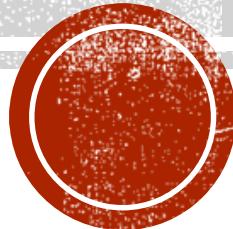


# **YÜKSEK GERİLİM TEKNİĞİ**

Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ



**Statik Elektrik Alanı  
MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI**

# **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
--------------	------------	------------------------	------------------	-------------------------	-------------------

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## Giriş

Yüksek gerilim tekniği bakımından, boşalma başlangıcını ve oluşumunu belirleyen  $E_{\max} \geq E_d$  koşulu önemlidir. Bu nedenle maksimum elektrik alan şiddetinin ( $E_{\max}$ ) bilinmesi ve bulunması, elektriksel boşalmaz, güvenilir sistem tasarıımı için gereklidir.

Maksimum elektrik alan şiddeti, analitik, sayısal ve/veya deneysel olarak bulunabilir.

Burada, özellikle temel elektrot sistemlerine benzeyen ve çok kullanılan elektrot sistemlerinin maksimum elektrik alan şiddetinin yaklaşık olarak hesabı açıklanacaktır.

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Yaklaşık  $E_{\max}$  hesabında, aşağıdaki **temel kurallar** dikkate alınır.

- 1) Maksimum elektrik alan şiddeti ( $E_{\max}$ ), eğrilik yarıçapı küçük olan elektrot üzerindedir.
- 2) Maksimum elektrik alan şiddeti ( $E_{\max}$ ), genel olarak iki elektrot arasında en kısa yol (kritik alan çizgisi) üzerindedir.
- 3) Maksimum elektrik alan şiddeti ( $E_{\max}$ ), karşı elektrodun eğrilik yarıçapına az bağlıdır ve bu bağlılık elektrot açılığı büyündükçe azalır.

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

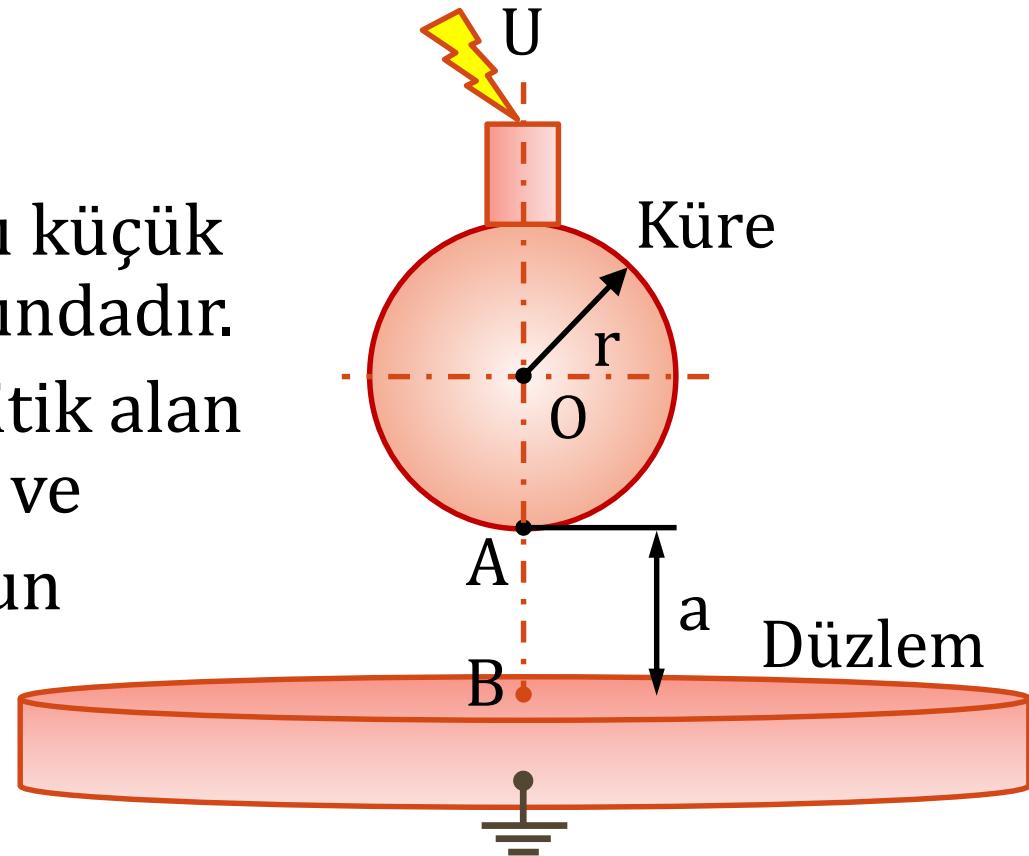
## Örnekler

### 1) Küre – Düzlem Elektrot Sistemi

(1) kuralına göre  $E_{\max}$  eğrilik yarıçapı küçük olan küre elektrot üzerinde A noktasındadır.

