{a}{\sin \theta} = a \csc \theta$$

bulunur. Şekil 30.2a daki dik üçgenden $\tan \theta = a/(-x)$ olduğunu, (ds , x in negatif olduğu yerde seçildiği için negatif işaretli) gerekli oldu,

$$x = -a \cot \theta$$

elde edilir. Bu ifadenin türevi alınarak,

$$(3) \quad dx = a \csc^2 \theta d\theta$$

(2) ve (3), (1) de yerlerine konulursa,

$$(4) \quad dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a \csc^2 \theta \sin \theta d\theta}{a^2 \csc^2 \theta} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin \theta d\theta$$

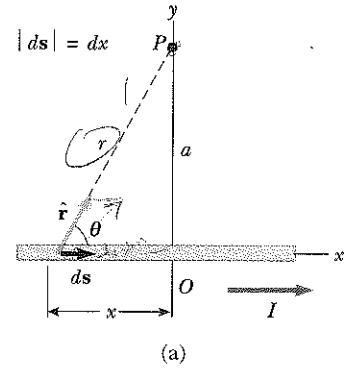
olar. Böylece, ifadeyi yalnız θ değişkenini içeren bir biçimde indirdik. Şimdi, Şekil 30.2b de tanımladığı gibi θ_1 den θ_2 ye kadar olan açıları gören tüm elemanlar üzerinde (4)'ün integralini alarak P deki toplam alanı elde edebiliriz: Bu işlem

$$B = \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi a} \right] \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (30.4)$$

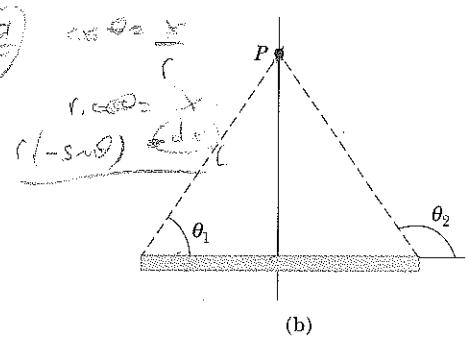
sonucuna götürür. Geometriyi ve dolayısı ile θ_1 ve θ_2 açılarını bilsek, bu sonucu, herhangi bir doğrusal telin manyetik alanını bulmak amacıyla kullanabiliriz. Özellikle, sonsuz uzunlukta doğru tel alalım. Bu durumda, Şekil 30.2b'den görülebileceği gibi $x = -\infty$ dan $x = +\infty$ a kadar olan uzunluk elemanları için $\theta_1 = 0^\circ$ ve $\theta_2 = \pi$ olur. $(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = (\cos 0 - \cos \pi) = 2$ olduğundan Eşitlik 30.6,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (30.5)$$

birimine indirgenir.



(a)



(b)

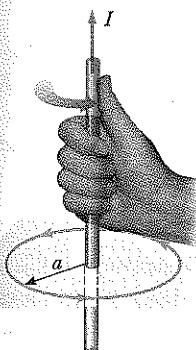
Şekil 30.2 (a) I akımı taşıyan ince doğrusal bir tel. Her bir ds elemanın P de oluşturduğu alan kâğıt düzleminden dışa doğrudur ve bu nedenle net manyetik alan da kâğıt düzleminden dışa doğrudur. (b) θ_1 ve θ_2 bu geometri için sınırlayıcı açılardır. Tel sonsuz uzunlukta olduğundan $\theta_1 = 0$ ve $\theta_2 = 180^\circ$ olur.

Eşitlik 30.4 ve Eşitlik 30.5'in her ikisin de beklenildiği gibi manyetik alanın büyüklüğünün akımla doğru orantılı ve telden uzaklık arttıkça azaldığını göstermektedir. Eşitlik 30.5'in bir uzun yüklü doğru telden kaynalandan elektrik alanının büyüklüğünü veren ifadeyle aynı matematiksel biçimde sahip olduğuna dikkat ediniz (Eşitlik 24.7'ye bakınız).

Aliştırma 5A akım taşıyan bir sonsuz uzunlukta doğrusal telin, kendisinden 4 cm uzaklıkta oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü hesaplayınız.

Cevap $2,5 \times 10^{-5}$ T.

Örnek 30.1'in sonucu önemli, çünkü uzun, doğrusal bir tel biçimindeki akımla çok sık karşılaşır. Şekil 30.3 uzun, doğru akım taşıyan telin etrafında oluşturduğu manyetik alanın onu sardığını gösteren üç-boyutlu bir görselidir. Telin simetrisi gereği manyetik alan çizgileri, telle aynı ekseni çemberler olup tele dik olan düzlemlerde bulunurlar. B 'nin büyütüğü yarıçapı a olan herhangi bir çember üzerindeki her noktada aynıdır ve Eşitlik 30.5 ile verilir. B 'nin yönünü bulmak için kolay bir kural, başparmak akımın yönünü göstererek biçimde sağ-el ile teli kavramaktır. Diğer dört parmak manyetik alanın yönünü gösterir.



Şekil 30.3 Akım taşıyan uzun ve doğrusal bir telin oluşturduğu manyetik alanın yönünü belirlemeye yaranan sağ-el kuralı. Manyetik alan çizgilerinin telin etrafında çemberler oluşturduklarına dikkat ediniz.

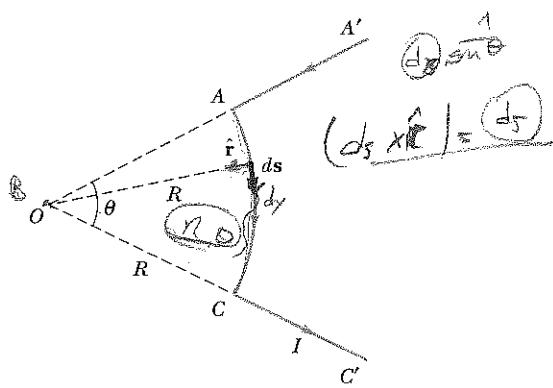
ÖRNEK 30.2 Kavisli Bir Tel Parçasından Kaynaklanan Manyetik Alan

Şekil 30.4'de gösterilen akım taşıyan tel parçası için O noktasındaki manyetik alanı hesaplayınız. Tel, iki doğru parça ve bir θ açısını gören R yarıçaplı çembersel bir yaydan oluşmuş. Tel üzerindeki ok uçları akımın yönünü gösteriyor.

Çözüm AA' ve CC' doğru parçalarındaki akımların O da oluşturdukları manyetik alan sıfırdır. Çünkü bu yollar boyunca $ds \times \hat{r}$ ye paraleldir; bu demektir ki $ds \times \hat{r} = 0$. AC yolu boyunca her ds uzunluk elmanı, O dan aynı R uzaklığındadır ve her birindeki akım O da kağıt düzleminin içine doğru yönelmiş bir $d\mathbf{B}$ alan elemanı kadar katkıda bulunur. Ayrıca, AC üzerindeki her noktada $ds \times \hat{r}$ ye dikdir, bu nedenle $|ds \times \hat{r}| = ds$ dir. Eşitlik 30.1'i ve bu bilgiyi kullanarak, ds uzunluklu bir elemendeki akımdan kaynaklanan O daki alanın büyüklüğünü bulabiliriz:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{R^2}$$

$$\int_{O \text{ daki}} \int_{\text{eleman}} \int_{\text{yay}} \int_{\text{çember}} \int_{\text{çember}} \int_{\text{çember}} \int_{\text{çember}} \int_{\text{çember}}$$



Şekil 30.4 Kavisli AC parçasındaki akımın O da oluşturduğu manyetik alan sayfanın içine doğrudur. Doğrusal parçalardaki akımların O daki alana katkıları sıfırdır.

İye R sabit oldukları için, bu ifadenin integralini AC kavisli yolu boyunca kolayca alabiliriz:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \oint ds = \frac{\mu_0 L}{4\pi R^2} s = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \theta \quad (30.6)$$

Burada θ radyan cinsinden ölçmek kaydıyla $s = R\theta$ gerçegini kullandık. \mathbf{B} nin yönü O da sayfanın içine doğrudur,

MAT 5
 $\theta = 2\pi$
 $4\pi R^2$

cünkü her bir uzunluk elemanı için $ds \times \hat{\mathbf{r}}$ sayfanın içine doğru yönelmiştir.

Aliştırma Yarıçapı R olan bir çemberSEL tel ilmek I akımı taşımaktadır. Merkezindeki manyetik alanın büyüklüğü nedir?

Cevap $\mu_0 I / 2R$

ÖRNEK 30.3 ÇemberSEL Bir Akım İlmeğinin Eksenİ Üzerindeki Manyetik Alan

Şekil 30.5 de görüldüğü gibi, kararlı bir I akımı taşıyan ve yz düzleminde bulunan R yarıçaplı çemberSEL bir tel ilmek veriliyor. Bu ilmeğin, ekseni üzerinde merkezinden bir x uzaklıktı bulunan bir P noktasındaki manyetik alanı hesaplayınız.

Çözüm Bu durumda, çember üzerindeki her ds uzunluk elemanın, bulunduğu yerde $\hat{\mathbf{r}}$ ye dik olduklarına dikkat ediniz. Bu nedenle, herhangi bir eleman için $|ds \times \hat{\mathbf{r}}| = (ds) \sin 90^\circ = ds$ dir. Ayrıca, ilmeğin çevresindeki uzunluk elemanlarının hepsi P den aynı r uzaklıktadır. Burada $r^2 = x^2 + R^2$ dir. Öyleyse herhangi bir ds elemanında akım dan kaynaklanan $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{|ds \times \hat{\mathbf{r}}|}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + R^2)}$$

ile verilir. Şekil 30.5 de gösterildiği gibi, $d\mathbf{B}$ alanının yönü, $\hat{\mathbf{r}}$ ve ds nin oluşturduğu düzleme dikdir. $d\mathbf{B}$ vektörü, x ekseni boyunca bir dB_x ve x ekseneN DİK bir dB_y bileşenine ayrılabılır. Tüm ilmek için x e dik bileşenler toplandığı zaman toplamlarının sıfır olduğu görülür. Bir başka deyişle, simetriden ötürü, ilmeğin herhangi bir tarafındaki bir eleman, çapsal olarak tam karşısındaki bir başka elemanın oluşturduğu $d\mathbf{B}$ alanının dik bileşenini dengelererek yok edebilen bir dik bileşen oluşturacaktır. Bu nedenle, P deki bileşke alan x ekseni boyunca olmalı ve $dB_x = dB \cos \theta$ bileşenlerinin integralini alarak bulabiliR. Yani, $\mathbf{B} = B_x \hat{\mathbf{x}}$ olup, burada B_x

$$B_x = \oint dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{ds \cos \theta}{x^2 + R^2}$$

bİçiminde verilir ve integrali ilmeğin tamamı üzerinde alınmayaN. θ , x ve R ilmeğin tüm elemanları için sabittirler ve $\cos \theta = R / (x^2 + R^2)^{1/2}$ olduğundan

$$B_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} \oint ds = \frac{\mu_0 IR^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (30.7)$$

buluruz. Burada $\oint ds = 2\pi R$ (ilmeğin çevresi) olması gerekiN gerçegi kullanıldı.

İlmeğin merkezindeki manyetik alanı bulmak için, Eşitlik 30.7 de $x = 0$ alırız. Böylece, bu özel nokta için,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (x = 0 \text{ da}) \quad (30.8)$$

elde edilir.

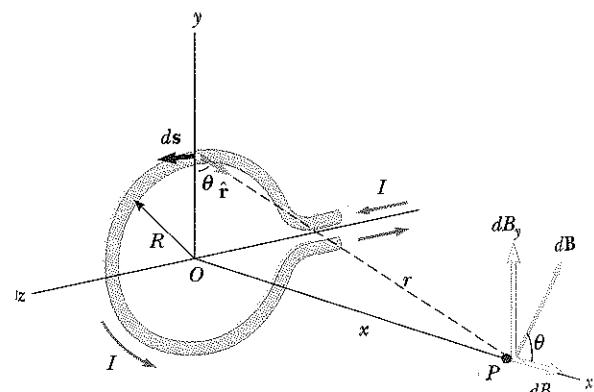
Bu sonuç Örnek 30.2'nin ki ile uyusur. Manyetik alanın davranışını, ilmekten çok uzaklarda yani, x 'in R 'ye göre çok büyük olduğu zaman belirlemek de ilginçtir. Bu durumda, Eşitlik 30.7 nin paydasındaki R^2 terimini ihmal ederek

$$B \approx \frac{\mu_0 IR^2}{2x^3} \quad (x \gg R \text{ için}) \quad (30.9)$$

elde edebiliriz. İlmeğin manyetik dipol momenti μ nün büyülüklüğü, ilmekten geçen akımla ilmek yüzeyinin çarpımı, çemberSEL ilmeğimiz için $\mu = I(\pi R^2)$ olduğundan, Eşitlik 30.9, aşağıdaki biçimde yazılabılır:

$$B \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\mu}{x^3} \quad (30.10)$$

Bu sonuç bİçimsel olarak, bir elektrik dipolünün uzaklarda oluşturduğu elektrik alan ifadesine yani $E = k_e(2qa)/r^3$ e benzemektedir. (Örnek 23.6 ya

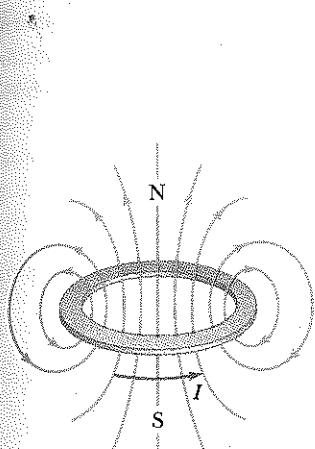


Şekil 30.5 Bir akım ilmeğinin ekseni üzerinde bulunan bir P noktasındaki manyetik alanı hesaplamaya yarayan şeKL. Simetriden ötürü, toplam \mathbf{B} manyetik alanı bu eksen boyuncadır.

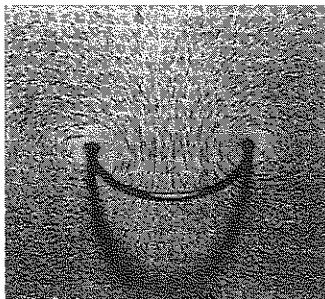
bakınız), Eşitlik 26.16 da tanımladığı gibi, burada $2qa = p$ elektrik dipol momentidir.

Çembersel bir ilmeğinin manyetik alan çizgilerinin deseni Şekil 30.6a'da gösterilmektedir. Açıklık bakımından,

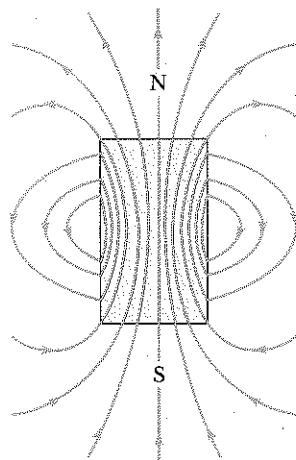
çizgiler, yalnız ilmek eksenini içine alan bir tek düzlemede gösterilmiştir. Aslında alan deseni eksenel olarak simetrikdir ve Şekil 30.6c de gösterildiği gibi bir çubuk mıknatısının etrafındaki desene benzer.



(a)



(b)



(c)

Şekil 30.6 (a) Bir akım ilmeğini saran manyetik alan çizgileri. (b) Bir akım ilmeğini saran manyetik alan çizgilerinin demir tozları ile görülebilir hale getirilmiş (Eğitim Geliştirme Merkezi, Newton, MA). (c) Bir çubuk mıknatısı saran manyetik alan çizgileri. Bu çizgi desenin bir akım ilmeğinin kine ne kadar benzettiğine dikkat ediniz.

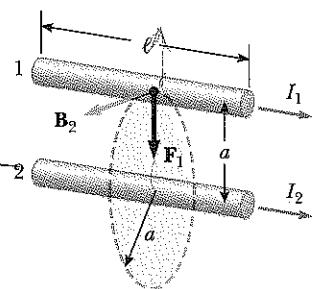
30.2 İKİ PARALEL İLETKEN ARASINDAKI MANYETİK KUVVET

Bölüm 29 da, akım-taşıyan bir iletken bir dış manyetik alan içerisine konulduğunda üzerine etkiyen manyetik kuvveti tanıttık. Bir iletkenden geçen akım, kendi manyetik alanını oluşturduğu için, akım taşıyan iki iletkenin birbirleri üzerine manyetik kuvvet etkisi ettiğeklerini anlamak hiçe zor değildir. Göreceğiz ki bu kuvvetler, "amper" ve "coulomb" kavramlarının tanımında temel olarak kullanılabilir.

Şekil 30.7 deki gibi aynı yönde I_1 ve I_2 akımları taşıyan ve aralarındaki uzaklık a olan iki uzun, doğrusal ve paralel tel alalım. Tellerden biri üzerine, ötekinin oluşturduğu alandan ötürü etkiyen manyetik kuvveti kolayca bulabiliyoruz. I_2 akımını taşıyan tel-2, tel-1'in bulunduğu konumda bir \mathbf{B}_2 alanı oluşturur. Şekil 30.7 de gösterildiği gibi \mathbf{B}_2 'nin yönü tel-1'e dikdir. Eşitlik 29.5'e göre tel-1'in ℓ uzunluğuna etkiyen manyetik kuvvet $\mathbf{F}_1 = I_1 \ell \times \mathbf{B}_2$ dir. ℓ , \mathbf{B}_2 'ye dik olduğundan \mathbf{F}_1 'nin büyüklüğü $F_1 = I_1 \ell B_2$ olur. \mathbf{B}_2 nin büyüklüğü Eşitlik 30.5 ile verildiği için,

$$F_1 = I_1 \ell B_2 = I_1 \ell \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \ell \quad (30.11)$$

olduğunu görürüz. $\ell \times \mathbf{B}_2$ aşağı yönde olduğundan, \mathbf{F}_1 'in yönü aşağı tel-2'ye doğrudur. Eğer tel-2'nin bulunduğu yerde tel-1'in oluşturduğu alan hesaplanırsa, tel-2'ye etkiyen \mathbf{F}_2 kuvvetinin büyüklük F_2 e eşit fakat ters yönde oldu-



Şekil 30.7 Kararlı akım taşıyan iki paralel tel, birbirlerine bir kuvvet etkisi ettiğirler. 2. teldeki akımından kaynaklanan \mathbf{B}_2 alanı, 1. tele büyükligi $F_1 = I_1 \ell B_2$ ile verilen bir kuvvet uygular. Akımlar, şekilde gösterildiği gibi aynı yönlü iseler kuvvet çekici, ters yönlü iseler iticidir.

ğu görülür. Bu zaten beklenen bir olaydır, çünkü Newton'un üçüncü yasası olan etki-tepki ilkesine uyulmalıdır.¹ Öte yandan akımlar zit yönlerde oluklarında (yani, Şekil 30.7 deki akımlardan birinin yönü ters çevrilirse), kuvvetlerin yönleri tersine döner ve bu yüzden teller birbirlerini iteler. Böylece, **zit yönde akım taşıyan paralel tellerin birbirlerini çekiklerini, buna karşın zit yönlerde akım taşıyan paralel tellerin ise birbirlerini ittiklerini** görürüz.

Her iki tele de etkiyen kuvvetlerin büyüklükleri aynı olduğundan, teller arasındaki manyetik kuvvetin büyüklüğünü F_B ile gösterebiliriz. Bu büyüklüğü, telin birim uzunluğuna etkiyen kuvvet cinsinden de yazabiliriz:

$$\frac{F_B}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (30.12)$$

İki paralel tel arasındaki kuvvet, **amper'i** aşağıdaki gibi tanımlamada kullanılır:

Aralarındaki uzaklık 1 m olan iki uzun, paralel telin taşıdıkları akımlar özesde olduğunda, birim uzunluklarına etkiyen kuvvetin büyüklüğü $2 \times 10^{-7}\text{ N/m}$ ise, tellerden geçen akımlar birer ampèr (1 A) dir.

WICB
Daha fazla bilgi için,
<http://physics.nist.gov/cuu/Units/ampere.html> sitesine giriniz.

$2 \times 10^{-7}\text{ N/m}$ sayısal değeri, $I_1 = I_2 = 1\text{ A}$ ve $a = 1\text{ m}$ alarak Eşitlik 30.12 den elde edilir. Bu tanım bir kuvvette dayandığından, amper'i standard hale getirmek için mekaniksel bir ölçüm kullanılabilir. Örneğin, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü, birincil akım ölçümleri için *akım terazisi* denen bir aygit kullanır. Bu sonuçlar, daha sonra ampermetre gibi daha alışlagelmiş diğer aygıtları standara uydurmada kullanılır.

SI deki yük birimi olan **coulomb**, şimdi ampèr cinsinden şu şekilde tanımlanabilir:

Bir iletken $1\text{A}'lik$ kararlı bir akım taşımakta ise, iletkenin bir kesitinden $1\text{s}'de$ geçen yük miktarı 1 C 'dur.

Eşitlik 30.11 ile Eşitlik 30.12'nin türetilmesinde, tellerin aralarındaki uzaklığa göre uzunlukları büyük alınmıştır. Gerçekte telin birinin uzun olması yetlidir. Eşitlikler, uzun bir telle sadece ℓ uzunlığundaki tel arasındaki kuvveti tanımlar.

Sınamalı Sorusu 30.1

Şekil 30.7 de $I_1 = 2\text{A}$, $I_2 = 6\text{A}$ ise (a) $F_1 = 3F_2$, (b) $F_1 = F_2/3$ veya (c) $F_1 = F_2$ şıklarından hangisi doğrudur?

Sınamalı Sorusu 30.2

Bir gevşek spiral yay, tavana asıldıktan sonra içerisinde büyük bir akım geçirilirse sarımlar birbirlerine yaklaşırlar mı yoksa uzaklaşırlar mı?

¹ Tel-1'e etkiyen toplam kuvvet, tel-2'ye etkiyen toplam kuvvete eşit ve zit olmakla birlikte, tellerin birbirlerine tam zit olmayan iki küçük elemanı düşünüldüğünde, Newton'un üçüncü yasası geçerli değildir. Newton'un üçüncü yasasına ve momentumun korunumuna uymayan bu durum elektrik ve manyetizma ile ilgili daha ileri düzeydeki incelemelerde açıklanmaktadır.

30.3 AMPÈRE YASASI

Oersted'in sapan pusula iğnesi hakkında 1819 daki keşfi, akım taşıyan bir teli bir manyetik alan oluşturduğunu apaçık gösterir. Bu deneyde, bir çok pusula iğnesi Şekil 30.8a'daki gibi uzun düşey bir tele yakınıca yatay bir düzleme konur. Telde hiçbir akım olmadığı zaman, ilmekteki tüm pusulalar aynı yönde (yerin alanı yönünde) yönelirler. Bu doğal olarak beklenen bir olsudur. Ancak, telden kuvvetli kararlı bir akım geçerse, Şekil 30.8b'de görüldüğü gibi, tüm pusula iğneleri çemberde teget olacak yönde saparlar. Bu gözlemler, akımın oluşturduğu \mathbf{B} nin yönünün Şekil 30.3'de tanıtılan sağ-el kuralı ile uyumlu olduğunu gösterir. Akımın yönü tersine çevrilirse, Şekil 30.8b'deki pusula iğneleri de tersine dönerler.

Pusula iğneleri \mathbf{B} nin yönünde yöneldiklerinden, önceki kesimde tartıştığımız gibi, \mathbf{B} nin alan çizgilerinin teli eksen kabul eden çemberler oluşturdukları sonucuna ulaşırız. Simetriden ötürü, \mathbf{B} nin büyülüğu, tele dik olan bir düzlem içinde kalan ve merkezi tel üzerinde olan çembersel bir yol üzerindeki yerde aynıdır. Akımı ve telden olan a uzaklığını değiştirerek, Eşitlik 30.5'in betimlediği gibi, \mathbf{B} nin akımla doğru ve telden uzaklığa ters orantılı olduğunu kanıtlanabilir.

Şimdi, $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ çarpımını hesaplayıp bu çarpımların, pusula iğnelerinin tanımladığı çembersel yolun üzerindeki $d\mathbf{s}$ uzunluk elemanları için çembersel kapalı yol üzerinden toplamını alalım. Bu yol boyunca $d\mathbf{s}$ ve \mathbf{B} vektörleri birbirine paraleldir (Şek. 30.8b), bu yüzden $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B ds$ dir. Ayrıca, bu çember üzerinde \mathbf{B} 'nin büyülüği sabit olup Eşitlik 30.5 ile verilir. Bu nedenle, kapalı yol boyunca $B ds$ çarpımlarının toplamı, ki bu toplam $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin çizgi integraline eşdeğer olup

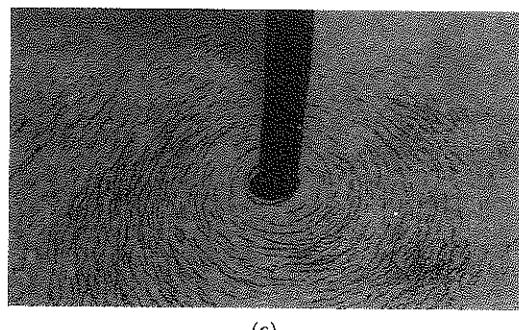
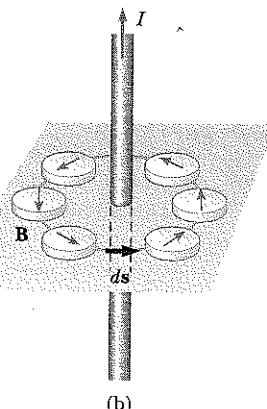
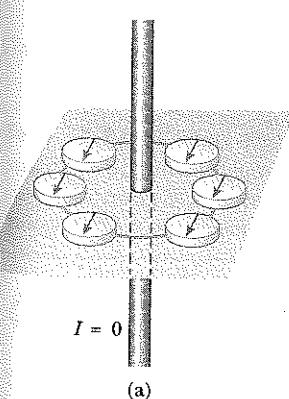
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \oint d\mathbf{s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r) = \mu_0 I$$

bağıntısı ile verilir. Burada $\oint d\mathbf{s} = 2\pi r$ çemberin çevresidir. Bu sonuç, bir teli çevreleyen özel bir çembersel yol durumu için elde edilmiş olmasına rağmen,



André-Marie Ampère

(1775-1836) Elektrik akımları ile manyetik alanlar arasındaki ilişkiyi (elektromanyetizmayı) keşfeden ve bundan ötürü elektrik akımının birimine adı verilerek ödüllendirilen bir Fransızdır. Ampère'nin yeteneği, özellikle matematiğte, 12 yaşına doğru ortaya çıktı. Ancak, özel hayatı trajedilerle doludur. Zengin bir şehir memuru olan babası Fransız ihtilali sırasında öldürüldü ve karısı 1803 de genç yaşta öldü. Hayatılarındaki yorumu, mezar taşı için seçtiği şu yazısından açıkça anlaşılmaktadır: *Tandem Felix* (Nihayet mutlu). (AIP Emilio Segre Görünüm Arşivinden)



Şekil 30.8 (a) Düşey telde akım olmadığı zaman, tüm pusula iğneleri aynı yönde yönelirler (Dünya'nın kuzey kutubuna doğru). (b) telden kuvvetli bir akım geçtiğinde, pusula iğneleri çemberde teget olan yönde saparlar. Bu yön, akımın oluşturduğu manyetik alanın yönündür. (c) Akım taşıyan bir iletkeni saran çembersel manyetik alan çizgilerinin demir tozları ile görüntülenmesi. (Henry Leap ve Jim Lehman'in izniyle)

zamanla değişmeyen (kararlı) *bir akımı* çevreleyen *keyfi bıçıklı* bir kapalı yol için de geçerlidir. **Ampère Yasası** olarak bilinen genel durum şöyle söylenebilir:

Herhangi bir kapalı yol çevresinde $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ 'nin çizgi integrali $\mu_0 I$ 'ya eşittir. Burada I kapalı yolu çevrelediği herhangi bir yüzeyden geçen toplam sürekli akımdır.

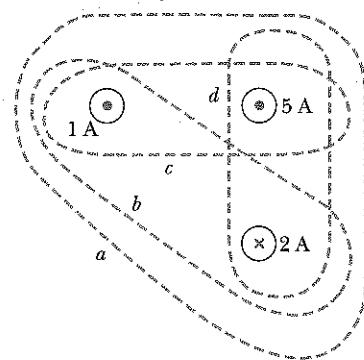
Ampère Yasası

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \quad (30.13)$$

Ampère yasası tüm sabit akım şekillenimlerinin oluşturduğu manyetik alanları betimler, ancak matematik seviyemiz yalnız oldukça yüksek simetriye sahip alan akım şekillerinin manyetik alanlarını hesaplamamıza uygundur. Kullanılışı, oldukça simetrik olan yük dağılımlarının oluşturduğu elektrik alanlarının hesaplanışındaki Gauss Yasasına benzer.

Sinama Sorusu 30.3

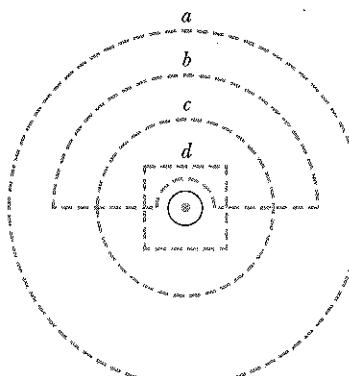
Şekil 30.9 daki kapalı yollar için $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ lerin büyüklüklerini en küçükten en büyüğe doğru sıralayınız.



Şekil 30.9 Akım taşıyan üç telin etrafındaki dört kapalı yol.

Sinama Sorusu 30.4

Şekil 30.10 daki kapalı yollar için $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ lerin büyüklükleri en küçükten en büyüğe doğru sıralayınız.



Şekil 30.10 Akım taşıyan bir tek tele yakını olan bir çok kapalı yol.

ÖRNEK 30.4 Uzun Bir Akım-Taşıyan Telin B Alanı

Kesitinin her tarafına düzgün dağılmış kararlı bir I_0 akımı taşıyan R yarıçaplı uzun ve doğrusal bir tel veriliyor (Şekil 30.11). $r \geq R$ ve $r < R$ bölgelerinde telin merkezinden r uzaklığındaki noktalarda manyetik alanı hesaplayınız.

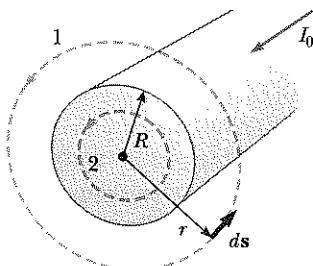
Cözüm $r \geq R$ durumunda; Örnek 30.1 de elde ettiğimiz sonucu bulmamız gerekmektedir. Orada aynı duruma Biot-Savart yasası uygulanmıştır. Şekil 30.11 de integral yolu olarak 1 nolu çemberi seçelim. Simetriden ötürü, bu yolu üzerindeki her noktada \mathbf{B} nin büyüklüğü sabit ve yönü ise ds ye paralel olmalıdır. 1 nolu yolu çevreleyen yüzeyden geçen toplam akım I_0 olduğu için, Ampère yasası,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 I_0$$

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \quad (r \geq R \text{ için}) \quad (30.14)$$

sonucu verir. Bu bağıntı, biçim olarak Eşitlik 30.5 e özdeşdir. Ampère yasasının kullanılışının Biot-Savart yasasının kullanılışından ne kadar kolay olduğuna dikkat ediniz. Olukça simetrik durumlarda her zaman bu böyledir.

Şimdi telin içindeki $r < R$ olan bölgeyi, yani, 2 nolu bölgeyi gözönüne alalım. Bu durumda, 2 nolu yolu çevreleyen I akımının I_0 dan az olduğuna dikkat ediniz. Akımın telin kesit alanının her tarafına düzgün olarak dağıldığı



Şekil 30.11 Kesitine düzgün dağılmış kararlı bir I_0 akımı taşıyan R yarıçaplı uzun, doğrusal bir tel. Herhangi bir noktadaki manyetik alan, tel ile aynı eksenli yarıçaplı çembersel bir yol kullanarak Ampère yasasından hesaplanabilir.

ÖRNEK 30.5 Bir Toroidin Oluşturduğu Manyetik Alan

Toroid denilen bir aygıt (Şekil 30.13) kapalı bir bölgede hemen hemen düzgün bir manyetik alan oluşturmak için kullanılır. Bir toroid, iletken olmayan bir maddeden yapılmış sınırlı biçimli yuvarlak, içi boş bir halkanın etrafına düzgün-

varsayıldığı için, 2 nolu yolu çevreleyen akımın toplam akıma oranı, 2 nolu yolu çevreleyen πr^2 alanının telin kesit alanına (πR^2 ye) oranına eşit olması gereklidir.² Yani,

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\pi r^2}{\pi R^2}$$

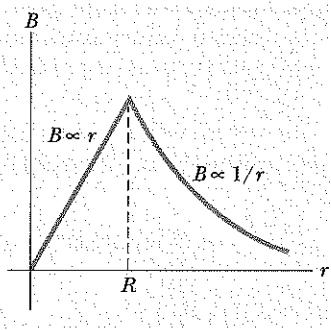
$$I = \frac{r^2}{R^2} I_0$$

1 nolu yol için izlenen sürecin aynısı burada da geçerli olduğu için Ampère yasasını 2 nolu yola da uygulayabiliriz:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B(2\pi r) = \mu_0 I = \mu_0 \left(\frac{r^2}{R^2} I_0 \right)$$

$$B = \left(\frac{\mu_0 I_0}{2\pi R^2} \right) r \quad (r < R \text{ için}) \quad (30.15)$$

Bu sonuç, biçimsel olarak düzgün yüklü bir kürenin içindeki elektrik alan ifadesine benzemektedir (Örnek 24.5). Bu örnekteki şekil için manyetik alanın r ile değişimi Şekil 30.12'de verilmektedir. Telin içinde $r \rightarrow 0$ olurken $\mathbf{B} \rightarrow 0$ olduğuna dikkat ediniz. Eşitlik 30.14 ve Eşitlik 30.15 eşitliklerinin $r = R$ de manyetik alanın aynı değerini verdiklerine dikkat ediniz. Bu demektir ki manyetik alan telin yüzeyinde sürekli dir.

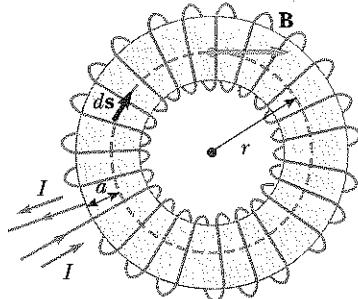


Şekil 30.12 Şekil 30.11'deki tel için manyetik alanın büyüklüğünün r ile değişimi. Alan, telin içinde r ile orantılı, dışında ise $1/r$ ile değişir.

ce sarılmış N tane iletken sarımdan oluşur. Sarımların yan yana sıkıca yerleştirildiklerini varsayıarak, merkezden r uzaklıktaki halkanın içindeki manyetik alanı hesaplayınız.

²Bu probleme bakmanın bir başka yolu, 2 nolu yolu çevreleyen akımın, $J = I_0/\pi R^2$ bağıntısı ile verilen akım yoğunluğu ile 2 nolu yolu içindeki πr^2 alanının çarpımına eşit olduğunu görmektir.

Çözüm Toroidin içindeki alanı hesaplamak için Şekil 30.13 deki r yarıçaplı çemberin üzerinde $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin integralini alırız. Simetriden ötürü, bu yolu üzerinde \mathbf{B} nin büyüklüğünün sabit ve yola teget olduğunu görürüz. Bu nedenle $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B ds$ dir. Ayrıca, kapalı çembersel yolu çevre-



Şekil 30.13 Eğer sarımlar sıkışık bir biçimde sarılmışsa, toroidsel kanganın içindeki (altın renkli bölge) alan kesik çizgili çembere teget olup $1/r$ ile orantılı değişir ve dışındaki alan ise sıfırdır. a simit'in kesit alanının yarıçapıdır.

lediği bölgeden her biri I akımı taşıyan N -tanı kapalı tel mek geçmektedir. Bu nedenle, Eşitlik 30.13 ün sağ tarafı $\mu_0 NI$ dir. Ampère yasasının bu çembere uygulandığında

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

(30.16)

olur. Bu sonuç, B nin $1/r$ ile orantılı olarak değiştğini, de laysı ile toroid içinde düzgün olmadığını göstermektedir. Ancak, r toroidin kesit alanının yarıçapından çok büyük olursa, toroidin içindeki alan yaklaşık olarak düzgün olacaktır. Ayrıca, sarımları yanına sıkıca sarılmış ideal bir toroidin dışında alan sıfırdır. Bu durum, torodi dıştan çevreleyen herhangi bir kapalı yoluñ içinden geçen net akımın sıfır olduğuna dikkat edilerek görülebilir. Böylece, Ampère yasasından toroidin dışındaki bölgelerde $\mathbf{B} = 0$ olduğu bulunur.

ÖRNEK 30.6

Sonsuz bir Akım Levhasının Oluşturduğu Manyetik Alan

Şimdiye kadar küçük kesit alanlı tellerden geçen akımları gözönüne alındı. Şimdi de akımın geniş bir cisimden geçtiği bir örneği ele alalım. yz düzleminde bulunan sonsuz genişlikte bir ince levha, lineer yoğunluğu J_s olan bir yüzey akımı taşımaktadır. Akım y yönündedir. J_s ise z ekseni boyunca ölçülen birim uzunluk başına akımı temsil etmektedir. Levhaya yakın yerdeki manyetik alanı bulunuz.

Çözüm Bu durum, Gauss yasasını içeren benzer hesaplamaları akla getirmektedir (Örnek 24.8'e bak). Sonsuz

bir yük düzleminin oluşturduğu elektrik alanın düzlemden uzaklığa bağlı olmadığını anımsayın. Bu yüzden, burada manyetik alan için de benzer bir sonuç bekleyebiliriz. Ampère yasasındaki çizgi integralini hesaplamak için, Şekil 30.14 te görüldüğü gibi leyhanın bir kesimini çevreleyen dikdörtgen biçimli bir yol (ilmek) alalım. Dikdörtgenin boyutları ℓ ve w dir. Burada ℓ uzunluklu kenarlar yüzeye paraleldir. Dikdörtgenin düzleminden geçen net akım $J_s \ell$ dir. Ampère yasasını ilmek boyunca uygularken, w uzunluğunundaki iki kenarın çizgi integraline katkıları olmayacağına dikkat etmeliyiz (çünkü bu yollar boyunca \mathbf{B} nin bileseni sıfırdır). Simetriden ℓ uzunluklu kenarlar boyunca manyetik alanın sabit olduğunu iddia edebiliriz. Çünkü sonsuz düzlemin üzerindeki her nokta eşdeğerdir ve bu nedenle alan noktadan noktaya değişmemelidir. Simetri için akla yakın olan alan yönü seçimleri düzleme dik ya da paraleldir. Bir dik alan akımın *icinden* geçeceğ; bu durum ise Biot-Savart yasası ile çelişir. Büyüklükçe sabit ve levha düzlemine paralel bir alan gözönüne alarak,

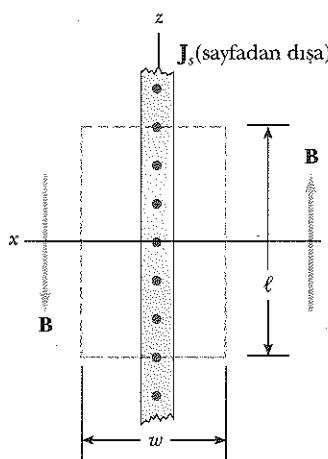
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I = \mu_0 J_s \ell$$

$$2B\ell = \mu_0 J_s \ell$$

$$B = \mu_0 \frac{J_s}{2}$$

buluruz.

Bu sonuç beklenildiği gibi, manyetik alanın, akım levhasından olan uzaklığa bağlı olmadığını göstermektedir.



Şekil 30.14 yz düzleminde bulunan sonsuz bir akım levhasının uctan görünüşü, burada akım y yönündedir (kağıt düzleminde dışa). Bu görünüş, levhanın her iki tarafında da \mathbf{B} nin yönünü göstermektedir.

ÖRNEK 30.7**Bir Akım Elemanına Etkiyen Manyetik Kuvvet**

Sekil 30.15 deki "Tel-1" y -ekseni boyunca uzanmaktadır ve I_1 karanlık akımını taşımaktadır. Telin sağ tarafına yerleştirilen $x-y$ düzleminde yatan dikdörtgen bir devreden I_2 akımı geçtiği zaman, Sekilde "Tel-2" olarak belirtilen ilmeğin b uzunluklu üst teline "Tel-1" in uyguladığı manyetik kuvveti bulunuz.

Cözüm Bu problemde, "Tel-2" nin dx uzunluklu küçük bir parçasına etkiyen kuvveti bulmak için Eşitlik 30.12 yi kullanmayı düşünebilirsiniz. Ancak, söz konusu eşitlik yalnızca iki paralel tele uygulanabilir ve burada kullanıl-

maz. Doğru yaklaşım, telin küçük bir ds elemanına etkiyen $d\mathbf{F}_B = I ds \times \mathbf{B}$ ifadesinden hareket etmektir (Eş. 29.4). Burada $I = I_2$ ve \mathbf{B} ise, uzunluğu ds olan elemanın bulunduğu yerde "Tel-1" in oluşturduğu manyetik alandır. Ampère yasasından, "Tel-1" in x uzaklıktaki oluşturduğu alan (Eşitlik 30.14 e bakınız)

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi x} (-\mathbf{k})$$

ile verilir. Buradaki birim vektör $(-\mathbf{k})$, ds 'deki alanın kağıt düzleminin içine doğru olduğunu belirtmek için kullanılmıştır "Tel-2" x eksenini boyunca olduğu için, $ds = dx \mathbf{i}$ olarak,

$$d\mathbf{F}_B = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi x} [\mathbf{i} \times (-\mathbf{k})] dx = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \frac{dx}{x} \mathbf{j}$$

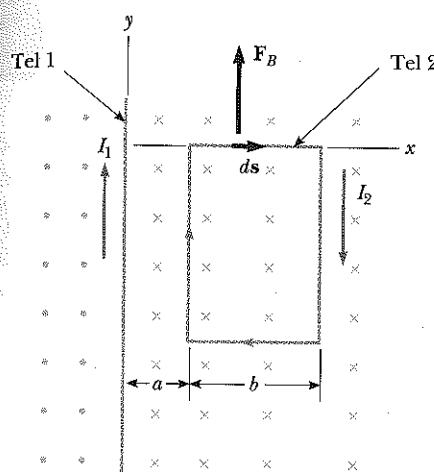
bulunur. $x = a$ ile $x = a + b$ arasında integrali alınarak

$$\mathbf{F}_B = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln x \Big|_a^{a+b} \mathbf{j} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{b}{a} \right) \mathbf{j}$$

elde edilir. Kuvvet, \mathbf{j} gösterimi ile belirtildiği ve Sekil 30.15 te gösterildiği gibi, pozitif y yönündedir.

Aliştırma b uzunluklu alt tele etkiyen kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir?

Cevap Kuvvet, üst yatay elemana etkiyen kuvvetle aynı büyüklükte, fakat aşağı doğru yönelmiştir.



Sekil 30.15

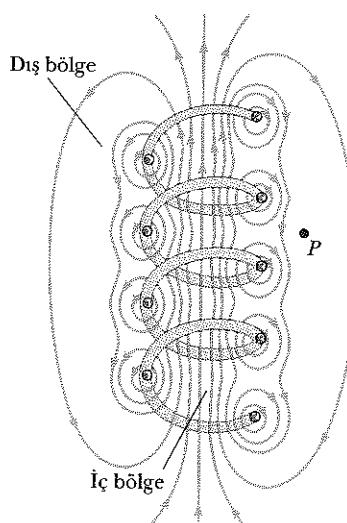
Sınaması Sorusu 10.1

Örnek 30.7 deki akım ilmeğine net bir kuvvet etki ediyor mu? Net bir tork etki ediyor mu?

10.4**BİR SOLENOİDİN MANYETİK ALANI**

Bir solenoid (akım makarası), helis biçiminde sarılmış uzun bir teldir. Sıkışık sarılmış bir solenoidin içindeki bölgenin küçük bir hacminde düzgün varsayılabilecek bir manyetik alan elde edilebilir. Sarımlar sıkışık olduğunda her birine bir çember gözüyle bakılabilir ve net manyetik alan tüm sarımlardan kaynaklanan alanların vektörel toplamıdır.

