

## 5. ALAN ETKİLİ TRANSİSTORLAR

### 5.1 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.

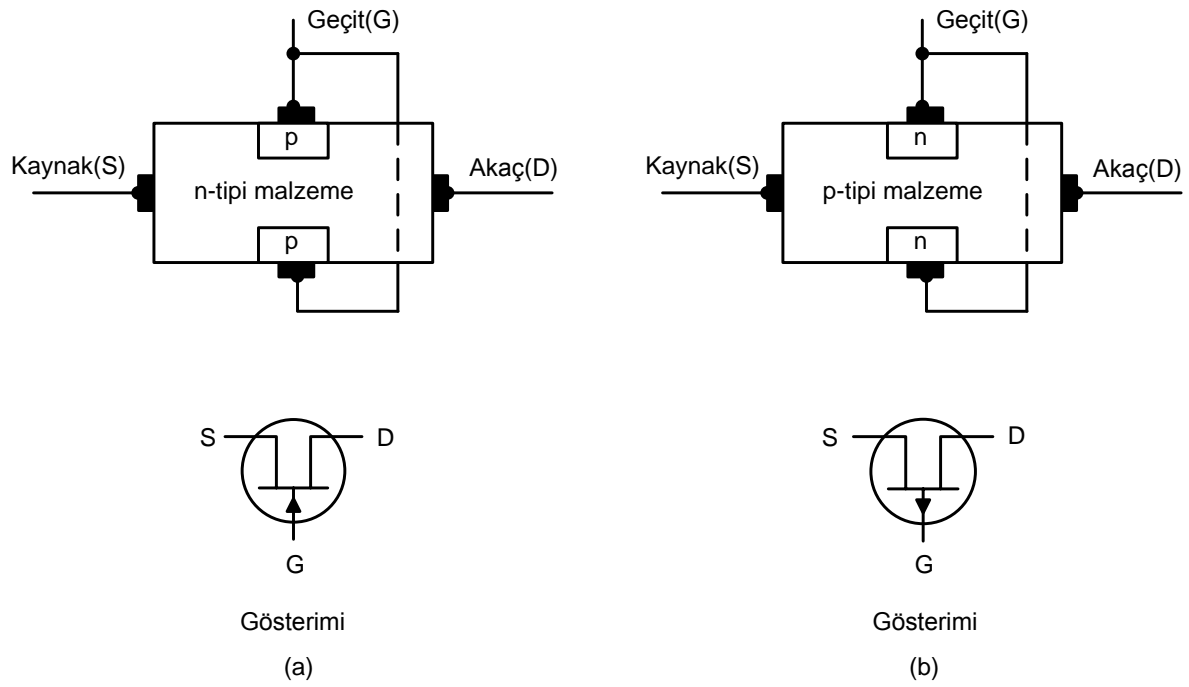
FET ler p-n jonksiyonuna sahip üç uçlu bir eleman olup ya jonksiyon FET (JFET) VEYA metal oksit yarıiletken FET (MOSFET) olarak üretilmektedir.

### 5.2 JFET in çalışması

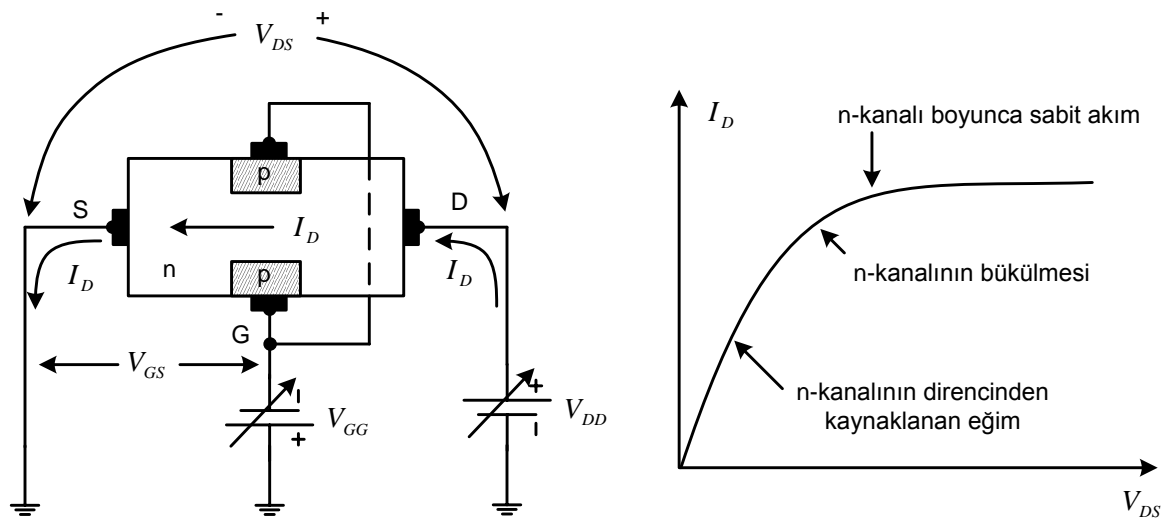
N kanallı JFET, içine bir çift p-tipi bölgenin difüzyon yoluyla yerleştirilmiş olan n-tipi bir çubuk kullanılarak yapılmaktadır. p kanallı JFET ise bunun tam tersidir.