(2) kuralına göre  $E_{\max}$  en kısa yol (kritik alan çizgisi) olan AB doğrusu üzerindedir ve

(3) kuralına göre  $E_{\max}$  karşı elektrodun yarıçapına az bağlıdır ve düzlem elektrot yerine, B noktasında teğet, küre elektrot ile eş merkezli olan ve  $r + a$  yarıçaplı K' küresi göz önüne alınabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Bu varsayımdan dolayı maksimum alanda oluşan değişim, özellikle A noktasında, oldukça küçük olacaktır. Buna göre

## Küre-Düzlem Elektrot Sistemi

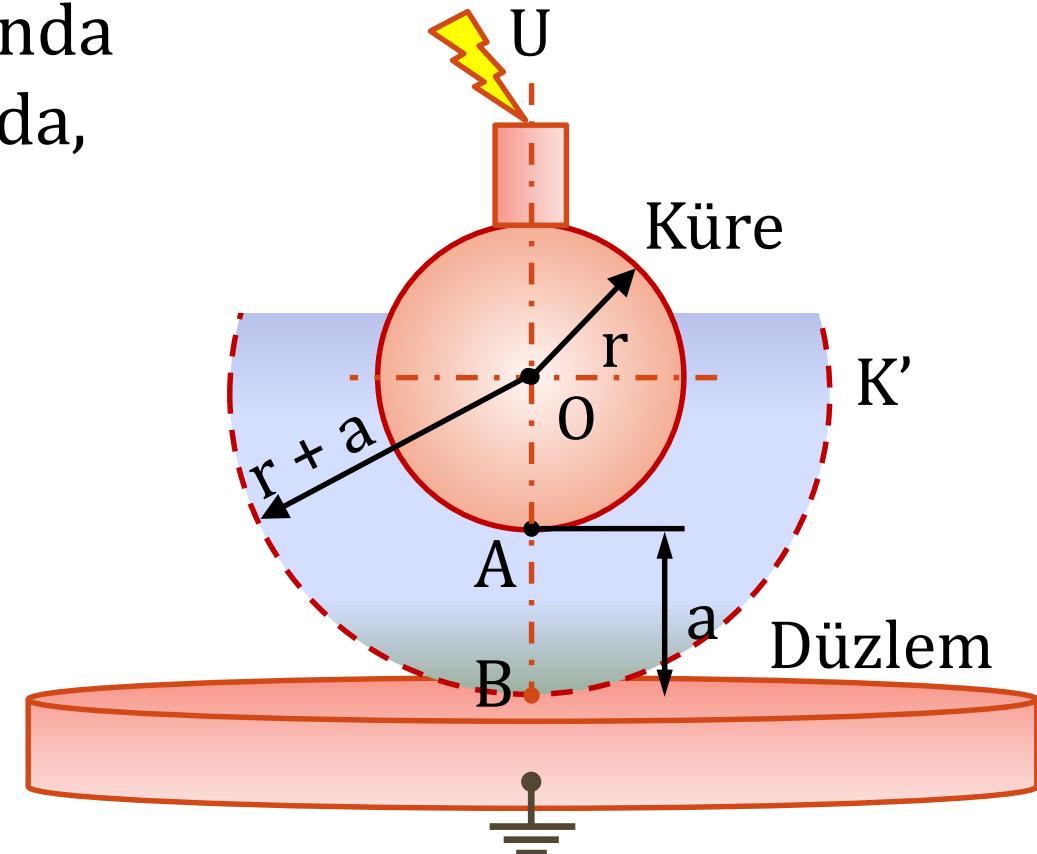
$$r_1 = r$$

$$r_2 = r + a$$

$$U \rightarrow U$$

## Eş Merkezli Küresel Elektrot Sistemi

yaklaşımı yapılabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Eş merkezli küresel elektrot sistemi için  $E_{\max}$  bağıntısında  $r_1 = r$ ,  $r_2 = r + a$ ,  $U \rightarrow U$  alarak

$$E_{\max} = \frac{U}{(r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1)} \quad \rightarrow \quad E_{\max} \cong \frac{U}{\frac{r}{r+a}(r+a-r)} = \frac{r+a}{r \cdot a} \cdot U$$

yazılabilir.  $k$  yaklaşıklık katsayısı ile küre-düzlem elektrot sistemi için  $E_{\max}$

$$E_{\max} = k \cdot \frac{r+a}{r \cdot a} \cdot U$$

olur. Yaklaşıklık katsayısı  $0,88 \leq k \leq 0,97$  arasında alınabilir.  
Ortalama yaklaşıklık katsayısı olarak  $k \cong 0,9$  kullanılabilir.

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI



## Örnek 1:

Küre-düzlem elektrot sisteminde yaklaşık alan hesabından yararlanarak küre yarıçapı 2 mm, elektrot açıklığı 5 mm, havanın delinme dayanımı 30 kV/cm ve yaklaşıklık (düzeltme) katsayısı 0,85 olduğuna göre delinme gerilimini hesaplayınız.

## Yanıt 1:

$$E_{\max} = k \cdot \frac{r + a}{r \cdot a} \cdot U \quad (E_{\max} = E_d \text{ iken } U = U_d \text{ olur}) \quad U_d = E_d \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{r \cdot a}{r + a}$$

Delinme gerilimi:

$$U_d = 30 \cdot \frac{1}{0,85} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,5}{0,2 + 0,5} = 5,042 \text{ kV}$$

bulunur.

