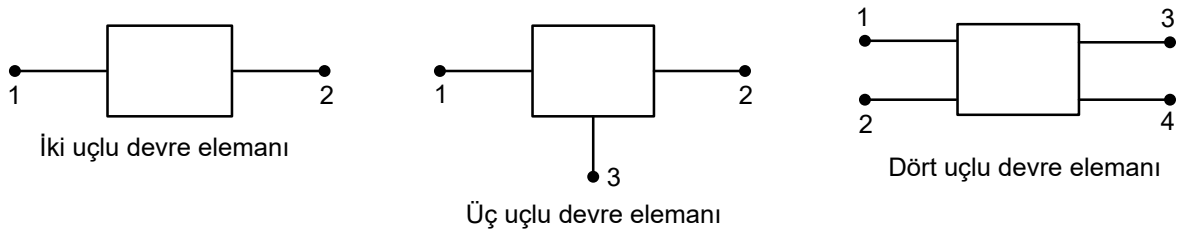


## BÖLÜM 1. BİR ELEKTRİK DEVRESİNDE AKIM, GERİLİM VE FONKSİYONLARIN TANIMLANMASI

### a) Fiziksel ve Elektriksel Sistemler

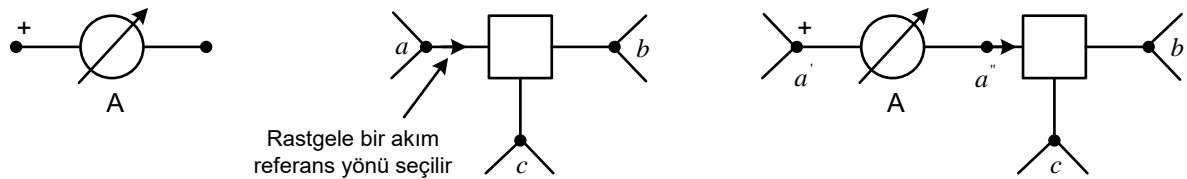
Birbirine tesir eden fiziksel elemanların oluşturduğu sisteme veya belirli bir görevi gerçekleştirmek üzere birbirine bağlanmış fiziksel eleman ya da düzenlerin oluşturduğu kümeye fiziksel sistem denir. En basit fiziksel sisteme fiziksel eleman denir. O halde, bir **elektrik devresi**, bu devreyi oluşturmak üzere birbirlerine bağlanmış bulunan düzenler topluluğudur. Elektrik devrelerini oluşturan düzenlere bu devrenin **eleman**'ları adı verilir. Devre elemanları, birbirlerine, sahip oldukları **uç**'lar yardımı ile bağlanabilmektedir.

En basit bir devre elemanının iki ucu vardır ve bu elemana **2-uçlu devre elemanı** ya da kısaca 2-uçlu denilmektedir. Uç sayısı ikiden fazla olan bir devre elemanına da çok-uçlu eleman ya da uç sayısı  $n(n>2)$  ise,  **$n$ -uçlu** devre elemanı adı verilmektedir. En basit iki, üç ve dört uçlu devre elemanları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

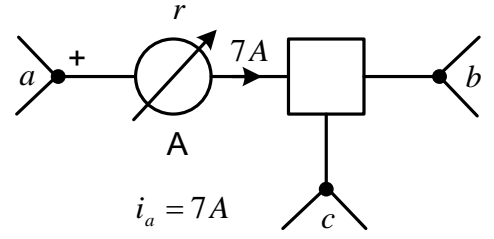
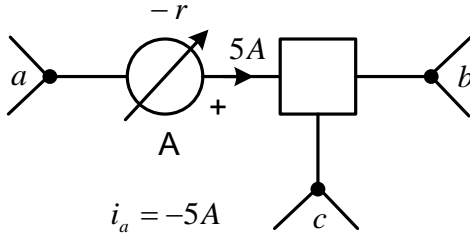


### b) Akım ve gerilim denklemlerinin işlemsel tanımları:

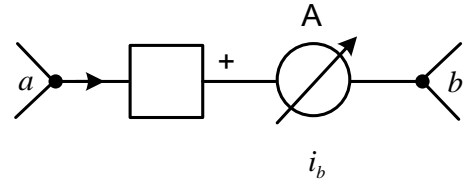
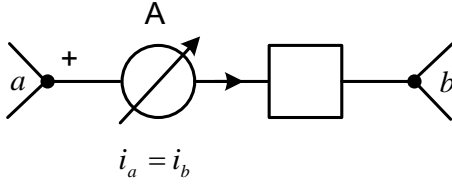
Akımın işlemsel tanımı:



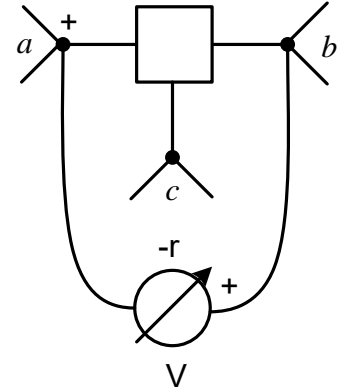
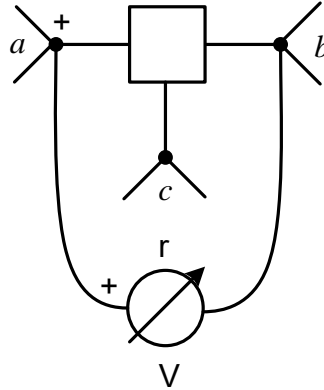
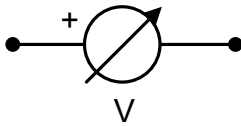
Akımlar devre elemanlarının uçlarında ölçülür. Bu durumda “a” ucuna ait akımı ölçelim. Akım ölçülecek uca önce bir referans yönü konur. Ölçü aletinin “+” ucu, seçilen akım referans yönüne bağlanmalıdır. Bu şekilde bağlanan ampermetrenin ölçtüğü değere “a” ucuna ilişkin akım denir.  $i = i(t)$  ifadesine de, akımın ani değeri denir.



$i_a(t)$  ifadesine de üç uçlunun “a” ucuna ilişkin “t” anındaki akımın ani değeri denir.



Gerilimin işlemsel tanımı: Önce gerilimi ölçülecek elemana ait bir referans yönü seçilmelidir. Ölçü aletinin “+” ucu referans seçilen uca bağlanmalıdır. Bu şekilde bağlanan voltmetrenin ölçtüğü değere “a” noktasının (ucunun) “b” noktasına (ucuna) göre gerilimi adı verilir.

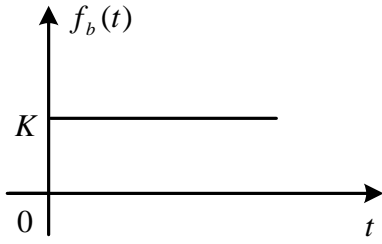


### c) Akım ve gerilim fonksiyonları:

#### 1. Basamak Fonksiyonu

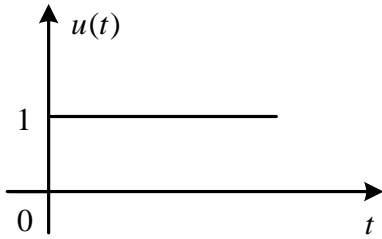
Bu fonksiyonun tanım bağıntısı aşağıdaki eşitlikle verilir ve yine aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$f_b(t) = \begin{cases} K & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



Birim basamak fonksiyonunun tanım bağıntısı da aşağıdaki eşitlikle verilir ve yine aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

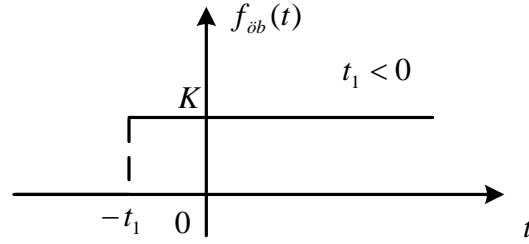
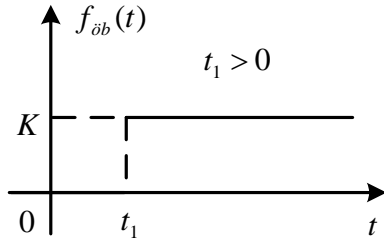


Dolayısı ile  $f_b(t) = Ku(t)$  yazabiliriz.

#### 2. Ötelenmiş Basamak Fonksiyonu

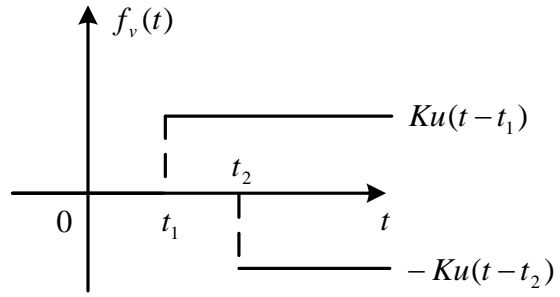
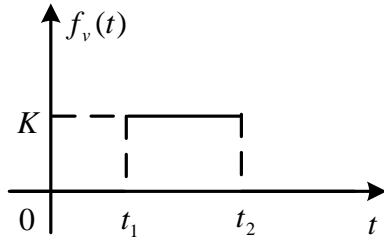
Ötelenmiş basamak fonksiyonunun tanım bağıntısı aşağıdaki gibi verilir ve yine aşağıdaki gibi gösterilir. Burada  $t_1$  negatif veya pozitif olabilir.  $f_{\text{öb}}(t) = f_b(t - t_1)$  yazılabilir. Buna göre  $t_1$  kadar ötelenmiş birim basamak fonksiyonu  $u(t - t_1)$  şeklinde verilir.

$$f_{\ddot{o}b}(t) = \begin{cases} K & t \geq t_1 \\ 0 & t < t_1 \end{cases}$$



### 3. Vuru Fonksiyonu

Vuru fonksiyonunun tanım bağıntısı aşağıdaki gibi verilir ve yine aşağıdaki gibi gösterilir.



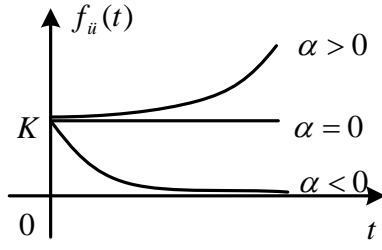
$$f_v(t) = \begin{cases} K & t \geq t_1 \text{ ve } t < t_2 \\ 0 & t < t_1 \text{ ve } t > t_2 \end{cases}$$

### 4. Üstel Fonksiyon

Üstel fonksiyonun tanım bağıntısı aşağıdaki gibi verilir ve yine aşağıdaki gibi gösterilir.

$$f_{\ddot{u}}(t) = \begin{cases} Ke^{\alpha t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

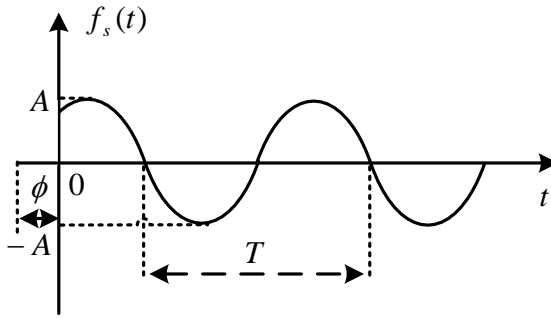
Dolayısı ile  $f_{\ddot{u}}(t) = Ke^{\alpha t} u(t)$  yazabiliriz.



## 5. Sinüzoidal Fonksiyon

Sinüzoidal fonksiyonun tanım bağıntısı aşağıdaki gibi verilir ve yine aşağıdaki gibi gösterilir.

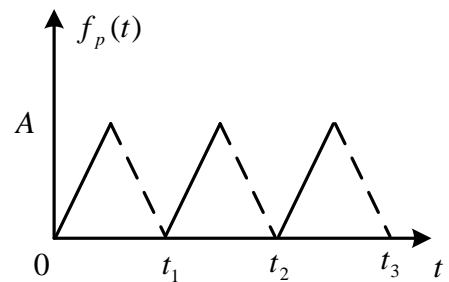
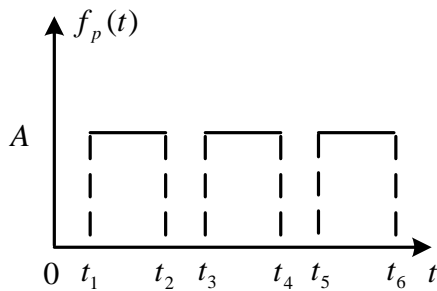
$$f_s(t) = \begin{cases} A \sin(\omega t + \phi) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



Burada  $A$  genliği,  $\omega$  açısal hızı (frekansı) [rad/sn] ve  $\phi$  başlangıç fazını [1 rad] göstermektedir. Aynı zamanda  $T = \frac{1}{f}$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  (periyot) [1 sn] ve  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  (frekans) [Hz] olduğu bilinmektedir.

## 6. Periyodik Fonksiyonlar

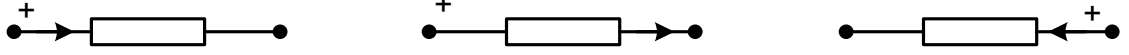
Periyodik fonksiyonların iki örneği aşağıda gösterilmektedir.



## BÖLÜM 2. DEVRE ELEMANLARI VE TANIM BAĞINTILARI

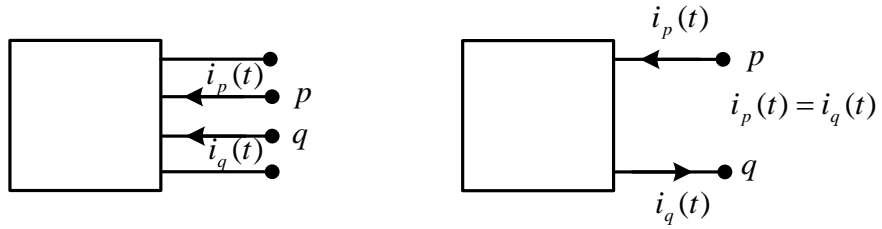
### Uyumlu referans yönleri

Gerilim kutbu ile akım oku aynı yönde (kuyruğunda) ise bunlar uyumlu referans yönleridir.



### Kapı

$i_p(t) = -i_q(t)$  ise  $(p, q)$  uç çifti bir kapıdır. Yani iki uç yalnız bir kapı oluşturur.

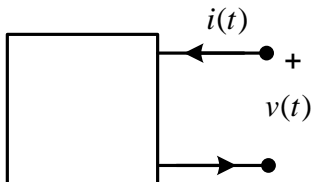


### Güç

Güç uyumlu referans yönleri için ve aynı zamanda herhangi bir kapı için tanımlanmıştır. Birimi ise Watt dır.

**1-kapılının ani gücü:** 1-kapılı elemanın ani gücü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P(t) = v(t).i(t) \text{ (Bu güç reel bir sayıdır.)}$$



$P(t) > 0$  ise tanım uyarınca bu 1-kapılı güç alıyor demektir.

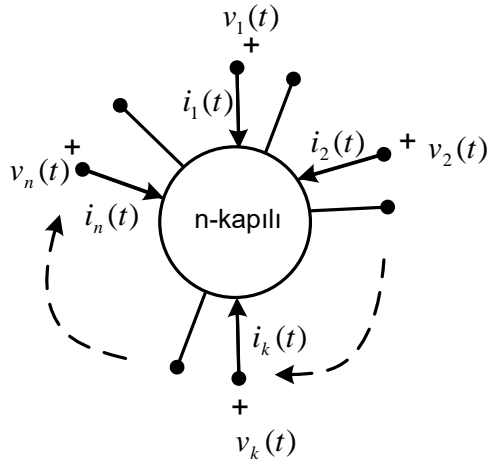
$P(t) < 0$  ise tanım uyarınca bu 1-kapılı güç veriyor demektir.

**n-kapılının ani gücü:** n-kapılı elemanın ani gücü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_k(t) = v_k(t) \cdot i_k(t)$$

$$P(t) = \sum_{k=1}^n P_k(t)$$

$$P(t) = \sum_{k=1}^n v_k(t) \cdot i_k(t)$$

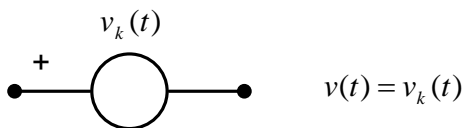


## Devre elemanları

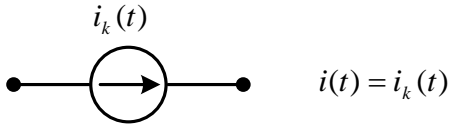
- a) 1-kapılı devre elemanı
- b) 2-kapılı devre elemanı
- c) n-kapılı devre elemanı

### 1-kapılı devre elemanları

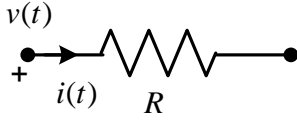
**1. Bağımsız gerilim kaynağı:** Birimi volt(1V) dur.



**2. Bağımsız akım kaynağı:** Birimi amper(1A) dir.



**3. Direnç elemanı:**  $R$  harfi ile gösterilir ve birimi 1ohm( $1\Omega$ ) dur



Direncin tanım bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$v(t) = R \cdot i(t)$$

$$i(t) = G \cdot v(t)$$

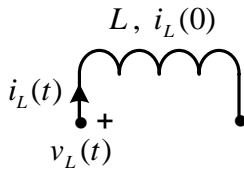
Yukarıdaki ifadelerde  $R$  direnç ve  $G$  iletkenlik olarak adlandırılır ve iletkenliğin birimi 1 mho veya 1 siemens dir. Direncin ani gücü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$p(t) = R \cdot i^2(t)$$

$$p(t) = G \cdot v^2(t)$$

Direnç elemanı pasif bir eleman olup, üzerinde güç harcar. Yani  $p(t)$  değeri daima pozitiftir.

**4. Endüktans elemanı:**  $L$  harfi ile gösterilir ve birimi 1Henry (1H) dir.



Endüktansın tanım bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

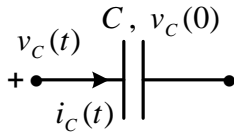
$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$



Endüktansın ani gücü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$p_L(t) = v_L(t) \cdot i_L(t) = L \cdot i_L(t) \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

**5. Kapasite elemanı:**  $C$  harfi ile gösterilir ve birimi 1Farad (1F) dir.



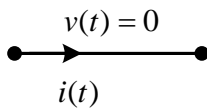
Kapasitenin tanım bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$i_C(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$$

Kapasitansın ani gücü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$p_C(t) = v_C(t) \cdot i_C(t) = C \cdot v_C(t) \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$$

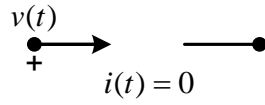
**6. Kısa-devre elemanı:**



$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = 0$$

Bu kısa devre elemanının gücü sıfırdır. Bu yüzden bağlı olduğu devreye ne enerji verir ve ne de bağlı olduğu devreden enerji alırlar.

## 7. Açık-devre elemanı:

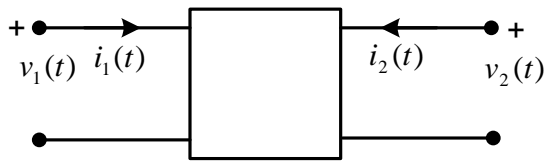


$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = 0$$

Aynı şekilde bu açık devre elemanının gücü de sıfırdır. Bu yüzden bağlı olduğu devreye ne enerji verir ve ne de bağlı olduğu devreden enerji alırlar.

## 2-kapılı devre elemanı

### 1. Bağımlı kaynak

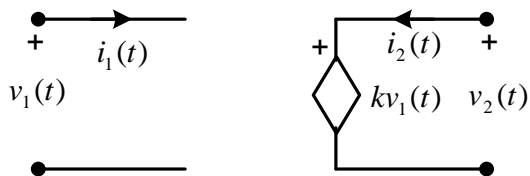


#### (a) GKGK(Gerilimle kontrol edilebilen gerilim kaynağı)

$$i_1(t) = 0$$

$$v_2(t) = k v_1(t)$$

Bu iki bağıntıyı da aynı anda gerçekliyorsa bu 2-kapılı bir GKGK dır.

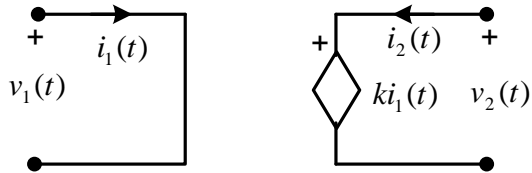


#### (b) AKGK(Akımla kontrol edilebilen gerilim kaynağı)

$$v_1(t) = 0$$

$$v_2(t) = ki_1(t)$$

Bu iki bağıntıyı da aynı anda gerçekliyorsu bu 2-kapılı bir AKGK dır.

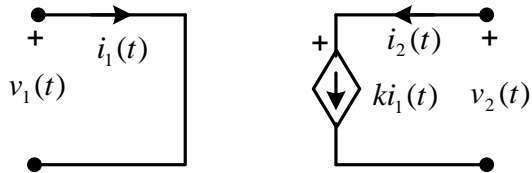


**(c) AKAK(Akım ile kontrol edilebilen akım kaynağı)**

$$v_1(t) = 0$$

$$i_2(t) = ki_1(t)$$

Bu iki bağıntıyı da aynı anda gerçekliyorsu bu 2-kapılı bir AKAK dır.

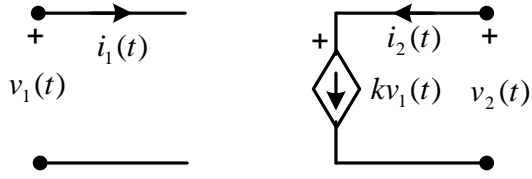


**(d) GKAK(Gerilimle kontrol edilebilen akım kaynağı)**

$$i_1(t) = 0$$

$$i_2(t) = kv_1(t)$$

Bu iki bağıntıyı da aynı anda gerçekliyorsu bu 2-kapılı bir GKAK dır.



$$p(t) = \underbrace{p_1(t)}_0 + p_2(t)$$

$$p_2(t) = v_2(t) \cdot i_2(t) = kv_2(t) \cdot i_1(t) \text{ (AKAK için)}$$

Önemli not: Bu güç değeri pozitif de olabilir, negatif de olabilir.

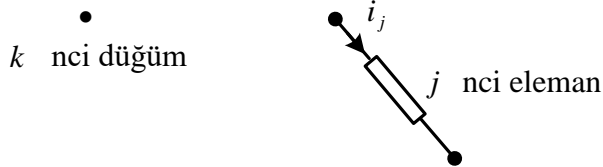
Aşağıda en çok kullanılan diğer iki kapılı devre elemanları listelenmiştir.

- Transformatör
- İdeal negatif gerilim çevirici
- İdeal negatif akım çevirici
- Pasif jirator
- Aktif jirator
- İşlemsel kuvvetlendirici
- Diferansiyel girişli işlemsel kuvvetlendirici

## BÖLÜM 3. DEVRE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

### 3.1. Kirchoff'un Düğümmler İçin Akım Denklemleri

$$\sum_{j=1}^{n_e} a_{kj} \cdot i_j = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n_d$$



$$a_{kj} = \begin{cases} 0 \\ +1 \\ -1 \end{cases}$$

$j$  nci eleman  $k$  ncı düğüme bağlı değil ise,  $a_{kj} = 0$

$j$  nci eleman  $k$  ncı düğüme bağlı ve akım yönü düğümden dışarı doğru ise,  $a_{kj} = +1$

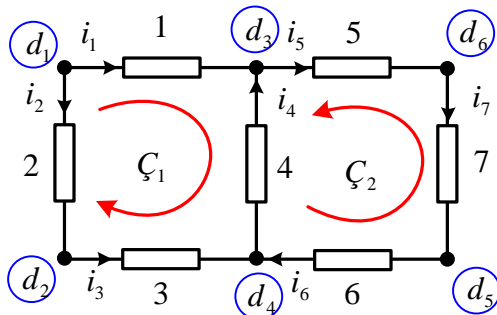
$j$  nci eleman  $k$  ncı düğüme bağlı ve akım yönü düğüme doğru ise,  $a_{kj} = -1$

$$A_b \cdot I_e(t) = \Theta$$

$$A_b = [a_{kj}]_{n_d \times n_e}$$

$$I_e(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ \vdots \\ i_{n_e}(t) \end{bmatrix}_{n_e \times 1}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{n_d \times 1}$$

**Örnek:**



$$d_1 : i_1 + i_2 = 0$$

$$d_2 : -i_2 + i_3 = 0$$

$$d_3 : i_5 - i_1 - i_4 = 0$$

$$d_4 : i_4 - i_3 - i_6 = 0$$

$$d_5 : -i_7 + i_6 = 0$$

$$d_6 : i_7 - i_5 = 0$$

### 3.2. Kirchoff'un Gerilim Denklemleri

$$\sum_{j=1}^{n_e} b_{kj} \cdot v_j = 0, \quad k = 1, 2, 3, \dots, n_\zeta \quad b_{kj} = \begin{cases} 0 \\ +1 \\ -1 \end{cases}$$

$j$  nci eleman  $\zeta$  nci çevreye girmiyorsa,  $b_{kj} = 0$

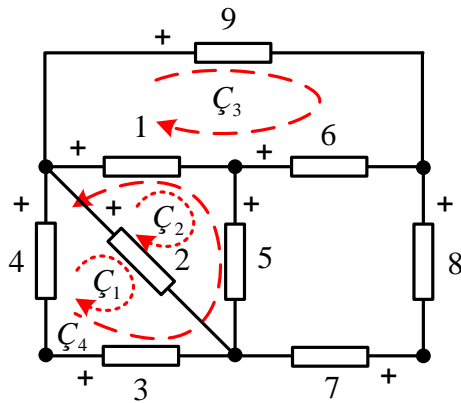
$j$  nci eleman  $\zeta$  nci çevreye giriyor ve eleman gerilim referans yönü çevre yönünde ise,  $b_{kj} = +1$

$j$  nci eleman  $\zeta$  nci çevreye giriyor ve eleman gerilim referans yönü çevre yönünün tersinde ise,  $b_{kj} = -1$

$$B_b \cdot V_e(t) = \Theta$$

$$B_b = [b_{kj}]_{n_\zeta \times n_e}$$

$$V_e(t) = \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_{n_e}(t) \end{bmatrix}_{n_e \times 1}, \quad \Theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{n_\zeta \times 1}$$



$$C_1 : v_2 - v_3 - v_4 = 0$$

$$C_2 : v_1 - v_2 + v_5 = 0$$

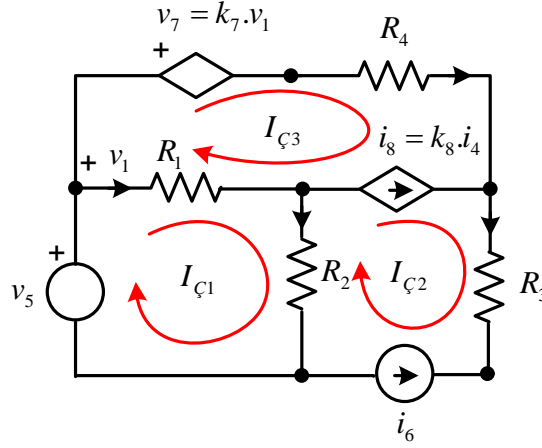
$$C_4 : -v_1 + v_3 + v_4 - v_5 = 0$$

$$C_1 + C_2 : v_1 - v_3 - v_4 + v_5 = 0$$

$$C_1 + C_2 = -C_4$$

### 3.3. Bağımsız çevrelere ilişkin çevre denklemleri

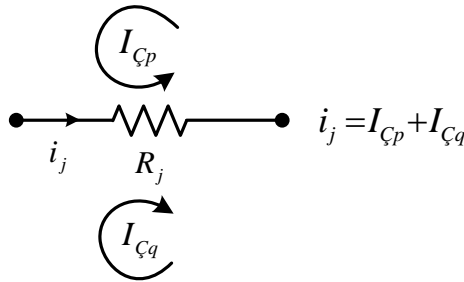
**Örnek:** Aşağıdaki devrenin çevre denklemlerini bağımsız çevreler için adım adım yazınız.



1. Bağımsız çevrelere ilişkin çevre denklemleri ve ardından direnç elemanlarının gerilimleri yerine tanım bağıntıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
 v_1 + v_2 - v_5 &= 0 & \Rightarrow & R_1 \cdot i_1 + R_2 \cdot i_2 - v_5 = 0 \\
 -v_2 + v_3 - v_6 + v_8 &= 0 & \Rightarrow & -R_2 \cdot i_2 + R_3 \cdot i_3 - v_6 + v_8 = 0 \\
 -v_1 + v_4 - v_8 + v_7 &= 0 & \Rightarrow & -R_1 \cdot i_1 + R_4 \cdot i_4 - v_8 + v_7 = 0
 \end{aligned}$$

**Açıklama:** Herhangi bir devre elemanının (direnç, endüktans, kapasite, bağımlı ve bağımsız gerilim ve akım kaynağı v.b) akımı, çevre akımları cinsinden, çevre akımlarının yönleri esas alınmak suretiyle, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi ifade edilir.



2. Daha sonra, direnç elemanının akımları çevre akımları cinsinden ifade edilir ve hemen ardından çevre akımları parantezine alındıklarında denklemler aşağıdaki hale gelir.

$$\begin{aligned}
R_1 \cdot (I_{\zeta 1} - I_{\zeta 3}) + R_2 \cdot (I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2}) &= v_5 \quad \Rightarrow \quad (R_1 + R_2) \cdot I_{\zeta 1} - R_2 \cdot I_{\zeta 2} - R_1 \cdot I_{\zeta 3} = v_5 \\
-R_2 \cdot (I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2}) + R_3 \cdot I_{\zeta 2} &= v_6 - v_8 \quad \Rightarrow \quad -R_2 \cdot I_{\zeta 1} + (R_2 + R_3) \cdot I_{\zeta 2} + 0 \cdot I_{\zeta 3} = v_6 - v_8 \\
-R_1 \cdot (I_{\zeta 1} - I_{\zeta 3}) + R_4 \cdot I_{\zeta 3} &= v_8 - v_7 \quad \Rightarrow \quad -R_1 \cdot I_{\zeta 1} + 0 \cdot I_{\zeta 2} + (R_1 + R_4) \cdot I_{\zeta 3} = v_8 - v_7
\end{aligned}$$

Sonuçta elde edilen denklemleri matrisel forma sokacak olursak aşağıdaki sonuca ulaşırız.

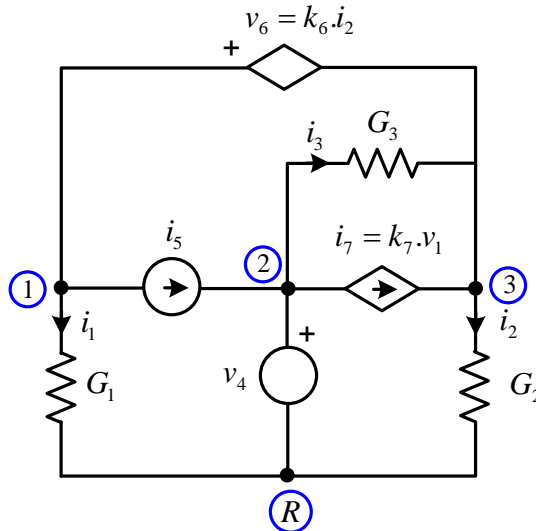
$$\begin{bmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 & -R_1 \\ -R_2 & R_2 + R_3 & 0 \\ -R_1 & 0 & R_1 + R_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\zeta 1} \\ I_{\zeta 2} \\ I_{\zeta 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_5 \\ v_6 - v_8 \\ v_8 - v_7 \end{bmatrix}$$

Burada üç adet bağımsız denkleme sahibiz. Bununla birlikte  $I_{\zeta 1}$ ,  $I_{\zeta 2}$ ,  $I_{\zeta 3}$ ,  $v_6$ ,  $v_7$  ve  $v_8$  bilinmiyor. Yani altı (6) adet bilinmeyenimiz var. Bu nedenle üç (3) adet ek denkleme daha ihtiyaç duyarız. Bu ek denklemler aşağıda verilmiştir.

1.  $v_5$  bilinen bir fonksiyondur.
2.  $i_6 = i_k(t) = -I_{\zeta 2}$  olur. Bu nedenle  $I_{\zeta 2}$  artık biliniyor demektir.
3.  $v_7 = k_7 \cdot v_1 = k_7 \cdot R_1 \cdot i_1 = k_7 \cdot R_1 \cdot (I_{\zeta 1} - I_{\zeta 3})$
4.  $i_8 = k_8 \cdot i_4 \Rightarrow I_{\zeta 2} - I_{\zeta 3} = k_8 \cdot I_{\zeta 3} \Rightarrow I_{\zeta 2} = (1 + k_8) \cdot I_{\zeta 3}$

### 3.4. Düğüm Denklemleri

Örnek: Aşağıdaki devrenin düğüm denklemlerini bağımsız düğümler için adım adım yazınız.

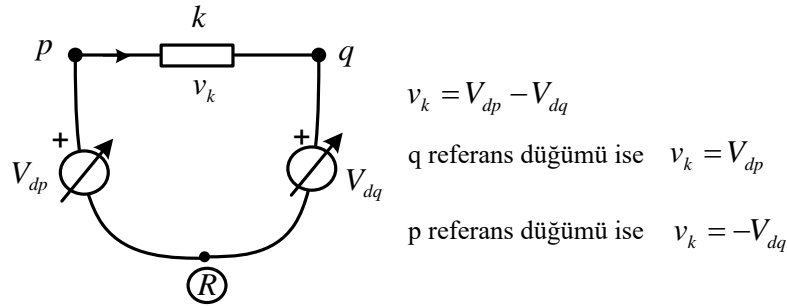




1. Bağımsız düğümlere ilişkin düğüm denklemleri ve ardından direnç elemanlarının akımları yerine tanım bağıntıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} i_1 + i_5 + i_6 = 0 & \Rightarrow G_1.v_1 = -i_5 - i_6 \\ -i_5 + i_4 + i_3 + i_7 = 0 & \Rightarrow G_3.v_3 = i_5 - i_4 - i_7 \\ i_2 - i_3 - i_6 - i_7 = 0 & \Rightarrow G_2.v_2 - G_3.v_3 = i_6 + i_7 \end{aligned}$$

**Açıklama:** Herhangi bir devre elemanının (direnç, endüktans, kapasite, bağımlı ve bağımsız gerilim ve akım kaynağı v.b) gerilimi, düğüm gerilimleri cinsinden, eleman akımlarının yönleri esas alınmak suretiyle, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi ifade edilir.



2. Daha sonra, direnç elemanının gerilimleri düğüm gerilimleri cinsinden ifade edilir ve hemen ardından düğüm gerilimleri parantezine alındıklarında denklemler aşağıdaki hale gelir.

$$\begin{aligned} G_1.V_{d1} = -i_5 - i_6 & \Rightarrow G_1.V_{d1} + 0.V_{d2} + 0.V_{d3} = -i_5 - i_6 \\ G_3.V_{d2} - G_3.V_{d3} = i_5 - i_4 - i_7 & \Rightarrow 0.V_{d1} + G_3.V_{d2} - G_3.V_{d3} = i_5 - i_4 - i_7 \\ G_2.V_{d3} - G_3.V_{d2} + G_3.V_{d3} = i_6 + i_7 & \Rightarrow 0.V_{d1} - G_3.V_{d2} + (G_2 + G_3).V_{d3} = i_6 + i_7 \end{aligned}$$

Sonuçta elde edilen denklemleri matrisel forma sokacak olursak aşağıdaki sonuca ulaşırız.

$$\begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ 0 & G_3 & -G_3 \\ 0 & -G_3 & G_2 + G_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \\ V_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_5 - i_6 \\ i_5 - i_4 - i_7 \\ i_6 + i_7 \end{bmatrix}$$

### 3. Ek denklemler

1.  $i_7 = k_7.v_1 = k_7.V_{d1}$  bilinir hale gelir.

2.  $V_{d2} = v_4$  bilinir hale gelir.

3.  $v_6 = k_6 \cdot i_2 \Rightarrow V_{d1} - V_{d3} = k_6 \cdot G_2 \cdot v_2 \Rightarrow V_{d1} - V_{d3} = k_6 \cdot G_2 \cdot V_{d3} \Rightarrow V_{d1} = (1 + k_6 \cdot G_2) \cdot V_{d3}$

#### 4. Bilinmeyenler

1.  $i_6$

2.  $V_{d3}$

3.  $i_4$

#### 5. Bilinenler

$$V_{d2} = v_4$$

$$i_7 = k_7 \cdot v_1 = k_7 \cdot V_{d1}$$

$$v_6 = k_6 \cdot i_2 \Rightarrow V_{d1} - V_{d3} = k_6 \cdot G_2 \cdot v_2 \Rightarrow V_{d1} - V_{d3} = k_6 \cdot G_2 \cdot V_{d3} \Rightarrow V_{d1} = (1 + k_6 \cdot G_2) \cdot V_{d3}$$

### 3.5. Tellegen teorisi

$$\sum_{k=1}^{n_e} p_k(t) = \sum_{k=1}^{n_e} v_k(t) \cdot i_k(t) = 0$$

Yani devredeki elemanlarda harcanan gücün toplamının  $\sum_{k=1}^{n_e} p_k(t) = 0$  olduğu görülür.

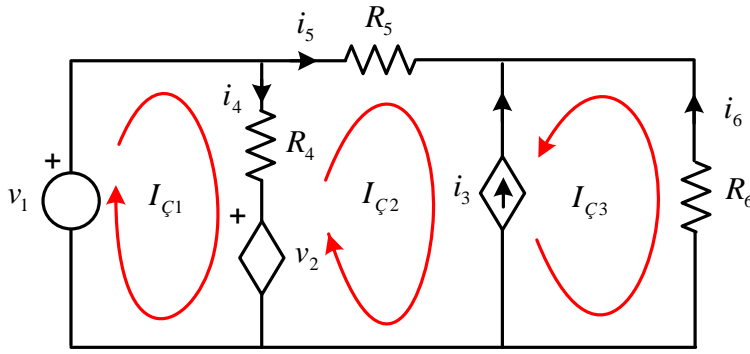
**Örnek 1.** Aşağıdaki devrenin;

a.) Çevre denklemlerini adım adım çıkarınız.

b.) Bu denklemleri çözerek çevre akımlarını bulunuz.

c.) Çevre akımlarından yararlanarak eleman akım ve gerilimlerini bulunuz.

d.) Tellegen teoreminin yani  $\sum_{i=1}^{n_e=6} p_i(t) = 0$  ifadesinin sağlandığını gösteriniz.



$$v_1 = 2 \text{ Volt}$$

$$v_2 = \mu \cdot v_6$$

$$i_3 = \beta \cdot i_4$$

$$\mu = 2$$

$$\beta = 10$$

$$R_4 = 5 \Omega$$

$$R_5 = 4 \Omega$$

$$R_6 = 1 \Omega$$

a.) Her üç çevreye ait çevre denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-v_1 + v_4 + v_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad -v_1 + R_4 \cdot i_4 + v_2 = 0$$

$$-v_2 - v_4 + v_5 - v_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad -v_2 - R_4 \cdot i_4 + R_5 \cdot i_5 - v_3 = 0$$

$$v_6 - v_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad R_6 \cdot i_6 - v_3 = 0$$

Direnç elemanlarının akımları çevre akımları cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$i_4 = I_{\text{Ç1}} - I_{\text{Ç2}}$$

$$i_5 = I_{\text{Ç2}}$$

$$i_6 = I_{\text{Ç3}}$$

Çevre akımları cinsinden yazılan bu eleman akımları, yukarıdaki çevre denklemlerinde yerine konacak ve matrisel bir biçime sokulacak olursa aşağıdaki sonuca gelinir.

$$-v_1 + R_4 \cdot (I_{\text{Ç1}} - I_{\text{Ç2}}) + v_2 = 0$$

$$-v_2 - R_4 \cdot (I_{\text{Ç1}} - I_{\text{Ç2}}) + R_5 \cdot I_{\text{Ç2}} - v_3 = 0$$

$$R_6 \cdot I_{\text{Ç3}} - v_3 = 0$$

$$\begin{bmatrix} R_4 & -R_4 & 0 \\ -R_4 & R_4 + R_5 & 0 \\ 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\text{Ç1}} \\ I_{\text{Ç2}} \\ I_{\text{Ç3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 - v_2 \\ v_2 + v_3 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

$$i_3 = \beta \cdot i_4 \quad \Rightarrow \quad -(I_{\text{Ç2}} + I_{\text{Ç3}}) = \beta \cdot (I_{\text{Ç1}} - I_{\text{Ç2}}) \quad \Rightarrow \quad I_{\text{Ç3}} = -10 \cdot I_{\text{Ç1}} + 9 \cdot I_{\text{Ç2}}$$

ve

$$v_2 = \mu \cdot v_6 = \mu \cdot R_6 \cdot i_6 = \mu \cdot R_6 \cdot I_{\text{Ç3}} = 2 \cdot I_{\text{Ç3}} = -20 \cdot I_{\text{Ç1}} + 18 \cdot I_{\text{Ç2}}$$

Bu ifadeleri ve eleman değerlerini çevre denklemlerinde yerine yazmak ve matrisel bir biçime sokmak suretiyle aşağıdaki sonuçlara gelinir.

$$\begin{aligned}
-2 + 5.(I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2}) - 20.I_{\zeta 1} + 18.I_{\zeta 2} &= 0 \\
20.I_{\zeta 1} - 18.I_{\zeta 2} - 5.(I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2}) + 4.I_{\zeta 2} - v_3 &= 0 \\
-10.I_{\zeta 1} + 9.I_{\zeta 2} - v_3 &= 0
\end{aligned}
\quad
\begin{bmatrix} -15 & 13 & 0 \\ 15 & -9 & -1 \\ -10 & 9 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\zeta 1} \\ I_{\zeta 2} \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki denklem takımından görüleceği üzere artık elimizde üç bilinmeyen ve üç denklem vardır. Bu denklem takımı çözülmek suretiyle  $I_{\zeta 1}$  ve  $I_{\zeta 2}$  çevre akımları ile  $v_3$  akıma bağımlı akım kaynağının gerilimi aşağıdaki gibi bulunur.

$$I_{\zeta 1} = 0.655 \text{ Amper}$$

$$I_{\zeta 2} = 0.909 \text{ Amper}$$

$$v_3 = 1.636 \text{ Volt}$$

Bu değerlerden faydalanmak suretiyle,  $I_{\zeta 3} = -10.I_{\zeta 1} + 9.I_{\zeta 2} = -10 \times 0.655 + 9 \times 0.909$

$$I_{\zeta 3} = 1.636 \text{ Amper olarak bulunur.}$$

d.) Eleman akım ve gerilimleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$i_1 = -I_{\zeta 1} = -0.655 \text{ Amper}$$

$$v_1 = 2 \text{ Volt}$$

$$i_2 = I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2} = 0.655 - 0.909 = -0.254 \text{ Amper}$$

$$v_2 = -20.I_{\zeta 1} + 18.I_{\zeta 2} = -20 \times 0.655 + 18 \times 0.909 = -3.272 \text{ Volt}$$

$$i_3 = 10.(I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2}) = 10.(0.655 - 0.909) = -2.545 \text{ Amper}$$

$$v_3 = 1.636 \text{ Volt}$$

$$i_4 = I_{\zeta 1} - I_{\zeta 2} = 0.655 - 0.909 = -0.254 \text{ Amper}$$

$$v_4 = R_4.i_4 = 5 \times (-0.254) = -1.27 \text{ Volt}$$

$$i_5 = I_{\zeta 2} = 0.909 \text{ Amper}$$

$$v_5 = R_5.i_5 = 4 \times (0.909) = 3.636 \text{ Volt}$$

$$i_6 = I_{\zeta 3} = 1.636 \text{ Amper}$$

$$v_6 = R_6 \cdot i_6 = 1 \times (1.636) = 1.636 \text{ Volt}$$

e.) Aşağıdaki tabloya bakarak Tellegen teoremini sağlandığını gösterebiliriz.