Sekil 30.16, gevşek sarılmış bir solenoidin manyetik alan çizgilerini göstermektedir. İç bölgelerindeki alan çizgilerinin birbirlerine hemen hemen paralel, düzgün dağılmış ve yakın olduklarına dikkat ediniz. İki komşu sarım üzerindeki akım elemanları arasındaki alan çizgileri birbirlerinin etkilerini yok ederler. Çünkü iki elemandan kaynaklanan alan vektörleri birbirlerine zittir. Solenoidin dışındaki alan hem düzgün değil hem de zayıftır. P gibi dış noktalarda zayıftır. Çünkü sarımların sağ tarafındaki akım elemanlarından kaynaklanan manyetik alan sol tarafındaki elemanlardan kaynaklanan alan yok etmemektedir.

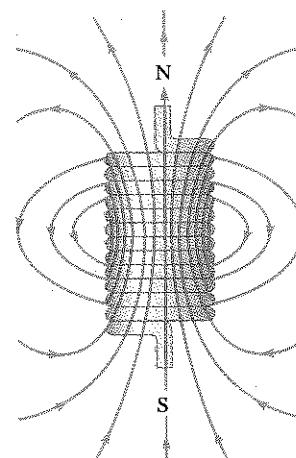


Sekil 30.16 Gevşek biçimde sarılmış bir solenoidin manyetik alan çizgileri.

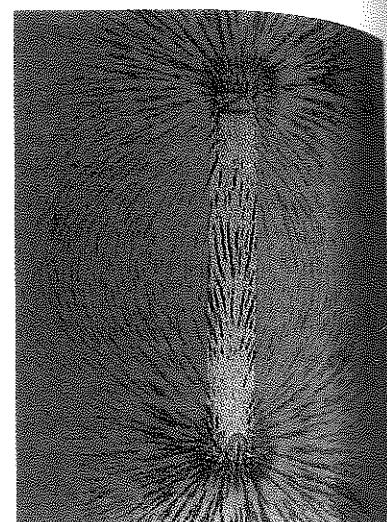
5



Bir teknisyen bir hastanın kafatasının görüntüsünü inceliyor. Görüntü, manyetik rezonans görüntüleme (MR) denen bir hastalık teşhis tekniği kullanılarak elde edilmiş. Manyetik rezonans aygıtı süper-iletken solenoidlerin oluşturduğu manyetik alanları kullanır. (Hank Morgan/Science Source)



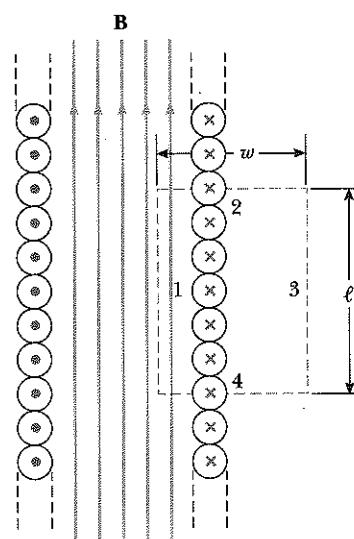
(a)



(b)

Şekil 30.17 (a) Kararlı bir akım taşıyan sonlu uzunlukta sıkıca sarılmış bir solenoidin manyetik alan çizgileri. Solenoidin iç bölgesindeki alan hemen hemen düzgün ve kuvvetlidir. Alan çizgilerinin çubuk mıknatısın alan çizgilerine benzendiğine dikkat ediniz. Bu nedenle, solenoid kuzey ve güney kutupları varmış gibi davranışır. (b) Bir çubuk mıknatısın manyetik alan deseni, bir kağıt parçasındaki demir tozları yardımıyla görsel hale getirilmiştir. (Henry Leop ve Jim Lehman'ın izniyle)

Sarımlar, sıkışık sarılmış ve solenoid sonlu uzunlukta ise, alan çizgileri Şekil 30.17a da görüldüğü gibidir. Bu alan çizgilerinin dağılımı bir çubuk mıknatısı saran alan çizgilerine benzer (Şekil 30.17b ye bakınız). Bu yüzden, solenoidin bir ucu çubuk mıknatısının kuzey kutbu gibi davranışırken öteki ucu güney kutbu gibi davranışır. Solenoidin uzunluğu artırıldıkça, içindeki alan gitikçe daha düzgün hale gelirken dış bölgesindeki alan zayıflar. Sarımlar sıkıca sarıldıkları ve solenoidin uzunluğu yarıçapına göre oldukça fazla olduğu zaman *ideal bir solenoid* durumuna yaklaşılır. Bu durumda, solenoidin dışındaki alan sıfır ve iç bölgesindeki alan ise oldukça büyük bir hacimde düzgün olur.



Şekil 30.18 İdeal bir solenoidin kesitten görünüşü. İçindeki alanı düzgün, dışındaki sıfır varsayabiliriz. Kırmızı kesik çizgili dikdörtgene Ampère yasası uygulanarak solenoidin iç bölgesindeki alanın büyüklüğü hesaplanabilir.

ideal bir solenoidin iç bölgesindeki manyetik alan ifadesini elde edebilmek için Ampère yasasını kullanabiliriz. Şekil 30.18, *I* akımı taşıyan böyle bir solenoidin bir parçasının uzunluğuna bir kessitini göstermektedir. Solenoid ideal olduğundan iç bölgesinde \mathbf{B} düzgün ve solenoidin eksenine paralel, fakat dışındaki bölgede \mathbf{B} sıfırdır. Şekil 30.18 de gösterildiği gibi uzunluğu ℓ ve genişliği w olan dikdörtgeni ele alalım. Bu dikdörtgenin dört kenarı boyunca $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin integralini alarak, Ampère yasasını uygulayabiliriz. Kenar-3 boyunca olan katkı kuşkusuz sıfırdır; çünkü bu bölgede $\mathbf{B} = 0$ dir. 2 ve 4 numaralı kenarlar her ikisinden gelen katkı da sıfırdır, çünkü bu yollar boyunca \mathbf{B} alanı $d\mathbf{s}$ ye dikdir. Uzunluğu ℓ olan kenar-1'in integrale katkısı $B\ell$ dir; çünkü bu yol boyunca \mathbf{B} düzgün ve $d\mathbf{s}$ 'ye paraleldir. Bu nedenle, kapalı dikdörtgensel yol boyunca integralin değeri,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \int_{\text{yol 1}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \int_{\text{yol 1}} ds = B\ell$$

dir.

Ampère yasasının sağ tarafı intergralin aldığı kapalı yolu çevrelediği yüzeyden geçen *toplam* akımı içerir. Şimdi durumunda dikdörtgen yolu çevrelediği yüzeyden geçen toplam akım, herbir sarımdan geçen akımla yüzeyin içindeki sarım sayısının çarpımına eşittir. ℓ uzunlığında bulunan sarım sayısı N ise, dikdörtgenin içinde geçen toplam akım NI olur. O halde, Ampère yasası bu yola uygulandığında,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B\ell = \mu_0 NI$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu_0 nI \quad (30.17)$$

bulunur. Burada $n = N/\ell$ birim uzunluktaki sarım sayısıdır. Bu sonucu, toroid şeklindeki bir kangalın (bobinin) manyetik alanını (Örnek 30.5) dikkate alarak da benzer biçimde elde edebilirdik. N sarımdan oluşan toroidin r yarıçapı kesit alanının yarıçapı olan a dan oldukça büyükse, toroidin küçük bir kesimi yaklaşık olarak bir solenoid oluşturur; burada $n = N/2\pi r$ ile verilir. Bu sınırlı durumda, toroid için elde edilen Eşitlik 30.16, Eşitlik 30.17 ile uyusur.

Eşitlik 30.17, oldukça uzun bir solenoidin merkezine yakın (yani; uçlarının oldukça uzak) olan noktalar için geçerlidir. Beklendiği gibi, uçlara yakın yerlerdeki alan, Eşitlik 30.17 ile verilen değerden daha küçüktür. Uzun bir solenoidin tam uçlarındaki alanın büyüklüğü, ortadaki değerin yaklaşık yarısı kadar olur.

Ev Deneyi

Bir pusulanın etrafında bir teli bir kağıt sar, bir başka deyişle pusulayı bir solenoidin içine koy. Telin iki ucunu bir pilin uçlarına dokundur. Pusulaya ne olur? Pusula telin sarımlarının dışında olduğunda da etki aynı derecede mi?

Bir solenoid içindeki manyetik alan

Web

Bir solenoidin ekseni boyuncaki manyetik alanın daha ayrıntılı bir tartışması için,
www.saunderscollege.com/physics/ sitesine giriniz.

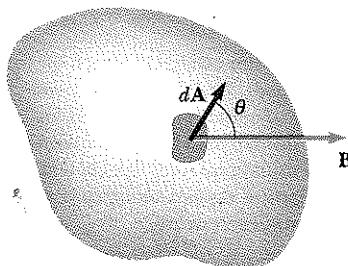
30.5 MANYETİK AKI

Manyetik alanla ilgili aki da elektrik akısının tanımlandığı gibi tanımlanır. (Ş. 24.3'e bak). Şekil 30.19 da olduğu gibi keyfi şekilli bir yüzey üzerinde alanı dA olan bir yüzey elemanı alalım. Bu elemandaki manyetik alan \mathbf{B} ise, elemandan geçen manyetik aki $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ dir. Burada $d\mathbf{A}$, büyülü dA alanına eşit ve yönü yüzeye dik olan bir vektördür. Böylece, tüm yüzeyden geçen toplam manyetik aki Φ_m ,

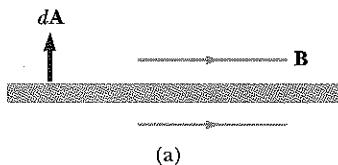
$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (30.18)$$

bağıntısı ile verilir.

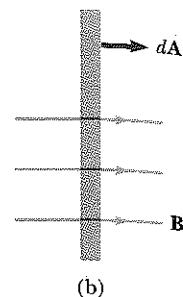
Manyetik akının tanımı



Şekil 30.19 Bir dA yüzey elemanından geçen manyetik akı, $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = B dA \cos \theta$ ile verilir. $d\mathbf{A}$ 'nın yüzeye dik olduğuna dikkat ediniz.



Şekil 30.20 (a) Manyetik alan, düzlemin yüzeyine paralel olduğu zaman, düzlemede geçen akı sıfırdır (yandan bir görünüş). (b) Manyetik alan düzleme dik olduğunda düzlemede geçen akı maksimumdur.



Özel bir durum olarak, yüzey alanı A olan bir düzlem ve $d\mathbf{A}$ vektörü ile açısı yapan düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanı alalım. Bu durumda, düzlemeden geçen manyetik akı,

$$\Phi_B = BA \cos \theta \quad (30.19)$$

olur. Manyetik alan, Şekil 30.20a da görüldüğü gibi düzleme paralel olursa, $\theta = 90^\circ$ ve akı sıfırdır. Öte yandan Şekil 30.20b deki gibi düzleme dik olursa $\theta = 0^\circ$ ve akı BA (maksimum değer) olur.

Akınnın birimi $T \cdot m^2$ Buna *weber* (Wb) denir; $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ dir.

ÖRNEK 30.8 Dikdörtgen Bir İlmekten Geçen Akı

Genişliği a ve uzunluğu b olan dikdörtgen bir ilmek, I akımı taşıyan uzun bir telden c uzaklığa yerleştirilmiştir (Şekil 30.21). Tel, ilmeğin uzun kenarına paraleldir. Teldeki akının ilmekten geçirdiği toplam manyetik akıyı bulunuz.

Çözüm Eşitlik 30.14 teki doğrusal ve uzun bir telin kendisinden r uzaklıkta oluşturduğu manyetik alanın büyüğünü

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

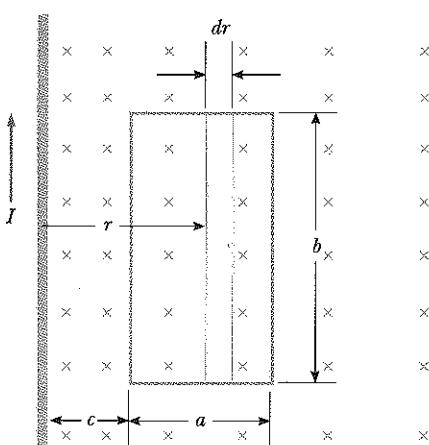
ile verildiğini biliyoruz. $1/r$ faktörü, alanın ilmeğin bulunduğu bölgede değiştiğini, Şekil 30.21 ise yönünün kağıt düzleminin içine doğru olduğunu gösterir. Ilmeğin içinde \mathbf{B} , $d\mathbf{A}'ya$ paralel olduğundan dA yüzey elamanından geçen akıyı,

$$\Phi_B = \int B dA = \int \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dA$$

biçiminde yazabiliriz. (\mathbf{B} düzgün olmayıp r ye bağlı olduğu için integralin dışına çıkarılamaz.)

Integrali almak için, önce Şekil 30.21 deki yüzey elmanını $dA = b dr$ şeklinde ifade ederiz. Şimdi integralde görülen değişken yalnız r olduğu için,

$$\begin{aligned} \Phi_B &= \frac{\mu_0 Ib}{2\pi} \int_c^{a+c} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 Ib}{2\pi} \ln r \Big|_c^{a+c} \\ &= \frac{\mu_0 Ib}{2\pi} \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) = \frac{\mu_0 Ib}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{a}{c} \right) \end{aligned}$$



Şekil 30.21 I akımı taşıyan doğru ve uzun telin, ilmeğin bulunduğu bölgede oluşturduğu manyetik alan düzgün değildir.

Aliştırma $\ln(1+x)$ için seri açılımı yapılarsa (Bak. E. B.5), halkanın telden yeterince uzak olduğu durumlarda (başa deyişle $c \gg a$ için) bu eşitlik uygun bir sonuç verir.

Cevap $\Phi_B \rightarrow 0$

30.6

MANYETİZMADA GAUSS YASASI

Bölüm 24 de bir net yükü içine alan (sarın) kapalı bir yüzeyden geçen elektrik alan akışının, o net yükle orantılı olduğunu bulmuştuk (Gauss yasası). Başka bir deyişle, kapalı yüzeyden çıkan elektrik alan çizgilerinin sayısı yalnızca içindeki net yüke bağlıdır. Bu özellik, kısmen elektrik alan çizgilerinin elektrik yüklerinden doğması ve elektrik yüklerinde sona ulaşması gerçeğine dayanmaktadır.

Durum, manyetik alanlar için oldukça farklıdır. Manyetik alan çizgileri sürekli olup kapalı ilmekler oluştururlar. Bir başka deyişle manyetik alan çizgileri, herhangi bir noktadan başlamaz ya da bir noktada sona ermez. Şekil 30.22'deki çubuk mıknatısın manyetik alan çizgileri bu noktayı açıklamaktadır. Sınırları, Şekil 30.22'deki kesikli kırmızı çizgi ile belirtilen gibi herhangi bir kapalı yüzeye giren alan çizgilerinin sayısının, bu yüzeyden çıkan çizgilerin sayısına eşit olduğuna dikkat ediniz. Bu nedenle, kapalı yüzeyden geçen net manyetik akı *sıfırdır*. Bu durum, bir elektrik dipolünün yüklerinden birini sarın kapalı bir yüzey durumuna terstir (Şek. 30.23); orada net elektrik akısı sıfır değildir.

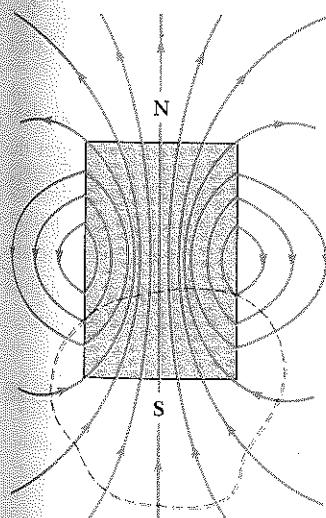
Manyetizmada Gauss yasası,

herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net manyetik akının her zaman sıfır olduğunu belirtir:

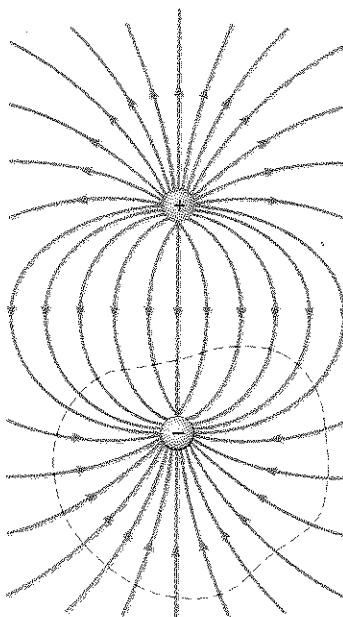
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (30.20)$$

Manyetizmada Gauss Yasası

Bu yargı, Bölüm 29'un açısından belirtildiği gibi, **yalıtlı manyetik kutupların** (ya da tek-kutupların) bu güne kadar deneysel olarak algılanamadığı gerçeği dayanmaktadır. Belki de böyle bir kutup hiç yoktur. Buna rağmen, bilim adamları araştırmayı sürdürmektedir. Çünkü, bunun dışındaki temel fiziksel



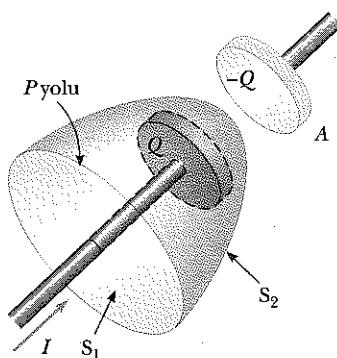
Şekil 30.22 Bir çubuk mıknatısının manyetik alan çizgileri kapalı ilmekler oluştururlar. Kutuplardan birini içine alan kapalı yüzeyden geçen net akının (veya başka bir kapalı yüzey) sıfır olduğuna dikkat ediniz.



Şekil 20.23 Bir elektrik dipolünün elektrik alan çizgileri pozitif yükten başlarlar ve negatif yükte sona ererler. Yüklerden birini içine alan kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısı sıfır değildir.

davranışları açıklamada başarılı olan bazı teoriler, tek-kutupların olabileceğini önermektedir.

30.7 YERDEĞİŞTİRME AKIMI VE AMPÈRE YASASININ GENEL BİÇİMİ



Şekil 30.24 Bir kondansatörün plakasına yakın olan S_1 (mavi) ve S_2 (kırmızı) yüzeyleri aynı P yoluna ile çevrelenmiştir. Teldeki iletim akımı yalnız S_1 den geçer. Bu, Ampère yasasında bir uyuşsuzlukla götürür. Bu uyuşsuzluk, ancak S_2 den bir yerdeğştirme akımının geçtiği postülât olarak ileri sürülebilir.

Yer değiştirme akımı

Ampère-Maxwell Yasası

Hareket halindeki yüklerin ya da akımların manyetik alanlar oluşturduklarını gördük. Akım taşıyan bir iletken yüksek bir simetriye sahipse, oluşturduğu manyetik alanı hesaplayabilmek için Ampere yasasını kullanabiliriz. Eşitlik 30.13 yani, $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$ daki çizgi integrali, iletim akımının içinden geçtiği bölgeli çevreleyen herhangi bir kapalı yol üzerinden alınır ve iletim akımı $I = dq/dt$ bağıntısı ile tanımlanır. Şimdi, Ampère yasasının bu biçiminin, elektrik alanı yalnız zamanla değişmiyorsa geçerli olduğunu göstereceğiz. Maxwell, bu sınırlamanın farkına vardı ve Ampère yasasını tüm olası durumları içerecek biçimde düzeltti.

Bu problemi, Şekil 30.24 de şekillendirilen gibi yüklenmeye olan bir kondansatörü inceleyerek anlayabiliriz. Bir iletim akımı olduğunda pozitif plakadaki yük değişir, fakat *plakalar arasındaki aralıktan hiç iletim akımı geçmez*. Şimdi Şekil 30.24 deki gibi aynı P yolunun çevrelediği S_1 ve S_2 yüzeylerini dikkate alalım. Ampère yasası, $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin bu yol boyunca çizgi integralinin $\mu_0 I_a$ eşit olması gerektiğini söyler. Burada I_a , P yolunun çevrelediği herhangi bir yüzeyden geçen toplam akımdır.

P yolunun S_1 'i çevrelediği düşünülürse, $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$ dir. Çünkü iletim akımı S_1 den geçer. Fakat, P yolunun S_2 'yi çevrelediği düşünülürse, $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$ olur, çünkü S_2 den hiç bir iletim akımı geçmez. O halde, akımın sürekliliğinden kaynaklanan bir ters duruma ulaştık! Maxwell, Eşitlik 30.13 ün sağına yer değiştirme akımı, I_d denen³ ve

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (30.21)$$

birimde tanımlanan ek bir terim koyarak, bu problemi çözdü. Φ_E 'nin $\Phi_E = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$ biçiminde tanımlanan elektrik alan akısı olduğunu anımsayınız (Eşitlik 24.3 e bakınız).

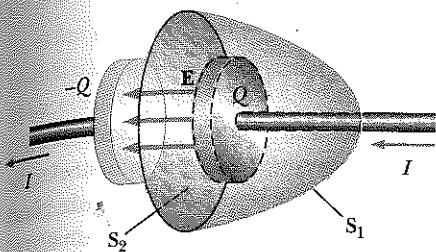
Kondansatör yüklenirken (ya da boşalırken), levhaların arasındaki *değişken* elektrik alanı, teldeki iletim akımının devamı olan bir akıma eşdeğer düşünülebilir. Eşitlik 30.21 ile verilen yerdeğştirme akımı ifadesi, Ampère yasasının sağ tarafına eklenirse, Şekil 30.24'ün temsil ettiği güçlük ortadan kalkar. P yolunun çevrelediği yüzey ne olursa olsun ya iletim ya da yerdeğştirme akımı ondan geçecektir. Bu yeni I_d terimi ile, Ampère yasasının genelleştirilmiş biçimini (bazen **Ampère-Maxwell Yasası** denir),

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (30.22)$$

şeklinde ifade edebiliriz.⁴

³ Buradaki yerdeğştirme, Bölüm 2 de kullanıldığı anlamda değildir. Tam doğru olmayan anlamlara gelmesine rağmen kelime, tarihsel süreç içerisinde fizik diline girdi, bu yüzden kullanmaya devam ediyoruz.

⁴ Bu ifadenin yalnız boşlukta geçerli olduğunu belirtmek gerekir. Şayet manyetik ortam varsa, Eşitlik 30.22 nin sağındaki μ_0 ve ϵ_0 sırasıyla maddenin manyetik geçirgenliği μ_m ve elektriksel geçirgenliği ϵ ile değiştirilmelidir. Ayrıca, Ampère yasasını tam olarak genelleştirebilmek için Eşitlik 30.27 nin sağ tarafına bir de I_m ile gösterilen miknatışlanma akımını da koymak gerekmektedir. Mikroskopik ölçekte, I_m de iletim akımı I kadar gerçek bir akımdır.



Şekil 30.25 Kondansatör plakalarına bağlı olan tellerden geçtiği için iletim akımı $I = dQ/dt S_1$ den geçer fakat S_2 den geçmez. S_2 den yalnız yerdeğiştirme akımı $I_d = \epsilon_0 d\Phi_E/dt$ geçer. Süreklik gereği iki akım birbirlerine eşit olmalıdır.

Bu ifadenin anlamı, Şekil 30.25 incelenerek anlaşılabilir. S_2 den geçen elektrik akısı $\phi_E = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = EA$ dir. Burada A kondansatörün plakalarının yüzey alanı ve E plakalar arasındaki düzgün elektrik alanın büyüklüğüdür. Q herhangi bir anda plakalardaki yük ise, $E = Q/\epsilon_0 A$ (Kesim 26.2) elde edilir. O halde, S_2 den geçen elektrik akısı,

$$\Phi_E = EA = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

dir. Böylece S_2 den geçen yerdeğiştirme akımı I_d ,

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (30.23)$$

olar. Yani S_2 den geçen yerdeğiştirme akımı, S_1 den geçen iletim akımı I ye tam olarak eşittir!

S_2 yüzeyini inceleyerek yerdeğiştirme akımını, yüzey sınırlarındaki manyetik alanın kaynağı olarak yorumlayabiliriz. Yerdeğiştirme akımının fiziksel kaynağı ise zamanla-değişen elektrik alandır. O halde, bu formalizmanın (biçimlenişin) can alıcı noktası,

manyetik alanları, hem iletim akımlarının, hem de zamanla-değişen elektrik alanlarının oluşturabilir olmasıdır.

Bu sonuç, Maxwell'ın kuramsal çalışmasının oldukça dikkat çeken bir örneği idi ve elektromanyetizmanın anlaşılmasıında pek çok gelişmeye katkıda bulundu.

Sınamaya Sorusu 30.6

Tam olarak yüklenmiş $3\mu\text{F}$ lik bir kondansatör için yerdeğiştirme akımı nedir?

ÖRNEK 30.9 Bir Kondansatördeki Yerdeğiştirme Akımı

$8\mu\text{F}$ lik bir kondansatörün uçları arasına frekansı 3 kHz ve voltaj genliği 30 V olan bir ac gerilimi uygulandığında kondansatörün levhaları arasındaki yerdeğiştirme akımını bulunuz.

Cözüm Kaynağın açısal frekansı Eşitlik 13.6 dan, $\omega = 2\pi f = 2\pi (3 \times 10^3 \text{ Hz}) = 1,88 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ dir. Buradan kondansatörün uçları arasındaki gerilimin zamana bağlı ifadesi,

$$\Delta V = \Delta V_{\text{maks}} \sin \omega t = (30 \text{ V}) \sin (1,88 \times 10^4 t)$$

dir. Yerdeğiştirme akımını bulmak için kondansatördeki

yükün $Q = CV$ ile verildiğini hatırlayıp Eşitlik 30.23 ü kullanabiliriz:

$$I_d = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} (C\Delta V) = C \frac{d}{dt} (\Delta V)$$

$$= (8,00 \times 10^{-6} \text{ F}) \frac{d}{dt} [(30,0 \text{ V}) \sin(1,88 \times 10^4 t)]$$

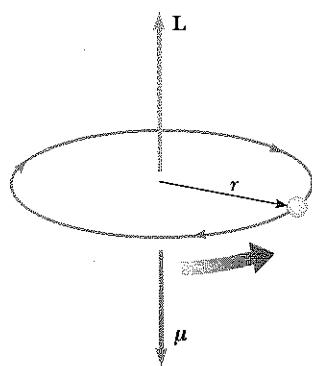
$$= (4,52 \text{ A}) \cos(1,88 \times 10^4 t)$$

Buna göre, yerdeğiştirme akımı zamanla sinüssel olarak değişir ve maksimum değeri $4,52 \text{ A}$ dir.

Seçmeli Kesim**30.8 MADDE İÇİNDE MANYETİZMA**

Bir tel sardıktaki akımın oluşturduğu manyetik alan, bazı maddelerin kuşku manyetik özellikler göstermelerinin nedeni konusunda ipucu vermektedir. Daha önce, Şekil 30.17 dekine benzer bir kangalın bir kuzey ve bir de güney kutbu olduğunu bulmuştuk. Genelde, *herhangi bir akım ilmeği*, bir manyetik alana ve buna karşılık gelen bir manyetik momente sahiptir. Buna atomun bazı modellerinde betimlenen atomik düzeydeki akım-ilmekleri de dahildir. Bu nedenle, mknatsılanmış bir maddedeki manyetik momentlerin, bu atomik düzeydeki akım ilmeklerinden kaynaklandığı söylenebilir.

Atomun Bohr modeli için, bu akım ilmekleri çekirdeklerin etrafındaki çembersel yörüngelerde bulunan elektronların hareketlerinden kaynaklanır. Ayrıca, elektronların, protonların nötronların ve diğer bazı parçacıkların "spin" denen bir iç özelliğinden kaynaklanan bir başka manyetik momentleri daha vardır.



Şekil 30.26 r yarıçaplı bir çember üzerinde dolanan bir elektron, zıt yönlerde olmak üzere bir açısal momentumuna (L) ve bir manyetik momente (μ) sahiptir.

Yörungesel manyetik moment

Açısal momentum kesiklidir

Atomların Manyetik Momentleri

Tartışmamıza, elektronların oldukça ağır bir çekirdek etrafındaki çembersel yörüngelerde doladığını varsayıklı klasik atom modeli ile başlamak eğiticidir olacaktır. Bu modelde, yörungede dolanın bir elektronun, küçük bir akım ilmeği oluşturduğu düşünülür ve elektronun manyetik momenti bu yörungesel hareketiyle ilişkilidir. Bu modelin pek çok yetersizlikleri varsa da, kuantum fiziginin önerdiği doğru teori ile iyi bir uyum içindedir.

Şekil 30.26 da gösterildiği gibi çekirdek etrafında r yarıçaplı çembersel bir yörungede sabit v hızı ile hareket eden bir elektronu ele alalım. Elektron, $2\pi r$ lik (çemberin çevre uzunluğu) bir mesafeyi T zamanda aldığı için yörungesel sürat $v = 2\pi r/T$ dir. Dolanan bu elektronu temsil eden I akımı, elektronun yükünün bir dolanım için geçen zamana bölümüne eşittir. $T = 2\pi/\omega$ ve $\omega = v/r$ bağıntılarını kullanarak

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r}$$

elde edilir. Bu etkin akım ilmeğinin oluşturduğu manyetik moment $\mu = IA$ dir. Burada $A = \pi r^2$ yörungenin çevrelediği alandır. O halde,

$$\mu = IA = \left(\frac{ev}{2\pi r} \right) \pi r^2 = \frac{1}{2} evr \quad (30.24)$$

olur. Elektronun yörungesel açısal momentumunun büyüklüğü $L = m_e vr$ ($\phi = 90^\circ$ için Eşitlik 11.16) olduğundan, yörungesel manyetik momenti

$$\mu = \left(\frac{e}{2m_e} \right) L \quad (30.25)$$

şeklinde yazılabilir. Bu sonuç, **elektronun manyetik momentinin, yörungesel açısal momentum ile orantılı olduğunu söylemektedir**. Elektron negatif yüklü olduğundan, μ ve L vektörlerinin zıt yönlerde yönelmiş olduklarına dikkat ediniz. Şekil 30.26 da belirtildiği gibi her iki vektör de yörunge düzlemine diktir.

Kuantum fiziginin bir temel sonucu, yörungesel açısal momentumun kesikli (quantize) ve her zaman $\hbar = h/2\pi = 1,06 \times 10^{-34}$ J.s'nin bir tam katı olması gerektidir (Burada h , Planck sabitidir.). Elektronun yörungesel hareketinden kaynaklanan manyetik momentinin sıfır olmayan en küçük değeri,

$$\mu = \sqrt{2} \frac{e}{2m_e} \hbar \quad (30.26)$$

dir. Eşitlik 30.26 ya benzeyen bağıntıların nasıl elde edildiğini Bölüm 42 de göreceğiz.

Tüm maddeler elektron içerdiklerine göre, bir kısmının niçin manyetik olmadıklarını merak edebilirsiniz. Temel neden, maddelerin çoğu, atomdaki bir elektronun manyetik momentinin yine aynı atomun ters yönde dolanan diğer bir elektronunun manyetik momenti tarafından dengelenerek etkisiz hale getirilmesidir. **Maddelerin çoğu için, sonuç olarak, elektronların yörungesel hareketinin oluşturduğu manyetik etki ya sıfır ya da oldukça küçüktür.**

Yörungesel manyetik momentinden başka, elektronun **spin** denen bir başka iç özelliği daha vardır; manyetik momentine bu da katkıda bulunur. Bu yöntole elektrona, çekirdeğin etrafında yörungesel hareketini yaparken aynı zamanda Şekil 30.27 deki gibi kendi eksenin etrafında dönen bir küresel yük gözyle de bakılabilir. (Bu klasik tanıtım tam olarak doğru kabul edilmemelidir çünkü spin kuantum mekaniksel bir analize dahil edilmesi gereken göreceli dinamikten kaynaklanır.) Spinle ilgili açısal momentumun S büyüklüğü, yörungesel hareketten kaynaklanan açısal momentumla aynı mertebededir. Kuantum teorisinin öngördüğü spin açısal momentumun büyüklüğü,

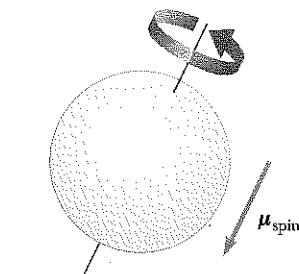
$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

ve bir elektron spininin oluşturduğu manyetik moment

$$\mu_{\text{spin}} = \frac{e\hbar}{2m_e} \quad (30.27)$$

dir. Sabitler cinsinden elde edilen bu ifadeye **Bohr Magnetonu**

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T} \quad (30.28)$$



Şekil 30.27 Dönen bir eletro-n klasik modeli. Bu model, doğru olmayan bir manyetik moment büyülüğü, doğru olmayan kuantum sayıları ve çok fazla serbestlik derecesi verir.

Spin açısal momentumu

denir. O halde atomik manyetik momentler Bohr Magnetonu cinsinden verilebilirler (Not: $1 \text{ J/T} = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 'dir):

Cok sayıda elektronu olan atomlarda elektronlar genellikle spinleri *zit* yönelecek biçimde çiftler oluştururlar; böylece spin manyetik momentleri birbirlerini yok ederler. Fakat, tek sayıda elektronu olan atomların en azından bir tane "çiftlenmemiş" elektronu ve buna karşılık gelen bir spin manyetik momenti olması gereklidir. Bir atomun toplam manyetik momenti, yörungesel ve spin manyetik momentlerinin vektörel toplamıdır. Tablo 30.1 de birkaç örnek verilmektedir. Helyum ve neonun momentlerinin sıfır olduğuna dikkat ediniz. Bunların bireysel spin ve yöringe momentleri birbirlerini yok ederler.

Bir atom çekirdeğinin de proton ve nötronlarından kaynaklanan manyetik momenti vardır. Ancak, bir protonun ya da nötronun manyetik momenti, elektronun manyetik momentinin yanında çok küçük kalır ve genellikle ihmal edilebilir. Bu durumu Eşitlik 30.28 i inceleyerek ve elektronun kütlesi yerine bir protonun veya nötronun kütlesini koyarak anlayabiliriz. Proton ve nötronun küteleri, elektronun kütlesinden çok çok büyük olduklarından, manyetik momentleri yaklaşık 10^3 kere daha küçüktür.

Mıknatışlanma Vektörü ve Manyetik Alan Şiddeti

Bir maddenin manyetik durumu, **mıknatışlanma vektörü (\mathbf{M})** denen bir nicekle betimlenir. **Bu vektörün büyüklüğü, maddenin birim hacminin net manyetik momentine eşittir.** Tahmin edebileceğiniz gibi, bir maddedeki toplam manyetik alan \mathbf{B} , hem uygulanan (dış) alana (\mathbf{B}_0) ve hem de maddenin mıknatışlanmasına bağlıdır.

Böyle durumlarda, \mathbf{B} toplam manyetik alanını ölçmeyi içeren problemleri anlamak için şunu ele alalım: Manyetik alanları ölçmek için bilim adamları

TABLO 30.1 Bazı Atomlar ve İyonların Manyetik Momentleri

Atom (veya iyon)	Manyetik Moment (10^{-24} J/T)
H	9,27
He	0
Ne	0
Ce ³⁺	19,8
Yb ³⁺	37,1

Manyetik vektörü \mathbf{M}

Hall olayına (Kesim 29.6 ya bakınız) dayanan küçük algılayıcılar kullanılarak Böyle bir algılayıcı, sayfa 951 deki Ev Deneyi'nde sözü edilen solenoidin içine yerleştirilseydi pusulayı solenoidin içine soktuğunuzda ne göreceksiniz? Pusula bir manyetik madde olduğundan, algılayıcı solenoid (dış) alanı \mathbf{B}_0 ile pusulanın oluşturduğu (miknatıslanma) alanı \mathbf{B}_m nin toplamından oluşan \mathbf{B} toplam manyetik alanını ölçer. Bu bize akımlardan kaynaklanan manyetik alanları manyetik maddelerden kaynaklanan alanlardan ayırdetmek için bir yola gerekşimiz olduğunu söyler. Akım taşıyan bir iletkenin oluşturduğu bir \mathbf{B}_0 manyetik alanının bulunduğu bir bölge düşünelim. Şimdi o bölgeyi bir manyetik madde ile doldurursak, bölgedeki *toplam* alan $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m$ olacaktır. Burada \mathbf{B}_m manyetik maddenin oluşturduğu alandır. Bu katkı, maddenin miknatıslanma vektörü cinsinden $\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M}$ şeklinde ifade edilebilir. Böylece, bölgedeki toplam alan

Manyetik alan şiddeti \mathbf{H}

olur. Miknatıslanmadan kaynaklanan manyetik alanları analiz ederken maddenin içinde **manyetik alan şiddeti (\mathbf{H})** denen başka bir alan niceliği tanımlamak kolaylık sağlamaktadır. Manyetik alan şiddeti, tellerdeki iletim akımlarının maddeye etkisini temsil eder. Alan şiddeti \mathbf{H} ile \mathbf{B} alanı arasındaki ilişki vurgulamak için, \mathbf{B} ye çoğu kez *manyetik akı yoğunluğu veya manyetik induksiyon* denir. Manyetik alan şiddeti $\mathbf{H} = \mathbf{B}_0 / \mu_0 = (\mathbf{B} / \mu_0) - \mathbf{M}$ bağıntısıyla tanımlanan bir vektördür. Böylece, Eşitlik 30.29

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M} \quad (30.29)$$

biçiminde yazılabilir. \mathbf{H} ve \mathbf{M} niceliklerinin birimleri aynıdır. SI birimlerinde \mathbf{M} birim hacimdeki manyetik moment olduğuna göre, birimi $\text{A} \cdot \text{m}^2 / \text{m}^3$ veya A/m dir.

Bu ifadeleri daha iyi anlayabilmek için I akımı taşıyan bir toroidin içindeki bölgeyi ele alınız. Şayet bu iç bölge bir boşluksa $\mathbf{M} = 0$ ve $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ olur. Bir toroidin içinde $B_0 = \mu_0 nI$ olduğundan (burada n toroidin birim uzunluğundaki sarım sayısıdır), $H = B_0 / \mu_0 = \mu_0 nI / \mu_0$ veya

$$H = nI \quad (30.31)$$

olur. Bu durumda, toroidin içindeki \mathbf{B} manyetik alanı yalnız, sarımlarından geçen akımdan ileri gelmektedir.

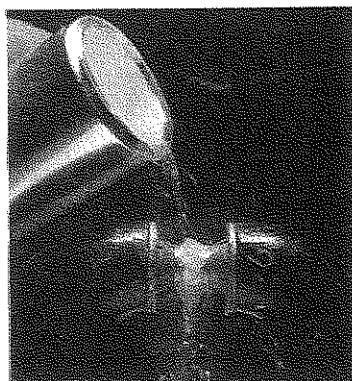
Öte yandan toroidin içi bir tür madde ile doldurulur ve I akımı sabit tutulursa, maddenin içindeki \mathbf{H} , nI büyüklüğünü koruyarak *değişmeden* kalır (çünkü yalnız akıma bağlıdır). Ancak, toplam \mathbf{B} alanı madde konulduğu zaman değişir. Eşitlik 30.30 a göre \mathbf{B} nin bir kısmının toroiddeki akımdan ileri gelen $\mu_0 \mathbf{H}$ teriminden; ikinci kısmının ise maddenin miknatıslanmasından ileri gelen $\mu_0 \mathbf{M}$ teriminden kaynaklandığını görürüz.

Manyetik Maddelerin Sınırlandırılması

Manyetik özelliklerine bağlı olarak maddeler başlıca üç sınıfa ayrılabilir. **Paramanyetik** ve **ferromanyetik** maddeler, sürekli (daimi) manyetik dipol momente sahip atomlardan oluşur. **Diyamanyetik** maddeler ise sürekli manyetik momente sahip olmayan atomlardan oluşur.

Paramanyetik ve diyamanyetik maddelerin miknatıslanma vektörleri \mathbf{M} , manyetik alan şiddeti \mathbf{H} ile orantılıdır. Yani bir dış manyetik alan içerisinde yerleştirilen bu maddeler için,

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (30.32)$$



Bir paramanyetik madde olan oksijen, manyetik alana doğru çekilir. Bu fotoğraftaki sıvı oksijen, miknatıslanma kutupları arasında asılı durur (Leon Lewandowski).

**TABLO 30.2 Bazı Paramanyetik ve Diyamanyetik Maddelerin 300 K'deki
Manyetik Duygunlukları**

Paramanyetik Madde	χ	Diyamanyetik Madde	χ
Alüminyum	$2,3 \times 10^{-5}$	Bismut	$-1,66 \times 10^{-5}$
Kalsiyum	$1,9 \times 10^{-5}$	Bakır	$-9,8 \times 10^{-6}$
Krom	$2,7 \times 10^{-4}$	Elmas	$-2,2 \times 10^{-5}$
Litium	$2,1 \times 10^{-5}$	Altın	$-3,6 \times 10^{-5}$
Magnezyum	$1,2 \times 10^{-5}$	Kurşun	$-1,7 \times 10^{-5}$
Nayobiyum	$2,6 \times 10^{-4}$	Cıva	$-2,9 \times 10^{-5}$
Oksijen	$2,1 \times 10^{-6}$	Azot	$-5,0 \times 10^{-9}$
Platin	$2,9 \times 10^{-4}$	Gümüş	$-2,6 \times 10^{-5}$
Tungsten	$6,8 \times 10^{-5}$	Silisyum	$-4,2 \times 10^{-6}$

yazabiliriz. Burada χ manyetik duyguluk (susceptibilité) denen boyutsuz (birimsiz) bir çarptandır. Şayet madde paramanyetikse, χ pozitif olup bu durumda \mathbf{M} , \mathbf{H} ile aynı yöndedir. Madde diyamanyetik ise, χ negatif olup \mathbf{M} , \mathbf{H} 'ye ters yöndedir. Bu lineer bağımlılığın ferromanyetik maddeler için geçerli olmadığını dikkat etmek son derece önemlidir. Bazı maddelerin duygulukları Tablo 30.2 de verilmiştir.

Eşitlik 30.32 ile verilen $\mathbf{M}'yi$ Eşitlik 30.30 da yerine koyarak,

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(\mathbf{H} + \chi\mathbf{H}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$$

Manyetik duyguluk χ

$$\mathbf{B} = \mu_m \mathbf{H} \quad (30.33)$$

elde edilir. Buradaki μ_m sabitine maddenin manyetik geçirgenliği denir ve duyguluga

$$\mu_m = \mu_0(1 + \chi) \quad (30.34)$$

Manyetik geçirgenlik μ_m

bağıntısı ile bağlıdır. Maddeler, μ_m ve μ_0 'nın (serbest uzayın geçirgenliği) büyüğüğe bağlı olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

Paramanyetik	$\mu_m > \mu_0$
Diyamanyetik	$\mu_m < \mu_0$

Paramanyetik ve diyamanyetik maddeler için χ çok küçük olduğundan (Tablo 30.2 ye bakınız), bu maddeler için μ_m hemen hemen μ_0 'a eşittir. Ancak, ferromanyetik maddeler için μ_m , μ_0 dan bir kaç bin kere daha büyütür (bunun anlamı ferromanyetik maddeler için χ nin çok büyük olduğunu).

Eşitlik 30.33, \mathbf{B} ile \mathbf{H} arasında basit bir bağıntı oluşturuyorsa da, ferromanyetik maddelere uygulanmaya çalışıldığımda dikkatlice yorumlanmalıdır. Daha önce belirtildiği gibi, ferromanyetik maddelerde \mathbf{M} , \mathbf{H} nin lineer bir fonksiyonu değildir. Böyle olmasının nedeni, μ_m nin değerinin yalnız ferromanyetik maddenin bir karakteristiği olmakla kalmayıp aynı zamanda önceki durumuna ve önceki durumundan şimdiki durumuna gelinceye kadar geçirdiği işlemelere de bağlı olmasıdır.

ÖRNEK 30.10 Demirle Doldurulmuş Bir Toroid

5A'lık akım taşıyan toroid şeklindeki bir sarginin birim uzunluğunda 60 sarım vardır. Çekirdeği demir olup geçirgenliği, verilen koşullar altında, $\mu_m = 5000\mu_0$ olduğuna göre demirin içindeki H ve B 'yi bulunuz.