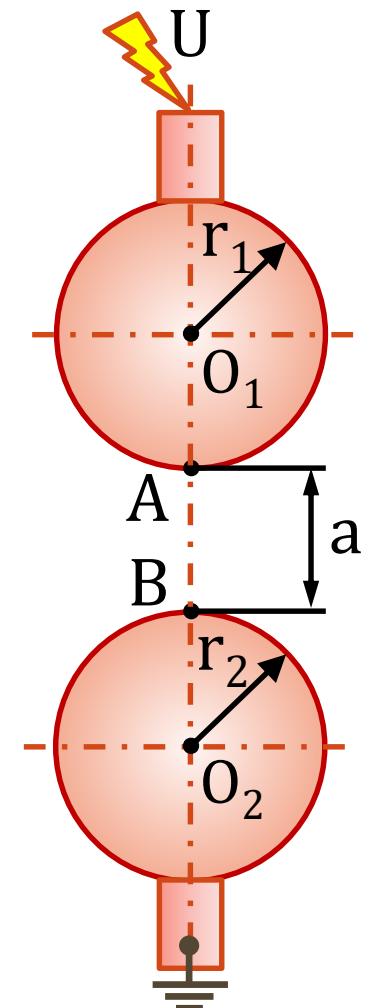
# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## 2) Küre - Küre Elektrot Sistemi

(1) kuralına göre  $E_{\max}$  eğrilik yarıçapı küçük olan küre elektrot üzerinde A noktasındadır. Küre çapları eşitse yüksek gerilimli elektrot üzerindedir.

(2) kuralına göre  $E_{\max}$  en kısa yol (kritik alan çizgisi) olan AB doğrusu üzerindedir ve

(3) kuralına göre  $E_{\max}$  karşı elektrodun yarıçapına az bağlıdır. Göz önüne alınacak simetri düzlemi yerine, küre elektrot ile eş merkezli olan ve  $r + (a/2)$  yarıçaplı K' küresi göz önüne alınabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Bu varsayımda nedeniyle maksimum alanda oluşan değişim özellikle A noktasında, oldukça küçük olacaktır. Buna göre

Küre-Küre Elektrot Sistemi

Küre-Düzlem Elektrot Sistemi

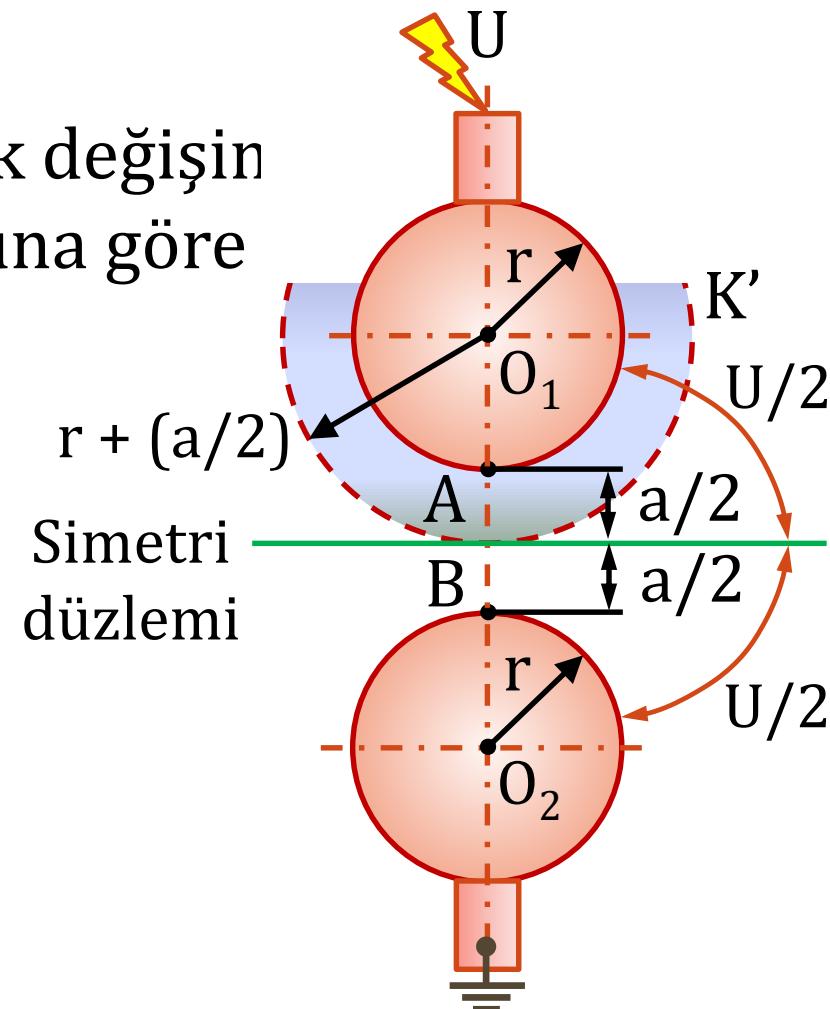
$$r_1 = r$$

$$r_2 = r + (a/2)$$

$$U \rightarrow U/2$$

Eş Merkezli Küresel Elektrot Sistemi

yaklaşımı yapılabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Eş merkezli küresel elektrot sistemi için  $E_{\max}$  bağıntısında  $r_1 = r$ ,  $r_2 = r + (a/2)$ ,  $U \rightarrow U/2$  alarak

