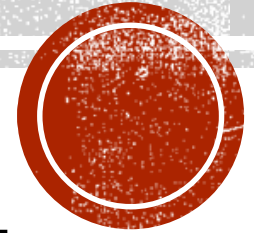


YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ



Statik Elektrik Alanı - Temel Elektrot Sistemleri
KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ - 2022 BAHAR YARIYILI

Dersi veren öğretim üyesi:
Prof. Dr. Özcan Kalenderli



2021-2022 Bahar Yarıyılı

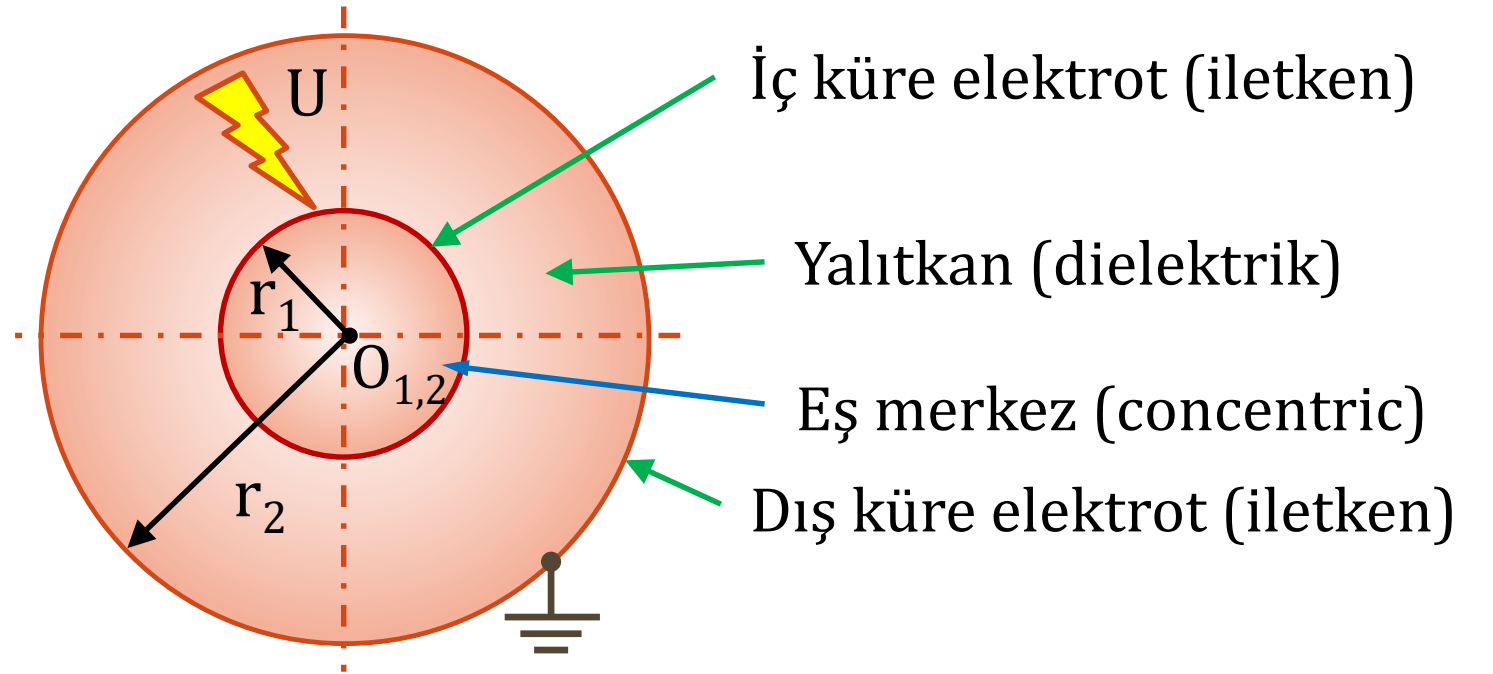
CRN 22843	ELK 312	Yüksek Gerilim Tekniği	Özcan Kalenderli	Perşembe 08:30/11:30	Öğr. Sayısı 45
--------------	------------	------------------------	------------------	-------------------------	-------------------

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

Küresel elektrot sistemi türleri:

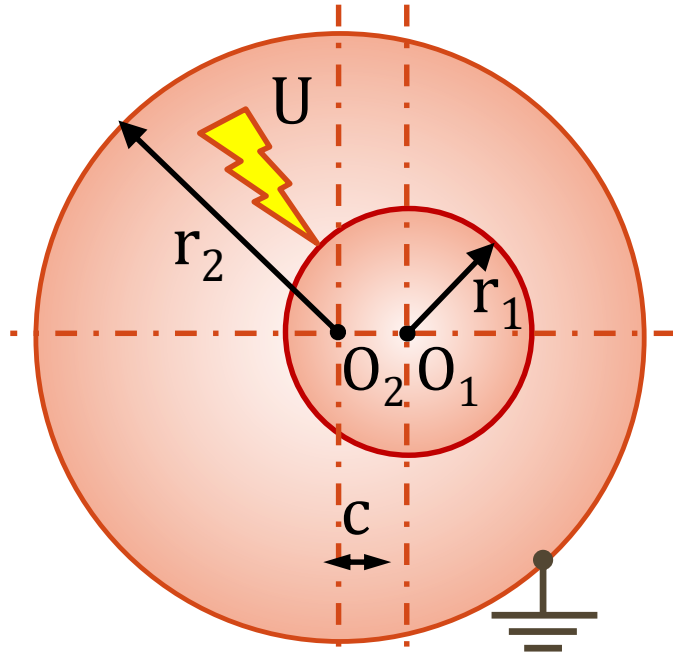
Eş merkezli küresel elektrot sistemi



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

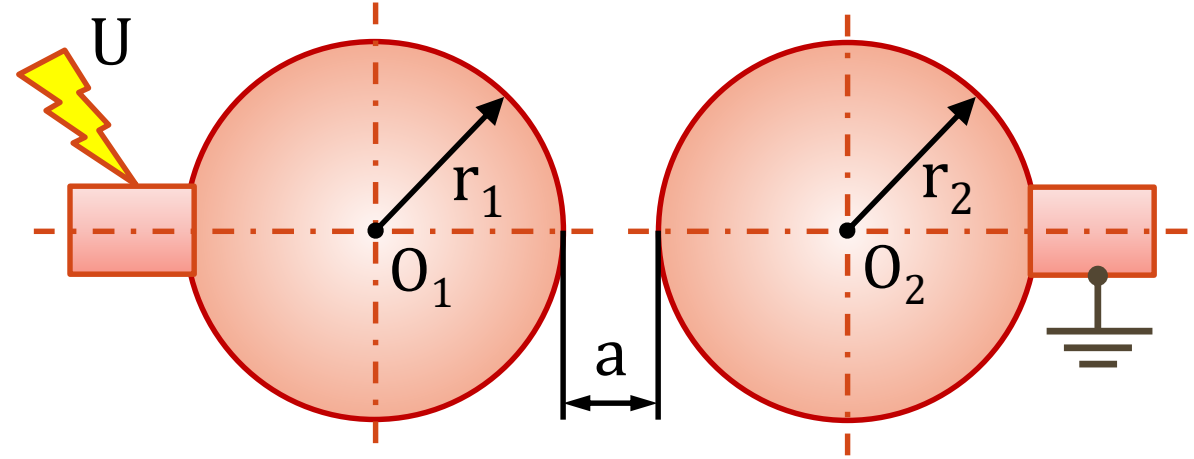
KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

Kaçık merkezli küresel elektrot sistemi örnekleri:



İç içe

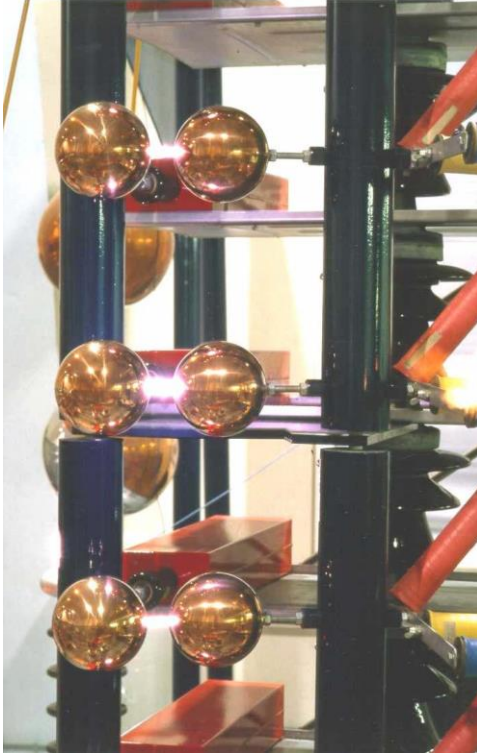
kaçık merkezli küresel elektrot sistemleri



