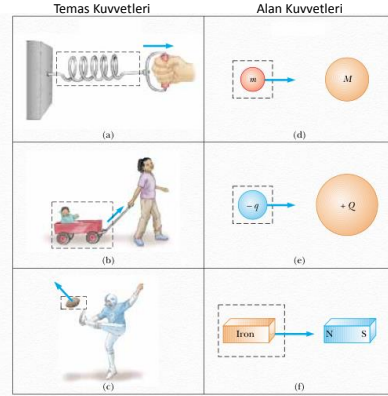




Ariane 5 roketi 22 Nisan 2011 de uzay yolculuğuna başlıyor. Avrupa Uzay Birliği (ESA) tarafından geliştirilen bu roket 9.5 ton yükü Dünya'nın çekim kuvvetinden kurtarıp uzaya taşıyarak bir rekor kırmıştır. Hareketi doğuran temel etken kuvvettir. Hareketin, kuvvet ve kütle gibi kavramlarla ilişkisi tam olarak nedir?

Kuvvet

- Bir cismin hızındaki değişim ancak o cisme bir kuvvet uygulanması ile mümkündür. O halde cismin üzerine uygulanan kuvvet ile cismin ivmesi arasında bir ilişki vardır.
- Kuvvetler temas kuvvetleri ve alan kuvvetleri olmak üzere ikiye ayrılabilir.



Doğada var olan temel kuvvetler:

- 1) **Kütle çekim kuvvetleri**; iki cismin kütlelerinden dolayı birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetleri
- 2) **Elektromanyetik kuvvetler**; durgun veya hareketli iki yüklü parçacığın yüklerinden dolayı birbirlerine uyguladıkları itme veya çekme kuvvetleri
- 3) Atom-altı parçacıklar arasında görülen, şiddetleri büyük **çekirdek kuvvetleri**
- 4) **Zayıf nükleer kuvvetler**; belli radyoaktif bozunumlarda ortaya çıkan kuvvetlerdir.

- Kuvvet F büyüklüğü ve yönü belirlenen **vektörel** bir büyüklüktür.
- Durağan bir cisim üzerine etki eden bileşke (net) kuvvet sıfır ise bu cisim hareketsiz kalır.
- Bir cisme uygulanan net kuvvet, ayrı ayrı itme ve çekmelerden oluşan toplam itme ya da çekmeyi ifade eder.

$$\vec{F}_{net} = \sum_i \vec{F}_i \quad 1N = 1 \text{ kg.m/s}^2$$

$$SI \rightarrow 1 \text{ Newton (N)} = 1 \text{ kg.m/s}^2$$

$$CGS \rightarrow 1 \text{ Dyne (din)} = 1 \text{ g.cm/s}^2$$

Nicelik	Kütle	İvme	Kuvvet
Sembol	m	a	F
Birim	kg	m/s ²	kg m/s ²

Tablo 1.1: Birim Tablosu

SI → 1 Newton (N) = 1 kg.m/s²

1N=10³g.10²cm/s²=10⁵Din

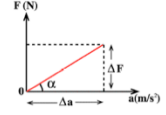
1Din=10⁻⁵ N ; 1N = 10⁵ Din

1kg'lık kütleye 1m/s² lik ivme kazandıran kuvvet 1 newton (N) değerindedir. 1 N= 1kg m/s² dir.

$F = m \cdot a$ bağıntısından ivme birimi m/s² yerine, $a = \frac{F}{m} = \frac{N}{kg}$ da kullanılabilir.

Bir cisme uygulanan F kuvveti ile cismin kazandığı ivmenin değişim grafiğinde,

$$\tan \alpha = \text{eğim} = \frac{\Delta F}{\Delta a} = \text{sabit} = \text{kütle}.$$



Grafik 1.1:Kuvvet-ivme grafiği

Kuvvet-ivme grafiğinin eğimi cismin kütleini verir.



Isaac Newton,
English physicist and
mathematician
(1642–1727)

- 1686 yılında İngiliz bilim adamı İsaac Newton yayınladığı *Principia Mathematica* adlı kitabıyla modern **Mekanik** biliminin temelini atmış oldu.
- Newton Mekanik 3 temel yasa üzerine kurulmuştur. Bu yasaları ispatsız kabul ederseniz, tüm makroskobik cisimlerin (taş, roket, ay, güneş ...) hareketini açıklayabilirsiniz.
- 1900 lü yıllarda atomik boyutlardaki parçacıklar için bu yasaların yanlış sonuçlar verdiği gözlemlendi. Yeni arayışlar sonucunda **Kuantum Mekanik**i adıyla modern bir teori kuruldu.
- Fakat makroskobik cisimler için Newton mekanik hala geçerlidir.

Newton'un Birinci Yasası

Bir cisim üzerine, hiçbir kuvvet etki etmez ise ya hareketsiz kalır veya düzgün doğru hareket etme halini korur!!!