$$E_{\max} = \frac{U}{(r_1/r_2) \cdot (r_2 - r_1)} \quad \rightarrow \quad E_{\max} \cong \frac{U/2}{\frac{r}{r+(a/2)}(r+(a/2)-r)} = \frac{r+(a/2)}{r \cdot a} \cdot U$$

yazılabilir.  $k$  yaklaşıklık katsayısı ile küre-küre elektrot sistemi için  $E_{\max}$

$$E_{\max} = k \cdot \frac{r+(a/2)}{r \cdot a} \cdot U$$

olur. Yaklaşıklık katsayısı  $0,84 \leq k \leq 0,98$  arasında alınabilir.  
Ortalama yaklaşıklık katsayısı olarak  $k \cong 0,9$  kullanılabilir.

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI



## Örnek 2:

Eş çaplı küre-küre elektrot sisteminde yaklaşık alan hesabından yararlanarak küre yarıçapı 5 cm, elektrot açıklığı 6 mm, havanın delinme dayanımı 30 kV/cm ve yaklaşıklık (düzeltme) katsayısı 0,9 olduğuna göre delinme gerilimini hesaplayınız.

## Yanıt 2:

$$E_{\max} = k \cdot \frac{r + (a/2)}{r \cdot a} \cdot U \quad (E_{\max} = E_d \text{ iken } U = U_d \text{ olur}) \quad U_d = E_d \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{r \cdot a}{r + (a/2)}$$

Delinme gerilimi:

$$U_d = 30 \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{5 \cdot 0,6}{5 + (0,6/2)} = 18,87 \text{ kV}$$

bulunur.

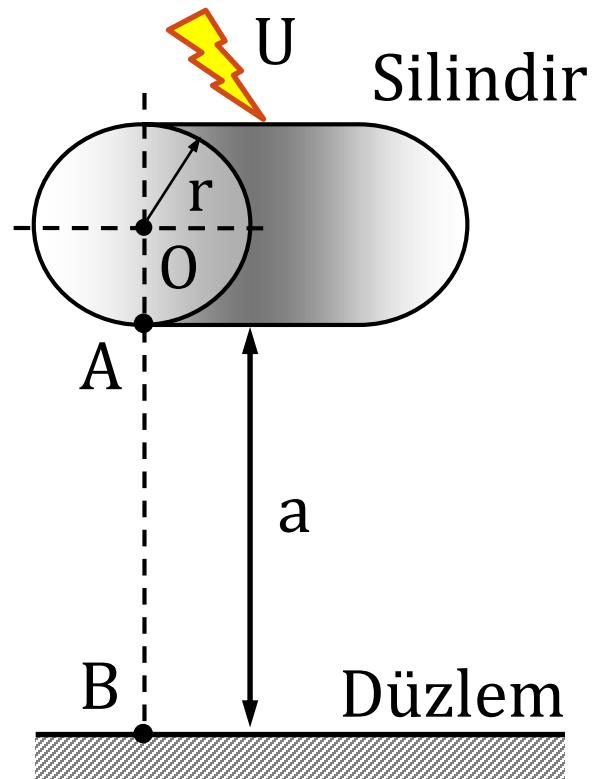
# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## 3) Silindir - Düzlem Elektrot Sistemi

(1) kuralına göre  $E_{\max}$  eğrilik yarıçapı küçük olan silindir elektrot üzerinde A noktasındadır.

(2) kuralına göre  $E_{\max}$  en kısa yol (kritik alan çizgisi) olan AB doğrusu üzerindedir ve

(3) kuralına göre  $E_{\max}$  karşı elektrodun yarıçapına az bağlıdır ve düzlem elektrot yerine, B noktasında teğet, silindir elektrot ile eş eksenli olan ve  $r + a$  yarıçaplı  $S'$  silindiri göz önüne alınabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Bu varsayımda nedeniyle maksimum alanda oluşan değişim, özellikle A noktasında, oldukça küçük olacaktır. Buna göre