Şekil 5.1(a) daki n-tipi eleman için kapı üzerindeki ok işareti, kapının(geçit) p-tipi, kanalın ise n-tipi, şekil 5.1(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

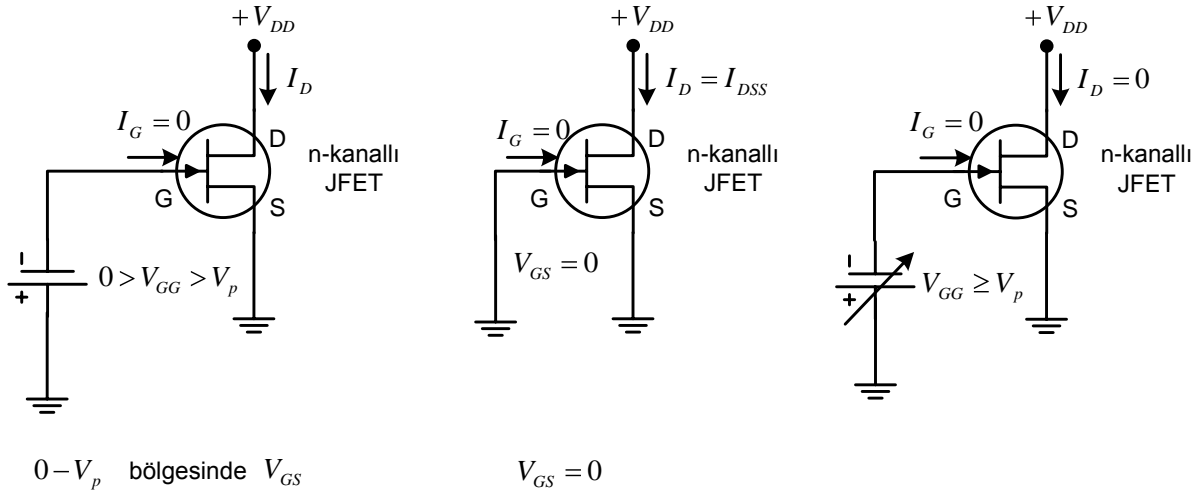
kaynak geriliminin polaritesi, kapı-kaynak jonksiyonunu ters öngerilimleyeceğinden, kapıdan akım akmayacaktır. Kapı-kaynak geriliminin yaratacağı etki, kanalda bir boşaltma etkisi yaratmak ve kanal genişliğini azaltarak akaç-kaynak direncini artırıp daha az akaç akımı geçirmektir(şekil 5.2).



Şekil 5.1



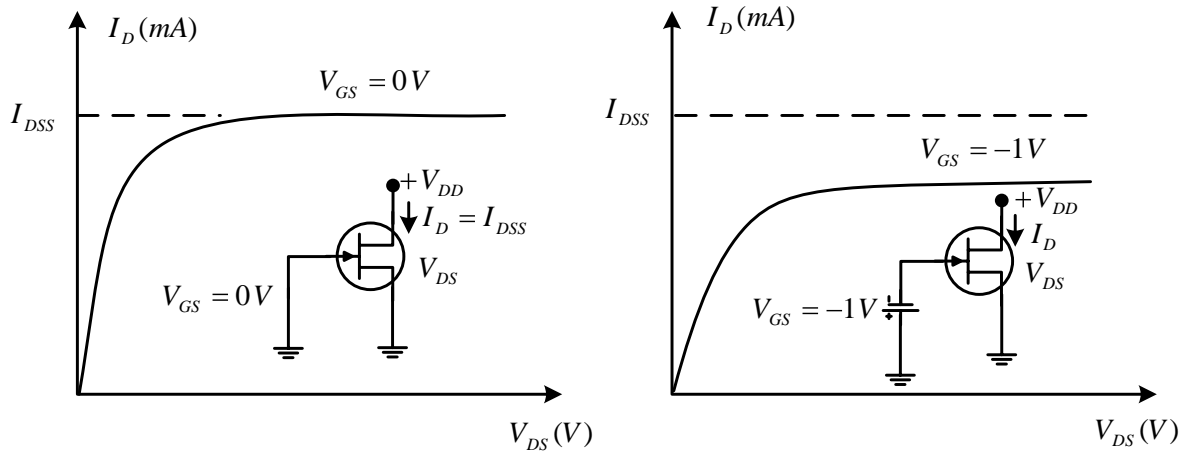
Şekil 5.2



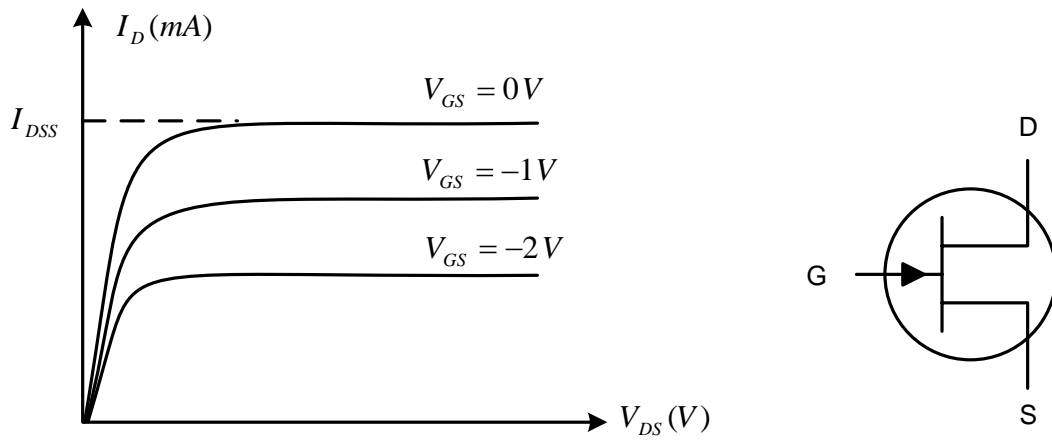
Şekil 5.3

Şekil 5.3 deki  $I_{DSS}$  akımı akaç-kaynak doyma akımı olup,  $V_p$  ise kısılma gerilimidir.