Karşılıklı

KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

Yüksek gerilim üretim amaçlı
küresel elektrot sistemi örnekleri:



Darbe gerilimi üretici kat küreleri
(anahtarlama ve gerilim ayarlama)



Kesme küreleri (Kesik darbe gerilimi üretimi)



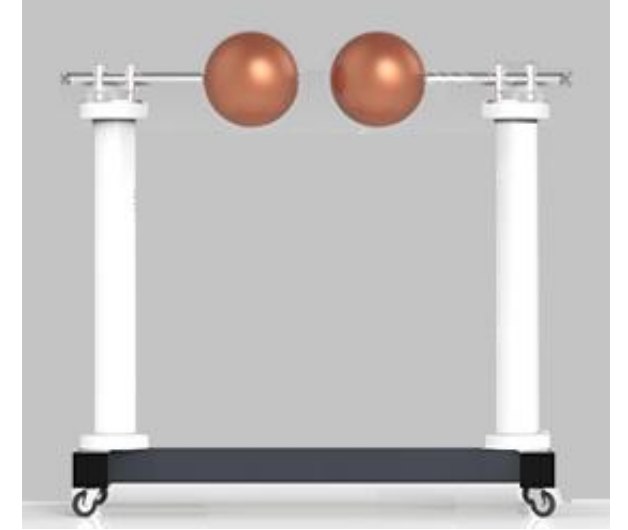
KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

Yüksek gerilim ölçme amaçlı
küresel elektrot sistemi örnekleri:

25 cm çaplı
ölçme küreleri
(düşey düzen)



10 cm çaplı
ölçme küreleri
(düşey düzen)



15 cm çaplı
ölçme küreleri
(yatay düzen)

KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ (Her yerde...)



İTÜ Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı – Gümüşsuyu, Taksim

KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

Küresel elektrot sistemi uygulamaları:

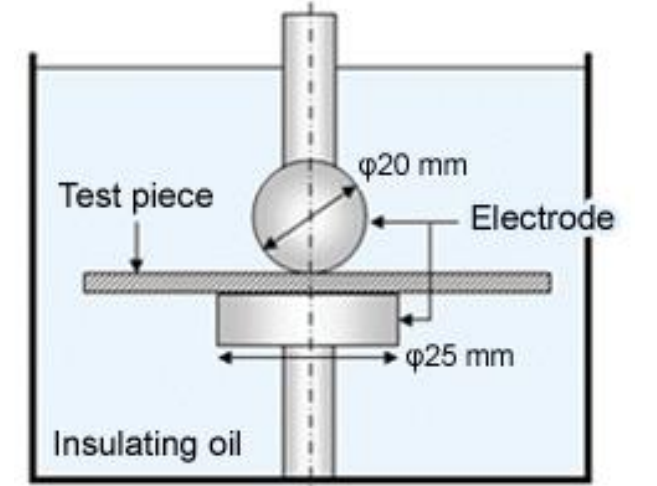


Yüksek gerilim transformatör çıkışları...



Aşırı gerilimden
koruma...

Deney ve araştırma...



Katı yalıtkanların delinme
gerilimini belirleme



Sıvı yalıtkanların delinme
gerilimini belirleme

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMLERİ

Burada küresel elektrot sistemlerinin

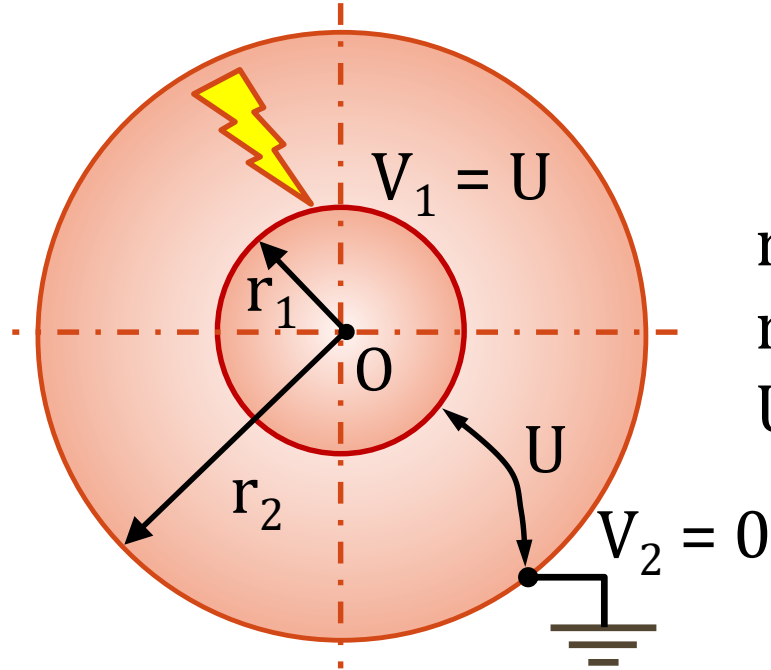
1. Elektriksel potansiyel bağıntısı ve dağılımı,
2. Elektrik alan şiddeti bağıntısı ve dağılımı,
3. Elektriksel kapasitesi ve
4. Elektriksel zorlanma ve delinme (boşalma olayları)

bakımından incelemeleri yapılacaktır.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eş merkezli küresel elektrot sisteminin elektriksel potansiyeli ve elektrik alanı:

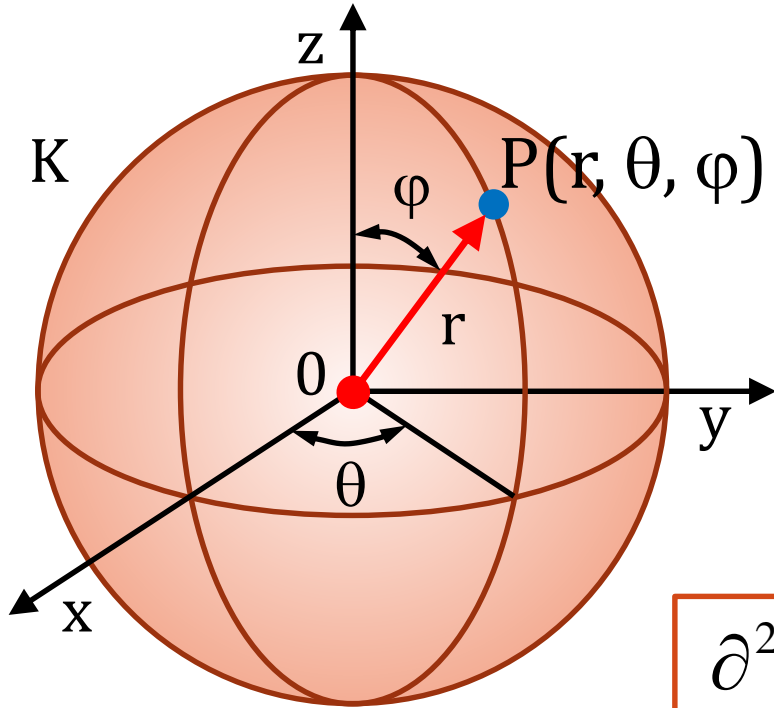


r_1 : İç küre elektrot yarıçapı
 r_2 : Dış küre elektrot yarıçapı
 U : Elektrotlar arasına uygulanan gerilim

İncelemeler küresel koordinatlarda yapılacaktır.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



Küresel koordinatlar (r, θ, φ) ile gösterilirse

$$x = r \sin \varphi \cos \theta$$

$$y = r \sin \varphi \sin \theta$$

$$z = r \cos \varphi$$

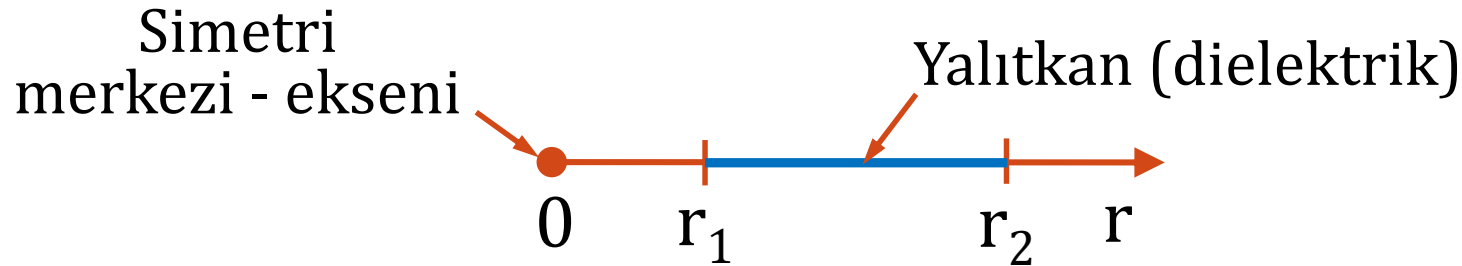
olur. Küresel koordinatlarda üç boyutlu potansiyel $V = V(r, \theta, \varphi)$ için **Laplace denklemi**:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\cos \varphi}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial V}{\partial \varphi} = 0$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eksenel ve dönel simetri nedeniyle küresel elektrot sistemi bir boyutlu olarak incelenebilir.