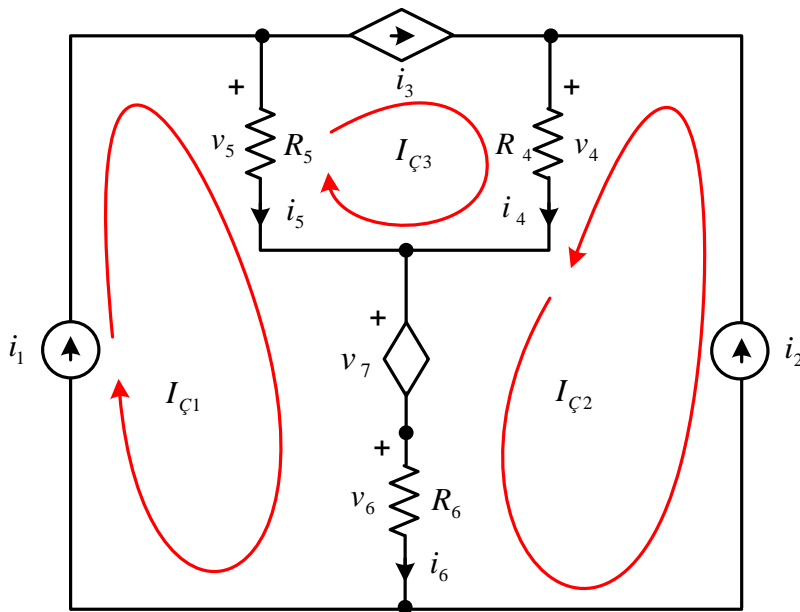
| Eleman        | $i$ (Amper) | $v$ (Volt) | $p$ (Watt)    |
|---------------|-------------|------------|---------------|
| 1             | -0.655      | 2          | -1.31         |
| 2             | -0.254      | 3.272      | -0.83         |
| 3             | -2.545      | 1.636      | -4.163        |
| 4             | -0.254      | -1.27      | 0.323         |
| 5             | 0.909       | 3.636      | 3.305         |
| 6             | 1.636       | 1.636      | 2.676         |
| <b>Toplam</b> |             |            | <b>0.0014</b> |

**Ödev:**

Aşağıdaki devrenin;

a.) Çevre ve ek denklemlerini yazınız ve matrissel bir biçime sokunuz.

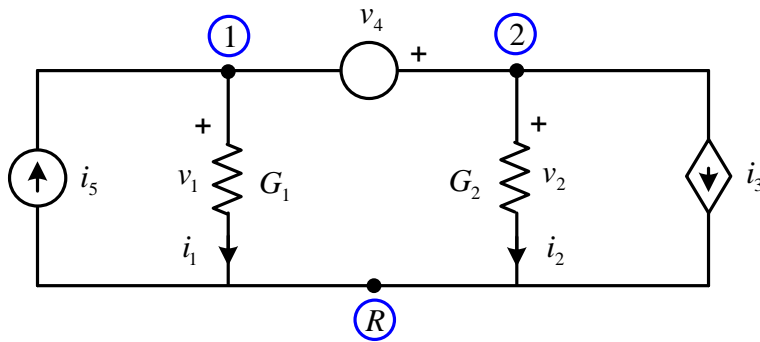
b.)  $v_7$  bağımlı gerilim kaynağına ilişkin  $p_7$  ani gücünü hesaplayınız.



$$\begin{aligned} v_7 &= 3.v_4 \\ i_3 &= 2.i_6 \\ i_1 &= 10 \text{ Amper} \\ i_2 &= 20 \text{ Amper} \\ R_4 &= R_5 = 1 \Omega \\ R_6 &= 3 \Omega \end{aligned}$$

**Örnek 2.** Aşağıdaki devrenin;

- Düğüm denklemlerini adım adım yazınız.
- Bu denklemleri çözerek düğüm gerilimlerini bulunuz.
- Eleman akım ve gerilimlerini bulunuz.
- Tellegen teoreminin yani  $\sum_{i=1}^{n_e=5} p_i(t) = 0$  ifadesinin sağlandığını gösteriniz.



$$\begin{aligned} v_4 &= 6 \text{ Volt} \\ i_5 &= 5 \text{ Amper} \\ i_3 &= \frac{1}{2} \cdot v_1 \\ R_1 &= 2 \Omega \\ R_2 &= 4 \Omega \end{aligned}$$

a.)  $(n_d - 1)$  adet düğüm denklemi ve ardından devredeki dirençlerin yerine tanım bağıntıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} -i_5 + i_1 - i_4 &= 0 \quad \Rightarrow \quad -i_5 + G_1 \cdot v_1 - i_4 = 0 \\ i_4 + i_2 + i_3 &= 0 \quad \Rightarrow \quad i_4 + G_2 \cdot v_2 + 0.5 \times v_1 = 0 \end{aligned}$$

Daha sonra eleman gerilimleri düğüm gerilimleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} -5 + \frac{1}{2} \cdot V_{d1} - i_4 &= 0 \\ i_4 + \frac{1}{4} \cdot V_{d2} + \frac{1}{2} \cdot V_{d1} &= 0 \end{aligned}$$

Daha sonra ek denklemler aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} V_{d2} - V_{d1} &= v_4 = 6 \text{ Volt} \\ V_{d2} &= V_{d1} + 6 \end{aligned}$$

Bu ek denklemleri yukarıda yerine koyacak olursak aşağıdaki ifadeye gelinir.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot V_{d1} - i_4 &= 5 \\ i_4 + \frac{1}{4} \cdot (V_{d1} + 6) + \frac{1}{2} \cdot V_{d1} &= 0 \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{3}{4} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{d1} \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ -\frac{3}{2} \end{bmatrix}$$

b.) Yukarıdaki denklemler çözülmek suretiyle düğüm gerilimleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{d1} = \frac{14}{5} \text{ Volt}$$

$$V_{d2} = V_{d1} + 6 = \frac{14}{5} + 6 = \frac{44}{5} \text{ Volt}$$

c.) Bu ifadelerden faydalanmak suretiyle eleman akım ve gerilimleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$v_1 = V_{d1} = \frac{14}{5} \text{ Volt}$$

$$i_1 = G_1 \cdot V_{d1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{14}{5} = \frac{14}{10} \text{ Amper}$$

$$v_2 = V_{d2} = \frac{44}{5} \text{ Volt}$$

$$i_2 = G_2 \cdot V_{d2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{44}{5} = \frac{44}{20} = \frac{11}{5} \text{ Amper}$$

$$v_3 = V_{d2} = \frac{44}{5} \text{ Volt}$$

$$i_3 = \frac{1}{2} \cdot v_1 = \frac{1}{2} \cdot V_{d1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{14}{5} = \frac{14}{10} = \frac{7}{5} \text{ Amper}$$

$$v_4 = 6 \text{ Volt}$$

$$i_4 = \frac{1}{2} \cdot V_{d1} - 5 = \frac{1}{2} \cdot \frac{14}{5} - 5 = -\frac{36}{10} = -\frac{18}{5} \text{ Amper}$$

$$v_5 = -V_{d1} = -\frac{14}{5} \text{ Volt}$$

$$i_5 = 5 \text{ Amper}$$

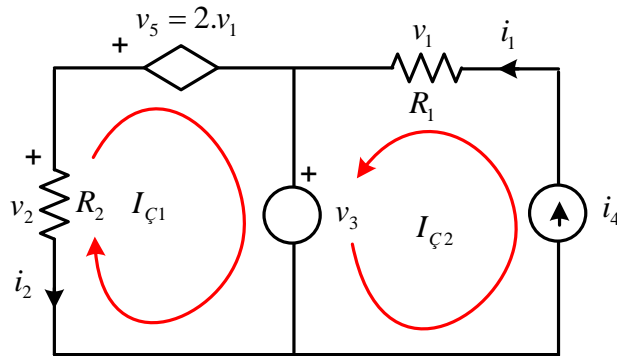
d.)

| Eleman        | $v$ (Volt) | $i$ (Amper) | $p$ (Watt) |
|---------------|------------|-------------|------------|
| 1             | $14/5$     | $7/5$       | $98/25$    |
| 2             | $44/5$     | $11/5$      | $484/25$   |
| 3             | $44/5$     | $7/5$       | $308/25$   |
| 4             | 6          | $-18/5$     | $-108/5$   |
| 5             | $-14/5$    | 5           | -14        |
| <b>Toplam</b> |            |             | <b>0</b>   |

**Örnek 3.** Aşağıdaki devrenin;

a.) Çevre denklemlerini yazınız.

b.) Ek denklemleri yazarak eleman akım ve gerilimlerini bulunuz.



$$\begin{aligned}
 v_3 &= 5 \text{ Volt} \\
 i_4 &= 3 \text{ Amper} \\
 R_1 &= 1 \Omega \\
 R_2 &= 2 \Omega
 \end{aligned}$$

a.) Çevre denklemlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\begin{aligned}
 v_5 + v_3 - v_2 &= 0 & v_5 + v_3 - R_2 \cdot i_2 &= 0 \\
 v_1 + v_3 + v_4 &= 0 & R_1 \cdot i_1 + v_3 + v_4 &= 0
 \end{aligned}$$

Direnç elemanlarının akımları çevre akımları cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$i_2 = -I_{C1}$$

$$i_1 = I_{C2}$$

Çevre akımları cinsinden yazılan bu eleman akımları, yukarıdaki çevre denklemlerinde yerine konacak ve matrisel bir biçime sokulacak olursa aşağıdaki sonuca gelinir.



$$\begin{bmatrix} R_2 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\zeta 1} \\ I_{\zeta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_3 - v_5 \\ -v_3 - v_4 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\zeta 1} \\ I_{\zeta 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 - v_5 \\ -5 - v_4 \end{bmatrix}$$

Ayrıca ek denklemleri de aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$v_5 = 2.v_1 = 2.R_1.i_1 = 2.R_1.I_{\zeta 2} = 2 \times 1 \times 3 = 6 \text{ Volt}$$

$$I_{\zeta 2} = i_4 = 3 \text{ Amper}$$

b.) Daha sonra bu ek denklemleri matrissel formda yerine koyup bilinmeyenleri çözecek olursak aşağıdaki sonuca geliriz.

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\zeta 1} \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 - 6 \\ -5 - v_4 \end{bmatrix}$$

$$I_{\zeta 1} = -5.5 \text{ Amper}$$

$$v_4 = -8 \text{ Volt}$$

$$i_1 = i_4 = I_{\zeta 2} = 3 \text{ Amper}$$

$$v_1 = R_1.i_1 = R_1.I_{\zeta 2} = 1 \times 3 = 3 \text{ Volt}$$

$$i_2 = -I_{\zeta 1} = 5.5 \text{ Amper}$$

$$v_2 = R_2.i_2 = R_2.(-I_{\zeta 1}) = 2 \times 5.5 = 11 \text{ Volt}$$

$$i_3 = I_{\zeta 1} + I_{\zeta 2} = -5.5 + 3 = -2.5 \text{ Amper}$$

$$v_3 = 5 \text{ Volt}$$

$$i_4 = 3 \text{ Amper}$$

$$v_4 = -8 \text{ Volt}$$

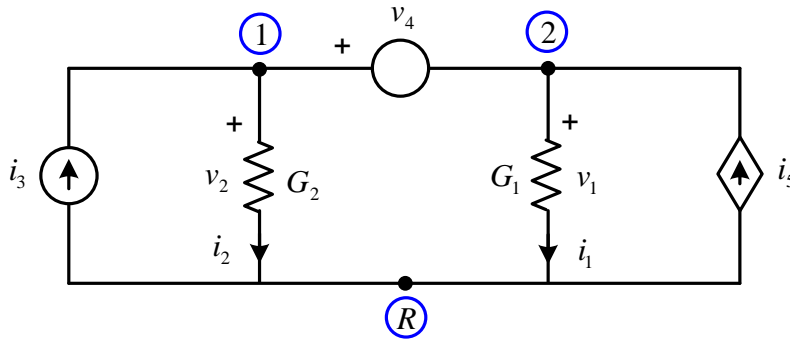
$$i_5 = I_{\zeta 1} = -5.5 \text{ Amper}$$

$$v_5 = 2.v_1 = 2 \times 3 = 6 \text{ Volt}$$

| Eleman        | $i$ (Amper) | $v$ (Volt) | $p$ (Watt) |
|---------------|-------------|------------|------------|
| 1             | 3           | 3          | 9          |
| 2             | 5.5         | 11         | 60.5       |
| 3             | -2.5        | 5          | -12.5      |
| 4             | 3           | -8         | -24        |
| 5             | -5.5        | 6          | -33        |
| <b>Toplam</b> |             |            | <b>0</b>   |

**Örnek 4.** Aşağıdaki devrenin;

- Düğüm denklemlerini yazınız.
- Ek denklemleri de yazarak düğüm gerilimlerini bulunuz.
- $i_5$  bağımlı akım kaynağının  $p_5$  anı gücünü bulunuz.



$$\begin{aligned}
 v_4 &= 2 \text{ Volt} \\
 i_3 &= 3 \text{ Amper} \\
 i_5 &= 4i_2 \\
 R_1 &= R_2 = 1 \Omega
 \end{aligned}$$

a.)  $(n_d - 1)$  adet düğüm denklemi ve ardından devredeki dirençlerin yerine tanım bağıntıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
 -i_3 + i_2 + i_4 &= 0 & -i_3 + G_2 \cdot v_2 + i_4 &= 0 \\
 -i_4 + i_1 - i_5 &= 0 & -i_4 + G_1 \cdot v_1 - i_5 &= 0
 \end{aligned}$$

Daha sonra eleman gerilimleri düğüm gerilimleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 v_2 &= V_{d1} \\
 v_1 &= V_{d2}
 \end{aligned}$$

Düğüm gerilimleri cinsinden yazılan bu eleman gerilimleri, yukarıdaki düğüm denklemlerinde yerine konacak ve matrisel bir biçime sokulacak olursa aşağıdaki sonuca gelinir.

$$\begin{bmatrix} G_2 & 0 \\ 0 & G_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_3 - i_4 \\ i_4 + i_5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 - i_4 \\ i_4 + i_5 \end{bmatrix}$$

b.) Ayrıca ek denklemleri de yazarak  $V_{d1}$  ve  $V_{d2}$  düğüm gerilimleri ile  $i_4$  bağımsız gerilim kaynağının akımını aşağıdaki gibi bulabiliriz.

$$v_4 = V_{d1} - V_{d2} = 2 \Rightarrow V_{d1} = 2 + V_{d2}$$

$$i_2 = G_2 \cdot v_2 = G_2 \cdot V_{d1} = 1 \times V_{d1} = V_{d1}$$

$$i_5 = 4 \cdot i_2 = 4 \cdot V_{d1} = 4 \cdot (2 + V_{d2})$$

$$V_{d2} = -4.5 \text{ Volt}$$

$$V_{d1} = -2.5 \text{ Volt}$$

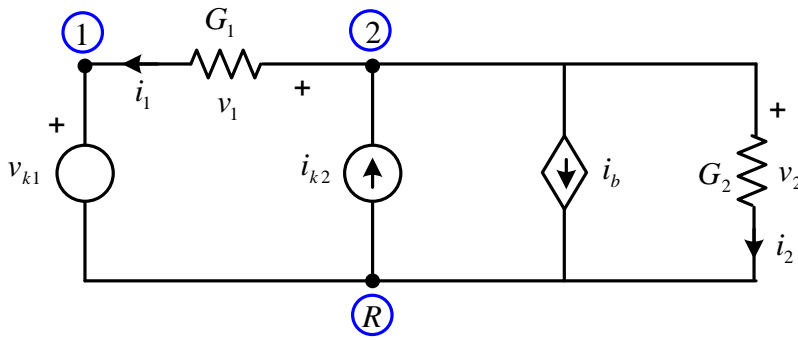
$$i_4 = 5.5 \text{ Amper}$$

c.)  $i_5$  bağımlı akım kaynağının  $p_5$  ani gücü aşağıdaki gibi bulunur.

$$p_5 = v_5 \cdot i_5 = (-V_{d2}) \cdot 4 \cdot i_2 = (-V_{d2}) \cdot 4 \cdot V_{d1} = (4.5) \times 4 \times (-2.5) = -45 \text{ Watt}$$

**Örnek 5.** Aşağıdaki devrenin;

- Düğüm denklemlerini yazınız.
- Ek denklemleri de yazarak düğüm gerilimlerini bulunuz.
- $i_{k2}$  bağımsız akım kaynağının  $p_{k2}$  ani gücünü bulunuz.



$$v_{k1} = 1 \text{ Volt}$$

$$i_{k2} = 2 \text{ Amper}$$

$$i_b = 4.i_1$$

$$R_1 = 5 \Omega$$

$$R_2 = 1 \Omega$$

a.)  $(n_d - 1)$  adet düğüm denklemi ve ardından devredeki dirençlerin yerine tanım bağıntıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$i_{k1} - i_1 = 0$$

$$i_{k1} - G_1.v_1 = 0$$

$$i_1 - i_{k2} + i_b - i_2 = 0$$

$$G_1.v_1 - i_{k2} + i_b - G_2.v_2 = 0$$

Daha sonra eleman gerilimleri düğüm gerilimleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$v_1 = V_{d2} - V_{d1}$$

$$v_2 = V_{d2}$$

Düğüm gerilimleri cinsinden yazılan bu eleman gerilimleri, yukarıdaki düğüm denklemlerinde yerine konacak ve matrisel bir biçime sokulacak olursa aşağıdaki sonuca gelinir.

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_1 \\ -G_1 & G_1 + G_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{k1} \\ i_{k2} - i_b \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{5} & -\frac{1}{5} \\ -\frac{1}{5} & \frac{1}{5} + 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{k1} \\ 2 - 4.i_1 \end{bmatrix}$$

b.) Ek denklemler de yazılarak  $V_{d2}$  düğüm gerilimi ve  $i_{k1}$  bağımsız gerilim kaynağının akımı aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$v_1 = V_{d2} - V_{d1}$$

$$V_{d1} = v_{k1} = 1 \text{ Volt}$$

$$i_1 = G_1.v_1 = G_1.(V_{d2} - V_{d1}) = \frac{1}{5} \times (V_{d2} - V_{d1}) = \frac{1}{5} \times (V_{d2} - 1)$$

$$i_b = 4.i_1 = \frac{4}{5} \times (V_{d2} - 1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{5} & -\frac{1}{5} \\ -\frac{1}{5} & \frac{1}{5}+1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ V_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{k1} \\ 2-\frac{4}{5} \times (V_{d2}-1) \end{bmatrix}$$

$$V_{d2} = 1.5 \text{ Volt}$$

$$i_{k1} = 0.1 \text{ Amper}$$

c.)  $i_{k2}$  bağımsız akım kaynağının  $p_{k2}$  ani gücü aşağıdaki gibi bulunur.

$$p_{k2} = v_{k2} \cdot i_{k2} = (-V_{d2}) \cdot i_{k2} = (-1.5) \times 2 = -3 \text{ Watt}$$

## BÖLÜM 4. YARI İLETKEN MALZEMELER

### 4.1 Giriş

Bir yarı iletken, bir izolatör(çok düşük iletkenlik) ile bakır gibi yüksek bir iletkenliğe sahip bir iletkenin sınırları arasında kalan bir iletkenlik düzeyine sahiptir. Bir maddenin yük akışına ve akıma karşı direnci iletkenliği ile ters orantılıdır.

Belli bir sıcaklıkta bir maddenin direncine ilişkin denklem,  $R[\Omega] = \frac{\rho[\Omega \cdot cm] \cdot l[cm]}{A[cm^2]}$  bağıntısı

ile verilir. Burada  $R$  ölçülen omik direnç,  $l$  malzeme örneğinin uzunluğunu,  $A$  malzemenin kesitini ve  $\rho$  da malzemenin özgül direncini göstermektedir.

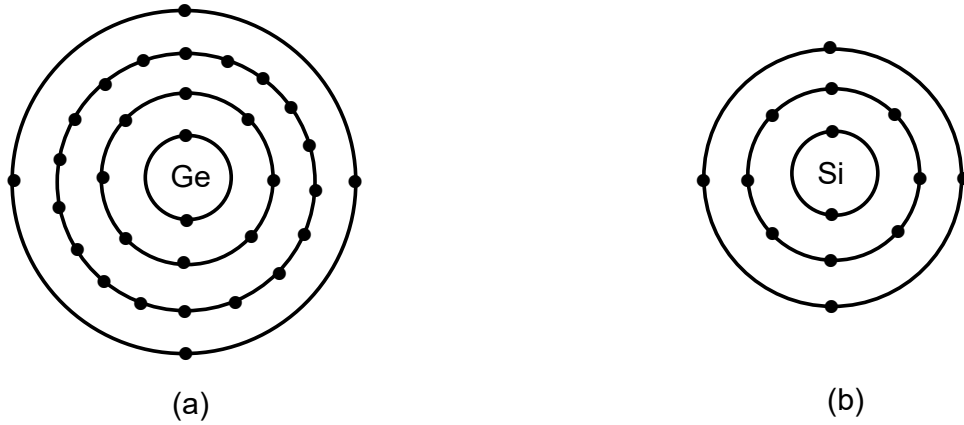
Üç genel madde kategorisi için tipik öz direnç değerleri Tablo 4.1 de verilmiştir

Tablo 4.1 Tipik Öz direnç Değerleri

| İletken                                      | Yarı iletken   | Yalıtkan                                       |
|--|--|--|
| $\rho \cong 10^{-6} \Omega \cdot cm$ (bakır) | $\rho \cong 50 \Omega \cdot cm$ (germanyum)<br>$\rho \cong 50 \cdot 10^3 \Omega \cdot cm$ (silisyum) | $\rho \cong 10^{12} \Omega \cdot cm$<br>(mika) |

Germanyum ve Silisyum yarı iletkenlerinin dirençleri sıcaklıkla ters orantılıdır. Yani sıcaklık artarken dirençleri düşer. Bu nedenle bu malzemelere negatif sıcaklık katsayısına sahiptirler denir. Atom, elektron, proton ve nötron denen üç temel parçacıktan oluşur.

Şekil 4.1 de gösterildiği gibi germanyum atomunun 32 adet yörüngesel elektronu varken, silisyumun 14 adet elektronu vardır. Her bir durumda en dış kabuğunda 4 elektron bulunmaktadır. Bu 4 elektrondan herhangi birini uzaklaştırmak için gerekli olan potansiyel(iyonizasyon potansiyeli) yapıdaki herhangi başka bir elektronu uzaklaştırmak için gerekenden daha azdır.



Şekil 4.1 Germanyum ve silisyum atomunun yapısı

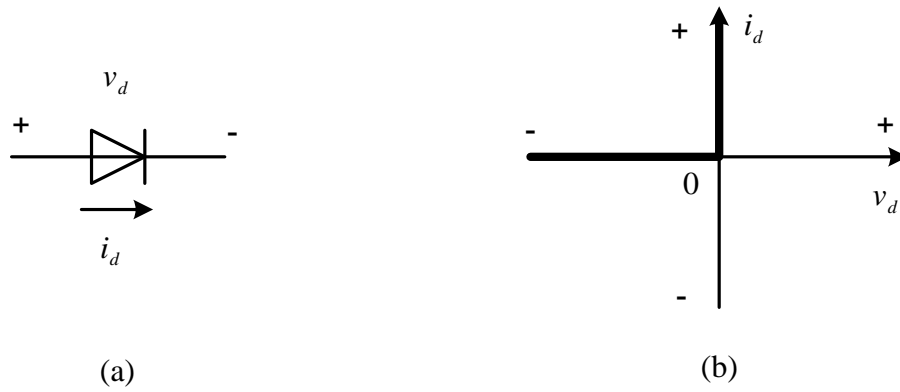
Yarı iletken malzemelerin karakteristikleri, nispeten saf yarı iletken malzemeye, bazı katkı atomları eklenerek önemli ölçüde değiştirilebilir. Bu katkılama işlemine tabi tutulan yarı iletken malzemeye katkılı malzeme denir. Yarı iletken eleman üretiminde n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki tip katkılı malzeme vardır. n ve p-tipi malzemeler yarı iletken elemanların temel yapı taşlarını oluşturur. Aynı zamanda n-tipi malzemenin p-tipi malzeme ile birleştirilmesi, elektronik sistemlerde oldukça önemli bir yarıiletken eleman oluşturmaktadır.

## 4.2 İdeal diyot

Yarı iletken elemanların en basiti olan diyotlar, basit bir anahtarinkine benzeyen karakteristikleri ile elektronik sistemlerde çok önemli rol oynarlar.

İdeal diyot sırasıyla aşağıdaki iki şekilde gösterilen sembol ve karakteristiklere sahip iki uçlu bir elemandır.

Uygulanan gerilimin polaritesi şekil 4.2(a) daki gibi ise, şekil 4.2(b) de karakteristiğin göz önünde tutulacak parçası, dikey eksenin sağıdır. Ters bir gerilim uygulanırsa, solda verilen karakteristikler geçerli olacaktır. Diyottan geçen akım (a) daki gibi ise, karakteristiğin dikkate alınacak bölümü yatay eksenin üstüdür. Tersine bir durum, karakteristiğin yatay eksenin altında kalan kısmının kullanılmasını gerektirir.



Şekil 4.2 İdeal diyot gösterimi ve karakteristiği

Diyota ilişkin önemli parametrelerden bir tanesi, çalışma bölgesi veya noktasındaki dirençtir. Yukarıdaki şekilde  $i_d$  nin yönü ve  $v_d$  nin polaritesi ile tanımlanan bölgeyi dikkate alacak olursak, ohm kanunu ile belirlenen ileri yön direnci  $R_f$  nin değerinin;

$$R_f = \frac{V_f}{I_f} = \frac{0}{\text{pozitif deger}} = 0 \Omega$$

olduğunu buluruz. Burada  $V_f$ , diyot üzerindeki ileri yön gerilimi ve  $I_f$  ise diyottan geçen ileri yön akımıdır. Bu nedenle ideal diyot, ileri yönde iletim bölgesi için kısa devre elemanıdır ( $i_d \neq 0$ ). Yukarıdaki şekilde, ters yönde uygulanan potansiyele ilişkin bölüme bakacak olursak(üçüncü çeyrek),  $R_r$  nin değerinin;

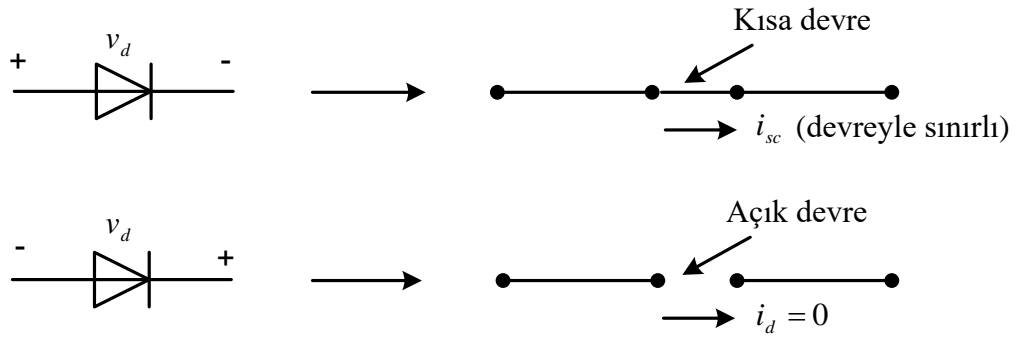
$$R_r = \frac{V_r}{I_r} = \frac{-5, -20 \text{ veya ters yonde herhangi bir potansiyel degeri}}{0}$$

= çok büyük bir sayı yani( $\infty$ ) kabul edeceğiz.

olduğunu buluruz. Burada  $V_r$ , diyot üzerindeki ters yön gerilimi ve  $I_r$  ise diyottan ters yönde akan akımdır. Bu nedenle ideal diyot, iletim olmadığı bölgede bir açık devre elemanıdır ( $i_d = 0$ ).

Şekil 4.3 deki gibi durumu özetlersek;



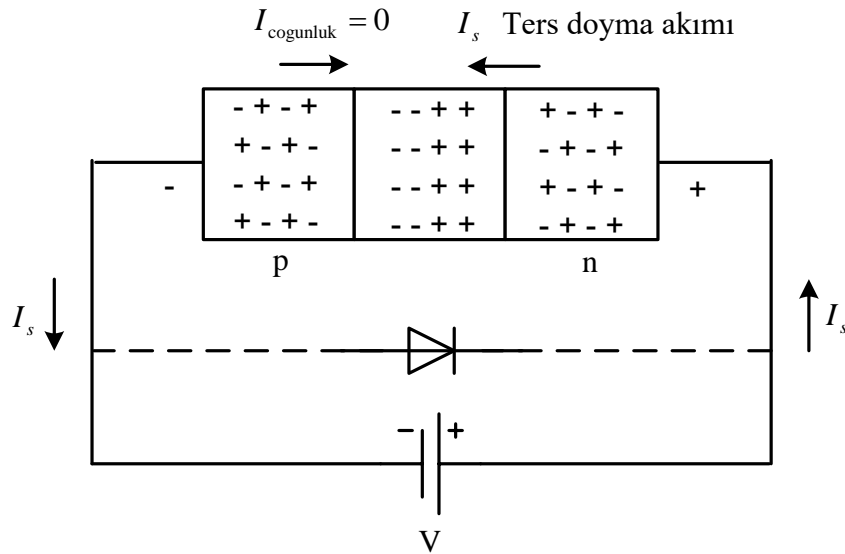


Şekil 4.3 İleri ve tersine öngerilimlenmiş diyot eşdeğeri

Yarı iletken diyot, daha önce bahsettiğimiz üzere n ve p-tipi malzemeler, ileri teknoloji kullanılarak bir araya getirilmek suretiyle oluşturulur.

#### 4.3 Ters öngerilimleme durumu

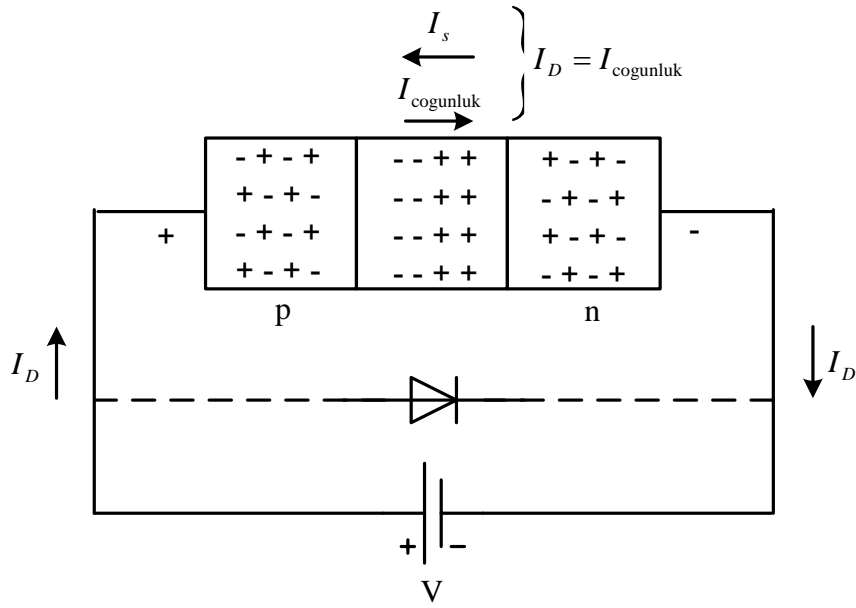
Bu akım, bazı yüksek güç elemanları dışında, ender olarak birkaç mikroamperi aşan büyüklüktedir. Terimdeki “doyma” kelimesi, bu akımın azami değerine çabucak ulaşması ve tersine öngerilimleme potansiyelindeki artışla beraber önemli ölçüde değişmemesi gerçeğine dayanmaktadır.



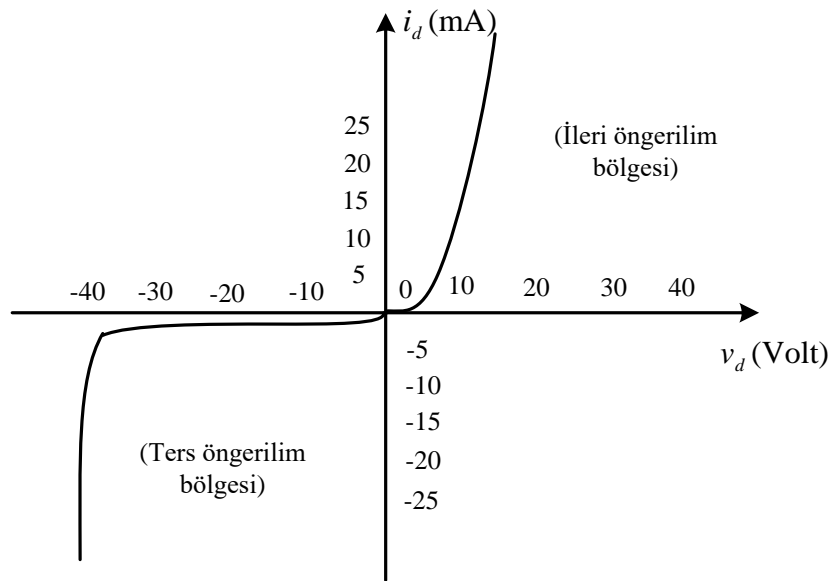
Şekil 4.4 Ters öngerilimlenmiş p-n jonksiyonu

#### 4.4 İleri öngerilimleme durumu

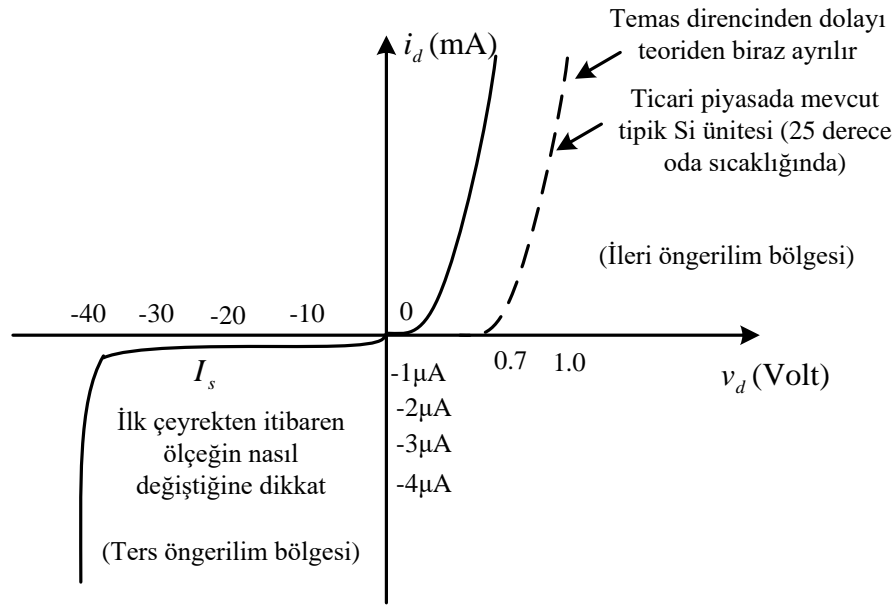
İleri öngerilimleme durumu, Şekil 4.5 de gösterildiği gibi, p-tipi malzemeye pozitif potansiyel ve n-tipi malzemeye de negatif potansiyel uygulanarak sağlanır. Şekil 4.6 dan da görüldüğü üzere, çoğunluk taşıyıcısı akışı, ileri öngerilimlemenin artışıyla birlikte üstel olarak artacaktır. İlk bölge ileri öngerilimleme bölgesini temsil etmektedir.



Şekil 4.5 İleri öngerilimlenmiş p-n jonksiyonu



Şekil 4.6 En genel diyot karakteristiği



Şekil 4.7 Yarıiletken Si diyot karakteristiği

Katı hal fiziği kullanılarak, diyot akımı ile sıcaklık ( $T_k$ ) ve uygulanan öngerilim ( $V$ ) arasında aşağıdaki matematiksel ilişki kurulabilir.

$$I = I_s (e^{kV/T_k} - 1)$$

Burada  $I_s$  ters yönde doyma akımı,  $k = 11600/\eta$  ve  $i_d$  nin küçük değerleri için, germanyumda  $\eta = 1$ , silisyumda  $\eta = 2$  dir. Karakteristiğin düşey kısmında ise hem Ge ve hem de Si için  $\eta = 1$  dir.

$$T_k = T_c + 273 \text{ (} T_k = {}^0 K, T_c = {}^0 C \text{)}$$

Yukarıdaki denklem şekil 1.7 deki eğrileri temsil etmek suretiyle, 0,5 voltluk ileri öngerilimleme voltajının oda sıcaklığında ( $25^0 C$ ) yaratacağı  $I$  akımını bulalım.

$$I_s = 1 \mu A = 1 \times 10^{-6} A$$

$$T_k = T_c + 273^0 = 25^0 + 273^0 = 298^0$$

$$k(Si) = \frac{11600}{2} = 5800$$

$$\frac{kV}{T_k} = \frac{(5800) \times (0.5)}{298} = 9.732$$

$$I = I_s (e^{9.732} - 1) = (1 \times 10^{-6}) \times (16848 - 1) = 16.848 \times 10^{-3} \cong 16.8 \text{ mA}$$

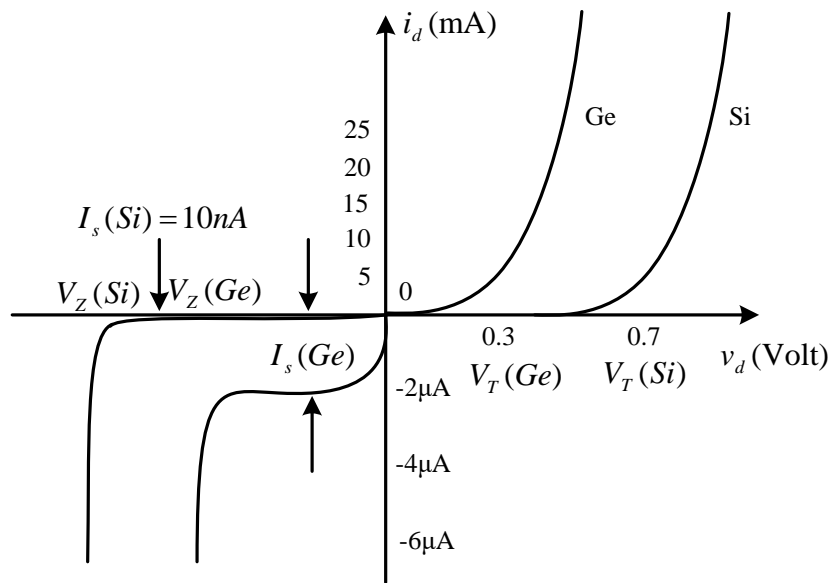
Tersine öngerilimleme bölgesinde, ters yönde doyma akımı  $I_s$  nin sıcaklıktaki her  $10^0 C$  lık değişim için şiddetinin hemen hemen ikiye katlandığı deneysel olarak görülmüştür. Tersine öngerilimleme bölgesinde bu şiddetteki akım düzeyleri, tersine öngerilimleme bölgesinde görmek istediğimiz açık devre durumunun gerçekleşmesine gölge düşürecektir. Silisyum tipik değerleri, benzer akım ve güç düzeylerinde germanyumunkinden çok daha düşüktür. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklıklarda bile silisyum  $I_s$  değerleri germanyum da görülen yüksek değerlere ulaşmaz ve bu da silisyum elemanlarının tasarımıda daha çok kullanılmasının en önemli nedenlerindendir.