- Kuvvet F büyüklüğü ve yönü ile belirlenen vektörel bir büyüklüktür.
- Net kuvvet cisme etki eden bütün farklı kuvvetlerin vektörel toplamıdır. Cisim kendine etki eden net kuvvet sıfır olduğunda dış etkenlerden soyutlanmış olur.

1. Newton Yasası

Üzerine net kuvvet etkimeyen bir cisim ya hareketsizdir, yahut da düzgün doğrusal hareket yapar.

$$\vec{F}_{\text{net}} = 0 \iff \vec{a} = 0$$

- \vec{F}_{net} çok sayıda kuvvetin vektörel toplamı olup, buna **net kuvvet** veya **bileşke kuvvet** denir:

$$\vec{F}_{\text{net}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \sum_i \vec{F}_i$$

Cisim üzerine çok sayıda kuvvet etkiyor olabilir, ama bunların bileşkesi sıfırsa, birinci yasa geçerlidir.

- Birinci yasa aslında kuvvetin tanımıdır. **Eğer bir cisim ivmeleniyorsa üzerine net bir kuvvet etkiyor demektir.** İvme, kuvvetin varlığının habercisidir.

Kütle

- Eylemsizlik bir cismin dış kuvvete nasıl karşı koyacağını (direneceğini) bir ölçüsüdür.
- Kütle, bir cismin sahip olduğu eylemsizliğin bir ölçüsüdür. SI birim sistemine göre birimi kilogramdır.
- Kütlenin sayısal ölçümü, farklı cisimler üzerine belli bir kuvvet uygulandığında kazanılan ivmelerin karşılaştırılmasıyla yapılır.

$$\frac{m_1}{m_2} \equiv \frac{a_2}{a_1}$$

Kütle ve Ağırlık

- Kütle, cismin değişmeyen bir özelliğidir ve cismin çevresinden ve kütleyi ölçmek için kullanılan yöntemlerden bağımsızdır.
- Kütle skaler bir büyüklüktür
- Bir cismin ağırlığı ise ona etki eden yerçekimi kuvvetinin büyüklüğüdür ve cismin konumuna göre değişir.

Newton'un İkinci Yasası

Bir cismin ivmesi, ona etki eden bileşke kuvvet ile doğru orantılı ve kütlesi ile ters orantılıdır!!!

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$\sum F_x = ma_x \quad \sum F_y = ma_y \quad \sum F_z = ma_z$$

2. Newton Yasası

Bir cisim, üzerine uygulanan net kuvvetle doğru orantılı ve onunla aynı yönde bir ivme kazanır. Orantı katsayısı cismin kütlesi olur.

$$\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a}$$

- İkinci yasa kuvvet birimini belirler. SI sisteminde Newton (kısaca N) $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
- İkinci yasa vektörel bir eşitliktir. Her bileşen için geçerli olmalıdır:
$$\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a} \iff \begin{cases} F_{x,\text{net}} = m a_x \\ F_{y,\text{net}} = m a_y \end{cases}$$
- İkinci yasa aslında kütlenin tanımıdır. Kütle, cismin ivmelenmeye direncinin bir ölçüsüdür. Buna **eylemsizlik** denir.
- Newton yasaları hangi gözlemler için geçerlidir?
Newton yasaları birbirine göre duran veya düzgün doğrusal hareket yapan gözlemler için geçerlidir.

Ağırlık ve Çekim Kuvveti

- Bir cisme dünyanın uyguladığı kuvvet, çekim kuvveti olarak adlandırılır ve \vec{F}_g ile gösterilir.
- Bir cismin ağırlığı \vec{F}_g nin büyüklüğü olarak tanımlanır ve mg dir.

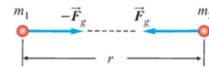


Newton'un birinci kanun ile gerilmiş bir yay uyguladığı kuvvet gibi bilinen bir kuvvet kullanılarak diğer kuvvetler ölçülebilir. Bu sistemde ölçülen kuvvet yerçekimi kuvvetidir.

Newton'un Kütle Çekim Yasası

Evrende her iki cisim arasında, kütlelerin çarpımıyla doğru orantılı ve aralarındaki uzaklıkla ters orantılı bir çekim kuvveti vardır:

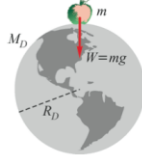
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



- $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ (gravitasyon sabiti)

- Dünya üzerindeki m kütleli bir cisme uygulandığında:

$$F_g = G \frac{mM_D}{R_D^2} = m \left(\frac{GM_D}{R_D^2} \right)$$



Bu özel kuvvete **ağırlık** adı verilir ve büyüklüğü W ile gösterilir:

$$W = F_g = mg \quad \text{ve} \quad g = \frac{GM_D}{R_D^2} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Newton'un Üçüncü Yasası

Bir B cismi bir A cisminde kuvvet uyguluyorsa A'da B'ye bir kuvvet uygular. Bu iki kuvvetin büyüklükleri birbirine eşittir ve yönleri terstir.