Küresel koordinatlarda bir boyutlu Laplace denklemi:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\cos \varphi}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial V}{\partial \varphi} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dV}{dr} = 0}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

$$\frac{d^2V}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dV}{dr} = 0 \quad \text{Laplace denkleminin çözümü } V = V(r) \text{ verecektir.}$$

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{dV}{dr} \right) + \frac{2}{r} \cdot \frac{dV}{dr} = 0$$

$$\int \frac{d \left(\frac{dV}{dr} \right)}{\frac{dV}{dr}} = \int -\frac{2}{r} dr$$

$$\ln \frac{dV}{dr} = -2 \ln r + \ln A = \ln \frac{A}{r^2}$$

$$\frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \int dV = \int \frac{A}{r^2} dr$$

Denklemin **genel çözümü**:

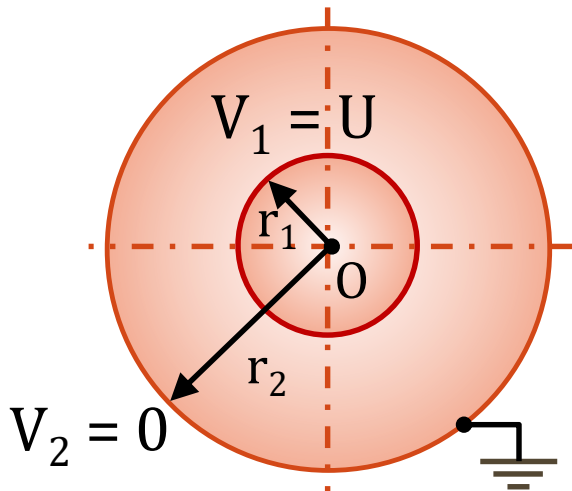
$$V = V(r) = -\frac{A}{r} + B$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

$V(r) = - (A/r) + B$ genel çözümündeki A ve B katsayıları, problemin sınır koşullarından belirlenebilir (özel çözüm):

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sınır koşulları: } r = r_1 \text{ iken } V(r_1) = V_1 = U \\ r = r_2 \text{ iken } V(r_2) = V_2 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U = - (A/r_1) + B \\ 0 = - (A/r_2) + B \end{array} \right.$$



Bu denklemlerden

$$A = - \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} U$$

$$B = - \frac{r_1}{r_2 - r_1} U$$

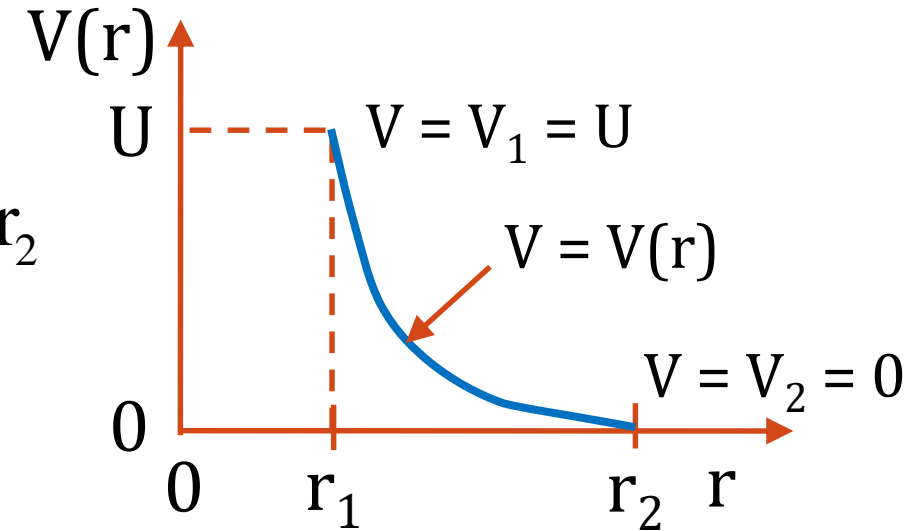
bulunur.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Bulunan A ve B katsayıları $V(r) = - (A/r) + B$ genel çözümünde yerlerine yazılırsa

$$V = V(r) = \frac{r_1}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_2}{r} - 1 \right) \cdot U \quad r_1 \leq r \leq r_2$$



bulunur. Bu denklem, eş merkezli küresel elektrot sisteminin **elektriksel potansiyel** bağıntısıdır.

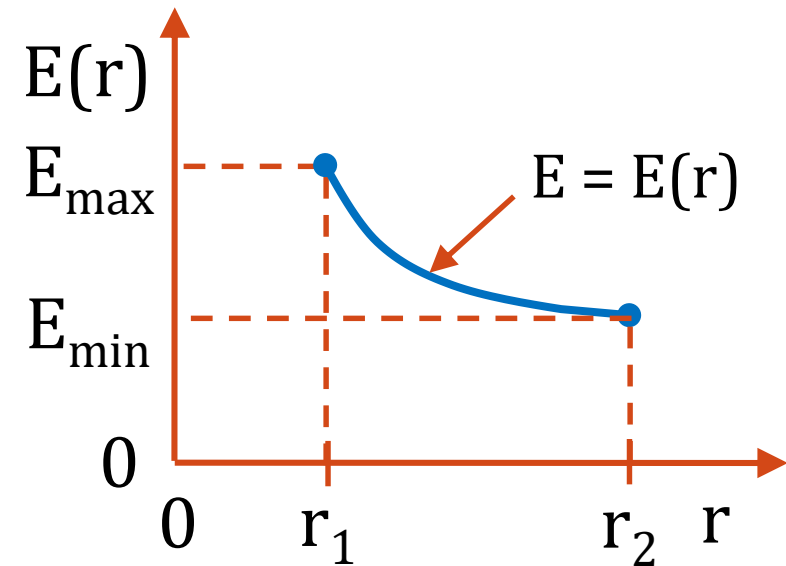
YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eş merkezli küresel elektrot sisteminin **elektrik alan** bağıntısı, elektriksel potansiyel bağıntısından elde edilebilir:

$$E = E(r) = -\frac{dV}{dr} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \cdot \frac{U}{r^2}$$

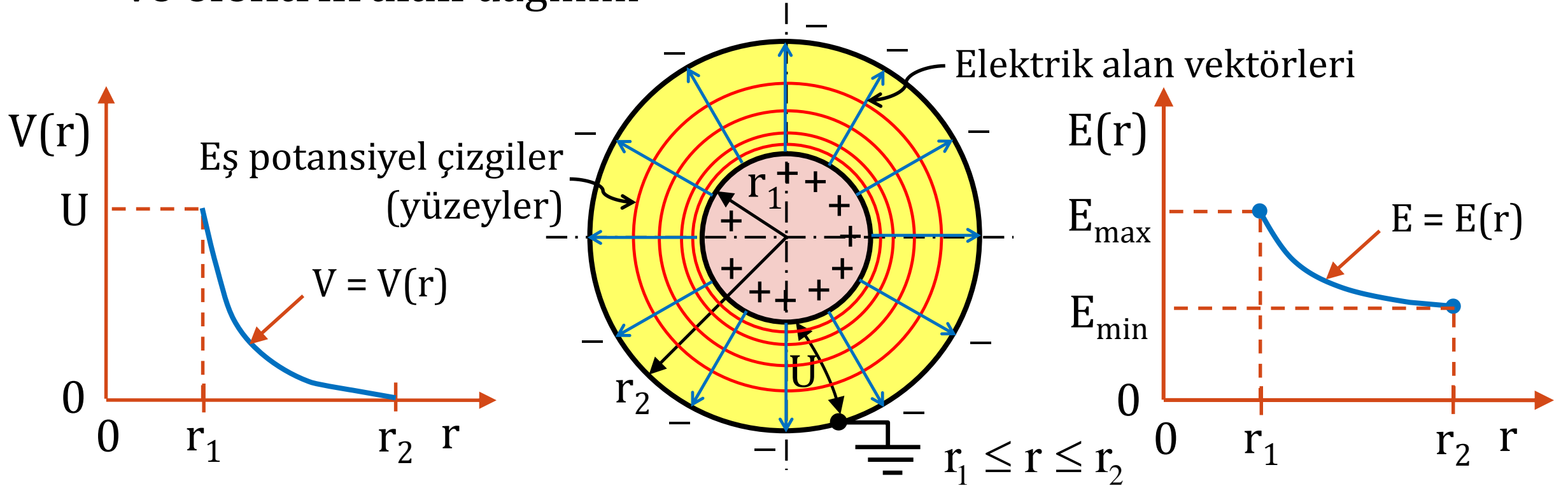
$$r_1 \leq r \leq r_2$$



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eş merkezli küresel elektrot sisteminde **elektriksel potansiyel** ve **elektrik alan** dağılımı