Silindir-Düzlem Elektrot Sistemi

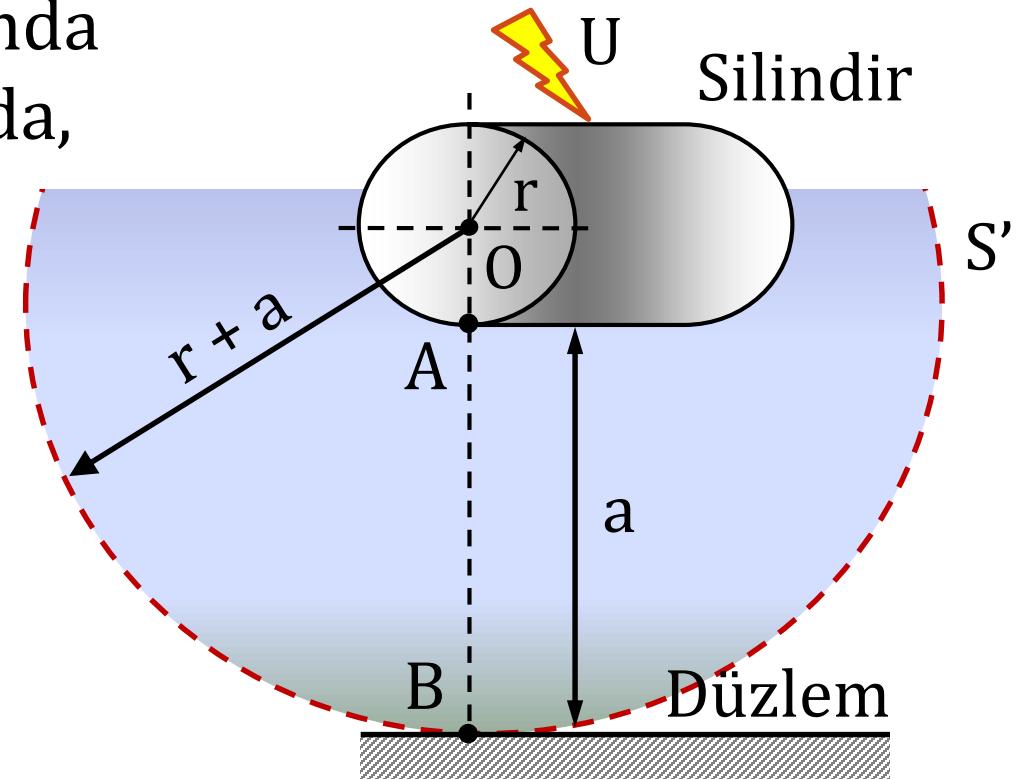
$$r_1 = r$$

$$r_2 = r + a$$

$$U \rightarrow U$$

Eş Eksenli Silindirsel Elektrot Sistemi

yaklaşımı yapılabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Eş eksenli silindirsel elektrot sistemi için  $E_{\max}$  bağıntısında  $r_1 = r$ ,  $r_2 = r + a$  ve  $U \rightarrow U$  alarak

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \rightarrow \quad E_{\max} \cong \frac{U}{r \ln \frac{r+a}{r}}$$

yazılabilir.  $k$  yaklaşıklık katsayısı ile silindir-düzlem elektrot sistemi için

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{r \ln \frac{r+a}{r}}$$

olur. Yaklaşıklık katsayısı  $0,85 \leq k \leq 0,94$  arasında alınabilir. Ortalama yaklaşıklık katsayısı olarak  $k \cong 0,9$  kullanılabilir.

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI



## Örnek 3:

Silindir-düzlem elektrot sisteminde yaklaşık alan hesabından yararlanarak silindir yarıçapı 12 mm, elektrot açılığı 10 cm,  $U = 40 \text{ kV}$  için yaklaşıklık katsayısını 0,9 alarak maksimum elektrik alan şiddetini hesaplayınız.

## Yanıt 3:

Silindir-düzlem elektrot sistemi için yaklaşık alan hesabından

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{r \ln \frac{r+a}{r}} = 0,9 \cdot \frac{40}{1,2 \ln \frac{1,2+10}{1,2}} = 13,43 \text{ kV/cm}$$

bulunur.

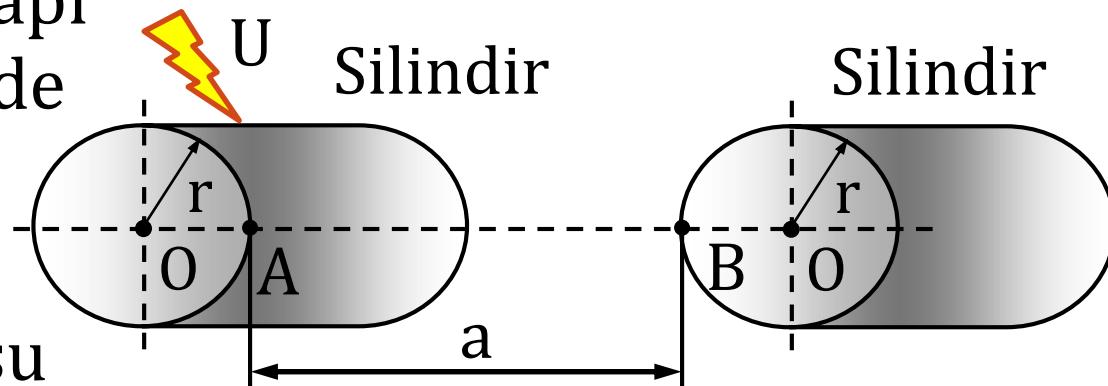
# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## 4) Silindir - Silindir Elektrot Sistemi

(1) kuralına göre  $E_{\max}$  eğrilik yarıçapı küçük olan silindir elektrot üzerinde A noktasındadır.