Cözüm Eşitlik 30.31 ve Eşitlik 30.33'ü kullanarak

$$H = nI = \left(60,0 \frac{\text{sarım}}{\text{m}}\right)(5,00 \text{ A}) = 300 \frac{\text{A} \cdot \text{sarım}}{\text{m}}$$

$$B = \mu_m H = 5000 \mu_0 H$$

$$= 5000 \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}\right) \left(300 \frac{\text{A} \cdot \text{sarım}}{\text{m}}\right) = 1,88 \text{ T}$$

B 'nin bu değeri, demir çekirdeğin bulunmadığı zamanki değerden 5000 kez daha büyüktür.

Aliştırma Demir çekirdeğin içindeki mıknatışlanma vektörünün büyüklüğünü bulunuz.

Cevap $M = 1,5 \times 10^6 \text{ A/m}$

Sınav Sorusu 30.7

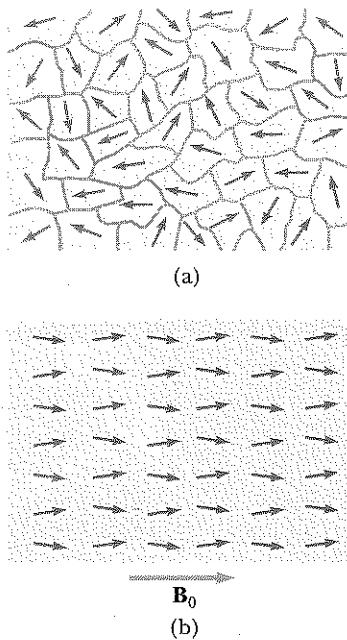
İç bölgesinde hava bulunan bir solenoiddeki akım, bir $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ manyetik alanı oluşturur. Solenoidin içine (a) aluminyum, (b) bakır ve (c) demir yerleştirilirse \mathbf{B} nin büyüğünün nasıl değiştigini nitel olarak betimleyiniz.

Ferromanyetizma

Atomları sürekli manyetik momente sahip olan az sayıda kristal yapılı madde, **ferromanyetizma** denen kuvvetli manyetik olaylar gösterirler. Ferromanyet maddelerin bazı örnekleri demir, kobalt, nikel, godolinyum ve disprosyumdur. Bu tür maddeler, zayıf bir dış manyetik alan içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan atomik manyetik dipol momentler içerirler. Momentler bir kere paralel hale getirildikten sonra, dış alan ortamdan kaldırılsa bile madde mıknatıslanmış olarak kahr. Bu sürekli yönelim, komşu olan manyetik momentler arasındaki kuwertli bir etkileşimden kaynaklanır. Bu etkileşim, ancak kuantum mekaniksif ifadelerle anlaşılabılır.

Tüm ferromanyetik maddeler "domain" denen mikroskopik bölgelerden oluşurlar. Herhangi bir bölgedeki momentlerin hepsi aynı yönde yönelmiştir. Bu bölgelerin hacimleri yaklaşık $10^{-12} - 10^{-8} \text{ m}^3$ olup $10^{17} - 10^{21}$ civarında atom içermektedirler. Farklı yönelimlere sahip olan bölgelerin arasındaki sınırlara **bölge duvarları** denir. Mıknatıslanmamış bir numunedede, Şekil 30.28a'da gösterildiği gibi bölgeler, net manyetik moment sıfır olacak biçimde rastgele yönelirler. Numune bir dış manyetik alan içine konduğu zaman, bölgeler hafifce dönerek alan yönünde yönelmeye çalışırlar. Bu yönelme olayı, Şekil 30.28b'deki gibi mıknatıslanmış bir numune ortaya çıkarır. Gözlemler, dış alan uygulayınca başlangıçta dış alan yönünde yönelmiş durumda olan bölgelerin diğer yönlere yönelik olanların aleyhine büyüyeceğini göstermektedir. Dış alan ortamdan kaldırıldığı zaman, numune kalkan alanın yönünde net bir mıknatıslanmayı koruyabilir. Normal sıcaklıklarda, ısisal uyarımlar manyetik momentlerin bu tercihli yönelimini bozacak kadar etkili değildir.

Ferromanyetik bir maddenin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan tipik bir deneysel düzenek, Şekil 30.29 da olduğu gibi, N tane sarım teli bulunan toroid-biçimli bir numunededen oluşur. Burada sarımlar siyah renkte çizilmiş olup birinci kangal adını alır. Bu aygıta bazen **Rowland halkası** da denir. Toroidin içinden geçen manyetik akımı ölçmek için bir galvanometreye bağlanmış bir *ikinci kangal* kullanılır. Toroidin çekirdeğindeki manyetik alan \mathbf{B} , toroid akımını sıfırdan I değerine kadar artırarak ölçülür. Akım değişince,



Şekil 30.28 (a) Mıknatıslanmamış bir maddenin atomik manyetik dipollerinin rastgele yönellisleri. (b) Bir \mathbf{B}_0 dış alanı uygulandığı zaman, atomik manyetik dipollerin alan yönünde yönelmeye başlaması. (c) Bir \mathbf{B}_0 dış alanı uygulandığı zaman, atomik manyetik dipollerin alan yönünde yönelmeye başlaması.

ikinci kangaldan geçen akı BA kadar değişir (burada A toroidin kesit alanıdır). Kesim 31 de göreceğimiz gibi, bu değişen akı nedeniyle ikinci kangalda manyetik akımın zamana göre değişim hızı ile orantılı bir emk oluşur. Şayet ikinci devredeki galvanometre uygun bir biçimde kalibre edilirse, birinci kangaldaki akımın harhangi bir değerine karşılık gelen B için bir değer elde edilebilir. Değişik akımlar için manyetik alan B nin önce boş toroid kanganlarında sonra da aynı kangan manyetik madde ile doldurulduktan sonraki değerlerini ölçülür. Böylece, iki ölçüm karşılaştırılarak maddenin manyetik özelliklerini elde edilir.

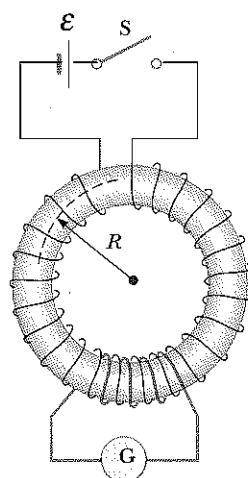
Şimdi çekirdeği mıknatıslanmamış demirden oluşan toroid şeklinde bir kangan ele alalım. Sarımlardaki akım sıfırdan bir I değerine arttırılırsa, $H = nI$ ifadesine göre olan şiddeti H , I akımı ile lineer olarak artar. Ayrıca, Şekil 30.30 da 0 dan a ya kadarki eğrinin gösterdiği gibi, B toplam alanı da akım arttıkça artar. 0 noktasında demirin manyetik bölgeler rastgele yönelmişlerdir. Bu da $B_m = 0$ 'a karşılık gelir. Birinci kangaldaki artan akım dış alan B_0 1 arttırdıkça bölgeler alanla daha çok paralel hale gelirler ve sonunda a noktasında hemen hemen hepsi paralel duruma geçerler. Bu noktada, demir çekirdek *doyuma* yaklaşmaktadır. (Doyum hali, tüm bölgelerin aynı yöne yöneldikleri durumdur.)

Bundan sonra akımın sıfır düşürüldüğünü ve böylece dış alanın ortamdan kaldırıldığını düşünelim. **Mıknatıslanma eğrisi** denen B 'nin H ile değişim eğrisi, şimdi, Şekil 30.30 da gösterilen ab yolunu izler. b noktasında dış alan $B_0 = 0$ olduğu halde, B alanının sıfır olmadığına dikkat ediniz. Bunun nedeni, çok sayıda bölgelenin paralel hale geçmelerinden ötürü, şimdi, demir çekirdeğin mıknatıslanmış olduğunu gösterir. Birincildeki akım yönü değiştirilerek dış alanın yönü değiştirilip şiddeti artırılırsa, numune c noktasında tekrar mıknatıslanmamış duruma geçinceye kadar bölgeler yön değiştirirler; burada $B = 0$ olur. Ters yönlü akımdaki daha fazla artış demirin ters yönde mıknatıslanmasına neden olur ve d noktasında doyuma yaklaşır. Akım tekrar sıfır düşürülüp ve sonra başlangıçtaki (pozitif) yönde artırılırsa benzer olaylar zinciri oluştur ve mıknatıslanma eğrisi *def* yolunu izler. Akım yeterince artırılırsa, mıknatıslanma eğrisi a noktasına geri döner ve orada numune yine maksimum mıknatıslanma değerine kavuşur.

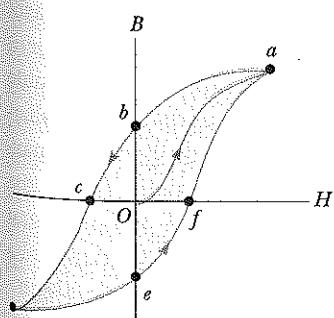
Anlatılan bu olaya **manyetik "hysteresis"** denir. Manyetik hysteresis, ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının uygulanan alanın şiddetine olduğu kadar maddenin geçmişteki durumuna da bağlı olduğunu gösterir. (*Hysteresis* kelimesinin gerçek anlamı "geride kalış" dır.) Çok kez ferromanyetik bir maddenin "belleğe" sahip olduğu söylenilir. Çünkü dış alan ortadan kaldırıldıktan sonra, madde mıknatıslanmış olarak kalır. Şekil 30.31 deki kapalı ilmege bir hysteresis ilmek denir. Şekli ve büyülüğu ferromanyetik maddenin

Ev Deneyi

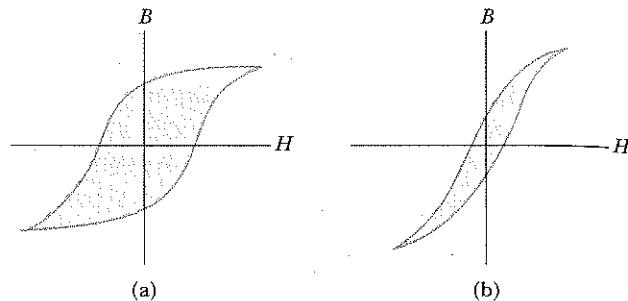
Bu deneyi önceden yapmış olabilirsiniz. Bir civiyi bir çubuk mıknatısa bir kaç kez súrterek mıknatıslayın. Civinin mıknatıslanmasının büyülüğünü çevreden topladığı kağıt parçaları ve tutturucularla test edebilirsiniz. Simdi civiye çekicile birkaç defa vurduktan sonra yeniden mıknatıslanmayı test edin. Civî çeliğe "bölge" açısından neler olduğunu açıklayın.



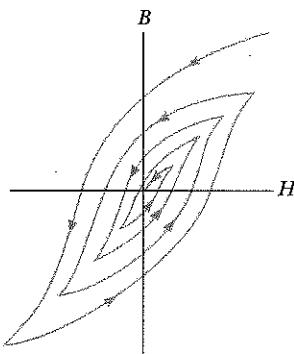
Şekil 30.29 Bir maddenin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan toroid şeklindeki bir sargı düzeneği kesiti. Araştırılacak madde toroidin içine doldurulur ve galvanometrenin bağlı olduğu ikinci devre ile manyetik akı ölçüller.



Şekil 30.30 Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanma ya da hysteresis eğrisi



Şekil 30.31 (a) Sert bir ferromanyetik maddenin ve (b) yumuşak bir ferromanyetik maddenin hysteresis ilmekleri.



Şekil 30.32 Ferromanyetik bir maddeyi peşpeşe hysteresis ilmeklerden geçirerek mıknatışlığını ortadan kaldırma işlemi.

özelliklerine ve uygulanan maksimum alanın şiddetine bağlıdır. "Sert" ferromanyetik maddelerin hysteresis ilmekleri Şekil 30.31a daki gibi genişir. Bu tür maddelerin büyük bir kalıcı mıknatışlanması var demektir. Bu mıknatışlanma bir dış alanla kolaylıkla ortadan kaldırılamaz. Demir gibi "yumuşak" ferromanyetik maddelerin dar bir hysteresis ilmeği ve buna karşılık gelen küçük bir kalıcı mıknatışlanması vardır (Şek. 30.31b). Böyle maddeler kolaylıkla mıknatışlanır ve mıknatışlıklarını kolaylıkla kaldırılabilir. İdeal bir yumuşak ferromanyet olsayıdı hiç hysteresis gösteremeyecek ve böylece hiç kalıcı mıknatışlanması olmayacağındır. Ferromanyetik bir maddenin, Şekil 30.32 de görüldüğü gibi uygulanan alanı yavaş yavaş azaltarak, peşpeşe hysteresis ilmeklerden geçirerek suretiyle mıknatışlığını ortadan kaldırabiliriz.

Sınamaya Sorusu 30.8

Hysteresis ilmeği Şekil 30.31a ya benzeyen madde mi yoksa Şekil 30.31b ye benzeyen madde mi daha iyi sürekli (daimi) mıknatıs yapımına elverişlidir?

Mıknatışlanma eğrisi başka bir nedenden ötürü de kullanışlıdır. Mıknatışlanma eğrisinin içinde kalan alan, maddeyi hysteresis döngüsünden geçirmek için gereken işi temsil eder. Mıknatışlanma sürecinde maddenin kazandığı enerji, dış alanın kaynağından (Yani toroidin devresindeki emk'den) doğar. Mıknatışlanma döngüsü tekrarlandığı zaman, bölgelerin yeniden sıralanışlarından ötürü maddede oluşan kayıp süreçleri manyetik enerjinin iç ısisal enerjiye dönüşmesi ile sonuçlanır. Bu yüzden maddenin sıcaklığı artar. Bu nedenle, değişken alanların etkisindeki aygıtlarda (transformatörler gibi) yumuşak ferromanyetik maddelerden yapılan çekirdekler kullanılır. Bunların hysteresis ilmekleri dar ve dolayısı ile döngü başına enerji kayipları çok küçütür.

Manyetik bilgisayar diskleri, bir ince tabaka halindeki ferromanyetik maddenin bir parçasında \mathbf{B} nin yönünü değiştirerek bilgileri depolamaya yarar. "Floppy" diskler, tabakanın bir dairesel plastik yaprak üzerine yerleştirilmesiyle elde edilir. "Hard disk"ler, her iki tarafında da manyetik kaplama olan bir çok sert tabakadan oluşur. Ses ve görüntü kayıt teypleri, floppy disklerle aynı ilkeye dayanır fakat burada ferromanyetik madde oldukça uzun plastik şerit üzerine yayılmıştır. Bir kafadaki oldukça küçük tel kangallar, hızlı bir şekilde kafanın önünden geçen manyetik maddeye yakın bir konumdadır. Kangallardan geçen akımları değiştirmek, kaydetme maddesini mıknatıslayan bir manyetik alan oluşturur. Bilgileri geri almak için mıknatıslanan madde bir okuma (playback) kangalının önünden geçirilir. Maddenin değişen manyetizması kangalda Bölüm 32 de tartışacağımız gibi, bir akım oluşturur. Bu akım daha sonra, ses veya görüntü aygıtı ile yükseltilir ya da bilgisayar devresi ile işlenir.

paramanyetizma

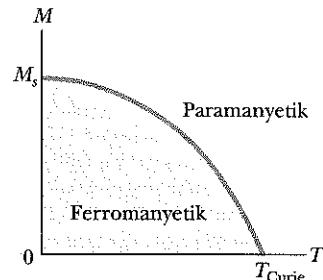
Paramanyetik maddeler pozitif fakat küçük bir manyetik duyguluga sahiptir ($0 < \chi \ll 1$). Bu duyguluk, *sürekli* manyetik dipol momenti olan atomların (ya da iyonların) varlığından kaynaklanır. Bu momentler birbirleri ile yalnız çok zayıf etkileşimde bulunurlar ve bir dış manyetik alan içerisinde bulunmadıkları zaman gelişigüzel yönelmişlerdir. Madde bir dış manyetik alan içerisinde konulduğu zaman, atomik momentleri alan yönünde yönelmeye zorlanırlar. Ancak bu yönelik süreci, momentleri rastgele yönlerde yöneltmeye çalışan ısisal hareketin etkileri ile yarışmak zorundadır.

Pierre Curie (1859-1906) ve ondan sonra pekçok araştırmacı deneyel olarak bazı koşullar altında, paramanyetik bir maddenin miknatıslanmasının manyetik alanla doğru, mutlak sıcaklıkla ise ters orantılı olduğunu buldular:

$$M = C \frac{B_0}{T} \quad (30.35)$$

Bu bağıntiya, keşfedenin anısına, **Curie Yasası** ve **C sabitine de Curie sabiti** denir. $B_0 = 0$ olduğunda miknatıslanma sıfırdır; bu durum dipol momentlerin rastgele yönelmiş olmalarına karşılık gelir. Bağıntı, miknatıslanmanın artan alanla ve azalan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Çok yüksek alanlarda veya çok düşük sıcaklıklarda, miknatıslanma maksimum veya doyum değerine yaklaşırlar. Bu durumda, tüm manyetik dipol momentler uygulanan alan yönünde dizilmişler demektir ve 30.35 Eşitliği artık geçerli değildir.

Ferromanyetik bir madde, sıcaklığı **Curie sıcaklığı** denen bir kritik sıcaklığı ulaştığı ya da geçtiği zaman kalıcı miknatıslanmasını kaybeder ve paramanyetik duruma geçer (Şekil 30.33'e bakınız). Curie sıcaklığının altında, manyetik momentler paralel olarak dizildikleri için madde ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstünde, ısisal enerji, momentlerin gelişigüzel yönelimlerine neden olacak kadar yüksektir; bu yüzden madde paramanyetik olur. Bazı ferromanyetik maddelerin Curie sıcaklıklarının bir listesi Tablo 30.3'de verilmiştir.



Şekil 30.33 Ferromanyetik bir maddenin miknatıslanmasının mutlak sıcaklıkla değişimi. T_c ile gösterilen Curie sıcaklığının altında manyetik momentler aynı yönde dizilirler (sıralanmışlar). Bu bölgede madde ferromanyetik olur. Buna karşın T_c 'nin üstünde ise paramanyetiktir (sıralanmamış).

TABLO 30.3 Bazı Ferromanyetik Maddelerin Curie Sıcaklıkları

Madde	T_c (K)
Demir	1043
Kobalt	1394
Nikel	631
Gaolinyum	317
Fe_2O_3	893

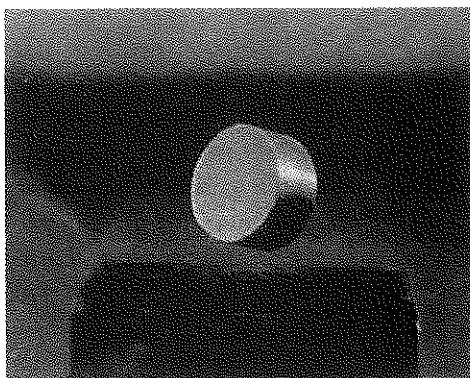
Diyamanyetizma

Diyamanyetik bir maddeye bir dış manyetik alan uygulandığında, bu alana zıt yönde zayıf bir manyetik moment oluşur. Bu diyamanyetik maddelerin bir miknatıslar tarafından zayıfca itilmesine neden olur. Her çeşit maddede diyamanyetizma olmakla birlikte etkileri paramanyetizma ya da ferromanyetizma ya göre daha zayıftır ve ancak diğer etkiler olmadığı zaman gözlenebilirler.

Çekirdeğinin etrafında zıt yönlerde fakat aynı süratla dolanan iki elektronlu klasik atom modelini düşünerek diamanyetizmayı bir ölçüde anlayabiliyoruz. Elektronlar, pozitif yüklü çekirdeğin oluşturduğu çekici elektrostatik kuvvet nedeniyle çembersel yörüngelerde dolanırlar. İki elektronun manyetik momentlerinin büyüklükleri eşit fakat yönleri zıt olduğundan birbirlerini yokederler ve atomun manyetik momenti sıfır olur. Bir dış manyetik alan uygulandığı zaman elektronlar $qv \times B$ ile verilen ek bir kuvvet hissederler. Bu ek kuvvet nedeniyle elektronların gördüğü merkezil kuvvetler artık eşit değildir. Manyetik momenti alana antiparalel olan elektronun yörüngesel süratı artarken, paralel olan elektronun süratı azalır. Sonuçta, elektronların manyetik momentleri birbirlerini yok edemezler ve madde uygulanan manyetik alana zıt yönde net bir manyetik moment edinir.

Web

üzm tanelerini miknatısların ittiği gösteren bir deney için www.exploratorium.edu/snacks/diamagnetism/www/index.html sitesine giriniz.



Şekil 30.34 Sıvı azot sıcaklığına kadar soğutularak, süper iletken duruma geçirilen $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ den oluşan bir diskin üstünde sıvı azot sıcaklığında (77 K) havada askida kalan küçük bir daimi mıknatıs (ABD enerji bilimleri Fen Kaynakları Fotoğraf Araştırmaları Kurumu)

web

Süperiletkenlerin olağanüstü özelliklerinin bir daha ayrıntılı betümlemesi için www.saunderscollege.com/physics/ sitesine giriniz.

Bölüm 27 den anımsayacağınız gibi, süperiletkenler maddeden maddeye değişen kritik sıcaklıkların altındaki sıcaklıklarda dc direnci *sıfır* olan maddelardır. Süperiletkenlerin bazı tipleri, süperiletken duruma geçtiklerinde mükemmel bir diyamanyetizma da gösterirler. Sonuçta, süperiletken içindeki manyetik alanı, sıfır yapacak şekilde uygulanan bir alanı dışarı atar. Bu akıyi dışarı atma olayına **Meissner olayı** denir. Sürekli bir mıknatıs, bir süperiletke ne yaklaştırılırsa iki madde birbirlerini iter. Bu durum Şekil 30.34'te görülmektedir. Bu resim sürekli bir küçük mıknatısın 77 K de tutulan bir süperiletkenin üzerinde asılı kaldığını göstermektedir.

ÖRNEK 30.11 Doyum Mıknatışlanması

Atom başına bir tek çiftlenmemiş elektron spinin olduğunu varsayıarak uzun bir demir silindirin doyum mıknatışlanması bulunuz.

Çözüm Doyum mıknatışlanması, nümunedeki manyetik momentlerin tümü aynı yönde dizildikleri zaman elde edilir. Numunenin birim hacminde n tane atom varsa, doyum mıknatışlanması M_d 'nin değeri,

$$M_d = n\mu$$

olur. Burada μ atomlardan birinin manyetik momentidir. Demirin molekül ağırlığı 55 g/mol ve yoğunluğu 7,9 g/cm³ olduğundan n 'nin değeri $8,6 \times 10^{28}$ atom/m³ dür.

Manyetik momente her atomun bir Bohr mağnetonu (çiftlenmemiş olan spinden ötürü) kadar katkıda bulunduğu varsayıarak,

$$\begin{aligned} M_d &= \left(8,6 \times 10^{28} \frac{\text{atom}}{\text{m}^3} \right) \left(9,27 \times 10^{-24} \frac{\text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{atom}} \right) \\ &= 8,0 \times 10^5 \text{ A/m} \end{aligned}$$

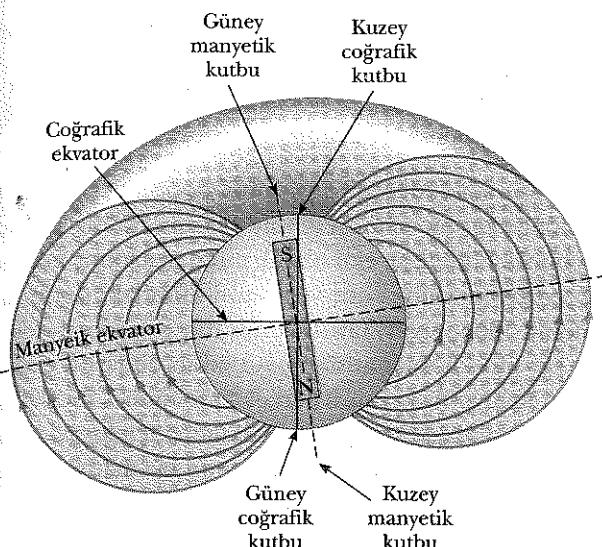
elde ederiz. Bu değer, tavlanmış demirin deneyel olarak bulunan doyum mıknatışmasını yaklaşık olarak yarına eşittir. Bu durum gerçekte, atom başına iki tane çiftlenmemiş elektron spinin olduğunu göstermektedir.

Seçmeli Kesim



YERİN MANYETİK ALANI

Bir pusula mıknatısının, bir kuzey, bir de güney kutbu var demek yerine, bir "kuzeyi gösteren" bir de "güneyi gösteren" kutbu var demek daha doğrudur. Bununla mıknatısın bir kutbunun yerin kuzey coğrafik kutbunu aradığını ya da işaret ettiğini kasdediyoruz. Bir mıknatısın kuzey kutbu Dünya'nın kuzey coğrafik kutbuna doğru çekildiğinden Dünya'nın **kuzey manyetik kutbunun güney coğrafik kutbunun yakınına ve güney manyetik kutbunun ise kuzey coğrafik kutbunun yakınına yerleşmiş** olduğu sonucuna varız. Gerçekte, Şekil 30.35'te resimlendirildiği gibi Yer'in manyetik alanının şekillenimi, bir çok büyük çubuk mıknatısı Yer'in iç bölgesinde derine gömerek elde edilebilecek sonuca oldukça benzemektedir.



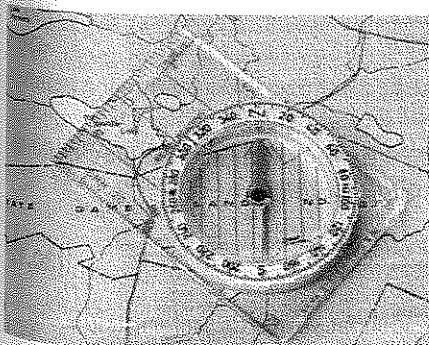
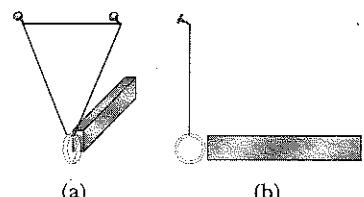
Sekil 30.35 Yer'in manyetik alan çizgileri. Dünya'nın güney manyetik kutbunu ve kuzey coğrafik kutubuna, kuzey manyetik kutbunun ise güney coğrafik kutbuna yakın olduğunu dikkat ediniz.

Bir pusula iğnesi yatay düzlemede olduğu kadar düşey düzlemede de dönen bir biçimde asılırsa, iğne yalnız ekvatora yakın yerlerde yer yüzeyine paraleldir. Kuzeye doğru götürüldükçe iğne gittikçe Dünya yüzeyini gösterecek biçimde döner. Sonuçta, Kanada'da Hudson Körfezinin hemen kuzeyindeki bir noktasında, iğnenin kuzey kutbu tam aşağı doğru yönelir. İlk kez 1832 de bulunan bu yer, Dünya'nın güney manyetik kutbunun bulunduğu konum olarak düşünülmektedir. Bu, Dünya'nın coğrafik kuzey kutbundan yaklaşık 1300 mil uzakta olup tam konumu zamanla çok az değişmektedir. Benzer şekilde, Dünya'nın kuzey manyetik kutbu güney coğrafik kutbundan yaklaşık 1200 mil uzaktadır.

Bu yüzden bir pusula iğnesinin kuzeyi gösterdiğini söylemek ancak yaklaşık olarak doğrudur. Coğrafik Kuzey kutup olarak tanımlanan gerçek kuzey ile bir pusulanın gösterdiği kuzey arasındaki fark, Dünya üzerindeki noktadan noktaya değişir. Bu farka *manyetik sapma* denir. Örneğin Florida'dan Büyük Gölle (Great Lakes) kadar uzanan hat boyunca bir pusula gerçek kuzeyi gösterir, buna karşın Washington'da gerçek kuzeyin 25° doğusuna doğru yönelir.

Ev Deneyi

Altın yüzük bir mıknatıs tarafından çok zayıfça itilir. Bunu görmek için 14 yada 18 ayar bir yüzüğün (a)'da görüldüğü gibi uzun bir iple as. Sahnim yaptır ve peryodunu yaklaşık bul. Şimdi yüzüğün durdur ve hareket etmemesini sağla. Daha sonra kuvvetli bir mıknatısı (b)'deki gibi hızla yüzüye yaklaştır, fakat ona çarpmamaya dikkat et. Sonra mıknatı uzaklaştır. Daha önce bulduğumuz sahnim periyodunuza uygun şekilde hareketi tekrarlayın. Bu tam olarak sahincakte sallanan çocuğun itmeye benzer. Rezonans frekansında küçük bir kuvvet uyguladığınızda büyük genlikler oluşturabilirsiniz. Platin yüzüğünüz var ise, benzer olayı gözleyebilirsiniz. Platin paramagnetik olduğu için mıknatıs tarafından zayıfça çekilir.



Bir pusula iğnesinin kuzey ucu, Dünya'nın güney manyetik kutbunu gösterir. Dünya üzerindeki bir noktasında pusulanın gösterdiği "kuzey" yön, o noktadaki manyetik sapmaya bağlı olarak gerçek coğrafik kuzeyden ayrılr. (George Semple)

Sinama Sorusu 30.9

Dünya'nın çevresine ekvator boyunca çok büyük bir akım ilmeği sararak Dünya'nın (Yer'in) manyetik alanını sıfırlamak isteseydiğimizde akımın doğudan batıya doğru mu yoksa batıdan doğuya doğru mu akması gerekiyor?

Dünyanın manyetik alan deseni dünyanın derinliklerindeki bir çubuk mıknatısının oluşturabileceği bir alan desenine benzeyorsa da, Dünya'nın alan kaynağının, niçin büyük kütleli sürekli olarak mıknatışlanmış maddeler olmayağını anlamak kolaydır. Dünya'nın yüzeyinin altındaki derin tabakalarda büyük miktarda demir filizi vardır, fakat Dünya'nın çekirdeğindeki yüksek sıcaklık bu demirin bir sürekli mıknatışlanmaya sahip olmasını engeller. Bilim adamları, Dünya'nın manyetik alanının gerçek kaynağının, merkezindeki yüksəleyen konveksiyon akımları olduğunu sanmaktadır. İçteki sıvıda dönen yüklü iyonlar ya da elektronlar, bir tel ilmekteki akımın bir manyetik alan oluşturması gibi, bir manyetik alan oluşturabilirler. Bir gezegenin manyetik alan şiddetinin dönme hızına bağlı olduğunu belirten kuvvetli deliller de vardır. Örneğin Jupiter, Dünya'dan daha hızlı döner ve son zamanlardaki uzay araştırmaları Jupiter'in manyetik alanının Dünya'nın kinden daha kuvvetli olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan Venüs, Dünya'dan daha yavaş döner ve manyetik alanının daha zayıf olduğu bulunmuştur. Dünya'nın manyetizmasının nedenleri hakkındaki araştırmalar devam etmektedir.

Dünyanın manyetik alanı ile ilgili ilginç bir rastlantı da son bir milyon yıl içerisinde manyetik alanın bir çok kere yön değiştirdiğinin tesbitidir. Bunun için gerekli kanıtı bazalt (demir içeren bir çeşit taş) vermektedir. Bazalt, okyanus tabanındaki volkanik fiskirmalarla ortaya çıkar. Lavlar soğurken o katılaşır ve Dünya'nın manyetik alanının bir yönünün bir resmini muhafaza eder. Taşların başka yöntemlerle yaşları belirlenerek manyetik alanın bu periyodik olarak yön değiştirmesini ortaya koyan zamansal süreç elde edilmiş olur.

ÖZET

Biot-Savart yasası, kararlı bir I akımı taşıyan bir ds uzunluk elemanın bir P noktasında oluşturduğu $d\mathbf{B}$ manyetik alanının

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{r}}{r^2} \quad (30.1)$$

ile verildiğini belirtir. Burada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ serbest uzayın geçirgenliği r , ds elemanı ile P noktası arasındaki uzaklık ve \hat{r} , ds den P noktasını gösteren bir birim vektördür. P deki toplam alanı bulmak için bu vektörel ifadenin akım dağılımının tamamı üzerinden integralini almamız gereklidir.

I akımı taşıyan uzun, doğrusal bir telden a kadar uzaklıktaki bir noktada oluşan **manyetik alan**

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (30.5)$$

bağıntısı ile verilir. Alan çizgileri, merkezleri tel üzerinde olan iç-içe çemberler biçimindedir.

I_1 ve I_2 akımları taşıyan ve aralarında a uzaklığında bulunan iki paralel iletkenin birbirlerine uyguladıkları birim uzunluk başına kuvvet,

$$\frac{F_B}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (30.12)$$

dir. Kuvvet, akımlar aynı yönde iseler çekici, zıt yönlerde iseler iticidir.

Ampère yasası, kapalı herhangi bir yol boyunca $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin çizgi integralinin eşit olduğunu söyler. Burada I kapalı yolu çevreleyen herhangi bir yüzeyden geçen net toplam kararlı akımdır:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \quad (30.13)$$

Ampère yasası kullanılarak bir toroidin ve bir solenoidin içindeki alanlarının değeri

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R} \quad (\text{toroid}) \quad (30.16)$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu_0 n I \quad (\text{solenoid}) \quad (30.17)$$

ile verildiği bulunur. Burada N toplam sarım sayısıdır. Bir yüzeyden geçen manyetik akı Φ_m ,

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (30.18)$$

ile verilen yüzey integrali ile tanımlanır.

Manyetizmanın Gauss yasası, kapalı herhangi bir yüzeyden geçen net manyetik akının sıfır olduğunu belirtir.

Ampère-Maxwell yasası da denen **Ampère yasasının genelleştirilmiş biçimi**,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (30.22)$$

Bu yasa, manyetik alanların hem iletim akımları, hem de değişken elektrik alanları ile oluşturulabildikleri gerçekini betimlemektedir.

SORULAR

1. Bir akım ilmeğinin oluşturduğu manyetik alan düzgün müdür? Açıklayınız.
2. Akım taşıyan bir iletkenin, etrafında oluşturduğu manyetik alan Biot-Savart yasası kullanılarak hesaplanabilir. Akım, yükün akış hızı olarak tanımlandığına göre durgun yüklerden kaynaklanan manyetik alan hakkında ne sonuca varabilirsiniz? Hareketli yüklerden kaynaklanan hakkında ne diyebilirsiniz?
3. İki paralel telin zıt yönlerde akım taşıdıklarını varsayıarak (a) telleri arasında (b) tellerin dışında, telleri içine alan düzlemlerdeki noktalarda bileşke manyetik alanın özelliğini açıklayınız.
4. Zıt yönlerde akım taşıyan iki paralel telin birbirlerini niçin ittiklerini açıklayınız.
5. Bir devre oluşturulurken, eşit fakat zıt yönlü akımlar taşıyan iki tel yanyana getirilerek birlikte büklürler. Bu yöntem istenmeyen manyetik alanları niçin azaltır?
6. Bir iletkeni çevreleyen her çeşit kapalı yol için Ampère yasası geçerli midir? Böyle her türlü yol için \mathbf{B} yi hesaplamak niçin yararlı değildir.
7. Ampère yasasını Biot-Savart yasası ile karşılaştırınız. Akım taşıyan bir iletkenin oluşturduğu \mathbf{B} 'yi hesaplamak için hangisi daha geneldir?
8. Toroidin içindeki manyetik alan düzgün müdür? Açıklayınız.
9. Manyetizma'daki Ampère yasası ile elektrostatikdeki Gauss yasasının benzerliklerini açıklayınız.
10. İçi boş bakır bir boru, uzunluğu boyunca akım taşımaktadır. Borunun içinde niçin $\mathbf{B} = 0$ dır? Borunun dışında \mathbf{B} sıfır değil midir?
11. Bir solenoidin dışındaki \mathbf{B} niçin sıfır değildir? Bir toroidin dışındaki \mathbf{B} niçin sıfırdır? (\mathbf{B} 'nin çizgilerinin kapalı yollar oluşturmak zorunda olduğunu unutma)
12. Kararlı I akımı taşıyan bir solenoidin (a) uzunluğu iki katına çıkarılır, fakat sarım sayısı değiştirilmese; (b) sarım sayısı iki katına çıkarılır, fakat uzunluğu değiştirilmezse, içindeki manyetik alanın değişimini açıklayınız.
13. Yassi bir iletken ilmek, x -eksenine paralel olan düzgün bir manyetik alana yerleştirilmiştir. İlmeğin hangi yönelimi için yüzeyinden geçen aki maksimum, hangi yönelimi için minimumdur?
14. Ampère yasasının, Maxwell tarafından genelleştirilen biçimindeki yeni kavram nedir?
15. Bir çivinin çevresine çok sayıda tel ilmek sarıldıktan sonra bir pile bağlandığında, M 'nin, H 'nin ve \mathbf{B} 'nin kaynaklarını açıklayınız.

16. Bir mıknatıs bir demir parçasını çeker. Bu parça da daha sonra bir başka demir parçasını çekebilir. Manyetik bölgelerin dizilişlerine dayanarak herbir demir parçasında neler olduğunu açıklayınız.
17. Manyetik alanı bulunmayan bir gezegene deneme ayırtısız çıkışmış bir astronot olduğunuzu varsayıñ. Yanınızda iki tane demir çubuk var; biri mıknatıslanmış öteki ise mıknatıslanmamış olsun. Hangisinin ne olduğunu nasıl belirleyebilirsiniz?
18. Bir mıknatısa bir çekiçle vurmak onun mıknatılığının azalmasına neden olacaktır. Niçin?
19. Bir çiviyi bir mıknatısın kutuplarından herhangi biri çekebilir mi? Mıknatısın yanına getirildiğinde çivinin içinde neler olur? Açıklayınız.
20. Bir Hind hükümdarı bir keresinde kendisinin yerle gök yüzü arasında sonsuza kadar aşağı kalabilecegi biçiminde, kutuplanış düzeltenmiş bir manyetik tabuta gömülmüşünü önermiş. Böyle bir manyetik askı olası mıdır? Tartışınız.
21. Boşlukta niçin $M = 0$ dır? Boşlukta B ile H arasındaki ilişki nedir?
22. Niçin bazı atomlar sürekli manyetik momente sahip ve diğerleri değildir, açıklayın.
23. Bir atomun toplam manyetik momentine hangi faktörler katkıda bulunabilir?
24. Diamanyetik bir maddenin duygunuñu niçin negatifir?
25. Paramanyetik bir madde de diyamanyetizm etkisi niçin savsanabilir?
26. Ferromanyetik bir madde için Curie sıcaklığının önemini açıklayınız.
27. Ferromanyetik, paramanyetik ve diyamanyetik maddelerin arasındaki farkları tartışınız.
28. Sert ve yumuşak ferromanyetik maddelerin arasındaki fark nedir?
29. Bir bilgisayar diskinin yüzeyi "sert" mi yoksa "yumuşak"

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/simbolik problem çifti

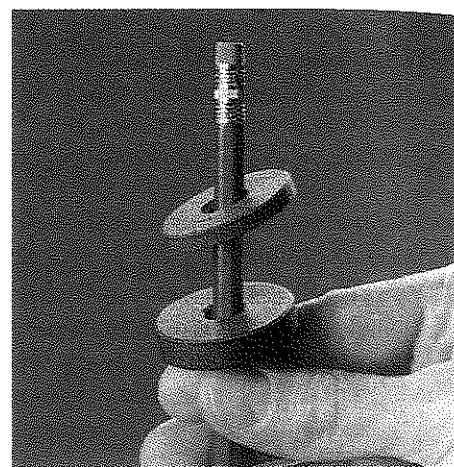
Kesim 30.1 Biot-Savart Yasası

1. Neils Bohr'un 1913 de önerdiği hidrojen atomu modelinde bir elektron, protonun etrafında 5.3×10^{-11} m yarıçaplı bir çembersel yörengede 2.2×10^6 m/s süratla dolanır. Elektronun hareketinin, protonun bulunduğu konumda oluşturduğu manyetik alanın şiddetini bulunuz.

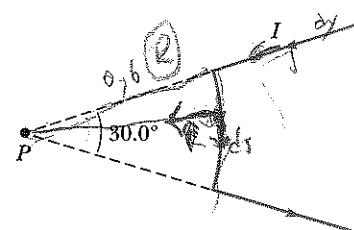
2. *Sekil P30.2* de gösterildiği gibi biçimlendirilen bir akım yolu, yayın merkezi olan *P* noktasında bir manyetik alan oluşturur. *P* den yayı gören açı 30.0° , yayın yarıçapı 0,600 m ve akım 3.00 A ise *P* de oluşturulan alanın büyüklüğü ve yönü nedir?

3. (a) Kenar uzunluğu $\ell = 0,4 \text{ m}$ olan kare biçimli bir iletken ilmekten $I = 10 \text{ A}$ şiddetinde akım geçmektedir (*Sekil P30.3*). Karenin merkezinde oluşan manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz. (b)

- Eğer bu iletken bir çember haline getirilir ve aynı akım geçirilirse merkezindeki manyetik alanın değeri ne olur?
30. Sürekli mıknatısları yapmak için niçin sert ferromanyet maddeler kullanmak gerektiğini açıklayınız.
31. Bir mıknatıs bir teyb şeridini çekebilir mi? (Deneyin, fakat silinmesini istemediğiniz bir bilginin kaydı olduğunu bir şeritle değil!)
32. Sadece kuvvetli bir mıknatıs ve bir tornavida verildiğinde, tornavidayı nasıl mıknatıslayabilir, sonra mıknatılığını nasıl kaldırabilirsiniz?
33. *Sekil Q30.33*, merkezlerinde delik olan iki sürekli mıknatısı göstermektedir. Üstteki mıknatısın alttakini üstünde havada asılı kaldığına dikkat ediniz. (a) Bu nasıl olur? (b) Kurşun kalemin görevi nedir? (c) Bu gözlem sonucuna göre mıknatısların kutupları hakkında ne söyleyebilirsiniz? (d) Üstteki mıknatıs alttus edilmiş olsaydı, ne olacağını tahmin ediniz.

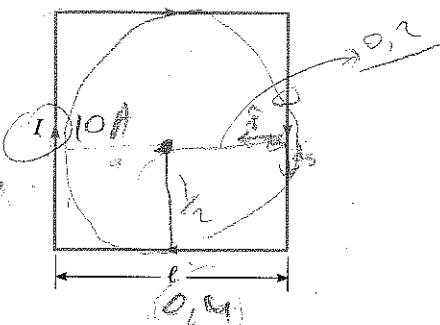


Sekil Q30.33 İki seramik mıknatıs kullanılarak manyetik etkinin gösterimi (CENCO'nun izniyle)



Sekil P30.2

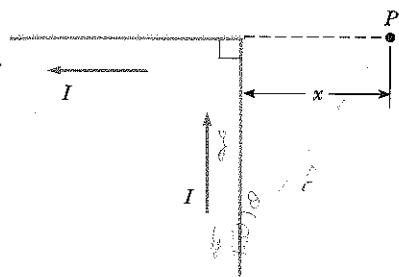
Eğer bu iletken bir çember haline getirilir ve aynı akım geçirilirse merkezindeki manyetik alanın değeri ne olur?



Şekil P30.3

4. 1 A siddetinde akım taşıyan uzun ve ince bir iletkenin 100 cm uzaklıktaki bir noktada manyetik alanın büyüklüğünü hesaplayınız.

- Şekil P30.5'te gösterildiği biçimde dik açıyla bükülen sonsuz uzunlukta bir telin köşesinden x uzaklıktaki bir P noktasında manyetik alan nedir? Tel kararlı bir I akımı taşımaktadır.



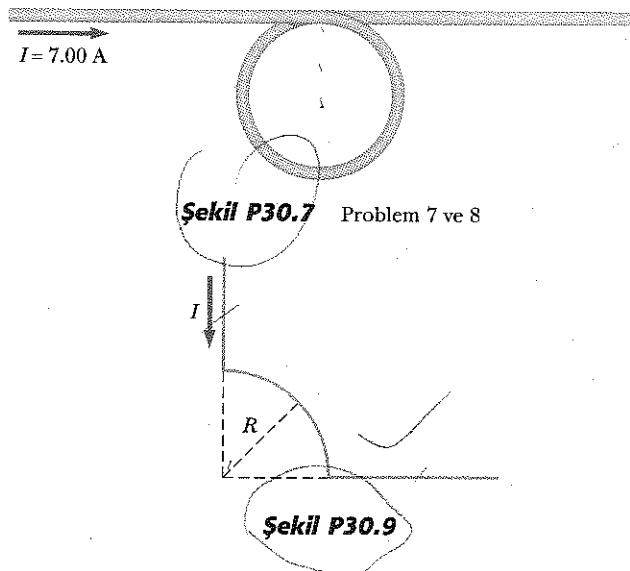
Şekil P30.5

5. 5 A'lık akım taşıyan bir telden bir sarımlı çember şeklinde ilmek yapılması istenmektedir. Manyetik alanın ilmeğin merkezindeki değeri $10 \mu\text{T}$ olduğuna göre ilmeğin yarıçapı ne olmalıdır?