B cisminin A cisminde uyguladığı kuvvet F_{AB} , A cisminin B cisminde uyguladığı F_{BA} kuvvetine eşit ve zıt yöndedir.

$$F_{BA} = -F_{AB}$$

3. Newton Yasası

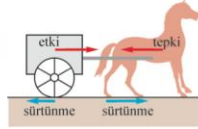
Bir cisim diğer ikinci bir cisme \vec{F}_{12} kuvveti uyguluyorsa, ikinci cisim de birinciye eşit ve zıt yönde bir \vec{F}_{21} kuvveti uygular.

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

- Etki ve tepki farklı cisimlere uygulanır. Bu ayırım yapılmazsa çelişkiye düşülebilir.

Örnek düşünce: "At ve araba birbirlerini eşit ve zıt kuvvetlerle çekmektedirler. İki kuvvet birbirini sıfırlar ve araba gitmez."

Doğru mu?



Yanlış, çünkü etki ve tepki farklı cisimlere uygulanmaktadır. Bir cismi incelerken sadece o cisme etkiyen kuvvetler gözönüne alınır. At, arabanın tepki kuvvetini zeminde oluşturduğu büyük sürtünme kuvvetiyle dengeleyip geri gitmemeyi başarır.

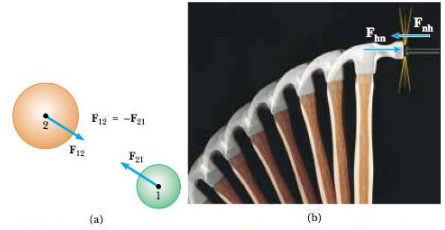
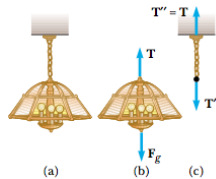


Figure 5.5 Newton's third law. (a) The force F_{12} exerted by object 1 on object 2 is equal in magnitude and opposite in direction to the force F_{21} exerted by object 2 on object 1. (b) The force F_{hn} exerted by the hammer on the nail is equal in magnitude and opposite to the force F_{nh} exerted by the nail on the hammer.

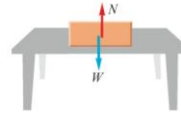
Gerilme Kuvveti

▪ T ile gösterilen gerilme, esnek halat (ya da tel, kablo veya ip) tarafından cisme uygulanan bir kuvvettir.

▪ Gerilme, (ihmal edilebilir kütleli) ince iplerde, ip boyunca her noktada aynıdır.



Yüzeylerde Normal Kuvvet (N)



Masa üzerinde duran kitap.
 $W = mg$ ağırlık kuvveti var.

Kitap hareketsiz ($a = 0$) olduğuna göre, ağırlığa zıt yönde bir kuvvet daha etkiyor olmalı ki net kuvvet sıfır olsun.

Etkileşen yüzeyler arasında, daima yüzeye dik (normal) bir tepki kuvveti oluşur.

- Normal kuvvetin kaynağı, masa ve kitabı oluşturan moleküller arasındaki etkileşme kuvvetleridir.
- Cisim sadece yüzeye temas ettiğinde ortaya çıkar, cisim yüzeyden ayrıldığında ortadan kalkar.
- Normal kuvvet, cismin yüzey içine girmesini engellemeye yetecek büyüklüktedir.

Normal Kuvveti

- Yerçekimi kuvvetini dengeleyen, yüzeye dik ve dışarıya doğru yönelmiş olan kuvvete normal kuvvet denir ve n veya F_N ile gösterilir.

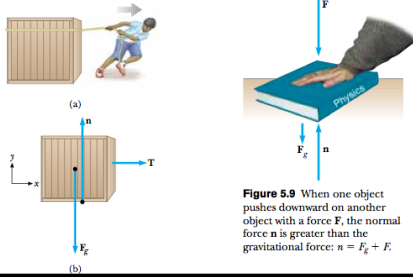


Figure 5.9 When one object pushes downward on another object with a force F , the normal force n is greater than the gravitational force: $n = F_g + F$.

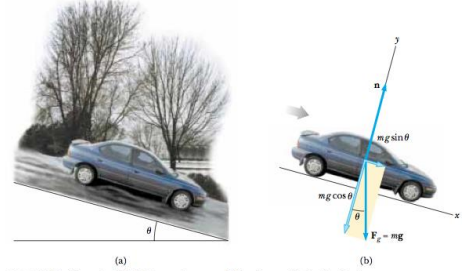
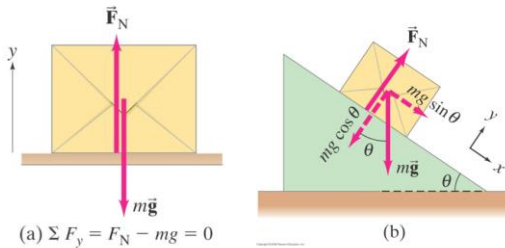


Figure 5.11 (Example 5.6) (a) A car of mass m sliding down a frictionless incline. (b) The free-body diagram for the car. Note that its acceleration along the incline is $g \sin \theta$.