(2) kuralına göre  $E_{\max}$  en kısa yol (kritik alan çizgisi) olan AB doğrusu üzerindedir ve

(3) kuralına göre  $E_{\max}$  karşı elektrodun yarıçapına az bağlıdır. Göz önüne alınacak simetri düzlemi yerine, silindir elektrot ile eş eksenli olan ve  $r + (a/2)$  yarıçaplı S' silindiri göz önüne alınabilir.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Bu varsayımda nedeniyle maksimum alanda oluşan değişim, özellikle A noktasında, oldukça küçük olacaktır.

Silindir-Silindir Elektrot Sistemi

Silindir-Düzlem Elektrot Sistemi

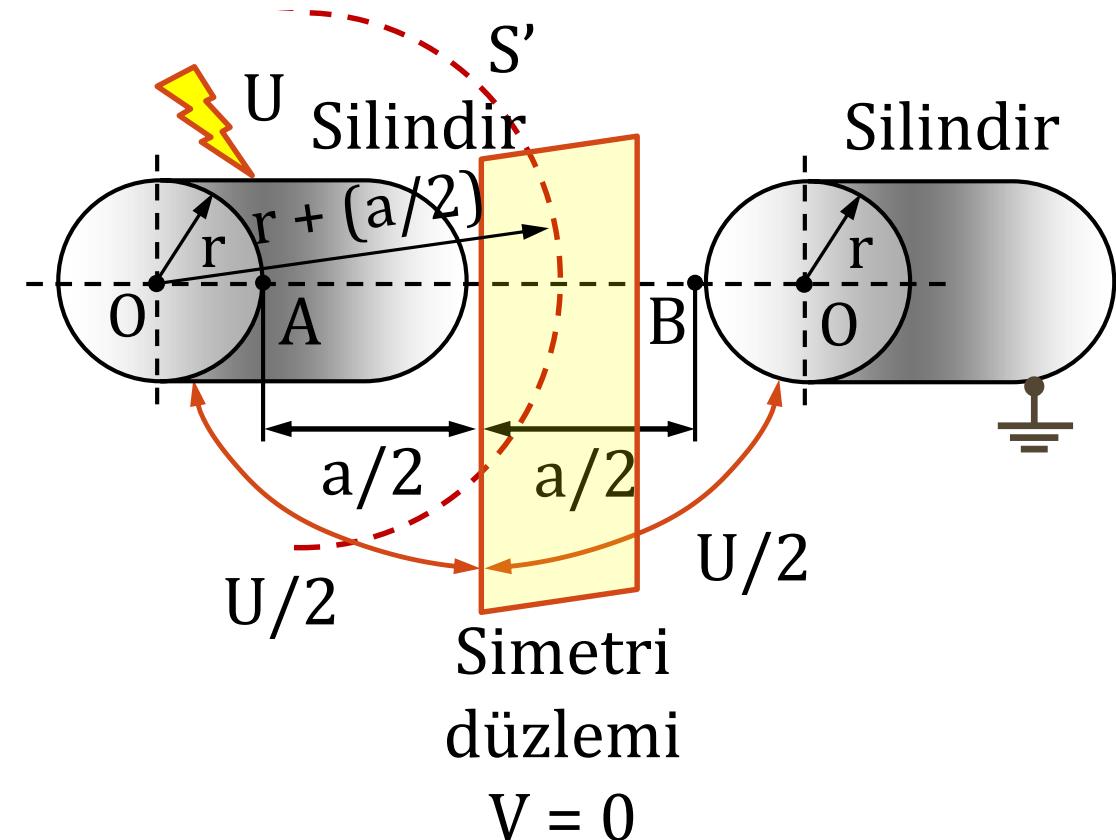
$$r_1 = r$$

$$r_2 = r + (a/2)$$

$$U \rightarrow U/2$$

Eş Eksenli Silindirsel Elektrot Sistemi

yaklaşımı yapılabılır.



# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

Eş eksenli silindirsel elektrot sistemi için  $E_{\max}$  bağıntısında  $r_1 = r$ ,  $r_2 = r + (a/2)$ ,  $U \rightarrow U$  alarak

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \rightarrow \quad E_{\max} \cong \frac{U/2}{r \ln \frac{r + (a/2)}{r}} = \frac{U}{2r \ln \frac{r + (a/2)}{r}}$$

yazılabilir.  $k$  yaklaşıklık katsayısı ile silindir-düzlem elektrot sistemi için

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{2r \ln \frac{r + (a/2)}{r}}$$

olur. Yaklaşıklık katsayısı  $0,84 \leq k \leq 0,96$  arasında alınabilir. Ortalama yaklaşıklık katsayısı olarak  $k \cong 0,9$  kullanılabilir.