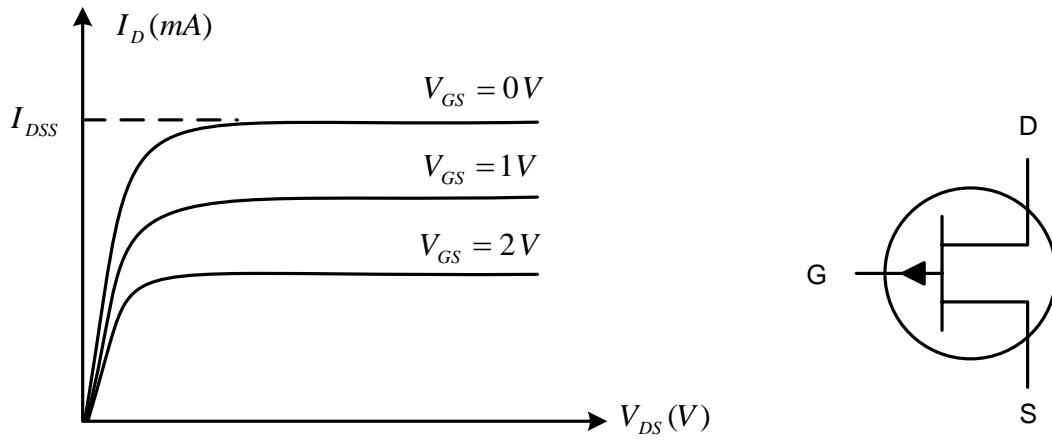
### 5.3 JFET in akaç-kaynak karakteristiği



Şekil 5.4 n-kanallı JFET için  $V_{GS} = 0 V$  ve  $V_{GS} = -1 V$  akaç-kaynak karakteristikleri

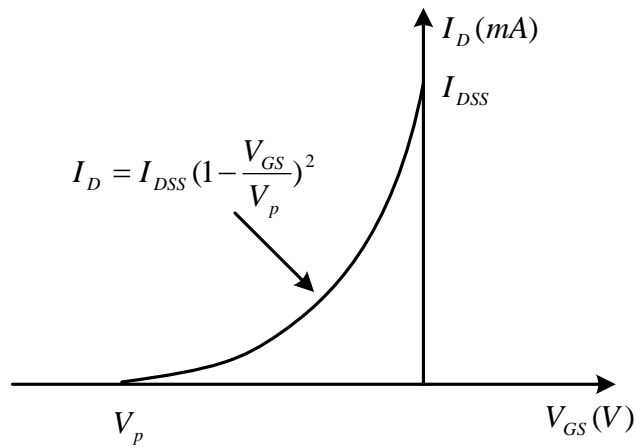


Şekil 5.5 n-kanallı JFET in tüm karakteristiği



Şekil 5.6 p-kanallı JFET in tüm karakteristiği

#### 5.4 JFET in transfer karakteristiği



Şekil 5.7 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.

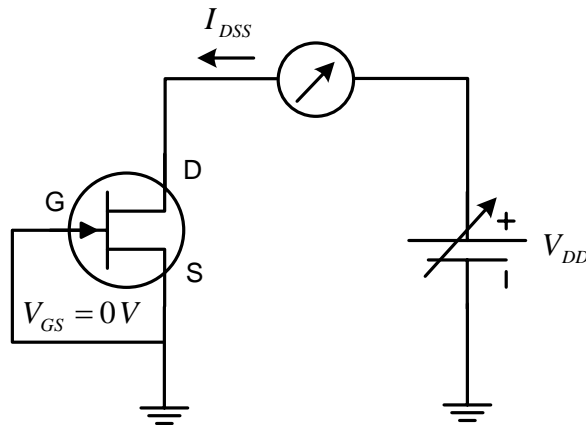
$$(a) I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{0V}{-4V}\right)^2 = 12 \text{ mA}$$

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

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

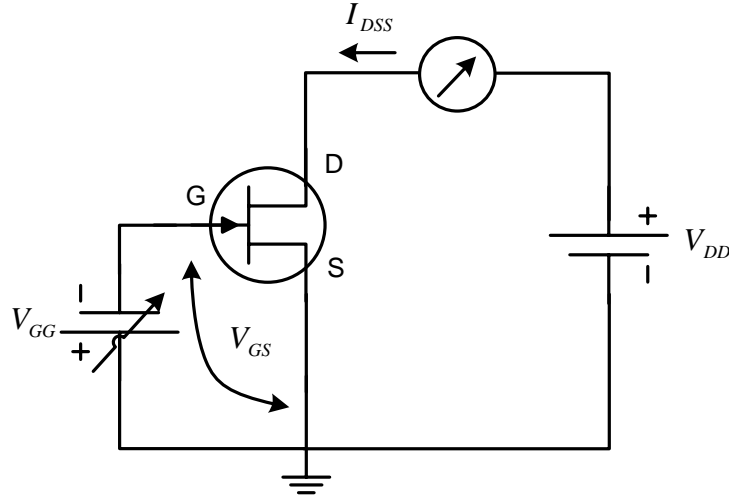
JFET elemanının çalışmasını tanımlamak için kullanılan parametreler  $I_{DSS}$  (akaç-kaynak doyma akımı) ve  $V_p$  (kısılma gerilimi) değerleridir. Bu değerler için üretici karakteristik özellik sayfalarındaki tipik değerler kullanılabilir veya söz konusu JFET üzerinden ölçülebilir.

$I_{DSS}$  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 5.8 de gösterilmiştir.



Şekil 5.8  $I_{DSS}$  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 5.9 da gösterilmiştir.