#### 4.5 Zener bölgesi

Şekil 4.8 de,  $V_z$  ters yönde öngerilimleme potansiyeli altında karakteristiğin nasıl keskin biçimde değiştiğine dikkat edelim. Bu sabit gerilim etkisi, diyot üzerindeki ters yönde büyük bir öngerilimleme düzeyinden kaynaklanmaktadır. Uygulanan ters yönlü potansiyel negatif yönde daha da arttırıldıkça, yüksek bir çığ akımının oluşturulup, çığ kırılma bölgesinin belirlendiği noktaya kadar iyonizasyon sürecine katkıda bulunabilirler.

ığ bölgesi ( $V_z$ ) p ve n- tipi malzemelerdeki katkı düzeyleri yükseltilerek düşey eksene daha da yaklaştırılabilir. Ancak,  $V_z$  örneğin -5V gibi çok düşük düzeylere indikçe, zener kırılması denen başka bir mekanizma, karakteristikteki keskin değişime katkıda bulunacaktır. Zener kırılması ancak düşük  $V_z$  düzeylerinde önemli bir katkı durumunda olsa da, karakteristik üzerinde, herhangi bir düzeyde keskin değişim olduğu bölgeye zener bölgesi ve p-n jonksiyonunun karakteristiğinin bu özgül kısmını kullanan diyotlara da zener diyotları denir.

Ters gerilim bölgesine ilişkin karakteristikte görülen keskin değişimin, herhangi bir sistemin cevabını tümüyle değiştirmesi istenmiyorsa, söz konusu yarı iletken diyotun, zener bölgesinde çalıştırılmaması gerekir. Bu bölgeye girmeksizin uygulanabilecek maximum tersine öngerilimleme potansiyeline(PIV), ters tepe gerilimi denmektedir.



Şekil 4.8 Yarıiletken Ge ve Si diyot karakteristiği

#### 4.6 Germanyum ve silisyum diyotların karşılaştırılması

Silisyum diyotların, genelde germanyum diyotlara göre daha yüksek bir tersine öngerilimleme potansiyeli ve akım değeri ile daha geniş bir sıcaklık aralığı vardır. Silisyum için PIV değerleri 1000V' a yakın olabilirken, germanyum için maximum değer 400V' a yakındır. Silisyum 200<sup>0</sup> C' ye kadar sıcaklıklarda kullanılabilirken, germanyumda maximum sıcaklık çok daha düşüktür (100<sup>0</sup> C). Ancak germanyuma kıyasla silisyumun dezavantajı, yukarı salınım bölgesine ulaşmak için daha yüksek bir ileri öngerilim düzeyinin gerekli olmasıdır. Piyasadan satın alınan silisyum diyotlarda bu değer 0,7V iken, germanyum diyotlar için 0,3V dur. Silisyumdaki daha yüksek sapma,  $\eta$  faktöründen kaynaklanmaktadır. Bu faktör eğrinin daha düşük akım düzeylerindeki şeklini belirlemede rol oynar. Eğri dikey olarak yükselmeye başladıktan sonra  $\eta$  katsayısı 1'e iner (germanyum için sürekli değer). Bu yükselmenin başladığı potansiyel, genelde sapma, eşik veya ateşleme potansiyeli olarak anılır.

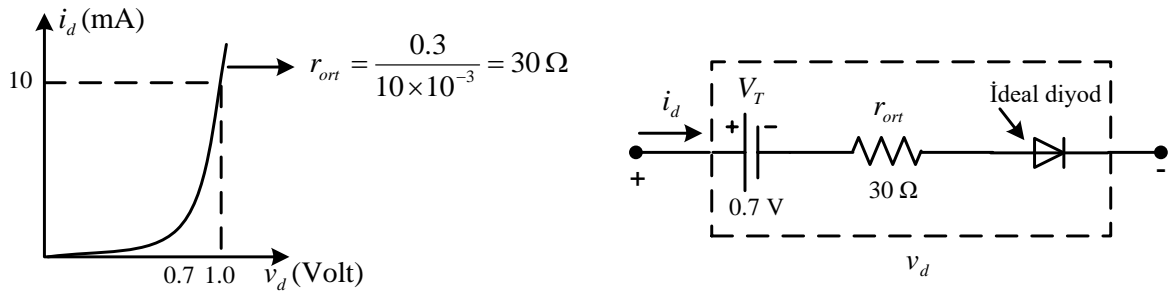
Kısaca;  $V_T = 0.7 \text{ Volt (Si)}$  ve  $V_T = 0.3 \text{ Volt (Ge)}$

Açıkça görüleceği gibi, yukarı salınım dikey eksene ne kadar yakınsa, elemanda da o ölçüde “ideal” olacaktır. Ancak germanyuma kıyasla silisyumun diğer karakteristikleri, onun, ticari elemanlarının çoğunluğunda tercih edilmesini sağlamaktadır.

#### 4.7 Eşdeğer devreler

Eşdeğer devreler, eleman, sistem v.s gerçek uç karakteristiklerini en iyi temsil edecek uygun bir eleman kombinasyonudur. Yani eşdeğer devre belirlendiğinde, elemanın sembolü şemadan çıkarılıp, sistemin genel davranışı önemli ölçüde etkilenmeksizin, yerine eşdeğer devre konulabilir.

Bir diyot için eşdeğer devre elde etme tekniklerinden biri, düz-çizgi parçaları ile elemanın karakteristiklerine yaklaşmaya çalışmaktır. Bu tür eşdeğer devreye, parçalı doğrusal eşdeğer devre denir. Seçilen direnç ortalama direnç olmak üzere tüm eşdeğer devre şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 Diyotun eşdeğer devresine örnek

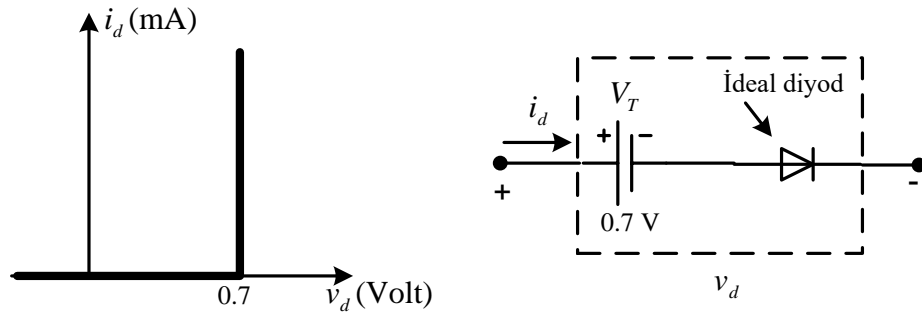
Burada ideal diyot, elemanda sadece bir yönde iletimin söz konusu olduğunu ve tersine öngerilimlenme durumunun açık devre durumu olduğunu göstermek için konulmuştur. Bir silisyum yarı iletken diyotu, yaklaşık 0.7 volta varmadan iletim durumuna geçmediği için, eşdeğer devrede bu değere karşı koyan bir  $V_T$  geriliminin görünmesi gerekir. Bu ise, eşdeğer devredeki ideal diyot, ileri yönde öngerilimlenmeden önce, diyot üzerinde düşen toplam ileri yön gerilimi  $V_D$  'nin  $V_T$  'den daha büyük olması gerektiğini gösterir.

$V_T$  'nin sistem içerisinde bağımsız bir enerji kaynağı olmadığına dikkat edilmelidir. Yani basit bir voltmetre, yalıtılmış bir silisyum diyot üzerinde  $V_T = 0.7V$  'luk bir gerilim düşümü göstermeyecektir. Bu sadece, yarı iletken diyota ilişkin yatay kaymayı temsil eden bir araçtır.

Yarı iletken bir diyot için, 1 volta karşı akan akım  $I_D = 10mA$ , karakteristik yükselmeden önce silisyum için 0,7 voltluk bir kaymanın gerekli olduğunu biliyoruz. Buradan;

$$r_{ort} = \frac{1 - 0.7}{10 \text{ mA}} - \frac{0.3}{10 \times 10^{-3}} = 30 \Omega \text{ bulunur.}$$

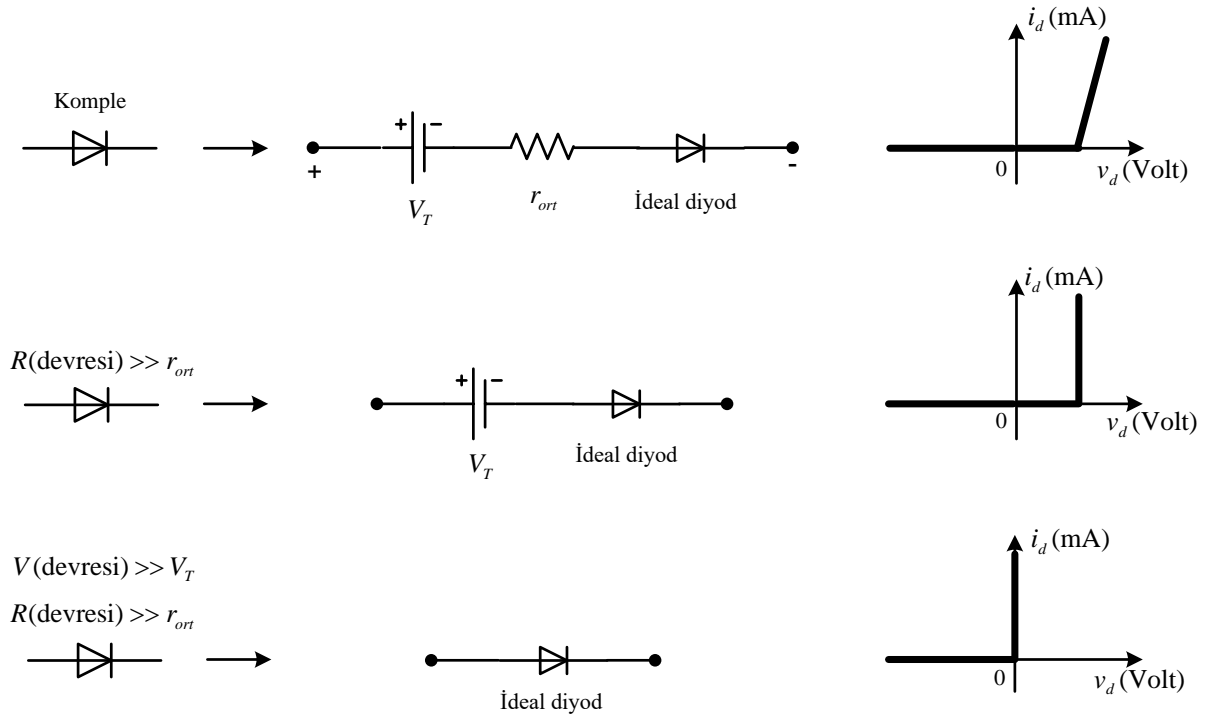
Birçok uygulamada  $r_{ort}$  direnci, devrenin diğer elemanlarına kıyasla ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Eşdeğer devreden  $r_{ort}$  un çıkarılması aşağıdaki şekle karşı gelir. Bu yaklaşım yarı iletken devre analizinde sıkça kullanılır. Bu durum Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Diyotun eşdeğer devresine örnek

Aslında uygulanan gerilime kıyasla, 0.7 voltun çoğu durumda ihmal edilebileceği söylenebilir. Bu nedenle ileriki bölümlerde ele alınacak uygulamaların birçoğunda komple eşdeğer devre yerine ideal diyotlar kullanılmıştır.

Dolayısıyla düşük gerilimler ve düşük dirençler seri dirençler hariç olmak üzere, ideal diyot kullanıldığında elde edilen devre yanıtı, hiçbir zaman gerçek yanıtın çok farklı değildir ve bu sayede çok sayıda matematiksel işlem den kurtulunmuş olur. Şekil 4.11 de diyot modelleri (eşdeğer devreleri) ve doğrusal karakteristikleri verilmiştir.

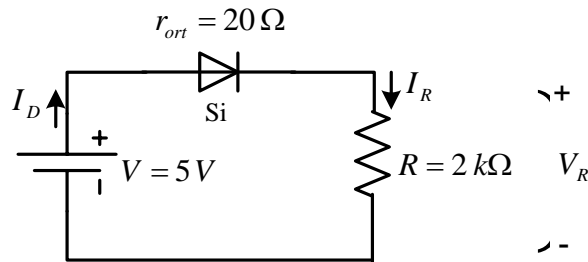


Şekil 4.11 Diyot modelleri ve doğrusal karakteristikleri

### Örnek

a ) Şekil 4.12 de verilen devre parametreleri düzeylerinde silisyum diyot için hangi modelin daha uygun olduğunu belirleyin.

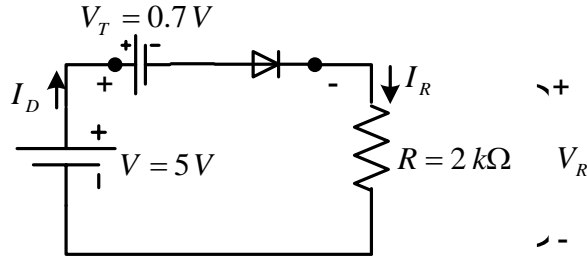
b ) R direncine ilişkin akım ve gerilimi hesaplayın.



Şekil 4.12 Örnek devre

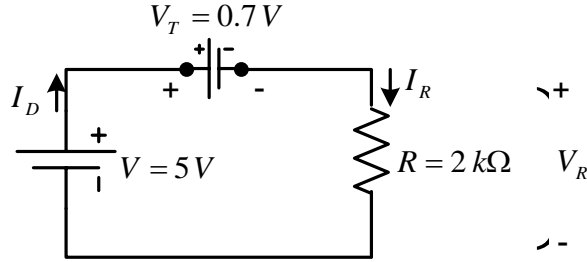
a ) R direnci, diyotun  $r_{av}$  değerinden çok daha büyük olduğundan,  $r_{av}$  yaklaşıklık açısından ihmal edilebilir. Ancak  $V_T$ ,  $V$  nin %14' ü kadardır ve bu nedenle hesaba katılmalıdır. Seçilen model şekil 4.13 de verilmiştir.





Şekil 4.13 Şekil 4.12 de verilen devrenin tüm eşdeğer devresi

b ) Uygulanan gerilim, diyot üzerinde kısa devre durumuna getiren bir gerilim yaratmıştır. Diyot yerine kısa devre eşdeğeri konulduğunda şekil 4.14 deki devre ortaya çıkar.



Şekil 4.14 Şekil 4.12 de verilen devrenin öz eşdeğer devresi

$$V_R = V - V_T = 5 - 0.7 = 4.3V$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{4.3V}{2k\Omega} = 2.15mA$$

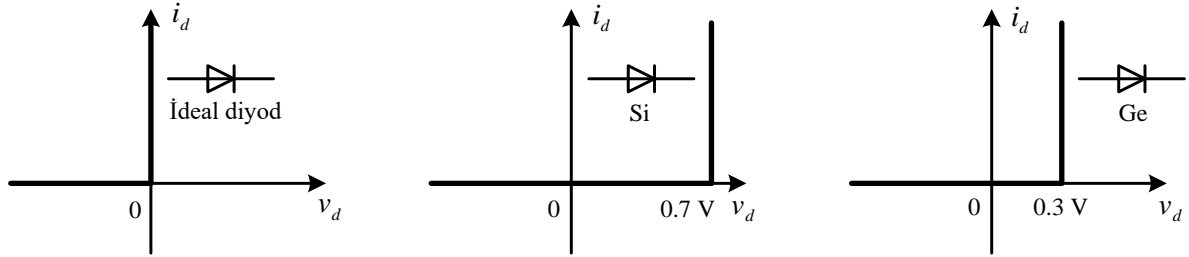
$$P_{D_{\max}} = V_D \times I_D = 0.7V \times 2.15mA = 1.505mW$$

Burada  $V_D$  ve  $I_D$  belirli bir çalışma noktasındaki diyot gerilimi ve akımıdır.

## BÖLÜM 5. DİYOT UYGULAMALARI

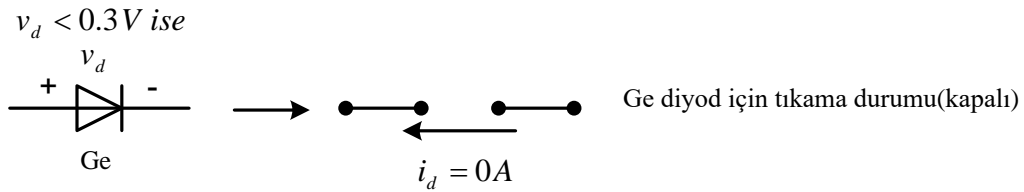
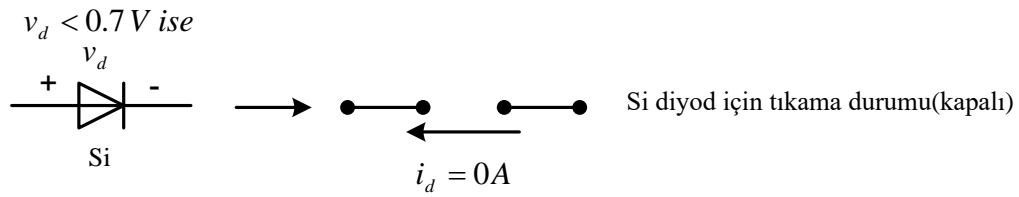
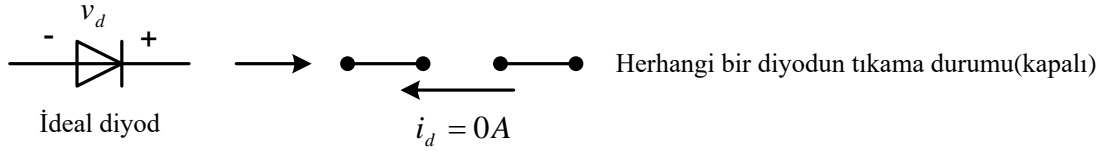
### 5.1 DC girişli seri diyot devreleri

Bundan sonraki analizlerde, yaklaşık diyot modeli için Şekil 5.1 de verilen semboller kullanılacaktır.

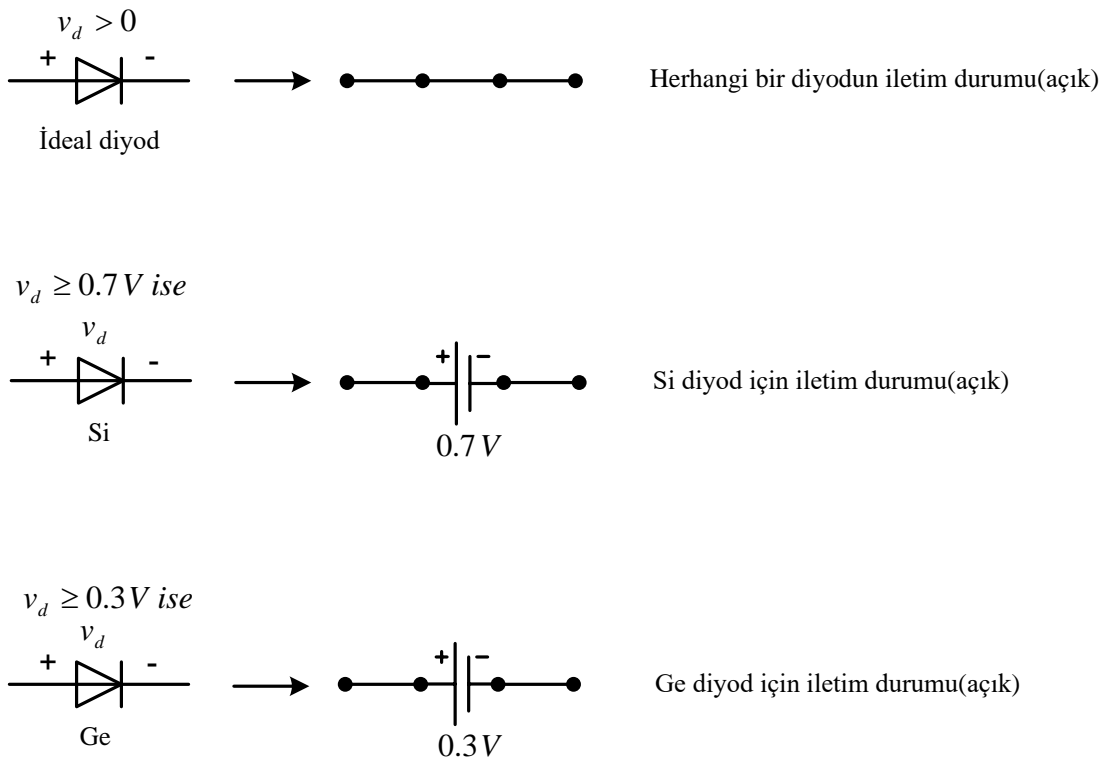


Şekil 5.1 Yaklaşık diyot modelleri

Bu modeller için, uygulanan gerilimin polaritesine göre diyotların iletim veya tıkama durumları Şekil 5.2(a) ve (b) de verilmiştir.



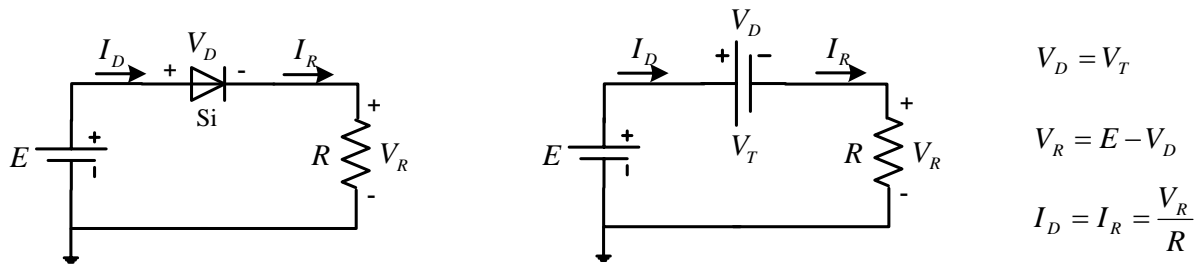
Şekil 5.2(a) Çeşitli diyot modelleri için iletim veya tıkama durumları



Şekil 5.2(b) Çeşitli diyot modelleri için iletim veya tıkama durumları

Eşdeğer devrelerde yer alan 0.7 ve 0.3 V luk gerilim kaynaklarının bağımsız birer gerilim kaynağı olmadığı unutulmamalıdır. Bu, diyotu ideal karakteristikten ayıran sapma geriliminin etkilerini dahil etmek için kullanılan bir gösterimdir.

Uygulanan ileri öngerilimin büyüklüğü diyotun davranışları üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Açık devre durumu için akım sıfırdır. Kısa devre durumunda ise, akım diyotun bağlı olduğu devre tarafından belirlenecektir. Bu değer, diyotun maksimum nominal(anma) değerinden daha büyük olmamalıdır. Ancak ideal olarak, ileri öngerilimli bir diyot üzerinde sabit bir gerilim düşümü olacak (ideal diyot için 0 V, Si için 0.7 V, Ge için 0.3 V) ve akım, diyotun içinde bulunduğu devre tarafından belirlenecektir.



Şekil 5.3 Diyot iletim durumu

Şekil 5.3 deki devrede,  $V_T$  ters karşı koyma gerilimini karşılamaya yeterli gerilim olduğu sürece diyot iletim (açık) durumdadır. Yani  $E > V_T$  ise diyot iletimdedir.

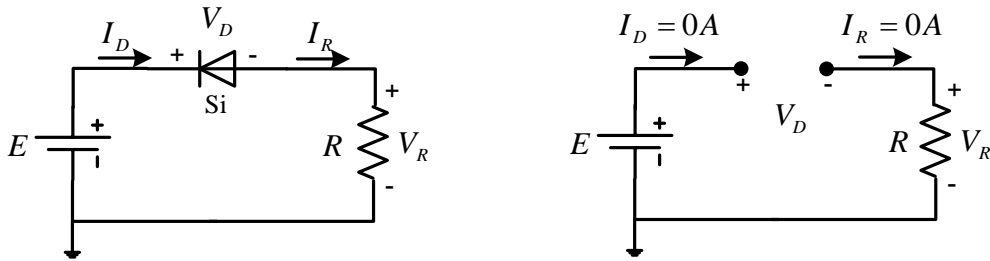
Yine Şekil 5.3 deki devrede,  $E = 8V$ ,  $R = 2.2 k\Omega$  ve diyot silisyum ( $V_T = 0.7V$ ) ise,  $V_D$ ,  $V_R$  ve  $I_R$  yi bulalım.

$$V_D = 0.7V$$

$$V_R = E - V_T = 8 - 0.7 = 7.3V$$

$$I_R = I_D = \frac{V_R}{R} = \frac{7.3V}{2.2 k\Omega} \cong 3.32 mA$$

Aynı işlemi diyotu ters çevirerek tekrarlayacak olursak şekil 5.4 deki devreye geliriz.



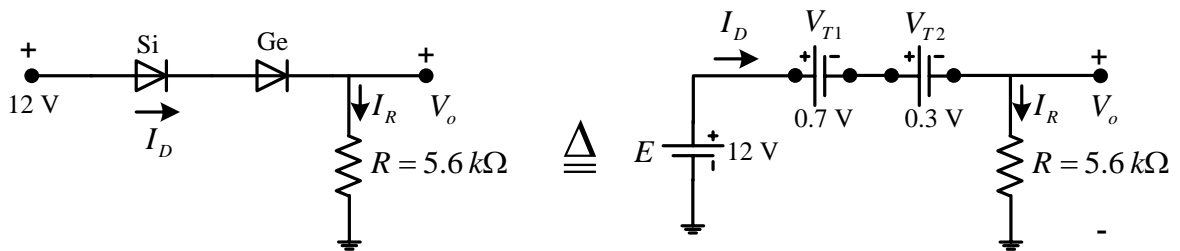
Şekil 5.4 Diyot tıkama durumu

$$E - V_D - V_R = 0V$$

$$V_D = E - V_R = E - 0 = 8V$$

$$I_R = I_D = \frac{V_R}{R} = \frac{0}{2.2 k\Omega} = 0A$$

**Örnek:** Şekil 5.5 deki seri devre için  $V_o$  ve  $I_D$  yi bulunuz.



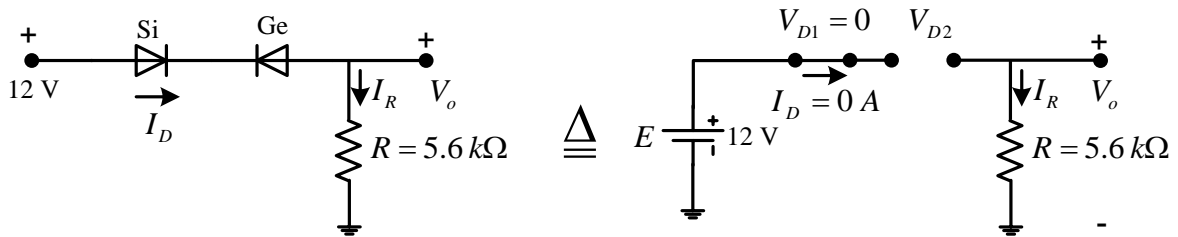
Şekil 5.5

$12 > 0.7 + 0.3 = 1$  olduğundan diyotlar iletim durumundadırlar. Bu durumda;

$$V_o = E - (V_{T1} + V_{T2}) = 12 - (0.7 + 0.3) = 11V$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R} = \frac{11V}{5.6k\Omega} \cong 1.96mA$$

**Örnek:** Şekil 5.6 daki devre için  $I_D$ ,  $V_{D2}$  ve  $V_o$  ı bulunuz.



Şekil 5.6

$$V_R = R.I_R = R.I_D = (5.6k\Omega) \times 0 = 0V$$

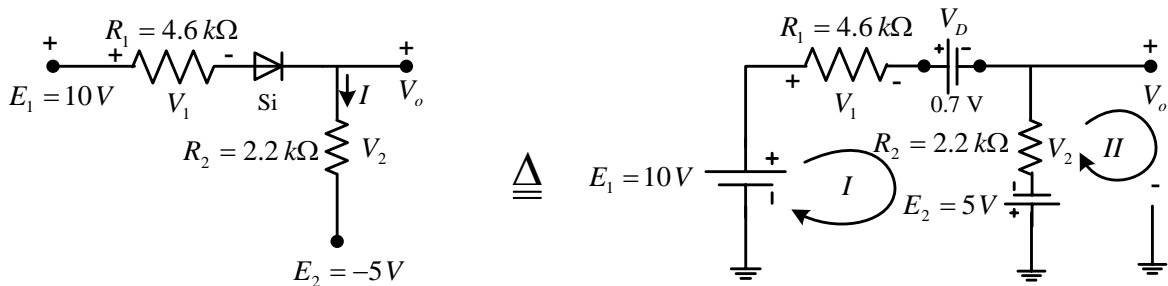
$$V_{D2} = V_{\text{acık devre}} = E = 12V$$

$$E - V_{D1} - V_{D2} - V_o = 0$$

$$V_{D2} = E - V_{D1} - V_o = 12 - 0 - 0 = 12V$$

$$V_o = 0V$$

**Örnek:** Şekil 5.7 deki seri bağlı dc devresi için  $I$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  ve  $V_o$  ı bulunuz.



Şekil 5.7

Görüldüğü gibi diyot iletim durumundadır. Birinci çevre için kirchhoff gerilim yasasını uygularsak;

$-E_1 - E_2 + V_D + R_1.I + R_2.I = 0$  olur. Buradan  $I$  akımını çekersek;

$$I = \frac{E_1 + E_2 - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{10V + 5V - 0.7V}{4.6k\Omega + 2.2k\Omega} = \frac{14.3V}{6.8k\Omega} \cong 2.1mA$$

$$V_1 = R_1.I = 4.6k\Omega \times 2.1mA = 9.66V$$

$$V_2 = R_2.I = 2.2k\Omega \times 2.1mA = 4.62V$$

İkinci çevre için kirchhoff gerilim yasasını uygularsak;

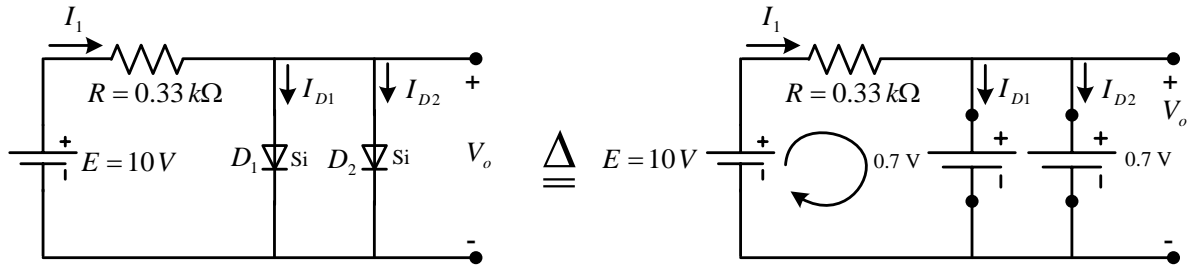
$$V_o + E_2 - V_2 = 0$$

$$V_o = V_2 - E_2 = 4.62 - 5 = -0.38V$$

(-) işareti  $V_o$  in yukarıdaki şekilde gösterilen polaritenin tersi bir polariteye sahip olduğunu gösterir.

## 5.2 Paralel ve seri-paralel devreler

**Örnek:** Şekil 5.8 deki paralel diyot devresi için  $V_o$ ,  $I_1$ ,  $I_{D1}$  ve  $I_{D2}$  yi bulunuz.



Şekil 5.8

$$V_o = 0.7V$$

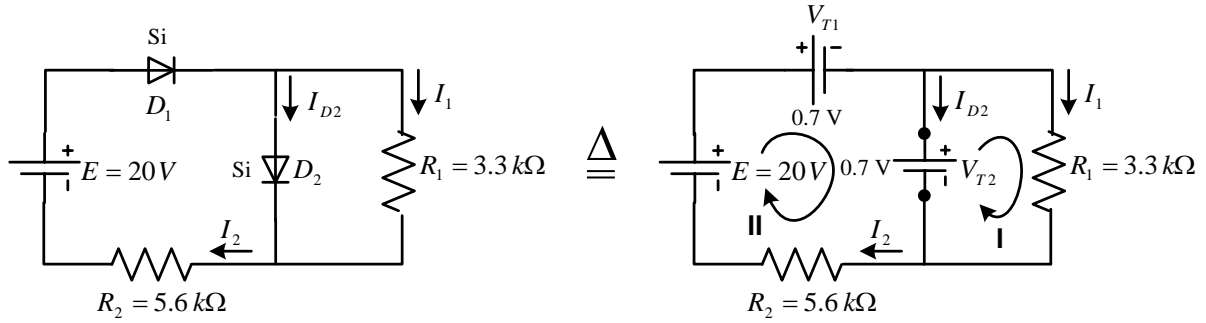
$$-E + R.I_1 + V_D = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1 = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10V - 0.7V}{0.33k\Omega} = 28.18mA$$

Şekil 5.8 deki diyotlar benzer karakteristiklere sahip olduklarından

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_1}{2} = \frac{28.18 \text{ mA}}{2} = 14.09 \text{ mA}$$

Bu devrede şayet tek diyot olsa idi ve bu diyotun anma akımı 20 mA olsaydı, devreden 28.18 mA akacağı için bu diyot hasar görürdü. Paralel iki diyot kullanmak suretiyle aynı uç gerilimi ile akım 14.09 mA gibi güvenli bir düzeyde sınırlandırılmıştır.

**Örnek:** Şekil 5.9 daki devrede  $I_1$ ,  $I_2$ , ve  $I_{D2}$  akımlarını bulunuz.



Şekil 5.9

Şekil 5.9 dan görüldüğü gibi, uygulanan gerilim, her iki diyotu iletim durumuna getirecek şekildedir.

Birinci çevre için Kirchhoff gerilim yasasını uygularsak;

$$I_1 = \frac{V_{T2}}{R_1} = \frac{0.7 \text{ V}}{3.3 \text{ k}\Omega} = 0.212 \text{ mA}$$

İkinci çevre için Kirchhoff gerilim yasasını uygularsak;

$$-E + V_{T1} + V_{T2} + R_2 \cdot I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{E - V_{T1} - V_{T2}}{R_2} = \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{5.6 \text{ k}\Omega} = \frac{18.6 \text{ V}}{5.6 \text{ k}\Omega} = 3.32 \text{ mA}$$

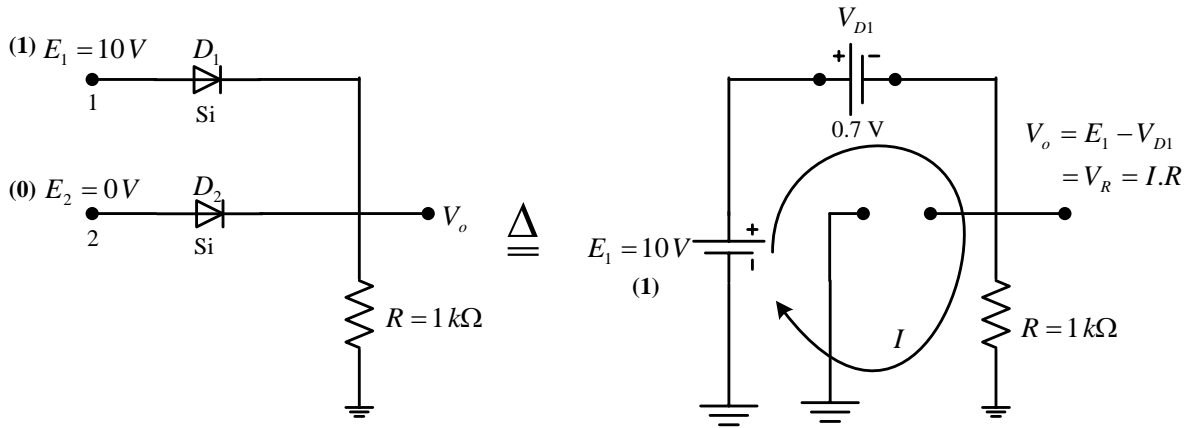
$$I_2 = I_{D2} + I_1 \quad \Rightarrow \quad I_{D2} = I_2 - I_1 = 3.32 \text{ mA} - 0.212 \text{ mA} = 3.108 \text{ mA}$$

### 5.3 VE / VEYA mantık kapıları

10 V düzeyi Boole cebrine göre (1), 0 V düzeyi ise Boole cebrine göre (0) olarak verilir.

VEYA kapısı girişlerden biri veya ikisi birden 1 olduğu zaman çıkış gerilim düzeyini 1 yapar. Her iki giriş sıfır olduğunda çıkışta sıfırdır.

**Örnek:** Şekil 5.10 daki VEYA kapısı için çıkış düzeyini bulunuz.



Şekil 5.10

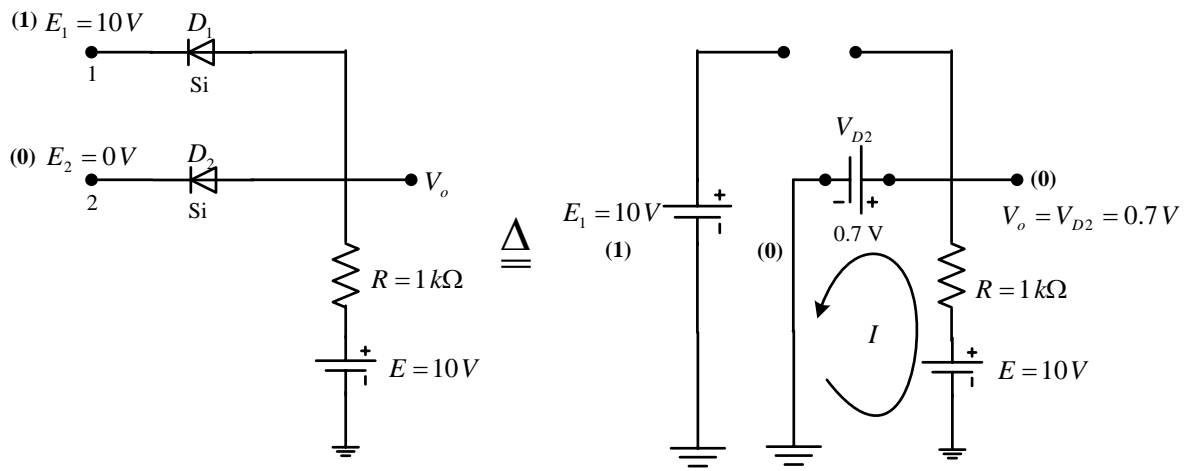
$D_1$  diyotu 1 ucuna uygulanan 10 V' tan dolayı iletim,  $D_2$  diyotu da 2 ucundaki 0 V' tan dolayı tıkama durumundadır.  $D_1$  in iletim durumu  $V_o = E_1 - V_{D1} = 10 - 0.7 = 9.3V$  düzeyinde bir gerilim oluşturmaktadır.  $D_2$  nin (-) katod tarafına 9.3 V ve anod (+) tarafında 0 V ile,  $D_2$  kesinlikle tıkama durumundadır. Çıkış gerilim düzeyi 10 V luk düzeyde değildir ama 9.3 V luk bir değer çıkışın 1 düzeyinde olduğunu kabul etmek için yeteri kadar büyüktür. Akım ise,

$$I = \frac{E_1 - V_{D1}}{R} = \frac{10V - 0.7V}{1k\Omega} = 9.3mA \text{ olur.}$$

**Örnek:** Şekil 5.11 deki VE kapısı için çıkış düzeyini bulunuz.

$D_2$  diyotu iletimde olduğundan  $V_o = 0.7V$  düzeyindedir.  $D_1$  in anodunda 0.7 V, katodunda da 10 V olduğu için kesinlikle tıkamadadır. Bu durumda saat yönünün tersi istikamette iç taraftaki devreye Kirchhoff gerilim yasasını uygularsak;





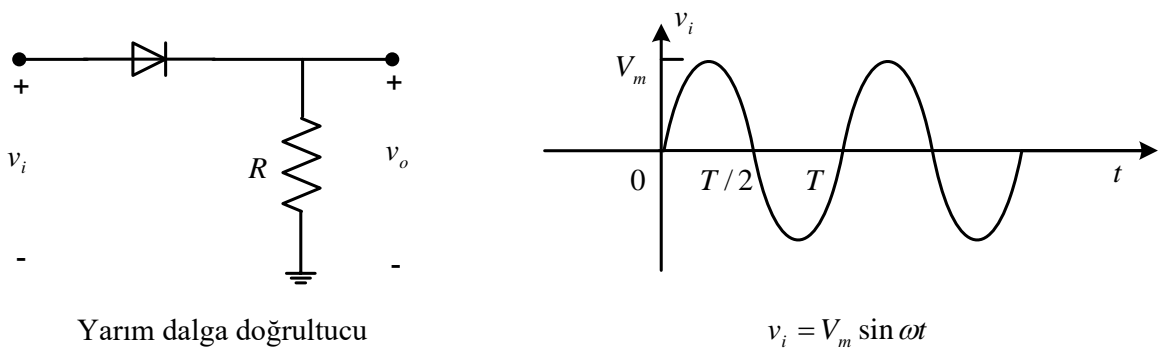
Şekil 5.11

$$-E + V_{D2} + R.I = 0 \quad \Rightarrow \quad I = \frac{E - V_{D2}}{R} = \frac{10V - 0.7V}{1k\Omega} = 9.3mA \text{ olacaktır.}$$

Bu nedenle Şekil 5.11 den de görüleceği üzere, VE kapısında girişlerden biri (0) seviyesinde ise çıkışın da (0) seviyesinde olacağı kanıtlanmış olur.