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI



## Örnek 4:

Yarıçapları eşit silindir-silindir elektrot sisteminde yaklaşık alan hesabından yararlanarak iletken çapı 28 mm olan 380 kV'luk üç fazlı bir enerji iletim hattında,

- İletkenler arası minimum uzaklığı bulunuz ( $E_{d,hava} = 30 \text{ kV/cm}$ ).
- Bu düzende iletkenler arası açıklık 1 m olursa kaç kV'ta atlama olur?
- Aynı hatta 2 m iletken açıklığı durumunda maksimum alan şiddeti ne kadar olur?

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## Yanıt 4:

Silindir-silindir elektrot sisteminin maksimum elektrik alan şiddetinin yaklaşık hesap bağıntısı:

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{2r \cdot \ln \frac{r + (a/2)}{r}}$$

a)  $r = 28/2 \text{ mm} = 14 \text{ mm} = 1,4 \text{ cm}$ ,  $U = 380 \text{ kV}$ ,  $E_d = 30 \text{ kV/cm}$  ve  $k = 0,9$  için iletkenler arası minimum uzaklık (acıklık):

$$a = 2 \cdot \left[ r \cdot \exp \left( \frac{k \cdot U}{E_{\max} \cdot 2r} \right) - r \right] = 2 \cdot \left[ 1,4 \cdot \exp \left( \frac{0,9 \cdot 380}{30 \cdot 2 \cdot 1,4} \right) - 1,4 \right] = 161,39 \text{ cm}$$

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

b)  $a = 1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$  iletkenler arası açıklık,  $r = 14 \text{ mm} = 1,4 \text{ cm}$ ,  
 $E_d = 30 \text{ kV/cm}$  ve  $k = 0,9$  için atlama (delinme) gerilimi:

$$U_a = E_d \cdot \frac{2r}{k} \cdot \ln \frac{r + (a/2)}{r} = 30 \cdot \frac{2 \cdot 1,4}{0,9} \cdot \ln \frac{1,4 + (100/2)}{1,4} = 336,295 \text{ kV}$$

c)  $a = 2 \text{ m} = 200 \text{ cm}$  iletkenler arası açıklık,  $r = 14 \text{ mm} = 1,4 \text{ cm}$ ,  
 $U = 380 \text{ kV}$  ve  $k = 0,9$  için maksimum elektrik alan şiddetı:

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U/2}{r \cdot \ln \frac{r + (a/2)}{r}} = 0,9 \cdot \frac{380/2}{1,4 \cdot \ln \frac{1,4 + (200/2)}{1,4}} = 28,52 \text{ kV/cm}$$

olur.

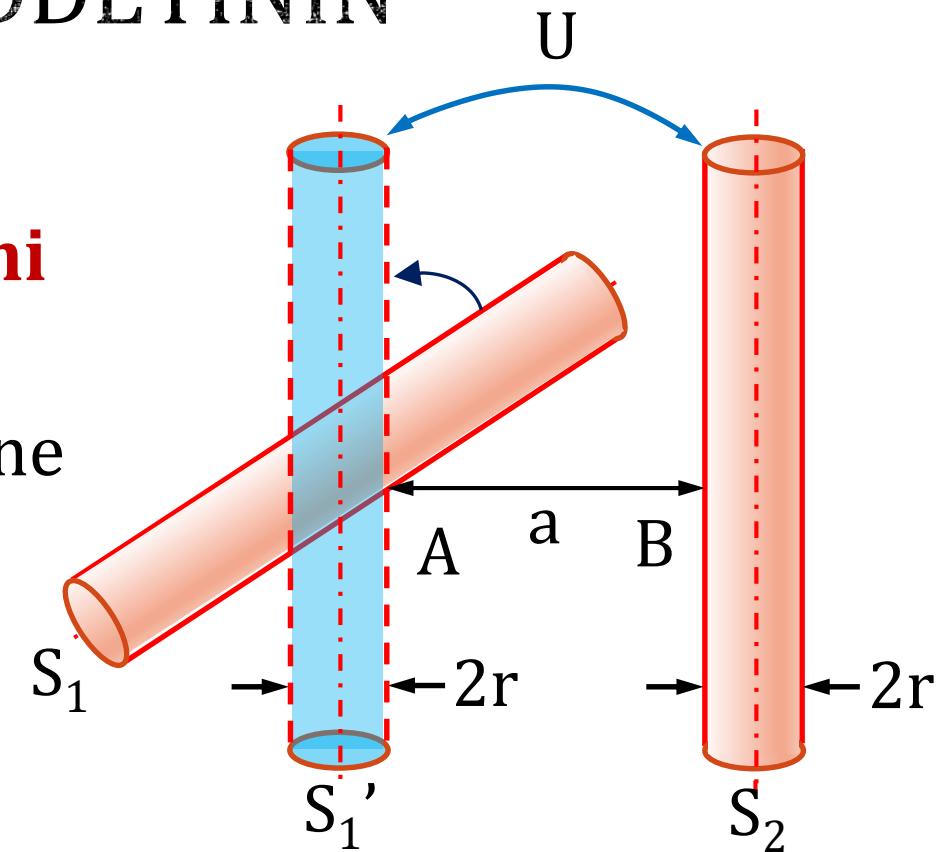
# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## 5) Çapraz Silindir - Silindir Elektrot Sistemi

Bu durumda, silindir elektrotlardan birisi, aralarındaki açıklık değiştirilmeden, diğerine paralel duruma getirilirse, silindir-silindir elektrot sistemi elde edilir.