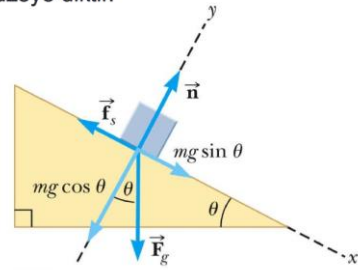
Kuvvet Şemaları (serbest cisim diyagramları)



(a) $\Sigma F_y = F_N - mg = 0$

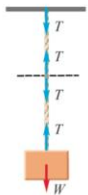
Copyright © 2009 Pearson Education, Inc.

- Bir nesneye bir açı ile etki eden kuvvet x ve y bileşenlerine ayrılabilir. x bileşeni yüzeye paralel, y bileşeni yüzeye diktir.



İplerde Gerilme Kuvveti (T)

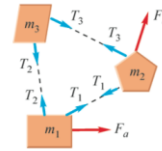
İp, kablo veya tel gibi bükülebilir cisimlerde gerilme kuvveti oluşur. Esnek olmayan bir ipin ucuna asılı m kütlesi.



- Cisim dengede olduğuna göre, altta ağırlığa eşit ve zıt yönde bir T gerilme kuvveti olmalıdır.
- İpin herhangi bir kesitindeki alt ve üst parçalar, 3. yasaya göre, birbirlerini eşit ve zıt bir gerilme kuvvetiyle çekerler.
- İpin kütlesi ihmal edilebiliyorsa, her kesitte aynı T gerilmesi tavana kadar iletilir.

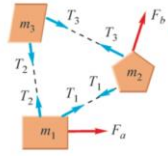
Serbest-Cisim Diyagramları

Dinamik problemlerinde ele alınan sistemi açıkça belirtmek gerekir.



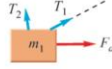
Çok sayıda kütleden oluşan bir sisteme etkiyen kuvvetler iki gruba ayrılırlar:

- İç kuvvetler:** Sistemi oluşturan kütlelerin birbirine uyguladığı kuvvetlerdir. (Şekilde T_1 , T_2 , T_3)
3. Newton yasasına göre, bu kuvvetler daima çift olarak yer alırlar.
- Dış kuvvetler:** Sisteme dışardan uygulanan kuvvetlerdir (F_a , F_b).



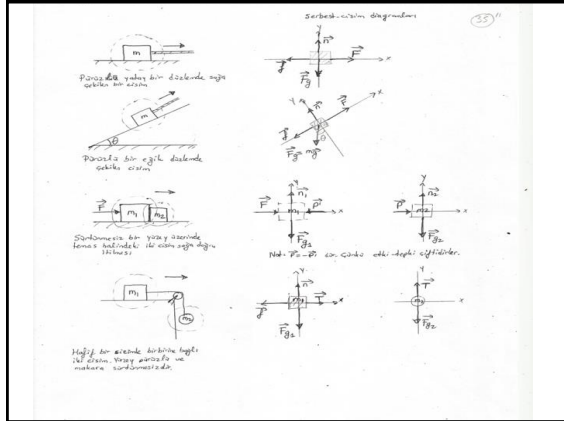
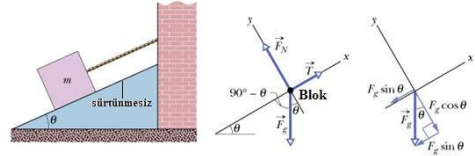
- Bütün sistem ($m_1 + m_2 + m_3$) incelendiğinde, sadece dış kuvvetler gözönüne alınır (F_a, F_b). (İç kuvvetler \pm işaretli iki kez yeraldığından birbirlerini götürürler).

- Sistemin sadece bir parçası inceleniyorsa (örneğin m_1), ona etkiyen tüm kuvvetler (iç ve dış) birlikte gözönüne alınırlar.



Newton yasalarını uygularken takip edilecek yol:

1. İncelenecek sistemin basit bir şeklini çizin.
2. Probleme uygun bir koordinat sistemi seçin.
3. Sistemdeki tüm kuvvetleri belirleyin ve serbest-cisim diyagramı üzerinde gösterin.
4. Newton yasalarını sisteme uygulayın.



Örnek : Kütlesi 0.3 kg olan bir hokey diski sürtünmesiz bir yüzey üzerinde kaymaktadır. Diske, şekildeki gibi $F_1 = 5 \text{ N}$ ve $F_2 = 8 \text{ N}$ luk iki kuvvet etkimektedir.