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Elektrik alan şiddeti, $r = r_1$ iken maksimum (en büyük) olur:

$$E_{\max} = \frac{r_2}{r_2 - r_1} \cdot \frac{U}{r_1} = \frac{U}{\frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1)}$$

Eş merkezli
küresel elektrot sisteminin
maksimum elektrik alan şiddeti
bağıntısı

Elektrik alan şiddeti, $r = r_2$ iken minimum (en küçük) olur:

$$E_{\min} = \frac{r_1}{r_2 - r_1} \cdot \frac{U}{r_2} = \frac{U}{\frac{r_2}{r_1}(r_2 - r_1)}$$

Eş merkezli
küresel elektrot sisteminin
minimum elektrik alan şiddeti
bağıntısı

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

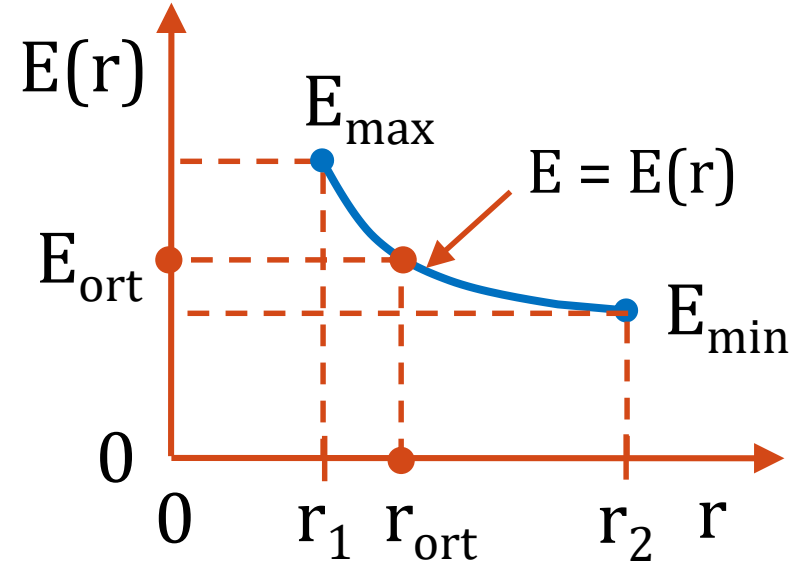
Ortalama elektrik alan şiddeti:

$$E_{\text{ort}} = \frac{U}{a} = \frac{U}{r_2 - r_1} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \cdot \frac{U}{r_{\text{ort}}^2}$$

$E = E_{\text{ort}}$ yapan r 'ye r_{ort} denirse:

$$r_{\text{ort}} = \sqrt{r_1 \cdot r_2}$$

olur.

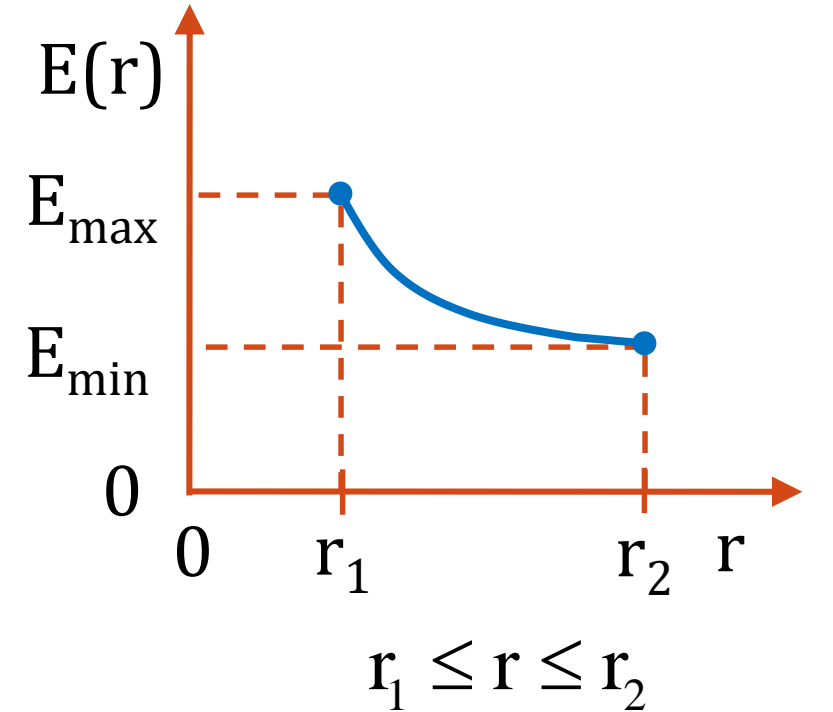


YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Görüldüğü gibi, eş merkezli küresel elektrot sisteminde elektrik alanı düzgün dağılmamakta yani her yerde aynı değeri almamaktadır.

Elektrik alan şiddeti, iç iletken üzerinde maksimum, dış iletkende ise minimumdur. Bu tür elektrik alan dağılımlarına **düzgün olmayan elektrik alan dağılımı** denir.



YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Yüksek gerilimde bir yerdeki E elektrik alan şiddeti, o yerdeki elektriksel yalıtkanın E_d delinme dayanımına eşit veya büyük olduğunda elektriksel boşalma olur. Buna **elektriksel boşalma koşulu** denir.