Şekil 5.9  $V_p$  nin ölçülerek elde edilmesine ait devre

### 5.5 JFET Parametreleri

1.  $I_{DSS}$  : akaç-kaynak doyma akımı
2.  $V_p = V_{GS}$  : kısılma veya kapı-kaynak kapama gerilimi
3.  $BV_{GSS}$  : akaç kaynak kısa devreyken elemanın kırılma gerilimi
4.  $g_m = g_{fs}$  : elemanın geçiş iletkenliği (transkondüktansı)
5.  $r_{ds}$  : eleman açıldığı zaman görülen akaç-kaynak direnci

Bir ve ikinci maddeler yukarıda yeteri kadar açıklandı. Üçüncü madde için ise  $BV_{GSS}$  belirli bir akımda akaç-kaynak kısa devre iken ( $V_{DS} = 0V$ ) ölçülür. Dördüncü madde için ise

$$g_{fs} = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS}=0} = g_m \text{ ölçülür ve bu değer JFET ac yükseltme durumunu gösterir.}$$

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

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

$g_m$  nin birimi [mho] veya [Siemens] dir. Aldığı tipik değerler ise 1mS ila 10 mS veya 1000  $\mu$ S ila 10000  $\mu$ S arasındadır.

$$g_{mo} = \left(\frac{2I_{DSS}}{|V_p|}\right) \text{ olmak üzere } g_m = g_{mo} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)$$

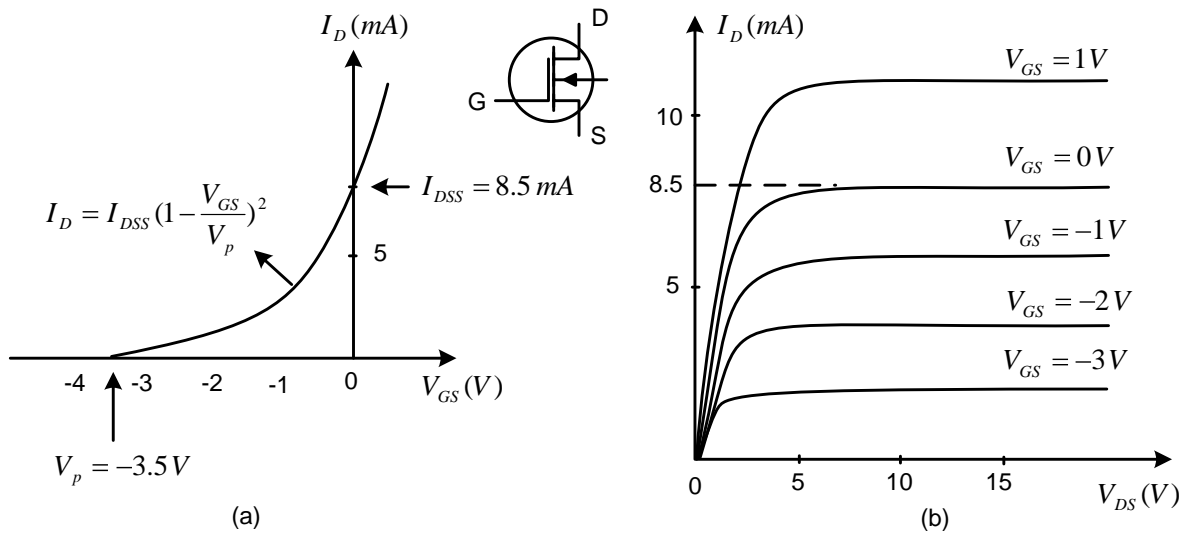
**Örnek:**  $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$  ve  $V_p = -4 \text{ V}$  luk değerlere sahip bir JFET in geçiş iletkenliğini  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  ve  $V_{GS} = -1.5 \text{ V}$  öngerilim noktalarında hesaplayınız.

$$g_{mo} = \left(\frac{2I_{DSS}}{|V_p|}\right) = \frac{2 \times (12 \text{ mA})}{|-4|} = 6.10^{-3} \text{ Siemens} = 6000 \mu\text{S}$$

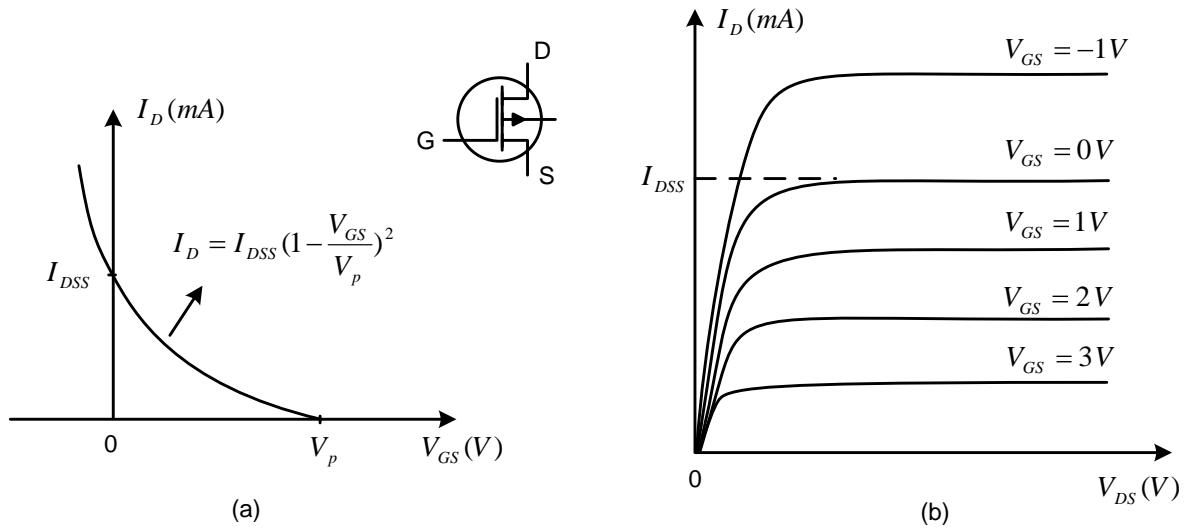
$$(a) \quad g_m = g_{mo} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right) = 6 \text{ mS} \times \left(1 - \frac{0}{-4}\right) = 6 \text{ mS} = 6000 \mu\text{S}$$

$$(b) \quad g_m = g_{mo} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right) = 6 \text{ mS} \times \left(1 - \frac{-1.5}{-4}\right) = 3.75 \text{ mS} = 3750 \mu\text{S}$$