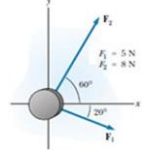
- a-) Diskin ivmesinin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.
- b-) Diskin ivmesini sıfır yapacak üçüncü kuvvet ne olmalıdır?

$$a-) a_x = \frac{\sum F_x}{m} = \frac{5 \cdot \cos(20^\circ) + 8 \cdot \cos(60^\circ)}{0.3} = 29 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{\sum F_y}{m} = \frac{-5 \cdot \sin(20^\circ) + 8 \cdot \sin(60^\circ)}{0.3} = 17.4 \text{ m/s}^2$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(29)^2 + (17.4)^2} = 33.8 \text{ m/s}^2$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{17.4}{29}\right) = 31^\circ$$



$$b-) \vec{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} = 0 \rightarrow \sum F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = 0 \rightarrow F_{3x} = -5 \cdot \cos(20^\circ) - 8 \cdot \cos(60^\circ) = -8.7 \text{ N}$$

$$\sum F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 0 \rightarrow F_{3y} = 5 \cdot \sin(20^\circ) - 8 \cdot \sin(60^\circ) = -5.2 \text{ N}$$

$$\vec{F}_3 = F_{3x} \hat{i} + F_{3y} \hat{j} = -8.7 \hat{i} - 5.2 \hat{j} \text{ N}$$

Örnek : Ağırlığı 125 N olan trafik ışıkları şekildeki gibi iplerle asılı durmaktadır. Üstteki kabloların yatayla yaptıkları açılar 37° ve 53° olduğuna göre, her üç ipteki gerilme kuvvetlerini hesaplayınız. Hangi durumda $T_1 = T_2$ olur?

Sistem dengede olduğuna göre, $T_3 = F_g = 125 \text{ N}$ bulunur.

$$\sum F_x = -T_1 \cos(37^\circ) + T_2 \cos(53^\circ) = 0 \quad (1)$$

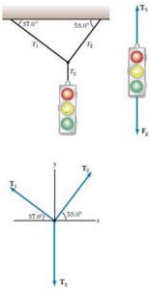
$$\sum F_y = T_1 \sin(37^\circ) + T_2 \sin(53^\circ) - T_3 = 0 \quad (2)$$

$$\text{Eş-1'den: } T_1 = -\frac{\cos(53^\circ)}{\cos(37^\circ)} T_2 = \frac{0.8}{0.6} T_2 \text{ bulunur.}$$

$$\text{Bunu Eş-2'de yerine koyarsak: } T_1(0.6) + \frac{0.6}{0.8} T_1 - 125 = 0 \rightarrow T_1 = 75.1 \text{ N}$$

$$T_2 = \frac{0.6}{0.8} T_1 = 99.9 \text{ N bulunur.}$$

Eş-1'e göre, iplerin yatayla yaptıkları açılar aynı olsaydı, $T_1 = T_2$ olurdu.



Örnek : Kütlesi m olan bir sandık, eğim açısı θ olan sürtünmesiz eğik bir düzlem üzerinden serbest bırakılıyor.

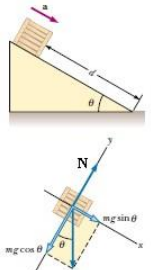
- a-) Sandığın ivmesini bulunuz.
- b-) Sandık eğik düzlemin tabanına ne kadar sürede ulaşır ve bu anda hızı ne olur?

$$a-) \sum F_x = mg \sin \theta = ma_x \rightarrow a_x = g \sin \theta$$

$$\sum F_y = N - mg \cos \theta = 0$$

$$b-) x - x_0 = \frac{1}{2} a_x t^2 \rightarrow t = \sqrt{\frac{2d}{g \sin \theta}} \text{ bulunur.}$$

$$v^2 = v_i^2 + 2a_x \Delta x \rightarrow v_s = \sqrt{2g \sin \theta d} \text{ olur.}$$



Newton Yasalarının Uygulanması/Serbest-Cisim Diyagramları:

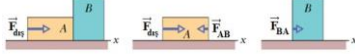
Newton yasalarını uygulayarak mekanik problemlerinin çözümü serbest-cisim diyagramını çizmekle başlar.

Bu, incelenen sistem bir bütün olarak veya her cisim için ayrı ayrı yapılır.

Daha sonra her cisim için uygun bir koordinat sistemi seçilir.

Aşağıda verilen örneği gözönüne alalım. Sürtünmesiz bir sistem

A ve B gibi iki blok ve A bloğuna etkiyen bir $\vec{F}_{dış}$ kuvveti içermektedir.



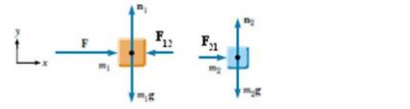
Şöyle "sistem" ler düşünebiliriz:

- Sistem = blok A + blok B. Yatay kuvvet $F_{dış}$.
- Sistem = blok A. Cisme etkiyen iki yatay kuvvet vardır: $F_{dış}$ ve F_{AB} .
- Sistem = blok B. Cisme etkiyen yatay kuvvet F_{BA} .