#### 5.4 Yarım dalga doğrultma

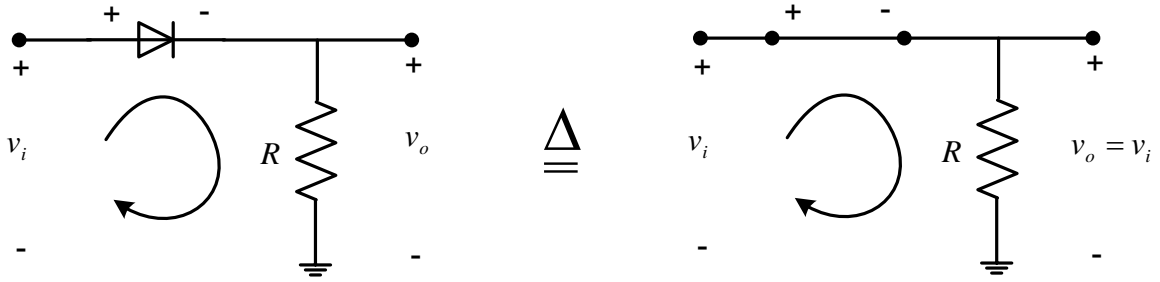
Şekil 5.12 de gösterilen devreye  $T$  periyotlu sinüzoidal bir işaret (gerilim) uyguladığımızı düşünelim. İdeal diyot modelini kullanmak suretiyle devreyi analiz edelim.



Yarım dalga doğrultucu

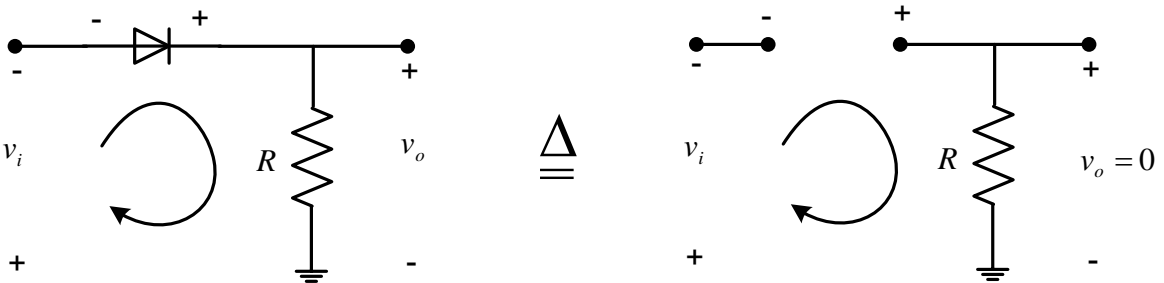
Şekil 5.12

Şekil 5.13 den de görüldüğü üzere,  $0 - T/2$  periyodu aralığında  $v_o = v_i \Rightarrow i = v_o / R$



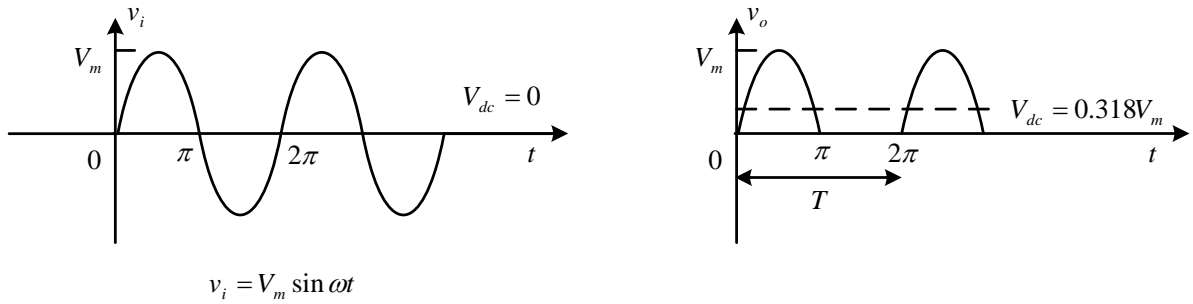
Şekil 5.13

Şekil 5.14 den de görüldüğü üzere,  $T/2 - T$  periyodu aralığında  $v_o = 0 \Rightarrow i = v_o / R = 0$



Şekil 5.14

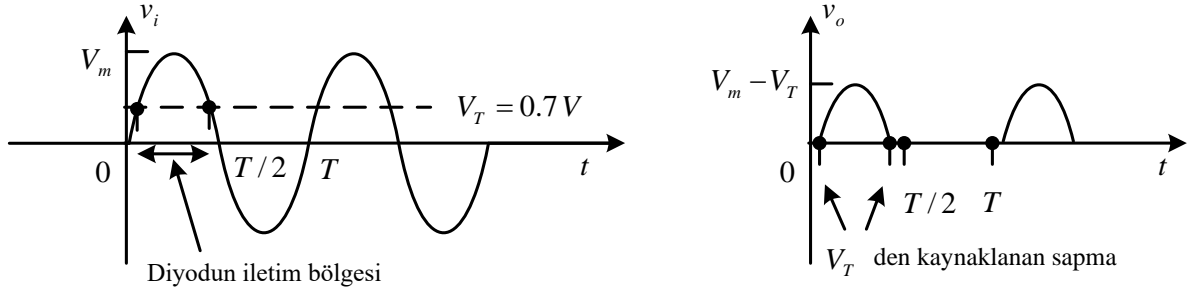
Bu analiz neticesinde  $v_o$  çıkış geriliminin dalga şekli şekil 5.15 deki gibi olacaktır.

Şekil 5.15  $v_o$  çıkış geriliminin dalga şekli

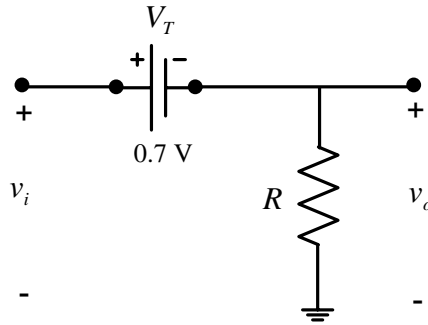
Şekil 5.15 den de görüldüğü gibi, ilk yarı periyotta işaret var, ikinci yarı periyotta işaret yoktur. Dolayısı ile çıkışta doğrultulmuş gerilimin ortalama değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = -\frac{V_m}{2\pi} \cos \omega t \Big|_0^{\pi} = -\frac{V_m}{2\pi} (-1 - 1) = \frac{V_m}{\pi} = 0.318V_m \text{ Volt}$$

$V_T = 0.7 V$  olan bir silisyum diyot durumunda, giriş ve çıkış dalga şekilleri ile eşdeğer devre şekil 5.16 daki gibi olacaktır.



Şekil 5.16

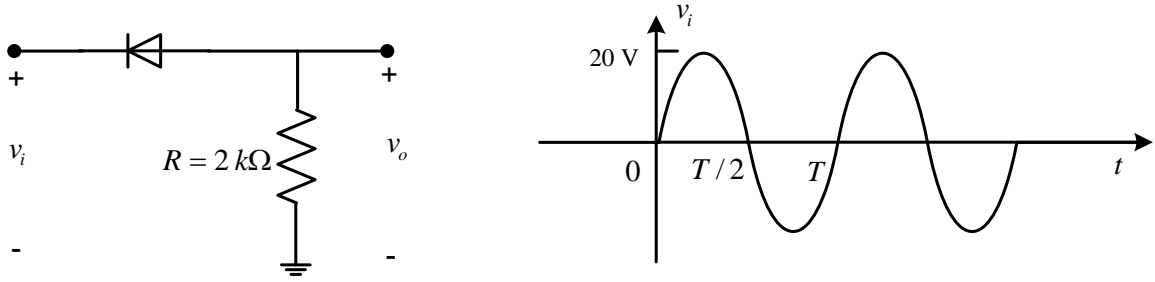


Şekil 5.17

Şekil 5.17 deki 0,7 voltluk net etki, eksen üzerinde kalan alanın küçülmesi şeklinde ortaya çıkacaktır. Bu da, doğal olarak sonuçta elde edilen dc gerilim düzeyini düşürecektir. Eğer  $V_m \gg V_T$  ise,  $V_T$  ihmal edilip,  $V_{dc} \equiv 0.318V_m$  alınabilir.  $V_m$  nispeten  $V_T$  ye yakın bir düzeyde ise, tepe değerini, kayma gerilimi ( $V_T$ ) kadar düşürerek kullanmak suretiyle yaklaşık bir değer bulunabilir. Sağ ve sol kenarlardaki saçaklama alanlarının ihmal edilmesi nedeniyle meydana gelen farklılık, normalde ciddi sorun yaratmayacak büyüklüktedir. Bu nedenle;

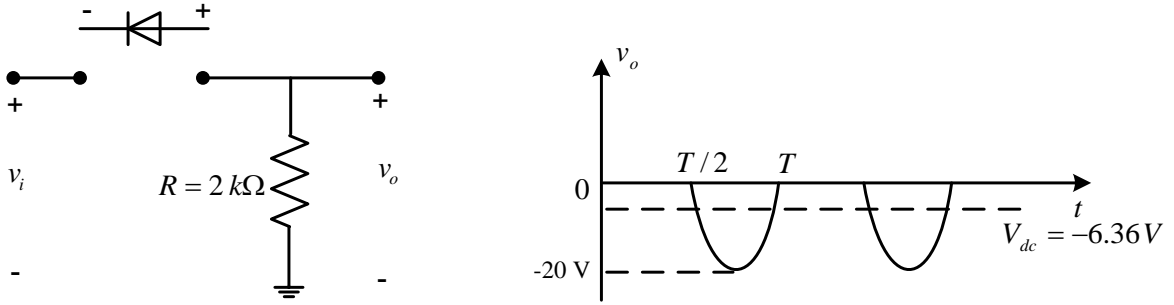
$$V_{dc} = 0.318(V_m - V_T)$$

**Örnek:** Şekil 5.18 deki devrede  $V_o$  çıkışını, ideal diyot ve silisyum diyot durumları için ayrı ayrı çizin ve çıkışın dc düzeyini bulunuz.

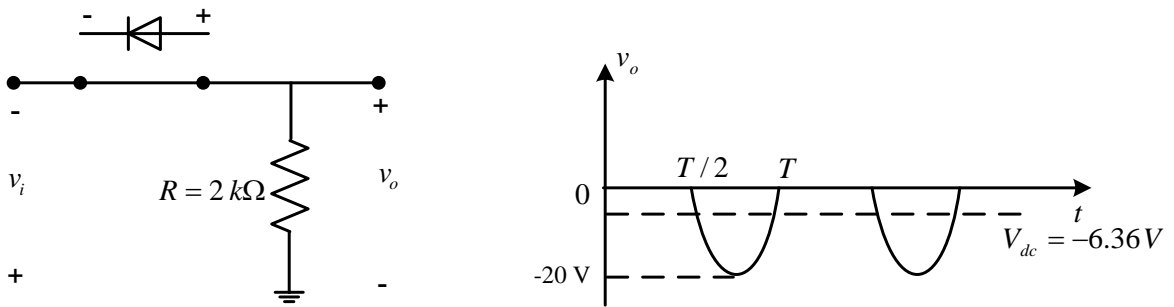


Şekil 5.18

İdeal diyot durumu için eşdeğer devre ve çıkış geriliminin dalga şekli  $0-T/2$  ve  $T/2-T$  periyotlarında şekil 5.19 ve şekil 5.20 de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.19



Şekil 5.20

Bu durumda diyot, girişin negatif yarısı boyunca iletimde olacak ve  $V_o$  aynen görünecektir. Buna göre ideal diyot için dc düzeyi, bir tam periyot için aşağıdaki gibi verilir.

$$V_{dc} = -0.318V_m = -0.318 \times 20 = -6.36\text{ V}$$

Ayrıca Si diyot için dc düzeyi ise, bir tam periyot için aşağıdaki gibi verilir.

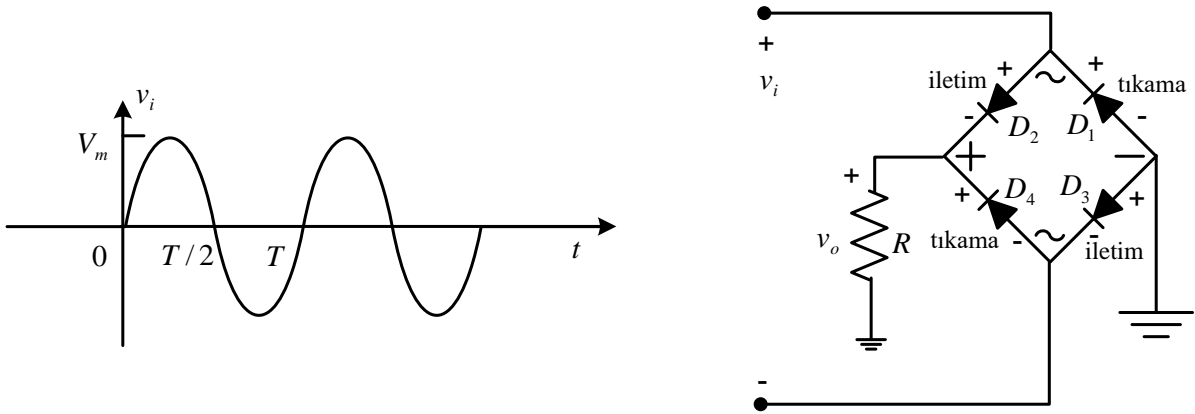
$$V_{dc} = -0.318(V_m - 0.7) = -0.318(20 - 0.7) = -0.318 \times 19.3 \cong -6.14 \text{ V}$$

Sonuçta dc düzeyindeki düşme 0.22V yani %3.5 kadardır. Diyotun ters tepe gerilimi(PIV-Peak Inverse Voltage) anma (nominal) değeri, doğrultucu sistemlerin tasarımında önemlidir. Bunun, geri öngerilimleme bölgesinde çalışıldığında, aşılmaması gereken anma gerilim değeri olduğunu, aksi takdirde diyotun, zener çık bölgesine gireceği unutulmamalıdır. Yarım dalga doğrultucu için gereken PIV anma değeri, Kirchhoff gerilim yasası uygulandığında, uygulanan gerilimin tepe değerine eşit olması veya onu aşmaması gerektiği görülür. Buradan;

$$(PIV)_{\text{anma değeri}} = (V_m)_{\text{yarım dalga doğrultucu}}$$

### 5.5 Tam dalga doğrultma(köprü doğrultucu)

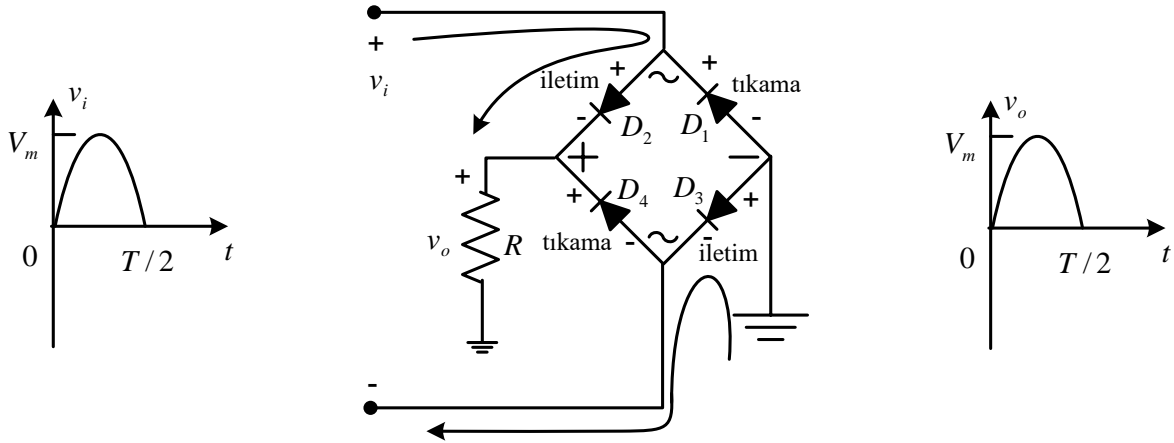
Bunun için kullanılan en yaygın devre, köprü düzeninde bağlanmış dört diyotlu devre şekil 5.21 de gösterilmiştir. Girişin polaritesi (kutuplanması),  $t$  nin sıfırdan  $T/2$  ye kadar olan periyotta, şekil 5.22 de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.21

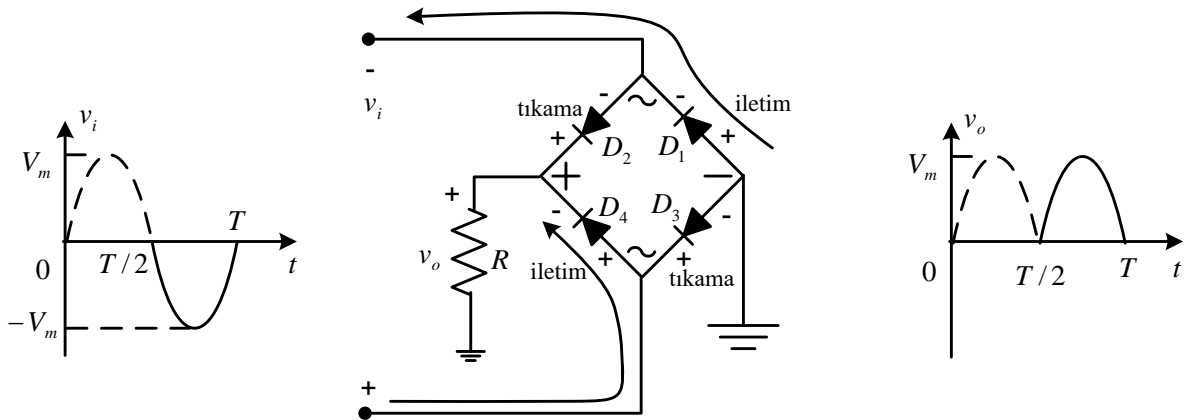
Girişin pozitif bölgesinde,  $D_2$  ve  $D_3$  diyotları iletimde iken, negatif bölgesinde  $D_1$  ve  $D_4$  diyotları iletimdedir. Diyotlar ideal kabul edildiği için,  $R$  yük direnci üzerindeki yük gerilimi  $v_o = v_i$  olur. Her iki periyot için iletim durumları şekil 5.22 ve şekil 5.23 de gösterilmiştir.

$0-T/2$  aralığında;



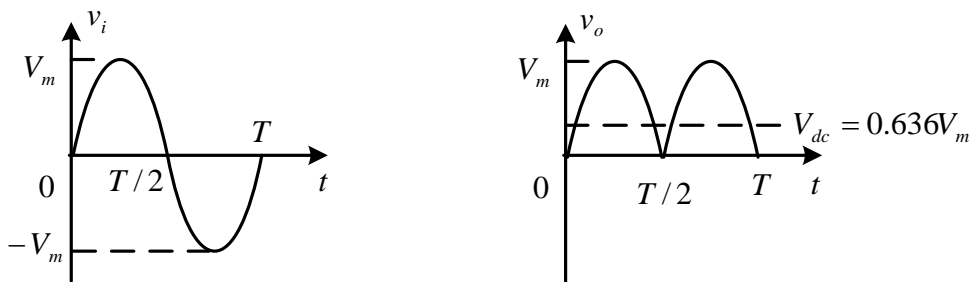
Şekil 5.22

$T/2-T$  aralığında;



Şekil 5.23

Bu iki aralık için yapılan analiz neticesinde elde edilen çıkış dalga biçimi şekil 5.24 deki gibi olup, bunun integrasyonu sonucunda elde edilen doğru gerilim(ortalama değer) aşağıdaki gibi hesaplanır.



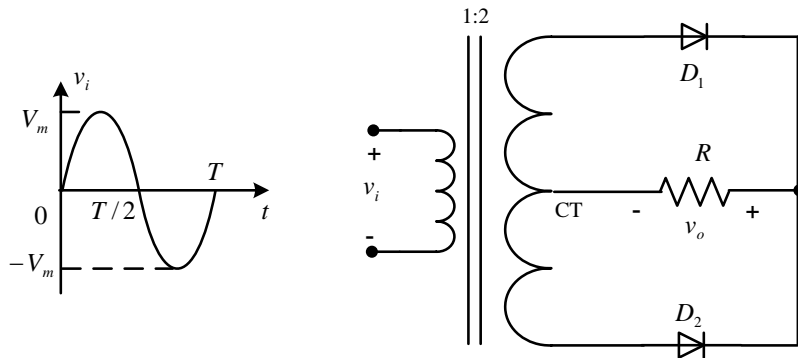
Şekil 5.24

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot V_m (-\cos \omega t) \Big|_0^{T/2=\pi} = -\frac{V_m}{\pi} (-1-1) = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m$$

Yukarıdaki elde edilen gerilim  $V_m \gg 2V_T$  olması durumunda geçerlidir. Eğer  $V_m$ ,  $2V_T$  ye yakın ise, ortalama değer  $V_{dc} \cong 0.636(V_m - 2V_T)$  şeklinde hesaplanır. Her bir ideal diyot için gereken PIV, giriş sinyalinin pozitif bölgesindeki tepe değerinden elde edilebilir. Tam dalga köprü doğrultucu için  $PIV = V_m$  dir.

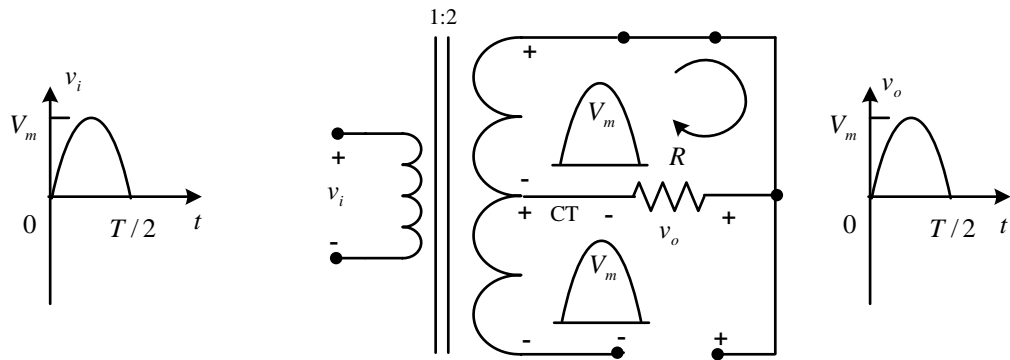
### 5.6 Tam dalga doğrultma(orta uçlu transformatörlü doğrultucu)

İkinci ve yaygın olarak kullanılan, orta uçlu bir transformatör ve iki adet diyottan meydana gelen tam dalga doğrultucu şekil 5.25 de gösterilmiştir.



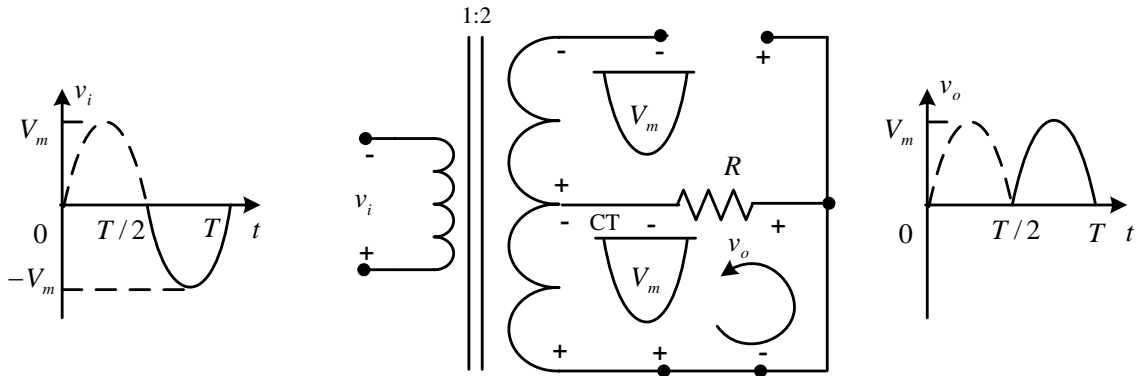
Şekil 5.25

Transformatörün primer sargısına uygulanan  $v_i$  giriş geriliminin pozitif kısmı etkin iken,  $v_o$  çıkış gerilimi şekil 5.26 daki gibi olur.



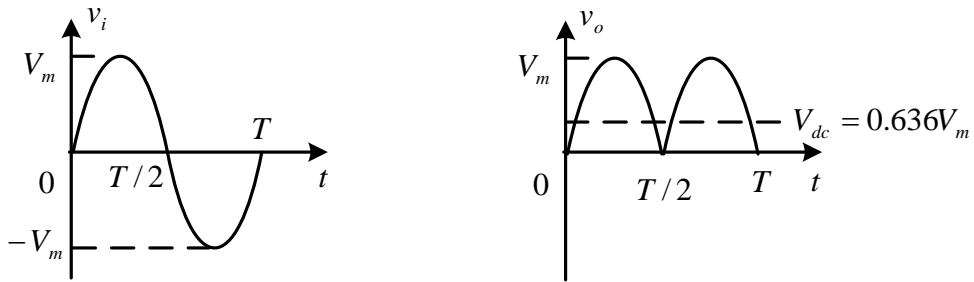
Şekil 5.26

Girişin negatif bölümü etkin iken ise devre şekil 5.27 daki gibi olur.



Şekil 2.27

Sonuçta yük üzerindeki gerilimin dalga şekli şekil 5.28 de verilir ve ortalama değeri de aşağıdaki gibi hesaplanır.



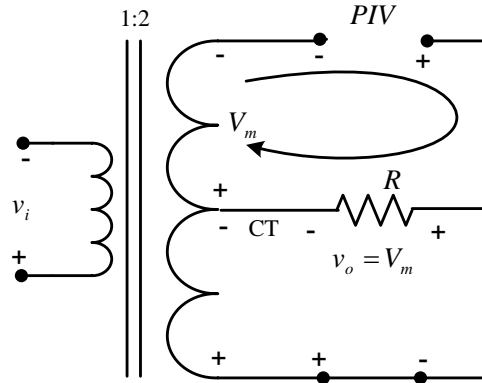
Şekil 5.28

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot V_m (-\cos \omega t) \Big|_0^{T/2=\pi} = -\frac{V_m}{\pi} (-1 - 1) = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m$$

Şekil 5.29 daki devreye Kirchhoff gerilim yasasını uygularsak, üç uçlu transformatörlü tam dalga doğrultucunun PIV değerini de aşağıdaki gibi bulabiliriz.

$$V_{\text{sekonder}} + V_R - PIV = 0 \Rightarrow PIV = V_m + V_m = 2V_m$$





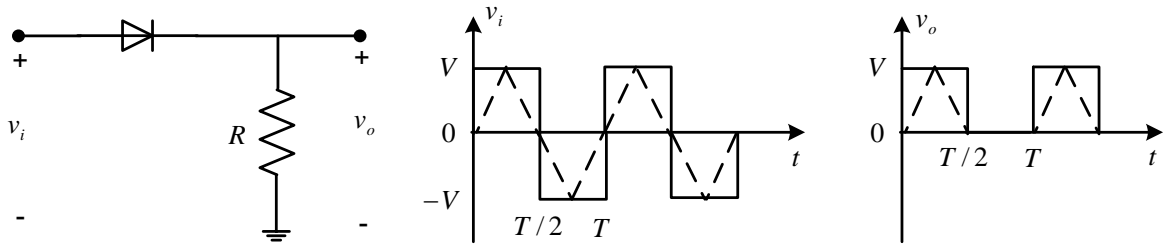
Şekil 5.29

### 5.7 Kırpıcı devreler

Değişken dalga biçiminin geri kalan kısmını bozmadan, giriş sinyalinin bir bölümünü kırpma özelliğine sahip olan devrelere kırpıcı devreler denir. Yarım dalga doğrultucu, bir diyotlu kırpıcının en basit örneklerinden biridir. Devre, diyotun yönüne bağlı olarak giriş sinyalinin pozitif veya negatif bölgesini kırpar. Kırpıcılar seri ve paralel olmak üzere ikiye ayrılırlar. Seri devrelerde diyot yüke seri, paralel devrelerde ise paralel bağlıdır.

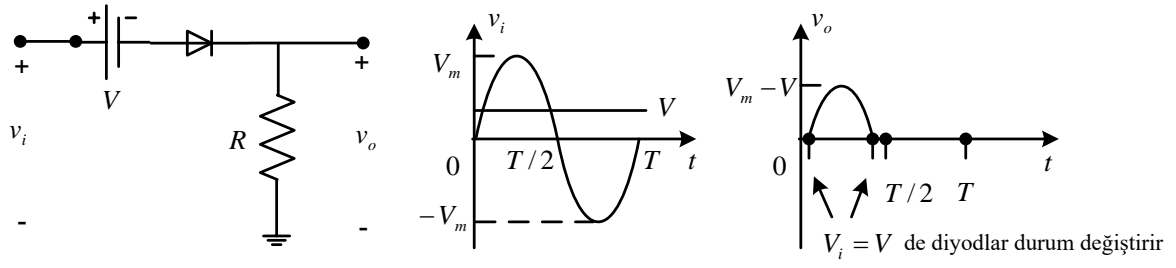
#### 5.7.1 Seri kırpıcılar

Seri kırpıcılarda diyot yüke aşağıdaki gibi seri bağlıdır.

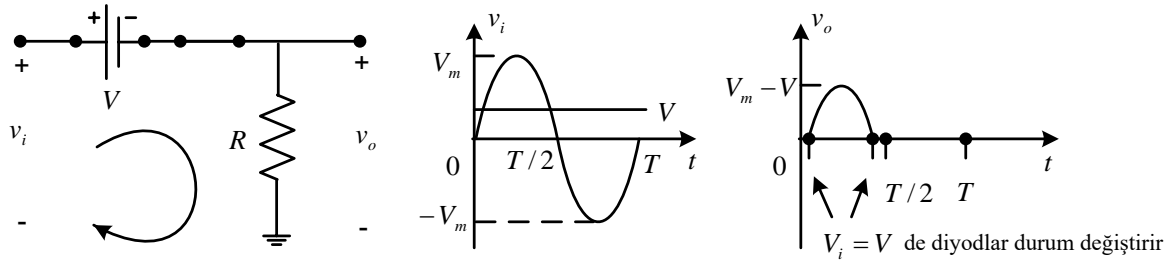


Şekil 5.30

**Örnek:** Şekil 5.31 deki devrede  $V_o$  çıkışını, ideal diyot için bulunuz.



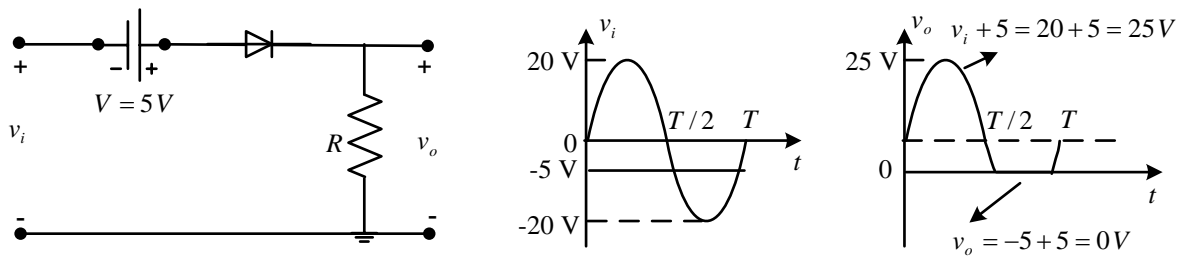
Şekil 5.31



Şekil 5.32

$$-v_i + V + v_o = 0 \Rightarrow v_o = v_i - V$$

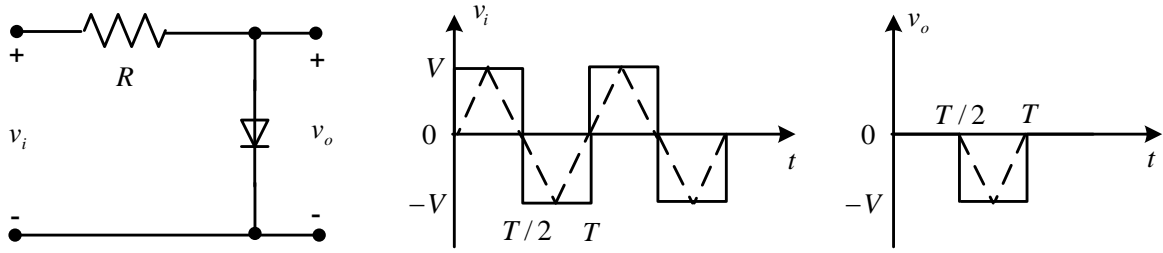
**Örnek:** Şekil 5.33 deki seri kırpıcı devrenin çıkışını belirleyiniz.



Şekil 5.33

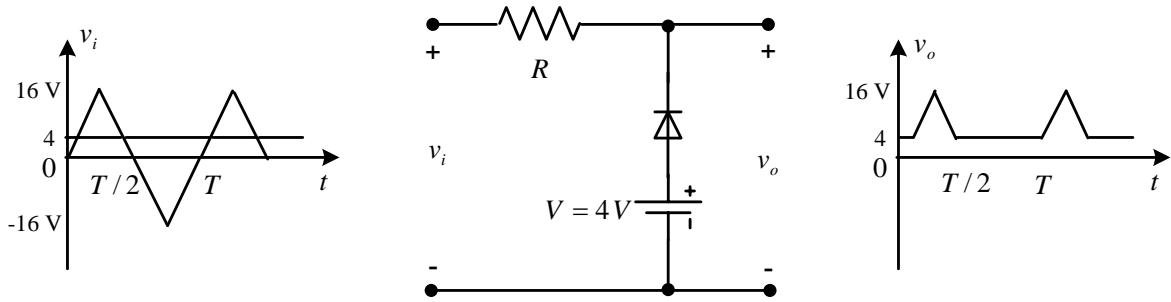
### 5.7.2 Paralel kırpıcılar

Paralel kırpıcılarda diyot yüke aşağıdaki gibi paralel bağlıdır.



Şekil 2.34

**Örnek:** Şekil 5.35 deki devrenin girişine yine aynı şekilde gösterilen testere dişi bir işaret uygulandığında, devrenin çıkış geriliminin zamana göre değişimini çiziniz.



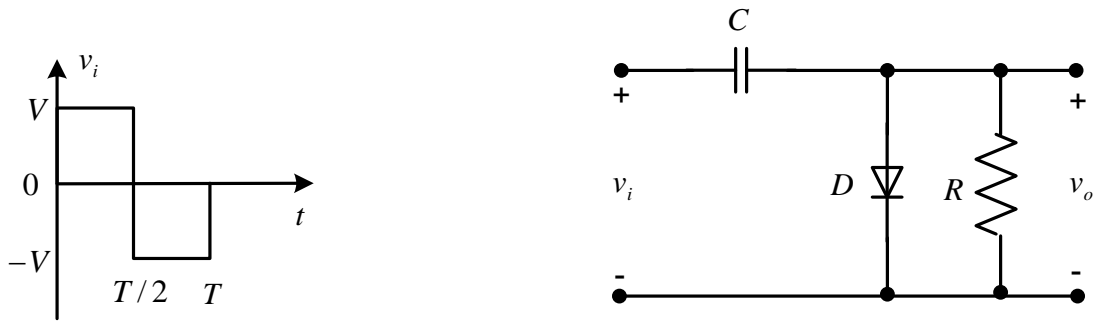
Şekil 5.35

$v_i = 4V$  olana kadar 4 voltluk dc kaynağın etkisi ile diyot iletimde ve çıkış gerilimi  $v_o = 4V$  dur.  $v_i > 4V$  dan sonra diyot tıkamada ve direnç üzerinde bir gerilim düşümü olmadığından dolayı ( $i_d = 0$ ), giriş gerilimi aynen çıkış üzerinde gözükülecektir ve  $v_o = v_i$  olur.

## 5.8 Kenetleme devreleri

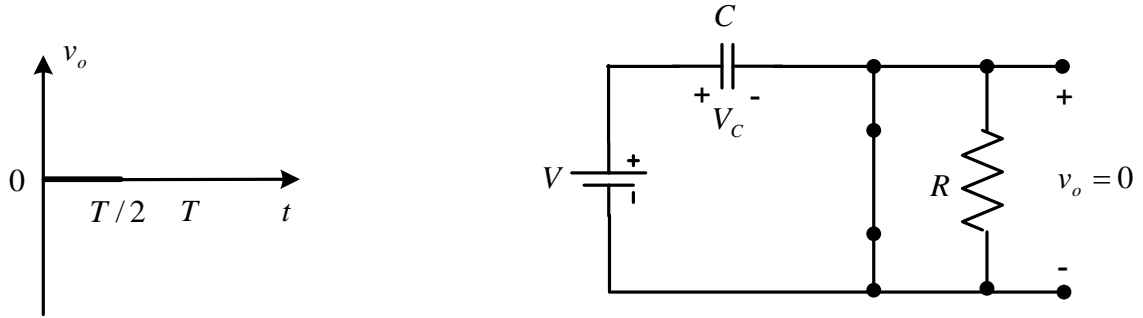
Kenetleyici, bir sinyali (işareti) farklı bir dc düzeyine “kenetleyebilen” bir devredir. Devrede bir kondansatör, bir diyot ve bir direnç bulunmak zorundadır. Ancak ek bir kayma elde etmek için bağımsız bir dc kaynak da kullanılıyor olabilir.

$R$  ve  $C$  nin değeri,  $\tau = R.C$  zaman sabiti, kondansatördeki gerilim diyotun iletim durumunda olmadığı zaman aralığı içerisinde, önemli ölçüde boşalmasını önleyecek büyüklükte olacak şekilde seçilmelidir. Şekil 5.36 daki devrenin analizi boyunca, pratik açıdan kondansatörün zaman sabitinin 5 katı kadar bir sürede dolduğunu ve boşaldığını kabul edeceğiz.