## 5.6 Kanal ayarlamalı MOSFET



Şekil 5.10 n-kanallı kanal ayarlamalı MOSFET in (a) Transfer (b) Akçe karakteristiği

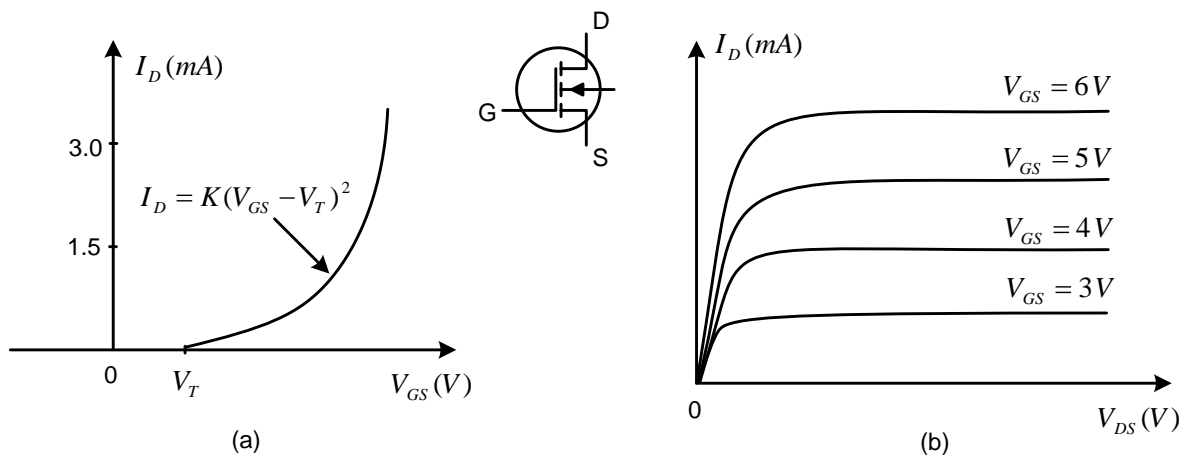


Şekil 5.11 p-kanallı kanal ayarlamalı MOSFET in (a) Transfer (b) Akaç karakteristiği

### 5.7 Kanal oluşturmali MOSFET

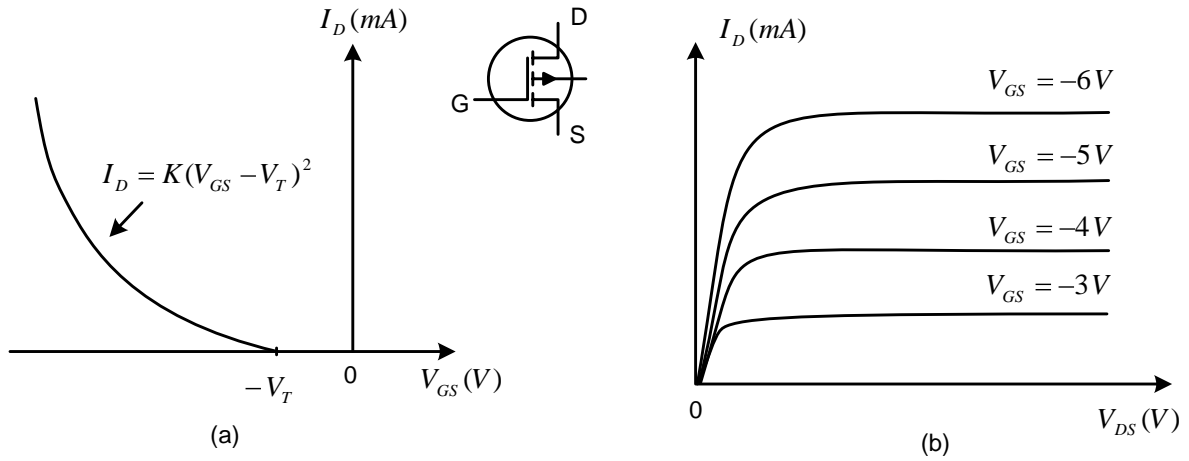
$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

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



Şekil 5.12 n-kanallı kanal oluşturmali MOSFET in (a) Transfer karakteristiği (b) Akaç karakteristiği





Şekil 5.13 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.

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

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

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

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.

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

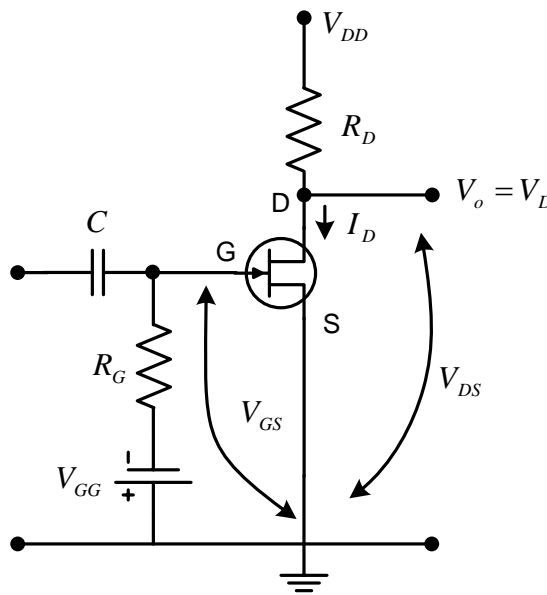
$$(b) g_m = 2 \times (0.3) \times (8 - 3) = 3 mS$$

### 5.8 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 5.14 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 5.14 FET in öngerilimlenmesi