Örnek : Kütleleri m_1 ve m_2 olan iki blok yatay sürtünmesiz bir düzlemde temas halindedir. m_1 kütlelerine sabit bir F kuvveti uygulanıyor.

a-) Blok sisteminin ivmesini bulunuz.

b-) Bloklar arasındaki temas kuvvetini bulunuz.



$$a-) \sum F_x(\text{sistem}) = F = (m_1 + m_2)a_x \rightarrow a_x = \frac{F}{m_1 + m_2}$$

b-) m_2 bloğu için Newton' un ikinci yasasından:

$$\sum F_x = F_{21} = m_2 a_x \rightarrow F_{21} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} F = F_{12} \text{ bulunur.}$$

Örnek : Bir kişi elindeki m kütleli balığı asansörün içinde tavana asılı yaylı bir terazi ile tartmak istiyor. Asansör ister yukarı ister aşağı doğru ivmelenin, balığın gerçek kütlelerinden daha farklı bir değer ölçer. İspatlayınız.

Asansör yukarı doğru ivmelenin:

$$\sum F_y = T - mg = ma \rightarrow T = m(g + a)$$

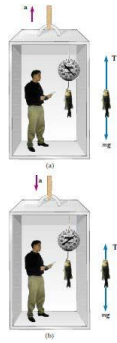
Asansör aşağı doğru ivmelenin:

$$\sum F_y = T - mg = -ma \rightarrow T = m(g - a)$$

Asansör sabit hızla hareket etsin:

$$\sum F_y = T - mg = 0 \rightarrow T = mg$$

Görüldüğü gibi, ivmeli hareket durumunda balığın ağırlığı (T), gerçek ağırlığından farklı ölçülür.



Örnek : Kütleleri farklı iki cisim, ağırlığı ihmal edilebilir sürtünmesiz bir makara üzerinden bir ip ile şekildedeki gibi asılmıştır. Bu sisteme "Atwood düzeneği" diyoruz. Sistem serbest bırakıldığında, kütlelerin ivmesi ve ipteki gerilme kuvveti ne olur?

$m_2 > m_1$ olduğunu kabul edelim:

m_1 ve m_2 için Newton' un ikinci yasası, sırasıyla:

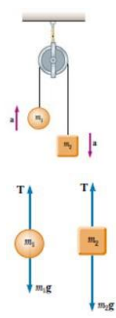
$$\sum F_y = T - m_1 g = m_1 a \quad (1)$$

$$\sum F_y = T - m_2 g = -m_2 a \quad (2)$$

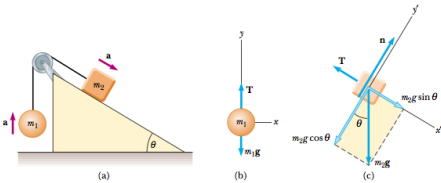
Bu iki denklemden T yi yok edersek ivme,

$$a = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \right) g \text{ bulunur. Bunu da Eş-1' de yerine koyarsak,}$$

$$T = m_1 (a + g) = m_1 \left(\frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} + 1 \right) g = \left(\frac{2m_1 m_2}{m_2 + m_1} \right) g \text{ bulunur.}$$



Örnek:



$$(1) \sum F_x = 0$$

$$(2) \sum F_y = T - m_1 g = m_1 a_y = m_1 a$$

$$(3) \sum F_x = m_2 g \sin \theta - T = m_2 a_x = m_2 a$$

$$(4) \sum F_y = n - m_2 g \cos \theta = 0$$

$$(5) a = \frac{m_2 g \sin \theta - m_1 g}{m_1 + m_2}$$

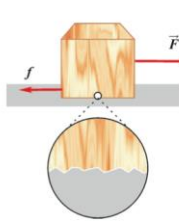
$$(6) T = \frac{m_1 m_2 g (\sin \theta + 1)}{m_1 + m_2}$$

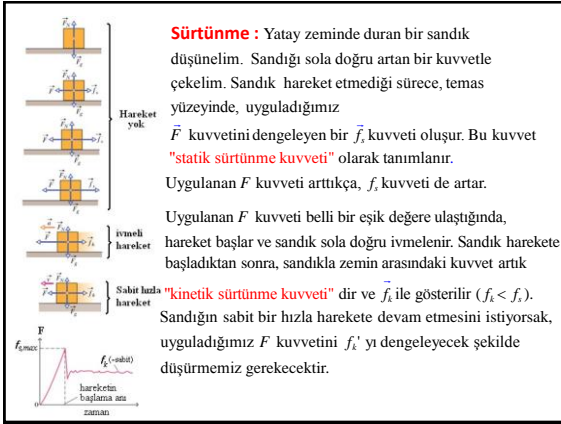
Sürtünme Kuvveti (f)

Bir yüzey boyunca hareket etmek isteyen cisme daima bir sürtünme kuvveti karşı koyar.

Gözlemler:

- Sürtünme kuvveti cisim ile yüzeyin arakesitindeki engeller ve atomlar arası kimyasal bağlardan kaynaklanır.
- Cismin hangi yüzü temasta olursa olsun, sürtünme kuvveti yaklaşık aynı olur.
- Cismin hızı ne olursa olsun, sürtünme kuvveti yaklaşık aynı olur.
- Yüzey üzerinde duran cisim harekete başladıktan sonra sürtünme kuvvetinin maksimum değeri biraz azalır. **Statik sürtünme kuvveti ve kinetik sürtünme kuvveti** farklıdır.