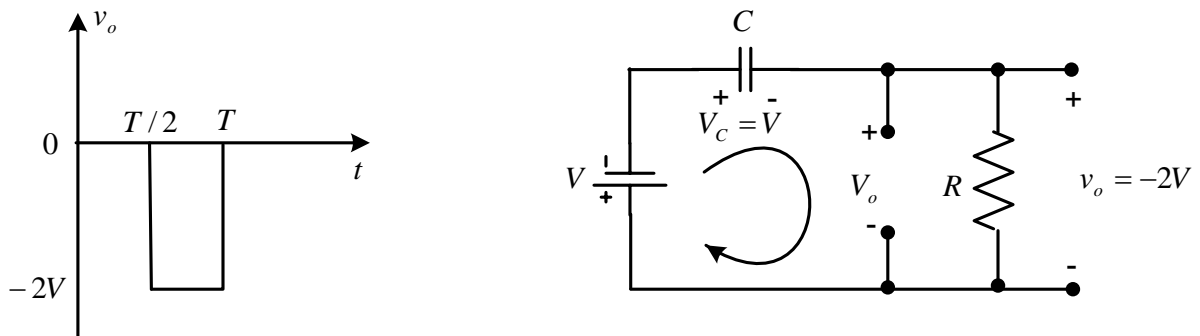
Şekil 5.36

$0-T/2$  aralığında çıkış geriliminin ve devrenin durumu şekil 5.37 de gösterilmiştir. Bu periyotta, diyot kısa devre olduğundan direnç üzerinden akım akmaz. Akımın tamamı diyot üzerinden akar ve bu durumda diyot kısa devredir.



Şekil 2.37

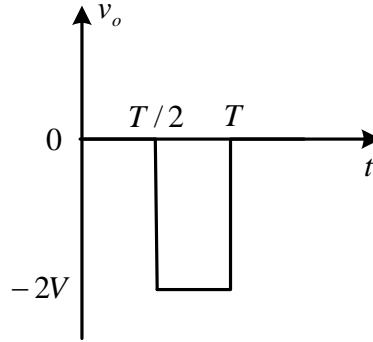
$T/2-T$  aralığında çıkış geriliminin ve devrenin durumu ise şekil 5.38 de gösterilmiştir. Bu periyotta, R tekrar devreye girdiğinden,  $RC$  ile belirlenen  $\tau$  zaman sabiti,  $T/2-T$  periyodundan çok daha büyük olan  $5\tau$  luk bir boşalma periyodu oluşturur. Yaklaşık varsayımlla, kondansatörün tüm yükünü ve dolayısı ile gerilimini ( $Q = V.C$  veya  $V = Q/C$ ) bu süre içinde tuttuğu kabul edilebilir. Bu durumda Kirchhoff gerilim yasası, devredeki girişe ait çevreye uygulandığında aşağıdaki sonuç elde edilir.



Şekil 5.38

$$V + V_C + v_o = 0 \Rightarrow v_o = -2V$$

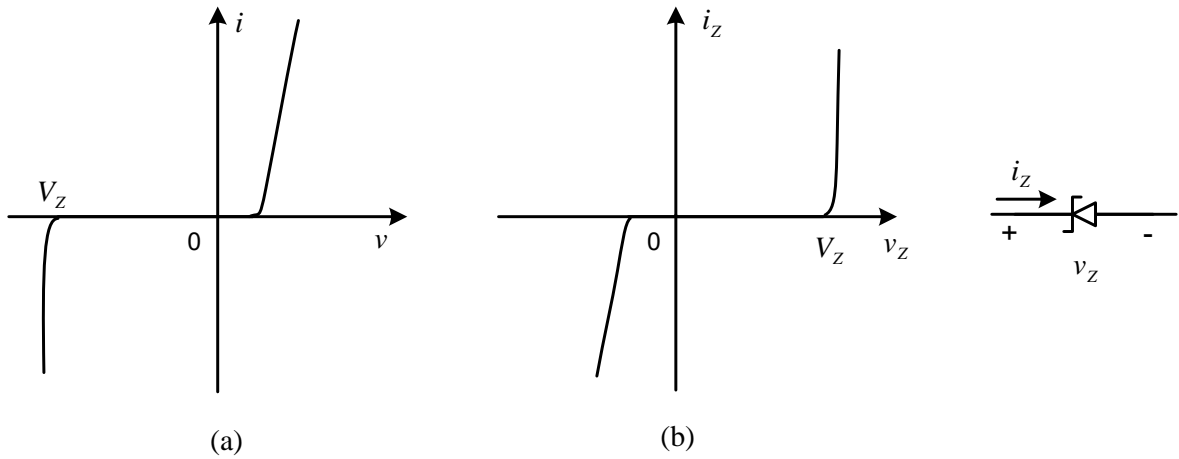
Sonuçta  $0-T$  aralığında çıkış dalga biçimi şekil 5.39 deki gibi olur.



Şekil 5.39

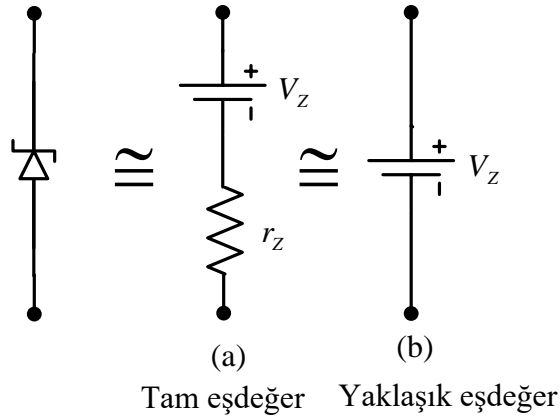
### 5.9 Zenerler

Zener diyot, zener bölgesinden tam anlamıyla faydalanmak için tasarlanan bir elemandır. Karakteristiği şekil 2.40 daki gibidir. Karakteristiği şekil 2.40(b) de gösterildiği gibi (şekil 2.40(a) nın 0 noktasına göre simetriği), söz konusu bölgeyi vurgulamak için,  $xy$  koordinat düzleminin birinci bölgesinde verirsek, daha önce verilmiş olan silisyum diyot karakteristiği arasında bir benzerlik ortaya çıkar. 0(orijin) dan  $V_Z$  ye kadar herhangi bir gerilim, silisyum diyotda  $V_T$  nin altına düşmesi gibi, bir açık devre eşdeğerine yol açacaktır. Bununla beraber, zener diyot ile silisyum diyotun karakteristikleri arasında, geri öngerilimleme bölgesinde önemli farklılıklar vardır. Silisyum diyot geri öngerilimleme bölgesinde açık devre eşdeğerliliğini korurken, zener diyot geri kayma gerilimine ulaşıldıktan sonra kısa devre durumuna geçer. Dolayısı ile (b) nin birinci bölgesi, aynı şekildeki zener diyot sembolünün yanında görünen polarite ve akım yönüyle tanımlıdır.



Şekil 5.40

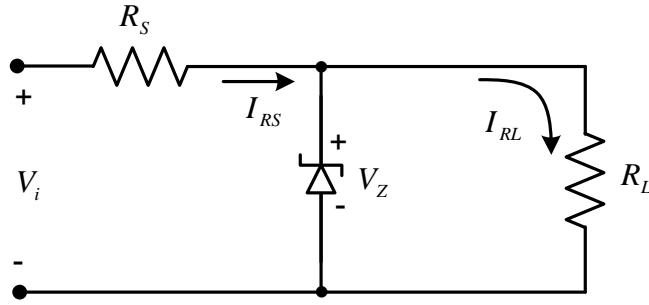
Zener diyotun zener bölgesindeki tam eşdeğer devresi, küçük bir dinamik direnç ve zener potansiyeline eşit bir de kaynaktan oluşur. Ancak uygulamalarda harici dirençler, zener eşdeğeri dirençten oldukça büyük olduğundan, eşdeğer devre şekil 5.41 de gösterildiği gibi sadece zener potansiyeli ile gösterilir.



Şekil 5.41

### 5.10 Zener diyot uygulamaları

Zener diyotun en sık görülen kullanımı, öngerilimleme ve karşılaştırmaya yönelik sabit bir referans gerilimi sağlamaktır. Örneğin  $V_i$  ve  $R_L$  deki değişimlere karşı, yük üzerinde sabit bir  $V_Z$  gerilimi sağlamak için tasarlanmış olan şekil 5.42 deki devreyi inceleyelim.



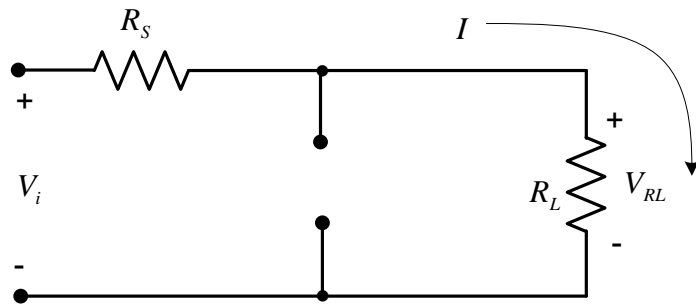
Şekil 5.42

Burada göz önünde bulundurulması gereken iki kavram vardır. Birinci giriş geriliminin sabit olup,  $R_L$  nin değişeceği, ikincisi  $R_L$  nin sabit olup giriş geriliminin değişeceği durumdur.

#### 5.10.1 Sabit $V_i$ , değişken $R_L$

$V_Z$  kayma gerilimi dolayısıyla zener diyotun iletim durumunda olmasını sağlayacak belirli bir direnç değeri aralığı olacaktır.  $R_L$  düşük değerde olursa,  $V_Z$  den daha düşük  $V_{RL}$  gerilimine yol açacak ve şekil 5.43 deki gibi zener diyot tıkama durumunda kalacaktır.

Zener diyotunu çalıştıracak minimum yük direncini (dolayısı ile maksimum yük akımını) belirlemek için aşağıda şekilde gösterildiği gibi zener diyotu çıkaralım ve  $V_{RL} = V_Z$  lik bir yük gerilimine yol açacak  $R_L$  değerini hesaplayalım.



Şekil 5.43

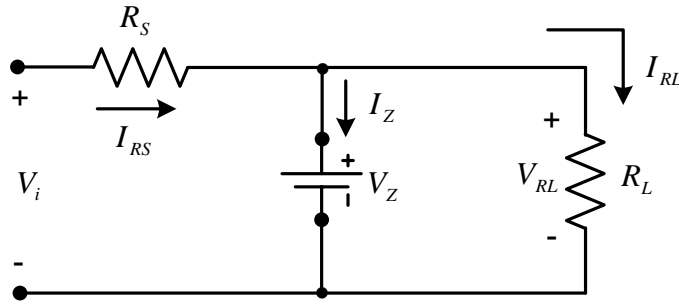
$$-V_i + (R_S + R_L)I = 0 \rightarrow I = \frac{V_i}{R_S + R_L}$$

$$V_{RL} = R_L I \rightarrow I = \frac{V_{RL}}{R_L}$$

$$\frac{V_i}{R_S + R_L} = \frac{V_{RL}}{R_L} \rightarrow V_{RL} = \frac{R_L V_i}{R_S + R_L} = V_Z$$

$$R_L V_i = R_S V_Z + R_L V_Z \rightarrow R_L (V_i - V_Z) = R_S V_Z \rightarrow R_{L\min} = \frac{R_S V_Z}{V_i - V_Z}$$

Bu  $R_L$  değerinden büyük her direnç değeri, şekil 5.44 de gösterildiği gibi zener diyotun çalışmasını (iletime geçmesini) sağlar ve artık diyot  $V_Z$  kaynak eşdeğeri ile aşağıdaki gibi olur.



Şekil 5.44

Bu durumda aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$I_{RL\max} = \frac{V_{RL}}{R_{L\min}} = \frac{V_Z}{R_{L\min}}$$

Zener diyot bir kere iletim durumuna geçtikten sonra  $R_S$  üzerindeki gerilim düşümü;

$V_{RS} = V_i - V_Z$  ile sabit kalır ve  $I_{RS}$  akımı

$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{R_S}$  ile sabit kalır.

Zener akımı ise düğüm denkleminde  $I_Z = I_{RS} - I_{RL}$  olarak yazılabilir.



Bu arada  $I_{RS}$  sabit olduğu için  $I_{RL}$  maksimumken minimum bir  $I_Z$  ye ve  $I_{RL}$  minimumken maksimum bir  $I_Z$  ye yol açar.

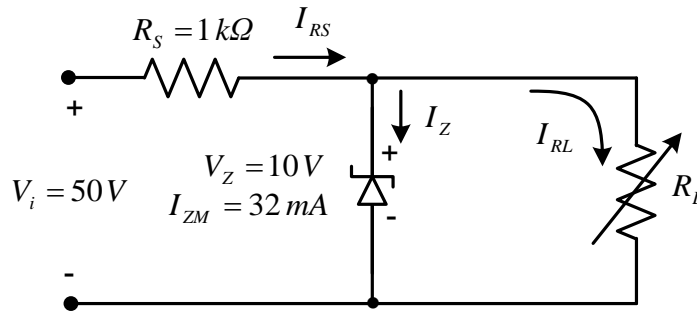
$I_Z$ ,  $I_{Z\max}$  ile sınırlı olduğundan,  $R_L$  nin ve dolayısı ile  $I_{RL}$  nin değer aralığını etkilemektedir.

$I_Z$  yerine  $I_{Z\max}$  konursa minimum  $I_{RL}$ ;

$I_{RL\min} = I_{RS} - I_{Z\max}$  olarak bulunur ve maksimum yük direnci;

$R_{L\max} = \frac{V_Z}{I_{RL\min}}$  şeklinde bulunur.

**Örnek:** Şekil 5.45 deki devre için  $V_{RL}$  yi 10 voltta tutacak  $R_L$  ve  $I_{RL}$  değer aralığını bulun. Diyotun maksimum güç anma değerini hesaplayın.



Şekil 5.45

Zener diyotu çalışır duruma getirecek  $R_L$  değerini hesaplamak için;

$$R_{L\min} = \frac{R_S \cdot V_Z}{V_i - V_Z} = \frac{(1) k\Omega \times (10) V}{(50 - 10) V} = \frac{10 \times 10^3}{40} = 250 \Omega$$

$R_S$  direnci üzerindeki gerilim;

$$I_{RL\max} = \frac{V_{RL}}{R_{L\min}} = \frac{V_Z}{R_{L\min}} = \frac{10 V}{250 \Omega} = 40 mA$$

$$V_{RS} = V_i - V_Z = 50 - 10 = 40 V$$

Buradan  $I_{RS} = \frac{V_{RS}}{R_S} = \frac{40V}{1k\Omega} = 40mA$

Minimum  $I_{RL}$  değeri;

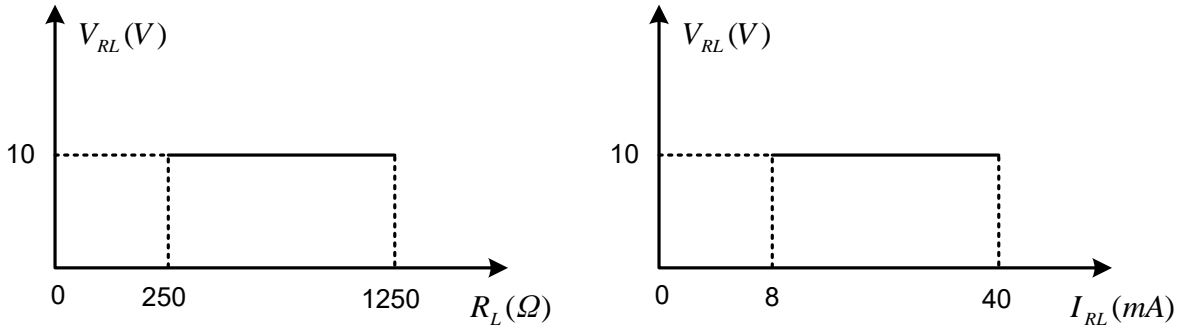
$$I_{RL\min} = I_{RS} - I_{ZM} = 40 - 32 = 8mA$$

Maximum  $R_L$  değeri;

$$R_{L\max} = \frac{V_Z}{I_{RL\min}} = \frac{10V}{8mA} = 1.25k\Omega$$

$$P_{\max} = V_Z \times I_{Z\max} = 10(V) \times 32(mA) = 320mW$$

$V_{RL}$  nin,  $R_L$  ve  $I_{RL}$  ye göre grafiği şekil 5.46 da açık bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.46

### 5.10.2 Sabit $R_L$ , değişken $V_i$

İlk çizdiğimiz devrede  $R_L$  nin sabit değerleri için  $V_i$  gerilimi zener diyotu çalıştıracak büyüklükte olmalıdır. Çalıştırma gerilimi;

$$V_{RL} = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R_S} \rightarrow V_{i\min} = \frac{(R_L + R_S)}{R_L} V_Z \text{ bulunur.}$$

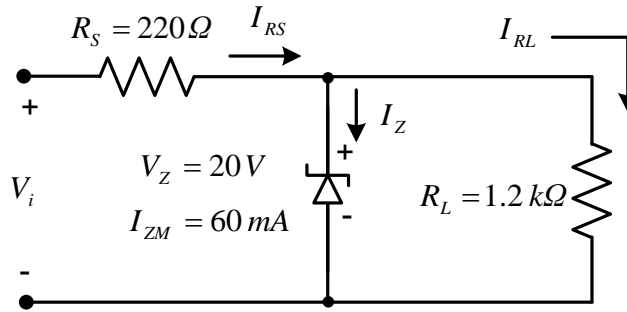
Maximum  $V_i$  değeri, maximum zener akımı  $I_{ZM}$  ile sınırlıdır.

$$I_{ZM} = I_{RS} - I_{RL} \text{ olduğundan, } I_{RS \max} = I_{ZM} + I_{RL}$$

$$I_{RL} = \frac{V_Z}{R_L} \text{ den sabit ve } I_{ZM}, \text{ maximum } I_Z \text{ değeri olduğundan}$$

$$V_{i \max} = I_{RS \max} R_S + V_Z \text{ ile verilir.}$$

**Örnek:** Şekil 5.47 deki devrede zener diyotu iletim durumunda tutacak  $V_i$  değer aralığını bulunuz.



Şekil 5.47

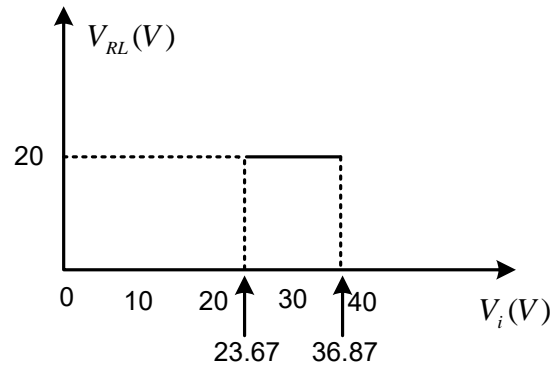
$$V_{i \min} = \frac{(R_L + R_S)}{R_L} \cdot V_Z = \frac{(1200 + 220)}{1200} \cdot 20 = 23.67 \text{ V}$$

$$I_{RL} = \frac{V_{RL}}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{20 \text{ V}}{1.2 \text{ k}\Omega} = 16.67 \text{ mA}$$

$$I_{RS \max} = I_{ZM} + I_{RL} = 60 + 16.67 = 76.67 \text{ mA}$$

$$V_{i \max} = I_{RS \max} R_S + V_Z = 76.67 \text{ (mA)} \times 0.22 \text{ (k}\Omega) + 20 \text{ (V)} = 36.87 \text{ V}$$

$V_{RL}$  nin  $V_i$  ye göre grafiği şekil 5.48 da açık bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.48

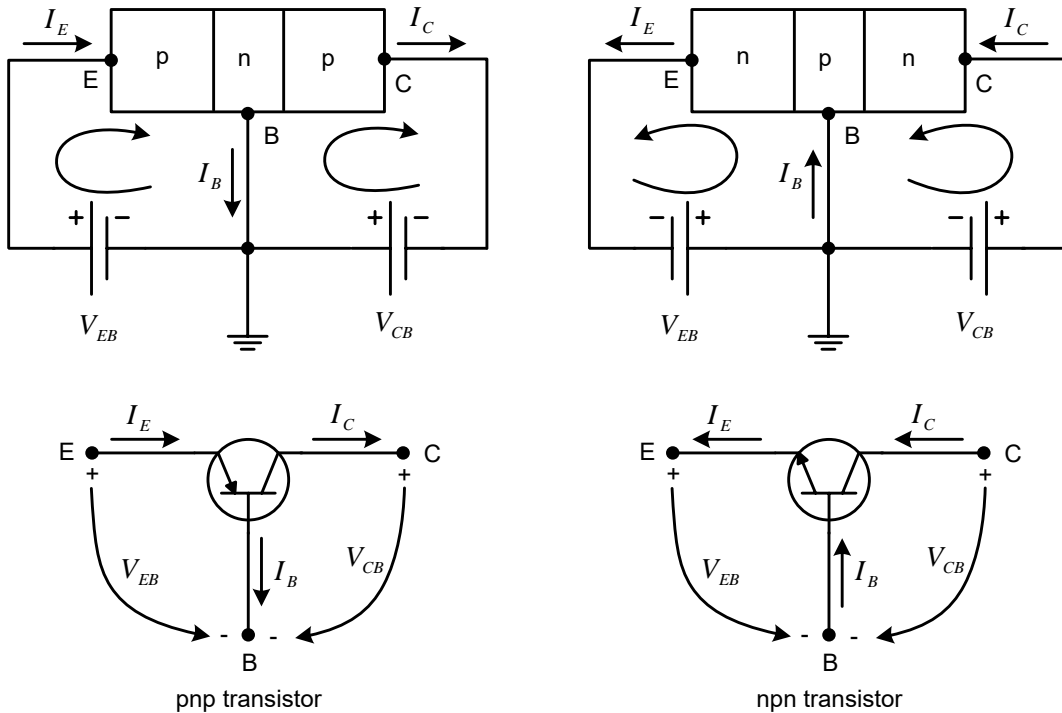
Bu örnekte elde edilen sonuçlar, sabit bir  $R_L$  ye sahip bir devrede 23.67 (V) - 36.87 (V) aralığında değişen giriş gerilimi için, çıkış geriliminin 20 voltta sabit kalacağını gösterir.

## BÖLÜM 6. İKİ KUTUPLU JONKSİYON TRANSİSTORLARI (BJT)

Transistor ya iki n- ve bir p- tipi malzeme tabakasından veya iki p- ve bir n- tipi malzeme tabakasından oluşan üç katmanlı yarı iletken bir elemandır. İlkine npn, ikincisine pnp transistorü denir. Üç uçlu bir eleman olup, bu uçlar, kollektör, emetör ve baz olarak adlandırılır.

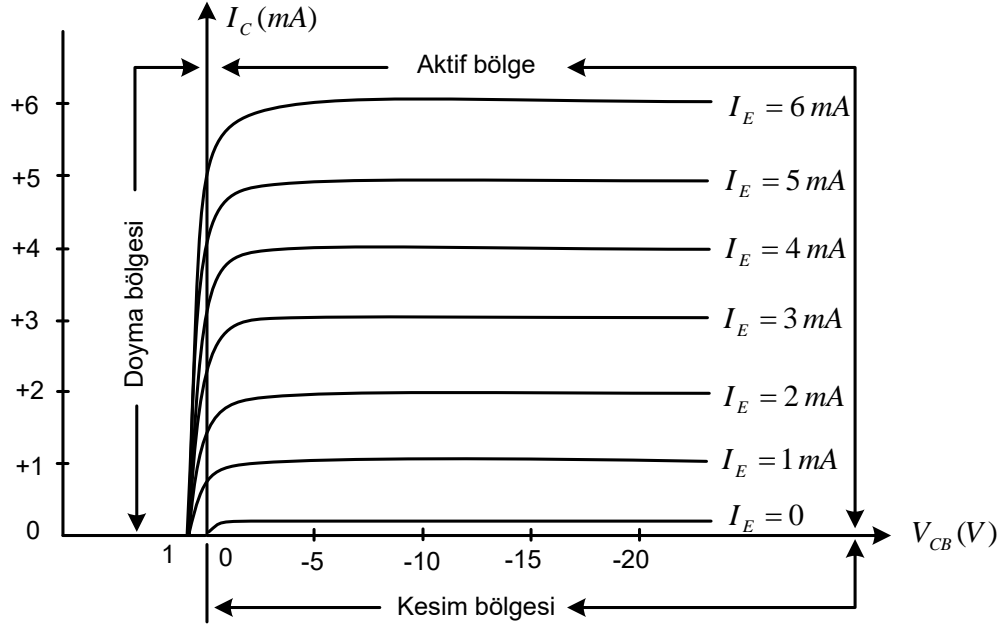
### 6.1 Ortak bazlı devre

Bu tip devrelerde baz ucu, devrenin giriş ve çıkışı için ortaktır. Ortak bazlı devrelerde uygulanan potansiyeller, baz potansiyeline göre  $V_{EB}$  ve  $V_{CB}$  şeklinde yazılırlar. Yani indisin ikinci harfi daima transistorun devre tipini belirtir. Her durumda indisin ilk harfi daima yüksek potansiyeli tanımladığı için, pnp transistoru için  $V_{EB}$  pozitif,  $V_{CB}$  negatif, npn transistoru için ise  $V_{EB}$  negatif,  $V_{CB}$  pozitif olduğu Şekil 6.1 de gösterilmiştir. Ortak bazlı pnp transistorun davranışını temsil etmek için iki grup karakteristik gereklidir. Bunlar, "Sürme noktası"(giriş) ve "kollektör"(çıkış) grubudur. Şekil 6.2 deki çıkış veya kollektör karakteristiği, kollektör (çıkış) akımını, kollektör-baz gerilimine ve emetör (giriş) akımına ilişkilendirir.



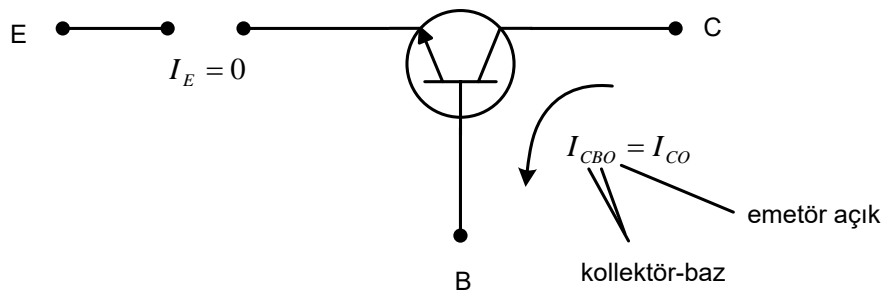
Şekil 6.1

Kollektör karakteristiğinin üç temel bölgesi vardır; iletim, kesim, doyma. İletim bölgesinde kollektör jonksiyonu ters yönde, emetör jonksiyonu ise ileri yönde öngerilimlenmiştir.



Şekil 6.2 Ortak bazlı devrenin kollektör(çıkış) karakteristiği

Emetör akımı ( $I_E$ ) sıfır düzeyindeyken, kollektör akımı ters doyma akımı  $I_{CO}$  dan oluşmaktadır.  $I_{CO}$  akımı, Şekil 6.2 den de görüldüğü üzere,  $I_C$  nin düşey eksen ölçeğine (miliamper) göre o kadar çok küçüktür ki (mikroamper),  $I_C = 0$  ile aynı yatay eksen de görülmektedir. Ortak bazlı devrelerde  $I_E = 0$  durumundaki  $I_{CO}$  akımı çoğunlukla  $I_C$  olarak gösterilir(Şekil 6.3).



Şekil 6.3

Sabit  $V_{CB}$  değerleri için,  $I_C$  deki küçük bir değişimin  $I_E$  deki küçük bir değişime oranı, ortak bazlı kısa devre yükseltme faktörü adıyla anılır ve aşağıdaki gibi  $\alpha$  ile gösterilir.

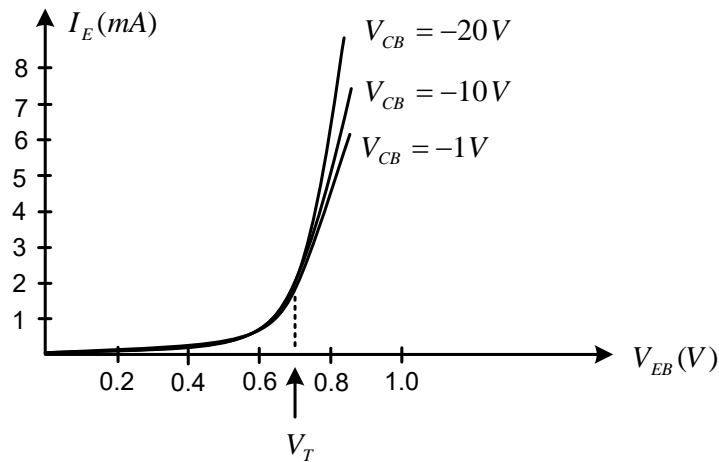
$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{V_{CB}=\text{sabit}}$$

Kısa devre terimi  $\alpha$  belirlendiği anda yükün kısa devre yapıldığını gösterir. Tipik  $\alpha$  değerleri 0,90 ve 0,998 arasındadır. Pratik uygulamaların çoğunda aşağıdaki formülle yaklaşık olarak elde edilir.

$$\alpha \cong \frac{I_C}{I_E}$$

Emetör akımı sıfırın üzerinde çıkınca kollektör akımı yaklaşık olarak emetör akımını izler. Ayrıca  $V_{CB}$  nin, iletim bölgesinde kollektör akım üzerinde neredeyse ihmal edilebilir bir etkisi vardır. Eğrilerden de görüleceği üzere iletim bölgesinde  $I_C$  ve  $I_E$  arasındaki ilişki  $I_C \cong I_E$  olarak ifade edilebilir.

Şekil 6.4 deki  $I_E - V_{EB}$  giriş karakteristiğinde, kollektörün sabit  $V_{CB}$  geriliminde bulunması durumunda, emetör-baz potansiyeli arttıkça emetör akımı da artmaktadır. DC çalışmada ileri öngerilimli baz-emetör jonksiyonu için  $V_{EB}$  yaklaşık olarak 0,7 V ele alınacaktır.



Şekil 6.4 Ortak bazlı devrenin sürme noktası (giriş) karakteristiği

**Örnek:** Yukarıdaki karakteristikleri kullanmak suretiyle;

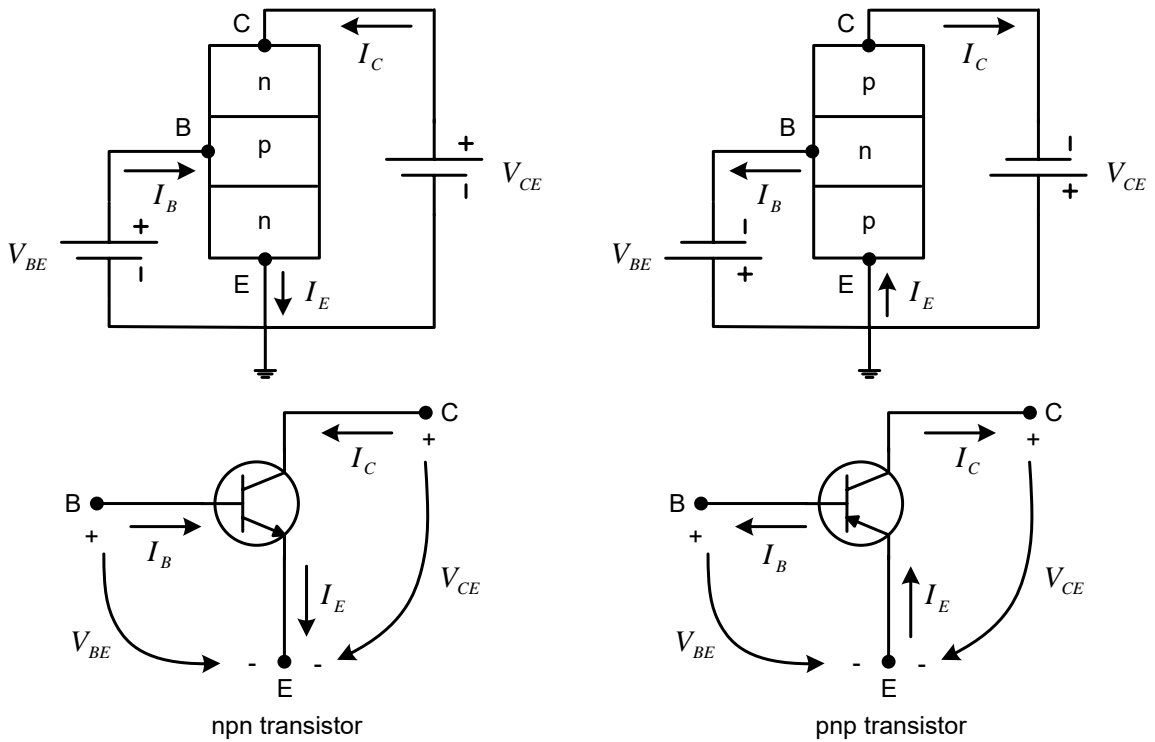
- $I_E = 3 \text{ mA}$  ve  $V_{CB} = -10 \text{ V}$  olursa akacak olan  $I_C$  kollektör akımını bulunuz.
- $V_{EB} = 750 \text{ mV}$  ve  $V_{CB} = -10 \text{ V}$  olursa akacak olan  $I_C$  kollektör akımını bulunuz.
- $I_C = 5 \text{ mA}$  ve  $V_{CB} = -1 \text{ V}$  için  $V_{EB}$  gerilimini bulunuz.

**Çözüm:**

- $I_C = I_E = 3 \text{ mA}$
- İkinci (giriş) karakteristiklerinde  $V_{EB} = 750 \text{ mV}$  ve  $V_{CB} = -10 \text{ V}$  un kesişme noktası  $I_E = 3.5 \text{ mA}$ , böylece  $I_C = I_E = 3.5 \text{ mA}$  bulunur.
- $I_C = I_E = 5 \text{ mA}$ . Giriş karakteristiğinde  $I_E = 5 \text{ mA}$  ve  $V_{CB} = -1 \text{ V}$  un kesişme noktası da  $V_{EB} = 800 \text{ mV} = 0.8 \text{ V}$  bulunur.

## 6.2 Ortak emetörlü devre

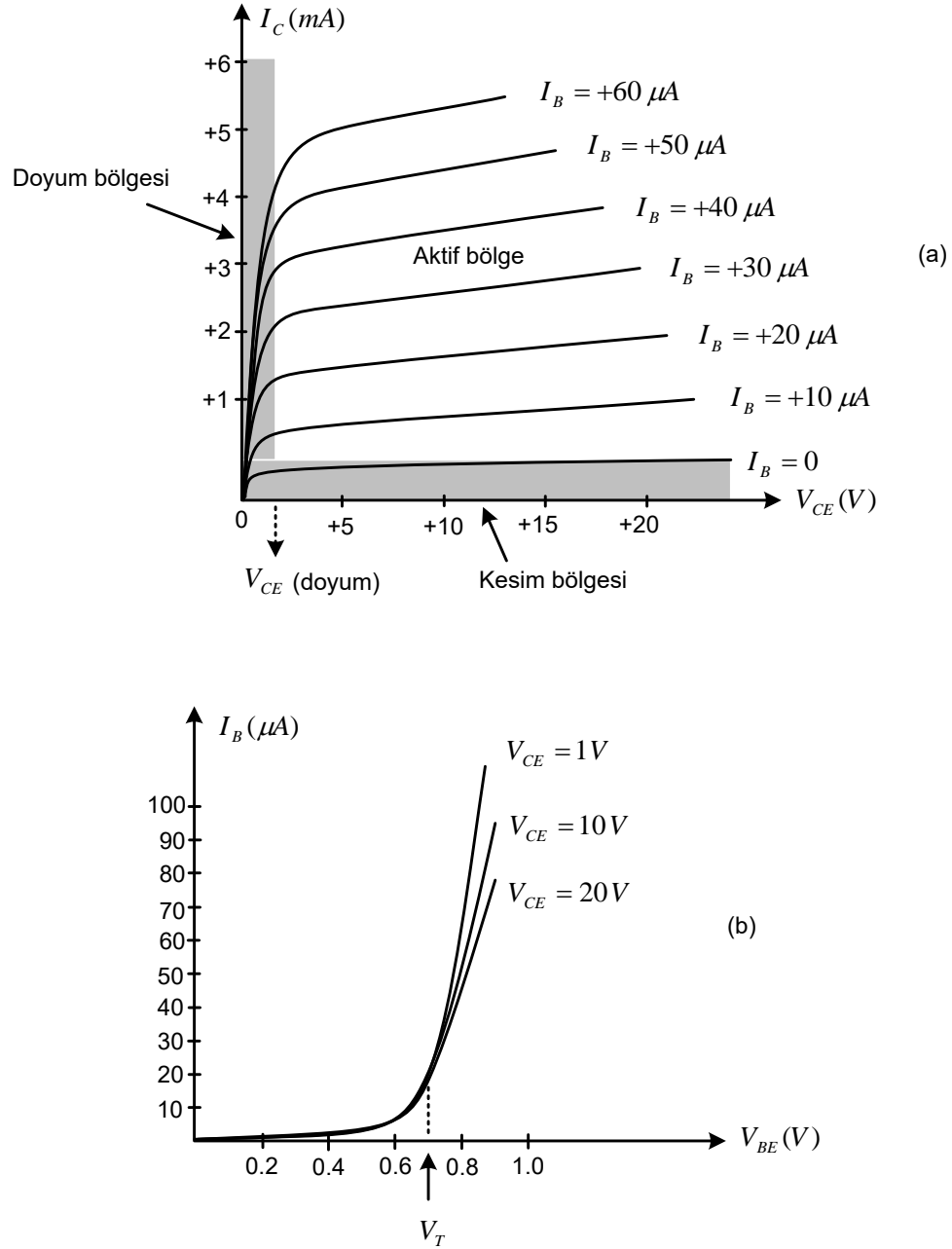
Şekil 6.5 de gösterildiği gibi, emetörün hem giriş hem de çıkış uçlarında ortak olması nedeniyle bu tip devreye ortak emetörlü devre denir.



Şekil 6.5 Ortak emetörlü devre



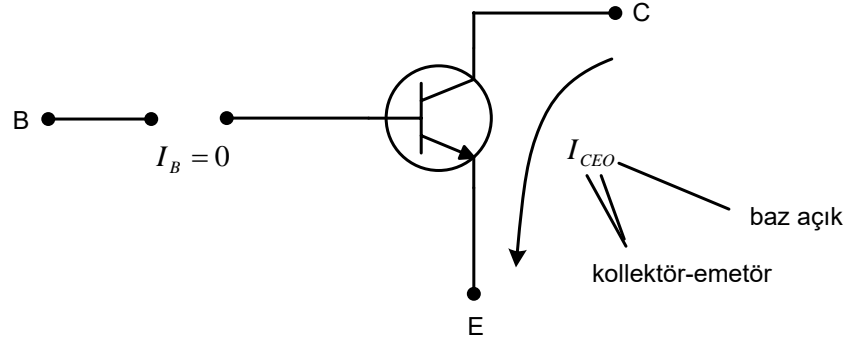
Ortak emetörlü devrenin çıkış karakteristiği, Şekil 6.6(a) da gösterildiği gibi, ( $I_B$ ) giriş akımının değer aralığı için, ( $I_C$ ) çıkış akımının, ( $V_{CE}$ ) çıkış gerilimine göre grafiği olacaktır. Giriş karakteristikleri ise, yine Şekil 6.6(b) de gösterildiği gibi, ( $V_{CE}$ ) çıkış geriliminin değer aralığı için, ( $I_B$ ) giriş akımının ( $V_{BE}$ ) giriş gerilimine göre grafiği olacaktır.



Şekil 6.6 Ortak emetörlü devrenin (a)çıkış ve (b)giriş karakteristikleri

Ortak emetörlü devrenin yükseltme faktörü  $\beta$  ile gösterilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$



Şekil 6.7

Transistor maksimum anma değerleri olarak en az üç maksimum anma değerinden bahsedilir. Bunlar;

- Kollektör kaybı  $P_{C\max}$  (mW)
- Kollektör gerilimi  $V_{CE\max}$  (V) (Ortak emetörlü devre için)
- Kollektör akımı  $I_{C\max}$  (mA)

Güç veya kayıp anma değeri, kollektör gerilimi ve kollektör akımının çarpımından oluşur. Kollektör kaybı, ortak emetörlü ve ortak bazlı devre için devre için aşağıdaki gibi verilir.

$$P_{C\max} = V_{CE} \cdot I_C$$

$$P_{C\max} = V_{CB} \cdot I_C$$

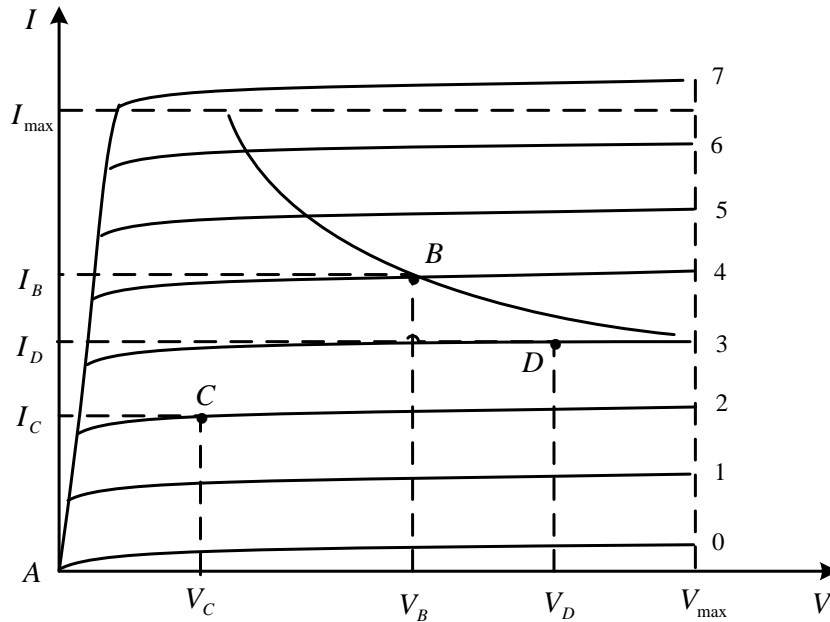
### 6.3 DC öngerilimlemede BJT ler

BJT lerin gerilim ve akım yükseltme veya kontrol(açma-kapama) elemanı olarak kullanabilmek için önce transistorun öngerilimlenmesi gerekir. Öngerilimlemenin nedeni genelde transistoru açık duruma getirmek ve özelde transistoru karakteristiğinin en doğrusal çalıştığı bir bölgesinde çalıştırmaktır.