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

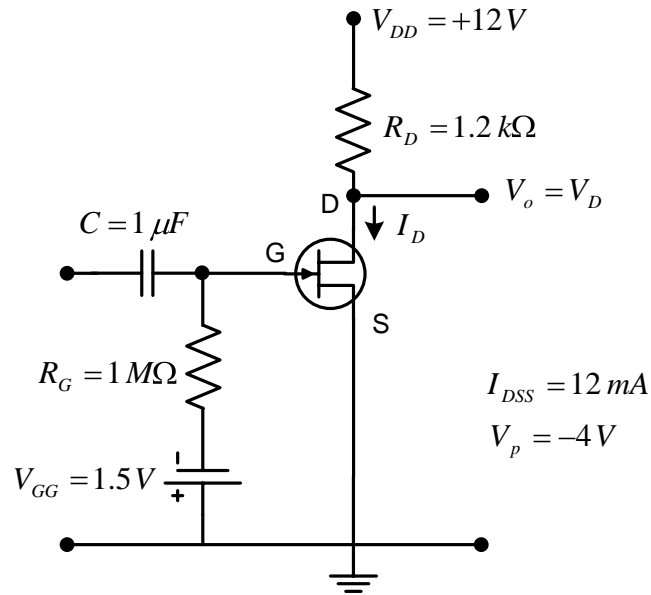
olduğunu bilinmektedir.  $I_{RG} = 0$  olduğundan,  $V_{GS} = -V_{GG}$  olur.

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

$$V_{RD} = I_D R_D$$

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

**Örnek:** Şekil 5.15 deki sabit öngerilim devresinin akaç akımını ( $I_D$ ) ve akaç-kaynak ( $V_{DS}$ ) gerilimini bulunuz.



Şekil 5.15 Örnek devre

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

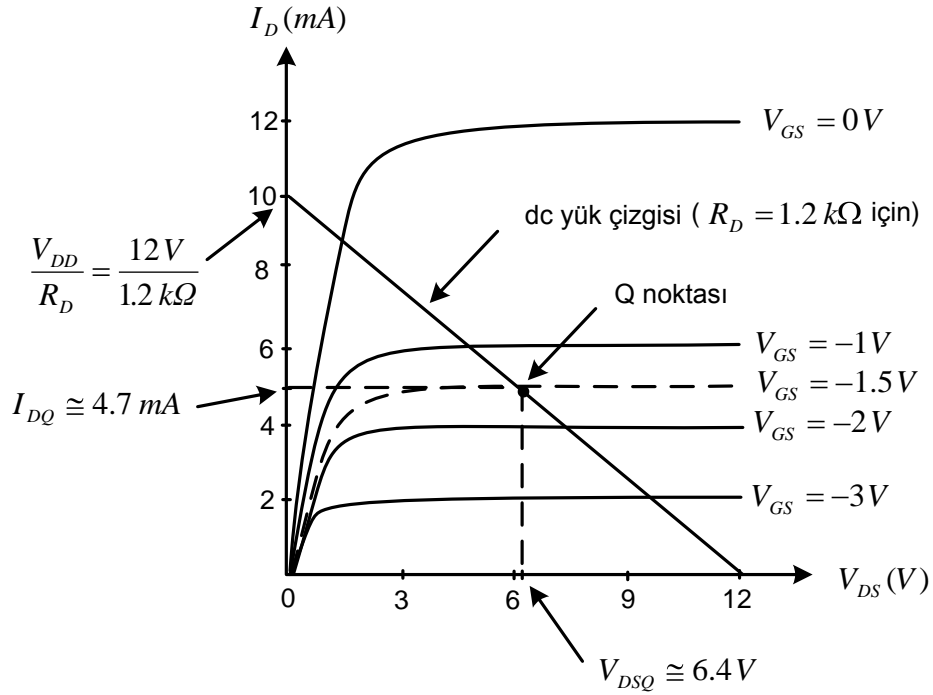
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 12 mA \times \left(1 - \frac{-1.5 V}{-4 V}\right)^2 = 4.69 mA$$

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

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

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

Grafik analiz, dc öngerilimlemeye neden ihtiyaç duyulduğunu anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bir JFET akaç-kaynak karakteristiği şekil 5.16 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 5.16 Bir JFET in akaç-kaynak karakteristiği

$I_D = 0 \text{ mA}$  için,

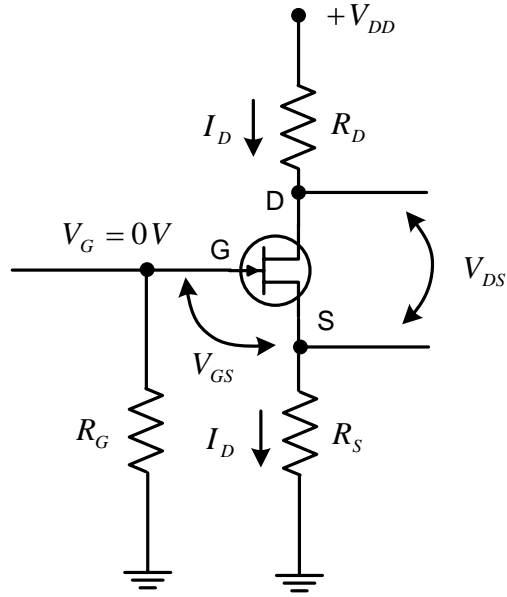
$V_D = V_{DD} - R_D I_D = V_{DD} = 12 \text{ V}$  olur.

$V_{DS} = V_D = 0 \text{ V}$  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 5.17 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 5.17 deki devrede,  $V_{DD} = 24 \text{ V}$ ,  $R_D = 6.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_S = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,

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

a) Transfer karakteristiği yardımıyla  $V_{GS}$  ve  $I_D$  yi bulunuz.