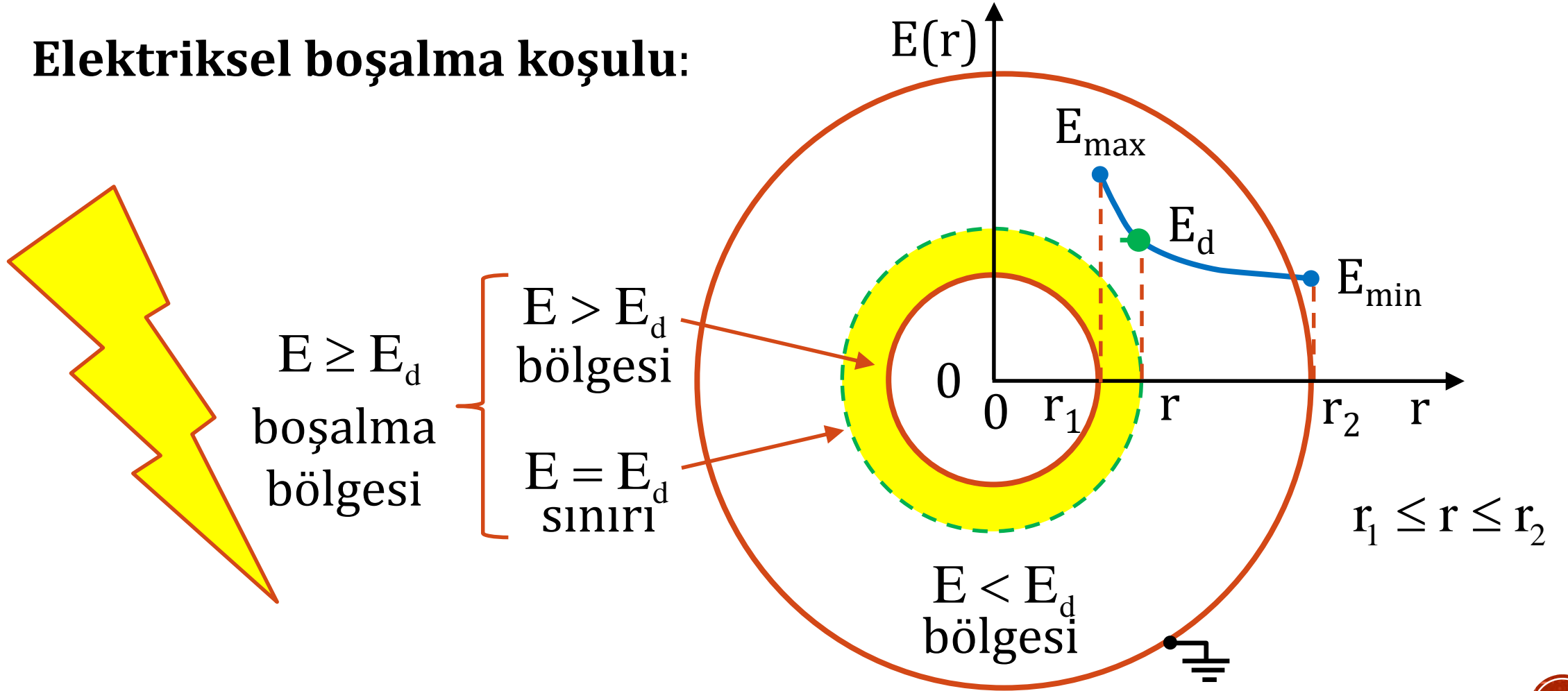
$$E \geq E_d$$

Elektriksel boşalma $E < E_d$ olan yere kadar sürer, boşalma koşulu sağlanmazsa sonrasında devam edemez.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Elektriksel boşalma koşulu:



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Elektriksel boşalma koşulu (**Açıklama**):

$$E_{\max} \geq E_d > E_{\min}$$

ise ya da başka bir deyişle

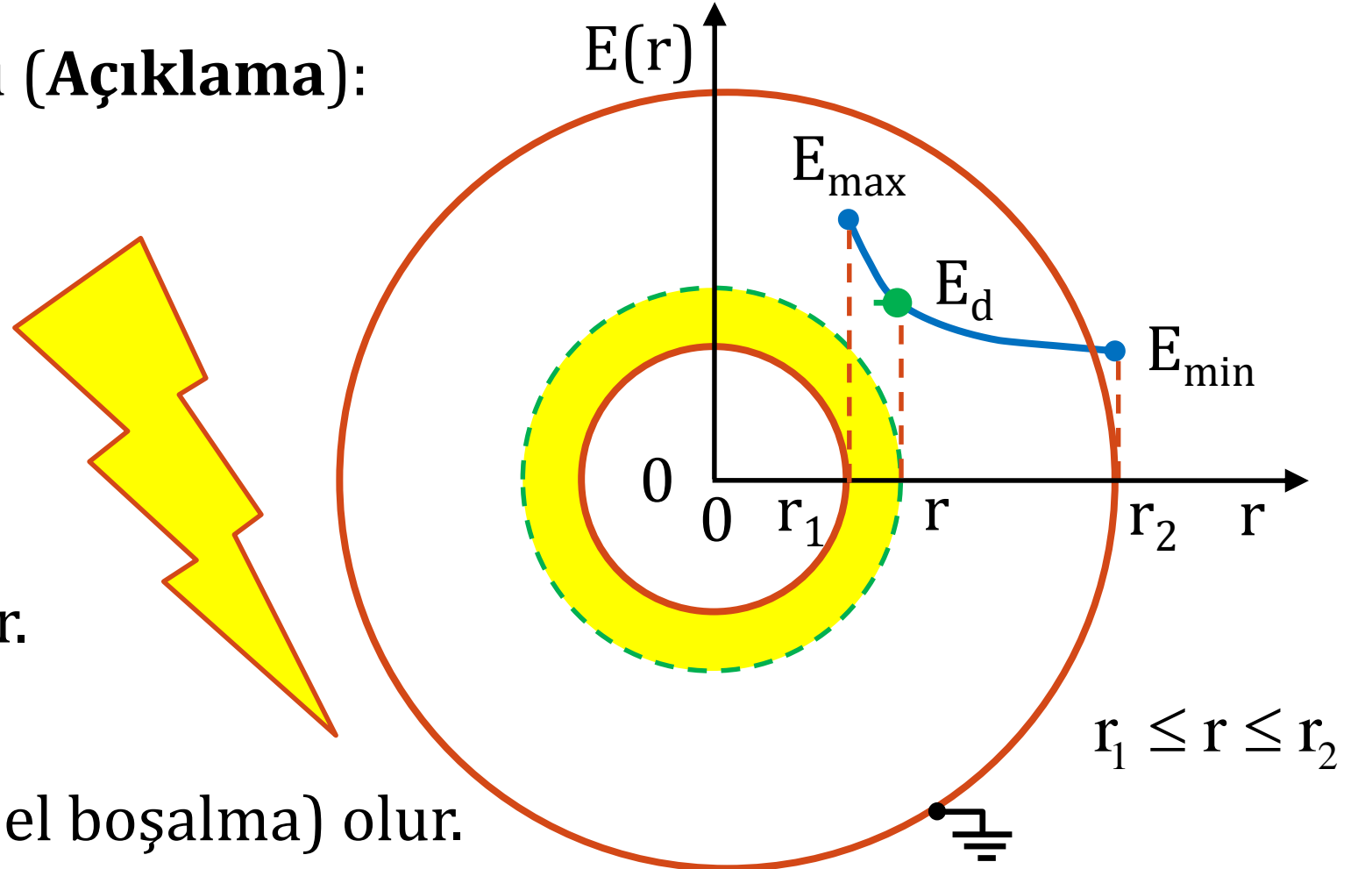
$$E_{\max} \geq E_d \text{ ve } E_{\min} < E_d$$

ise **kısmi boşalma**

(ön elektriksel boşalma,
tam olmayan boşalma) olur.

$$E_{\max} \geq E_d \text{ ve } E_{\min} > E_d$$

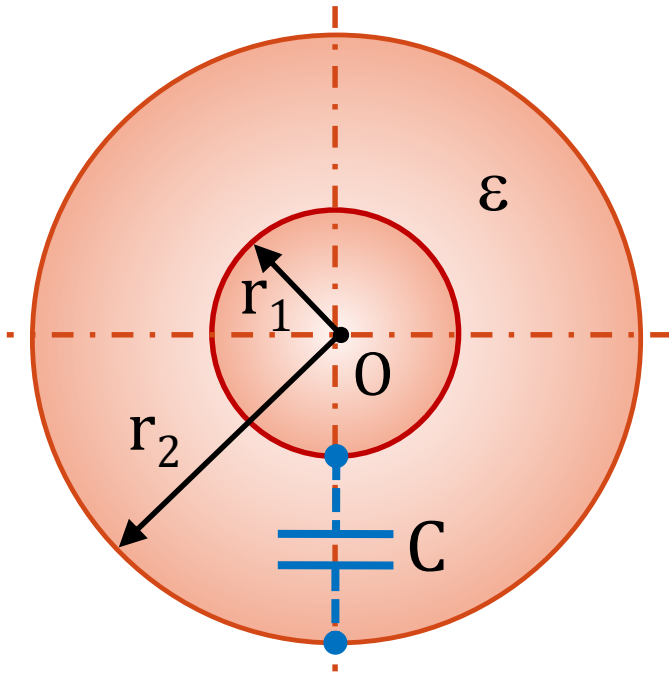
ise **delinme** (tam elektriksel boşalma) olur.



YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eş merkezli küresel elektrot sisteminin **kapasitesi**:



$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \quad (\text{Farad})$$

$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$: Yalıtkanın dielektrik sabiti (F/m)
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m, boşluğun dielektrik sabiti
 ϵ_r : Bağlı dielektrik sabiti
 r_1, r_2 : İç ve dış küre yarıçapları (m)

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Malzemelerin ϵ_r bağıl dielektrik sabitleri:

Malzeme	Bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r	Örnek
Katı yalıtkanlar	2 - 10	2,3 (XLPE), 5 (PVC), 6 (porselen), 5 (cam)
Sıvı yalıtkanlar	2,5 - 5	2,5 (trafo yağı, mineral yağ), 2-73 (silikon yağlar) 3,3 (ester)
Gaz yalıtkanlar	≈ 1	≈ 1 (Hava, SF ₆ , N ₂ , ...)
Vakum	1	

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Küresel elektrot sistemleri ile ilgili **tanımlar**:

Gerçek açıklık (yalıtkan kalınlığı), $a = r_2 - r_1$ [m]

Eşdeğer açıklık, $\alpha = \frac{r_1}{r_2} (r_2 - r_1)$ [m]

Eş merkezli küresel elektrot sisteminde

Düzgün alanda

$$E_{\max} = \frac{U}{\frac{r_1}{r_2} (r_2 - r_1)} = \frac{U}{\alpha}$$

$\xrightarrow{\text{eşdeğer}}$

$$E = \frac{U}{a}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Geometrik karakteristikler:

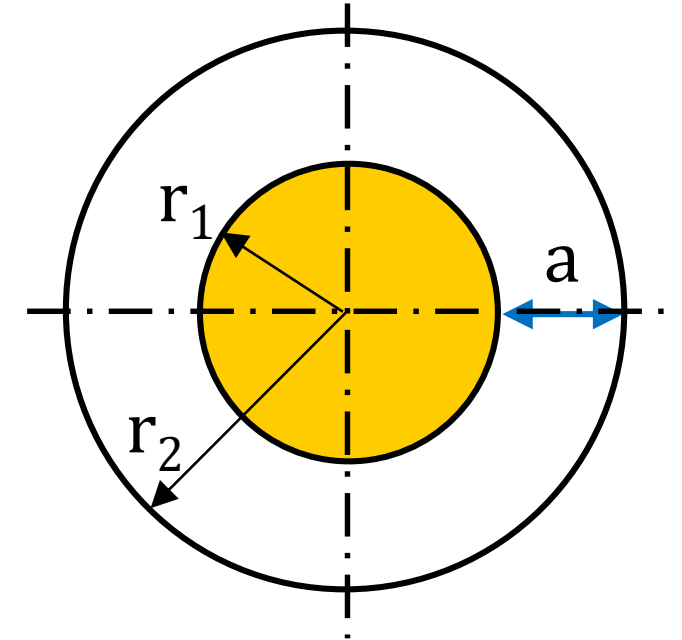
$$p = \frac{r_1 + a}{r_1}$$

$$q = \frac{r_2}{r_1}$$

Eş merkezli küresel elektrot sistemi için

$$p = \frac{r_1 + a}{r_1} = \frac{r_1 + (r_2 - r_1)}{r_1} = \frac{r_2}{r_1} = q$$

$$p = \frac{r_2}{r_1}$$



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

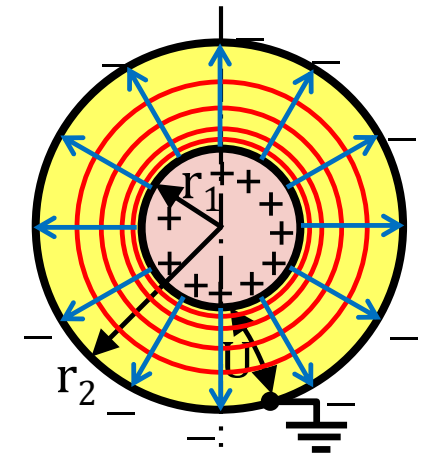
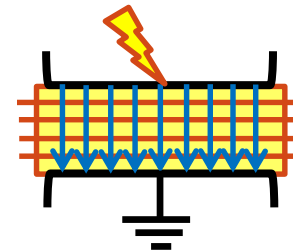
Faydalanma faktörü

$$\eta = \frac{E_{\text{ort}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U/a}{U/\alpha} = \frac{\alpha}{a} = \frac{\frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1)}{r_2 - r_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{p} \leq 1$$

$$\eta \leq 1$$

$\eta = 1$ düzgün elektrik alan dağılımı

$\eta < 1$ düzgün olmayan elektrik alan dağılımı



YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eş Merkezli Küresel Elektrot Sisteminin Delinme Bakımından İncelenmesi (Optimizasyonu)

1) **Maksimum elektrik alan şiddetini minimum yapan r_1 yarıçapının hesabı**

Hesapta r_2 dış yarıçapı ve U gerilimi sabit tutulup maksimum elektrik alan şiddetini minimum yapan, yani bu koşullarda elektrot sisteminin en az zorlanacağı r_1 yarıçapı bulunacaktır.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Maksimum elektrik alan şiddeti:

$$E_{\max} = \frac{U}{\frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1)} = \frac{r_2 \cdot U}{r_1 r_2 - r_1^2}$$

Bunu minimum yapan r_1 yarıçapını bulmak için

$$\frac{dE_{\max}}{dr_1} = 0$$

işlemi yapılırsa

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

$$\frac{dE_{\max}}{dr_1} = \frac{0 - (r_2 - 2r_1)r_2 \cdot U}{(r_1 r_2 - r_1^2)^2} = 0$$

$$r_2 - 2r_1 = 0$$



$$\frac{r_2}{r_1} = 2$$

$r_1 = r_2/2$ için veya $r_2 = 2 \cdot r_1$ için maksimum elektrik alan şiddeti minimum $(E_{\max})_{\min}$ olur:

$$(E_{\max})_{\min} = \frac{2U}{r_1} = \frac{4U}{r_2}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Bu durumda delinme bakımından en uygun geometrik karakteristik olarak adlandırılan p_d :

$$p_d = \frac{r_2}{r_1} = 2$$

olur. Ayrıca,

Eşdeğer açıklık:

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2} (r_2 - r_1) = \frac{r_1}{2} = \frac{r_2}{4}$$

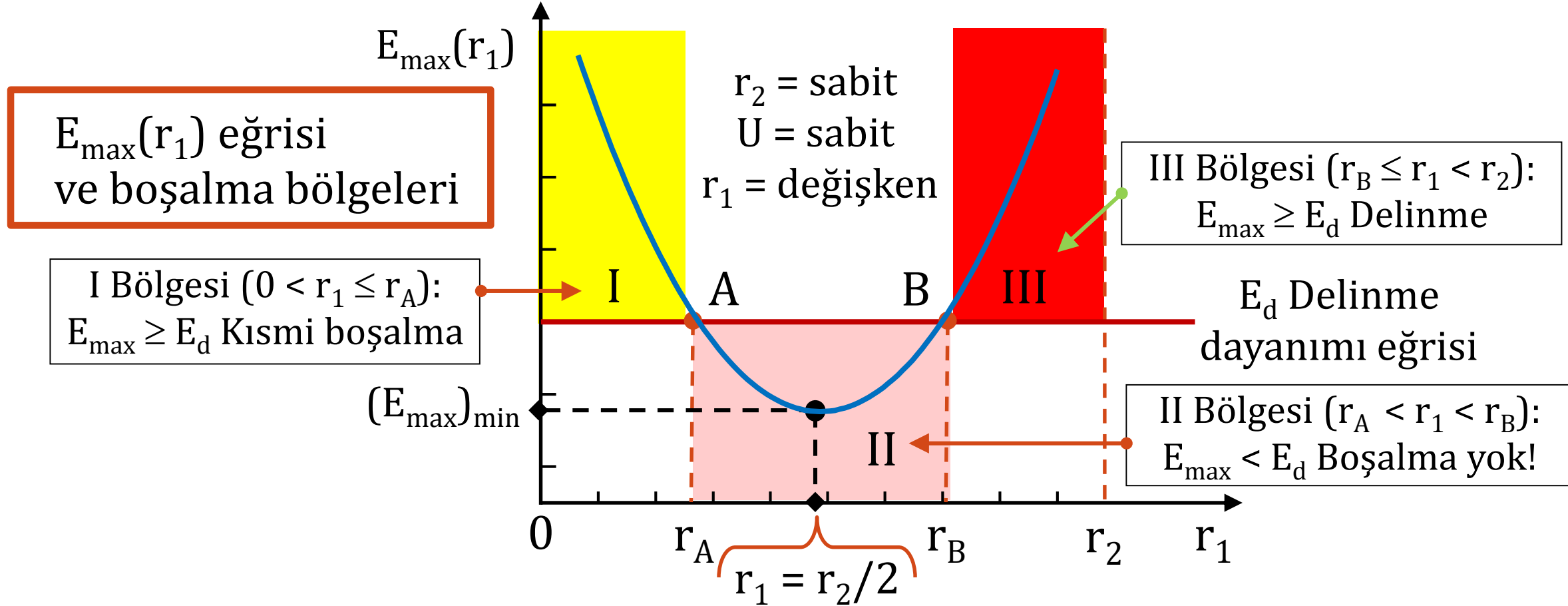
Faydalanma faktörü:

$$\eta = \frac{E_{\text{ort}}}{E_{\text{max}}} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{p_d} = 0,5 \leq 1$$

Bu değerler için $(E_{\text{max}})_{\text{min}}$ olur.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Eş Merkezli Küresel Elektrot Sisteminin Delinme Bakımından İncelenmesi (Optimizasyonu)

2) Uygulanabilecek gerilimi maksimum yapan r_1 yarıçapının hesabı

Hesapta r_2 dış yarıçapı ve E_d delinme dayanımı sabit tutulup gerilimi maksimum yapan, yani bu koşullarda sisteme en yüksek gerilimin uygulanabileceği r_1 yarıçapı bulunacaktır.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Maksimum elektrik alan şiddeti:

$$E_{\max} = \frac{U}{\frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1)} = \frac{U}{\alpha} \quad \Rightarrow \quad U = E_{\max} \cdot \alpha$$

$U = U_d$ delinme gerilimi için $E = E_d$ olur. O halde

$$U_{d\max} = E_d \cdot \alpha_{\max}$$

olur. E_d sabit alınırsa, gerilimin maksimum ($U_{d\max}$) olması için α eşdeğer açıklığının maksimum (α_{\max}) olması gerekir.