DC öngerilimleme, transistordan sabit bir akım geçirmek ve transistor üzerinde istenilen bir sabit gerilim düşümü sağlamakla ilgili olduğundan, bu statik bir işlemdir.

Öngerilimlemenin amacı, çalışma noktası(sükûnet veya Q) denen belli bir düzeyde akım ve gerilim sağlamak olduğundan, bu noktanın, transistor karakteristiği üzerinden nasıl seçildiği önemlidir.

Öngerilimleme devresi, transistorun Şekil 6.8 de verilen çalışma noktalarından herhangi birinde veya çalışma bölgesinin herhangi bir noktasında çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmış olmalıdır. Çalışma bölgesi, söz konusu transistorün akım veya gerilim yönünden maksimum sınırlar içindeki alanıdır. Bu sınırlar şekilde  $V_{max}$  ve  $I_{max}$  ile belirlenmiştir. Bu çalışma noktalarından B noktası doğrusal kazanç veya mümkün olan en büyük gerilim ve akım salınımı açısından en iyi çalışma noktası olarak görünür.



Şekil 6.8 Transistorun çalışma bölgeleri

Sıcaklık, transistor akım kazancı ve transistor kaçak akımı gibi transistor karakteristiklerinin değişmesine yol açar. Bu nedenle öngerilim devresinin, devreye belli bir oranda "sıcaklık kararlılığı" sağlayarak transistördeki sıcaklık değişimlerinin çalışma noktasında yarattığı değişmeyi en aza indirmelidir. Çalışma noktasının bu şekilde korunması "kararlılık faktörü(S)" gibi bir parametre ile belirtilebilir. Bu, çalışma noktası akımında sıcaklığa bağlı değişmeyi gösterir.

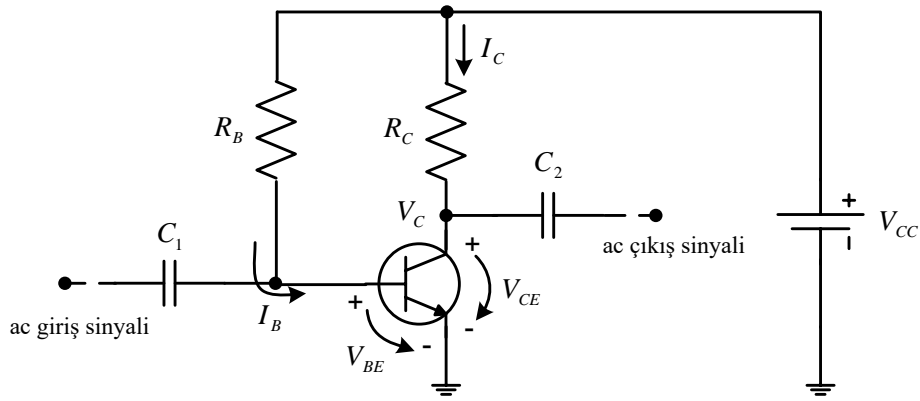
➤ BJT nin doğrusal veya aktif çalışma bölgesinde;

Baz-emetör ileri öngerilimlenir, baz-kollektör ters öngerilimlenir.

- BJT nin kesim bölgesinde;  
Baz-emetör ters öngerilimlenir.
- BJT nin doyum bölgesinde;  
Baz-emetör ileri öngerilimlenir, baz-kollektör ileri öngerilimlenir.

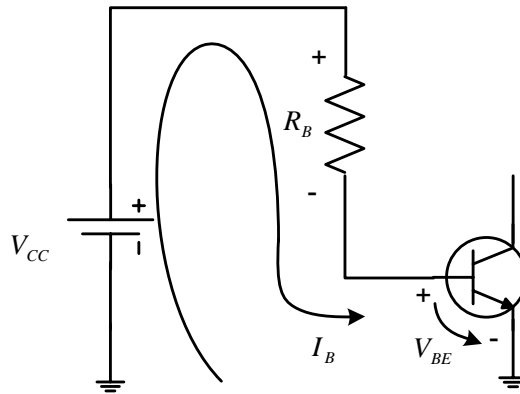
#### 6.4 Sabit öngerilimli devre

BJT nin öngerilimlenmesi baz-emetör ve baz-kollektör dc öngerilimleme çevre denklemleri ayrı ayrı ele alınarak analiz edilir. Aşağıdaki devrede transistorün baz ve kollektörünün dc öngerilim akım ve gerilimlerinin nasıl bulunduğunu inceleyelim.



Şekil 6.9 Ortak emetörlü sabit öngerilimli transistor devresi

Baz-emetör ileri öngerilimlenmesinde, baz-emetör devresine ait çevre denklemi, Şekil 6.10 dan da görüleceği üzere aşağıdaki denklem yazılabilir.



Şekil 6.10 Baz-emetör devresi çevresi

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0$$

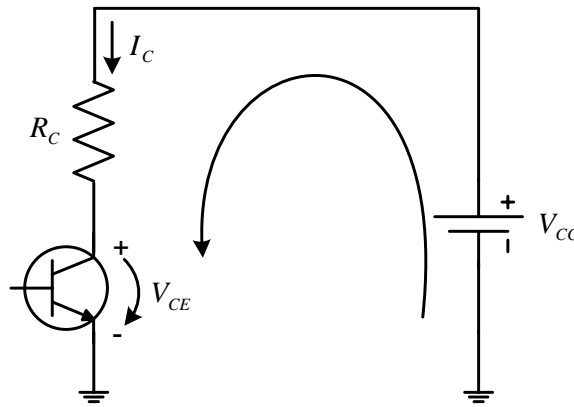
Bu denklemden  $I_B$  baz akımı çekilerek aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

Kaynak gerilimi  $V_{CC}$  ve baz-emetör gerilimi  $V_{BE}$  sabit gerilim değerleri olduğundan, bir baz öngerilim direncinin seçilmesi, baz akımının değerini sabit tutar. Çoğu durumda  $V_{CC} \gg V_{BE}$

olduğundan,  $I_B \cong \frac{V_{CC}}{R_B}$  yazılabilir.

Baz-kollektör ileri öngerilimlenmesinde, kollektör-emetör devresi çevre denklemi Şekil 6.11 den de görüleceği üzere aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 6.11 Kollektör-emetör devresi çevresi

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$$

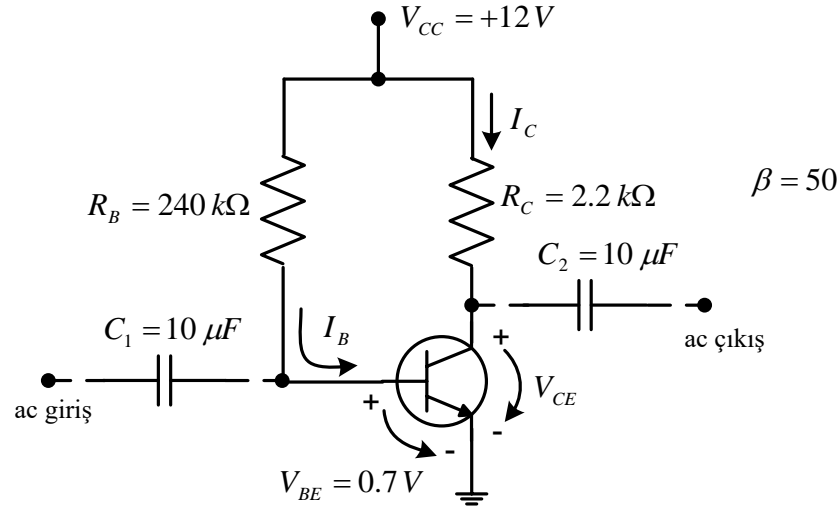
Bu denklemden  $V_{CE}$  kollektör-emetör gerilimini çekilerek aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

$I_E = I_C + I_B$  olup,  $I_B$  akımı da,  $I_C$  ve  $I_E$  ye göre çok küçük olduğundan,  $I_E \cong I_C$  yazılabilir. Transistor akım kazancı  $\beta$  veya  $h_{FE}$ , daha önce ifade edildiği gibi,  $\beta = \frac{I_C}{I_B} = h_{FE}$  olarak verilmişti.

**Devrenin analiz yöntemi:** Baz akımı biraz önce yazılan  $I_B = V_{CC} / R_B$  denkleminde elde edilir. Daha sonra  $\beta = I_C / I_B$  bağıntısı ile  $I_C$  akımı ve daha sonrada  $V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$  denklemi ile  $V_{CE}$  kollektör-emetör gerilimi elde edilir.

**Örnek:** Şekil 6.12 deki devrede dc öngerilimleme gerilim ve akımını bulunuz.



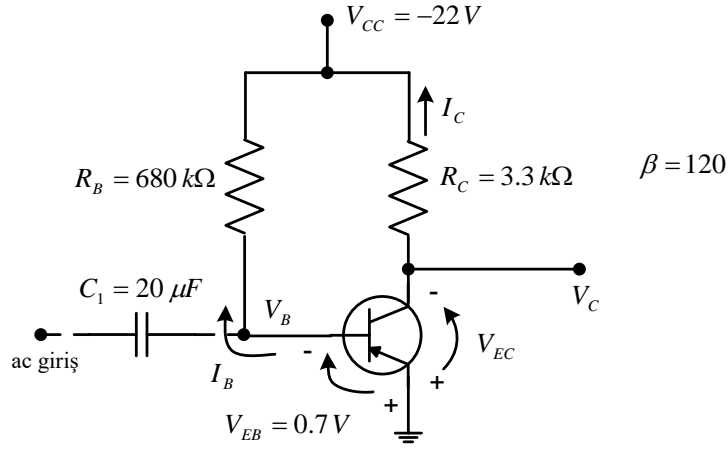
Şekil 6.12

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{(12 - 0.7)V}{240 k\Omega} = 47.08 \mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \times 47.08 \mu A = 2.35 mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 12V - 2.2 k\Omega \times 2.35 mA = 6.83V$$

**Örnek:** Şekil 6.13 deki devrede  $V_C$  kollektör gerilimi ve  $I_C$  kollektör akımını bulunuz.



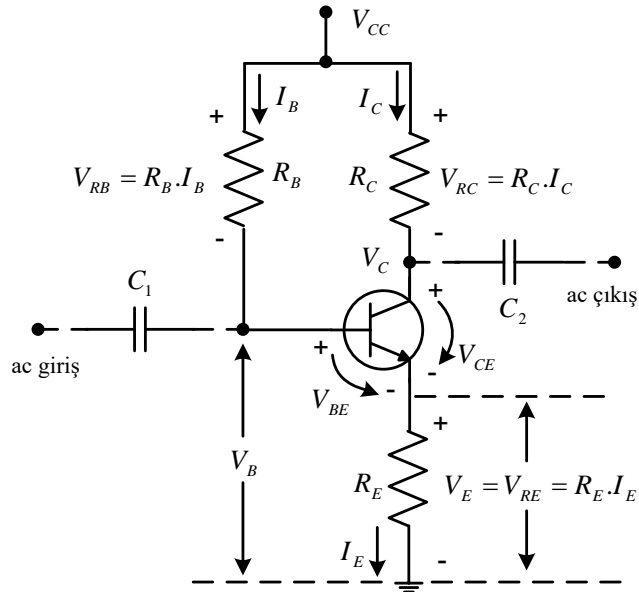
Şekil 6.13

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{(22 - 0.7)V}{680 k\Omega} = 31.32 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 120 \times 31.32 \mu A = 3.76 mA$$

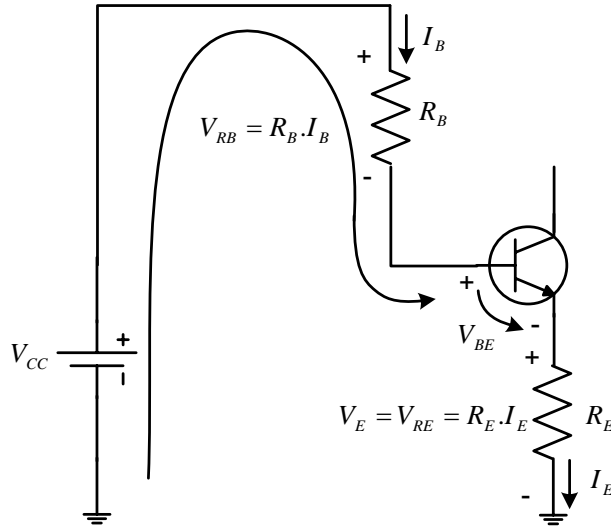
$$V_C = V_{CE} = -(V_{CC} - R_C I_C) = -(22 V - 3.3 k\Omega \times 3.76 mA) = -9.6 V$$

### 6.5 Emetörü dirençli dc öngerilimleme devresi



Şekil 6.14 Emetörü dirençli dc öngerilimleme devresi

Bu devreye ait baz-emetör çevre denklemini Şekil 6.15 deki devreden yazacak olursak,



Şekil 6.15 Baz-emetör çevresi

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E = 0$$

Aynı zamanda  $I_E = I_C + I_B$  ve  $I_C = \beta \cdot I_B$  idi. Bu durumda  $I_E = \beta \cdot I_B + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B$  olur.

Bu ifadeyi yukarıdaki denklemde yerine koyacak olursak,

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_B = 0$$

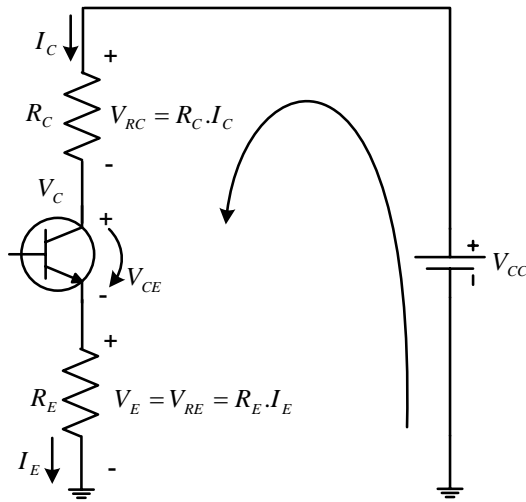
ifadesini elde ederiz. Buradan  $I_B$  baz akımını çekecek olursak,

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E \cdot (\beta + 1)}$$

ifadesini elde ederiz.  $I_C = \beta \cdot I_B$  bağıntısını kullanmak suretiyle de  $I_C$  kollektör akımını bulabiliriz.

Bu devreye ait kollektör-emetör çevre denklemini Şekil 6.16 daki devreden yazacak olursak,





Şekil 6.16 Kollektör-emetör çevresi

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_E = 0$$

$I_E \cong I_C$  idi. Bu bağıntıyı yukarıdaki denklemde kullanırsak aşağıdaki sonuca geliriz.

$$V_{CE} \cong V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

Son ifadeyi başka yoldan giderek hesaplayacak olursak emetörden toprağa ölçülen gerilim,

$$V_E = R_E \cdot I_E \cong R_E \cdot I_C$$

olarak yazılabilir. Aynı zamanda kollektörden toprağa ölçülen gerilim için de,

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_C = 0$$

ifadesini yazabiliriz. Bu ifadeden  $V_C$  kollektör gerilimini çekecek olursak,

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

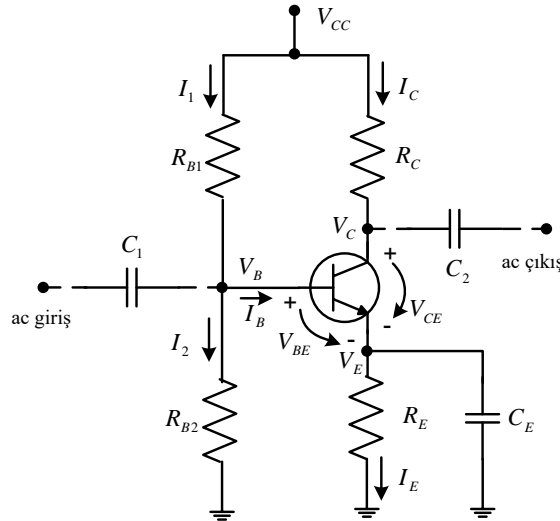
İki nokta arasındaki potansiyel farkına ait ifadeden de aşağıdaki sonucunu elde edebiliriz.

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_C = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

**Açıklama:** BJT nin dc öngerilimlenmesine bir emetör direncinin ilave edilmesi kararlılığı artırır. Yani, sıcaklık, kaynak gerilimi ve  $\beta$  değişse bile, dc öngerilim akım ve gerilimleri devre tarafından belirlenen değerlere yakın kalır.

### 6.6 Beta( $\beta$ ) dan bağımsız dc öngerilimleme devresi (Yaklaşık Analiz)

Daha önce incelediğimiz öngerilim değerlerinde kollektörün öngerilim akım ve gerilim değerleri, transistorün akım kazancına( $\beta$ ) bağılıydı. Ancak  $\beta$  değeri, özellikle silisyum transistorlerde sıcaklığa karşı duyarlıdır. Ayrıca  $\beta$  nın anma değeri de iyi tanımlanmış olmadığından, bu ve başka nedenlerden dolayı(transistorün bir başka transistorle değiştirilmesi), transistorün  $\beta$  değerinden bağımsız bir dc öngerilim devresi tasarımı gerekir. Şekil 6.17 deki devre, bu gereksinimleri karşılayan bir devredir.

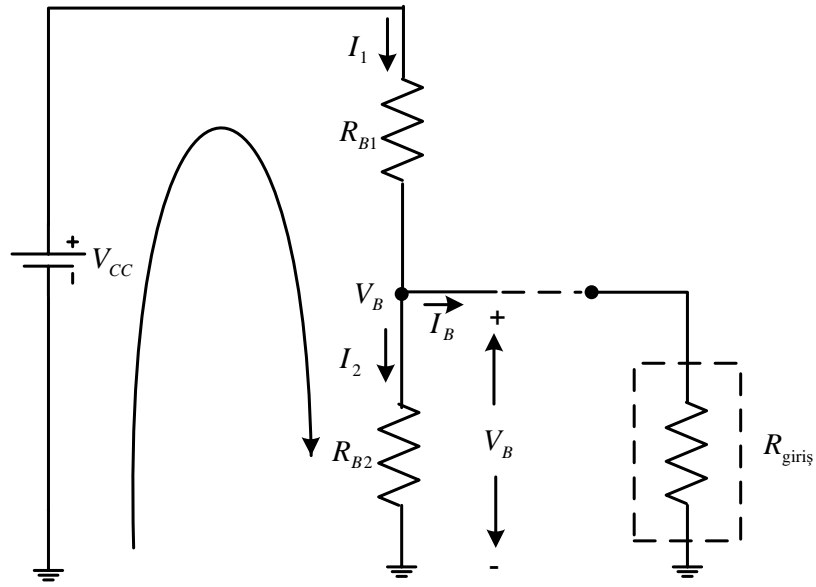


Şekil 6.17 Beta(  $\beta$  ) dan bağımsız dc öngerilimleme devresi

Bazı gören  $R_{giriş}$  direnci,  $R_{B2}$  direncinden çok büyükse, baz gerilimi  $R_{B1}$  ve  $R_{B2}$  gerilim bölücü dirençler tarafından belirlenir.

$$I = \frac{V_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}} \text{ ve } I = \frac{V_B}{R_{B2}}$$

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} \text{ (Baz toprak gerilimi olup, gerilim bölücü devresi ve kaynak tarafından belirlenir)}$$



$R_{giriş} \cong \beta \cdot R_E \gg R_{B2}$  olduğundan  $(I_1 \cong I_2)$  yazılabilir. Yani  $I_B \cong 0$

Şekil 6.18 Beta ( $\beta$ ) dan bağımsız dc öngerilileme devresinin baz-emetör çevresi

$V_E = V_B - V_{BE}$  (Emetörün toprağa göre gerilimidir)

$I_E = \frac{V_E}{R_E}$  olup, aynı zamanda  $I_C \cong I_E$  bağıntısı yazılabilir.

Kollektör direnci üzerindeki gerilim düşümü ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{RC} = I_C \cdot R_C$$

Toprağa göre kollektör gerilimi ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-V_{CC} + V_{RC} + V_C = 0 \quad \Rightarrow \quad V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

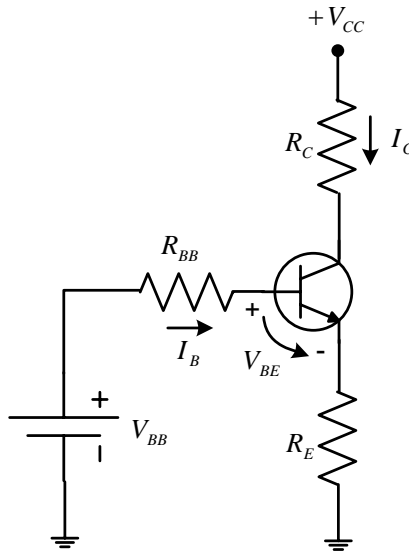
İki nokta arasındaki potansiyel farkına ait ifadeden aşağıdaki sonuca gelinir.

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_{CC} - R_C \cdot I_C - R_E \cdot I_E = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

### Tam Analiz

Gerilim bölücünün Thevenin eşdeğeri kullanılarak tam analiz yapılabilir. Buna göre  $R_{B1}$  ve  $R_{B2}$  dirençlerinin Thevenin  $R_{BB}$  eşdeğer direnci ve  $V_{BB}$  eşdeğer gerilimi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$R_{BB} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad \text{ve} \quad V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$



Böylece analiz edilecek devre yukarıdaki gibi yeniden çizilebilir. Bu devre üzerinde baz-emetör çevre denklemi yazılmak suretiyle  $I_B$  baz akımı, ardından da bu değer akım kazancı ile çarpılmak suretiyle  $I_C = \beta I_B$  kollektör akımı elde edilir.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (1 + \beta)R_E} \quad \text{ve} \quad I_C = \beta I_B$$

Ardından da kolektör-emetör çevre denklemini yazmak suretiyle  $V_{CE}$  kolektör emetör gerilimi elde edilir.

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

**Örnek:** Şekil 6.17 deki devrede  $V_{CC} = 22V$ ,  $V_{BE} = 0.7V$ ,  $\beta = 140$ ,  $R_{B1} = 39k\Omega$ ,  $R_{B2} = 3.9k\Omega$ ,  $R_C = 10k\Omega$ ,  $R_E = 1.5k\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = C_E = 50\mu F$  olduğuna göre  $I_C$  akımı ile  $V_{CE}$  gerilimini önce yaklaşık analiz ardından tam analiz ile hesaplayınız.

**Çözüm:**

a.) Yaklaşık analiz ile devre aşağıdaki gibi çözülür.

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} = \frac{3.9}{39 + 3.9} \cdot (22) = 2 \text{ Volt}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2V - 0.7V = 1.3 \text{ Volt}$$

$$I_C = I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3V}{1.5k\Omega} = 0.867 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 22 - (0.867 \text{ mA})(10k\Omega) = 13.33 \text{ Volt}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 13.33V - 1.3V = 12.03 \text{ Volt}$$

Tam analiz ile devre aşağıdaki gibi çözülür.

$$R_{BB} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{39 \times 3.9}{39 + 3.9} = 3.55 k\Omega$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} = \frac{3.9}{39 + 3.9} \cdot 22 = 2 \text{ Volt}$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (1 + \beta)R_E} = \frac{2V - 0.7V}{3.55k\Omega + 141 \times (1.5k\Omega)} = 6.05 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 140 \times 6.05 \mu A = 0.85 \text{ mA} \cong I_E$$

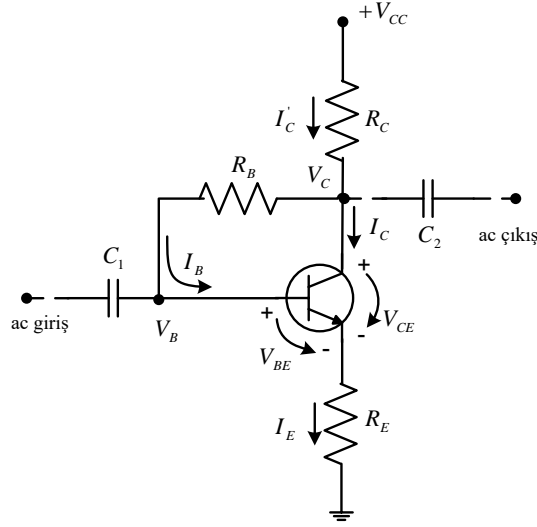
$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C = 22V - 0.85 \text{ mA} \times (10k\Omega + 1.5k\Omega) = 22V - 9.8V = 12.2V$$

Tam ve yaklaşık analiz sonuçlarını kıyaslayacak olursak aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

|                 | $I_C (mA)$ | $V_{CE} (V)$ |
|-----------------|------------|--------------|
| Yaklaşık analiz | 0.867      | 12.03        |
| Tam analiz      | 0.85       | 12.2         |

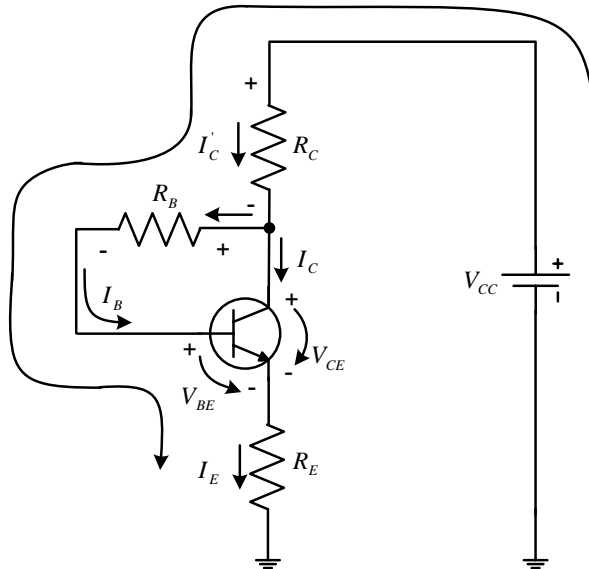
### 6.7 Geri beslemeli dc öngerilimleme devresi

Emetöre direnç bağlanmasının yanısıra, geribesleme yapmak suretiyle de öngerilimleme kararlılığı artırılabilir. Şimdi ise, Şekil 6.19 da verilen bu tarz bir geri beslemeli dc öngerilim devresi incelenip, dc akım ve geriliminin nasıl hesaplanacağı gösterilecektir.



Şekil 6.19 Geri beslemeli dc öngerilimleme devresi

Şekil 6.20 den, baz-emetör çevresini inceleyecek olursak;



Şekil 6.20 Geri beslemeli dc öngerilimleme devresine ait baz-emetör çevresi

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C' + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E = 0$$

$$I'_C = I_C + I_B = I_E = \beta I_B + I_B = (\beta + 1)I_B$$

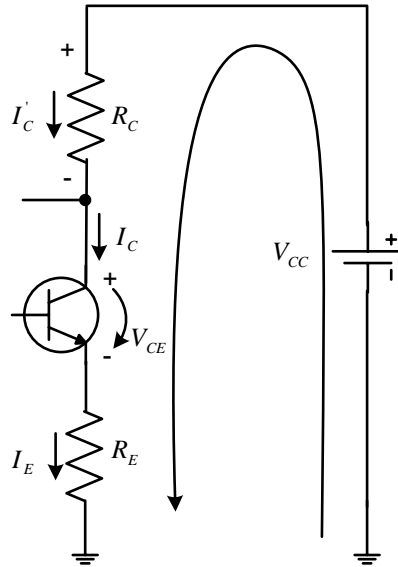
$I'_C$  ve  $I_E$  ifadelerini yukarıdaki denklemde yerine koyacak olursak, aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz.

$$-V_{CC} + R_C \cdot (\beta + 1)I_B + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot (\beta + 1)I_B = 0$$

Yukarıdaki denklemden  $I_B$  baz akımını çekecek olursak aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)} \quad \text{ve} \quad I_C = \beta I_B$$

Şekil 6.21 den, kollektör-emetör çevresine ait denklemi yazacak olursak;



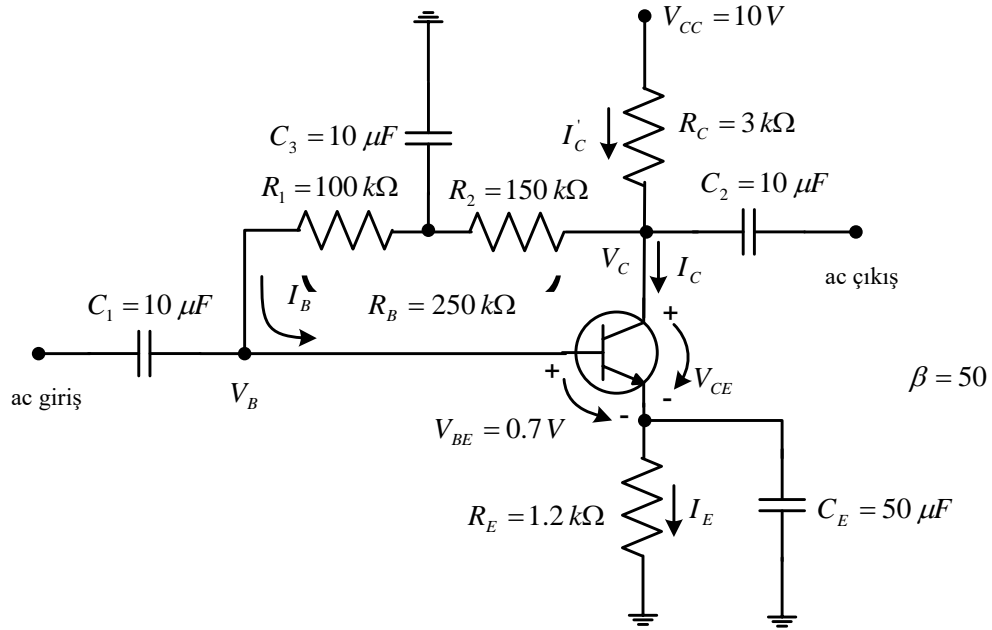
Şekil 6.21 Geri beslemeli dc öngerilimleme devresine ait kollektör-emetör çevresi

$$-V_{CC} + R_C \cdot I'_C + V_{CE} + R_E \cdot I_E = 0$$

$I'_C = I_E$  olduğunu hatırlayacak olursak, ifade aşağıdaki hale gelir.

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E \cdot (R_C + R_E)$$

**Örnek:** Şekil 6.22 deki devrede,  $I_C$  ve  $I_E$  akımları ile  $V_{CE}$  ve  $V_C$  gerilimlerini hesaplayınız.



Şekil 6.22

**Açıklama:**  $C_3$  kondansatörü, geribesleme sinyalinin durdurulmasını veya zayıflatılmasını temin etmekte olup, dc öngerilim hesabı üzerine etkisini yoktur.

Daha önce çıkardığımız formülden aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)} = \frac{(10 - 0.7)V}{250\text{ k}\Omega + (51) \times (3\text{ k}\Omega + 1.2\text{ k}\Omega)} = 20.03\text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 20.03\text{ }\mu\text{A} = 1.0015\text{ mA}$$

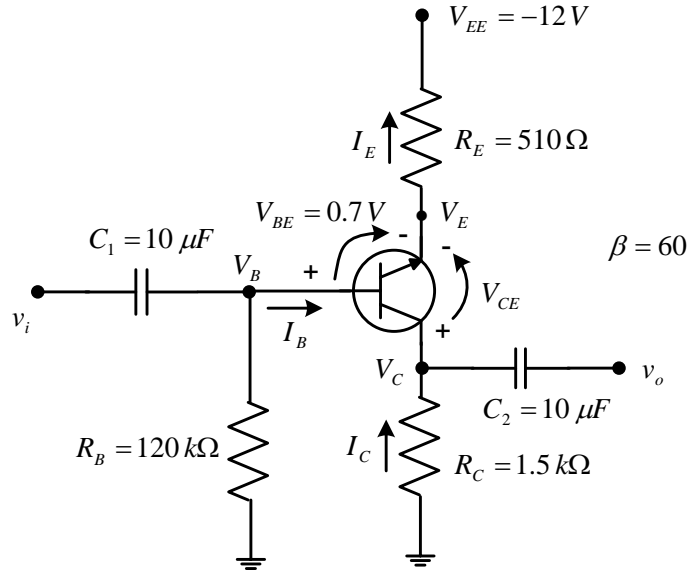
$$I_E = (\beta + 1)I_B = 51 \times 20.03\text{ }\mu\text{A} = 1.02\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E(R_C + R_E) = 10\text{ V} - 1.02\text{ mA} \times (3\text{ k}\Omega + 1.2\text{ k}\Omega) = 10\text{ V} - 4.28\text{ V} = 5.72\text{ V}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 10\text{ V} - 3\text{ k}\Omega \times 1.02\text{ mA} = 10\text{ V} - 3.06\text{ V} = 6.94\text{ V}$$



**Örnek:** Şekil 6.23 deki devrede  $I_C$  akımını ve  $V_{CE}$  gerilimini hesaplayınız.



Şekil 6.23

Baz-emetör çevre denklemini yazacak olursak;

$$-V_{EE} + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) I_B$$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{(\beta + 1) R_E + R_B} = \frac{(12 - 0.7) V}{(61) \times (0.510 k\Omega) + 120 k\Omega} = 74.78 \mu A$$

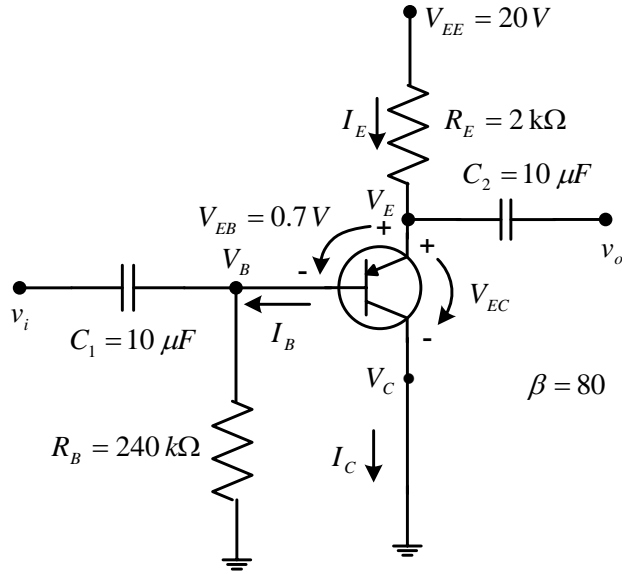
$$I_C = \beta I_B = 60 \times 74.78 \mu A = 4.48 mA$$

Kollektör-emetör çevre denklemini yazacak olursak;

$$-V_{EE} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E = 0 \quad (I_E \cong I_C) \text{ olduğundan;}$$

$$V_{CE} = V_{EE} - (R_C + R_E) I_C = 12 V - (1.5 k\Omega + 0.51 k\Omega) \times 4.48 mA = 2.9952 V$$

**Örnek:** Şekil 6.24 deki devrede  $I_C$  akımını ve  $V_E$  gerilimini bulunuz.



Şekil 6.24

Baz-emetör çevre denklemini ve ayrıca  $I_C$ ,  $I_E$  ve  $I_B$  akımları arasındaki ilişkiyi yazarsak;

$$-V_{EE} + R_E I_E + V_{EB} + R_B I_B = 0$$

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) I_B$$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{EB}}{(\beta + 1) R_E + R_B} = \frac{(20 - 0.7) V}{(81) \times (2 k\Omega) + 240 k\Omega} = 48.01 \mu A$$

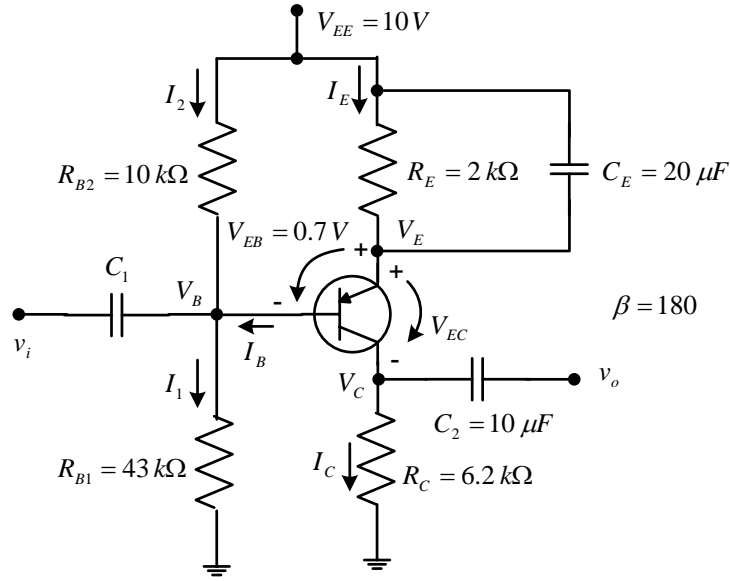
$$I_C = \beta I_B = 80 \times 48.01 \mu A = 3.84 mA \cong I_E$$

( $V_E = V_{EC}$ ) olduğunu gözönünde bulundurarak, kollektör-emetör çevre denklemini yazarsak;

$$-V_{EE} + R_E I_E + V_E = 0$$

$$V_E = V_{EE} - R_E I_E = 20 V - (2 k\Omega) \times (3.84 mA) = 12.32 V \text{ bulunur.}$$

**Örnek:** Şekil 6.25 deki devrede  $V_C$  kolektör gerilimini, yaklaşık gerilim bölücü metodunu kullanarak hesaplayınız.