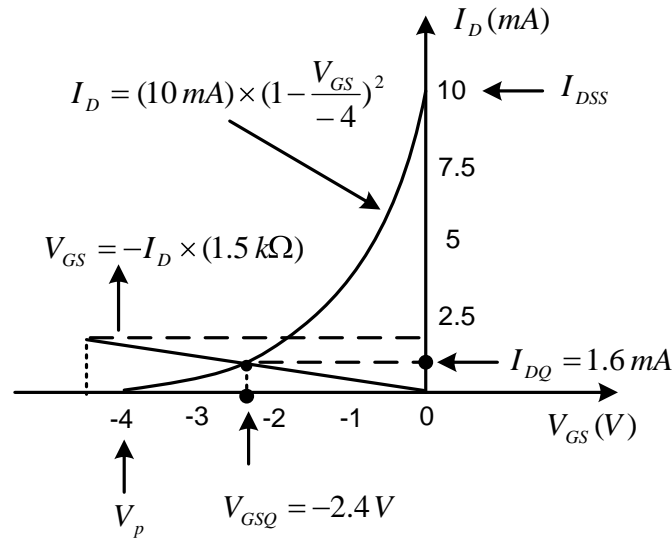
b)  $V_{DS}$  yi bulunuz.

c)  $I_{DSS} / 2$  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.

$V_{GS}(V)$	$I_D(mA)$	$I_D(mA)$	$V_{GS}(V)$
0	10 $I_{DSS}$	0	0
$0.3V_p$ -1.2	$5 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$	$\left[ \frac{V_p}{R_S} \right] 2.67$	-4
$0.5V_p$ -2.0	$2.5 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$		
$V_p$ -4.0	0		



Şekil 5.18 Kendinden öngerilimli JFET yükselticinin transfer karakteristiği

(b)

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

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

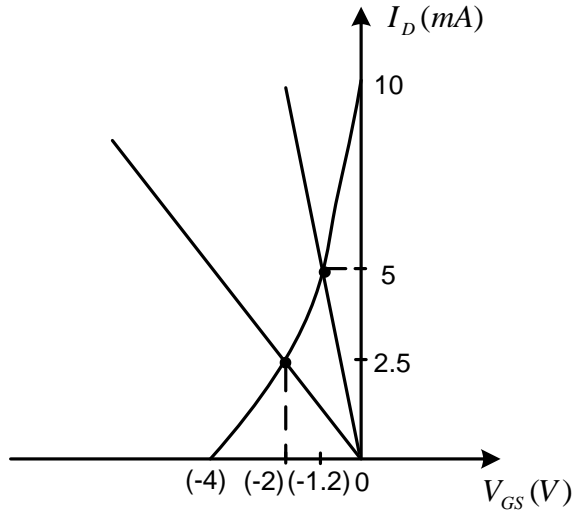
$$V_S = I_D R_S = (1.6 \text{ mA}) \times (1.5 \text{ k}\Omega) = 2.4 \text{ V}$$

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

(c) Bu durum, ölçekli bir şekilde şekil 5.19 da gösterilmiştir.

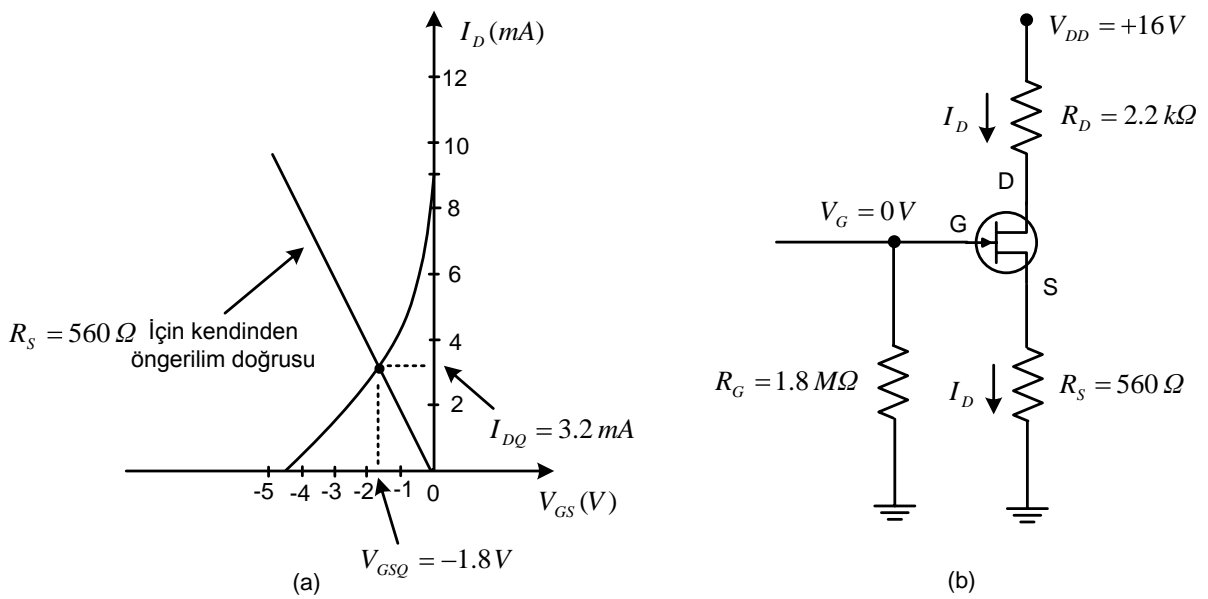
$$I_D = \frac{I_{DSS}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mA} \quad \rightarrow \quad R_S \left( \frac{I_{DSS}}{2} \text{ için} \right) = \frac{|V_{GS}|}{I_D} = \frac{1.2 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 240 \Omega$$

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



Şekil 5.19

**Örnek:** Şekil 5.20(a) da verilen transfer karakteristiğinden yararlanarak, şekil 5.20(b) de verilen devrenin  $I_{DSS}$  ve  $V_p$  değerlerini belirleyin ve  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini bulunuz.