- Sürtünme kuvvetinin maksimum değeri yüzeydeki normal kuvvetle orantılı olur:

$$f_{\max} = \mu N$$

- μ iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısıdır. Sürtünen yüzeylerin cinsine ve pürüzlülük derecesine bağlıdır.
- Cisim hareket etmiyorsa $0 < f < f_{\max}$ aralığında, hareket ediyorsa $f = f_{\max}$ olur.

Bazı yüzeylerin sürtünme katsayıları

Yüzey	Statik sürtünme, μ_s	Kinetik sürtünme, μ_k
Tahta-tahta	0.35	0.30
Çelik-çelik	0.80	0.50
Çelik-buz	0.1	0.05
Lastik-kuru asfalt	1.0	0.8
Lastik-yaş asfalt	0.7	0.5

- Birbiriyle temas halinde olan iki yüzey arasındaki statik sürtünme kuvveti uygulanan kuvvete zıt yönlüdür ve normal kuvveti ile orantılıdır;

$$f_s \leq \mu_s n$$

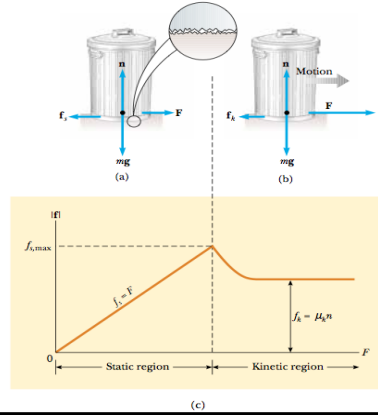
burada f_s statik sürtünme kuvveti, μ_s statik sürtünme katsayısı ve n normal kuvvetidir.

- Hareket eden bir cisme etki eden kinetik sürtünme kuvveti, daima cismin hareketinin zıt yönündedir ve normal kuvveti ile orantılıdır;

$$f_k = \mu_k n$$

burada μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır.

- μ_s ve μ_k değerleri yüzey özelliklerine bağlıdır ve $\mu_s > \mu_k$ dir



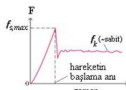
Sürtünme Kuvvetinin Özellikleri :

- Özellik - 1 :** Temas eden iki yüzey birbirlerine göre hareketli değillerse, statik sürtünme kuvveti \vec{f}_s , uygulanan \vec{F} kuvvetini dengeler.

- Özellik - 2 :** Statik sürtünme kuvveti f_s ' nin büyüklüğü sabit değildir.

0' dan $f_{s,\max} = \mu_s F_N$ değerine kadar değişir.

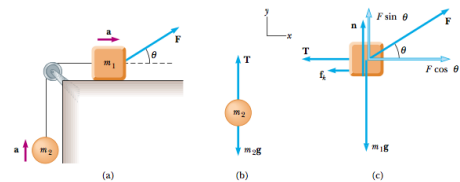
Burada, μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Uygulanan F kuvveti, $f_{s,\max}$ kuvvetini aştığı anda sandık harekete başlar.

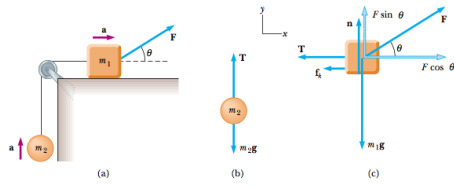


- Özellik - 3 :** Sandık harekete başladıktan sonra, sürtünme kuvveti artık "kinetik sürtünme kuvveti" \vec{f}_k dir ve büyüklüğü $f_k = \mu_k F_N$ eşitliği ile verilir. Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır.

Örnek: Sürtünmeli Ortamlarda İki Bağlı Cismin İvmesi

Şekilde görüldüğü gibi, m_1 kütleli bir blok yatay pürüzlü bir masa üzerinde ağırlıksız bir ipe sürtünmesiz bir makaradan geçirildikten sonra m_2 kütleli bir kütlesine bağlanmıştır. F büyüklüğünde bir kuvvet m_1 kütleli bir kütlesine uygulanmıştır. m_1 ile yüzey arasındaki kinetik sürtünme katsayısı μ_k dir. Her iki cismin ivmesinin büyüklüğünü bulunuz.





$$\sum F_x = F \cos \theta - f_k - T = m_1 a_x = m_1 a \quad (1)$$

$$\sum F_y = n + F \sin \theta - m_1 g = m_1 a_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_x = m_2 a_x = 0$$

$$\sum F_y = T - m_2 g = m_2 a_y = m_2 a \quad (3)$$

$$f_k = \mu_k n,$$

$$n = m_1 g - F \sin \theta$$

$$f_k = \mu_k (m_1 g - F \sin \theta) \quad (4)$$

$$F \cos \theta - \mu_k (m_1 g - F \sin \theta) - m_2 (a + g) = m_1 a$$

$$a = \frac{F(\cos \theta + \mu_k \sin \theta) - g(m_2 + \mu_k m_1)}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

Örnek : m kütleli bir blok sürtünmeli eğik bir düzlem üzerindedir. Eğim açısı θ , blok hareket edinceye kadar artırılabilir. Bloğun kaymaya başladığı kritik açı θ_c olduğuna göre, zeminle blok arasındaki statik sürtünme katsayısı μ_s nedir?