- Bir iletken, Şekil P30.7 de gösterilen gibi, yarıçapı $R = 0,100$ m olan bir çembersel ilmekle iki düz, uzun kesimden oluşmuş. Tel, kağıt düzleminde yatmaktadır ve $I = 7,00$ A'lık bir akım taşımaktadır. Ilmeğin merkezindeki manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

- Bir iletken, Şekil P30.7 de gösterilen gibi, yarıçapı R olan bir çembersel ilmekle iki düz, uzun kesimden oluşmuş. Tel kağıt düzleminde yatmaktadır ve bir I akımı taşımaktadır. Ilmeğin merkezindeki manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

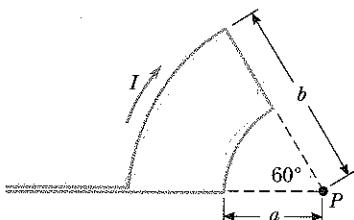
- Şekil P30.9 daki tel parçası $I = 5,00$ A'lık bir akım taşımaktadır. Çembersel yayın yarıçapı $R = 3,00$ cm olduğuna göre başlangıç noktasındaki manyetik alanın yönünü ve büyüklüğünü bulunuz.



Şekil P30.7 Problem 7 ve 8

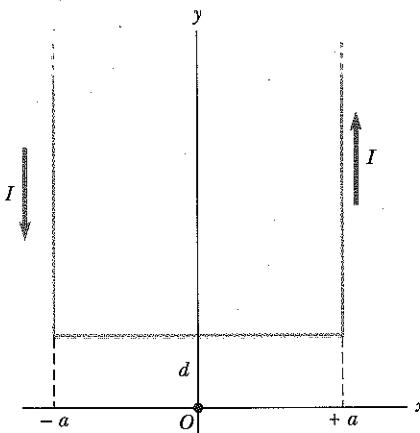
Şekil P30.9

10. I akımı taşıyan R yarıçaplı bir yassı çembersel akım ilmeğinin merkezinin merkezinde olmak üzere x -eksenini ilmeğin ekseni boyunca alınız. x koordinatındaki manyetik alanın büyüklüğünün başlangıçtaki değere oranının grafiğini $x = 0$ ile $x = 5R$ aralığında çiziniz. Bu problemi çözmek için programlanabilir bir hesap makinası veya bir bilgisayar yardımcı olabilir.
11. Şekil P30.11'de gösterilen gibi, yarıçapsal doğrular ve merkezleri P de olan çembersel yaylardan oluşan bir akım ilmeğini gözönüne alınız. P deki B manyetik alanının büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

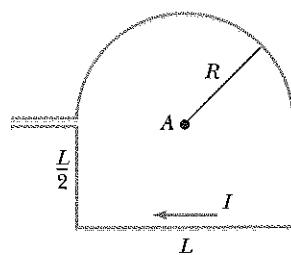


Şekil P30.11

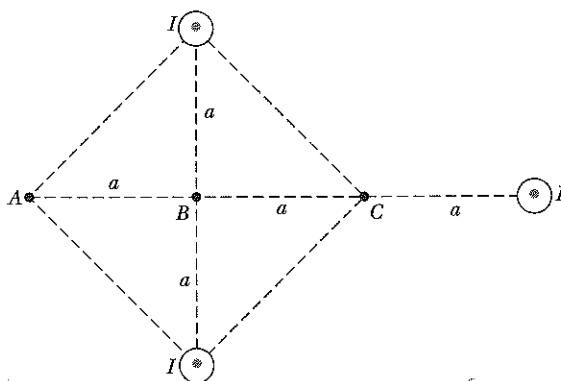
12. Şekil P30.12 de gösterilen akım ilmeğinin başlangıç noktasında oluşturduğu manyetik alını I , a ve d cinsinden bulunuz.
13. Şekil P30.13 deki ilmek bir I akımı taşımaktadır. A noktasındaki manyetik alanı, I , R ve L cinsinden bulunuz.
14. Üç, uzun ve paralel iletken $I = 2,00$ şer Amper akım taşımaktadır. Şekil P30.14, her üç akım da kağıt düzleminde dışa doğru geldiği iletkenlerin uçtan görünenmişidir. Eğer $a = 1,00$ cm ise, A , B ve C noktalarındaki manyetik alanların büyüklük ve yönlerini bulunuz.
15. Şekil 30.15 de görüldüğü gibi, iki uzun paralel iletken her ikiside sayfa düzleminin içine doğru yönel-



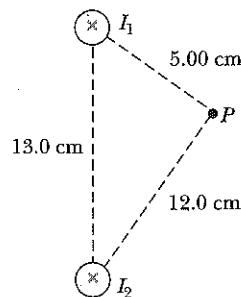
Şekil P30.12



Şekil P30.13



Şekil P30.14



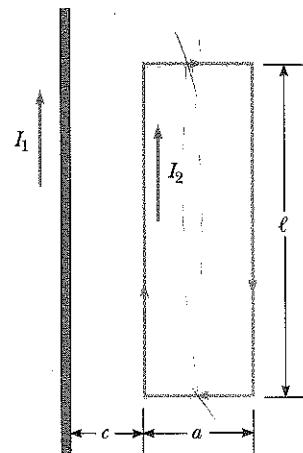
Şekil P30.15

miş $I_1 = 3,00 \text{ A}$ ve $I_2 = 3,00 \text{ A}$ akımları taşımaktadır. P de oluşan net manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

Kesim 30.2 İki Paralel iletken Arasındaki Manyetik Kuvvet

16. Aralarında 10 cm uzaklık bulunan iki uzun paralel iletkenden aynı yönde akım geçmektedir. Birinci iletkenden geçen akım $I_1 = 5,00 \text{ A}$, ikinciden geçen ise $I_2 = 8,00 \text{ A}$ dir. (a) I_1 in I_2 nin bulunduğu yerde oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğü nedir? (b) I_1 in I_2 ye birim uzunluk başına etkiyen kuvvet nedir? (c) I_2 nin I_1 in bulunduğu yerde oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğü nedir? (d) I_2 nin I_1 e birim uzunluğu başına uyguladığı kuvvet nedir?

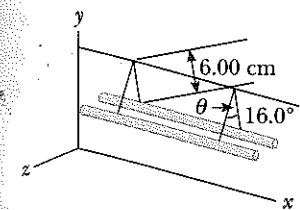
17. Şekil P30.17 deki düzenekte, uzun ve doğru iletken den geçen akım $I_1 = 5 \text{ A}$ olup, $I_2 = 10 \text{ A}'lik akım taşıyan dikdörtgensel ilmeğin düzlemini içinde bulunmaktadır. Boyutlar $c = 0,10 \text{ m}$, $a = 0,15 \text{ m}$ ve $\ell = 0,45 \text{ m}$ dir. I_1 akımı taşıyan iletkenin oluşturduğu manyetik alanın ilmeğe uyguladığı net kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.$



Şekil P30.17

18. Mayetik akının birimine Wilhelm Weber'in adı verildi. Manyetik alanın pratik büyüklüğünün birimine Johann Karl Friedrich Gauss'un adı verildi. Her ikisi de Göttingen'de (Almanya'da) bilim adamı idi. Bunlar bireysel becerilerinin yanı sıra 1833 de birlikte bir telgraf yaptılar, 0, 3 km uzunlukta bir iletim hattının bir ucuna yerleştirilen bir pil ile bir anabardan oluşmuştu ve öteki ucaktaki bir elektromıknatısı çalıştırılmıştı. (Andre Ampère 1821 de elektriksel işaret göndermeyi önerdi; Samuel Morse 1844 de Baltimore ile Washington arasına bir telgraf hattı yaptı.) Weber ve Gauss'un iletim hattının Şekil P30.18 de diyagramlandırıldığı gibi olduğunu varsayıyın. Birim uzunluğunun kütlesi 40 g/m olan iki uzun paralel tel, 6 cm uzunlukta iplerle yatay bir düzlemede asılı vaziyette tutulmaktadır. Her iki telden de aynı büyüklükte I akımı geçtiğinde, tellerin askı ipleri arasındaki θ açısı 16° olacak biçimde, bir

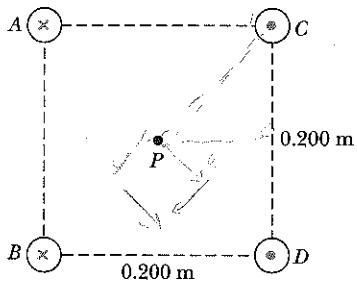
birlerini ittikleri görülmüştür. (a) Akımlar aynı yönde mi yoksa zıt yönlerde midir? (b) Akımın büyüklüğüne bulunuz.



Şekil P30.18

Kesim 30.3 Ampère Yasası

Dört uzun ve paralel iletkenin hepsinden de $I = 5\text{ A}$ geçmektedir. İletkenlerin uçlarının görünüşü Şekil P30.19'da görülmektedir. A ve B noktalarında akımlarının yönü kağıt düzleminin içine (çarpılarla gösterilmiş), C ve D noktalarında ise kağıt düzleminin dışına (noktalarla gösterilmiş) doğrudur. Kenar uzunluğu 0,2 m olan karenin merkezinde bulunan P noktasındaki manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü hesaplayınız.

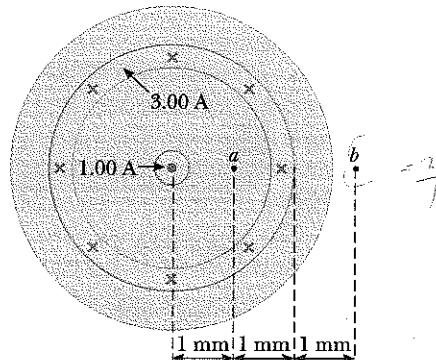


Şekil P30.19

20. Bir yatay masa üzerinde duran uzun, doğrusal tel $1,20 \mu\text{A}$ lik bir akım taşımaktadır. Vakumdaki bir proton, akıma zıt yönde tele paralel olarak $2,30 \times 10^4 \text{ m/s}$ lik bir sabit süratla telin d kadar üstünden geçtiğine göre d nin değerini bulunuz. Dünya'dan kaynaklanan manyetik alanı gözardı edebilirsiniz.

21. Şekil P30.21, bir koaksiyel (ortak-eksenli) kablonun kesit görünümüdür. Merkezdeki iletken bir lastik tabakaya çevrilmiş, bu da dış iletkenle çevrilmiş, dış iletken de bir başka lastik tabakaya çevrilmiş. Özel bir uygulamada, içteki iletkeden geçen akım $1,00 \text{ A}$ olup sayfa düzleminden dışa ve dıştakinden geçen akım ise $3,00 \text{ A}$ olup sayfa düzleminin içine doğrudur. a ve b noktasındaki manyetik alanların büyüklük ve yönlerini bulunuz.

22. $2,00 \text{ A}$ akım taşıyan uzun, doğrusal telden $40,0 \text{ cm}$ uzaklıktaki manyetik alan $1,00 \mu\text{T}$ dir. (a) alan hangi uzaklıktaki $0,1 \mu\text{T}$ olur? (b) Herhangi bir anda evde-



Şekil P30.21

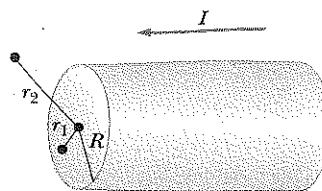
ki uzun bir uzatma kablosundaki iki iletken zıt yönlerde geçen $2,00 \text{ A}$ lik akımlar taşımakta ve aralarındaki uzaklık $3,00 \text{ mm}$ olsun. Doğru kablonun ortasından $40,0 \text{ cm}$ uzaklıktaki iki telin düzlemini üzerindeki bir noktada manyetik alanı bulunuz. (c) Hangi uzaklıkta onda birine düşer? (d) Bir ortak-eksenli kablonunun iç telinden bir yönde $2,00 \text{ A}$ lik bir akım geçerken dış telinden (kininden) buna zıt yönde $2,00 \text{ A}$ lik bir akım geçtiğine göre kablonun dışındaki noktalarda oluşturduğu manyetik alan nedir?

23. Bir Tokomak füzyon reaktörünün manyetik alan kangalları, iç yarıçapı $0,7 \text{ m}$ ve dış yarıçapı $1,3 \text{ m}$ olan bir toroid biçimindedir. Toroidin kahn tellerden oluşan 900 sarımı varsa ve bunların herbirinden 14 kA geçiyorsa, toroidin (a) iç yarıçapı boyunca (b) dış yarıçapı boyunca manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.
24. Yarıçapı $2,5 \text{ cm}$ olan silindirik bir iletken boyunca $I = 2,5 \text{ A}$ akım geçmektedir. Bu akım iletkenin kesitinin her tarafına düzgün olarak dağıldığına göre, (a) iletkenin yarıçapı boyunca yarı yoldaki (yani, $r = R/2$ deki) manyetik alanı bulunuz. (b) İletkenin yüzeyi dışında hangi uzaklıktaki manyetik alanın büyüklüğü, $r = R/2$ deki büyüklüğü ile aynı olur?

- WEB 25. 100 adet uzun, düz ve yalıtlı tellerden yarıçapı $R = 0,5 \text{ cm}$ olan bir silindir oluşturulmuştur. (a) Her telden 2 A şiddetinde akım geçerse demetin merkezinden $0,2 \text{ cm}$ uzaklıktaki bir telin birim uzunluğuna etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir? (b) Demetin dış kenarındaki bir tele (a) şıklıkla hesaplanan kuvvetten büyük bir kuvvet mi, yoksa küçük bir kuvvet mi etki edecektir?

26. Niobiyum metali, 9 K nin altına kadar soğutulduğu zaman bir süperiletken olur. Yüzey manyetik alanı $0,1 \text{ T}$ 'yi geçtiğinde süperiletkenlik ortadan kalkıyor, bir dış alan yokken 2 mm çaplı bir niobiyum telin taşıyabileceği ve süperiletkenliğini koruyabileceği maksimum akımı bulunuz.

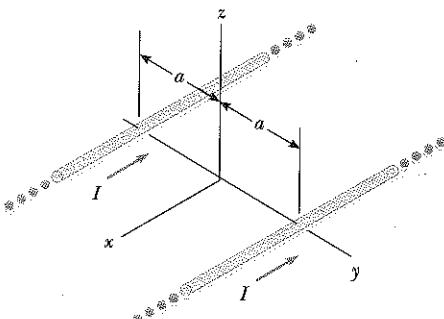
27. Yarıçapı R olan bir uzun, silindirik iletken, Şekil P30.27 de gösterilen gibi bir I akımı taşımaktadır. Ancak, akım yoğunluğu J , iletkenin kesitinde düz-



Şekil P30.27

gün olmayıp $J = br$ bağıntısına göre eksenden uzaklığa fonksiyonudur. Burada b bir sabittir. Silindirin ekseninden (a) bir $r_1 < R$ uzaklıkta ve (b) bir $r_2 > R$ uzaklıkta B manyetik alanını veren ifadeleri bulunuz.

28. Şekil P30.28 de her iki akımın da negatif x yönünde olduğunu varsayıınız. (a) yz -düzlemindeki manyetik alan desenini çiziniz. (b) z ekseni boyunca hangi d uzaklığında manyetik alan maksimumdur?



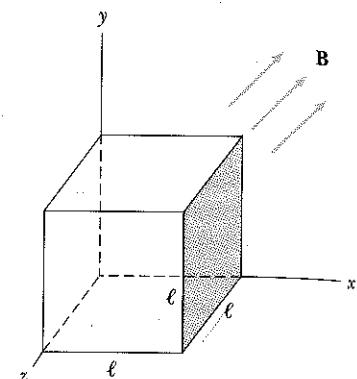
Şekil P30.28

Kesim 30.4 Bir Solenoidin Manyetik Alanı

29. 0,4 m uzunluğunda bir solenoidde (akım makarasında) düzgün sarılmış 1000 sarım bulunmaktadır. Bu uzun solenoidin merkezinde $1,0 \times 10^{-4}$ T büyüklüğünde bir manyetik alan oluşturabilmek için ne kadar akım gereklidir?
30. 10 T'lik manyetik alan oluşturabilecek bir süperiletken solenoidin yapılması istenmektedir. (a) Solenoidin sarımı 2000 sarım/metre ise, ne kadar akım gerekmektedir? (b) Bu manyetik alan, solenoid sarımlarına, birim uzunluk başına ne kadar kuvvet etki ettiğidir?
31. Yarıçapı $R = 5,00$ cm olan bir solenoid, yarıçapı $r = 2,00$ mm, uzunluğu $\ell = 10,0$ m ($\ell \gg R$) ve özdirençi $\rho = 1,70 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ olan uzun bir telden yapılmıştır. Tel emk $i \mathcal{E} = 20,0$ V olan bir üretece bağlanırsa, solenoidin merkezindeki manyetik alanı bulunuz.
32. Bir kenarının uzunluğu 2,00 cm olan bir sarımlı kare tel ilmekten saat yönünde 0,200 A lik bir akım geçmektedir. İmek, düzlemi solenoidin manyetik alanına dik olacak biçimde bir solenoidin içine yerleştiriliyor. Solenoidin birim uzunlığında 30 sarım/m bulunmakta ve saat yönünde 15,0 A lik bir akım taşımakta olsun. İlmeğin her kenarının gördüğü kuvveti ve ilmeğe etkiyen torku bulunuz.

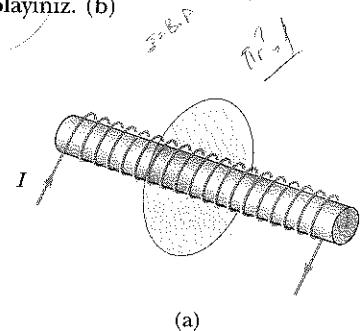
Kesim 30.5 Manyetik Aku

33. Kenar uzunluğu $\ell = 2,5$ cm olan bir küb, Şekil P30.33'de gösterildiği gibi, $\mathbf{B} = (5\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + 3\mathbf{k}) \text{ T}$ ifadesi ile verilen düzgün bir manyetik alan içine yerleştirilmiştir. (a) Kübün boyalı yüzünden geçen akımı hesaplayınız. (b) Kübün altı yüzünden geçen toplam akı nedir?

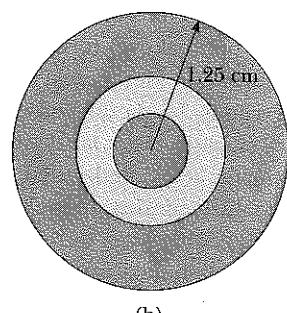


Şekil P30.33

34. Çapı 2,5 cm ve uzunluğu 30 cm olan bir solenoidin sarım sayısı 300 ve geçen akım 12 A dir. Şekil P30.34a'da görüldüğü gibi merkezi solenoidin ekseni üzerinde olan ve bu eksene dik olarak yerleştirilen 5 cm yarıçaplı bir diskin yüzeyinden geçen akımı hesaplayınız. (b)

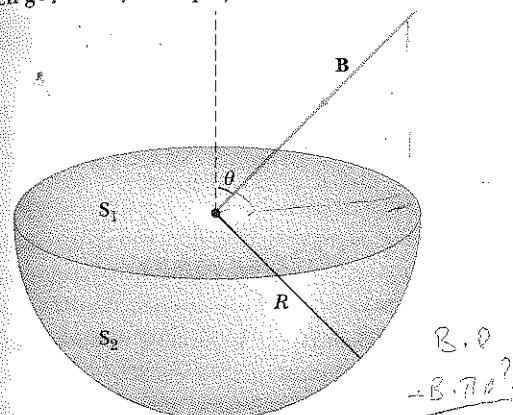


(a)



Şekil P30.34

Şekil P30.34b, aynı solenoidin büyütülmüş önden görünüşünü göstermektedir. İç yarıçapı 0,4 cm ve dış yarıçapı 0,8 cm olan ve mavi ile belirtilen bölge den geçen akımı hesaplayınız.



Şekil 30.35

35. Şekil P30.3 de görülen yarı-küresel kapalı yüzeyi veriliyor. Yarı-küre düşeye θ açısı yapan bir düzgün manyetik alan içersine konursa, (a) S_1 yatay yüzeyinden geçen ve (b) S_2 yarı-küresel yüzeyinden geçen manyetik akımı bulunuz.

Kesim 30.6 Manyetizmada Gauss Yasası

Kesim 30.7 Yerdeğistirme Akımı ve Ampère Yasasıının Genel Biçimi

36. Şiddeti 0,2 A olan bir akım, yarıçapı 10 cm olan yarıspherical plakalı bir kondansatörü yüklemektedir. Plaka aralığı 4 mm ise, plakaların arasındaki bölgede (a) elektrik alanın artış hızı dE/dt ne kadardır? (b) merkezden itibaren 5 cm uzaklıktaki manyetik alan ne kadardır?
37. Şiddeti 0,1 A olan bir akım, kenarı 5 cm olan kare plakalı kondansatörü yüklemektedir. Plaka aralığı 4 mm ise, (a) plakaların arasında elektrik akışının zamanla değişim hızı $d\Phi_E/dt$, (b) yerdeğistirme akımı I_d ne kadardır?

(Seçmeli)

Kesim 30.8 Madde İçinde Manyetizma

38. Bohr'un 1913 model hidrojen atomunda elektron, yarıçapı $5,29 \times 10^{-11}$ m olan çember bir yörüngede $2,19 \times 10^6$ m/s süratla dolanmaktadır. (a) Elektronun hareketinden kaynaklanan manyetik momentinin büyüklüğü nedir? (b) Elektron yatay bir çember üzerinde saatin dönmeye yönyle ters yönde dolanıyorsa bu manyetik moment vektörünün yönü nedir?
39. Ortalama yarıçapı 20 cm ve sarım sayısı 630 olan toroid şeklindeki bir sargı (Şekil P30.29'daki gibi) manyetik duygululuğu $\chi = 100$ olan çelik tozu ile doldurulmuştur. Sarımlardaki akım 3 A ise toroidin içindeki B 'yi (düzgün varsayıñ) bulunuz.
40. Demir-çekirdekli bir toroidde 1,3 T'lik bir manyetik alan oluşturulacaktır. Toroidin ortalamama yarıçapı 10

cm ve manyetik geçirgenliği $5000 \mu_0$ dir. 470 sarımı varsa ne kadar akım gerekmektedir? Demir halkanın kahnlığı 10 cm'den azdır ve dolayısı ile madde içindeki alan hemen hemen düzgündür.

41. Ortalama yarıçapı 20 cm ve kesit alanı 8 cm^2 olan bir demir halkanın ($\mu_m = 750 \mu_0$) üzerinde 500 sarımı vardır. Akım 0,5 A olduğunda bu Rowland halkasındaki manyetik akı, Φ_B 'yi bulunuz.
42. Yarıçapı 2,00 cm ve üzerindeki toplam yük $6,00 \mu\text{C}$ olan bir düzgün halka, merkezinden geçen ve düzleminde dik olan bir eksen etrafında $4,00 \text{ rad/s}$ lik sabit bir açısal hızla dönmektedir. Dönen bu halkanın manyetik momenti nedir?
43. Miknatıslanması 880 kA/m ve manyetik alanı $4,4 \text{ T}$ olan miknatıslanmış bir madde için manyetik alan şiddeti H 'yi hesaplayınız.
44. Doyum halinde, demirdeki spinlerin sıralanışı toplam B manyetik alanına 2 T kadar katkıda bulunabilir. Her elektron $9,27 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ (1 Bohr magnetonu) değerinde bir manyetik moment katkısında bulunursa, demirin doyum manyetik alanına atom başına kaç tane elektron katkıda bulunur? (İpucu: m^3 de $8,5 \times 10^{28}$ demir atomu vardır).
45. (a) Curie yasasının şu şekilde söylenebileceğini gösteriniz: $\chi = C\mu_0/T$ bağıntısına göre, (burada C Curie sabitidir) bir paramanyetik maddenin manyetik duygululuğu mutlak sıcaklıkta ters orantılıdır. (b) Krom için Curie sabitini hesaplayınız.

(Seçmeli)

Kesim 30.9 Dünyanın Manyetik Alanı

46. 30 cm çaplı ve 5 sarımlı çember şeklindeki bir kangal, ekseni dünyanın manyetik alanının yatay bileşeneine dik olacak biçimde, dik bir düzlem içinde yöneltilmiştir. Kangalın merkezine yerleştirilen yatay bir pusula, kangala verilen 0,60 A şiddetinde bir akımla manyetik kuzyeden 45° saptırıyor. (a) Dünyanın manyetik alanının yatay bileşeni ne kadardır? (b) Kangaldaki akım kesilsin. Düşey bir kuzyey-güney düzleminde dönebilen bir pusula iğnesi, düşeye 13° lik açı yaparsa, bu konumda dünyanın manyetik alanının toplam büyüklüğü ne kadardır?

- Dünyanın manyetik momenti yaklaşık $8,0 \times 10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ dir. (a) Bu, kocaman bir demir yiğininin maksimum ölçüde miknatıslanmasından kaynaklansayıdı, kaç tane çiftlenmemiş elketrona karşılık gelecekti? (b) Demir atomu başına 2 tane çiftlenmemiş elektron alsak, üstteki manyetik moment kaç kilogram demire karşılık gelecekti? (Demirin yoğunluğu 7900 kg/m^3 ve m^3 de yaklaşık $8,5 \times 10^{28}$ demir atomu bulunur.)

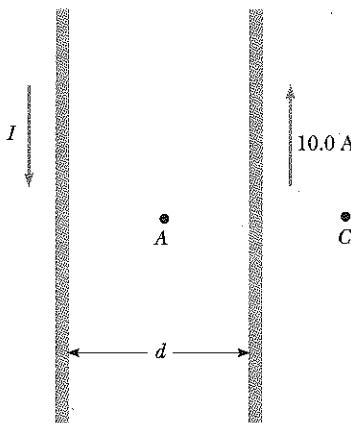
EK PROBLEMLER

48. Şimşek çakması, kısa bir zaman süresinde $1,00 \times 10^4$ A şiddetinde bir akım taşıyabilir. Yıldırının düşüğü

noktadan 100 m uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alan ne kadardır?

49. Dünya'nın manyetik alanının büyüklüğü her iki kutupta da yaklaşık $7,00 \times 10^{-5}$ T'dır. Bu alanı ekvatorun çevresine yereşirilen bir akım ilmeğinin oluşturduğu varsayılarınız bir modeli kullanarak, böyle bir alanı oluşturabilecek olan akımın büyüklüğünü bulunuz. Bunu yaparken Dünya'nın içindeki manyetik maddelerin miknatıslanmalarını dikkate alınmayın. (Dünya'nın yarıçapı $R_D = 6,37 \times 10^6$ m olsun).

50. Şekil P30.50 de gösterildiği gibi iki paralel iletken zit yönlerde akımlar taşımaktadır. İletkenin birinden geçen akım 10 A'dır. A noktası teller arası uzaklığın *orta noktası*, C noktası ise 10-A akımı taşıyan telin sağına doğru $d/2$ uzaklıktadır. $d = 18$ cm ve I, C noktasında manyetik alan sıfır olacak şekilde ayarlanmış ise, (a) I akımının değerini (b) A'daki manyetik alanın değerini bulunuz.

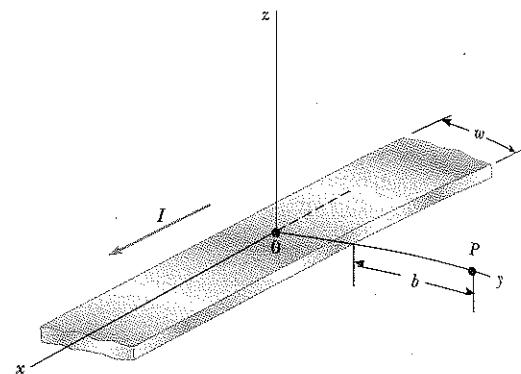


Şekil P30.50

51. Bir arabanın ön çamurluğunun ortasına bir pusula yerleştirdiğinizi varsayıñ. Farları açığınız zaman onları besleyen akımın pusulayı koyduğunuz yerde oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü kabaca hesaplayınız. Bulduğunuz sonucu Dünya'nın manyetik alanı ile karşılaştırın. Arabanın çamurluğunun hemen hemen plastik olduğunu varsayıbilirsiniz.

52. r telin ekseninden uzaklığı göstermek üzere $r \leq R$ için akım yoğunluğu $J(r) = J_0 (1 - r^2/R^2)$ ve $r > R$ için $J(r) = 0$ olan R yarıçaplı bir uzun, silindirik tel düşünün. (a) telin içindeki ($r \leq R$) ve dışındaki ($r > R$) manyetik alanı bulunuz. (b) Manyetik alanın büyüklüğünü r nin fonksiyonu olarak çizin. (c) Manyetik alanın maksimum olduğu konumu ve maksimum değerini bulunuz.

53. Genişliği w olan oldukça uzun ve ince bir metal şeritten Şekil P30.53'teki gibi uzunluğu boyunca bir I akımı geçmektedir. Şeritten b kadar uzaklıkta fakat



Şekil P30.53

şerit düzlemindeki bulunan P noktasındaki manyetik alanı bulunuz.

54. Bir öğrenci bir araştırma projesi için, içinde $0,08$ T büyüklüğünde bir manyetik alan oluşturabilen bir solenoide gereksinim duyar. Şiddeti $1,0$ A olan bir akım ve çapı $0,50$ mm olan bir tel kullanılmaya karar verir. Çapı $1,0$ cm ve uzunluğu $10,0$ cm olan yalıtkan bir kalıp üzerine tabakalar halinde sararak solenoidi oluşturur. Tel tabakaların sayısını ve kullanılan telin toplam uzunluğunu bulunuz.

55. İletken olmayan $10,0$ cm yarıçaplı bir halka, $10,0 \mu$ luk toplam pozitif yükle düzgünce yüklenmiştir. Bu halka, düzlemine dik olan ve merkezinden geçen bir eksen etrafında $20,0$ rad/s'lik sabit bir açısal hızla dönmektedir. Halkanın merkezinden $5,00$ cm uzaklıktaki eksen üzerinde merkezden $R/2$ m uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

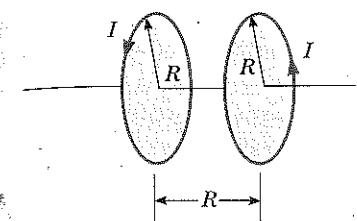
56. İletken olmayan R yarıçaplı bir halka, toplam pozitif q yükü ile düzgün olarak yüküldür. Bu halka, düzlemine dik olan ve merkezinden geçen bir eksen etrafında sabit bir ω açısal sürat ile dönmektedir. Halkanın eksen üzerinde merkezden $R/2$ m uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alanın büyüklüğünü nedir?

57. Ortak bir eksene dik olan R yarıçaplı çember şeklinde iki kangal alalım. Şekil P30.57'de gösterildiği gibi kangalların merkezleri arasındaki uzaklık R ve her iki kangaldan da aynı yönde birer kararlı I akımı geçmektedir. (a) Ortak eksen üzerinde kangalların ve herhangi birinin merkezinden x uzaklıktaki bir noktada manyetik alanın,

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \left[\frac{1}{(R^2 + x^2)^{3/2}} + \frac{1}{(2R^2 + x^2 - 2Rx)^{3/2}} \right]$$

olduğunu gösteriniz. (b) Kangalların arasındaki *orta* noktada dB/dx ve d^2B/dx^2 nin herikisinin de sıfır olduğunu gösteriniz. Bu demektir ki kangalların arasında orta bölgedeki manyetik alan düzgündür. Bu şekillenimdeki kangallara **Helmholtz kangalları** (binleri) denir.

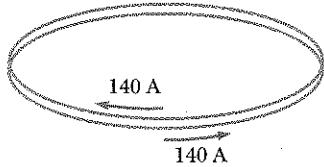
58. Herbirinin yarıçapı $0,50$ m ve sarım sayısı 100 olan iki özdes, yassi ve çember şeklinde tel kangal verili-



Şekil P30.57 Problem 57 ve 58

yor. Bu kangallar, Helmholtz kangaları takımı biçimde paralel ve aralarındaki uzaklık 0,50 m olarak düzenlenirler (Şekil P30.57) ve her iki kangaldan da 10 A akım geçirilirse, kangalların ekseni üzerinde olmak şartıyla aralarındaki orta noktada manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

59. Ortak-eksenli paralel ve hemen hemen birbirine dokunmak üzere olan iki çember şeklindeki ilmekler arasında 1 mm uzaklık vardır (Şekil P30.59). Her bir ilmeğin yarıçapı 10 cm olup, üstteki saat yönünde 140 A'lık bir akım, alttaki ise saatin tersi yönünde yine 140 A'lık bir akım taşımaktadır. (a) Alttaşı ilmeğin üsttekine uyguladığı manyetik kuvveti bulunuz. (b) Üsttekine ilmeğin kütlesi 0,021 kg'dır. Üsttekine etkiyen kuvvetlerin (a) şıklındaki kuvvet ve ağırlığından ibaret olduğunu varsayıarak ivmesini hesaplayınız.



Şekil P30.59

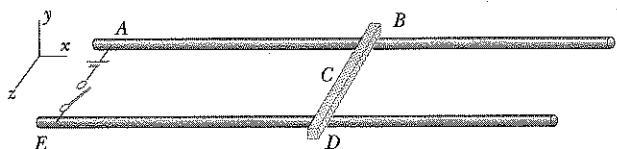
60. Bir elektrik alan içerisindeki hangi cisimlere kuvvet etki eder? Bu sorunun yanıtını Bölüm 23 verebilir: Alanı oluşturan yükün dışındaki hareketli ya da durum herhangi bir elektrik yüküne bir elektrik alanı ne oluşturur? Bölüm 23 de tartışıldığı gibi durgun ya da hereketli herhangi bir yük oluşturabilir. Bir manyetik alan içerisindeki hangi cisimlere kuvvet etki eder? Bölüm 29 da ortaya konulduğu gibi alanı oluşturan akım ya da hereketli yükün dışında bir elektrik akımı ya da hereketli bir elektrik yüküne. Bir manyetik alanı ne oluşturur? Kesim 30.11 de bulundığınız gibi bir elektrik akımı ya da bu problemde olduğu gibi bir hereketli elektrik yükü oluşturur. Bir manyetik alanı bir hereketli yükün nasıl oluşturduğunu gösterebilme için v hızı ile hareket eden bir q yükü alalım. Yukten herhangi bir konumu gösteren birim vektör $\hat{r} = \mathbf{r}/r$ olsun. Söz konusu konumdaki manyetik alanın

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times \hat{r}}{r^2}$$

ile verildiğini gösterin. (b) $2,00 \times 10^7 \text{ m/s}$ süratla he-

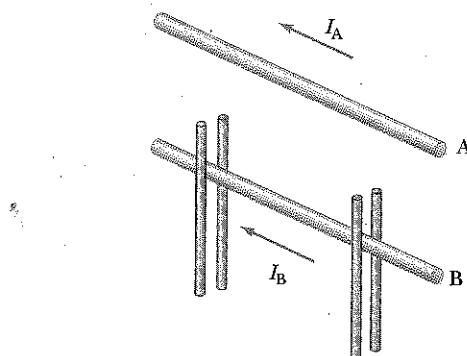
reket eden bir protonun yönüne dik 1,00 mm uzaklıktaki manyetik alanın büyüklüğünü bulun. (c) Bu noktada aynı süratla fakat zıt yönde gitmekte olan bir başka protona etkiyen manyetik kuvveti bulunuz. (d) İkinci protona etkiyen elektriksel kuvveti bulunuz.

61. Uzaya kimyasal roketsiz mermi gönderme ve savaş için yerden havaya savunma silahı olarak *ray türfekleri* önerildi. *Ray türfekinin* masa-üstü bir moledi (Şekil P30.61), aralarındaki uzaklık 3,50 cm olan iki uzun paralel yatay rayla bunlar arasına kütlesi 3,00 g olan bir *BD* çubuğuının oluşturduğu köprüden oluşur. Çubuk başlangıçta rayların ortasında durmaka fakat sürtünmesiz olarak kayabilecek şekilde serbesttir. Anahtar kapatıldığında, ABCDEA devresinde çabucak bir elektrik akımı doğar. Raylar ve çubuğu elektriksel direnci oldukça azdır ve güç kanağı 24,0 A akım taşıyan oldukça uzun doğru bir telden 1,75 cm uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alanın büyüklüğünü bulun. (b) (*İpucu:* Biot-Savart yasasından nasıl bir sonuç çıkarabileceğinizi düşünün) (c) *BD* çubuğu boyunca diğer noktalarda alan *C*deki ile aynı yönde fakat daha büyuktur. *BD* boyunca ortalamala etkin alanın, *C*deki alanın 5 katı olduğunu varsayıyın. Bu varsayıma göre çubuga etkiyen vektörel kuvveti bulun. (e) çubuk sabit bir ivmeye mi hareket eder? (f) çubuk rayların ucuna doğru 130 cm yol aldığı anda hızı ne olur?

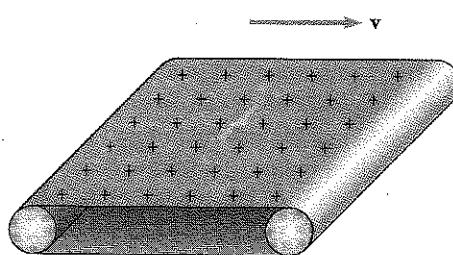


Şekil P30.61

62. İki uzun, paralel iletken Şekil P30.62 de görülen gibi aynı yönde akım taşımaktadır. A iletkeni, 150 A'lık bir akım taşımakta ve bulunduğu konumda sıkıcı tutulmaktadır. B iletkeni, I_B akımını taşımakta ve A ya paralel olarak iki yalıtkan yönlendirici arasında aşağı ve yukarı serbestçe kayabilemektedir. iletkeninin lineer yoğunluğu $0,10 \text{ g/cm}$ ise dengeye ulaştığında iki iletken arasındaki uzaklık 2,5 cm olduğuna göre I_B akımının değeri nedir? Şekil P30.63 deki gibi bir büyük yalıtkan kayışın üzerinde soldaki milin üst hisasından yük püskürtülüyor. Kayış, gösterildiği gibi millerin arasında v sürat ile hareket ederken düzgün yüzeyce yük yoğunluğu, σ olan bir yük taşamaktadır. Yük sağdaki mil üzerinde bulunan bir silici ile alnıp uzaklaştırılıyor. Hareketli kayışın yüzeyinin hemen üstünde bir nokta alınır. (a) Bu noktadaki \mathbf{B} manyetik alanının büyüklüğünü veren bir bağıntı bulunuz. (b) Eğer kayış pozitif yük-



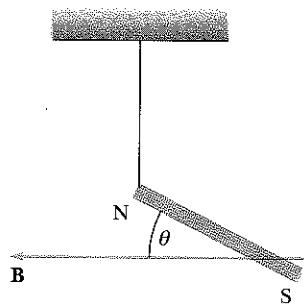
Şekil P30.62



Şekil P30.63

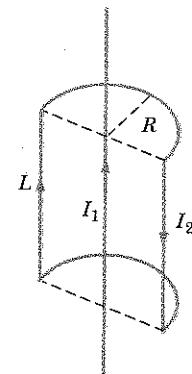
le yüklenmişse B nin yönü nedir? (Not: kayış sonsuz bir yaprak gibi düşünülebilir.)

64. Paramanyetik bir madde 4,0 K'lik bir sıcaklıkta tutulurken 5,0 T büyüklüğünde bir manyetik alan içine konulursa, doyum mıknatıslanmasının %10 una ulaştığı görülmüyör. Numunedeki manyetik atomların yoğunluğunun 8×10^{27} atom/m³ ve atom başına manyetik momentin 5 Bohr mağnetonu olduğunu varsayıarak maddenin Curie sabitini bulunuz.
65. Bir çubuk mıknatıs (kütlesi = 39,4 g, manyetik momenti = 7,65 J/T, uzunluğu = 10 cm) bir sicimle tavaa asılmıştır. Şekil P30.65 de gösterildiği gibi, düzgün bir dış manyetik alan yatay olarak uygulanınca mıknatıs yatayla θ açısı yapacak şekilde dengeye geliyor. $\theta = 5^\circ$ ise, uygulanan manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.



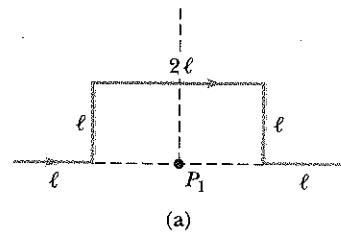
Şekil P30.65

66. Sonsuz uzunlukta doğrusal bir telden I_1 akımı geçmekte iken, Şekil P30.66 da gösterildiği gibi bir ilmek kışmen çevrilmiştir. İlmek uzunluğu L , yarıçapı R ve I_2 akımı taşımaktadır. İlmeğin ekseni teleskopikdir. İlmeğin etkiyen kuvveti bulunuz.

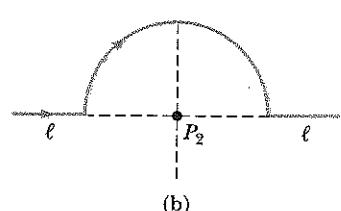


Şekil P30.66

67. Bir tel Şekil P30.67a da gösterilen biçimde bükülüyor ve teldeki akım I olduğu zaman P_1 'deki manyetik alan ölçülüyor. Aynı tel daha sonra, Şekil P30.67b'de gösterilen biçimde sokuluyor ve akım I olduğunda P_2 deki manyetik alan ölçülüyor. Her iki durumda da telin toplam uzunluğu aynı ise, B_1/B_2 oranı nedir?



(a)



(b)

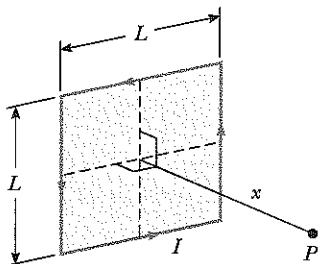
Şekil P30.67

68. 1962 yılında Oklahomada, Tusla Jeofizik gözlemevinde bir büyük hortumun manyetik alanı ölçülmüş. Hortum gözlemesinin 9,00 km doğusunda bulunduğu bir anda oluşturduğu manyetik alanın $B = 15,0$ nT büyüklüğünde ve kuzeşe doğru yönemi olduğunu göre, bir uzun doğrusal tel olarak modellenebilen hortumdan yukarı ya da aşağı yönde akan akım ne kadardır?

70. Bir tel, kenar uzunluğu L olan kare şeklinde bükülmüştür. (Şek. P30.69). İlmekteki akım I olduğu zaman, ekseni üzerinde merkezinden x uzaklıktaki bir P noktasındaki manyetik alanın

$$B = \frac{\mu_0 I L^2}{2\pi(x^2 + L^2/4)\sqrt{x^2 + L^2/2}}$$

ile verildiğini gösteriniz.

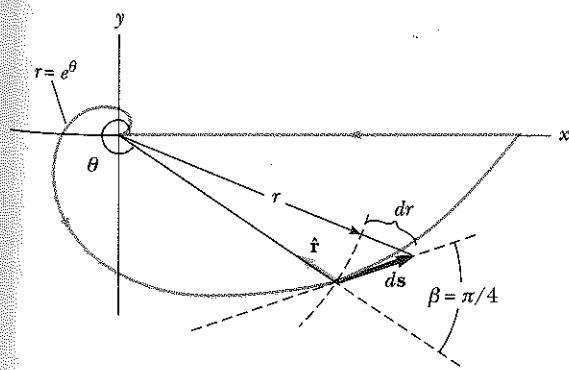


Şekil P30.69

71. x yönünde yönelmiş düzgün olmayan bir manyetik alanın yönelttiği bir μ manyetik dipolune etkiyen kuwert $F_x = |\mu| dB/dx$ ile verilir. Yarıçapları R olan iki yassi tel ilmeğin her ikisinden de I akımı geçtiğini varsayıyınız. (a) İlmekler ortak-eksenli olarak düzenlenmiş ve değişken bir x uzaklığı kadar ayrık iseler ($x > R$), aralarındaki manyetik kuwertin $1/x^4$ biçiminde değiştiğini gösteriniz. (b) $I = 10$ A, $R = 0,5$ cm ve $x = 5,0$ cm ise bu kuwertin büyüklüğünü bulunuz.