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

α eşdeğer açıklığını maksimum (α_{\max}) yapan r_1 yarıçapının bulunması için

$$\frac{d\alpha}{dr_1} = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1) = r_1 - \frac{r_1^2}{r_2}$$

$$\frac{d\alpha}{dr_1} = 1 - \frac{2r_1}{r_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad r_2 = 2r_1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{r_2}{r_1} = 2}$$

olur.

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

$r_2/r_1 = 2$ değeri için $\alpha = \alpha_{\max}$ dolayısıyla delinme gerilimi maksimum $U_{d\max} = E_d \cdot \alpha_{\max}$ olur. Bu durumda

$$r_1 = \frac{r_2}{2}$$

$$r_2 = 2r_1$$

ve eşdeğer açıklık

$$\alpha_{\max} = \frac{r_1}{r_2} (r_2 - r_1) = \frac{r_1}{2} = \frac{r_2}{4}$$

olacaktır.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Ayrıca, delinme bakımından en uygun geometrik karakteristik olarak adlandırılan p_d :

$$p_d = \frac{r_2}{r_1} = 2$$

ve faydalanma faktörü, η :

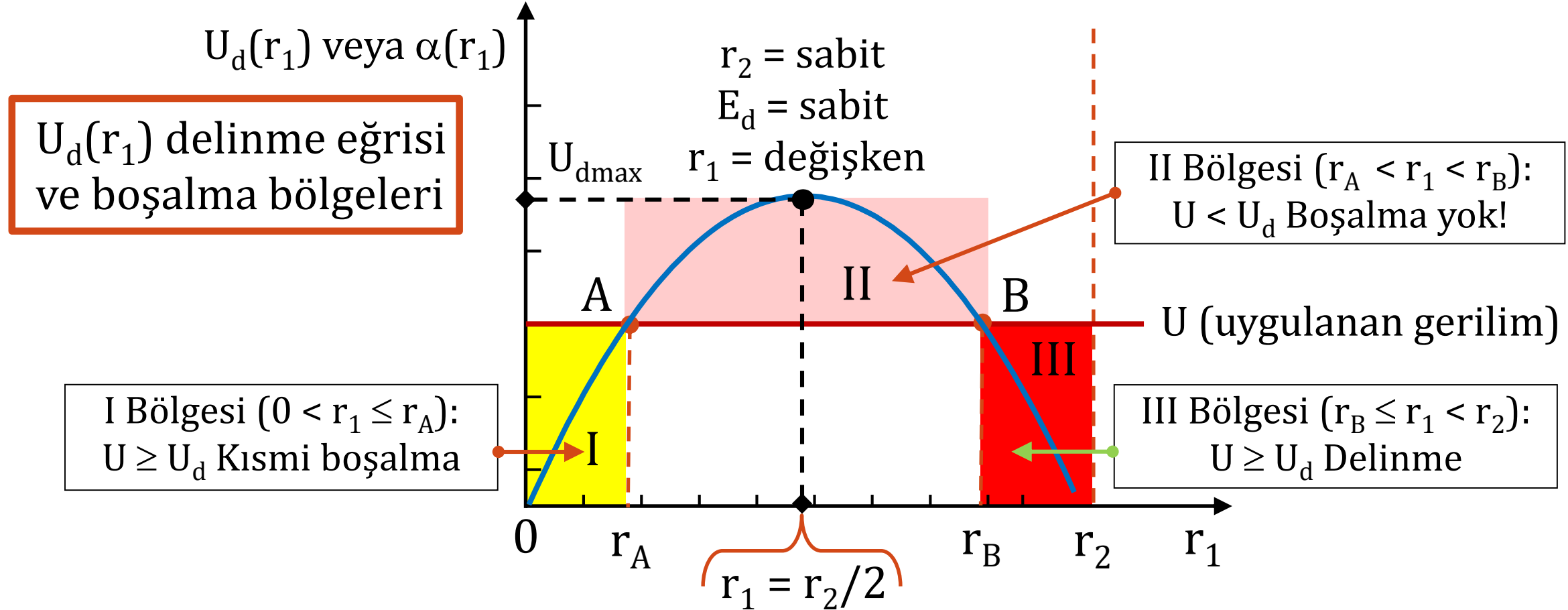
$$\eta = \frac{E_{\text{ort}}}{E_{\text{max}}} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{p_d} = 0,5$$

Bu değerler için
 $U = U_{\text{dmax}}$ olur.

olur.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞI

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



Örnek 1:

Bir eş merkezli küresel elektrot sisteminde, yarıçaplar $r_1 = 0,6 \text{ cm}$, $r_2 = 1,4 \text{ cm}$, yalıtkanın bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,3$ ve uygulanan gerilim $U = 20 \text{ kV}$ olduğuna göre

- Maksimum ve minimum elektrik alan şiddetlerini hesaplayınız.
- Sistemin kapasitesini hesaplayınız ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$).
- Sistemin a , α , p ve η değerlerini hesaplayınız.
- $U = 20 \text{ kV}$, $r_2 = 1,4 \text{ cm}$ ve $E_d = 80 \text{ kV/cm}$ sabit olmak üzere, sistemde herhangi boşalma oluşmaması için r_1 değer aralığı ne olmalıdır?
 $r_1 = 0,2 \text{ cm}$, $r_1 = 0,7 \text{ cm}$ ve $r_1 = 1,2 \text{ cm}$ değerleri için sistemin boşalma olayları bakımından davranışını açıklayınız.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Çözüm 1:

a) Maksimum elektrik alan şiddeti:

$$E_{\max} = \frac{U}{\frac{r_1}{r_2}(r_2 - r_1)} = \frac{20 \text{ kV}}{\frac{0,6 \text{ cm}}{1,4 \text{ cm}}(1,4 \text{ cm} - 0,6 \text{ cm})} = 58,333 \text{ kV/cm}$$

Minimum elektrik alan şiddeti:

$$E_{\min} = \frac{U}{\frac{r_2}{r_1}(r_2 - r_1)} = \frac{20 \text{ kV}}{\frac{1,4 \text{ cm}}{0,6 \text{ cm}}(1,4 \text{ cm} - 0,6 \text{ cm})} = 10,714 \text{ kV/cm}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

b) Sistemin kapasitesi

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}$$

$$C = 4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm} \cdot 2,3 \cdot \frac{0,6 \cdot 1,4}{1,4 - 0,6} = 268,7 \cdot 10^{-14} \text{ F} = 2,687 \text{ pF}$$

c) Sistemin gerçek açıklığı $a = r_2 - r_1 = 1,4 - 0,6 = 0,8 \text{ cm}$

Eşdeğer açıklık $\alpha = (r_1 / r_2)(r_2 - r_1) = (0,6 / 1,4)(1,4 - 0,6) = 0,342 \text{ cm}$

Geometrik karakteristik $p = r_2 / r_1 = 1,4 / 0,6 = 2,333$

Faydalanma faktörü $\eta = \alpha / a = 0,342 / 0,8 = 0,4275 \text{ (% 42,75)}$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

d) $U = 20 \text{ kV}$, $r_2 = 1,4 \text{ cm}$ ve $E_d = 80 \text{ kV/cm}$ sabit iken

$$E_{\max} = \frac{U}{(r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1)} = \frac{20 \text{ kV}}{(r_1/1,4) \cdot (1,4 - r_1)} = 80 \text{ kV/cm}$$

$$\frac{r_1}{1,4} (1,4 - r_1) = r_1 - \frac{r_1^2}{1,4} = \frac{20 \text{ kV}}{80 \text{ kV/cm}} = 0,25 \quad \Rightarrow \quad r_1^2 - 1,4 r_1 + 0,35 = 0$$

Bu denklemin çözümünden r_1 için

$$r_{11} = 0,326 \text{ cm} \quad \text{ve} \quad r_{12} = 1,074 \text{ cm}$$

değerleri bulunur.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Sistemin delinme olmadan kullanılabileceği r_1 yarıçapı aralığı

$$r_{11} = r_A = 0,326 \text{ cm} < r_1 < r_{12} = r_B = 1,074 \text{ cm}$$

olur. Buna göre

$0 < r_1 \leq r_A = 0,326 \text{ cm}$ aralığında kısmi boşalma;

$r_B = 1,074 \text{ cm} \leq r_1 < r_2 = 1,4 \text{ cm}$ aralığında delinme olacaktır.