Bu şekilde  $E_{\max}$  silindir-silindir elektrot sisteminin bağıntılarından yararlanılarak, yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Burada, yaklaşıklık katsayısı için ortalama değer olarak  $k = 0,9$  kullanılabilir.



$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{2r \ln \frac{r + (a/2)}{r}}$$

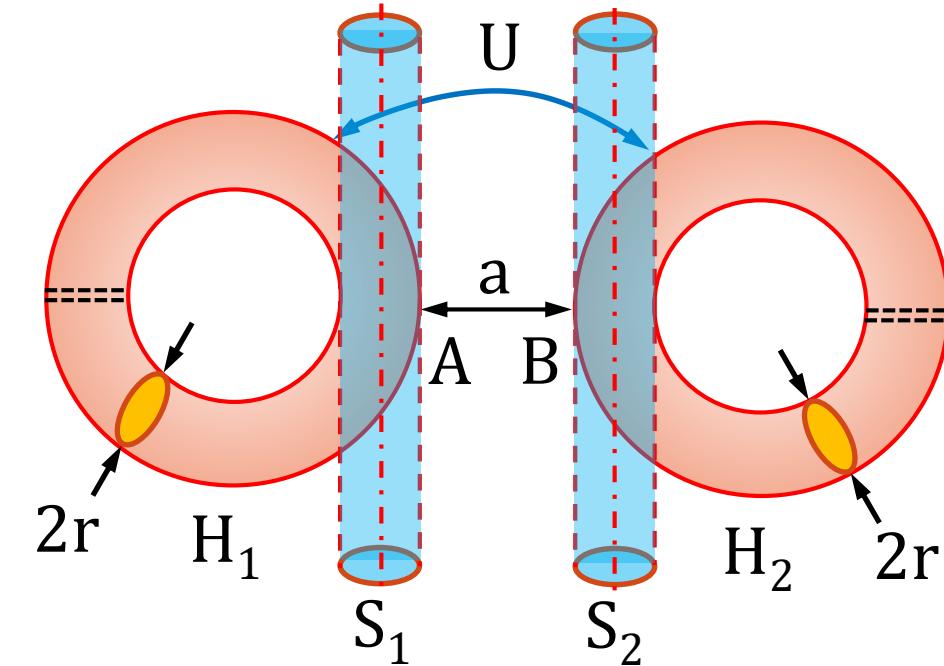
# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI

## 6) Halka – Halka Elektrot Sistemi

Bu durumda, halka elektrotlar kesilip, açılıp, aralarındaki açıklık değiştirilmeden, birbirine paralel duruma getirilirse, silindir-silindir elektrot sistemi elde edilir.

Bu şekilde  $E_{\max}$  silindir-silindir elektrot sisteminin bağıntılarından yararlanılarak, yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Burada, yaklaşıklık katsayısı için ortalama değer olarak  $k = 0,9$  kullanılabilir.



$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{2r \ln \frac{r + (a/2)}{r}}$$

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI



## Örnek 5:

Yarıçapları eşit  $r = 2,5$  cm olan halka-halka elektrot sisteminde halkalar arası açıklık  $a = 10$  cm'dir.  $k = 0,9$  alarak

- a)  $U = 100$  kV için maksimum elektrik alan şiddetini yaklaşık olarak hesaplayınız.

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{2r \ln \frac{r + (a/2)}{r}} = 0,9 \cdot \frac{100}{2 \cdot 2,5 \ln \frac{2,5 + (10/2)}{2,5}} = 16,38 \text{ kV/cm}$$

- b)  $E_d = 30$  kV/cm için delinme gerilimini yaklaşık olarak hesaplayınız.

$$U_d = \frac{E_d}{k} \cdot 2 \cdot r \cdot \ln \frac{r + (a/2)}{r} = \frac{30}{0,9} \cdot 2 \cdot 2,5 \cdot \ln \frac{2,5 + (10/2)}{2,5} = 183 \text{ kV}$$

# MAKSİMUM ELEKTRİK ALAN ŞİDDETİNİN YAKLAŞIK HESABI



## Çalışma Sorusu

Yarıçapları eşit silindir-silindir elektrot sisteminde maksimum elektrik alan şiddetinin yaklaşık hesabından yararlanarak iletken çapı 28 mm olan 154 kV'luk üç fazlı bir enerji iletim hattında,

- a)** İletkenler arası açıklık 0,5 m olsa kaç kV'ta atlama olur?
- b)** İletkenler arası açıklık 1,5 m olsa maksimum elektrik alan şiddeti ne kadar olur?
- c)** İletkenler arası ortam için  $E_{d,hava} = 30 \text{ kV/cm}$  alarak iletkenler arası minimum uzaklığı bulunuz.

Yanıtlar: a)  $U_a = 274,11 \text{ kV}$ ; b)  $E_{max} = 12,376 \text{ kV/cm}$ ; c)  $a_{min} = 11,78 \text{ cm}$