72. Üzerinden I akımı geçen bir tel Şekil P30.71'de görüldüğü gibi $\theta = 0$ ile $\theta = 2\pi$ aralığında değişen bir $r = e^\theta$ üstel spirali biçiminde bükülmüştür. Tam bir ilmek haline getirmek için spiralin ucları x ekseni üzerindeki doğru bir telle birleştirilmiştir. Başlangıç noktasında \mathbf{B} 'nin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz. (İpucu: Biot-Savart yasasını kullanınız. $r = f(\theta)$ eğrisi üzerindeki herhangi bir noktaya giden yarıçapsal çizgi ile o noktadan geçen teget çizgi arasındaki β açısı, fonksiyona aşağıdaki biçimde bağlıdır:

$$\tan \beta = \frac{r}{dr/d\theta}$$



Şekil P30.71

Bu durumda $r = e^\theta$ olduğundan $\tan \beta = 1$ ve $\beta = \pi/4$ dür. Bu nedenle ds ve \hat{t} arasındaki açı $\pi - \beta = 3\pi/4$ olur. Ayrıca

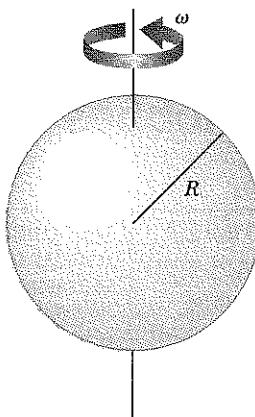
$$ds = \frac{dr}{\sin \pi/4} = \sqrt{2} dr$$

72. Tablo P30.72, bir ferromanyetik maddeden alınan verileri içermektedir. (a) Verilenden bir miknatışlanma eğrisi elde edin. $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M}$ olduğunu unutma. B ve B_0 çiftinin herbiri için B/B_0 oranını bulun ve B/B_0 'ın B_0 'a karşı değişim grafiğini çizin. (B/B_0 oranına bağlı geçingenlik denir ve induksiyonla oluşan manyetik alanın bir ölçüsüdür.

TABLO P30.72

$B(T)$	$B_0(T)$
0,2	$4,8 \times 10^{-5}$
0,4	$7,0 \times 10^{-5}$
0,6	$8,8 \times 10^{-5}$
0,8	$1,2 \times 10^{-4}$
1,0	$1,8 \times 10^{-4}$
1,2	$3,1 \times 10^{-4}$
1,4	$8,7 \times 10^{-4}$
1,6	$3,4 \times 10^{-3}$
1,8	$1,2 \times 10^{-1}$

73. Tarama Problemi. Yarıçapı R olan bir kürenin, hacimce yük yoğunluğu ρ sabittir. Kütle, merkezinden geçen bir eksen etrafında ω açısal hızı ile katı bir cisim gibi dönerse, merkezindeki manyetik alanı bulunuz (Şekil P30.73).

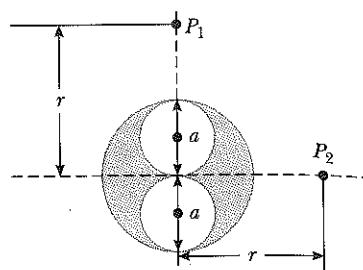


Şekil P30.73 Problem 73 ve 74

74. Tarama Problemi. Yarıçapı R olan bir kürenin hacimce yük yoğunluğu ρ sabittir. Küre, merkezinden

geçen bir eksen etrafında ω açısal hızı ile katı bir cisim gibi dönerse, manyetik dipol momentini bulunuz (Şekil P30.73 e bakınız).

75. Yarıçapı a olan bir uzun, silindir biçimli iletken, Şekil P30.75 deki kesitten görüldüğü gibi, uzunluğu boyunca uzanan a çaplı iki silindirik deliğe sahiptir. Bir I akımı, kağıt düzleminden dışa doğru yönelmiş ve iletkenin kesitine düzgün olarak dağılmıştır. (a) P_1 ve P_2 noktalarındaki manyetik alanların büyüklüklerini ve yönlerini μ_0 , I , r ve a cinsinden bulunuz.



Şekil P30.75

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

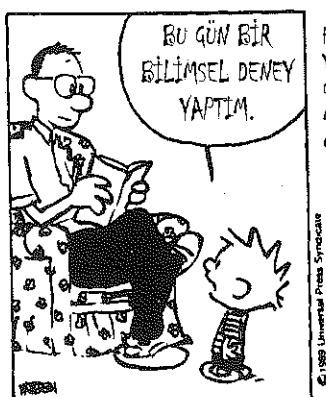
- 30.1 (c) $F_1 = F_2$; Newton'un üçüncü yasasından ötürü. Bu yanıt ulaşmanın bir başka yolu da akımların çarpımının (2A) (6A) veya (6A)(2A) olmasının Eşitlik 30.11'in sonucunu değiştirmeyeceğini görmektir.
- 30.2 Birbirlerine yaklaşırlar; çünkü sarımlar birbirlerine paralel akım taşıyan teller gibi davranışırlar ve bu yüzden birbirlerini çekerler.
- 30.3 b , d , a , c dir. Eşitlik 30.13, çizgi integralinin değerinin yalnız herbir kapalı ilmeğin çevirdiği bir yüzeyden geçen net akıma bağlı olduğunu belirtmektedir. b yolu 1A, d yolu 3A, a yolu 4A ve c yolu ise 6A lik birer net akımı sarmaktadır.
- 30.4 b , sonra $a = c = d$ dir. a , c ve d yolları sıfır olmayan aynı $\mu_0 I$ değerini verirler. Çünkü yolların büyülükleri ve şekilleri önemli değildir. b yolu akımı içermektedir ve bu nedenle çizgi integrali sıfırdır.
- 30.5 Net kuvvet, evet; net tork hayır. İlmeğin üst ve alt kenarlarına etkiyen kuvvetlerin büyülükleri eşit fakat yönleri zıt olduğundan birbirlerini etkisiz hale getirirler. İlmeğin sol kenarlarındaki akım I_1 e paralel olduğundan I_1 in bu kenara etkidiği F_L kuvveti çekici, öte yandan sağ kenarındaki akım ise I_1 e paralel olduğundan I_1 in bu kenara etkidiği F_R kuvveti iticidir. Sol taraf 1. tele daha yakın olduğundan $F_L > F_R$ ve net

kuvvet 1. tele doğrudur. İlmeğin dört kenarına etkiyen kuvvetlerin hepsi ilmek düzleminde oldukları için net tork yoktur.

- 30.6 Sıfırdır; tam olarak yüklenmiş bir kondansatöre yük akmaz, bu nedenle plakalarındaki yük değişmez ve plakalar arasındaki elektrik alan sabittir. Yerdeğistirme akımının olması için elektrik alanın değişiyor olması gereklidir.
- 30.7 (a) Biraz artar; (b) biraz azalır; (c) büyük ölçüde artar. Eşitlik 30.33 ve 30.34 e göre, metaller yerleştirilince toplam alan $\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H}$ olur. Tablo 30.2 ye göre aliminyum için $\mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H}$, $\mu_0 \mathbf{H}$ den biraz büyük, bakır için ise biraz küçüktür. Demir için, Örnek 30.10 da gördüğümüz gibi, alan binlerce kere kuvvetlendirilebilir.
- 30.8 İlmeği Şekil 30.31a dakine benzeyen maddeden daha iyi bir sürekli mıknatıs yapılabılır. Çünkü Şekil 30.31a da, Şekil 30.30 daki b noktasına karşılık gelen kalıcı mıknatıslanma daha büyüktür.
- 30.9 Batıdan doğuya doğru akmalıdır. Dünya'nın manyetik alan çizgileri gezegene Hudson Körfezinden girerler ve Antartika'dan çıkarlar. Bu nedenle akım dan kaynaklanan alan çizgileri zıt yönde gitmelidir. Şekil 30.6a ile Şekil 30.35 i karşılaştırır.

Calvin ve Hobbes

Bill Watterson



HARİTALARIN NASTL HER ZAMAN YUKARIYI KUZEY, AŞAĞIYI GÜNEY GÖSTERDİKLERNİ BİLİYOR MUSUNUZ? BUNUN DOGRU OLUP OLMADIGINI GÖRMEK İSTEDİM.



NE BULDUN BAKALIM? FAZLA BİR ŞEY DEĞİL, SİZİN PUSULA AĞACIN TEPEŞİNDEN GÜNEYE KADAR Kİ YOLCULUĞA DAYANAMADI!



BEN İ'M PUSULA?!?! BEN İ'M PUSULA?!?! YENİSİNI ALDIGIMIZ ZAMAN HABERİM OLUSUN. BENİM YARDIMÇI BİLM ADAMI KİTABIM, GEÇİCİ BAŞARISIZLİKLARDAN OTURU CESARETİN KAYBETME DER.

Bu makine satılan ürünü dışarıya vermeden önce, içeriye sokulan madeni paralar üzerinde bir çok denemeler yapar. Müşterileri fazla bekletmeden ve para la rı zarar vermeden hangi malzemeden yapıldıkları nasıl belirlenir? (George Semple)

b ö l ü m

Faraday Yasası

31

Bölüm İçeriği

- | | |
|--|--|
| 31.1 Faraday'ın İndüksiyon Yasası | 31.5 (Seçme/İ) Jeneratörler ve Motorlar |
| 31.2 Hareketsel emk | 31.6 (Seçme/İ) Girdap Akımları |
| 31.3 Lenz Yasası | 31.7 Maxwell'in Harika Denklemleri |
| 31.4 İndüksiyon emk'leri ve Elektrik Alanları | |

Flektrik ve manyetizmada buraya kadar olan çalışmalarımızın odağı, durgun yüklerden ileri gelen elektrik alanları ve hareketli yüklerin meydana getirdiği manyetik alanlardı.

1831 yılında İngiltere'de Faraday tarafından yapılan deneyler ve bundan bağımsız olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde aynı yıl Joseph Henry tarafından gerçekleştirilen deneyler, manyetik alanı değiştirmek devrede bir emk'in oluşturabileceğini gösterdi. Bir emk'in (ve dolayısıyla bir akımın) bir çok değişik yolla oluşturulabileceğini göreceğiz-örneğin, kapalı bir tel halkanın, manyetik alan bulunan bir bölgede hareket ettirilmesi. Bu deneylerin sonuçları, *Faraday'ın induksiyon kanunu* olarak bilinen elektromanyetizmanın çok temel ve önemli bir kanununa yol açtı. Bu kanun, bir devrede induklenen emk'in büyüklüğünün, devreden geçen manyetik akının zamanla değişim hizmasına eşit olduğunu söyler.

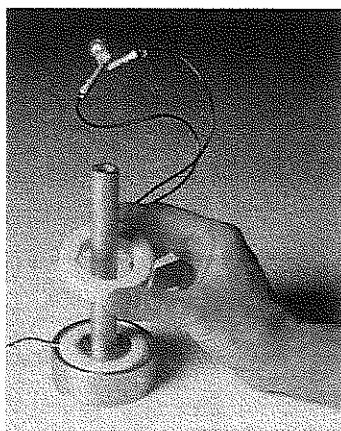
Faraday Yasasını inceleyerek, elektromanyetizmanın temel yasalarına olan bakışımızı tamamlıyoruz. Bu yasalar, *Maxwell denklemleri* diye amanın dört denklem takımıyla özetlenebilir. Bu denklemler, özetle tartışacağımız Lorentz kütveti yasasıyla beraber, yüklü cisimlerin etkileşmelerini tanımlayan noksansız bir teoriyi temsil ederler. Maxwell denklemleri, hem elektrik ve manyetik alanları birbirine bağlar, hem de bunların esas kaynakları olan elektrik yükleri arasında ilişki kurar.

31.1 FARADAY'IN İNDÜKSİYON KANUNU

31.1 Manyetik alanı değiştirmek bir emk'in nasıl olduğunu anlamak için, Şekil 31.1'de olduğu gibi galvanometreye bağlanmış bir tel halkayı ele alalım. Bir mıknatıs halkaya doğru yaklaştırıldığında zaman, galvanometrenin ibresi, Şekil 31.1a da gösterildiği gibi belli bir miktar sağa doğru sapar. Mıknatıs, halkadan uzaklaştırılırsa ibre, Şekil 31.1c de gösterildiği gibi ters yönde sapar. Mıknatıs halkaya göre hareketsiz olduğu zaman (Şekil 31.1b) hiç bir sapma gözlenmez. Son olarak, durgun halde tutulan mıknatısa yaklaşan veya uzaklaşan yönde, halka hareket ettirilirse, ibre yine sapar. Bu gözlemlerden, halkanın mıknatısın halkaya göre hareket halinde olduğunu "öğrendiği" sonucuna varırız; çünkü manyetik alanın şiddetinde ortaya çıkan bir değişim algılamaktadır. Böylece, akım ile değişen manyetik alan arasında bir ilişkinin var olduğu görülür.

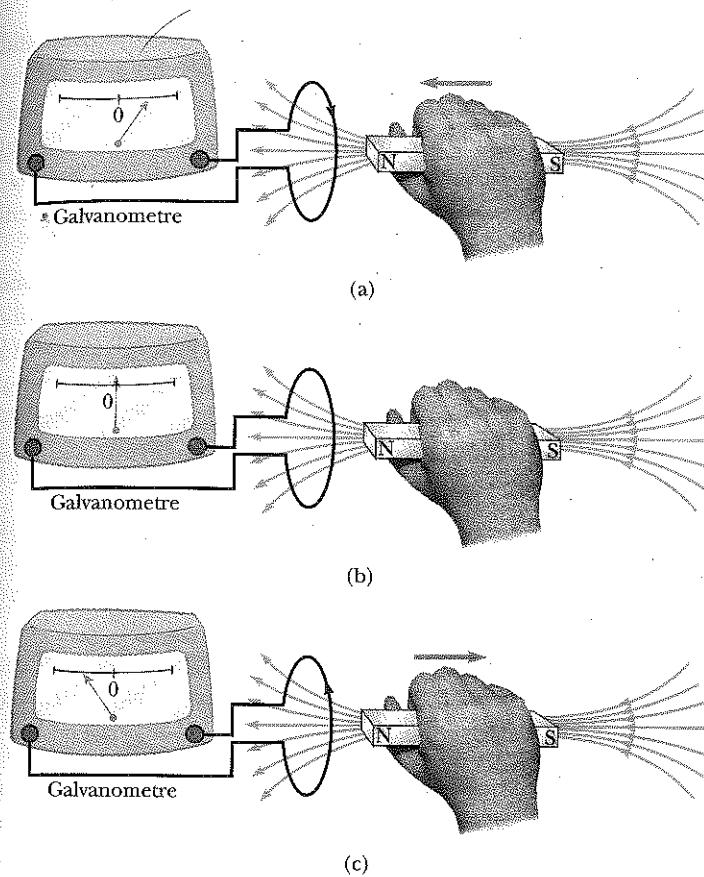
Devrede hiç batarya olmasa bile, devrede bir akının başladığı gerçeği göz önüne alındığında bu sonuçlar oldukça ilginçtir! *İndüklendi emk* tarafından meydana getirildiği için, böyle bir akıma *indüklendi akım* denir.

Şimdi, Şekil 31.2'de Faraday¹ tarafından yapılan bir deneyi tanıyalım. Birinci bobin bir anahtar ve bataryaya bağlanmıştır. Bu bobin, bir halkanın etrafına sarılmıştır ve anahtar kapatıldığı zaman bu bobindeki akım bir manyetik alan oluşturur. Ikinci bobin de bu halkanın etrafına sarılmış olup, galvanometreye bağlanmıştır. Ikinci devrede herhangi bir batarya yoktur ve ikinci bobin birinci bobine bağlı değildir. Ikinci devrede gözlenen herhangi bir akım, bazı dış etkenler tarafından oluşturulmak zorundadır.



Elektromanyetik induksiyonun gösterimi. Altta bobine değişken bir potansiyel farkı uygulanır. Üstteki bobine bağlı yanan ampulde gösterildiği gibi, üstteki bobinde bir emk oluşur. Üstteki bobin, düşey tüp boyunca yukarı doğru kaydırılırsa, lambanın aydınlatma şiddetine nasıl bir değişiklik meydana gelir? (Central Scientific Company'nin izniyle)

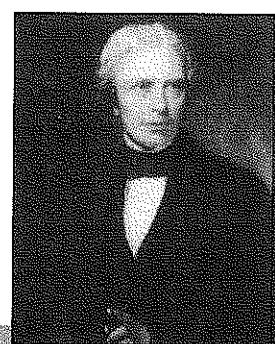
¹ J.D. Colladon, hareketli-mıknatıs deneyini ilk gerçekleştiren fizikcidir. Değişen manyetik alanın, kullanıldığı galvanometredeki etkisini en aza indirmek için galvanometreyi bitişik odaya yerleştiridi. Böylece, mıknatısı devrede hareket ettirdikçe ölçü aletinin ibresinin saptığım göremeyecek. Galvanometreyi okumak için bitişikteki odaya gittiği zaman, mıknatısın hareketi sona erdiği için, ibre tekrar sıfır konumuna dönmüştü. Bir emk ve buna karşılık gözlenebilen bir akım oluşturmak için, halka ile mıknatıs arasında bağıl bir hareket olmasının zorluğu, Colladon için bir talihsızlığı. Böylece, fizik öğrencileri Colladon'un induksiyon yasası yerine Faraday'ın induksiyon yasasını öğrenirler.



Sekil 31.1 (a) Miknatsı, galvonometreye bağlı bir tel halkaya doğru hareket ettirildiği zaman, galvonometre şekilde görüldüğü gibi sapar; bu da halkada bir akımın olduğunu gösterir. (b) Miknatsı sabit tutulduğu zaman, miknatsı halkanın içinde olsa, oluşan herhangi bir akım yoktur. (c) Miknatsı, halkadan uzaklaştırıldığın zaman, oluşan akımın yönü (a) da gösterilenin zıt yönde, yani galvonometre zıt yönde sapar. Miknatsın hareket yönünü değiştirmek, hereket yoluya oluşturulmuş akımın yönünü değiştirir.

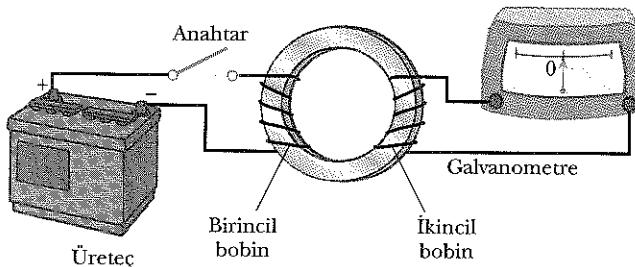
İlk bakışta, ikincil devrede hiç bir akımın gözlenemeyeceği tahmin edilir. Fakat, birincil devredeki anahtar aniden kapatıldığı veya açıldığı zaman oldukça şaşırtıcı birşeyler olur. Birincil devredeki anahtar kapatıldığı anda, ikinci devredeki galvonometre bir yöne sapar ve sonra sıfır konumuna geri döner. Anahtar açıldığı an, galvonometre zıt yönde sapar ve tekrar sıfır konumuna geri döner.

Son olarak, birincil devrede kararlı bir akım olduğu zaman ya da hiçbir akım olmadığı zaman galvonometre sıfır konumunda kalır. Bu deneyde neler



Michael Faraday (1791-1867)

1800'lu yılların en büyük deneyîel bilim adamı olarak bilinen bir İngiliz fizikçi ve kimyacısıdır. Elektrîge katkıları: elektrîk motoru, elektrîk jeneratörü ve transformatörün icadından başlayarak elektromanyetik induksiyon ve elektrolîz yasalarını kapsar. Dini duyguları nedeniyle İngiliz ordusı için zehirli gaz hazırlaması projesinde görev almayı reddetti. (Royal Society'nin izniyle)



Sekil 31.2 Faraday'ın deneyi. Soldaki ilk devrede bulunan anahtar kapatıldığında, sağdaki ikinci devrede bulunan galvonometre bir anlık sapma gösterir. İkinci devrede oluşan emk bu devredeki bobin içinden geçen manyetik alanın değişmesiyle gerçekleşir.

olduğunun anlaşılması için dikkat edilecek ilk nokta, anahtar kapatıldığı zaman, birincil devredeki akımın, bu devrenin bulunduğu bölgede bir manyetik alan oluşturması ve bu manyetik alanın da ikinci devreye nufuz etmesi gereklidir. Dahası anahtar kapatıldığı zaman birincil devredeki akım tarafından oluşturulan manyetik alan belirli bir zaman aralığında sıfırdan belli bir değerde çıkar ve ikincil devrede bir akım oluşturan işte bu değişken manyetik alanıdır.

Bu gözlemlerin ardından Faraday, **devrede (bizim düzenekte ikincil devre) bir elektrik akımının olduğu** sonucuna vardı. Oluşan bu akım, ikincil devreden geçen manyetik alan değiştiği sürece, sadece kısa bir zaman varlığını gösterir. Manyetik alan kararlı bir değere ulaştığı anda ikincil devredeki akım sıfıra düşer. Gerçekte, ikincil devre, sanki kendisine kısa bir an bir emk kaynağı bağlanmış gibi davranışır. Sonuçta şu yargıya varılır: **manyetik alanı değiştiren, ikincil devrede indüklenmiş bir emk üretilir.**

Şekil 31.1 ve Şekil 31.2 de gösterilen deneylerin ortak bir noktası var: Her bir durumda devreden geçen manyetik akı zamanla değiştiğinde, devrede bir emk oluşmaktadır. Genel olarak, indüklenmiş akımlar ve emk'leri içeren böyle deneyleri özetleyen genel ifade şöyledir:

Bir devrede indüklenen emk, devreden geçen manyetik akının zamana göre türevi ile doğru orantılıdır.

Faraday'ın induksiyon yasası olarak bilinen bu ifade şöyle yazılabilir:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.1)$$

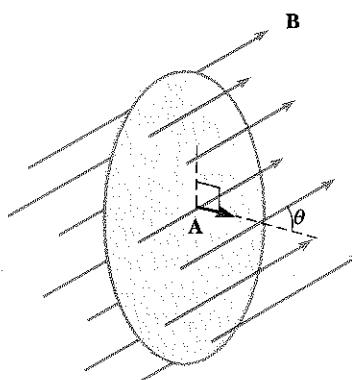
Burada $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$, devreden geçen manyetik akıdır (Kesim 30.5).

Devre, aynı alana sahip N tane sarımdan oluşursa ve Φ_B de bir sarımdan geçen manyetik akı olursa, her sarımda bir emk oluşur; böylece bobinde yanı devrede oluşan toplam emk aşağıdaki ifade ile verilir:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.2)$$

31.1 ve 31.2 Eşitliklerindeki eksi işaretinin fiziksel önemi büyktür ve Kesim 31.3'te tartışılacaktır.

Şekil 31.3 teki gibi, A alanına sahip bir ilmeğin, düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanını içinde bulunduğuunu kabul edelim. Bu ilmekten geçen akı $BA \cos \theta$ ya eşit



Şekil 31.3 Düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanının var olduğu bir ortamda A alanına sahip olan iletken bir ilmek. \mathbf{B} ile ilmeğin normali arasındaki açı θ dir.

Buradan indüklenmiş emk şöyle ifade edilebilir:

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} (BA \cos \theta) \quad (31.3)$$

Bu ifadeden, emk nin devrede pek çok yolla indüklenebileceği görülmektedir:

- B nin büyüklüğü zamanla değişebilir.
- İlmeğin çevrelediği alan zamanla değişebilir.
- B ile ilmeğin normali arasındaki θ açısı zamanla değişebilir.
- Yukarıdakilerin herhangi bir bireleşimi oluşabilir.

Sınamaya Sorusu 31.1

Eşitlik 31.3, bir mıknatısın kuzey kutbu, ilmek düzlemine dik olan ve merkezinden geçen eksen boyunca, ilmeğe doğru hareket ettirildiği zaman oluşan emk'i hesaplamak için kullanılabilir. Güney kutup ilmeğe doğru hareket ettirildiği zaman, denklemde hangi değişiklikler gereklidir?

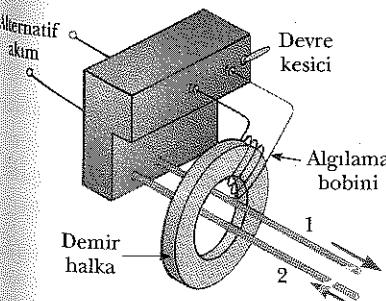
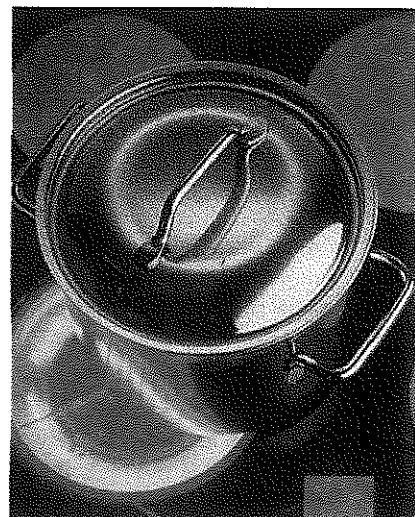
Ev Deneyi

Bir kaset bandı, uzun bir plastik seride tutturulmuş çok küçük metal okşit parçacıklarından yapılmıştır. Küçük bir ilmekteki akım, şerit üzerindeki parçacıkları, kayıt edilmesi istenen müziğe uygun düşecek bir düzende, miknatıslar. Bandın dinlenmesi sırasında, bant, ikinci bir küçük ilmek (kristal başlığı içinde) yakınında hareket ettilir ve bir akım oluşturulur ve bu da daha sonra yükseltılır. Bir kaset bandından bir şerit parçası koparın (üzerinde kayıt yaptırmayan sakincalı olmadığı bir bant olsun) ve bunun bir buz dolabı mıknatısı tarafından çektiğini veya itildiğini görün. Bunu, bir kaset bandınız yoksa, çöpe atmayı düşündüğünüz bir bilgisayar disketi ile deneyin.

Faraday Yasası'nın Bazı Uygulamaları

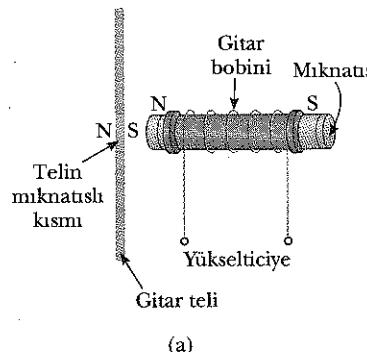
Topraklama hata kesicisi, elektriksel aygıtları kullananları elektrik çarpmalarına karşı koruyan ilginç bir güvenlik aygıtıdır. Bunun çalışma ilkesi Faraday yasasına dayanır. Şekil 31.4'te görülen devre kesicisinde, 1. tel prizden korunma düşünülen aygıta gider ve 2. tel ise aygıtın prize geri dönüşü sağlar. Bu iki teli, demirden yapılmış bir halka sarar ve bu halkanın bir kısmına algılama bobini sarılmıştır. Tellerdeki akımlar zıt yönlerde oldukları için, algılama bobininden, akımlar nedeniyle geçen manyetik akı sıfırdır. Bununla birlikte, 2. teli deki dönüş akımı değişirse, algılama bobininden geçen net akı artık sıfır olmaz (Bu durum, örneğin aygit ıslak hale gelirse ve böylece akımın toprağa geçisi sağlanırsa gerçekleşir). Evlerde kullanılan akım alternatif akım olduğu için (bunun anlamı, akımın sürekli olarak yön değiştirmesidir), algılama bobininden geçen manyetik akı zamanla değişir ve bu da bobinde bir emk oluşturur. İndüksiyonla oluşan bu emk, bir devre kesicisini tetikler ve böylece elle dokunulması tehlikeli olacak olan noktaya akımın ulaşması önlenmiş olur.

Faraday yasasının diğer ilginç uygulaması, bir elektro-gitarda sesin meydana getirilmesidir (Şekil 31.5). Bu durumda algılama bobini denen tel sarılmıştır. Titrenen gitar telinin yakınına yerleştirilir. Gitar teli metalden yapılmış olup mıknatıslanabilir özelliğe sahiptir. Bobinin içindeki dipol bir mıknatış, gitar telinin bobine en yakın olan bir kısmını mıknatıslar. Gitar teli belli frekans-

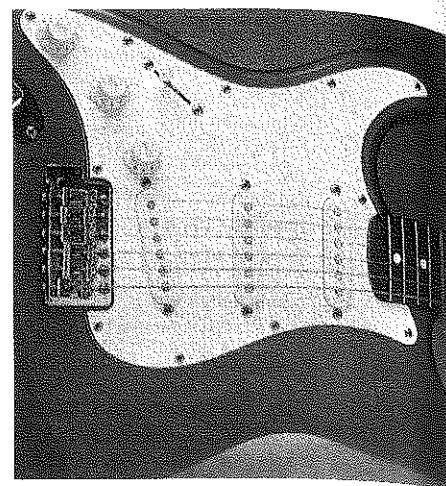


Şekil 31.4 Topraklama hata kesicisinin temel parçaları.

Bu elektrik ocağı, indüksiyon ilkesini temel olarak yemekleri pişirir. Özel bir camdan yapılmış olan pişirici yüzeyin altına konulan bir bobinden alternatif bir akım geçirilir. Bu akım, alternatif bir manyetik alan oluşturur ve bu da pişirme kaplarında bir akım meydana getirir. Pişirme kaplarının bir miktar elektriksel dirence sahip olmaları nedeniyle, indüklenen akıma eşlik eden elektriksel enerji iç enerjiye dönüştürülür. Bu da kabın ve içindeki yemeğin ısınmasına neden olur. (Corning Inc. in izniyle)



(a)



(b)

Şekil 31.5 (a) Bir elektro-gitar, titreşen tel, algılama bobiminde bir emk oluşturur. (b) Çalınan notalar, elektro-gitar metal teltleri altındaki daireler tarafından algılanır ve bu bilgiler yükselteç aracılığıyla hoparlörlerle gönderilir. (Gitar üzerindeki bir anahtar, çalgıcıya hangi alılı setin seçileceği imkanını tanır.) Gitar bobini, hangi müziğin çalındığını nasıl algılar? (b, Charles D. Winter)

larda titreştiği zaman, bunun mıknatışlanmış olan kısmı, bobinden geçen ve zamanla değişen bir manyetik akı oluşturur. Bu değişen akı, bobinde bir emk oluşturur ve bu da yükseltece aktarılır. Yükseltecin çıkışları hoparlöre gönderilir; bu da işittiğimiz ses dalgalarını oluşturur.

ÖRNEK 31.1 Bobinde emk Oluşturanın Bir Yolu

Bir bobin, toplam direnci $2,0 \Omega$ olan 200 sarımlı bir telden oluşmuştur. Her sarım, kenar uzunluğu 18 cm olan bir karedir ve düzgün bir manyetik alan bobin düzlemine dik olacak şekilde uygulanmıştır. Manyetik alan 0,8 s içinde 0'dan 0,5 T ye düzgün olarak değiştirilirse, alanın bu değişimi sırasında bobinde oluşan emk'nın büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm Halkanın alanı $(0,18 \text{ m})^2 = 0,0324 \text{ m}^2$ dir. $t = 0$ 'da bobinden geçen manyetik akı sıfırdır, çünkü bu anda $B = 0$ dir. $t = 0,8 \text{ s}$ 'de bir sarımdan geçen manyetik akı $\Phi_B = BA = (0,50 \text{ T})(0,0324 \text{ m}^2) = 0,0162 \text{ T}\cdot\text{m}^2$. O halde Eş-

31.2'den induklenmiş emk'nın büyüklüğü

$$|\mathcal{E}| = \frac{N\Delta\Phi_B}{\Delta t} = \frac{200 (0,0162 \text{ T}\cdot\text{m}^2 - 0 \text{ T}\cdot\text{m}^2)}{0,80 \text{ s}} \\ = 4,1 \text{ T}\cdot\text{m}^2/\text{s} = 4,1 \text{ V}$$

olur. $1 \text{ T}\cdot\text{m}^2/\text{s} = 1 \text{ V}$ olduğunu gösterebilmenizin.

Aliştırma Manyetik alan değişirken bobinde oluşan akımın büyüklüğü nedir?

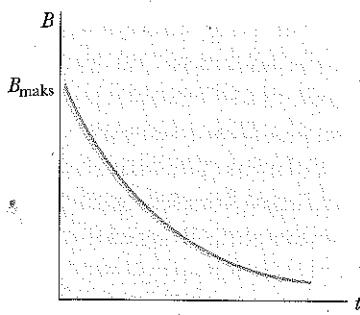
Cevap $2,0 \text{ A}$.

ÖRNEK 31.2 Üstel Olarak Azalan B Alanı

A yüzey alanına sahip bir tel halka, halka düzlemine dik bir manyetik alanının bulunduğu bir bölgeye yerleştirilmiştir. B nin büyüklüğü, $B = B_{\max}e^{-at}$ bağıntısına uygun olarak zamanla değişiyor. Burada a bir sabittir. Yani $t = 0$ 'da alan

B_{\max} ve $t > 0$ için alan üstel olarak azalır (Şekil 31.6). Halkada oluşan emk'i zamanın fonksiyonu olarak bulunuz.

Çözüm B , halka düzlemine dik olduğu için, $t > 0$ dla halkadan geçen manyetik akı



Şekil 31.6 Manyetik alanın büyüklüğünün zamanla üstel biçimde azalışı. İndüklenmiş emk ve indüklenmiş akım, zamana göre aynı biçimde değişirler.

KAVRAMSAL ÖRNEK 31.3 Hangisi Hangisine bağlıdır?

Şekil 31.7'de görüldüğü gibi iki ampul, bir tel halkanın iki zit ucuna bağlanmıştır. Azalan bir manyetik alan (şekilde gösterilen dairesel yüzeye sınırlı) halkada bir emk oluşturur, bu da iki ampulün yanmasına sebep olur. Anahtar kapatıldığı zaman ampullerin parlaklışı nasıl değişir?

Cözüm 1. ampul daha parlak yanar ve 2. ampul ise söner. Anahtar kapatıldığı anda, 1. ampul, anahtara kadar uzanan büyük bir halka içindedir. Değişen manyetik akı, tümüyle bu halka tarafından çevrelendiği için 1. ampulde bir akım vardır. 1. ampul şimdi, anahtar kapatılmadan öncükine göre, daha parlak yanar; çünkü sadece halkada bir

$$\Phi_B = BA \cos 0 = AB_{\max} e^{-at}$$

bağıntısıyla verilir. AB_{\max} ve a sabit oldukları için Eşitlik 31.1'den hesaplanan indüklenmiş emk

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -AB_{\max} \frac{d}{dt} e^{-at} = aAB_{\max} e^{-at}$$

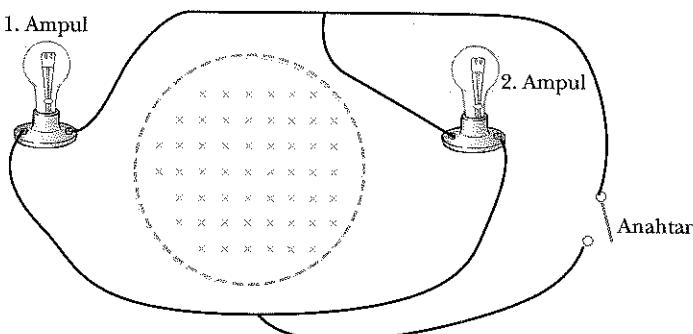
olur. Bu bağlantı, indüklenmiş emk'nın zamanla üstel bir biçimde azaldığını gösterir. emk'nın maksimum değerinin $t = 0$ 'da gerçekleştiğine dikkat ediniz. Burada $\mathcal{E}_{\max} = aAB_{\max}$ tır. \mathcal{E} nin t ye göre değişimi, Şekil 31.6 daki B nin t ye göre değişimine benzer.

direnç vardır. Sonuç olarak, 1. ampuldeki akım, halkada 2. ampul olduğu zamankine göre daha büyütür.

Anahtar kapatıldığı anda, 2. ampul, kendisine ve anahata giden tellerin oluşturduğu bir halkanın içindedir. Bu halka içinden, değişen bir manyetik akı geçmediği için bu halkada herhangi bir emk olusmaz.

Alıştırma Bu anahtar 1. ampulün solunda bulunan bir tel yardımıyla devreye bağlı olsayı ne olurdu?

Cevap 1. ampul söner, 2. ampul ise daha parlak yanar.

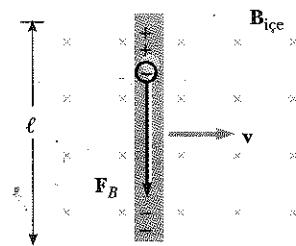


Şekil 31.7

HAREKETSEL EMK

Manyetik alan zamanla değiştiğinde, durgun bir devrede bir emk'in meydana geldiği durumları 31.1 ve 31.2 örneklerinde inceledik. Bu kesimde, sabit bir manyetik alan içinde hareket eden bir iletkende oluşan **hareketsel emk**'ini tartışacağız.

Uzunluğundaki doğrusal bir iletkenin, Şekil 31.8 de görüldüğü gibi, sayfa düzleminden içeriye doğru yönelmiş düzgün bir manyetik alana dik olarak hizla döş etkenlerin tesiriyle sabit bir hızla hareket ettiğini varsayılmı. İletken-



Şekil 31.8 v ye dik, düzgün bir \mathbf{B} manyetik alan içinde v hızıyla hareket eden ℓ uzunluğundaki doğrusal bir iletken çubuk. Çubugün uçları arasında $B\ell v$ ye eşit bir emk oluşur.

deki elektronlar, iletken boyunca $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ eşitliği ile verilen, ℓ boyunca, v ve \mathbf{B} 'ye dik (Eş. 29.1) bir kuvvetin etkisinde kalacaktır. Bu kuvvetin etkisi ile elektronlar, alt uca doğru hareket ederek orada birikeceklər ve üst ucta net bir pozitif yük kalacaktır. Bu sebeple, bu yük ayrılmı sonucunda, iletken içinde bir elektrik alanı meydana getirilir. Uçlardaki yük artışı, aşağıya doğru yönelen qvB manyetik kuvvetinin yukarıya doğru yönelen qE elektrik kuvveti tarafından dengelenene kadar artmaya devam eder. Denge kurulunca elektronlar durur. Denge şartı

$$qE = qvB \quad \text{veya} \quad E = vB$$

olmasını gerektirir. İletkende oluşan elektrik alanı (elektronların hareketinin sona erdiği ve E nin sabit olduğu), iletkenin uçları arasındaki potansiyel farkına $\Delta V = E\ell$ (Eşitlik 25.6) bağıntısı ile bağlıdır. Böylece,

$$\Delta V = E\ell = B\ell v \quad (31.4)$$

elde edilir. Burada üstteki uç, alttaki uçtan daha yüksek potansiyelidir. O halde, iletken düzgün manyetik alan içinde hareket ettiği sürece, iletkenin uçları arasında bir potansiyel fark oluşur. Hareket ters yönde olursa, bu potansiyel farkının kutuplanması da ters işaretli olur.

Hareketli iletken, kapalı iletken devrenin bir parçası olursa daha ilginç bir durum gerçekleşir. Bu durum, değişen manyetik akının, kapalı devrede nasıl bir indüklenmiş akım oluşturduğunu açıklamakta özellikle yararlıdır. Şekil 31.9a da olduğu gibi iki paralel iletken ray boyunca kayan, ℓ uzunlığında bir iletken çubuğu içeren devreyi ele alalım.

Basitlik için, hareketli çubugün sıfır dirençte ve devrenin durgun kısmında R direncine sahip olduğunu varsayılmı. Düzgün ve sabit bir \mathbf{B} alanı devrenin düzlemine dik olarak uygulansın. \mathbf{F}_{uyg} uygulanan kuvvetin etkisiyle çubuk, v hızıyla sağa doğru çekildikçe, çubuktaki serbest yükler, çubuk boyunca bir manyetik kuvvetin etkisinde kalırlar. Bu kuvvet, şimdi, yükler kapalı bir iletken yol boyunca hareket etmekte serbest olduklarından, indüklenmiş bir akım başlatır. Bu durumda, halka içinden geçen manyetik akının değişim hızı ve buna karşılık gelen hareketli çubugün uçları arasındaki indüklenmiş emk; çubuk, manyetik alan içinde hareket ettikçe, halkanın alanındaki değişimle orantılıdır. Göreceğimiz gibi, ki çubuk sağa doğru sabit bir hızla çekilirse, uygulanan kuvvet tarafından yapılan iş, R direncinde iç enerji olarak görüner. (Kesim 27.6'ya bakınız)

Herhangi bir anda devrenin çevrelediği alan ℓx olduğu için (buradaki x herhangi bir andaki devrenin genişliğidir) bu alandan geçen manyetik akı

$$\Phi_B = B\ell x$$

olur. Faraday yasasını kullanarak ve x in de $dx/dt = v$ hızıyla değiştiğine dikkat ederek, indüklenen hareketsel emk'ini

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} (B\ell x) = -B\ell \frac{dx}{dt} \quad (31.5)$$

Hareketsel emk

şeklinde buluruz. Devrenin direnci R olduğu için induksiyon akımın büyüklüğü

$$I = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = \frac{B\ell v}{R} \quad (31.6)$$

ile verilir. Bu örneğe ait eşdeğer devre diyagramı Şekil 31.9b de gösterilmiştir.

Bu sistemi enerji kavramını kullanarak inceleyelim. Devrede bir batarya olmadığı için, sistemdeki elektriksel enerjinin ve oluşan akımın kaynağı merak edilebilir. Dış kuvvetin iletken üzerine iş yaptığına ve manyetik alan içinde yüklerin hareket ettiği dikkate alınırsa, bu akımın nereden kaynaklandığı anlayabiliriz. Bu, yüklerin çubuk boyunca belli bir ortalama sürüklenme hızıyla hareket etmesine ve böylece bir akımın ortayamasına neden olur. Enerjinin korunumu açısından, belli bir zaman aralığında uygulanan kuvvetin çubuk üzerinde yaptığı iş, aynı sürede induksiyon emk'in sağladığı elektriksel enerjiye eşit olmalıdır. Ayrıca, çubuk sabit hızla hareket ederse, yapılan iş bu zaman aralığında dirence verilen enerjiye eşit olmalıdır.

Cubuk, düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanı içinde hareket ettiğe $I\ell B$ büyüklüğündeki \mathbf{F}_B manyetik kuvvetinin etkisi altında kalır (Kesim 29.2). Bu kuvvetin yönü çubugun hareket yönünün tersidir, yani Şekil 31.9a'da olduğu gibi sola doğrudur. Çubuk sabit hızla hareket ettiğe için, uygulanan kuvvet, manyetik kuvvetin büyüklik bakımından eşit fakat yön bakımından zıt olmalıdır, yani Şekil 31.9a'da olduğu gibi sağa doğrudur. (\mathbf{F}_B , hareket yönünde etkisine göre olur. Böyle bir durum enerjinin korunumu ilkesine aykırıdır). Eşitlik 31.6 ve $F_{uyg} = I\ell B$ gerektiğini kullanarak, uygulanan kuvvet tarafından sağlanan güç

$$\mathcal{P} = F_{uyg} v = (I\ell B) v = \frac{B^2 \ell^2 v^2}{R} = \frac{\mathcal{E}^2}{R} \quad (31.7)$$

bağıntılarıyla verilir. Eşitlik 27.23 ten görülür ki, bu güç, beklediğimiz gibi, dirence birim zamanda verilen $I^2 R$ enerjisine eşittir. Bu, aynı zamanda, hareketsel emk tarafından sağlanan $I\mathcal{E}$ gücüne eşittir. Bu örnek, mekanik enerjinin önce elektriksel enerjiye ve sonunda dirençte iç enerjiye dönüştüğünün bir göstergesidir.

Sınaması 31.2

Bir uçak, Los Angeles'tan Seattle'a uçarken, Dünya'nın manyetik alanının içinden geçer. Bunun sonucu olarak, kanat uçları arasında bir hareketsel emk'i oluştur. Hangi kanat ucu pozitif olarak yüklenir?

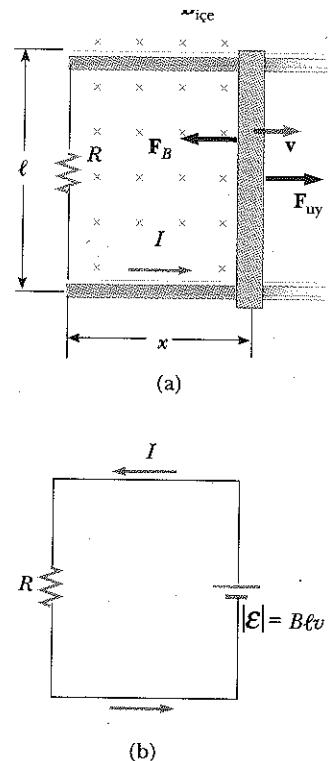
ÖRNEK 31.4 Dönen Çubukta Oluşan Hareketsel Emk

ℓ uzunluğundaki bir iletken çubuk, bir ucundaki mil etrafında ω sabit açısal hızıyla dönmektedir. Şekil 31.10 da olduğu gibi, düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanı dönen düzleme dik olarak uygulanmıştır. Çubugun uçları arasında oluşan hareketsel emk'i bulunuz.