Şekil 6.25

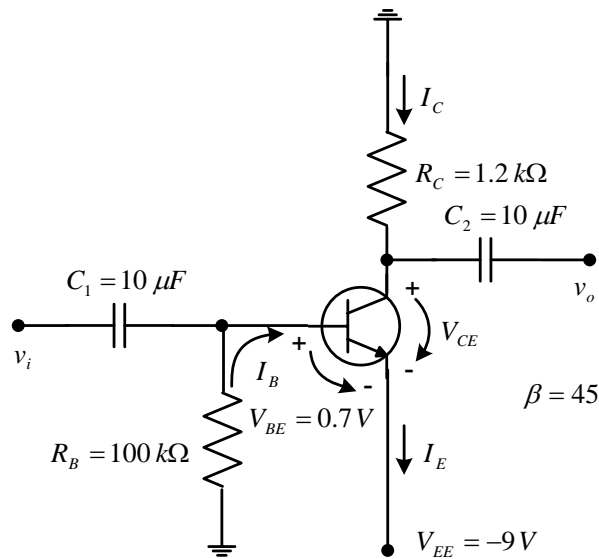
$$\frac{V_{EE}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{V_B}{R_{B1}} \Rightarrow V_B = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{EE} = \frac{43 \text{ k}\Omega}{43 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ V} = 8.11 \text{ V}$$

$$V_{EB} = V_E - V_B \Rightarrow V_E = V_{EB} + V_B = 8.11 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = 8.81 \text{ V} \text{ (pn-p transistor olduğundan } V_{EB})$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_E}{R_E} = \frac{10 \text{ V} - 8.81 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 0.595 \text{ mA} \cong I_C$$

$$V_C = R_C \cdot I_C = 6.2 \text{ k}\Omega \times 0.595 \text{ mA} = 3.69 \text{ V}$$

**Örnek:** Şekil 6.26 daki devrenin  $I_C$  akımını ve  $V_C$  gerilimini bulunuz.



Şekil 6.26

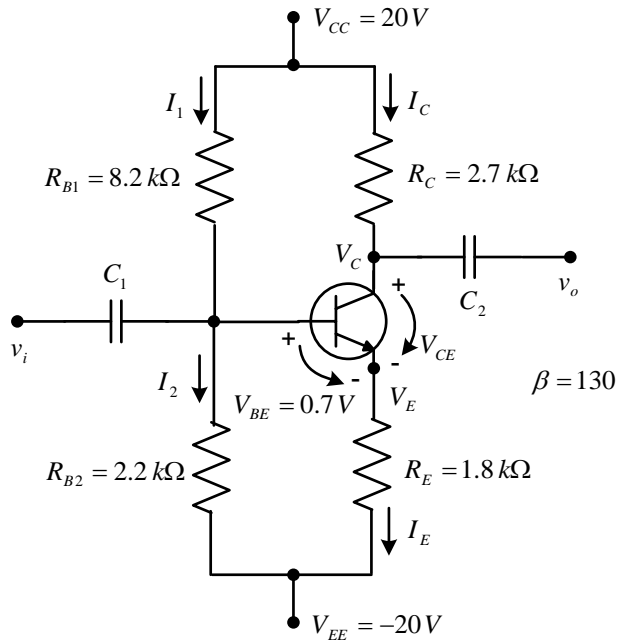
$$-V_{EE} + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B} = \frac{(9 - 0.7) V}{100 k\Omega} = 83 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 45 \times 83 \mu A = 3.735 mA$$

$$V_C = -R_C I_C = -1.2 k\Omega \times 3.735 mA = -4.48 V$$

**Örnek:** Şekil 6.27 deki devrenin  $I_E$  akımını ve  $V_C$  gerilimini tam analiz ile hesaplayınız.



Şekil 6.27

$$R_{BB} = \frac{R_{B1} \times R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{8.2 k\Omega \times 2.2 k\Omega}{8.2 k\Omega + 2.2 k\Omega} = 1.735 k\Omega$$

$$V_{BB} = \frac{2.2 k\Omega}{8.2 k\Omega + 2.2 k\Omega} \times (20 V) + \frac{8.2 k\Omega}{8.2 k\Omega + 2.2 k\Omega} \times (-20 V) = 4.23 V - 15.77 V = -11.54 V$$

$$-V_{EE} - V_{BB} + R_{BB} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

$$I_B = \frac{V_{EE} + V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (\beta + 1) R_E} = \frac{(20 - 11.54 - 0.7) V}{1.735 k\Omega + (131) \times (1.8 k\Omega)} = 32.67 \mu A$$

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) I_B = 131 \times 32.67 \mu A = 4.28 mA \cong I_C$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 20 - 2.7 k\Omega \times 4.28 mA = 8.4 V$$

## BÖLÜM 7. ALAN ETKİLİ TRANSİSTORLAR

### 7.1 Giriş

Npn veya pnp olarak yapılan iki kutuplu bir jonksiyon transistörü (BJT) hem elektron akımı hem de delik akımının kullanıldığı bir akım kontrollü transistördür. Alan etkili transistör (FET) ise tek kutuplu bir elemandır. N-kanallı bir FET de elektron akımıyla veya p-kanallı bir FET de delik akımıyla çalışan gerilim kontrollü bir transistördür. FET ler de, BJT ler gibi, farklı öngerilim varsayımlarıyla bir yükselteç devresinde kullanılabilir.

FET ile BJT nin karşılaştırılması:

1. FET in gerilim direnci tipik olarak  $100M\Omega$  gibi yüksek bir değer iken, BJT nin gerilim direnci tipik olarak  $2k\Omega$  dur.
2. FET in anahtar (veya kıyıcı) olarak kullanıldığında sapma gerilimi yoktur.
3. FET ler radyasyona duyarsız, BJT ler duyarlıdır. ( $\beta$  radyasyondan çok etkilenir)
4. FET ler, BJT lerden daha az gürültülüdür.
5. FET ler, BJT lere göre daha yüksek ısı kararlılığı sağlayacak şekilde çalıştırılabilir.
6. FET ler BJT lerden daha küçüktür.

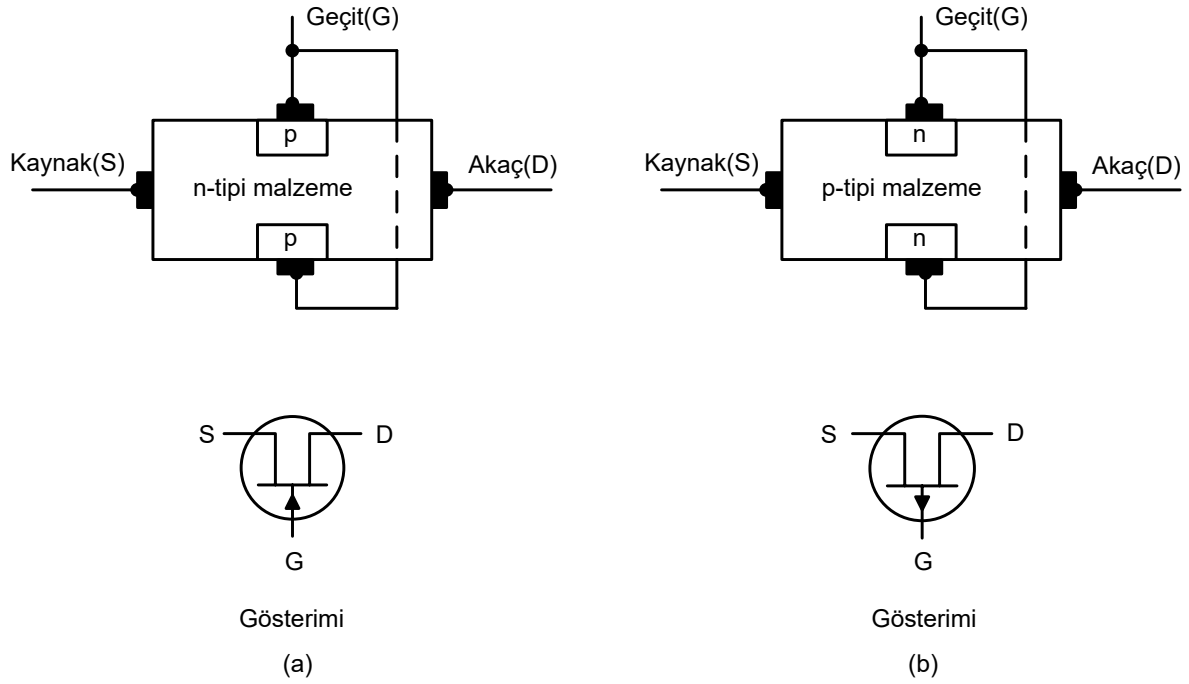
FET ler p-n jonksiyonuna sahip üç uçlu bir eleman olup ya jonksiyon FET (JFET) VEYA metal oksit yarıiletken FET (MOSFET) olarak üretilmektedir.

### 7.2 JFET in çalışması

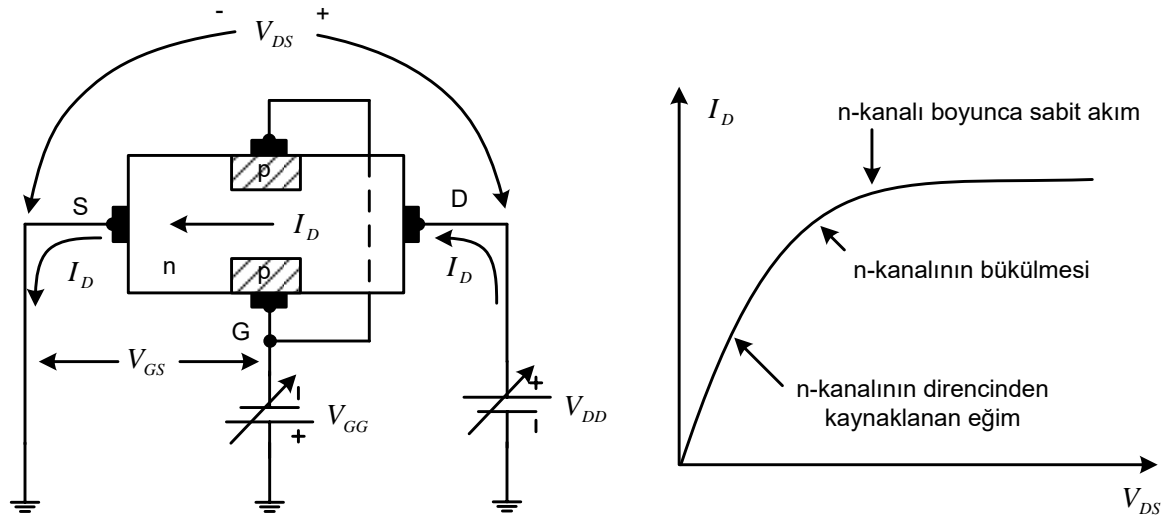
N kanallı JFET, içine bir çift p-tipi bölgenin difüzyon yoluyla yerleştirilmiş olan n-tipi bir çubuk kullanılarak yapılmaktadır. p kanallı JFET ise bunun tam tersidir.

Şekil 7.1(a) daki n-tipi eleman için kapı üzerindeki ok işareti, kapının(geçit) p-tipi, kanalın ise n-tipi, Şekil 7.1(b) deki p-tipi eleman içinse, kapının n-tipi, kanalın p-tipi olduğunu gösteren bir ok işareti vardır. N-kanallı bir JFET de  $V_{DD}$  besleme gerilimi akaçtan kaynağa bir  $I_D$  akımının akmasını sağlar. Bu akaç akımı p-tipi kapı ile çevrili kanaldan geçer. Kapı ile kaynak arasında bir  $V_{GG}$  besleme kaynağı ile bir  $V_{GS}$  gerilimi oluşturulmuştur. Bu kapı

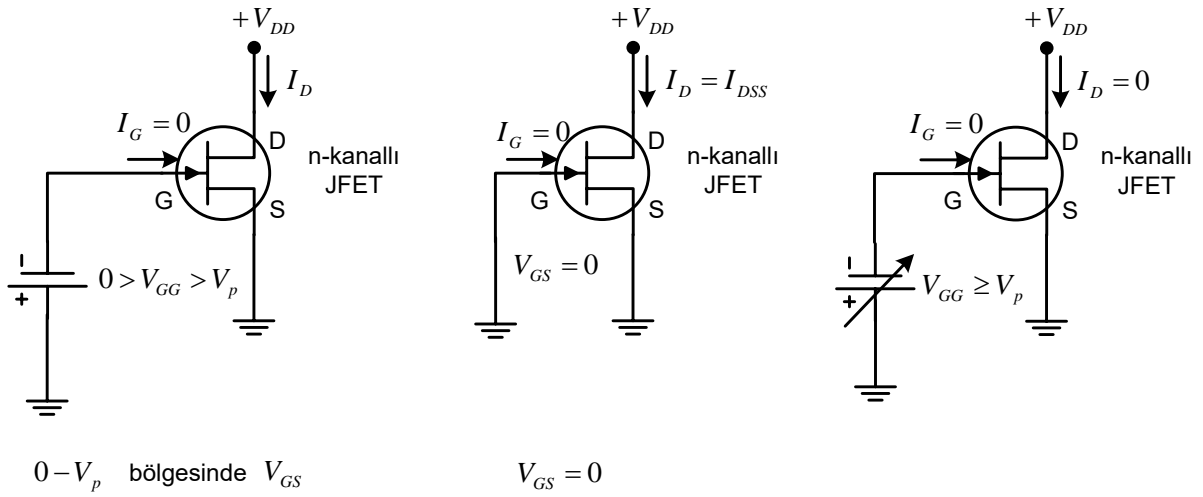
kaynak geriliminin polaritesi, kapı-kaynak jonksiyonunu ters öngerilimleyeceğinden, kapıdan akım akmayacaktır. Kapı-kaynak geriliminin yaratacağı etki, kanalda bir boşaltma etkisi yaratmak ve kanal genişliğini azaltarak akaç-kaynak direncini artırıp daha az akaç akımı geçirmektir(Şekil 7.2).



Şekil 7.1



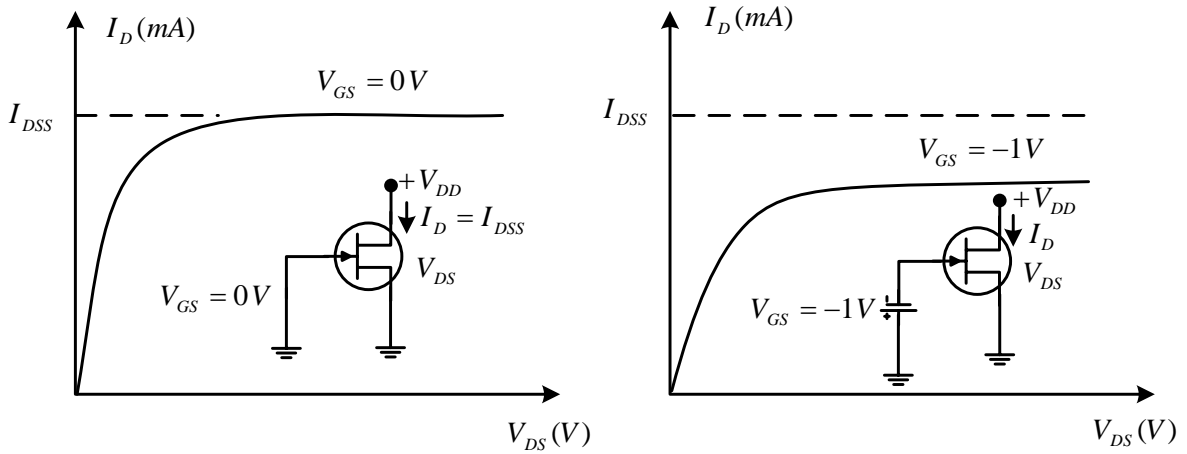
Şekil 7.2

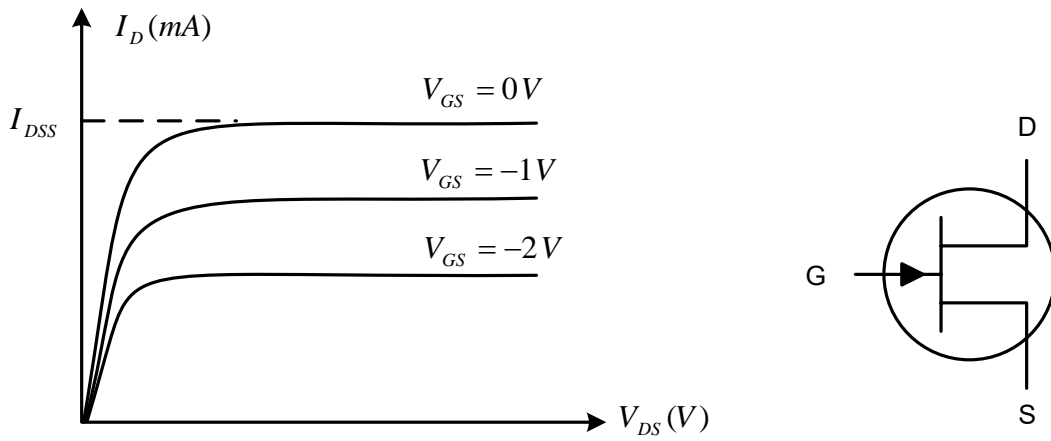


Şekil 7.3

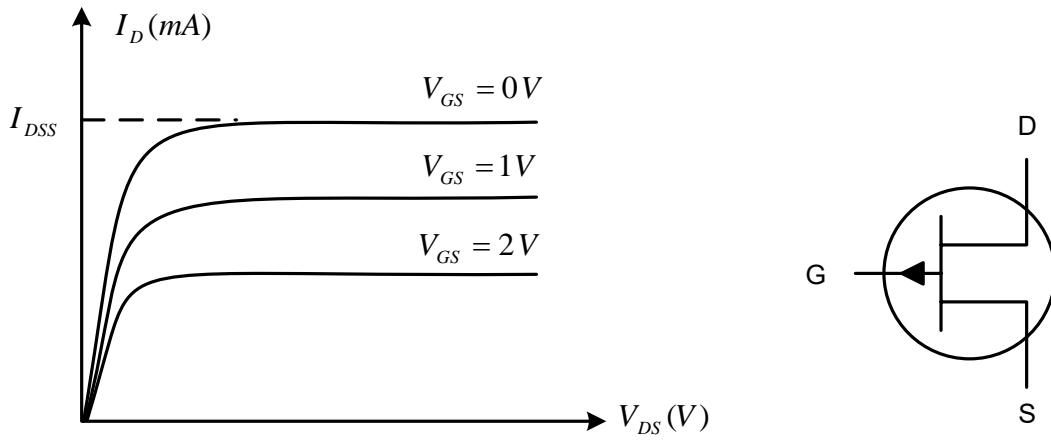
Şekil 7.3 deki  $I_{DSS}$  akımı akaç-kaynak doyma akımı olup,  $V_p$  ise kısılma gerilimidir.

### 7.3 JFET in akaç-kaynak karakteristiği

(a) n-kanallı JFET için  $V_{GS} = 0 V$  karakteristiği(b) n-kanallı JFET için  $V_{GS} = -1 V$  karakteristiğiŞekil 7.4 n-kanallı JFET için  $V_{GS} = 0 V$  ve  $V_{GS} = -1 V$  akaç-kaynak karakteristikleri

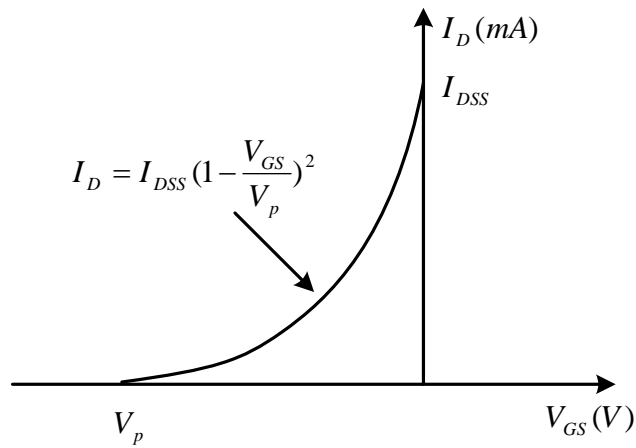


Şekil 7.5 n-kanallı JFET in tüm karakteristiği



Şekil 7.6 p-kanallı JFET in tüm karakteristiği

#### 7.4 JFET in transfer karakteristiği



Şekil 7.7 n-kanallı JFET in transfer karakteristiği



**Örnek:**  $V_p$  (kısılma gerilimi) = -4 volt,  $I_{DSS}$  (akaç-kaynak doyma akımı) = 12 miliamper olan n-kanallı JFET'in akaç akımını, (a)  $V_{GS} = 0V$ , (b)  $V_{GS} = -1.2V$  ve (c)  $V_{GS} = -2V$  kapı-kaynak gerilimleri için bulunuz.

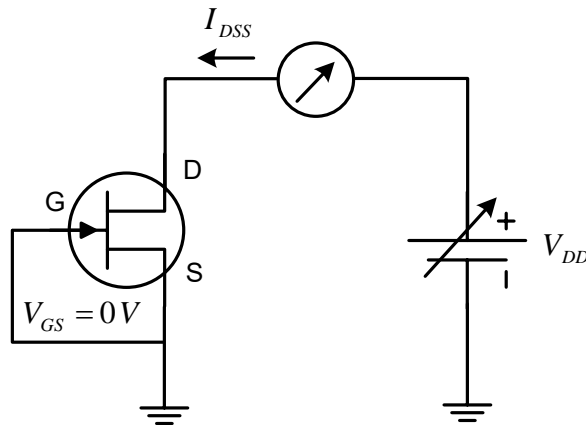
$$(a) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{0V}{-4V}\right)^2 = 12 \text{ mA}$$

$$(b) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{-1.2V}{-4V}\right)^2 = 5.88 \text{ mA}$$

$$(c) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{-2V}{-4V}\right)^2 = 3 \text{ mA}$$

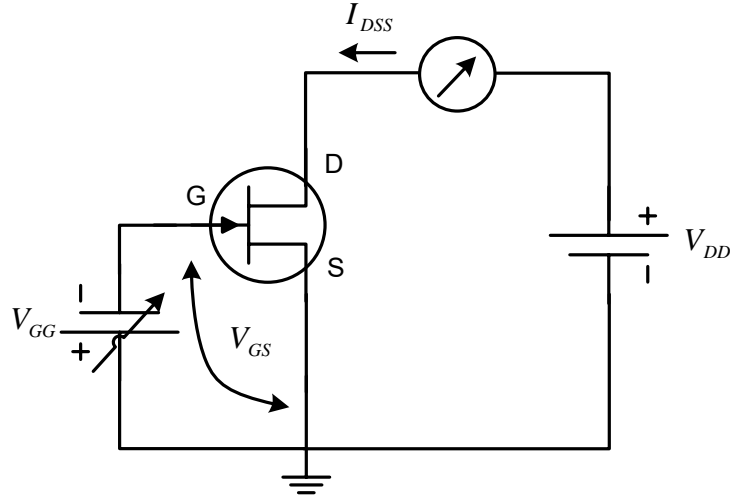
JFET elemanının çalışmasını tanımlamak için kullanılan parametreler  $I_{DSS}$  (akaç-kaynak doyma akımı) ve  $V_p$  (kısılma gerilimi) değerleridir. Bu değerler için üretici karakteristik özellik sayfalarındaki tipik değerler kullanılabilir veya söz konusu JFET üzerinden ölçülebilir.

$I_{DSS}$  yi ölçmek için  $V_{GS} = 0$  yapılır ve  $I_D$  akımı doymaya erişene kadar  $V_{DD}$  artırılır ve  $I_{DSS}$  akımı bir ampermetre ile ölçülür. Buna ait devre şeması Şekil 7.8 de gösterilmiştir.



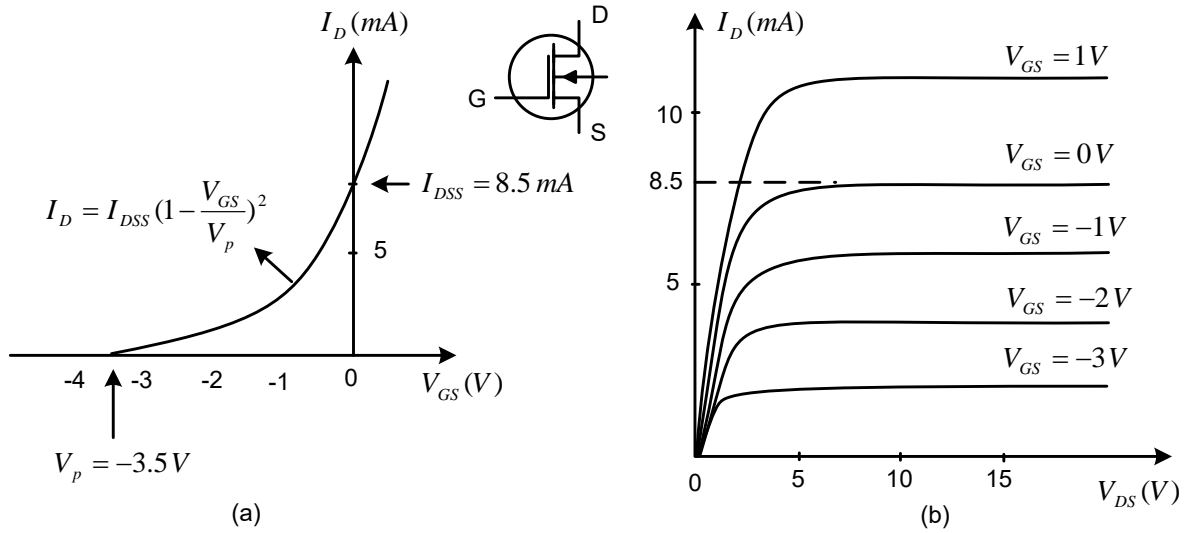
Şekil 7.8  $I_{DSS}$  nin ölçülerek elde edilmesine ait devre

Kapı-kaynak gerilimi, akaç akımı sıfıra çok yakın olana kadar 0 volttan daha büyük negatif değerlere doğru ayarlanır. Akaç akımının 0 olmasını sağlayan minimum  $V_{GS}$  gerilimi  $V_{GS(OFF)}$  veya  $V_p$  nin ölçülen değeridir. Buna ait devre şeması Şekil 7.9 da gösterilmiştir.

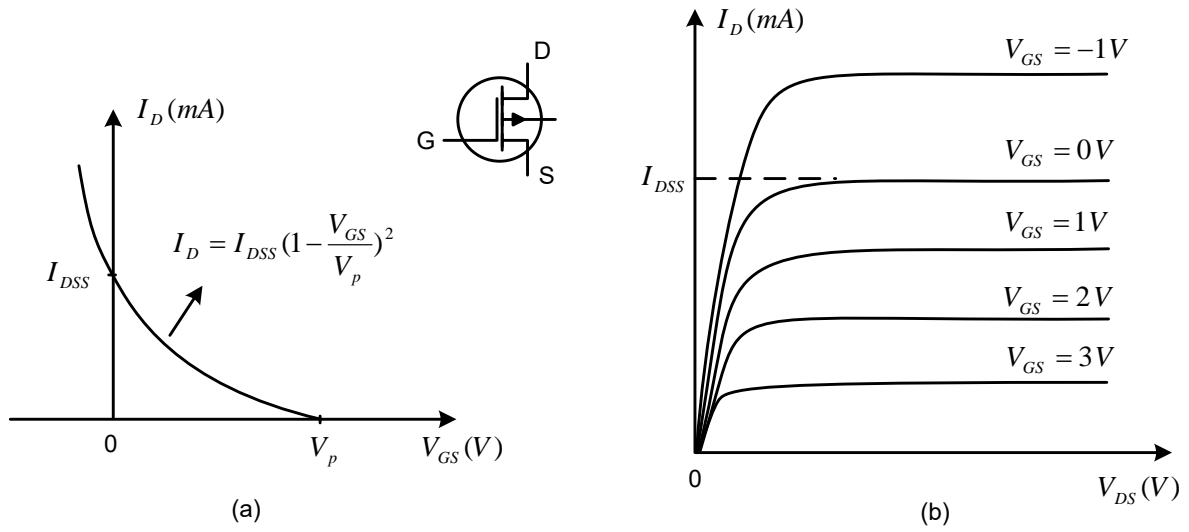


Şekil 7.9  $V_p$  nin ölçülerek elde edilmesine ait devre

## 7.6 Kanal ayarlamalı MOSFET



Şekil 7.10 n-kanallı kanal ayarlamalı MOSFET in (a) Transfer (b) Akaç karakteristiği

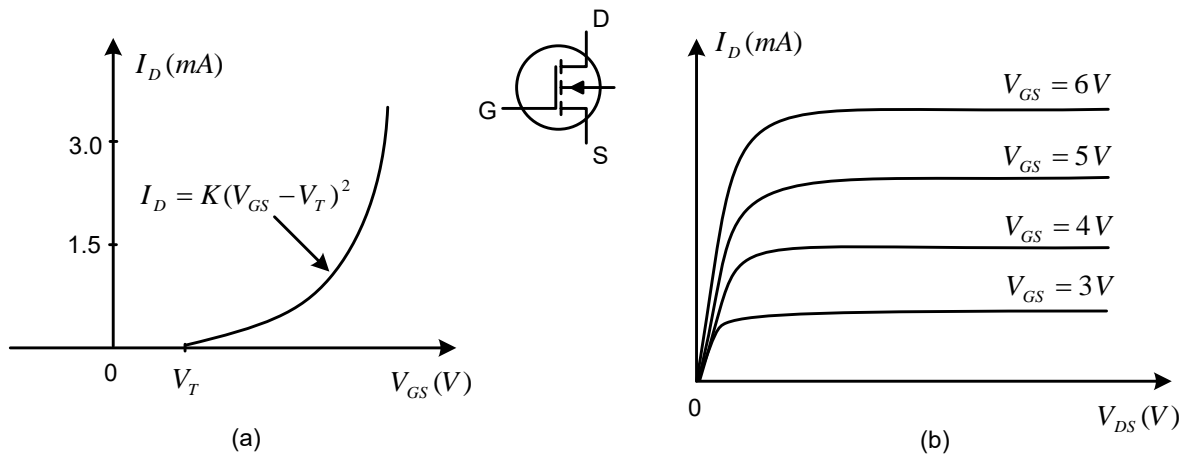


Şekil 7.11 p-kanallı kanal ayarlamalı MOSFET in (a) Transfer (b) Akaç karakteristiği

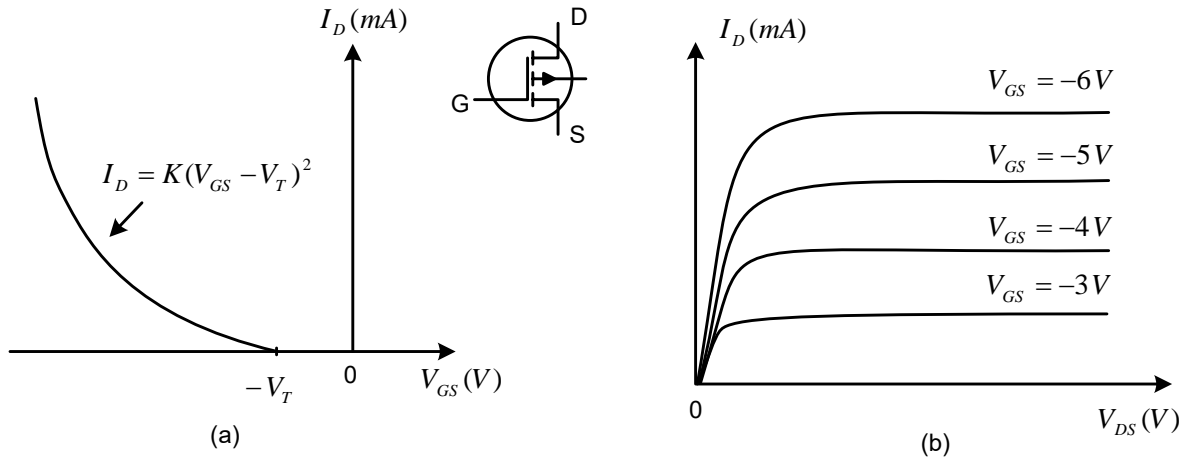
## 7.7 Kanal oluşturmali MOSFET

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

Burada K katsayısı elemanın yapısına ilişkin bir değer olup,  $V_T$  ise eşik gerilimidir.  $V_{GS} = 0$  iken  $I_D = 0$  dir.



Şekil 7.12 n-kanallı kanal oluşturmali MOSFET in (a) Transfer karakteristiği (b) Akaç karakteristiği



Şekil 7.13 p-kanallı kanal oluşturmali MOSFET in (a) Transfer karakteristiği (b) Akaç karakteristiği

**Örnek:** n-kanallı kanal oluşturmali eşik değeri  $V_T = 2.5V$  ve  $K = 0.3mA/V^2$  olan bir MOSFET için (a)  $V_{GS} = 2.5V$ , (b)  $V_{GS} = 4V$ , (c)  $V_{GS} = 6V$  kapı-kaynak gerilimlerinde akan  $I_D$  akaç akım değerlerini bulunuz.

$$(a) I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 0.3 \times (2.5 - 2.5)^2 = 0mA$$

$$(b) I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 0.3 \times (4 - 2.5)^2 = 0.675mA$$

$$(c) I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 0.3 \times (6 - 2.5)^2 = 3.675mA$$

Bunun için bir aktarma iletkenliği değeri ifade edilebilir.

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T)$$

$V_T = 3V$  olduğunda (a)  $V_{GS} = 6V$  ve (b)  $V_{GS} = 8V$  için  $g_m$  değerlerini bulunuz.

$$(a) g_m = 2 \times (0.3) \times (6 - 3) = 1.8mS$$

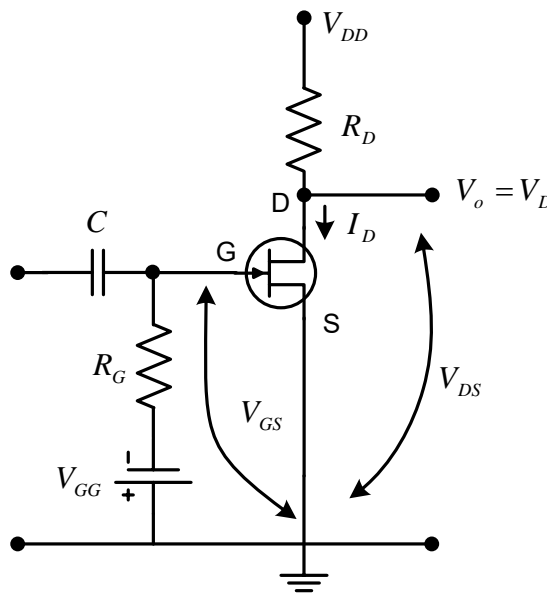
$$(b) g_m = 2 \times (0.3) \times (8 - 3) = 3mS$$

## 7.8 FET öngerilimleme

Bir FET elemanının dc öngerilimlenmesi, istenilen bir akaç akımının akmasına yol açan bir kapı-kaynak geriliminin uygulanmasını gerektirir. Bir JFET için akaç akımı, doyma akımı  $I_{DSS}$  ile sınırlıdır. Kanal ayarlamalı bir MOSFET,  $I_{DSS}$  nin altında, üstünde veya ona eşit bir değerde öngerilimlenebilir. Kanal oluşturmali bir MOSFET elemanının açılması için, eşik değerini aşan bir kapı-kaynak gerilimiyle öngerilimlenmelidir.  $V_{GG}$  kaynağı,  $V_{GS}$  geriliminin  $R_G$  den ya da kapı ucundan hiç akım akmayacak şekilde ters öngerilim düzeyine çekmek için kullanılır. Bu durum Şekil 7.14 de verilmiştir

Kapı-kaynak ters öngerilimli olduğu için, bu jonksiyondan akım akmaz. C kondansatöründen de dc akım geçmediğinden  $R_G$  direncinden de akım geçmeyecektir. Kaynak ( $V_{GG}$ ) n-kanallı JFET i öngerilimleyecek  $V_{GS}$  gerilimi sağlar, fakat  $V_{GG}$  kaynağından akım geçmez.

$R_G$  direnci, C kondansatörü üzerinden uygulanacak herhangi bir ac sinyalinin  $R_G$  üzerinde artırılmasını sağlamak için eklenmiştir. AC sinyalinin  $R_G$  üzerinde artmasıyla birlikte  $R_G$  üzerindeki gerilim düşümü aşağıdaki gibi verilir.  $I_{RG} = 0$  olduğundan  $V_{RG} = R_G \cdot I_{RG} = 0V$  olur.



Şekil 7.14 FET in öngerilimlenmesi

$$V_{GS} + V_{GG} - R_G I_{RG} = 0$$

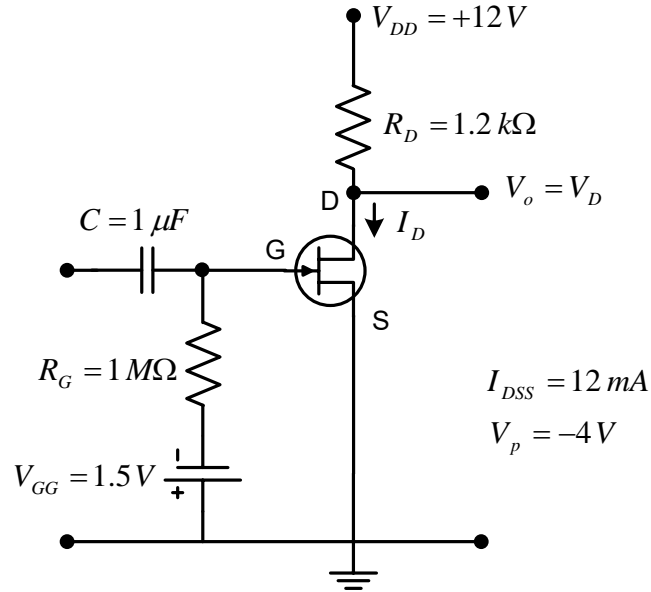
olduğunu bilinmektedir.  $I_{RG} = 0$  olduğundan,  $V_{GS} = -V_{GG}$  olur.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$$

$$V_{RD} = I_D R_D$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

**Örnek:** Şekil 7.15 deki sabit öngerilim devresinin akaç akımını ( $I_D$ ) ve akaç-kaynak ( $V_{DS}$ ) gerilimini bulunuz.



Şekil 7.15 Örnek devre

$$V_{GS} = -V_{GG} = -1.5\text{ V}$$

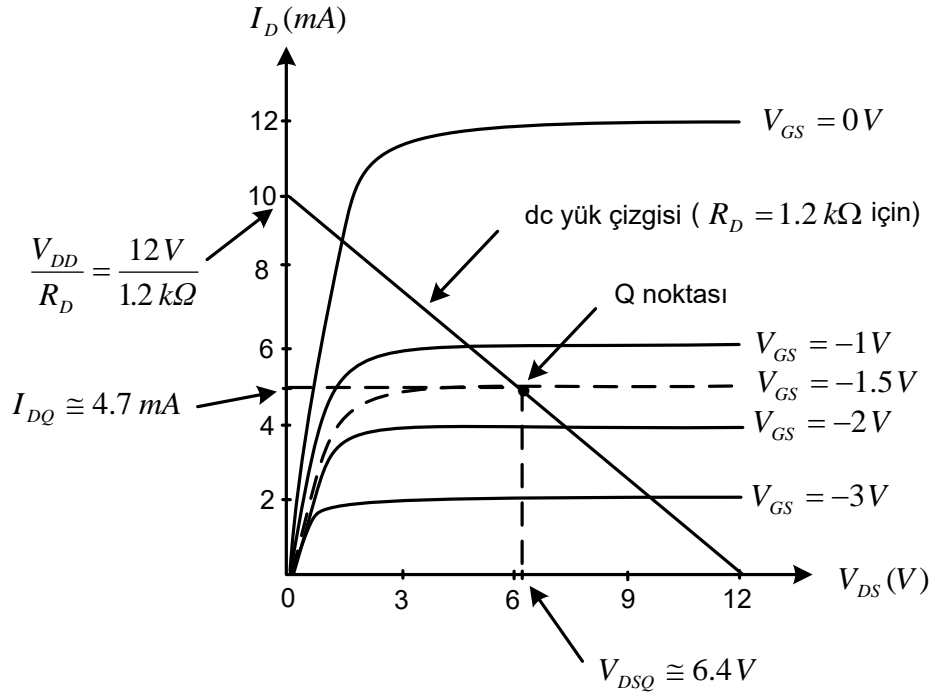
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12\text{ mA} \times \left(1 - \frac{-1.5\text{ V}}{-4\text{ V}}\right)^2 = 4.69\text{ mA}$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 12\text{ V} - 1.2\text{ k}\Omega \times 4.69\text{ mA} = 6.4\text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 6.4\text{ V} - 0\text{ V} = 6.4\text{ V}$$

### 7.9 JFET Akaç-kaynak karakteristiğine dayalı grafik analizi

Grafik analiz, dc öngerilimlemeye neden ihtiyaç duyulduğunu anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bir JFET akaç-kaynak karakteristiği Şekil 7.16 daki gibi olsun. ( $I_{DSS} = 12\text{ mA}$ ,  $V_p = -4\text{ V}$ ). Bu durumda  $V_{GS} = -1.5\text{ V}$  olarak tespit edilir(yaklaşık olarak ).



Şekil 7.16 Bir JFET in akaç-kaynak karakteristiği

$I_D = 0\text{ mA}$  için,

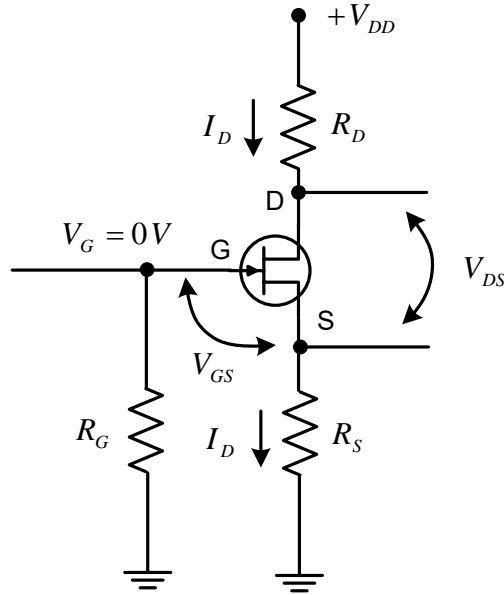
$V_D = V_{DD} - R_D I_D = V_{DD} = 12\text{ V}$  olur.

$V_{DS} = V_D = 0\text{ V}$  için,

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} = \frac{12\text{ V}}{1.2\text{ k}\Omega} = 10\text{ mA}$$

Bu dc yük çizgisi ile JFET in akaç-kaynak karakteristiğinin kesişme noktalarını ölçeklemek suretiyle bu JFET in çalışma noktalarını  $I_{DQ} \approx 4.7\text{ mA}$  ve  $V_{DSQ} \approx 6.4\text{ V}$  olarak bulabiliriz.