$r_1 = 0,2 \text{ cm}$ için kısmi boşalma olacaktır:

$$E_{\max} = \frac{20 \text{ kV}}{(0,2/1,4) \cdot (1,4 - 0,2)} = 116,67 \text{ kV/cm} > E_d = 80 \text{ kV/cm}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

$r_1 = 0,7$ cm için boşalma olmayacaktır:

$$E_{\max} = \frac{20 \text{ kV}}{(0,7/1,4) \cdot (1,4 - 0,7)} = 57,143 \text{ kV/cm} < E_d = 80 \text{ kV/cm}$$

$r_1 = 1,2$ cm için delinme olacaktır:

$$E_{\max} = \frac{20 \text{ kV}}{(1,2/1,4) \cdot (1,4 - 1,2)} = 116,67 \text{ kV/cm} > E_d = 80 \text{ kV/cm}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



Örnek 2:

Bir eş merkezli küresel elektrot sisteminde iç ve dış yarıçaplar $r_1 = 20$ cm, $r_2 = 100$ cm ve havanın delinme dayanımı $E_d = 30$ kV/cm olarak verildiğine göre

- Delinme gerilimini, geometrik karakteristiğini, eşdeğer açıklığı, faydalanma faktörünü hesaplayınız.
- Sistemin delinme bakımından en uygun düzeni için p_d , U_{dmax} , α_{max} , η_{max} değerlerini bulunuz.
- Delinme bakımından en uygun düzeninin kapasitesini hesaplayınız ($\epsilon_r = 1$).

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

a) $E_{\max} = E_d$ iken $U = U_d$ olur. Delinme gerilimi,

$$E_{\max} = E_d = \frac{U_d}{(20/100) \cdot (100 - 20)} = 30 \text{ kV/cm}$$

Bu denklemden $U_d = 480 \text{ kV}$ olarak hesaplanır.

Geometrik karakteristik, $p = r_2/r_1 = 100/20 = 5$

Eşdeğer açıklık, $\alpha = (r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1) = (20/100) \cdot (100 - 20) = 16 \text{ cm}$

Faydalanma faktörü:

$$\eta = \frac{\alpha}{a} = \frac{(r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1)}{(r_2 - r_1)} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{20}{100} = 0,2$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

b) Eş merkezli küresel elektrot sistemi için delinme bakımından en uygun düzenin geometrik karakteristiği, $r_2 = 100 \text{ cm} = \text{sabit}$ alınması koşuluyla $p_d = r_2/r_1 = 2$ olur. Bu durumda $r_1 = r_2/2 = 100/2 = 50 \text{ cm}$ olur.

Bulunması istenen diğer büyüklükler için:

$$E_{\max} = E_d = \frac{U_{d\max}}{(50/100) \cdot (100 - 50)} = 30 \text{ kV/cm} \Rightarrow U_{d\max} = 750 \text{ kV}$$

$$\alpha_{\max} = (r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1) = (50/100) \cdot (100 - 50) = 25 \text{ cm}$$

$$\eta_{\max} = \alpha_{\max}/a = r_1/r_2 = 50/100 = 0,5 \text{ değerleri bulunur.}$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

c) Delinme bakımından en uygun düzenin kapasitesi

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}$$

$$C = 4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 1 \cdot \frac{0,5 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ m} - 0,5 \text{ m}} = 111,26 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$C = 111,26 \text{ pF}$$

olur.

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



Çalışma Soruları

- 1) Dış küre yarıçapı $r_2 = 25 \text{ cm}$ = sabit olan bir eşmerkezli küresel elektrot sisteminde aradaki yalıtkan hava olup, delinme alan şiddeti $E_d = 30 \text{ kV/cm}$ 'dir. Sistemin delinme bakımından en uygun olması için iç küre yarıçapını hesaplayınız. Bu durumda uygulanabilecek maksimum gerilimi, gerçek elektrot açıklığını, eşdeğer elektrot açıklığını ve faydalanma faktörünü hesaplayınız.

Yanıtlar:

$$r_1 = 12,5 \text{ cm}, U_{\max} < 187,5 \text{ kV}, a = 12,5 \text{ cm}, \alpha = 6,25 \text{ cm}, \eta = 0,5$$

YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

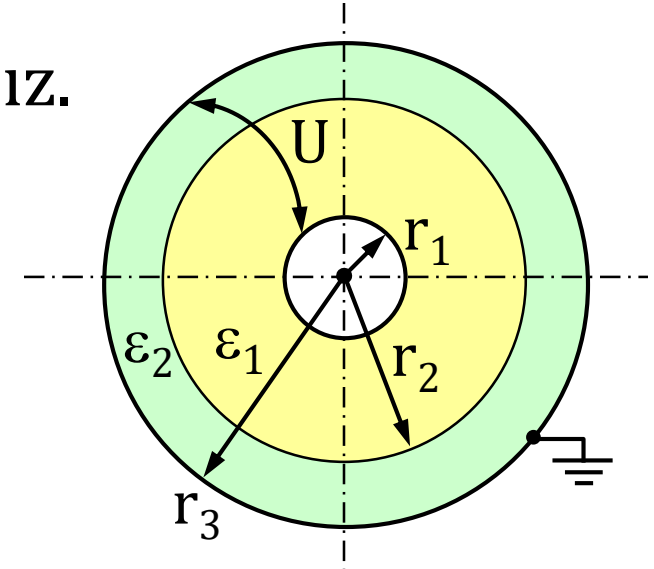
EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ



Çalışma Soruları

2) İki yalıtkan tabakalı eş merkezli küresel elektrot sisteminde $U = 40 \text{ kV}$, $r_1 = 2 \text{ cm}$, $r_2 = 2,5 \text{ cm}$, $r_3 = 3 \text{ cm}$, $\epsilon_{r1} = 2,2$ ve $\epsilon_{r2} = 4$ olmak üzere

- Tabakalara düşen gerilimleri hesaplayınız.
- Tabakalardaki maksimum ve minimum elektrik alan şiddetlerini hesaplayınız.
- Bu sistem alan bakımından düzgün zorlanıyor mu? Bu sistemin düzgün zorlanma koşulunu çıkarınız.



YÜKSEK GERİLİM TEKNIĞİ

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Yanıtlar:

2.a) $U_1 = 29,27 \text{ kV}$, $U_2 = 10,73 \text{ kV}$ ($U = U_1 + U_2 = 40 \text{ kV}$)

b) $E_{1\max} = 73,175 \text{ kV/cm}$, $E_{1\min} = 46,832 \text{ kV/cm}$

$E_{2\max} = 25,752 \text{ kV/cm}$, $E_{2\min} = 17,883 \text{ kV/cm}$

c) Düzgün zorlanma için $E_{1\max} = E_{2\max}$ olmalıdır.

$$E_{1\max} = \frac{U_1}{(r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1)} = \frac{\frac{U}{\epsilon_1 \cdot A} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}}{(r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1)} = \frac{U}{\epsilon_1 \cdot A \cdot r_1^2} \quad E_{2\max} = \frac{U_2}{(r_2/r_3) \cdot (r_3 - r_2)} = \frac{U}{\epsilon_2 \cdot A \cdot r_2^2}$$

İki yalıtkan tabakalı eş merkezli küresel elektrot sistemi için
düzgün zorlanma koşulu: $E_{1\max} = E_{2\max} \rightarrow \epsilon_1 \cdot r_1^2 = \epsilon_2 \cdot r_2^2$

YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ EŞ MERKEZLİ KÜRESEL ELEKTROT SİSTEMİ

Bu haftalık bu kadar!

Haftaya

Temel Elektrot Sistemleri: Silindirsel Elektrot Sistemleri
konusunu işleyeceğiz.

Sağlıkla kalın.