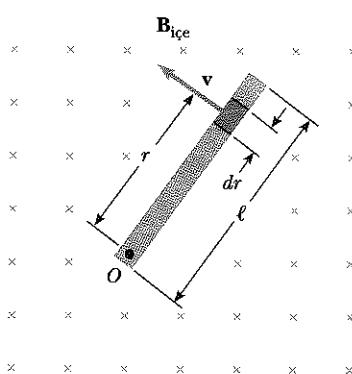
ÇÖZÜM Çubugun hızı v olsun. Uzunluğu dr olan bir parçasını dikkate alalım. (31.5) eşitliğine göre bu parçada meydana gelen emk

$$d\mathcal{E} = Bv dr$$

ile verilir. Çubugun her parçası \mathbf{B} ye dik olarak hareket ettiğinden, her birinin uçları arasında aynı biçimde bir $d\mathcal{E}$ emk'i oluşur. Tüm elemanlar boyunca indukleşen ve seri bağlanmış olan bu emk'lerin toplamı, çubugun uçları arasında toplam emk'i verir. Yani,



Şekil 31.9 (a) v hızıyla ve iletken ray boyunca F_{uyg} uygulanan kuvvetin etkisiyle kayan iletken bir çubuk. \mathbf{F}_B manyetik kuvveti harekete ters yönde olup, halkada saat ibrelerinin tersi yönünde bir akım oluşturur. (b), (a) ya eşdeğer devre.



Şekil 31.10 Dönen düzleme dik olan düzgün bir manyetik alan içinde, bir ucundaki mil etrafında dönen iletken çubuk. Çubugun uçları arasında bir emk oluşur.

$$\mathcal{E} = \int Bv \, dr$$

yazılabilir. Bu ifadenin integralini almak için, bir elemannın çizgisel hızının, ω açısal hızına $v = r\omega$ bağıntısıyla bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Böylece, B ve ω sabit olduklarından

$$\mathcal{E} = B \int v \, dr = B\omega \int_0^\ell r \, dr = \frac{1}{2} B\omega \ell^2$$

bulunur.

ÖRNEK 31.5 ◀ Kayan Çubuğa Etkiyen Manyetik Kuvvet

m kütlesine ve ℓ uzunluğuna sahip bir çubuk, kağıt düzleme dik olarak yöneltmiş düzgün bir manyetik alan içinde iki paralel ray üzerinde sürünenmesiz olarak harekete ediyor (Şekil 31.11). Çubuğa $t = 0$ anında sağa doğru bir v_i ilk hızı verilip serbest bırakılıyor. Çubuğun hızını zamanın fonksiyonu olarak bulunuz.

Cözüm Önce, oluşan akımın saat ibrelerinin ters iyönünde olduğuna ve manyetik kuvvetin $F_B = -I\ell B$ eşitliği ile verildiğine dikkat edin. Buradaki negatif işaret, kuvvetin sola doğru ve hareketi geciktirici türde olduğunu gösterir. Bu, çubuğa yatay olarak etkiyen yegane kuvvetdir. Newton'un ikinci kanunu yatay yöndeki harekete uygulanırsa

$$F_x = ma = m \frac{dv}{dt} = -I\ell B$$

sonucunu verir. Denklem 31.6 ya göre, $I = B\ell v/R$ ile verildiği için yukarıdaki ifadeyi

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{B^2 \ell^2}{R} v$$

$$\frac{dv}{v} = -\left(\frac{B^2 \ell^2}{mR}\right) dt$$

şeklinde yazabiliriz. $t = 0$ da $v = v_i$ başlangıç şartını kullanarak son eşitliğin integrali alınırsa

$$\int_{v_i}^v \frac{dv}{v} = \frac{-B^2 \ell^2}{mR} \int_0^t dt$$

$$\ln\left(\frac{v}{v_i}\right) = -\left(\frac{B^2 \ell^2}{mR}\right)t = -\frac{t}{\tau}$$

bulunur. Burada $\tau = mR/B^2 \ell^2$ bir sabittir. Buradan, hızın

üstel biçimde ifade edilebileceği görülmektedir.

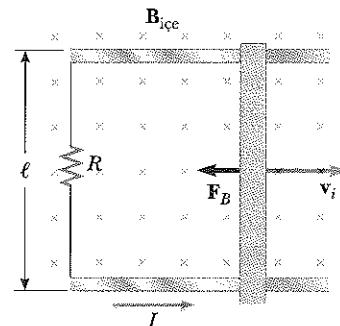
$$v = v_i e^{-t/\tau}$$

Bu bağıntı, geciktirici manyetik kuvvetin etkisi altında, çubuğun hızının zamanın zamana göre üstel bir biçimde azaldığını gösterir.

Aliştırma Bu örnekteki çubuk için, indüklenmiş akım ve indüklenmiş emk'nın büyülüüğünü zamanın fonksiyonu olarak veren bağıntıları bulunuz:

Cevap $I = \frac{B\ell v_i}{R} e^{-t/\tau}; \quad \mathcal{E} = B\ell v_i e^{-t/\tau}.$

(Her ikisi de zamanla üstel olarak azalır.)



Şekil 31.11 İki sabit iletken ray üzerinde sağa doğru v_i ilk hızı ile kayan ℓ uzunluğundaki iletken bir çubuk.



LENZ YASASI

Faraday yasası (Eşitlik 31.1), indüklenmiş emk ve akıdaki değişimin zıt cebirsel işaretlere sahip olduklarını gösterir. Bunun, **Lenz yasası**² olarak bilinen oldukça gerçek bir fiziksel açıklaması vardır:

² Alman fizikçi Heinrich Lenz (1804-1865) tarafından geliştirildi.

İndüksiyon emk'in yönü (polaritesi) akım ilmeğinin çevrelediği alandan geçen manyetik akı değişimine karşı koyacak şekilde manyetik akı oluşturulan akının yönündedir.

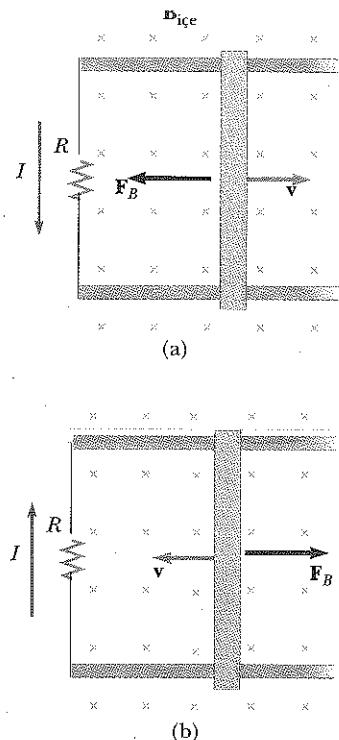
Yani, indüksiyon akımı, başlangıçta devreden geçen manyetik akının değişimini önleme etkisi gösterir. Göreceğiz ki bu yasa, enerjinin korunumu yasasının bir sonucudur.

Lenz yasasını anlamak için, kağıt düzlemine dik olarak yönelmiş, *dış manyetik alan* olarak bilinen, düzgün bir manyetik alanda iki paralel ray üzerinde hareket eden çubuk örneğine dönelim (Şekil 31.12a). Çubuk sağa doğru hareket ettikçe, halkanın alanı arttığı için, devre tarafından çevrelenen alandan geçen manyetik akı zamanla artar. Lenz kanunu, indüksiyon akımının yönünün dış manyetik akı değişimine karşı koyacak yönde olduğunu ifade eder. Dış alandan ileri gelen ve kağıt düzleminden içeriye doğru geçen manyetik akı arttırmak için, indüklenmiş akım, bu artışa karşı koyacak şekilde kağıt düzleminde okuyucuya doğru olan bir akı oluşturmalıdır. Buna göre çubuk sağa doğru hareket ettiği zaman meydana gelen akımın yönü, saat ibrelerinin tersi yönde olmalıdır. (Bu yönü doğrulamak için sağ-el kuralını kullanın). Şekil 31.12b de olduğu gibi çubuk sola doğru hareket ediyorsa, halkadan geçen manyetik akı azalır. Aksi, kağıt düzleminden içeri doğru yöneldiği için, halkanın içinde kağıt düzlemine doğru olan bir akı meydana getirebilmek için, indüksiyon akımının yönü saat ibreleriyle aynı yönde olmalıdır. Her iki halde de indüksiyon akımı, devrenin çevrelediği alandan geçen ilk aküyü korumaya çalışır.

Bu duruma şimdi de enerji açısından bakalım. Çubuğa sağa doğru küçük bir iletkenin verildiğini varsayıyalım. Yukarıdaki tartışmada, bu hareketin halkada saat ibrelerinin tersi yönünde bir akıma yol açtığını bulduk. Bu akım saat ibreleri yönünde olsaydı, nelerin olacağını görelim. Saat ibreleri yönünde olan I akımı için, kayan çubuk üzerine etkiyen manyetik kuvvetin yönü sağa doğru olacaktır. Bu kuvvet çubuğu ivmelendirerek ve hızını artıracaktır. Bu, aynı de, halkanın çevrelediği alanının daha çabuk artmasına sebep olacak, böylece indüksiyon akımı artacak, kuvvet büyüyecek, o da akımı artıracak vb... Gerçekte, sistem, kendisine herhangi bir enerji girişi olmadan, enerji kazanacaktır. Açıkça bu durum, tüm deneyimlere ve enerjinin korunumu kanununa aykırıdır. O halde akımın saat ibrelerinin tersi yönünde olması gerektiği sonuna varız.

Şek. 31.13a da olduğu gibi, bir çubuk mıknatısın sağa doğru hareket ederken durgun bir metal halkaya yaklaşığı bir başka durumu göz önüne alalım. Mıknatıs, halkaya yaklaşacak şekilde sağa doğru hareket ettikçe, halkadan geçen dış manyetik akı zamanla artar. Sağa doğru ilerledikçe akıda meydana gelen bu artmaya karşı koymak için, Şek. 31.13b de görüldüğü gibi, indüksiyon akımı sola doğru bir akı meydana getirir; böylece indüksiyon akımının yönü şekilde gösterildiği gibidir. Indüklenmiş akıma eşlik eden manyetik alan çizgilerinin, mıknatısın hareketine zıt yönde olduğuna dikkat edilmelidir. Aynı tür manyetik kutupların birbirini itmesi sebebiyle, akım ilmeğinin sol yüzü kuzey kutup, sağ yüzü ise güney kutuptur.

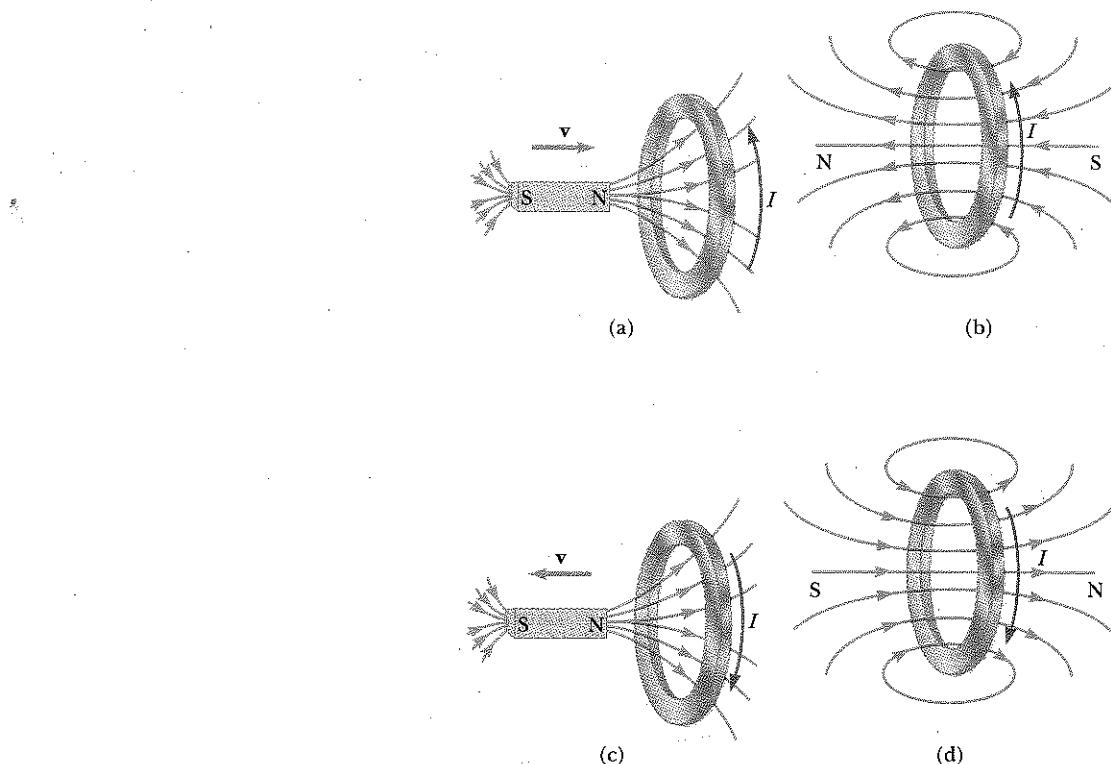
Şekil 31.13c'de görüldüğü gibi, mıknatıs sola doğru hareket ederse, bu akısı sağa doğru olup halkanın içinden geçerken akı zamanla azalacaktır. Şimdi halkadaki indüklenmiş akım, Şekil 31.13d'de gösterilen yönededir, cünkü bu akımın yönü, dış manyetik akı ile aynı yönde olan bir manyetik akı oluşturur. Bu durumda, halkanın sol yüzü güney kutup, sağ yüzü ise kuzey kutuptur.



Şekil 31.12 (a) İki sabit iletken ray üzerinde iletken çubuk kaydırıldığında, halkadan geçen manyetik akı zamanla artar. Lenz kanunu uyarınca, indüksiyon akımı, kağıt düzleminden okuyucuya doğru, karşı koyan türde bir akı oluşturmak üzere, saat ibrelerinin tersi yönde olmalıdır. (b) Çubuk sola doğru hareket ettiği zaman indüksiyon akımı saat ibrelerinin yönünde olmalıdır. Niçin?

Ev Deneyi

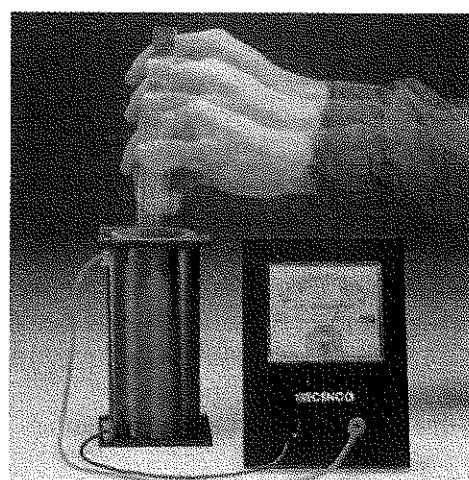
Bu deney, titremeyen eller, küçük bir madeni para ve güçlü bir mıknatıs gerektirir. Bu küçük madeni paranın mıknatıs tarafından çekilmedinini saptadıktan sonra, bunu dik duracak şekilde yerleştirin. (Bu işlem, diğer büyük madeni paralarla gerçekleşmez. Çünkü onları devirmek için çok büyük bir kuvvette ihtiyaç vardır.) Mıknatısın bir ucunu paranın yüzüne bir milimetre mesafeye kadar yaklaştırın. Şimdi mıknatısı geriye doğru çok hızlı bir şekilde uzaklaştırın. Para hangi yönde devrilir? Para her zaman aynı yönde mi devrilir? Lenz yasasından yararlanarak nelerin olduğunu açıklayın. Şekil 31.13 ten yararlanmak isteyebilirsiniz.



Şekil 31.13 (a) Miknatis, durgun olan iletken halkaya doğru hareket ettiği zaman, şekilde gösterilen yönde bir akım olur. (b) Bu induksiyon akımı, sağa doğru artmaka olan dış akıya karşı koymak üzere sola doğru kendi manyetik akışını meydana getirir. (c) Miknatis, durgun olan iletken halkadan uzaklaştırıldığı zaman, gösterilen yönde bir akım olur. (d) İndüksiyon akımı, sağa doğru yönelmiş olan bir manyetik akı oluşturur ve azalmakta olan dış akıya karşı koymuş olur.

Sınamaya Sorusunu 31.13

Şekil 31.14, bir miknatinin, galvanometreye bağlı olan bir solenoidein içerisindeki hareketini göstermektedir. Miknatinin güney kutbu, solenoide yakın olan kutuptur ve galva-



Şekil 31.14 Galvanometreye bağlı olan solenoide bir miknatis yaklaştırıldığı veya uzaklaştırıldığı zaman, galvanometre ibresinin anlık sapmasıyla anlaşılan, bir elektrik akımı induklenebilir. (Richard Megna/Temel Fotoğraflar)

metre, solenoiddeki akımın (üstten bakıldığımda) saat ibreleri yönünde olduğunu gösterir. Deneyci, mıknatısı içeriye doğru mu yoksa dışarıya doğru mu hareket ettiriyor?

KAVRAMSAL ÖRNEK 31.6

Lenz Yasasının Uygulaması

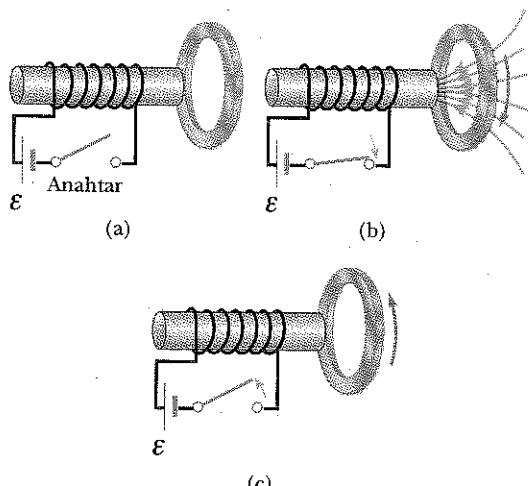
Bir metal halka, Şekil 31.15a'da görüldüğü gibi solenoidin yakınına yerleştiriliyor. Halkada oluşan induksiyon akımının yönünü, (a) solenoidi içeren devredeki anahtar kapalığı anda, (b) anahtarları kapatılma anından birkaç saniye sonra ve (c) anahtar açıldığı anda bulunuz.

Cözüm (a) Anahtar kapadığı anda, halkadan hiçbir manyetik akı çizgisinin geçmediği bir durumdan, Şekil 31.15b de gösterilen yönde akı çizgilerinin geçtiği bir durum gelinir. Akıda bu değişiklikle karşı koymak için, halkadaki indüklenmiş akım, Şekil 31.15b'de görüldüğü gibi solan sağa doğru bir manyetik alan oluşturmalıdır. Bu, gösterilen yönde bir akım gerektirir.

(b) Anahtarın kapatılmasından birkaç saniye sonra, halkadan geçen akıda hiçbir değişiklik olmaz; dolayısı ile halkadaki akım sıfırdır.

(c) Anahtarın açılması, manyetik akımın halkadan geçtiği durumdan, akımın sıfır olduğu bir duruma gelinmesine sebep olur. Indüklenmiş akımın yönü, Şekil 31.15c'de gösterilen yönde bir akım gerektirir.

terildiği gibidir; çünkü bu yöndeki akım, sağdan sola doğru yönelmiş olan bir manyetik alan oluşturmalıdır. Bu gösterilen yönde bir akım gerektirir.



Şekil 31.15

KAVRAMSAL ÖRNEK 31.7

Manyetik Alan İçinde Hareket Eden Halka

Boyları ℓ ve w olan ve direnci de R olan dikdörtgen bir metalik halka, Şekil 31.16a'da olduğu gibi sayfa düzlemine dik ve içeriye doğru yönelmiş olan ve x ekseni boyunca $3w$ mesafesine kadar uzanan, düzgün bir B manyetik alanı içinden, sabit bir v hızıyla sağa doğru hareket ediyor. x 'i, x -ekseni boyunca halkanın sağ kenarından itibaren ölçülen konum olarak tanımlarsak, x in fonksiyonu olarak (a) halkanın çevrelediği alandan geçen manyetik akımı, (b) indüklenmiş hareketsel emk'ı ve (c) manyetik kuvveti denelemek ve v hızını sabit tutmak için gerekli olan dış kuvveti bulunuz.

Cözüm (a) Şekil 31.16b, halkanın çevrelediği alandan geçen akımı x 'in fonksiyonu olarak göstermektedir. Halka, alan içine girmeden önce akı sıfırdır. Halka alan içine girerken, halkanın sol kenarı alanın içine tümüyle girene kadar, akı konumla doğrusal olarak artar. Son olarak, halka alan geçten akı, halka, alanı terk edene kadar doğrusal olarak sıfıra düşer.

(b) Halka, alanla girmeden önce, herhangi bir alan olmadığı için, herhangi bir hareketsel emk'de yoktur (Şekil 31.16c). Halkanın sağ tarafı alan içine girdikçe, sayfa düzleminden içeriye doğru yönelen manyetik akı arar. Böylece, Lenz yasasına uygun olarak oluşan akım, saat ibresinin

tersi yönündedir; çünkü bu akım, sayfa düzleminden dışarıya doğru bir manyetik alan meydana getirmek zorundadır. $-Blv$ heraketsel emk'i (Eşitlik 31.5 ten), halkanın sağ kenarındaki yüklerin manyetik kuvvetin etkisi altında kalmalarından ileri gelir. Halka tümüyle alan içinde olduğu zaman, akıda değişiklik sıfırdır ve oluşan hareketsel emk de sıfır olur. Halkanın sol kenarı alan içine girer girmez, bunun içinde oluşan hareketsel emk, halkanın sağ kenar alanı terk ettiğe, içeriye doğru olan akı azalmaya başlar, saat ibreleri yönünde bir akım oluşur ve indüklenmiş emk Blv dir. Sol kenar, alanı terk etmez emk sıfır düşer.

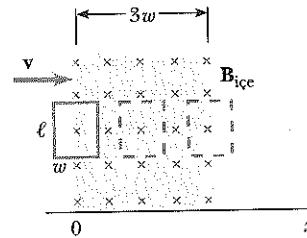
(c) Bu hareketi devam ettirmek için halkaya etki etmesi gereken kuvvet Şekil 31.16d de çizilmiştir. Halka alana girmeden önce, üzerine etkiyen herhangi bir manyetik kuvvet yoktur; böylece v sabit ise halkaya etkiyen kuvvet sıfır omalıdır. Halkanın sağ kenarı alana içine girdiği zaman, sabit hızı korumak için gerekli olan dışarıdan uygulanan kuvvet, bu kenara etkiyen ve $F_B = -IlB = -B^2\ell^2v/R$ ye eşit ve yönlü olan manyetik kuvvette eşit olmalıdır. Halka tümüyle alan içinde olduğu zaman, halka içinden geçen akı zamanla zamanla değişmez. Böylece halkada indüklenmiş net emk sıfır olup, akım da sıfırdır. Bu sebeple, halkanın hareketini devam ettirmek için herhangi bir dış kuvette ihtiyaç yoktur. Son olarak, sağ kenar manyetik alanı terk et-

tikçe, dış kuvvet halkanın sol kenarına etkiyen manyetik kuvvette büyüklük bakımından eşit ve yön bakımından zıt olmalıdır.

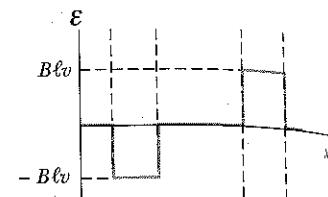
Bu incelemeden, güç girişiminin, sadece halka alana gi-

rerken ya da çıkışken sağlandığı sonucuna varılır. Bunun ötesinde, bu örnek, halkada indükleşmiş hareketsel emk'in, alan içinden geçen manyetik akı zamanla değiştiği anda hareketsel emk oluşur.

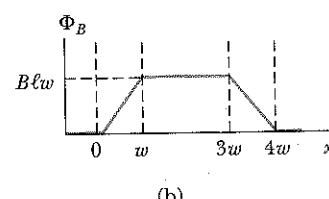
5



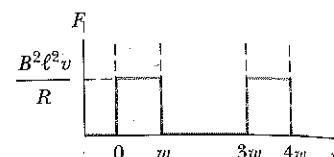
(a)



(c)



(b)



(d)

Şekil 31.16 (a) w genişliğinde, ℓ uzunluğunda olan ve $3w$ genişliğindeki düzgün bir manyetik alan içinde sabit bir v hızıyla hareket eden dikdörtgen bir halka; (b) Halkanın konumunun fonksiyonu olarak akının değişimi; (c) Ön kenarın konumunun fonksiyonu olarak indüksiyon emk'inin değişimi; (d) Halka hızının sabit olması halinde kuvvetin konuma göre değişimi.

31.4

INDÜKSİYON EMK'LERİ VE ELEKTRİK ALANLAR

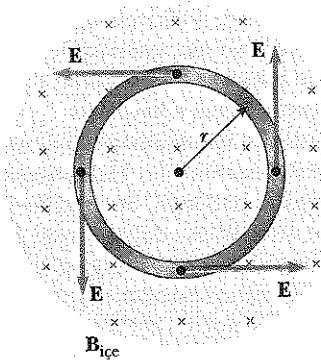
Değişen bir manyetik akının, iletken bir halkada (ilmek) emk ve akım oluşturduğu gördük. Bu sebeple, **manyetik akı değişiminin bir sonucu olarak, iletkende bir elektrik alanının meydana geldiği** sonucuna varılmalıdır. Bununla birlikte, indükleşmiş olan bu elektrik alanı, durgun yüklerin oluşturduğu bir elektrostatik alandan ayıran, iki önemli özelliği vardır: oluşan bu alan korunaklı olmayıp, zamanla değişmektedir.

Bu noktayı, Şekil 31.17 de görüldüğü gibi, halkanın düzleminde dik düzgün bir manyetik alan için yerleştirilmiş olan r yarıçaplı iletken halkayı düşünerken açıklayabiliriz. Manyetik alan zamanla değişirse, Faraday yasasına (Eşitlik 31.1) uygun olarak, halkada bir $\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt$ emk'i oluşturur. Böylece ortaya çıkacak olan bu indükleşmiş akım, indükleşmiş bir E elektrik alanının varlığını vurgular. Halkadaki tüm noktalar eşdeğer olduklarından, bu elektrik alan halkaya teget olmalıdır. Bir q deneme yükünü halka etrafında bir defa hareket ettirmek için yapılan iş $q\mathcal{E}$ ye eşittir. Bu yüze etkiyen elektriksel kuvvet qE olduğundan, halka etrafında bu yükü hareket ettirmek için bu kuvvetin yaptığı iş $qE(2\pi r)$ ye eşittir. Burada $2\pi r$ halkanın çevre uzunluğudur. İş için yazılan bu iki ifade eşit olmalıdır, böylece

$$q\mathcal{E} = qE(2\pi r)$$

$$E = \frac{\mathcal{E}}{2\pi r}$$

elde edilir. Bu sonucu, Faraday yasasını ve dairesel bir halkanın $\Phi_B = BA = \pi r^2 B$



Şekil 31.17 Halka düzleminde dik düzgün bir manyetik alan içinde r yarıçaplı bir halka. B zamanla değişirse, halkaya teget yönde bir elektrik alanı oluşur.

gerçegini kullanarak, indüklenmiş alan

$$E = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt} \quad (31.8)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Manyetik alanın zamanla değişimi belirlenirse, indüklenmiş elektrik alan Eşitlik 31.8'den kolayca hesaplanabilir. Bu eşitlikteki negatif işaret, indüklenmiş elektrik alanın, manyetik alandaki değişime karşı koyacak yönde olduğunu belirtir.

Herhangi bir kapalı yol için emk, yol boyunca $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ nin çizgisel integrali olarak ifade edilebilir: $\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$. Daha genel durumlarda, \mathbf{E} sabit olmayabilir, yol dairesel olmayıpabilir. Böylece, Faraday'ın indüksiyon yasası olan $\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt$ aşağıdaki genel biçimde yazılabilir:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.9)$$

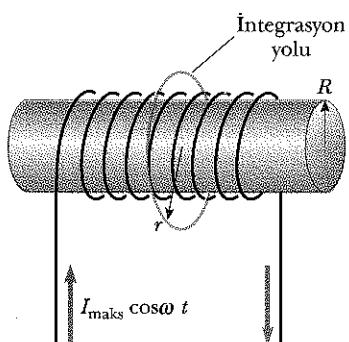
Faraday Yasasının genel biçimi

Eşitlik 31.9 da görülen indüklenmiş \mathbf{E} elektrik alanını, korunumlu olmayan, değişen bir manyetik alan yardımıyla oluşturulmuş, zamanla değişen bir alan olarak tanımlamak önemlidir. Eşitlik 31.9'u sağlayan \mathbf{E} alanının, aşağıdaki sebeple, bir elektrostatik alan olma olasılığı yoktur. Alan elektrostatik ve dolayısıyla korunumlu olsaydı, kapalı halka üzerinden $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ nin çizgisel integrali, Eşitlik 31.9'un aksine, sıfır olacaktı.

ÖRNEK 31.8 Solenoidde değişen bir manyetik alanın oluşturduğu elektrik alanı

R yarıçaplı uzun bir selenoid, birim uzunluğunda n sarım ve $I = I_{\max} \cos \omega t$ şeklinde zamanla sinüsel olarak değişen bir akım taşıtsın. Burada I_{\max} maksimum akım ve ω akım kaynağının açısal frekansıdır (Şekil 31.18). (a) Solenoidin dışında, ana eksen boyunca $r > R$ olacak şekilde, bir r uzaklığında indüklenmiş elektrik alanının büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm İlk olarak, solenoidin dışında bir noktayı alalım ve Şekil 31.18 de olduğu gibi solenoidle aynı merkezli r yarıçaplı bir daireyi çizgisel integral için çizelim. Si-



Şekil 31.18 $I = I_{\max} \cos \omega t$ şeklinde zamanla değişen akım taşıyan bir selenoid. Solenoidin içinde ve dışında bir elektrik alan oluşur.

metri nedeniyle bu yol boyunca \mathbf{E} nin büyüklüğünün sabit ve doğrultusunun da yola teget olduğunu görürüz. Bu daireden geçen manyetik akı $BA = B(\pi R^2)$ bağıntısıyla verilir ve Eş. 3.19'dan

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} (B\pi R^2) = -\pi R^2 \frac{dB}{dt}$$

$$(1) \quad \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E(2\pi r) = -\pi R^2 \frac{dB}{dt}$$

sonucu bulunur. Uzun bir solenoidin içindeki manyetik alan, Eş. 30.17'de, $B = \mu_0 nI$ ile verilir. $I = I_{\max} \cos \omega t$ bağıntısı bu denkleme konulduğunda ve elde edileni de (1) denkleminde yerine koymak,

$$E(2\pi r) = -\pi R^2 \mu_0 n I_{\max} \frac{d}{dt} (\cos \omega t) = \pi R^2 \mu_0 n I_{\max} \omega \sin \omega t$$

$$(2) \quad E = \frac{\mu_0 n I_{\max} \omega R^2}{2r} \sin \omega t \quad (r < R \text{ için})$$

bulunur. Böylece, elektrik alanının zamana göre sinüsel olarak değiştiği, solenoidin dışında, genliğinin $1/r$ ile azalladığı görülür.

(b) Solenoidin içinde ve eksenden r uzaklığında elektrik alanının büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm İçteki bir nokta ($r < R$) için, integral halkasından geçen akı $B\pi r^2$ bağıntısıyla verilir. (a) daki işlemin ay-

nisini yaparak

$$E(2\pi r) = -\pi r^2 \frac{dB}{dt} = \pi r^2 \mu_0 n I_{\text{maks}} \omega \sin \omega t$$

$$(3) \quad E = \frac{\mu_0 n I_{\text{maks}} \omega}{2} r \sin \omega t \quad (r < R \text{ için})$$

Bu, solenoidden geçen manyetik akının değişmesi yoluyla solenoid içinde induklenen elektrik alanını genliğinin, r ile doğrusal olarak arttığını ve zamana göre sinüsseel olarak değiştigini göstermektedir.

Alışturma Solenoidin iç ve dış bölgeleri için yazılan (2) ve (3) denklemlerinin $r = R$ sınırında uyumuşunu gösteriniz.

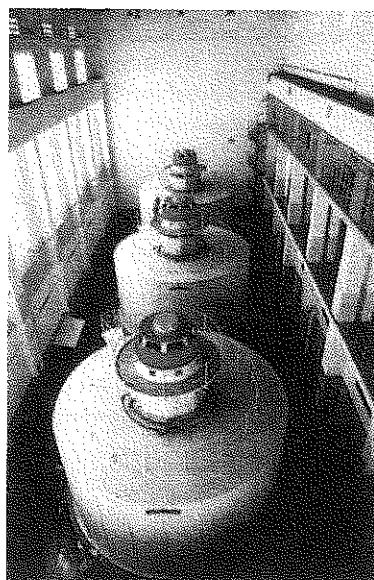
Alışturma Solenoidin içine bir demir parçası konulsayıdı, elektrik alanı farklı mı olacaktı?

Cevap Evet, solenoid içinden geçen maksimum manyetik alan (ve dolayısı ile akıdaki değişiklik) binlerce kez daha büyük olacağı için, elektrik alanı da çok büyük olacak! (Örnek 30.10 a bakınız).

Seçmeli Kesim



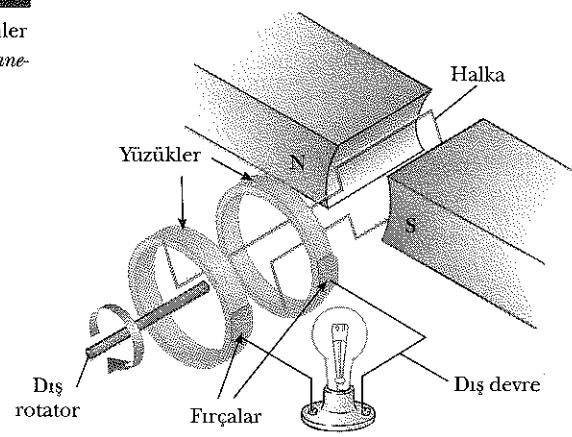
JENERATÖRLER VE MOTORLAR



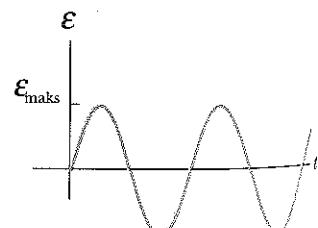
Bir hidroelektrik santralde türbinler jeneratörü döndürür. (Luis Castaneda / The Image Bank)

Elektrik jeneratörleri elektrik enerjisi üretmek için kullanılır. Bunların nasıl çalıştığını anlamak için, mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştüren **alternatif akım (ac) jeneratörünü** ele alalım. ac jeneratörü, en basit biçimde, manyetik alan içinde bazı dış etkenlerle dönen bir tel halkadan ibarettir.

Ticari enerji santrallerinde, halkayı döndürmek için gerekli olan enerji değişik kaynaklardan temin edilebilir. Örnek olarak, bir hidroelektrik santralde türbün kanatlarına doğru yönlendirilen bir su kütlesi dönme hareketini meydana getirir; kömür yakan bir santralde, yanın kömürün sağladığı enerjinin, suyu buhar haline dönüştürmesi ve bu buharın türbün kanatlarına çarptırılması yine dönme hareketi oluşturur. Halka manyetik alan içinde döndükçe, halkanın çevrelediği alandan geçen manyetik akı zamanla değişir; bu, Faraday yasasına uygun olarak, halkada bir emk oluşturur. Halkanın uçları, halka ile birlikte dönen toplayıcı yüzüklerle bağlıdır. Bu toplayıcı yüzüklerle dış devre arasında yapılan bağlantılar, jeneratörün çıkış terminaleri olarak rol alırlar.



(a)



(b)

Şekil 31.19 (a) ac jeneratörünün şematik gösterimi. Manyetik alan içinde bazı dış etkenler tarafından döndürülen bir halkada emk oluşur. (b) Halkada oluşan alternatif emk zamana göre çizilmiştir.

Bu halkanın, tek bir sarım yerine, herbirinin alanının A ve N tane sarıma (uygulamaya daha yakın bir durum) sahip olduğunu ve halkanın sabit bir ω açısal hızıyla manyetik alan içinde döndüğünü varsayılmı. Şekil 31.20 de olduğu gibi, manyetik alan ile halka düzleminin normali arasındaki açı θ ise, herhangi bir t anında halkadan geçen manyetik akı

$$\Phi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

şeklinde verilir. Burada, açısal yerdeğiştirme ile açısal hız arasındaki $\theta = \omega t$ bağıntısı kullanıldı (Denklem 10.3'e bakınız). ($t = 0$ olduğu zaman, $\theta = 0$ olacak şekilde saatimizi ayarlıyoruz). Böylece, halkada oluşan induksiyon emk

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} (\cos \omega t) = NAB\omega \sin \omega t \quad (31.10)$$

bağıntısıyla verilir.

Bu sonuç, Şek. 31.19b de çizildiği gibi, emk'in zamanla sinüsse olarak değişğini göstermektedir. emk'in maksimum değerinin

$$\mathcal{E}_{\text{maks}} = NAB\omega \quad (31.11)$$

olduğu ve bu değeri, Eşit.31.10 a göre, $\omega t = 90^\circ$ veya 270° olduğu anda aldığı görülmektedir. Başka bir deyişle, manyetik alanın halka düzleminde olduğu ve akının zamanla değişim hızının da maksimum olduğu durumda $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{maks}}$ dir. Bunun ötesinde, $\omega t = 0^\circ$ veya 180° olduğu, yani \mathbf{B} nin halka düzlemine dik ve akının zamanla değişim hızının sıfır olduğu anda emk sıfırdır.

Birleşik Devletlerde ve Kanadada ticari jeneratörler için frekans 60 Hz dir, buna karşın bazı Avrupa ülkelerinde ise 50 Hz kullanılır. (f hertz cinsinden frekans olmak üzere $\omega = 2\pi f$ olduğu hatırlanmalıdır.)

ÖRNEK 31.9 Bir Jeneratörde Oluşan Indüksiyon Emk

Bir acjeneratörü, herbirinin alanı $A = 0,09 \text{ m}^2$ ve toplam direnci 12Ω olan 8 tane tel sarıma sahiptir. Bu halka $B = 0,500 \text{ T}$ hk bir magnetik alan içinde 60 Hz değerinde sabit bir frekansla dönmektedir. (a) İndüksiyon emk'in maksimum değerini bulunuz.

Çözüm Önce $\omega = 2\pi f = 2\pi(60 \text{ Hz}) = 377 \text{ s}^{-1}$ olduğu dikkat edelim. Uygun sayısal değerleri ve Eşitlik 31.11 i kullanarak

$$\mathcal{E}_{\text{maks}} = NAB\omega = 8 (0,09 \text{ m}^2) (0,500 \text{ T}) (377 \text{ s}^{-1}) = 136 \text{ V}$$

elde edilir.

(b) Dış uçlar, düşük dirençli bir iletkenle bağlılığı zaman, indüksiyon akımının maksimum değeri nedir?

Cevap Denklem 27.8 den ve (a) nin sonucundan fay-

dalanarak

$$I_{\text{maks}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{maks}}}{R} = \frac{136 \text{ V}}{12,0 \Omega} = 11,3 \text{ A}$$

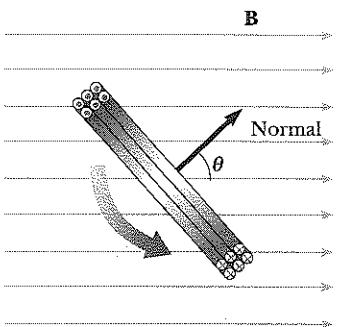
değeri bulunur.

Alıştırma Dış uçlar düşük dirençli bir iletkenle bağlandığı zaman, indüksiyon emk'in ve indüksiyon akımının zamanla değişimini belirleyiniz.

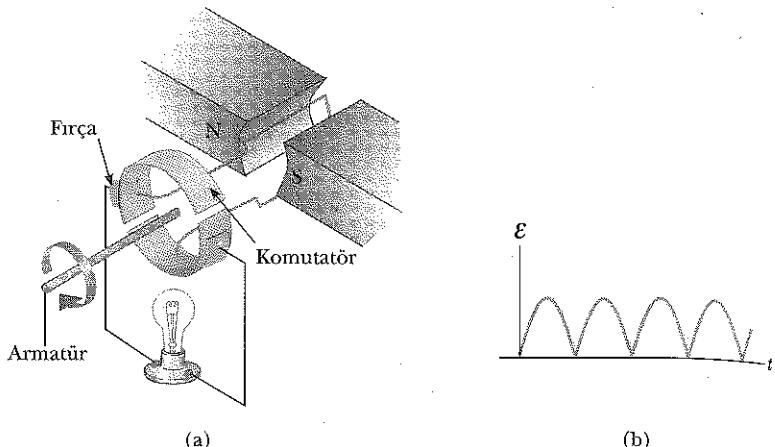
Cevaplar $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{maks}} \sin \omega t = (136 \text{ V}) \sin 377t$;
 $I = I_{\text{maks}} \sin \omega t = (11,3 \text{ A}) \sin 377t$

Doğru akım (dc) jeneratörü Şekil 31.21a da gösterilmiştir. Böyle jeneratörler, örnek olarak, eski model arabalarda akümülatörü yüklemek için kullanılmıştır. Dönen halka ile olan temasların, toplayıcı yüzükle (veya komütatör) olması dışında, kullanılan parçalar esasen ac jeneratöründekilerle aynıdır.

Bu şekillenimde, çıkış voltajı daima aynı polariteye sahiptir (+ veya -) ve Şekil 31.21b de olduğu gibi, akım atma şeklinde doğru akımdır. Bunun sebebi, toplayıcı yüzüğe olan temasların her bir yarımda rollerini değiştirdiklerine dikkat edilerek anlaşılabilir. Aynı zamanda, indüksiyon emk'in po-



Şekil 31.20 Herbirinin alanı A olan N sarıma sahip, manyetik alan içinde w sabit açısal hızıyla dönen bir halka. Halkada oluşan induksiyon emk zamanla sinüsse olarak değişir.



Şekil 31.21 (a) Bir dc jeneratörünün şematik gösterimi. (b) Zamana göre çizilmiş olan emk büyülüklük bakımından dalgalanır fakat polarite hiç değişmez.

laritesi de değişir; böylece toplayıcı yüzüğün polaritesi (çıkış voltajının polaritesi ile aynıdır) aynı kalır.

Atmalı akım çoğu uygulamalar için uygun değildir. Daha kararlı dc akım elde etmek için, ticari dc jeneratörlerde, değişik halkalardan ileri gelen sinüssel atmaların farklı fazlarda olmalarını temin edecek şekilde çok sayıda armatür halkalar ve komütatörler kullanılır. Bu atmalar üst üste geldiklerinde, dc çıkış hemen hemen dalgalanmalardan arındırılmış olur.

Motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren aygıtlardır. Esas olarak *bir motor, ters yönde çalışan bir jeneratördür*. Dönmen bir halka yardımıyla bir akım üretme yerine, bataryadan halkaya bir akım sağlanır ve akım taşıyan halkaya etkiyen tork (döndürme momenti) halkanın dönmesine neden olur.

Dönen armatürleri bazı dış aygıtlara birleştirerek faydalı mekanik iş elde edilebilir. Bununla beraber, halka döndükçe değişen manyetik akı, halkada bir emk indukları; bu induksiyon emk *daima* halkadaki akımı azaltma yönünde etkir. Durum böyle olmasaydı, Lenz Kanununa aykırı olacaktı. Armatürün dönme hızı arttıkça, *geri emk* büyülüklük bakımından artar. (*Geri emk* sözü, dıştan sağlanan akımı azaltma eğiliminde olan bir emk'i işaret eder.) Akımı temin edecek olan voltaj, dıştan sağlanan voltaj ile geri emk arasındaki farka eşit olduğu için, halkasından geçen akım geri emk tarafından sınırlanmıştır.