### 5.10 Kendinden öngerilimli JFET yükselticisi



Şekil 7.17 Kendinden öngerilimli JFET yükseltici devresi

Ters gerilimli kapı-kaynak üzerinden hiç kapı akımı akmayacağından  $I_G = 0$  dır. Bu nedenle

$$V_G = I_G R_G = 0 \text{ olur. Ayrıca,}$$

$$V_S = I_D R_S$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D R_S = -I_D R_S$$

$$I_D = 0 \text{ için } V_{GS} = 0$$

ve

$$V_{GS} = V_p \text{ için } -I_D R_S = V_p$$

$$I_D = -\frac{V_p}{R_S}$$

**Örnek:** Şekil 7.17 deki devrede,  $V_{DD} = 24V$ ,  $R_D = 6.2k\Omega$ ,  $R_G = 1M\Omega$ ,  $R_S = 1.5k\Omega$ ,

$I_{DSS} = 10mA$  ve  $V_p = -4V$  için;

- Transfer karakteristiği yardımıyla  $V_{GS}$  ve  $I_D$  yi bulunuz.
- $V_{DS}$  yi bulunuz.
- $I_{DSS}/2$  ile  $I_{DSS}/4$  arasında dc öngerilimlemeyi sağlayacak  $R_S$  direncinin değer aralığını bulunuz.

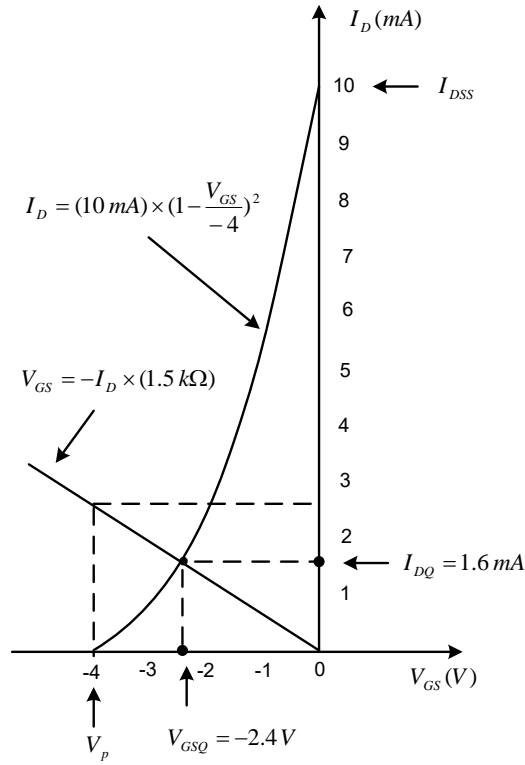


(a) JFET transfer karakteristiğini çizmek için  $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$  ve yük eğrisini çizmek için

$V_{GS} = -R_S \cdot I_D$  denklemlerinden faydalanmak suretiyle aşağıdaki tablolar oluşturulur.

| $V_{GS}(V)$    | $I_D(mA)$                           |
|----------------|-------------------------------------|
| 0              | $10[I_{DSS}]$                       |
| $[0.3V_p]-1.2$ | $5\left[\frac{I_{DSS}}{2}\right]$   |
| $[0.5V_p]-2.0$ | $2.5\left[\frac{I_{DSS}}{4}\right]$ |
| $[V_p]-4.0$    | 0                                   |

| $I_D(mA)$                           | $V_{GS}(V)$ |
|-------------------------------------|-------------|
| 0                                   | 0           |
| $\left[\frac{V_p}{R_S}\right] 2.67$ | -4          |



Şekil 7.18 Kendinden öngerilimli JFET yükselticinin transfer karakteristiği

(b)

$$I_D = 1.6 \text{ mA}$$

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D = 24 \text{ V} - (1.6 \text{ mA}) \times (6.2 \text{ k}\Omega) = 14.08 \text{ V}$$

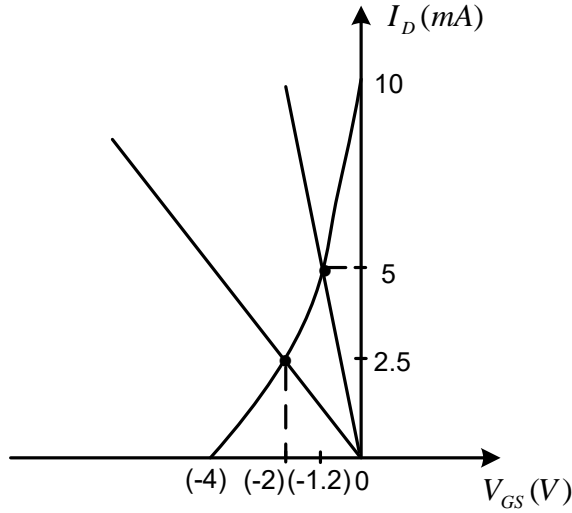
$$V_S = I_D R_S = (1.6 \text{ mA}) \times (1.5 \text{ k}\Omega) = 2.4 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 14.08 \text{ V} - 2.4 \text{ V} = 11.68 \text{ V}$$

(c) Bu durum, ölçekli bir şekilde Şekil 7.19 da gösterilmiştir.

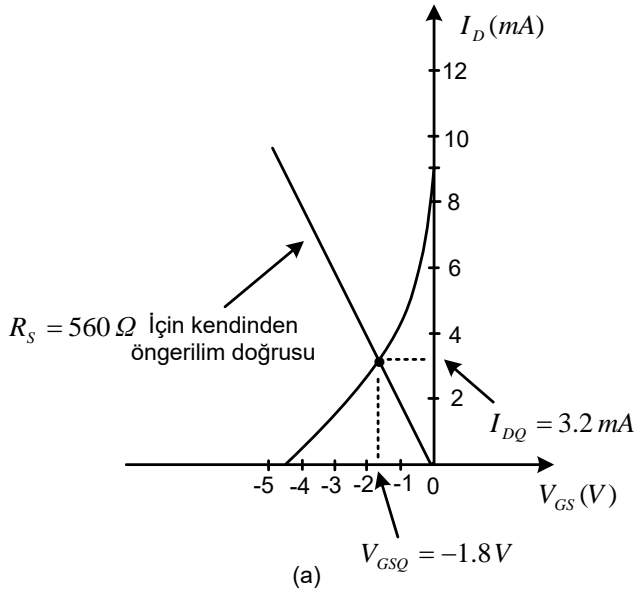
$$I_D = \frac{I_{DSS}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mA} \quad \rightarrow \quad R_S \left( \frac{I_{DSS}}{2} \text{ için} \right) = \frac{|V_{GS}|}{I_D} = \frac{1.2 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 240 \Omega$$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{4} = \frac{10}{4} = 2.5 \text{ mA} \quad \rightarrow \quad R_S \left( \frac{I_{DSS}}{4} \text{ için} \right) = \frac{|V_{GS}|}{I_D} = \frac{2 \text{ V}}{2.5 \text{ mA}} = 800 \Omega$$

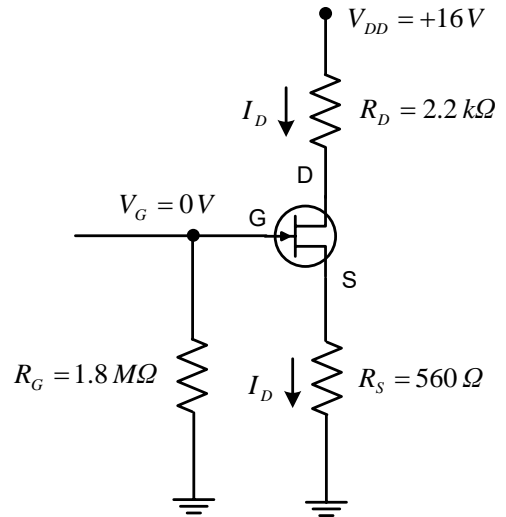


Şekil 7.19

**Örnek:** Şekil 7.20(a) da verilen transfer karakteristiğinden yararlanarak, Şekil 7.20(b) de verilen devrenin  $I_{DSS}$  ve  $V_p$  değerlerini belirleyin ve  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini bulunuz.



(a)



(b)

Şekil 7.20(a) Transfer karakteristiği, (b) Örnek devre

Transfer karakteristiğinden  $I_{DSS} = 9 \text{ mA}$  ve  $V_p = -4.5 \text{ V}$  ölçülür.

$V_{GS} = -I_D R_S$  den  $R_S$  doğrusu çizilir.

$I_D = 0$  iken  $V_{GS} = 0$

ve

$V_{GS} = V_p = -4.5 \text{ V}$  iken  $I_D = \frac{-V_p}{R_S} = \frac{-(-4.5 \text{ V})}{0.56 \text{ k}\Omega} = 8.04 \text{ mA}$  olur.

| $I_D (\text{mA})$                       | $V_{GS} (\text{V})$ |
|---|---------------------|
| 0                                       | 0                   |
| $\left[ -\frac{-V_p}{R_S} \right] 8.04$ | -4.5                |

Buradan akaç gerilimi,

$$V_D = V_{DD} - R_D I_D = 16 \text{ V} - (3.2 \text{ mA}) \times (2.2 \text{ k}\Omega) = 8.96 \text{ V}$$

$$V_S = I_D R_S = (3.2 \text{ mA}) \times (0.56 \text{ k}\Omega) = 1.79 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 8.96 \text{ V} - 1.79 \text{ V} = 7.17 \text{ V}$$

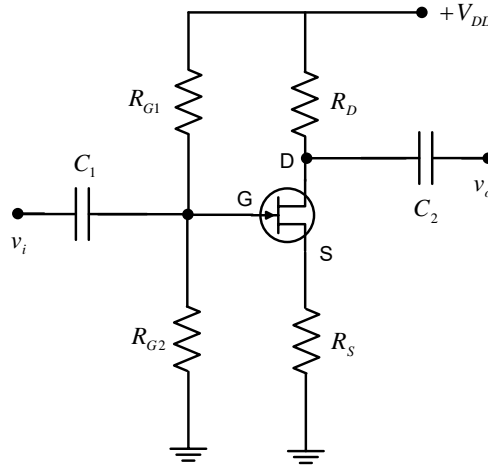
### 7.11 Gerilim bölücü ile öngerilimleme

Bu devre bize, dc öngerilimleme noktasının daha büyük bir aralıkta ayarlanmasını ve daha büyük  $R_S$  değerlerinin kullanılmasını mümkün kılar. Devrenin analizi daha önce anlatılanla aynı olup, burada tek fark, kendinden öngerilim doğrusunun (0,0) noktasından kaydırılmış olmasıdır. Burada da kapı ters öngerilimlidir. Dolayısıyla  $I_G = 0$  dır ve kapı gerilimi  $V_G$  aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot V_{DD}$$

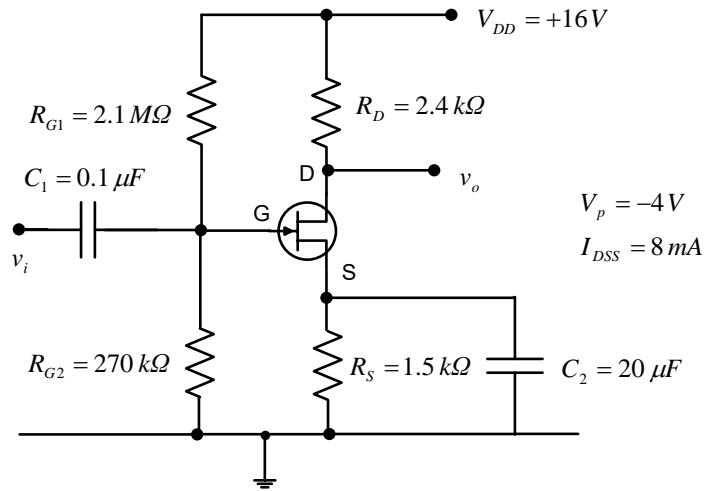
JFET öngerilimi  $V_{GS}$  ise aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_S$$



Şekil 7.21 Gerilim bölücü ile öngerilimleme devresi

**Örnek:** Şekil 7.22 deki devrenin çalışma noktalarını ve  $V_{DS}$  yi belirleyiniz.



Şekil 7.22 Örnek devre

$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 8 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-4 \text{ V}}\right)^2$  ifadesinden aşağıdaki tablo oluşturulur. Ardından

bu tablo değerleri göz önüne alınmak suretiyle transfer karakteristiği çizilir.

| $V_{GS} (V)$     | $I_D (mA)$                           |
|------------------|--------------------------------------|
| 0                | $8 [I_{DSS}]$                        |
| $[0.3V_p] - 1.2$ | $4 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$ |
| $[0.5V_p] - 2.0$ | $2 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$ |
| $[V_p] - 4.0$    | 0                                    |

Kapı gerilimi  $V_G$ , gerilim bölücü şeklinde düşünölmek suretiyle aşğıdaki gibi hesaplanır.

$$V_G = \frac{270 \text{ k}\Omega}{2.1 \text{ M}\Omega + 270 \text{ k}\Omega} \times (16 \text{ V}) = 1.82 \text{ V}$$

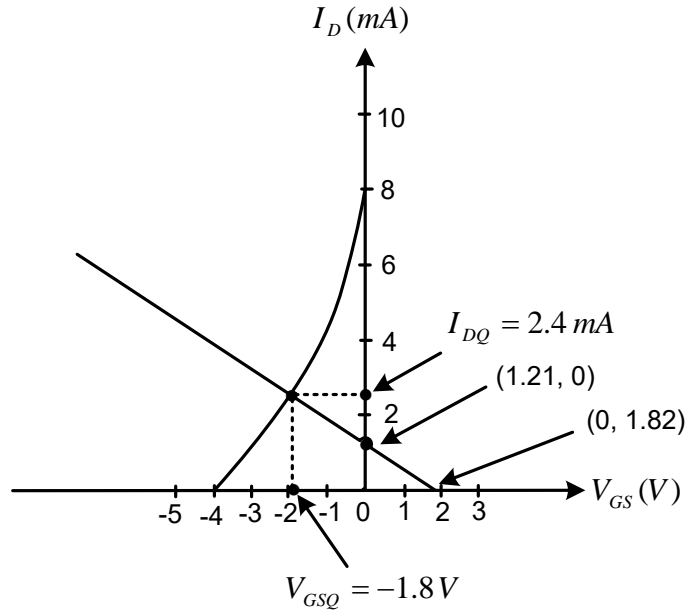
Kendinden öngerilim doğrusu  $V_{GS} = V_G - V_S$  den,

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S = 1.82 \text{ V} - I_D \times (1.5 \text{ k}\Omega)$$

$$I_D = 0 \text{ iken, } V_{GS} = 1.82 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 0 \text{ iken, } I_D = \frac{1.82 \text{ V}}{1.5 \text{ k}\Omega} = 1.21 \text{ mA}$$

| $I_D \text{ (mA)}$ | $V_{GS} \text{ (V)}$ |
|--------------------|----------------------|
| 0                  | 1.82                 |
| 1.21               | 0                    |



Şekil 7.23 Transfer karakteristiğı ve kesişme noktaları

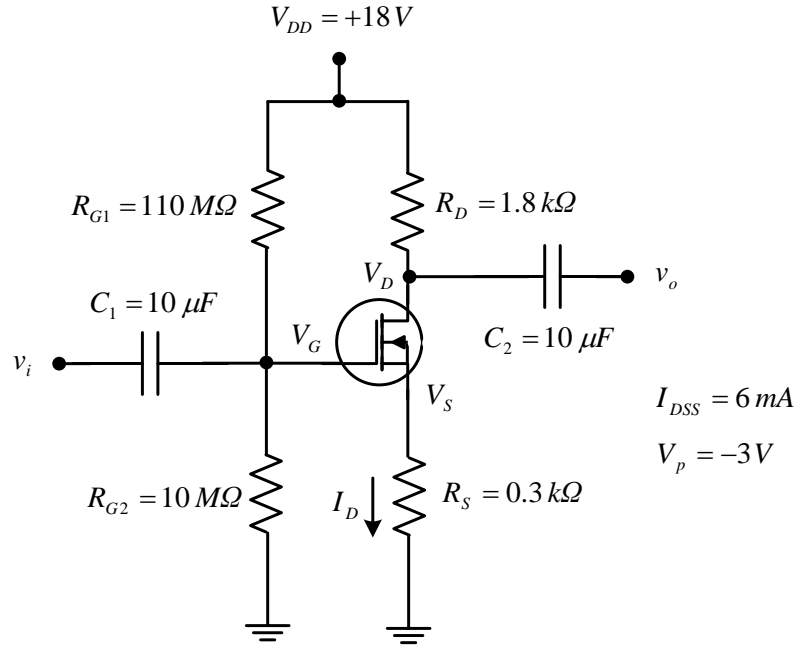
Bu tablo değerleri de kullanılarak kendinden öngerilim doğrusu çizilir. İki karakteristiğın kesişme noktası, Şekil 7.23 de göröldüğü gibi bize  $V_{GSQ} = -1.8 \text{ V}$  ve  $I_{DQ} = 2.4 \text{ mA}$  çalışma noktalarını verir.

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 16 \text{ V} - (2.4 \text{ mA}) \times (2.4 \text{ k}\Omega) = 10.24 \text{ V}$$

$$V_S = I_D R_S = (2.4 \text{ mA}) \times (1.5 \text{ k}\Omega) = 3.6 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 10.24 \text{ V} - 3.6 \text{ V} = 6.64 \text{ V}$$

**Örnek:** Şekil 7.24 deki n-kanallı kanal ayarlamalı MOSFET in transfer karakteristiğini çizerek  $V_{GS}$ ,  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini bulunuz.



Şekil 7.24 Örnek devre

$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 6 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-3 \text{ V}}\right)^2$  ifadesinden aşağıdaki tablo oluşturulur. Ardından

bu tablo değerleri göz önüne alınarak Şekil 7.25 de verilen transfer karakteristiği çizilir.

| $V_{GS} (V)$    | $I_D (mA)$                             |
|-----------------|--|
| $[-0.4V_p] 1.2$ | $12 [2I_{DSS}]$                        |
| 0               | $6 [I_{DSS}]$                          |
| $[0.3V_p] -0.9$ | $3 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$   |
| $[0.5V_p] -1.5$ | $1.5 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$ |
| $[V_p] -3.0$    | 0                                      |

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot V_{DD} = \frac{10 \text{ M}\Omega}{110 \text{ M}\Omega + 10 \text{ M}\Omega} \times (18 \text{ V})$$

$$V_G = 1.5 \text{ V}$$

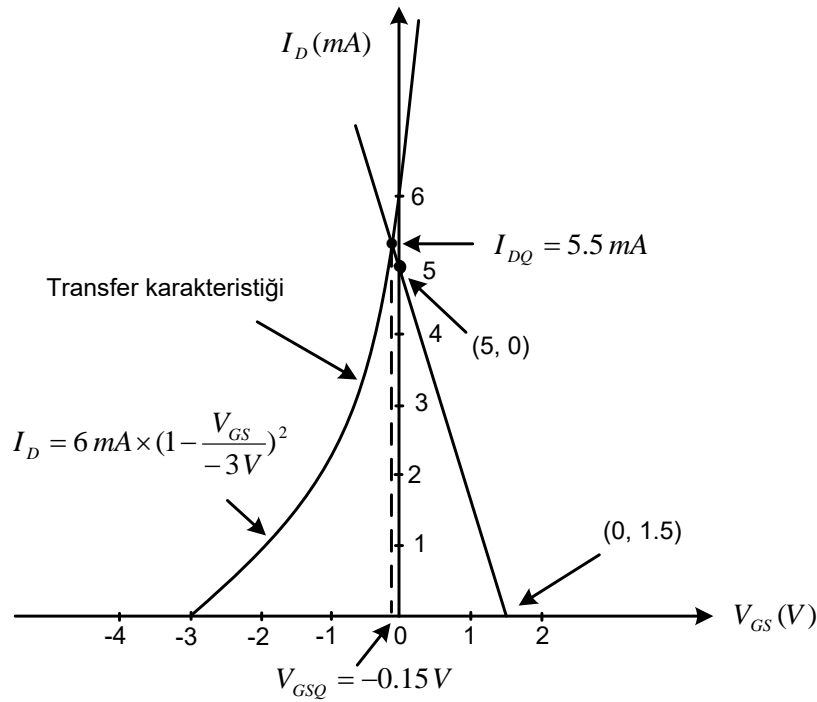
Kendinden öngerilim doğrusu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S = 1.5 V - I_D \times (0.3 k\Omega)$$

Öngerilim doğrusunu göz önüne almak suretiyle aşağıdaki tablo oluşturulur.

| $I_D (mA)$ | $V_{GS} (V)$ |
|------------|--------------|
| 0          | 1.5          |
| 5          | 0            |

Yukarıdaki tablo değerleri Şekil 7.25 deki transfer karakteristiği üzerinde gösterildiğinde,



Şekil 7.25 Transfer karakteristiği

$V_{GSQ} = -0.15 V$  ve  $I_{DQ} = 5.5 mA$  bulunur.

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 18 V - (5.5 mA) \times (1.8 k\Omega) = 8.1 V$$

$$V_S = I_D R_S = (5.5 mA) \times (0.3 k\Omega) = 1.65 V$$

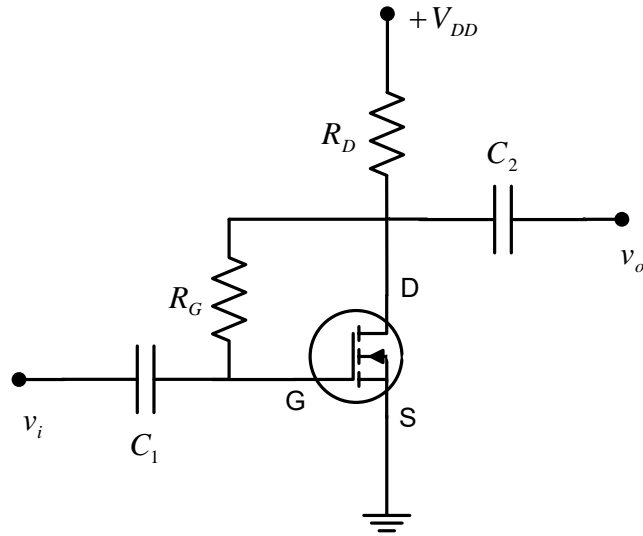
$$V_{DS} = V_D - V_S = 8.1 - 1.65 = 6.45 V$$

## 7.12 Kanal oluşturmali MOSFET öngerilim devreleri

Kanal oluşturmali bir MOSFET transistörü açmak için gereken eşik geriliminden daha büyük bir kapı-kaynak gerilimine ihtiyaç duyulur. Aşağıdaki devre en çok kullanılan tip olup, buradaki  $R_G$  direnci üzerinden MOSFET i açık duruma getirmek için, kapıya yeterli

büyükte bir gerilim uygulanmaktadır. Akım daha sonra akaç-kaynak (veya kapı-kaynak) gerilimi ile akaç akımı arasında belli bir denge durumu oluşana kadar artar. MOSFET akaç akımı, kapı-kaynak gerilimiyle oluşturulur ve  $I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$  ifadesiyle verilir. Burada  $V_T$  eşik gerilimidir.  $I_D$  akımı da  $R_D$  üzerinde bir gerilim düşümüne yol açar ve böylece aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$



Şekil 7.26 Kanal oluşturmali MOSFET öngerilim devresi

Kapı akımı  $I_G = 0$  olduğundan  $V_{GS} = V_{DS}$  dir. Buradan hareketle aşağıdaki sonuç elde edilir.

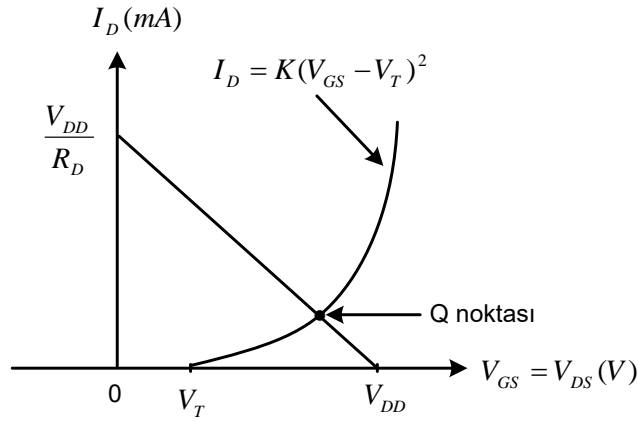
$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = K(V_{DS} - V_T)^2$$

Ayrıca  $V_S = 0$  olduğundan aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D = V_{DD} - I_D R_D \left[ I_D = 0 \text{ iken } V_{DS} = V_{DD} \text{ ve } V_{DS} = 0 \text{ iken } I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} \right]$$

MOSFET akaç karakteristiği  $I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$  denklemi ve yük doğrusunu da  $V_D = V_{DD} - I_D R_D$  denklemi kullanılarak aynı grafik üzerinde Şekil 7.27 deki gibi çizilebilir.





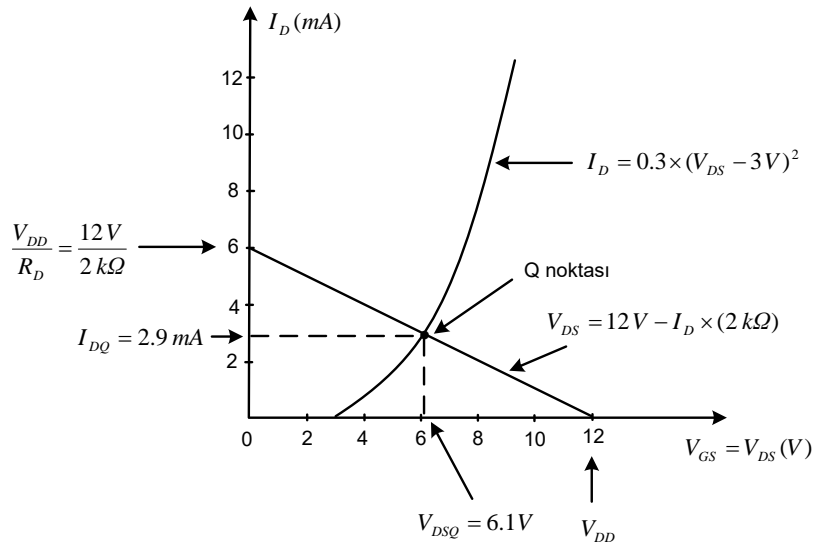
Şekil 7.27 Kanal oluşturmali MOSFET öngerilim devresinin transfer karakteristiği

**Örnek:** Şekil 7.26 daki devrede  $R_D = 2\text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 10\text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = 0.05\text{ }\mu\text{F}$  ve  $V_T = 3\text{ V}$  olmak üzere  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini bulunuz. ( $V_{DD} = 12\text{ V}$  ve  $K = 0.3\text{ mA/V}^2$ )

$I_D = 0.3 \times (V_{DS} - 3)^2$  denklemi yardımı ile oluşturulan tablo değerlerine sahip n-kanallı MOFSET in akaç karakteristiği ve  $V_{DS} = 12\text{ V} - I_D \times (2\text{ k}\Omega)$  denklemi yardımı ile oluşturulan tablo değerlerine sahip yük doğrusu aynı grafik üzerinde Şekil 7.28 deki gibi çizilebilir.

| $V_{GS}(V)$ | $I_D(mA)$ |
|-------------|-----------|
| 3           | 0         |
| 5           | 1.2       |
| 7           | 4.8       |
| 9           | 10.8      |

| $I_D(mA)$ | $V_{GS}(V)$ |
|-----------|-------------|
| 0         | 12          |
| 6         | 0           |

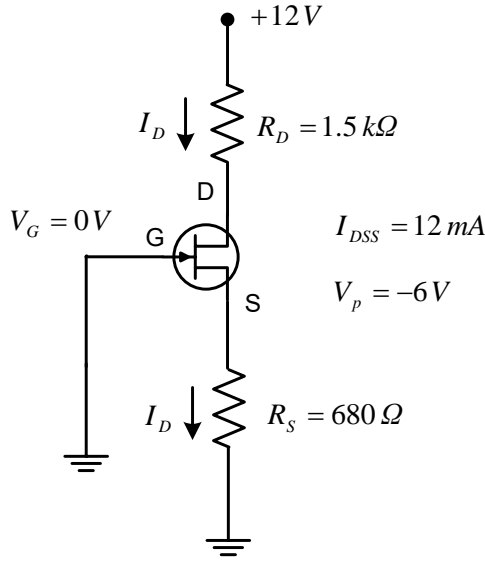


Şekil 7.28 Akaç-kaynak transfer karakteristiği ve yük doğrusu

Şekil 7.28 de verilen iki karakteristiğin kesişmesinden çalışma noktaları  $I_{DQ} = 2.9 \text{ mA}$  ve  $V_{DSQ} = 6.1 \text{ V}$  olarak tespit edilir.

### 7.13 Çeşitli öngerilim devrelerine ait örnekler

**Örnek 1.** Şekil 7.29 daki devrenin  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 7.29 Örnek devre

Devrenin sağlanması gereken iki denklem takımı aşağıda verilmiştir.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-6 \text{ V}}\right)^2$$

$$V_{GS} = -(0.680 \text{ k}\Omega) \times I_D$$

| $V_{GS}(\text{V})$ | $I_D(\text{mA})$                     |
|--------------------|--------------------------------------|
| 0                  | $12 [I_{DSS}]$                       |
| $[0.3V_p]-1.8$     | $6 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$ |
| $[0.5V_p]-3.0$     | $3 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$ |
| $[V_p]-6.0$        | 0                                    |

| $I_D(\text{mA})$ | $V_{GS}(\text{V})$ |
|------------------|--------------------|
| 0                | 0                  |
| 9                | -6                 |

Bu iki karakteristiğin kesişme noktasından  $I_{DQ} = 3.84 \text{ mA}$  ve  $V_{GSQ} = -2.61 \text{ V}$  olarak tespit edilir. Buradan hareketle aşağıdaki değerler bulunur.

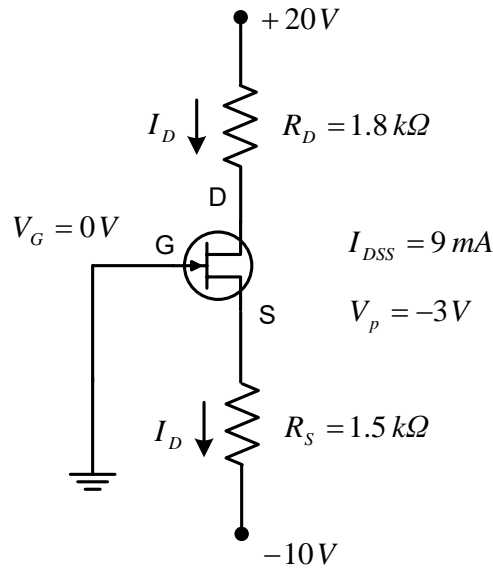
$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 12 \text{ V} - (1.5 \text{ k}\Omega) \times (3.84 \text{ mA}) = 6.24 \text{ V}$$

$$V_S = I_D R_S = (3.84 \text{ mA}) \times (0.680 \text{ k}\Omega) = 2.61 \text{ V}$$

Buradan da  $V_{DS}$  gerilimi aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{DS} = V_D - V_S = 6.24 \text{ V} - 2.61 \text{ V} = 3.63 \text{ V}$$

**Örnek 2.** Şekil 7.30 daki devrenin  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 7.30 Örnek devre

Kapı-kaynak devre denkleminde aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$V_{GS} + I_D R_S - 10 \text{ V} = 0$$

$$V_{GS} = 10 \text{ V} - I_D \times (1.5 \text{ k}\Omega)$$

Aynı zamanda eleman denkleminde de aşağıdaki yazılabilir.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 9 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-3 \text{ V}}\right)^2$$

Yukarıda verilen iki denklem çiftinden aşağıdaki tablolar oluşturulur.

| $V_{GS}(V)$    | $I_D(mA)$                            |
|----------------|--------------------------------------|
| 0              | $9[I_{DSS}]$                         |
| $[0.3V_p]-0.9$ | $4.5\left[\frac{I_{DSS}}{2}\right]$  |
| $[0.5V_p]-1.5$ | $2.25\left[\frac{I_{DSS}}{4}\right]$ |
| $[V_p]-3.0$    | 0                                    |

| $I_D(mA)$ | $V_{GS}(V)$ |
|-----------|-------------|
| 0         | 10          |
| 6.67      | 0           |

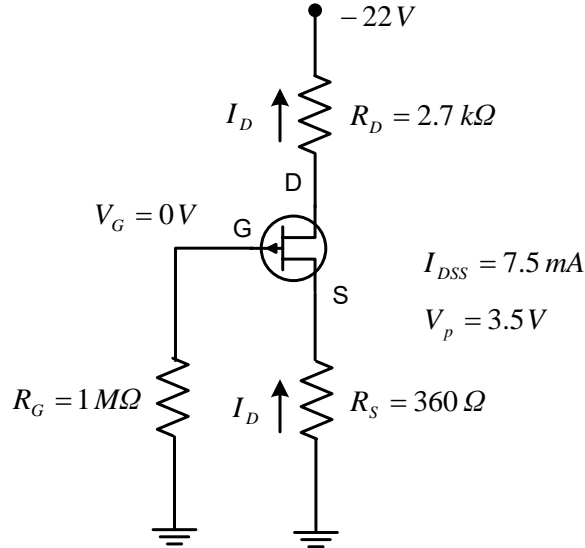
Bu iki karakteristiğin kesişme noktasından  $I_{DQ} = 6.9 \text{ mA}$  ve  $V_{GSQ} = -0.35 \text{ V}$  bulunur.

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 20 \text{ V} - (6.9 \text{ mA}) \times (1.8 \text{ k}\Omega) = 7.58 \text{ V}$$

$$V_S = -10 \text{ V} + (6.9 \text{ mA}) \times (1.5 \text{ k}\Omega) = 0.35 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 7.58 \text{ V} - 0.35 \text{ V} = 7.23 \text{ V}$$

**Örnek 3.** Şekil 7.31 deki devrenin (p-kanallı JFET)  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 7.31 Örnek devre

Kapı-kaynak çevre denkleminde aşağıdaki ifade yazılır.

$$V_{GS} - I_D R_S = 0$$

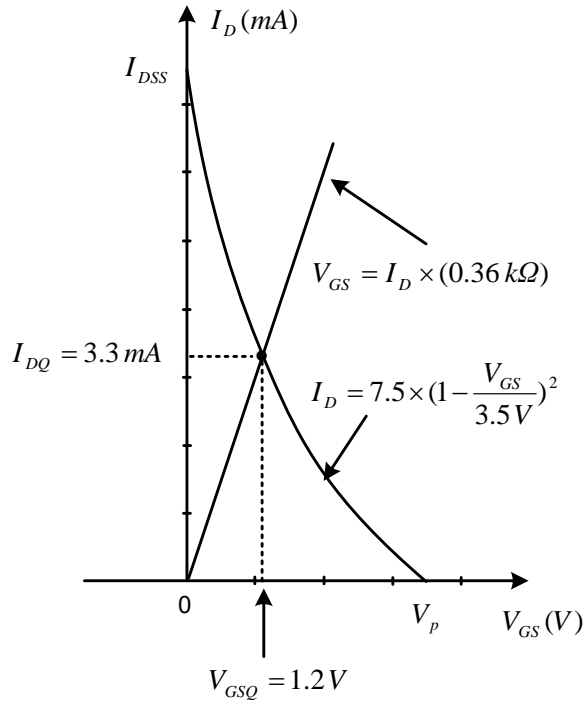
$$V_{GS} = I_D \times (0.36 \text{ k}\Omega)$$

Eleman denkleminde de aşağıdaki ifade yazılır.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 7.5 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{3.5 \text{ V}}\right)^2$$

| $I_D (mA)$ | $V_{GS} (V)$ |
|------------|--------------|
| 0          | 0            |
| 9.72       | 3.5          |

| $V_{GS} (V)$    | $I_D (mA)$                               |
|-----------------|--|
| 0               | $7.5 [I_{DSS}]$                          |
| $[0.3V_p] 1.05$ | $3.75 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$  |
| $[0.5V_p] 1.75$ | $1.875 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$ |
| $[V_p] 3.5$     | 0  |



Şekil 7.32 Akaç-kaynak transfer karakteristiği ve yük doğrusu

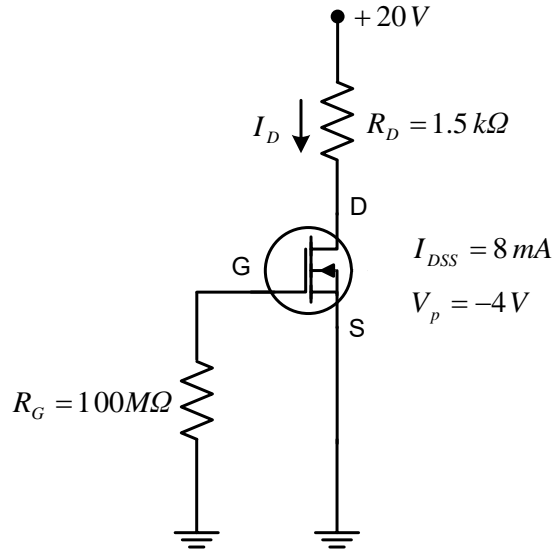
Bu iki karakteristiğin kesişme noktasından, çalışma noktaları olarak  $I_{DQ} = 3.3 \text{ mA}$  ve  $V_{GSQ} = 1.2 \text{ V}$  değerleri bulunur. Bu değerlerden faydalanarak aşağıdakileri bulabiliriz.

$$V_D = V_{DD} + I_D R_D = -22 \text{ V} + (3.3 \text{ mA}) \times (2.7 \text{ k}\Omega) = -13.09 \text{ V}$$

$$V_S = -I_D R_S = -(3.3 \text{ mA}) \times (0.360 \text{ k}\Omega) = -1.19 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = -13.09 \text{ V} - (-1.19 \text{ V}) = -11.9 \text{ V}$$

**Örnek 4.** Şekil 7.33 deki n-kanallı kanal ayarlamalı bir MOFSET devresi için  $I_D$  ve  $V_D$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 7.33 Örnek devre

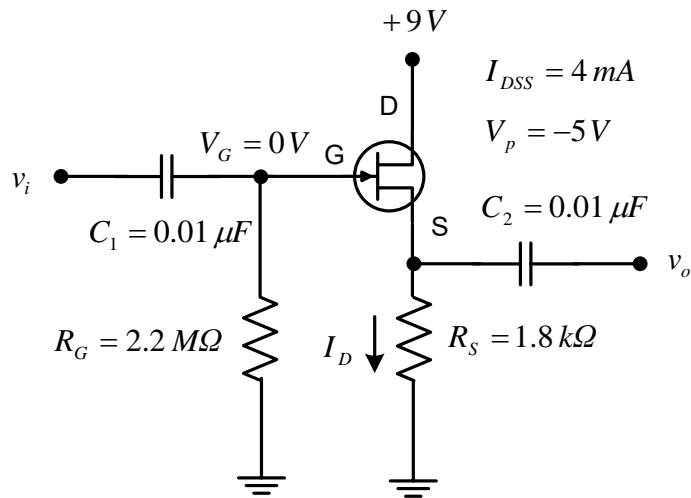
$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - 0 = 0$$

$$I_D = I_{DSS} = 8 \text{ mA}$$

Akçe gerilimi ise aşığıdaki gibi bulunur.

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 20 \text{ V} - (8 \text{ mA}) \times (1.5 \text{ k}\Omega) = 8 \text{ V}$$

**Örnek 5.** Şekil 7.34 deki n-kanallı bir JFET devresi için  $I_D$  ve  $V_S$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 7.34 Örnek devre

$$V_{GS} = 0 - I_D R_S = -I_D \times (1.8 \text{ k}\Omega)$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 4 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-5 \text{ V}}\right)^2$$

| $I_D (\text{mA})$ | $V_{GS} (\text{V})$ |
|-------------------|---------------------|
| 0                 | 0                   |
| 2.8               | -5                  |

| $V_{GS} (\text{V})$ | $I_D (\text{mA})$                 |
|---------------------|-----------------------------------|
| 0                   | $4[I_{DSS}]$                      |
| $[0.3V_p]-1.5$      | $2\left[\frac{I_{DSS}}{2}\right]$ |
| $[0.5V_p]-2.5$      | $1\left[\frac{I_{DSS}}{4}\right]$ |
| $[V_p]-5$           | 0                                 |

Bu iki karakteristiğin kesişme noktasından, çalışma noktaları olarak  $I_{DQ} = 1.23 \text{ mA}$  ve  $V_{GSQ} = -2.2 \text{ V}$  değerleri bulunur. Bu değerlerden faydalanarak aşağıdakini bulabiliriz.

$$V_S = I_D R_S = (1.23 \text{ mA}) \times (1.8 \text{ k}\Omega) = 2.21 \text{ V}$$