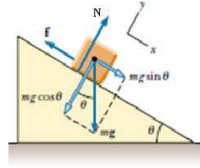
Kritik durumda
(kayma başlamadan hemen önce):

$$\sum F_x = mg \sin \theta - f_s = ma_x = 0$$

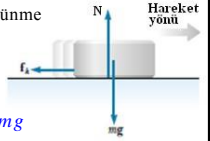
$$\sum F_y = N - mg \cos \theta = ma_y = 0$$

$$f_s = mg \sin \theta = \left(\frac{N}{\cos \theta} \right) \sin \theta = N \tan \theta$$

$$f_{s,max} = N \tan \theta_c = \mu_s N \rightarrow \mu_s = \tan \theta_c$$



Örnek : Donmuş bir gölet üzerinde, bir buz hokeyi diskine 20 m/s' lik bir ilk hız veriliyor. Disk, buz üzerinde 115 m yol aldıktan sonra durduğuna göre, zeminle hokeyi diski arasındaki kinetik sürtünme katsayısı μ_k nedir?



$$\sum F_y = N - mg = ma_y = 0 \rightarrow N = mg$$

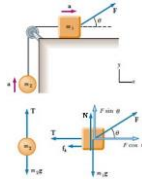
$$\sum F_x = -f_k = ma_x$$

$$f_k = \mu_k N = \mu_k mg \rightarrow a_x = -\mu_k g$$

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a_x \Delta x \rightarrow a_x = -\frac{20^2}{2(115)} = -\frac{40}{23}$$

$$a_x = -\mu_k g = -\mu_k (9.8) \rightarrow \mu_k = 0.177$$

Örnek : Pürüzlü bir yüzey üzerindeki m_1 kütleli blok, hafif bir ip ile sürtünmesiz ve kütlesi ihmal edilebilir bir makara üzerinden m_2 kütleli küresel cisme bağlanmıştır. m_1 bloğuna şekildeki gibi yatayla θ açısı yapan bir F kuvveti uygulanıyor. Blok ile zemin arasındaki kinetik sürtünme katsayısı μ_k ise, sistemin ivmesini bulunuz.



$$m_1 \text{ bloğu: } \sum F_x = F \cos \theta - T - f_k = m_1 a \quad (1)$$

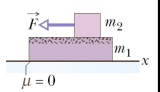
$$\sum F_y = N + F \sin \theta - m_1 g = 0 \rightarrow N = m_1 g - F \sin \theta$$

$$f_k = \mu_k N = \mu_k (m_1 g - F \sin \theta)$$

$$m_2 \text{ bloğu: } \sum F_y = T - m_2 g = m_2 a$$

Bu ifadeleri (1) denkleminde yerine koyarsak,
$$a = \frac{F(\cos \theta + \mu_k \sin \theta) - g(m_2 + \mu_k m_1)}{(m_2 + m_1)}$$

Örnek : Kütleli 40 kg olan bir kalas sürtünmesiz yatay düzlemde, üzerinde 10 kg' lık blok ile birlikte hareketsiz durmaktadır. Blok ile kalas arasındaki statik ve kinetik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.6 ve 0.4' tür. Bloğa 100



N' luk bir \vec{F} kuvveti şekildeki gibi uygulanmaktadır. Bloğun ve kalasın ivmelerini bulunuz.

Eğer iki kütle arasındaki sürtünme kuvvetinin maksimum değeri 100 N' dan küçük ise m_2 bloğu kalas üzerinde sola doğru hareket edecektir.

$$f_{s,max} = \mu_s N' = \mu_s m_2 g = 0.6(10)(9.8) = 58.8 \text{ N}$$

$F > f_{s,max}$ olduğuna göre, iki kütle arasındaki sürtünme kuvveti kinettir.

Şimdi her bir kütle için serbest cisim diyagramını çizerek hareketlerini inceleyelim:

m_2 bloğu:

$$N' = m_2 g = 10 \cdot 9.8 = 98 \text{ N}$$

$$f_k = \mu_k N' = 0.4 \cdot 98 = 39.2 \text{ N}$$

$$F - f_k = m_2 a_2 \Rightarrow a_2 = \frac{100 - 39.2}{10} = \frac{60.8}{10} = 6.08 \text{ m/s}^2$$

m_1 kalası:

$$f_k = m_1 a_1 \Rightarrow a_1 = \frac{39.2}{40} = 0.98 \text{ m/s}^2$$