Motor çalışmaya başladığı zaman, başlangıçta herhangi bir geri emk yoktur; böylece, akım sadece halkanın direnci ile sınırlı olduğu için, çok büyük tür. Halka dönmeye başladıkça, indüklenmiş geri emk uygulanan voltaja karşı koyar ve halkalardaki akım küçülür. Mekanik yük artarsa, motor yavaşlaşır bu da geri emk'in küçülmesine sebep olur. Geri emk'teki bu azalma halkalardaki akımı artırır ve böylece dış voltaj kaynağından sağlanan güç de artmış olur. Bu sebeple, bir motorun ilk hareketini başlatmak ve ağır yük altında çalıştırmak için gerekli olan güç, hafif yük için gerekli olandan, daha büyuktur. Motor herhangi bir mekanik yük olmaksızın çalıştırılırsa, geri emk, ısı ve sütürmeden ileri gelen enerji kayıplarını tam yenecek kadar, akımı belli bir derece kadar azaltır. Çok ağır bir yük, motorun dönmesini engelleyecek kadar, motoru sıkıştırırsa, böyle bir geri emk'in eksikliği, motor sargılarında tehlike yaratacak kadar yüksek akımın geçmesine yol açar. Bu problem giderilmezse yanım çıkabilir.

ÖRNEK 31.10 Motordaki İndüklenmiş Akım

$10\ \Omega$ dirençli halkalara sahip bir motorun 120 V luk bir kaynağa bağlandığını farzedin. Motor maksimum bir hızla dönerken, geri emk 70 V dur. Halkalardaki akımı (a) motor çalıştırıldığı anda, ve (b) Motor maksimum hızda ulaştığı anda bulunuz.

Çözüm (a) Motor çalıştırıldığında geri emk sıfırdır. (Halkalar hareketsiz.) Böylece halkalardaki akım maksimum olup,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{120\text{ V}}{10\ \Omega} = 12\text{ A}$$

değerine sahiptir.

(b) Maksimum hızda, geri emk maksimum değerdedir. Böylece etkin olan kaynak gerilimi, dış kaynak geriliminden geri emk'in çıkarılmasıyla oluşur. O halde, akım

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{geri}}}{10\ \Omega} = \frac{120\text{ V} - 70\text{ V}}{10\ \Omega} = \frac{50\text{ V}}{10\ \Omega} = 5,0\text{ A}$$

değerine düşmüştür.

Aliştırma Belli bir anda motordaki akım $8,0\text{ A}$ ise bu anda geri emk nedir?

Cevap 40 V .

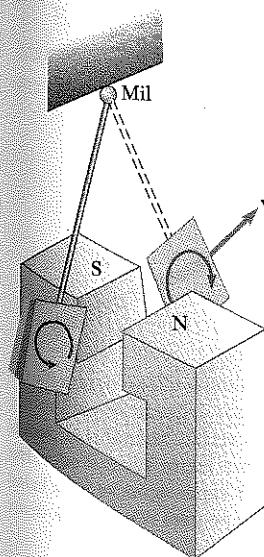
Seçmeli Kesim

GIRDAP AKIMLARI

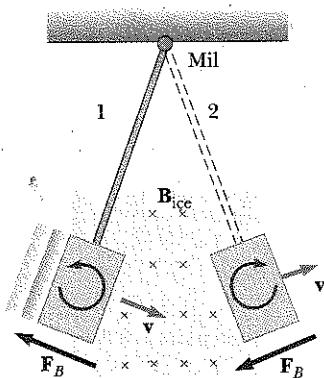
Manyetik akıyi değiştirerek, devrede bir emk ve bir akım oluştuğunu gördük. Benzer türde, manyetik alan içinde hareket eden metal külçeler içinde **girdap akımları** denen dolanan akımlar oluşur. Katı bir çubuğu ucundaki düz bir bakır veya alüminyum plakanın manyetik alan içinde sarkaç gibi salınmasına izin vererek, bu durum gösterilebilir (Şek.31.22). Plaka alana girdikçe değişmekte olan aki, plakada bir induksiyon emk doğurur, bu da metaldeki serbest elektronların hareket etmesine ve dönen girdap akımlarının oluşmasına neden olur. Lenz kanununa uygun olarak, girdap akımlarının yönü kendilerinin oluşmasına neden olan değişime karşı koyacak yönüdedir. Bu sebeple, girdap akımları plaka üzerinde etkin manyetik kutuplar meydana getirecek ve bu kutuplar da mıknatısın kutupları tarafından itilecektir. Böylece plakanın hareke-

Ev Deneyi

Güçlü bir mıknatısı, bir düzlemede ileri-geri sallanacak biçimde iki tane asın. Salınımı başlatarak, duruncaya kadar yaklaşık kaç defa sallanacağını belirleyin. Salınımı tekrar başlatın ve mutfağınızdaki düzlemsel alüminyum folyoyu çabucak mıknatısın dokunmayacak şekilde titreşim düzlemine bir milimetre kadar yaklaştırın. Bu durumda mıknatısın durması ne kadar zaman alır?



Şekil 31.22 Manyetik alan içinde hareket eden bir iletkende girdap akımlarının oluşması. Plaka, alan içine girip çıkışıkça, değişmekte olan manyetik aki girdap akımlarına sebep olan bir induksiyon emk oluşturur.



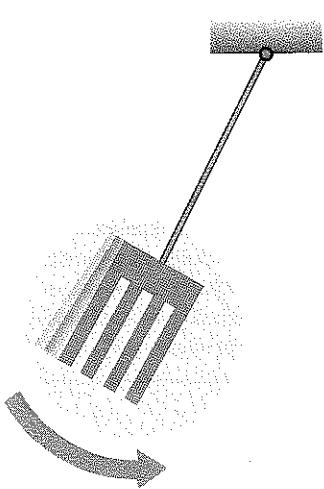
Şekil 31.23 İletken plaka 1 konumunda alan içine girdikçe girdap akımları saat ibrelerinin tersi yönündedir. Plaka, alanı terk ettikçe (2. konum) akımlar saat ibreleri yönündedir. Her bir durumda, plakaya etkilenen kuvvet, hızı zit yönlüdür ve plaka durgun hale gelir.

tine karşı koyan itici bir kuvvet ortaya çıkmış olacaktır. (Bunun tersi doğru olursa, her salınımdan sonra plaka ivmelenecel ve enerjisi, enerjinin korunması yasasına aykırı olarak, artacaktı.) Sayfa 997 deki Ev Deneyini yaparken, güçlü bir mıknatısın alanı içinde bir bakır veya alüminyum plakanın çekilmesi sırasında, bu geciktirici kuvveti hissetmiş olabilirsiniz.

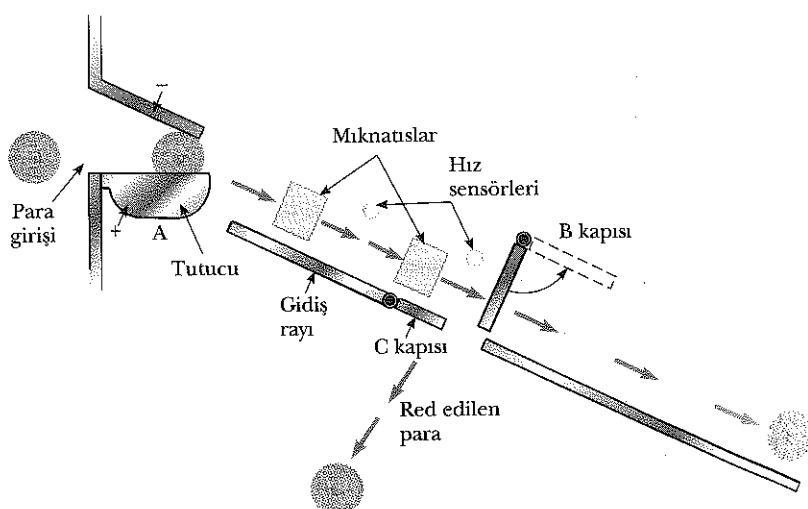
Şekil 31.23'de belirtildiği gibi, kağıt düzlemden içeriye doğru olan bir B alanının varken, salınan plaka 1 konumundaki alan içine girdiğinde oluşan girdap akımı saat ibrelerinin tersi yönünde olacaktır. Bunun nedeni kağıt düzlemden içeriye doğru olan dış manyetik akımın artmasıdır ve buradan Lenz yasasını uyarınca, indüklenmiş akım, kağıt düzlemden dışarıya doğru bir manyetik akı oluşturmalıdır. Plaka, 2 konumunda alanı terk ettiğinde, bunun tersi doğrudur; burada akım saat ibreleri yönündedir. Plaka alan içine girdiğinde ve çıktıığında, indüklenmiş girdap akımı daima geciktirici bir manyetik F_B kuvveti meydana getirdiği için, salınan plaka en sonunda durgun hale gelir.

Şekil 31.24 te görüldüğü gibi, plakada yarıklar oluşturulursa, girdap akımları ve buna karşılık geçiktirici kuvvet büyük ölçüde azaltılır. Plakadaki yarıkların, büyük akım ilmeklerinin oluşumunu engellediği gözönüne getirilerek, bu durum anlaşılabılır.

Pek çok tüp geçit ve hızlı ulaşım araçlarındaki frenleme sistemleri elektromanyetik induksiyon ve girdap akımlarından faydalıdır. Trenin yapıtırlanın bir elektromıknatıslı, çelik raylara yakın olacak şekilde yerleştirilir. (Bir elektromıknatıslı, gerçekte, bir demir çekirdeğe sahip olan bir bobindir). Elektromıknatıstan büyük bir akım geçirildiği zaman frenleme etkisi ortaya çıkar. Mıknatısın ve rayların göreli hareketi raylarda girdap akımlarını indükler ve bu akımların yönü, hareketli tren üzerinde bir sürükleme kuvveti oluşturur. Tren yavaşlaştıkça girdap akımları büyülüük bakımından gittikçe azaldığı için, frenleme etkisi tümüyle sarsıntısızdır. Girdap akımlı frenler bazı mekanik terazilerde ve değişik makinalarda da kullanılır. Trenin mekanik enerjisindeki kayıp, raylarda ve tekerlerde iç enerjiye dönüşür. Kimi elektrikli araçlar, elektrik devresi kesildiğinde hızlıca dönen dairesel bıçakların durdurulmasında, girdap akımlarından yararlanır.



Şekil 31.24 İletken plakada yarıklar oluşturulursa, girdap akımları küçülür ve plaka manyetik alan için daha serbest bir şekilde salınır.



Şekil 31.25 Madeni para, para makinesine sokulduğunda, A konumuna ulaşan paraya bir potansiyel fark uygulanır ve paranın direncini ölçer. Bu direnç, kabul edilir değerde ise para tutucu aşağıya doğru eğilir ve paranın içteki ray boyunca yuvarlanması izin verilir. Miknatıslar, parada girdap akımlarını oluşturur veya meydana gelen manyetik kuvvet paranın hızını kontrol eder. Hız sensörleri, paranın doğru değerde bir hızı sahip olduğunu algılasa, B kapısı açılır ve para kabul edilir. Para, doğru değerde bir hızı sahip değilse, C kapısı açılır ve para ret edilerek döşenir.

Mekanik enerjinin iç enerjiye dönüşümünü temsil ettikleri için, girdap akımları genellikle istenmez. Bu enerji kaybını azaltmak için, hareketli iletken parçalar yapraklar haline getirilir, yani, vernik veya metal oksit gibi iletken olmayan malzemelerle birbirinden ayrılmış ince tabakalardan oluşturulur. Bu katmanlı yapı; girdap akımlarının mümkün olabilecek yolları için direnci artırır ve etkin olarak akımları tek tek katmanlar içine sınırlar. Böyle katmanlı yapılar, transformatörler ve motorlarda girdap akımlarını minimum hale getirmek ve böylece bu cihazların verimini artırmak için kullanılır.

Şekil 31.25 te görüldüğü gibi, madeni para ile çalışan makineden bir çikolata satın almak gibi basit bir işlemde bile girdap akımlarından yararlanıldığı anlaşılır. Delikten içeri sokulan para, elektriksel direnci ölçülené kadar, kısa bir an durdurulur. Direnci, kabul edilebilir değerler arasında bulunursa, eğimli bir yolboyunca manyetik alan içinden geçmesine izin verilir. Alan içinde hareket ettikçe, para içinde girdap akımları oluşur ve manyetik kuvvetler hafifçe yavaşlamasına sebep olur. Buradaki yavaşlama miktarı paranın metalik bileşimine bağlıdır. Sensörler, miknatısları geçen paranın hızını ölçerler ve bu hız beklenen değerlerle karşılaştırılır. Para yasal ise ve bu denemeleri geçerse, bir kapı açılır ve para kabul edilir; durum böyle değilse ikinci bir kapı açılır ve para ret edilerek dışarı atılır.

31.7 MAXWELL'İN HARİKA DENKLEMLERİ

Bu bölümü, tüm elektrik ve manyetik olayların temeli olarak kabul edilen dört tane denklemi sunarak bitireceğiz. James Clerk Maxwell'in formüle etmesi nedeniyle Maxwell denklemleri olarak bilinen bu denklemler, mekanik olayların tartışılmamasında Newton kanunlarının rolü ne ise, elektromanyetik olayların incelenmesinde benzer görevi yaparlar. Gerçekte, Maxwell tarafından geliştirilen teori, 1905 de Einstein'in, özel relativite teorisi ile uyum içinde olması gibi, o zamanlarda kendi hayal ettiğinden bile daha ileri düzeyde sonuçlara götürdü.

Maxwell denklemlerinin, şu ana kadar tartışılmış olan elektrik ve manyetizmanın kanunlarını temsil ettiğini göreceğiz. Bununla beraber, bu denklemler daha başka önemli sonuçlara götürür. Bölüm 34 te bu denklemlerin, $c = \sqrt{1/\mu_0\epsilon_0} = 3,00 \times 10^8$ m/s ışık hızıyla hareket eden elektromanyetik dalgaların (elektrik ve manyetik alanların hareketli desenleri) varlığını öngördüğünü göstereceğiz. Ayrıca, bu teori böyle dalgaların, ivmeli yükler tarafından yanındığını gösterir.

Basitlik için **Maxwell denklemlerini**, herhangi bir dielektrik ve manyetik malzemenin olmadığı ortamda, yani *serbest uzaya* uygulandığı biçimde sunacağız. Bu dört denklem aşağıdaki gibidir:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (31.12)$$

Gauss Yasası

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (31.13)$$

Manyetizmada Gauss Yasası

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.14)$$

Faraday Yasası

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (31.15)$$

Ampère-Maxwell Yasası

Denklem 31.12, herhangi bir kapalı yüzeyden geçen toplam elektrik akımının bu yüzey içindeki net yükün ϵ_0 'a bölümüne eşit olduğunu ifade eden Gauss yasasıdır. Bu yasa elektrik alanını, bu elektrik alanını meydana getiren, yük dağılımına bağlar.

Manyetizmadaki Gauss kanunu olarak düşünülebilen Denklem 31.13, kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akının sıfır olduğunu ifade eder. Yani, kapalı bir hacime giren manyetik alan çizgilerinin sayısı, bu hacmi terkedenlerin sayısına eşittir. Bu, manyetik alan çizgilerinin herhangi bir noktada başlayamacağını veya sona eremeyeceğini sezdirir. Bu durum gerçekleşseydi, o noktalarda yalıtılmış manyetik monopollerin (tek kutuplar) var oldukları anlaşılıacaktı. Doğada yalıtılmış manyetik tek kutupların gözlenmemesi geçegi, Denklem 31.13'ün doğrulanması olarak dikkate alınabilir.

Denklem 31.14, değişen bir manyetik akının oluşturduğu elektrik alanını tanımlayan Faraday'ın induksiyon yasasıdır. Bu yasa, herhangi bir kapalı yol boyunca elektrik alanının çizgi integrali olan emk'in bu kapalı yol boyunca sınırlanan herhangi bir yüzey alanından geçen manyetik akının zamanla değişim hızına eşit olduğunu vurgular. Faraday yasasının bir sonucu, zamanla değişen bir manyetik alan içine yerleştirilen iletken halkada bir akım oluşmasıdır.

Genellikle Amper-Maxwell yasası olarak bilinen Denklem 31.15, amper yasasının genelleştirilmiş biçimidir. Bu yasa, değişen elektrik alanı ve elektrik akımları tarafından oluşturulan manyetik alanın oluşumu tanımlar: Herhangi bir kapalı yol boyunca manyetik alanın çizgi integrali, bu kapalı yol içinden geçen, akının, μ_0 ile çarpımının, bu kapalı yol boyunca sınırlanmış herhangi bir yüzeyden geçen elektrik akımının değişim hızının, $\epsilon_0\mu_0$ ile çarpımının toplamına eşittir.

Uzayda belli bir noktada elektrik ve manyetik alanlar bilinirse, q yüklü bir parçacığa etkiyen kuvvet aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (31.16)$$

Bu, bağıntıya **Lorentz kuvvet yasası** denilir. (Bu bağıntıyı daha önce eşitlik 29.16 olarak gördük). Bu kuvvet yasası ile beraber Maxwell denklemleri, tüm klasik elektromanyetik etkileşmeleri tam olarak anlatır.

Maxwell denklemlerinin simetrisini belirtmek ilginçtir. 31.12 ve 31.13 denklemleri, Denklem 31.13'te bir manyetik monopolün yokluğu dışında, simetiktir. Bunun ötesinde, 31.14 ve 31.15 denklemleri, kapalı bir yol boyunca \mathbf{E} ve \mathbf{B} nin çizgi integrallerinin, sırasıyla, manyetik akı ve elektrik akı değişim hızına bağlılığı anlamında simetiktir. John R. Pierce³ tarafından "Maxwell'in harika denklemleri" olarak adlandırılan bu denklemler, sadece elektromanyetizm için değil fakat tüm bilim için temel öneme sahiptir. Heinrich Hertz, bir keresinde "insan, bu matematiksel formüllerin bağımsız bir varlık oldukları, kendilerine ait bir zekaları olduğu, bizden ve hatta kaşiflerinden daha bilge oldukları ve onlara verdigimizden daha çوغunu onlardan aldığımız hissinden kaçamaz" yazmıştır.

ÖZET

Faraday'ın induksiyon yasası, bir devrede oluşan induksiyon emk'nin, devreden geçen manyetik akının zamana göre değişim hızı ile doğru orantılı olduğunu ifade eder:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.1)$$

Burada $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ manyetik akıdır.

³John R. Pierce, *Elektronlar ve Dalgalar*, Doubleday Science Study Series, 1964. Bu kitabın 6. Bölümünün okunması tavsiye edilir.

ℓ uzunluğunda olan iletken bir çubuk, \mathbf{B} manyetik alanı içinde, çubuk ala-
nına ve \mathbf{v} hızına dik olacak şekilde, \mathbf{v} hızıyla hareket ederse, çubukta indüklenen
hareketsel emk aşağıdaki denklemle verilir:

$$\mathcal{E} = -B\ell v \quad (31.5)$$

Lenz yasası, bir iletkendeki indüklenmiş akım ve indüklenmiş emk'in,
kendilerini meydana getiren değişime karşı koyacak yönde olduklarını ifade
eder.

Faraday'ın indüksiyon yasasının genel biçimini

$$\mathcal{E} = \oint_{\text{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.9)$$

şeklindedir. Buradaki \mathbf{E} , değişen manyetik akı tarafından oluşturulan, koru-
numlu olmayan ve zamana göre değişen elektrik alanıdır.

Maxwell denklemleri, $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ Lorentz kuvvet yasası ile beraber
kullanıldığı zaman, tüm elektromanyetik olaylar açıklanabilir:

$$\oint_{\text{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (31.12)$$

$$\oint_{\text{S}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (31.13)$$

$$\oint_{\text{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (31.14)$$

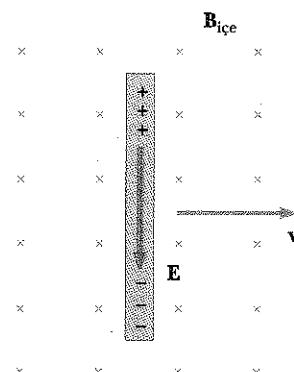
$$\oint_{\text{S}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (31.15)$$

Denklem 31.15 Amper-Maxwell yasası, değişen bir elektrik akısının ve bir ilet-
tim akımının nasıl bir manyetik alan meydana getirdiğini tanımlar.

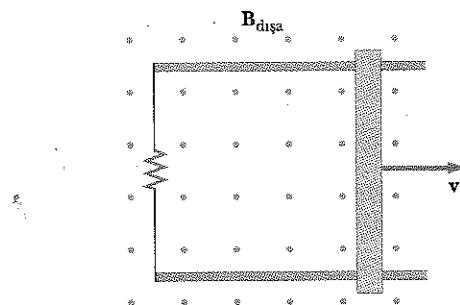
SORULAR

- Düzgün bir manyetik alan içine bir tel halka yerleştirilmiştir. Halkanın hangi yönelme için manyetik akı maksimumudur? Hangi yönelme için akı sıfırdır? Bu iki durum için şekiller çizin.
- Şekil Q31.2 deki iletken çubuk sağa doğru hareket ettikçe, aşağıya doğru yönelmiş bir elektrik alanı oluşur. Çubuk sola doğru hareket etseydi, elektrik alanının yukarıya doğru olmasının nedenini açıklayın.
- Şekil Q31.2 deki çubuk alana dik olarak hareket ettikçe, sabit hızla hareketine devam etmesi için dış bir kuvvete ihtiyaç var mıdır? Açıklayın.
- Şekil Q31.4 teki çubuk ray üzerinde \mathbf{v} hızıyla sağa doğru hareket eder ve düzgün, sabit manyetik alan kağıt düzleminden dışarıya doğru yönelmiştir. Niçin indüklenmiş akım saat ibreleri yönündedir? Çubuk sola doğru hareket etseydi indüklenmiş akımın yönü ne olacaktır?
- Şekil Q31.4 te sabit hızla hareket eden çubuğu hareketinin devamı için neden dış bir kuvvette gerek olduğunu açıklayın.
- Büyük bir dairesel tel halka yatay bir düzlemdede bulunmaktadır. Çubuk bir mıknatıs, halka içinden geçecek

şekilde düşürülmüştür. Mıknatıs düştükçe, ekseni ya-
tay kalırsa halkada indüklenen emk'ini tanımlayınız.
Mıknatıs düştükçe ekseni dikey kalırsa, bu durumda
ne gibi bir değişiklik olur?

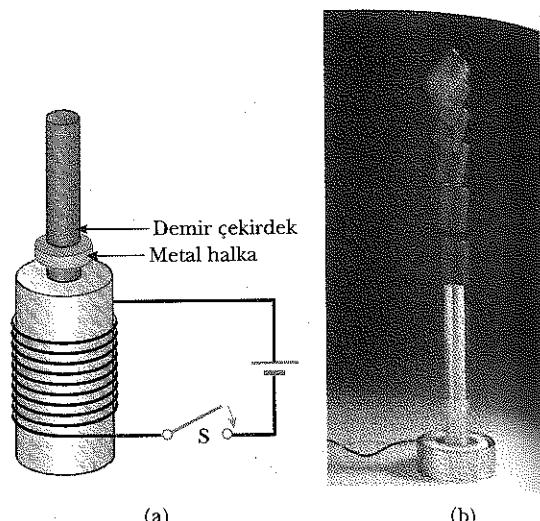


Şekil Q31.2 (Soru 2 ve 3)

**Şekil Q31.4** (Soru 4 ve 5)

7. Küçük bir mıknatıs bir solenoide doğru hareket ettirilirse, bu bobinde bir emk induklenebilir. Bununla beraber, eğer mıknatıs bir toroidal halkanın içinde hareket ettirilirse herhangi bir emk meydana gelmez. Sebebini açıklayınız.
8. Uzun bir bakır boru içinden aşağıya doğru bir mıknatıs düşürülürse, tüpün duvarlarında bir akım meydana gelir mi? Açıklayın.
9. Barajlarda elektrik enerjisi nasıl üretilir (yani, suyun hareket enerjisi alternatif akıma nasıl dönüştürülür)?
10. Bir işinli terazide, denge yakınında işin salınımlarını yavaşlatmak için bazen bir aliminyum plaka kullanılır. Bu plaka, işinin son kısmında monte edilmiş olup, küçük bir at nali mıknatısının kutupları arasında hareket eder. Niçin bu işin salınımları, denge yakınında kuvvetli bir sönüme uğrar?
11. Bir jeneratörün bobini daha hızlı bir şekilde döndürülürse ne olur?
12. Bir mıknatısı bir halka içinde döndürerek bu halkada bir akım induklenebilir mi? Eğer induklenebilirse, bu nasıl olur?

13. Şekil Q31.13a daki devrede bulunan anahtar kapatıldığın zaman, bu bobinde bir akım başlar ve metal yüzük yukarı doğru fırlar (Şekil Q31.13b ye bak). Bu davranışını açıklayın.

**Şekil Q31.13** (Soru 13 ve 14) (Fotoğraf, CSC'nin izniyle)

14. Şekil Q31.13a daki bataryanın bir alternatif akım kaynağı ile yerdeğiştirdiğini ve S anahtarının kapalı tutulduğunu kabul edin. Bobinin üst kısmındaki metal yüzük, aşağı konumda sabit tutulursa işinir. Niçin?
15. Maxwell denklemleri tek manyetik kutupların varlığına izin verir mi? Açıklayın.

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorlu; = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu*'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/simbolik problem çifti

Kesim 31.1 Faraday induksiyon yasası

Kesim 31.2 Hareketsel emk

Kesim 31.3 Lenz yasası

- Boytuları $5,00 \text{ cm} \times 10,0 \text{ cm}$ olan 50 sarımlı dikdörtgen bir bobin, $B = 0$ olan bir konumdan $B = 0,500 \text{ T}$ olan yeni bir konuma, bobinin düzlemi manyetik alana dik olacak şekilde "düşürülmüştür." Bu yerdeğiştirme $0,250 \text{ s}$ de gerçekleşmişse, bobinde induklenen ortalama emk'in büyüklüğünü bulunuz.
- $8,00 \text{ cm}^2$ lik alana sahip tek sarımlı düz bir tel halka, $1,00 \text{ s}$ lik bir sürede, $0,500 \text{ T}$ dan $2,50 \text{ T}$ değerine düzgün olarak artan bir manyetik alana diktir. Bu halkanın direnci $2,00 \Omega$ ise, induksiyon akımının değeri nedir?

- 25 sarımlı dairesel bir bobinin çapı $1,00 \text{ m}$ dir. Bu bobinin ekseni, $50,0 \mu\text{T}$ değerinde olan dünyanın manyetik alanının doğrultusunu boyunca yerleştirilmiştir. Bobinin ekseni $0,200 \text{ s}$ de 180° döndürülmüştür. Bobinde üretilen ortalama emk'in büyüklüğü nedir?
- A yüzey alanlı dikdörtgen bir halka, bu halka düzlemine dik olan bir manyetik B alanı içine yerleştirilmiştir. Bu alanın büyüklüğü $B = B_{\max} e^{-t/\tau}$ bağıntısına uygun olarak zamanla değişmektedir. Burada B_{\max} ve τ sabittirler. $t < 0$ için alanın değeri B_{\max} dur. (a) Faraday yasasını kullanarak halkada induklenen emk'in aşağıdaki bağıntı ile verildiğini gösterin

$$\mathcal{E} = (AB_{\max}/\tau) e^{-t/\tau}$$

$$(b) A = 0,160 \text{ m}^2, B_{\max} = 0,350 \text{ T} \text{ ve } \tau = 2,00 \text{ s} \text{ ise } t =$$

4,00 s deki \mathcal{E} için sayısal bir değer bulun. (c) (b) de verilen A , B_{\max} ve τ değerleri için \mathcal{E} nin maksimum değeri nedir?

5. Güçlü bir elektromagnat, 1,6 T değerinde bir manyetik alana ve $0,2 \text{ m}^2$ lik bir kesit alanına sahiptir. Toplam direnci 20Ω olan 200 sarımlı bir bobin elektrikmagnat içine koyarsak ve elektromagnatıa verilen gücü 0,02 s de kaldırırsak, bobinde induklenen akım ne olacaktır?

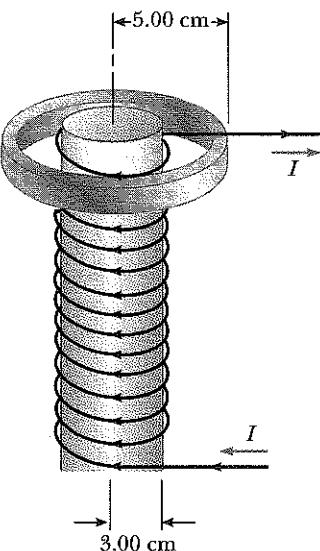
6. 500 sarımlı ve $10,0 \text{ cm}$ çaplı bir solenoidin içinde $0,200 \text{ T}$ değerinde bir manyetik alan vardır. Bobin içinde induklenen emk'in ortalama büyülüğünün 10 kV olabilmesi için, manyetik alanın sıfıra düşmesi ne kadar hızlı (yani, hangi zaman süresi içinde) olmalıdır?

7. $5,00 \text{ cm}$ yarıçaplı ve $3 \times 10^{-4} \Omega$ luk dirence sahip bir alüminyum bilezik, Şekil P31.7'de görüldüğü gibi, 1000 sarım/metre'ye sahip $3,00 \text{ cm}$ yarıçaplı, içi havaya olan uzun bir solenoidin tepesine yerleştirilmişdir. Bileziğin bulunduğu konumda, solenoiddeki akımdan ileri gelen manyetik alanın yarısına eşit olduğunu farzedin. Solenoidin, kendi kesit alanının dışında oluşturacağı manyetik alanın ihmali edilecek kadar küçük olduğunu varsayıñ. (a) Solenoiddeki akım 270 A/s hızla artarsa, bilezikteki induksiyon akımı nedir? (b) Bileziğin merkezinde, bilezikteki induklenmiş akımın meydana getirdiği manyetik alan nedir? (c) Bu alanın yönü nedir?

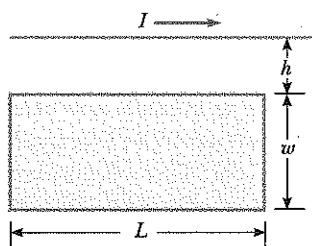
8. r_1 yarıçaplı ve R dirençli bir alüminyum bilezik, Şekil P31.7'de görüldüğü gibi, metre başına n tane sarıma sahip daha küçük bir r_2 yarıçaplı içi hava olan uzun bir solenoidin tepesine yerleştirilmiştir. Bileziğin bulunduğu konumda, solenoiddeki akımdan ileri gelen manyetik alanın eksen doğrultusundaki bileşeninin, solenoidin merkezindeki alanın yarısına eşit olduğunu farzedin. Solenoidin, kendi kesit alanının dışında oluşturacağı manyetik alanın ihmali edilecek kadar küçük olduğunu varsayıñ. (a) Solenoiddeki akım $\Delta I/\Delta t$ hızıyla artarsa bilezikteki induksiyon akımı nedir? (b) Bileziğin merkezinde, bilezikteki induklenmiş akımın meydana getirdiği manyetik alan nedir?

9. w genişliğinde ve L uzunlığında dikdörtgen biçimindeki bir tel halka ile I akımını taşıyan uzun ve doğru bir tel, Şekil P31.9 da görüldüğü gibi, bir masa üzerinde bulunmaktadır. (a) Halka içinden geçen ve I akımından kaynaklanan manyetik akıcıyı bulun. (b) a ve b sabitler olacak şekilde, akımın zamanına göre $I = a + bt$ şeklinde değiştiğini kabul ederek, $B = 10,0 \text{ A/s}$, $h = 1,00 \text{ cm}$, $w = 10,0 \text{ cm}$ ve $L = 100 \text{ cm}$ ise halkadaki induklenmiş olan emk'i bulun. Dikdörtgendeki induksiyon akımının yönelmesi nedir?

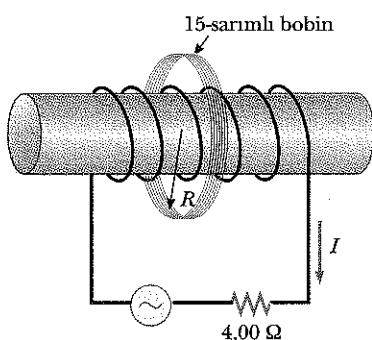
10. 15 sarımlı ve $10,0 \text{ cm}$ yarıçaplı bir bobin, $2,00 \text{ cm}$ yarıçaplı ve $1,00 \times 10^3 \text{ sarım/m}^2$ 'lik uzun bir solenoidi çevrelemektedir (Şekil 31.10). Solenoiddeki akım $I = (5,00 \text{ A}) \sin(120t)$ biçiminde değişirse, 15 sarımlı bobindeki induklenmiş emk'i zamanın fonksiyonu olarak bulunuz.



Şekil P31.7 Problem 7 ve 8.

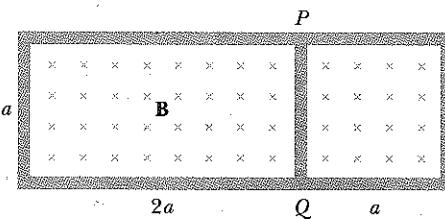


Şekil P31.9 Problem 9 ve 73.



Şekil P31.10

11. Şekil 31.11 de görüldüğü gibi $a = 65 \text{ cm}$ uzunluğundaki PQ kesiminden geçen akımı bulun. Bu devre, $B = (1,00 \times 10^{-3} \text{ T/s})t$ ifadesine uygun olarak büyülüğu zamanla değişen bir manyetik alan içine yerleştirilmiştir. Telin birim uzunluğunun direncinin $1,00 \Omega$ olduğunu varsayıñ.

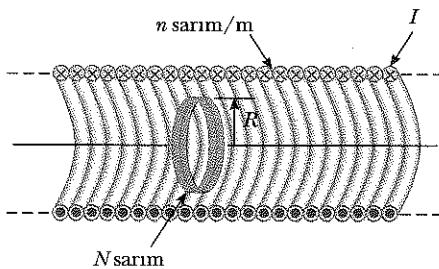


Şekil P31.11

12. 4,00 cm yarıçaplı, 30 sarımlı ve direnci $1,00 \Omega$ olan dairesel bir bobin, bobinin düzlemine dik doğrultuda olan bir manyetik alan içine yerleştirilmiştir. Manyetik alanın büyüklüğü $B = 0,010 t + 0,0400 t^2$ bağıntısına uygun olarak zamanla değişmektedir. Burada t , s ve B de tesla birimine sahiptir. $t = 5,00$ s de bobindeki indüklenmiş olan emk i hesaplayın.

13. Uzun bir solenoid metre başına 400 tane sarıma sahip olup, $I = (30,0 \text{ A})(1 - e^{-1,60t})$ akımını taşımaktadır. Bu solenoidin içinde ve bununla aynı eksene sahip, ince telden sarılmış 250 sarımlı ve 6,00 cm yarıçaplı bir bobin vardır (Şekil P31.13). Akımı değiştirmeden bobinde indüklenen emk ne olacaktır?

14. Uzun bir solenoid metre başına n tane sarıma sahip olup, $I = I_{\max}(1 - e^{-\alpha t})$ akımını taşımaktadır. Bu solenoidin içinde ve bununla aynı eksene sahip, ince telden sarılmış N sarımlı ve R yarıçaplı bir bobin vardır (Şekil P31.13). Akımı değiştirmeden bobinde indüklenen emk ne olacaktır?

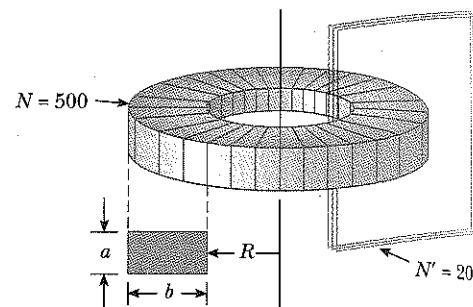


Şekil P31.13 Problem 13 ve 14

15. Kare biçiminde ve sıkıca sarılmış 50 sarımdan oluşan bir bobin, bobin düzleminin normali manyetik alanın yönüyle $30,0^\circ$ açı yapacak şekilde bir manyetik alan içine konmuştur. 0,400 s içinde, manyetik alanın büyüklüğü $200 \mu\text{T}$ dan $600 \mu\text{T}$ ye yükseltilirse, bobinde $80,0 \text{ mV}$ luk bir emk indüklenir. Telin toplam uzunluğu nedir?

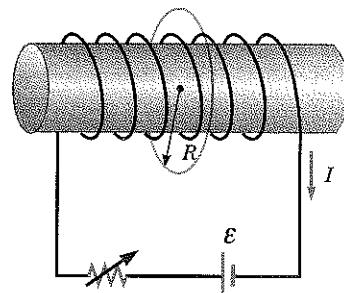
16. 0,500 m yarıçaplı ve dairesel biçimli olan kapalı bir tel halka verilmektedir. Bu halka, $0,400 \text{ T}$ büyülüğünde düzgün bir manyetik alana dik olan bir düzlemede bulunmaktadır. Bu dairesel halka, aynı düzlemede kalmak koşuluyla $0,1$ s içinde kare biçimde dönüştürülürse, bu zaman aralığında telde indüklenen ortalama emk in büyüklüğü nedir?

17. Dikdörtgen kesiti ($a = 2,00 \text{ cm}$ ve $b = 3,00 \text{ cm}$) bir toroidin iç yarıçapı $R = 4,00 \text{ cm}$ ve tel sarımlarının sayısı 500 olup, $I = I_{\max} \sin \omega t$ akımını taşımaktadır. Burada $I_{\max} = 50,0 \text{ A}$ ve frekans $f = \omega / 2\pi = 60,0 \text{ Hz}$ dir. Şekil 31.17 de görüldüğü gibi, telden yapılmış 20 sarımlı bir bobin toroidin bir kısmını içine almaktadır. Bobinde indüklenen emk i zamanın fonksiyonu olarak bulunuz.



Şekil P31.17

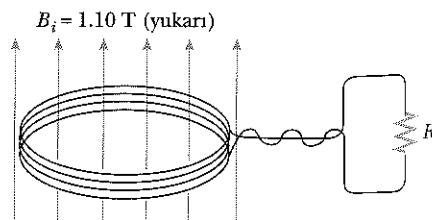
18. R yarıçaplı dairesel ve tek sarımlı halka, ℓ uzunluğunda ve r yarıçaplı N sarıma sahip uzun bir solenoidle aynı eksenlidir (Şekil P31.18). Solenoidin akımı Δt zaman aralığı içinde I_1 den I_2 ye lineer olarak azalacak biçimde direnç değiştiriliyor. Halkada indüklenen emk'i bulunuz.



Değiştirilebilir
direnç

Şekil P31.18

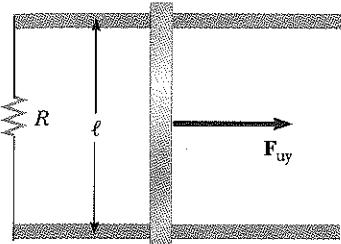
19. 100 cm^2 lik bir alanı çevreleyen dairesel bir bobin, Şekil P31.19 da görüldüğü gibi 200 sarımlı bakır bir telden yapılmıştır. Başlangıçta $1,10 \text{ T}$ lik düzgün bir



Şekil P31.19

manyetik alan, bobinin düzleminde dik olarak yuvarlak düzleme doğru yönlemiştir. Daha sonra manyetik alanın yönü tersine döner. $R = 5,00 \Omega$ ise, manyetik alanın yönünü değiştirme süresinde bobinden geçen yük miktarı nedir?

20. Şekil P31.20 de gösterilen düzeneği inceleyelim. $R = 6,00 \Omega$, $\ell = 1,20$ m ve $2,50$ T değerindeki düzgün bir manyetik alanın sayfa düzleminin içine doğru yönünü düşünelim. Dirence $0,500$ A lik bir akım meydana getirebilmek için, çubuk hangi hızla hareket ettirilmelidir?



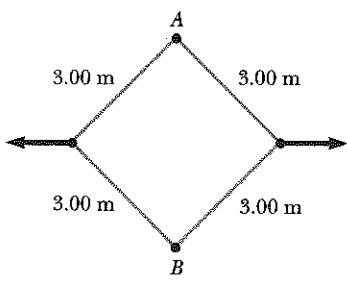
Şekil P31.20 Problem 20, 21 ve 22

21. Şekil P31.20 deki düzenekte iletken bir çubuk, bir tarafından $6,00 \Omega$ luk bir dirençle bağlanmış, sürünenesiz iletken raylar üzerinde kendisine, paralel bir biçimde sağa doğru hareket etmektedir. $2,50$ T değerinde bir manyetik alan, kağıt düzleminde içeriye doğru yönlemiştir. $\ell = 1,20$ m ve çubugün kütlesinin ihmali edildiği kabul edilmektedir. (a) Çubuğu sağa doğru 2 m/s lik sabit bir hızla hareket ettirebilmek için uygulanması gereken kuvveti hesaplayınız. (b) Bu dirence hangi hızda enerji verilir?

22. Şekil P31.20 de görüldüğü gibi, ℓ uzunluğundaki iletken bir çubuk iki yatay sürünenesiz ray üzerinde hareket etmektedir. $1,00$ N değerindeki sabit bir kuwert, kağıt düzleminde içeriye doğru yönlemiş bir \mathbf{B} manyetik alanı içindeki bu çubuğu $2,00$ m/s lik bir hızla hareket ettirirse, (a) $8,00 \Omega$ luk bir R direncinden geçen akım nedir? (b) Dirence verilen enerji hızı nedir? (c) \mathbf{F} kuvveti tarafından sağlanan mekaniksel güç nedir?

23. Kanat uzunluğu $60,0$ m olan bir Boeing 747 jeti, Dünyanın manyetik alanının, yatayın 58° altında ve $50,0 \mu\text{T}$ değerinde olduğu Arizona'daki Phoenix bölgesinde 300 m/s'lik bir hızla yatay doğrultuda uçmaktadır. Kanat uçları arasında oluşan voltaj nedir?

24. Şekil P31.24 teki kare halka, toplam direnci $10,0 \Omega$ olan tellerden yapılmıştır. Bu halka, kağıt düzlemine

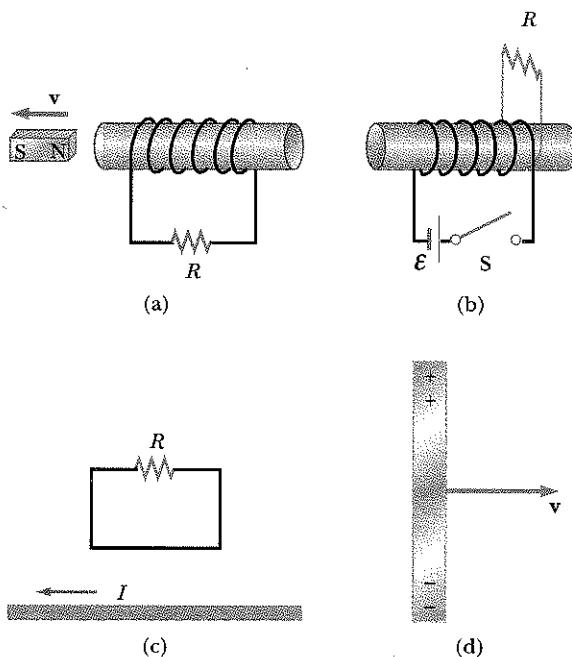


Şekil P31.24

dik ve içeriye doğru olan $0,100$ T lik düzgün bir manyetik alan içine konulmuştur. Her bir köşesinden menteşelenmiş olan bu halka, şekilde görüldüğü gibi A ile B arasındaki mesafe $3,00$ m olacak şekilde çizilmiştir. Bu süreç $0,100$ s sürerse halkada üretilen ortalama akım ne kadardır? Bu akımın yönü nedir?

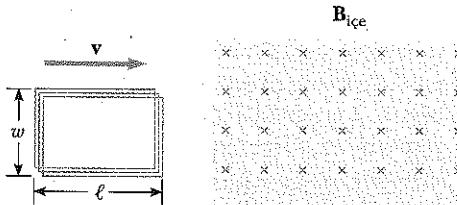
25. Bir helikopterin $3,00$ m uzunluğunda olan kanatları $2,00$ devir/s ile bir merkez etrafında dönmektedirler. Dünyanın manyetik alanının düşey bileşeni $50,0 \mu\text{T}$ ise, kanat ucu ile merkez noktası arasındaki indüklenmiş emk ne kadardır?

26. İndüksiyon akımının yönü hakkında olan aşağıdaki soruları cevaplamak için Lenz yasasını kullanınız. (a) Çubuk mıknatıs sola doğru hareket ettirdiği zaman, Şekil P31.26a daki R direncinde indüksiyon akımın yönü nedir? (b) Şekil P31.26b deki devrede bulunan S anahtarı kapatıldıkten hemen sonra, R direncindeki indüksiyon akımın yönü nedir? (c) Şekil P31.26c deki I akımı hızla sıfıra düşüğü zaman, R deki indüklenmiş akımın yönü nedir? (d) Şekil P31.26d de olduğu gibi, bakır bir çubuk, ekseni manyetik alana dik kalacak şekilde sağa doğru hareket ettirilmiştir. Çubugün üst ucu alt ucuna göre pozitif olursa manyetik alanın yönü nedir?



Şekil P31.26

27. R dirençli dikdörtgen bir bobin, Şekil P31.27 de görüldüğü gibi, her birinin uzunluğu ℓ ve genişliği w olan, N tane sarma sahiptir. Bu bobin, v hızıyla düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanının içine doğru hareket ediyor. (a) Bobin alan içine girerken, (b) Bobin manyetik alan içinde hareket ederken, (c) Bobin manyetik alanı terk ederken, bobine etki eden bileşke kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir?

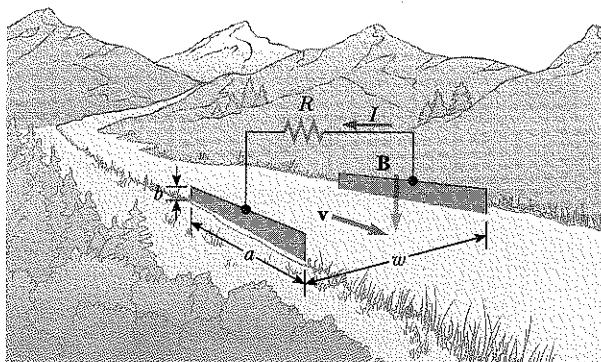


Şekil P31.27

28. Faraday, 1832 yılında Şekil P31.28'de görülen düzeneğin, Taymis nehrinde akan sudan elektrik akımı elde etmek için kullanılabileceğini öne sürdü.⁴ *a* uzunluğuna ve *b* genişliğine sahip iki iletken plaka, aralarındaki mesafe *w* olacak şekilde, birbirine paralel olarak nehrin zıt iki kenarında tümüyle gömülü olarak yerleştirilmişlerdir. Nehrin akış hızı *v* ve Dünya'nın manyetik alanının düşey bileşeni *B* dir. (a) *R* yük direncindeki akımını,

$$I = \frac{abvB}{\rho + abR/\omega}$$

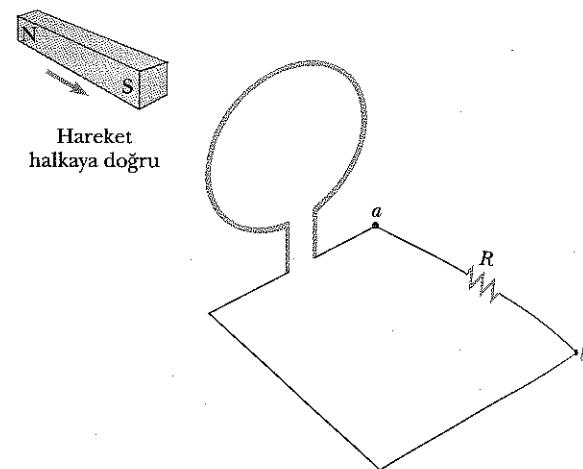
olduğunu gösterin. Buradı *r*, suyun elektriksel özdirencidir. (b) *a* = 100 m, *b* = 5,00 m, *v* = 3,00 m/s, *B* = 50,0 μ T ve ρ = 100 $\Omega \cdot \text{m}$ ise, kısa-devre akımını (*R* = 0) hesaplayınız.



Şekil P31.28

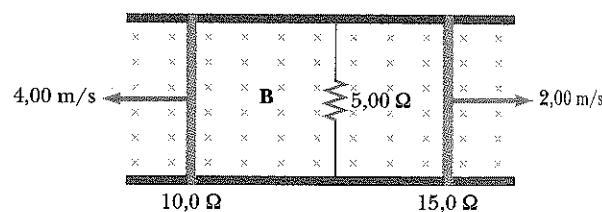
29. Şekil P31.29 daki çubuk mıknatıs, halkaya doğru hareket ettirilmiştir. $V_a - V_b$ pozitif mi, negatif mi yoksa sıfır mıdır? Açıklayın.
30. Şekil P31.10'da olduğu gibi, Dünya'nın manyetik alanında, bir metal çubuk sabit bir hızla dönmektedir. Bu dönme, dünyanın manyetik alanının, dönme düzlemine dik olan bileşeninin $3,30 \times 10^{-5}$ T olduğu bir bölgede gerçekleşmektedir. Bu çubuk, 1,00 m uzunluğunda ve açısal hızı da 5π rad/s ise uçları arasında meydana gelen potansiyel farkı nedir?

⁴ Bu problem ve Şekil P31.28 için, fikir alınan kaynak: Oleg D. Jefimenko, *Electricity and Magnetism; An Introduction to the Theory of Electric and Magnetic fields*. Star City, WV, Electret Scientific Co., 1989.



Şekil P31.29

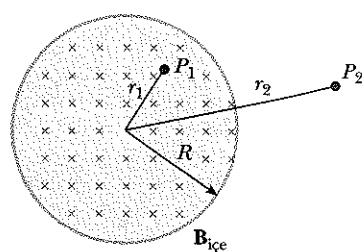
31. Dirençleri ihmali edilen iki paralel ray çubuğu arasındaki mesafe 10,0 cm olup, birbirlerine 5,00 Ω 'luk bir dirençle bağlanılmışlardır. Bu devrede, dirençleri 10,0 Ω ve 15,0 Ω olan iki metal çubuk da bulunmaktadır (Şekil 31.10). Bu çubuklar, dirençten, sırasıyla 4,00 m/s ve 2,00 m/s lik sabit hızlarla yana doğru hareket ettirilmektedirler. Büyüklüğü 0,010 T olan düzgün bir manyetik alan, rayların düzlemine dik olarak uygulanmaktadır. 5,00 Ω luk direnç üzerindeki akımı bulunuz.



Şekil P31.31

Kesim 31.4 İndüklenmiş emk'ler ve Elektrik Alanlar

32. Şekil P31.32'de tanımlanan durum için, Manyetik alan $B = (2,00t^3 - 4,00t^2 + 0,800)T$ şeklinde değişmekte olup, $r_2 = 2R = 5,00$ cm dir. (a) P_2 'ye yerleşmiş olan elektrona $t = 2$ s olduğu anda etkiyen kuvvetin



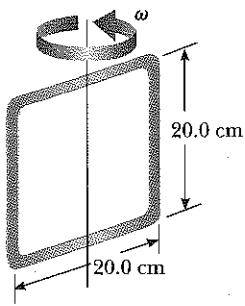
Şekil P31.32 Problem 32 ve 33.

- yönü ve büyüklüğünü hesaplayın. (b) Hangi anda bu kuvvet sıfırı eşittir?
33. Sayfa düzleminde içeriye doğru yönelmiş bir manyetik alan $B = (0,030t^2 + 1,40)$ T denklemine uygun olarak zamanla değişmektedir. Burada t , s birimine sahiptir. Manyetik alan $R = 2,50$ cm yarıçaplı dairesel bir kesite sahiptir (Şekil P31.32). $t = 3,00$ s ve $r_1 = 0,0200$ m olduğu zaman P_1 noktasındaki elektrik alanının büyüklüğü ve yönü nedir?
34. Bir solenoid 2 cm lik bir yarıçap ve 1000 sarım/m ye sahiptir. Akım $I = 3e^{0.2t}$ ifadesine uygun olarak zamanla değişmektedir. Bu denklemde I , A ve t ise s birimindedir. $t = 10$ s de solenoidin ekseninden 5 cm lik bir mesafede elektrik alanını hesaplayın.
35. 1000 sarım/metre lik 2,00 cm yarıçaplı uzun bir solenoid, $I = (5,0 \text{ A}) \sin(100\pi t)$ denklemiyle verilen alternatif bir akım taşımaktadır. (a) Solenoidin ekseninden itibaren $r = 1$ cm uzaklıktaki bir noktada induklenen elektrik alanı nedir? (b) Bobindeki akım saat ibrelerinin tersi yönünde arttuğu zaman, bu elektrik alanının yönü ne olur?

(Seçmeli)

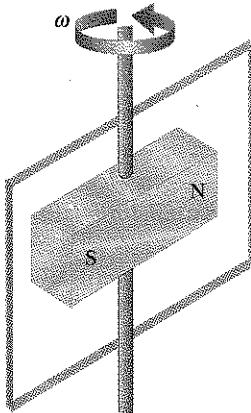
Kesim 31.5 Jeneratör ve Motorlar

36. 250-sarımlı bir otomobil alternatörünün her bir sarımdaki manyetik ağı $\Phi_B = (2,50 \times 10^{-4} \text{ T}\cdot\text{m}^2) \cos \omega t$ dir. Burada ω , alternatörün açısal hızıdır. Otomobil motorunun her bir devri için, alternatörün üç defa dönmesi ayarlanmıştır. Motor, 1000 devir/dakika açısal hızla çalıştığı zaman, (a) alternatörde induklenen emk'i zamanın fonksiyonu olarak bulun, (b) alternatördeki maksimum emk'ibulun.
37. $0,100 \text{ m}^2$ lik alana sahip bir bobin, $0,200 \text{ T}$ değerindeki bir manyetik alana dik olan bir dönmeye eksen etrafında $60,0$ devir/s hızla dönmektedir. (a) Bobin 1000 sarımdan oluşuyorsa, bobinde induklenen maksimum voltaj nedir? (b) Maksimum induklenmiş voltaj gerçekleştiği anda, bobinin manyetik alana göre yönlenmesi nedir?
38. 100 sarımlı telden yapılmış kare şeklindeki bir bobin ($20,0 \text{ cm} \times 20,0 \text{ cm}$), Şekil P31.38 de gösterildiği gibi, düşey bir eksen etrafında dakikada 1500 devir yapacak şekilde dönmektedir. Bobinin bulunduğu konumdağın manyetik alanının yatay bileşeni $2,00 \times 10^{-5} \text{ T}$ dir. Bu alanının bobinde induklediği emk'in maksimum değerini hesaplayın.



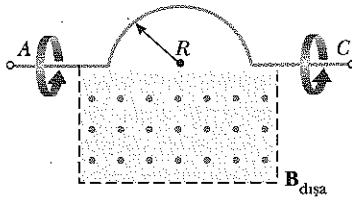
Şekil P31.38

39. Eksen, x eksenile çakışmakta olan uzun bir selenoid 15,0 A lik kararlı bir akım taşıyan 200 sarım/m lik bir telden yapılmıştır. 8,00 cm yarıçaplı dairesel bir çerçeve etrafına, sarım sayısı 30 olacak şekilde ince telden sarılmış bir bobin meydana getirilmiştir. Bu bobin, bobinin çapı eksen kabul ediliyor ve bu eksen de y eksenile çakışacak şekilde, solenoidin içine yerleştiriliyor. Bu bobin $4,00 \pi \text{ rad/s}$ lik bir açısal hızla döndürülür. (Bobinin düzleimi, $t = 0$ da, yz düzlemindedir.) Bobinde meydana gelen emk'i zamanın fonksiyonu olarak bulun.
40. Şekil P31.40 da görüldüğü gibi, bir çubuk mıknatıs bir eksen etrafında w sabit açısal hızıyla döndürülmektedir. Düz, dikdörtgen iletken bir bobin, mıknatısı sarmakta ve $t = 0$ da mıknatıs, şekilde görüldüğü gibi yönlenmiştir. Bobindeki induklenmiş akımı, saat ibrelerinin tersi yöndeği akımı pozitif, saat ibreleriyle aynı yönlü akımı negatif olarak, zamanın fonksiyonu olarak nitel bir grafikle gösterin.



Şekil P31.40

41. (a) Boyutları $2,50 \text{ cm} \times 4,00 \text{ cm}$ olan 80 sarımlı telden yapılmış bobine sahip bir elektrik motorunun üretebileceği maksimum tork nedir? Motorun 10,0 A lik bir akım kullandığını ve motor içinde $0,8 \text{ T}$ değerinde düzgün bir manyetik alan olduğunu kabul edin. (b) Motor 3600 devir/dakika ile dönerse, ürettiği maksimum güç nedir?
42. $R = 0,250 \text{ m}$ yarıçaplı yarıdairesel bir iletken 120 devir/dakika lk sabit bir hızla AC eksen etrafında dönmektedir (Şekil P31.42). Şeklin alt yarısının tümündeki düzgün manyetik alanın değeri $1,30 \text{ T}$ olup, dönmeye düzleminde doğrultuya doğru yönelmiştir. (a) İletkende induklenen emk'in maksimum değerini hesaplayın. (b) Her bir tam dönmeye için ortalamaya emk'in değeri nedir? (c) Düzgün \mathbf{B} alanının, dönmeye ekseninden yukarıya doğru R kadar uzanmasına izin verilseydi, (a) ve (b) şıklarındaki cevaplar nasıl değişecekti? (d) Alan, Şekil P31.42'deki gibi olduğu anda emk'i zamanın fonksiyonu olarak çizin, (e) alan, (c) şıklıkında tanımlandığı gibi ise emk'i zamanın fonksiyonu olarak çizin.



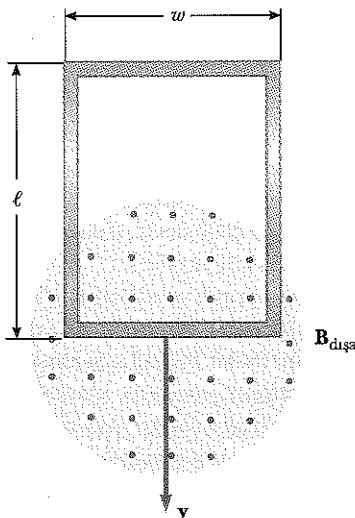
Şekil P31.42

43. Bir ac jeneratöründeki dönen bobin, 10,0 cm kenar uzunluğuna sahip bir karedir. Bu bobin, 0,800 T'lik düzgün bir manyetik alanda 60,0 Hz frekansıyla dönmektedir. (a) Zamanın fonksiyonu olarak bobinden geçen akımı, (b) bobinde induklenen emk'i, (c) Bobinin direnci $1,00 \Omega$ olduğu zaman, bobinde induklenen akımı, (d) Bobinin direncinde harcanan gücü ve (e) Bobini döndürmek için uygulanması gereken torku hesaplayın.

(Seçmeli)

Kesim 31.6 Girdap Akımları

44. Genişliği $1,00 \text{ m}$ ve uzunluğu $1,50 \text{ m}$ olan $0,150 \text{ kg}$ lik kapalı dikdörtgen biçimindeki bir telin direnci $0,750 \Omega$ dur. Bu dikdörtgenin, kendisinin hareket doğrultusuna dik olarak yönelmiş bir manyetik alan içinde düşmesine izin veriliyor (Şekil P31.44). Dikdörtgen, aşağı doğru, $2,00 \text{ m/s}'\text{lik bir limit hızı$ yaklaştıracak biçimde ivmeleniyor ve bu durumda dikdörtgenin üst kenarı manyetik alan bölgесine henüz gelmiyor. \mathbf{B} nin büyüklüğünü hesaplayın.



Şekil P31.44 Problem 44 ve 45.

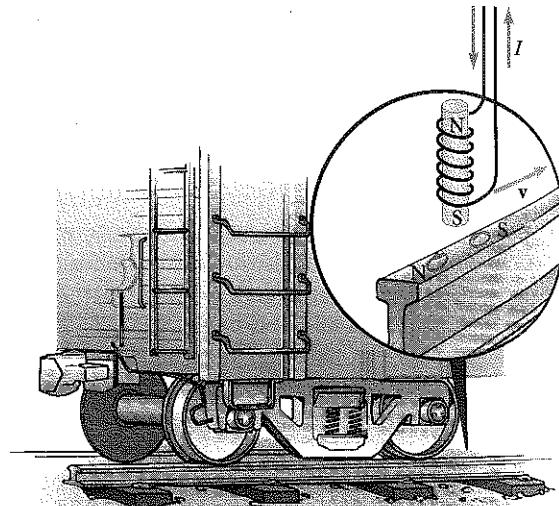
WEB 45. R direncine, w genişliğine ve ℓ uzunluğuna sahip olan M kütleyeli ve dikdörtgen biçimli iletken bir halka, Şekil P31.44 te görüldüğü gibi, bir \mathbf{B} manyetik

alanı içine düşmektedir. Bu halka, v_t limit hızına ulaşıyor (a)

$$v_t = \frac{MgR}{B^2 \omega^2}$$

olduğunu gösterin. (b) Niçin v_t , R ile orantılıdır? (c) Niçin v_t , B^2 ile ters orantılıdır?

46. Şekil P31.46, girdap akımlarından yararlanan bir elektromanyetik freni göstermektedir. Bir elektromagneto, raya yakın bir yerde tren vagonuna asılıyor. Vagonu durdurmak için, elektromagneto bobinlerine büyük bir kararlı akım gönderiliyor. Hareketli olan bu magneto, raylara girdap akımları oluşturur. Bu akımların meydana getireceği manyetik alanlar, elektromagnetonun alanındaki değişikliğe karşı koymalar. Bu girdap akımlarının manyetik alanları, elektromagnetonun akım üzerine kuvvet uygulayarak vagonun yavaşamasına sebep olunur. Vagonun hareket yönü ve elektromagnetonun akımının yönü, resimde doğru olarak gösterilmiştir. Raylarda gösterilen girdap akımlarının hangisinin doğru olduğunu belirleyin. Cevabı açıklayın.



Şekil P31.46

47. Bir proton, $\mathbf{E} = 50,0 \mathbf{j} \text{ V/m}$ ile verilen düzgün bir elektrik alanı ve $\mathbf{B} = (0,200\mathbf{i} + 0,300\mathbf{j} + 0,400\mathbf{k}) \text{ T}$ ile verilen düzgün bir manyetik alan içinde hareket etmektedir. Protonun hızı $\mathbf{v} = 200\mathbf{i} \text{ m/s}$ olduğu zaman ivmesini bulun.

48. Bir elektron, $\mathbf{E} = (2,50\mathbf{i} + 5,00\mathbf{j}) \text{ V/m}$ ile verilen düzgün bir elektrik alanı ve $\mathbf{B} = 0,400\mathbf{k} \text{ T}$ ile verilen düzgün bir manyetik alanı içinde hareket etmektedir. Elektronun hızı $\mathbf{v} = 10,0\mathbf{i} \text{ m/s}$ olduğu zaman ivmesini bulun.

EK PROBLEMLER

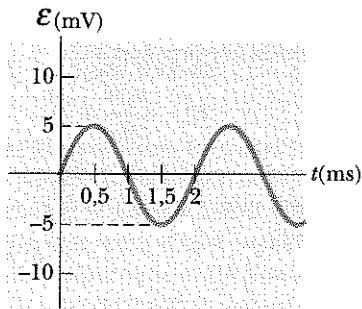
49. Gitarın çelik teli titreşmektedir (Şekil 31.5 e bakınız). Bu telin yakınında bulunan bir algılama bobin

nin alanına dik olan manyetik alanın bileşeni

$$B = 50,0 \text{ mT} + (3,20 \text{ mT}) \sin(2\pi 523 t/\text{s})$$

ile verilmektedir. Dairesel biçimli olan algılama bobinin sarım sayısı 30 ve yarıçapı 2,70 mm'dir. Bobinde induklenen emk'i zamanın fonksiyonu olarak bulunuz.

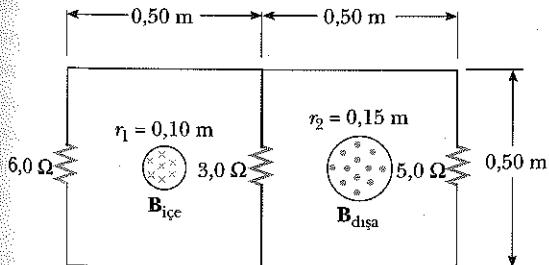
50. Şekil P31.50, bobinin dönmeye eksenine dik olarak yönelik düzgün bir manyetik alan içinde, ω açısal hızıyla dönen N sarımı bir bobin için, induklenen emk'i zamanın fonksiyonu olarak gösterilen bir grafiktir. Bu grafiğin (daha büyük ölçekte) bir fotokopisini alın ve aynı eksen takımı üzerinde emk'in zamanla göre grafiğini: (a) bobinin sarım sayısı iki katına çıkarılırsa (b) sarım sayısı aynı alacak şekilde açısal hız iki katına çıkarılırsa (c) bobinin sarım sayısı yarıya düşürülürken açısal hız iki katına çıkarılırsa, gösterin.



Şekil P31.50

51. $0,00500 \text{ m}^2$ lik bir alanı çevreleyen pırıncı bir bileziği takan bir teknisyen, elini, bileziğin düzlemine dik olarak yönelik, manyetik alanı $5,00 \text{ T}$ olan bir solenoidin içine yerleştiriyor. Bileziğin çevre boyunca olan elektriksel direnci $0,020 \Omega$ dur. Beklenmeyen bir elektrik kesintisi, $20,0 \text{ ms}'lik$ bir zaman içinde alanın $1,50 \text{ T}$ ya düşmesine sebep oluyor. (a) Bilezikte induklenen akımı ve (b) bileziğin direncine verilen gücü bulun. (Not: Bu problem, büyük manyetik alanların bulunduğu bölgelerde çalışırken, herhangi bir metalik cisimin üzerinde olmamasına dikkat edilmesi gerektiğini vurgular.)

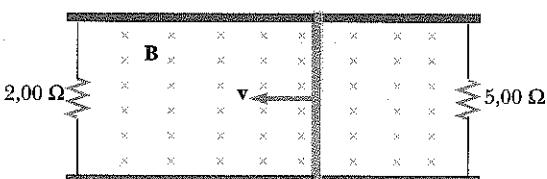
52. Sonsuz uzunlukta iki solenoid (kesitleri görülmüyor), Şekil P31.52 de görüldüğü gibi devreye sokulmuş-



Şekil P31.52

tur. Her birinin içindeki \mathbf{B} nin değeri aynı olup, 100 T/s hızıyla artmaktadır. Her dirençteki akım nedir?

53. $\ell = 35,0 \text{ cm}$ uzunluğunda olan iletken bir çubuk, paralel iki iletken ray üzerinde Şekil P31.53 te görüldüğü gibi serbestçe kayabilemektedir. $R_1 = 2,00 \Omega$ ve $R_2 = 5,00 \Omega$ dirençleri bir halka oluşturacak biçimde rayların zıt uçlarına bağlanmıştır. $B = 2,5 \text{ T}$ lik sabit bir manyetik alan, sayfa düzlemine dik olarak uygulanmıştır. Dış bir etken, çubuğu $v = 8,00 \text{ m/s}$ lik sabit bir hızla sola doğru çekiyor. (a) Her iki dirençteki akımları, (b) devrenin direncine sağlanan toplam gücü ve (c) çubuğu bu sabit hızla hereket ettirebilmek için gerekli olan dış kuvvetin büyüklüğünü bulun.

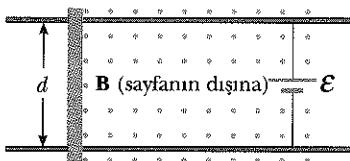


Şekil P31.53

54. Silindir biçimindeki seloteypin üzerine tel sarılarak bir bobin yapılmak isteniyor. Bu bobinde bir voltaj oluşturmak için bir çubuk mıknatısının nasıl kullanılacağını anlatın. Ürettiğiniz emk'in büyülüklük mertebesi nedir? Dikkate aldığınız verileri ve bunların değerlerini ifade edin.

55. R dirençli, m kütleyeli ve d uzunluğuna sahip bir çubuk, Şekil P31.55 te görüldüğü gibi, paralel raylar üzerinde sürtünmesiz olarak kaymaktadır. Sabit bir \mathbf{E} emk ini sağlayan bir batarya, raylar arasına bağlanmış ve sabit bir \mathbf{B} manyetik alanı ise sayfa düzlemine dik olarak yönlendirilmiştir. Çubuk, durgun bir durumdan harekete başlarsa, t anında aşağıdaki hızlı hareket ettiğini gösterin:

$$v = \frac{\mathcal{E}}{Bd} (1 - e^{-B^2 d^2 t/mR})$$

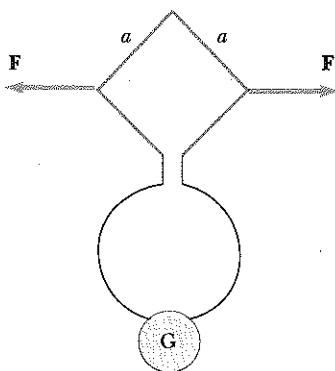


Şekil P31.55

56. Bir otomobil $1,20 \text{ m}$ uzunluğunda düşey bir radyo antenine sahiptir. Dünyanın manyetik alanının $50,0 \mu\text{T}$ olduğu ve yatayın 65° altında aşağı doğru (kuzeye doğru) yöneldiği bir yerde, otomobil yatay yolda 65 km/saat hızla hareket ediyor. (a) Antenin üst kısmına göre pozitif olacak şekilde, antende

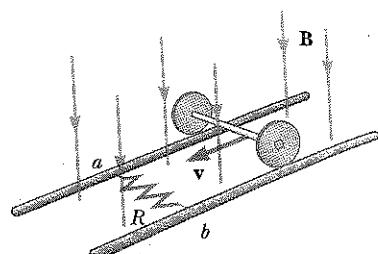
maksimum hareketsel emk'i üretmek için, otomobilin hareket etmek zorunda olduğu yönü bulun. (b) İndüklenmiş emk'in büyüklüğünü hesaplayın.

57. Kenar uzunluğu $a = 0,200$ m olan düzlemsel kare şeklindeki bir bobin, Şekil P31.57 de olduğu gibi, dünyanın manyetik alanının $B = 15,0 \mu\text{T}$ olduğu bir noktada, manyetik alana dik olarak yerleştirilmiştir. Bobinin ve bobini galvanometreye bağlayan tellerin toplam direnci $0,500 \Omega$ dur. Bobin, şekilde görüldüğü gibi yatay kuvvetlerle aniden bozulursa, galvanometreden geçecek olan toplam yük nedir?



Şekil P31.57

58. Manyetik alan değerleri, sıkça *araştırma bobini* olarak bilinen bir alet kullanılarak belirlenir. Bu teknik, bir bobinden, sarımlar arasındaki magnetik akının ya bobinin hareketinden dolayı ya da B nin değerindeki bir değişiklikten dolayı değişmesi süresinde, geçen toplam yükün ölçümüne bağlıdır. (a) Bobinden geçen akı Φ_1 den Φ_2 ye değişirse, t_1 ve t_2 arasında bobinden geçen yükün $q = N(\Phi_2 - \Phi_1)/R$ ile verildiğini gösteriniz. Buradaki R , bobinin ve ilgili devrenin (galvanometre) direnci ve N ise sarım sayısıdır. (b) Tipik bir örnek olarak, 200Ω luk dirence ve $40,0 \text{ cm}^2$ lik kesit alanına sahip 100 sarımlı bir bobin aşağıdaki sonuçları oluşturduğu zaman, B nin değerini hesaplayınız: Düzgün bir manyetik alan içindeki bobin, bobin düzleminin manyetik alana dik olduğu bir konumdan, paralel olduğu bir konuma döndüğü zaman bobinden $5,00 \times 10^{-4} \text{ C}$ luk toplam bir yük geçmektedir.
59. Şekil P31.59 da görülen $1,50$ m uzunluğundaki yuvarlanan tekerlekli mil, yatay raylar boyunca $v = 3,00 \text{ m/s}$ lik sabit bir hızla itilmiştir. $R = 0,400 \Omega$ luk bir direnç, raylara birbirinin tam karşısında olan a ve b noktalarından bağlıdır. (Tekerlekler iyi bir elektriksel temasla raylara bağlıdır. Böylece mil, raylar ve R tam bir kaplı devre oluşturur.) $B = 0,0800 \text{ T}$ değerinde aşağı doğru düzgün bir manyetik alan vardır. (a) Dirençteki I indüklenmiş akımı bulun. (b) Mili sabit bir yuvarlanma hızıyla hareket ettirmek için ge-



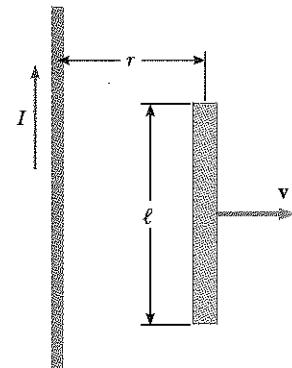
Şekil P31.59

rekli olan yatay \mathbf{F} kuvvetini bulun. (c) Direcin a ve b uçlarından hangisi yüksek elektrik potansiyelde dir? (d) Mil yuvarlanarak direnci geçtiğinden sonra, R deki akım yön değiştirir mi? Cevabınızı açıklayın.

60. Şekil P31.60 da görüldüğü gibi, iletken bir çubuk, I akımını taşıyan uzun ve doğrusal bir tele dik olarak sabit bir v hızıyla hareket etmektedir. Çubuğuun uçları arasında üretilen emk'in

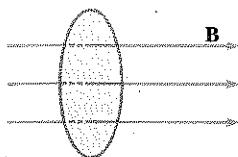
$$|\mathcal{E}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ell$$

denklemini verildiğini gösteriniz. Bu durumda, bekleniği gibi r arttıkça emk'in azaldığını dikkat edilmelidir.

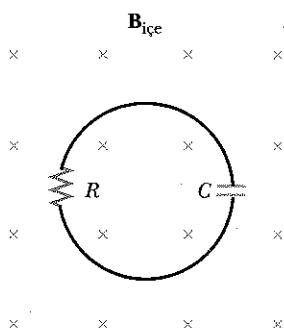


Şekil P31.60

61. r yarıçaplı dairesel bir halka, manyetik alanın yönü dairesel halkanın düzlemine dik olacak şekilde, uzaysal olarak düzgün bir manyetik alan içindedir (Şekil P31.61) Manyetik alan $B(t) = a + bt$ bağıntısına uygun olarak zamanla değişmektedir. Burada a ve b sabitlerdir. (a) $t = 0$ da halkadan geçen manyetik akımı hesaplayın. (b) Halkadaki indüklenmiş emk'i hesaplayın. (c) Halkanın direnci R ise indüklenmiş akım nedir? (d) Halkanın direncine sağlanan elektriksel enerjinin sağlanması hızı nedir?
62. Şekil P31.62 deki düzgün bir manyetik alan, $dB/dt = -K$ sabit hızıyla azalmaktadır. K pozitif bir sabittir. R direncine ve C sigasına sahip a yarıçaplı dairesel bir



Şekil P31.61

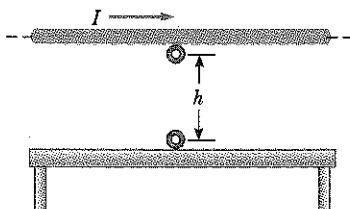


Şekil P31.62

halka, halka düzlemi alana dik olacak biçimde yerleştirilmiştir. (a) Kondansatör tam dolu olduğu zaman kondansatördeki Q yükünü bulun. (b) Kondansatörün hangi levhası daha yüksek potansiyelidir? (c) Yüklerin ayrılmasına neden olan kuvveti tartısun.

63. Boyutları, 0,100 m ile 0,200 m ve toplam direnci 10,0 Ω olan 60 sarımlı dikdörtgensel bir bobin, x - ekseni boyunca olan 1,00 T lik bir manyetik alan içinde, y ekseni etrafında 30,0 rad/s açısal hızıyla dönmektedir. $T = 0$ da bobinin düzlemi B nin yönüne dik olacak şekilde dönme başlatılmıştır. (a) Bobindeki indüklenmiş emk in maksimum değerini, (b) bobinden geçen manyetik akı değişiminin maksimum hızını, (c) $t = 0,500$ s de indüklenmiş emk'in değerini, (d) emk maksimum olduğu zaman, manyetik alan tarafından bobine etkiyen torku hesaplayın.

64. 0,500 cm yarıçaplı dairesel bir metal pul, 10,0 A akım taşıyan uzun ve doğrusal bir telin tam alt ucuna yakın tutulmuştur. Pul, masanın üst yüzünden 0,500 m yukarıda yerleştirilmiştir (Şekil P31.64). (a) Pul, durun halden aşağıya doğru düşürülürse, düşmeye başladığı andan itibaren masaya dokunduğu ana kadar geçen zamanda, pulda indüklenen ortalama emk'in

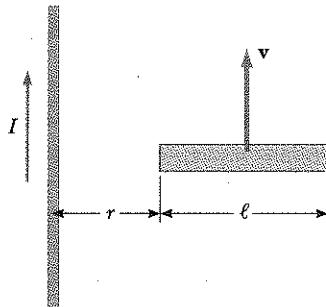


Şekil P31.64

büyüklüğü ne kadardır? Pulun kesit alanı boyunca manyetik alanın, hemen hemen sabit olduğunu ve pulun merkezindeki manyetik alan değerine eşit olduğunu kabul edin. (b) Poldaki indüklenmiş olan akımın yönü nedir?

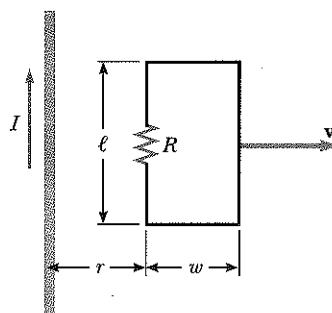
65. Bir hastanın nefes alınmasını izlemek için hastanın göğüsine ince bir kemeri bağlamıştır. Bu kemeri 200 sarımlı bir bobindir. Hafes alırken bobin tarafından çevrelenen alan $39,0 \text{ cm}^2$ kadar artar. Dünyanın manyetik alanı $50,0 \mu\text{T}$ olup, bobin düzlemeyle $28,0^\circ$ lik bir açı yapmaktadır. Hasta $1,80 \text{ s}$ de bir nefes alırsa, hasta nefes alırken, bobindeki ortalama indüklenmiş emk'i bulun.
66. ℓ uzunluğundaki iletken bir çubuk, I kararlı akımını taşıyan uzun bir tele paralel olacak şekilde, v hızıyla hareket etmektedir. Şekil P31.66 da görüldüğü gibi, çubuğun eksenin tele daima dik tutulup, çubuğun tele yakın olan ucu r mesafesindedir. Çubukta indüklenen emk'in aşağıdaki denklemle verildiğini gösterin:

$$|\mathbf{E}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} v \ln \left(1 + \frac{\ell}{r} \right)$$



Şekil P31.66

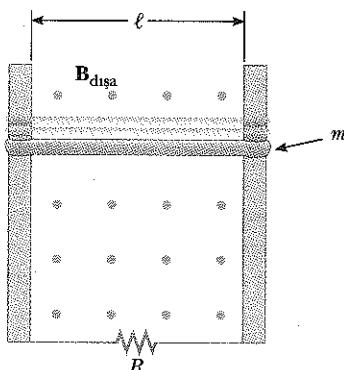
67. Boyutları ℓ ve ω olan dikdörtgen bir bobin, bobinin düzleminde olup I akımını taşıyan uzun bir telden uzaklaşacak şekilde sabit bir v hızıyla hareket etmek-



Şekil P31.67

tedir (Şek. P31.67). Bobinin toplam direnci R dir. Yakın uç telden r kadar uzakta olduğu anda, bobin-deki akımı veren ifadeyi çıkarın.

68. Yatay bir tel, Şekil P31.68'de görüldüğü gibi, düşey iletken raylar üzerinde serbestçe kayabilemektedir. Telin kütlesi m , uzunluğu ℓ ve devrenin direnci R dir. Bu çatuya dik olacak şekilde bir manyetik alan uygulanırsa, yerçekimi etkisi altında düşen bu telin son hızı nedir?



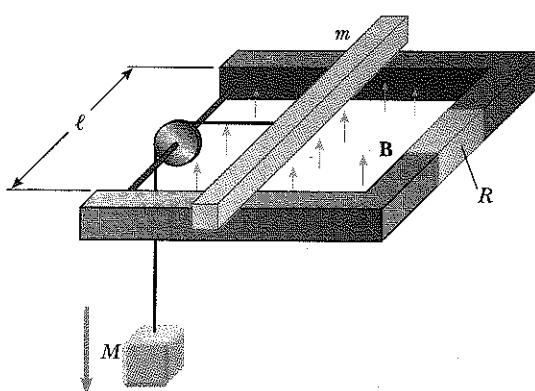
Şekil P31.68

69. Bir metal yüzükten geçen manyetik akı, t zamanına göre şu denklemeye uygun olarak değişmektedir:

$$\Phi_B = 3(a t^3 - b t^2) \text{ T} \cdot \text{m}^2, \quad a = 2,00 \text{ s}^{-3}, \quad b = 6,00 \text{ s}^{-2}$$

Yüzüğün direnci $3,00 \Omega$ dur. $t = 0$ dan $t = 2 \text{ s}$ ye kadar olan zaman aralığında yüzükte induklenen maksimum akımı bulun.

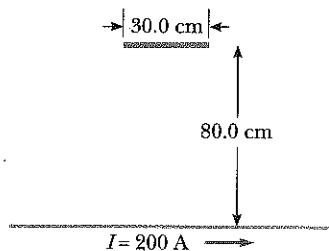
70. **Tarama Problemi.** Şekil P31.70 de görüldüğü gibi m küteli çubuk, ideal bir makaradan geçen kütlesi ihmal edilen bir iple serbestçe asılı bir M kütlesi tarafından, yatay olarak paralel raylar boyunca çekilmektedir. Düzgün olan manyetik alanın değeri B ve raylar arasındaki mesafe de ℓ dir. Raylar bir ucta R direncine bağlıdır. Çubuğun yatay hızını zamanın fonksiyonu olarak veren bir ifade türetin. Durgun



Şekil P31.70

olan asılı kütle ve çubuğun, $t = 0$ da serbest bırakıldığı varsayılmaktadır.

71. 2000 sarım/m lik bir selenoide, $I = 4 \sin(120\pi t)$ denklemine uygun şekilde zamanla değişen bir akım verilmektedir. Burada I , A ve t ise s birimindedir. 5,00 cm yarıçaplı, 40 sarımlı aynı ekseni küçük bir dairesel bobin, merkeze yakın bir şekilde selenoidin içine yerleştirilmiştir. (a) Küçük bobindeki emk'ın zamana göre değişimini tanımlayan bir ifade türetiniz. (b) Sarımların toplam direnci $8,00 \Omega$ ise küçük bobinde enerjinin ortalama harcanma hızı ne olur? 30,0 cm uzunluğundaki bir tel, odanın tabanında sabit bir şekilde duran 200 A lik akım taşıyan bir telden $80,0 \text{ cm}$ yukarıda ve tele paralel bir şekilde tutulmuştur (Şek. P31.72). 30 cm lik telin, akım taşıyan tele paralel kalacak şekilde serbest bırakılarak düşmesine izin veriliyor. Düşen telin $9,80 \text{ m/s}^2$ lik sabit bir ivme ile hızlandığını varsayıarak, düşmeye olan telde induklenen emk için bir denklem çıkarın. Tel düşürüldükten sonra, sonucunu zamanın fonksiyonu olarak ifade edin. Tel serbest bırakıldıkten $0,300 \text{ s}$ sonra induklenen emk ne olur?

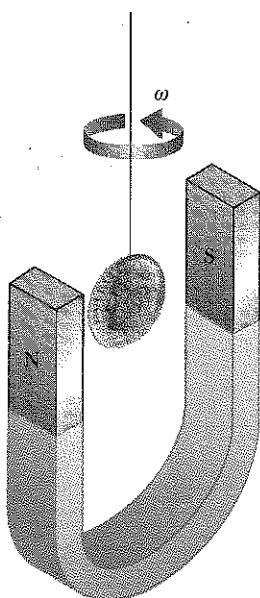


Şekil P31.72

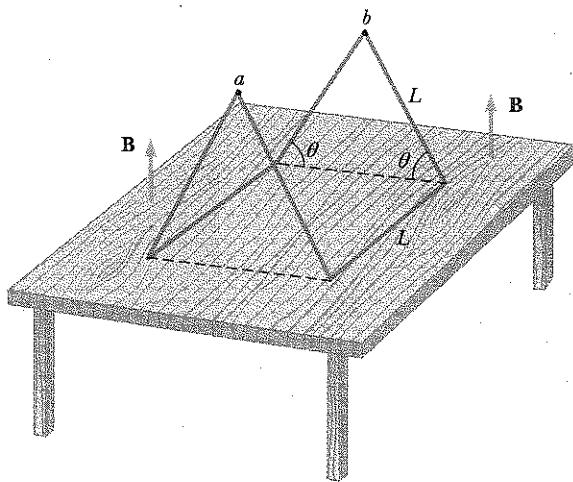
- WEB 73. Doğru ve uzun bir tel, $I = I_{\max} \sin(\omega t + \phi)$ akımını taşımakta ve Şekil P31.9 da görüldüğü gibi N sarımlı bir tel halkanın düzleminde bulunmaktadır. I_{\max} , ω ve ϕ gibi büyüklüklerin tümü sabittir. Doğru şeklindeki telden geçen akımdan dolayı, manyetik alanın halkada induklendiği emk'i bulun. $I_{\max} = 50,0 \text{ A}$, $\omega = 200\pi \text{s}^{-1}$, $N = 100$, $h = w = 5,00 \text{ cm}$ ve $L = 20,0 \text{ cm}$ değerlerini kullanın.

74. Şekil P31.74 te görüldüğü gibi, madeni bir para bir ipin ucuna bağlanmış ve güçlü bir at nahi mıknatısının kutupları arasına asılmıştır. Para, düşey bir eksen etrafında sabit ω açısal hızıyla dönmektedir. B nin yönü ile para yüzünün normali arasındaki açının θ olduğu ve θ nin $0 \leq \theta \leq 2\pi$ arasında değerler aldığı kabul ederek, induklenmiş akımdan ileri gelen torun grafiğini θ nin fonksiyonu olarak çizin.

75. Şekil P31.75 te görülen tel, $\theta = 60,0^\circ$ ve $L = 1,50 \text{ m}$ olmak üzere bir çadır teli biçiminde bükülmüş ve masa yüzeyine dik olarak uygulanan $0,300 \text{ T}$ değerinde düzgün bir manyetik alan içine yerleştirilmiştir. Tel, katı bir biçimde olmasına karşın a ve b noktalarında dönen bir özelliğe sahiptir. Bu çadır teli, $0,100 \text{ s}$ içinde masa üstüne yayılacak biçimde düz hale getirilirse, bu zaman içinde telde induklenmiş olan ortalama emk ne kadardır?



Şekil P31.74



Şekil P31.75

SİNAAMA SORULARININ CEVAPLARI

31.1 Manyetik alan, şimdi zıt yönde olduğu için, θ yi $\theta + \pi$ ile yer değiştirmemiz gerekir. $\cos(\theta + \pi) = -\cos\theta$ olduğu için indüklenmiş emk in işaretini ters çevrilmiş olur.

31.2 Uçağın batı kenarında olduğu. Kesim 30.9 da gördüğümüz gibi, kuzey yarı kürede, Dünya'nın manyetik alanının aşağıya doğru yönelik bir bileşeni vardır. Uçak kuzeye doğru uçtuğunda, Şekil 29.4 te açıklanan sağ el kuralı, pozitif yükün batıya doğru yönelik bir kuvveti hissettiğini ortaya koyar. O halde sol kanat ucu pozitif, sağ kanat ucu da negatif olarak yüklenmiştir.

31.3 Mıknatıs içeriye konmaktadır. Mıknatısın güney kutbu, solenoide yakın olan kutup olduğu için, Şekil 31.14 te mıknatıs tarafından oluşturulan alan çizgileri yukarı doğru yönelik olmuştur. Selonoidde indüklenen akım, yukarıdan bakıldığı zaman saat ibreleri yönünde olduğu için, bu akım tarafından oluşturulan manyetik alan çizgileri, Şekil 31.14 te aşağıya doğru yönelikmiştir. Mıknatıs dışarı doğru çekilseydi, yukarı doğru yönelik azalan bir aki oluşturulacaktı. Indüklenen bu akım, kendisinin yukarı doğru oluşturduğu akiyla, azalmaya karşı koymaktır. Bu durum, gözlenenin tersine, solenoidde saat ibreleninin tersi yönünde bir akım gerektirecektir.