Şekil 5.20(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,

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

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

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

### 5.11 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  $V_G$ ,

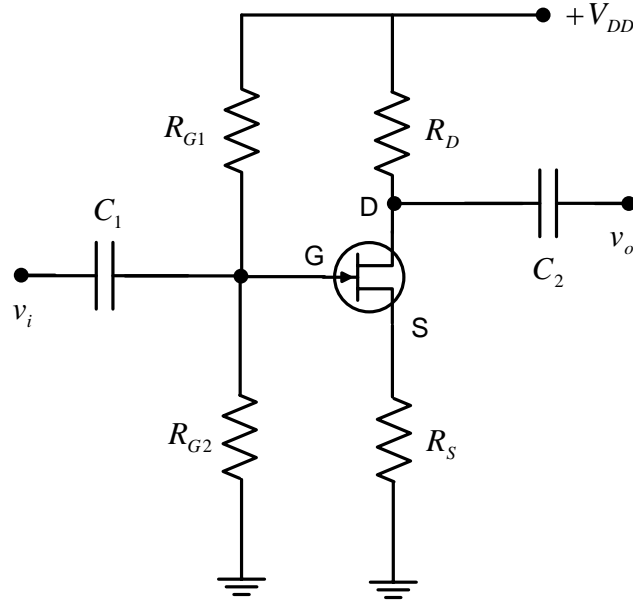
$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot V_{DD}$$

olarak bulunur ve JFET öngerilimi  $V_{GS}$  ise,



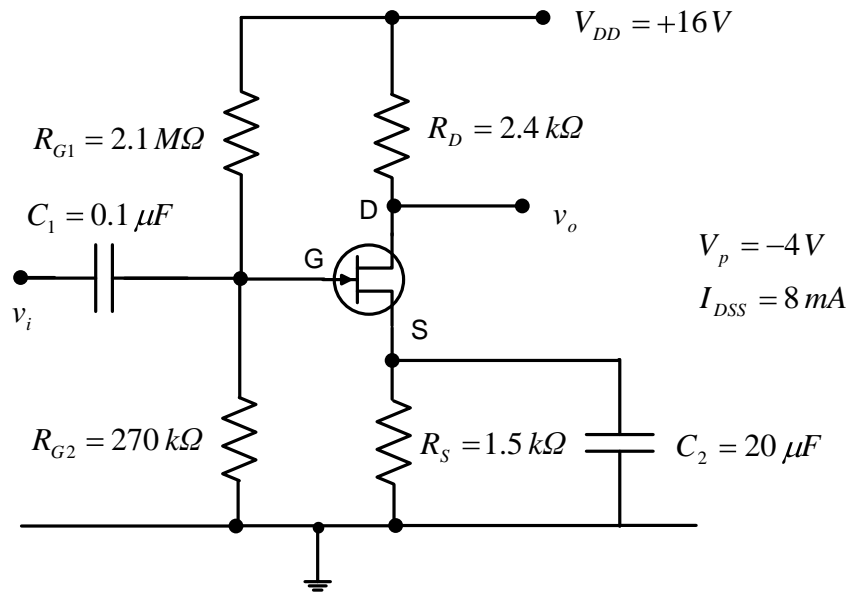
$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_S$$

olarak elde edilir.



Şekil 5.21 Gerilim bölücü ile öngerilimleme devresi

**Örnek:** Şekil 5.22 deki devrenin çalışma noktalarını belirleyiniz.



Şekil 5.22 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	$8 \text{ mA}$
$-1.2 \text{ V}$	$4 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$
$-2.0 \text{ V}$	$2 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$
$-4.0 \text{ V}$	0

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

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

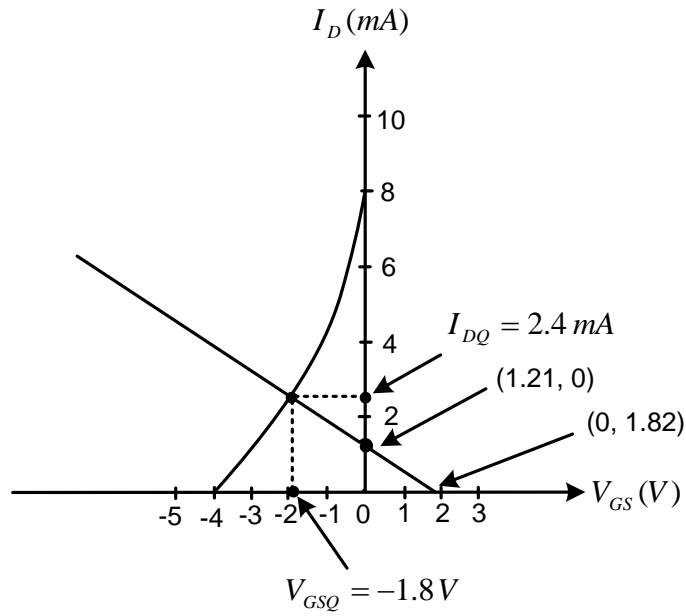
Kendinden öngerilim doğrusu  $V_{GS} = V_G - V_s$  den,

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

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

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

$I_D (mA)$	$V_{GS} (V)$
0	1.82
1.21	0



Şekil 5.23 Transfer karakteristiği ve kesişme noktaları

Bu tablo değerleri de kullanılarak kendinden öngerilim doğrusu çizilir. İki karakteristiğin kesişme noktası, şekil 5.23 de görüldüğü gibi bize  $V_{GSQ} = -1.8\text{ V}$  ve  $I_{DQ} = 2.4\text{ mA}$  çalışma noktalarını verir.

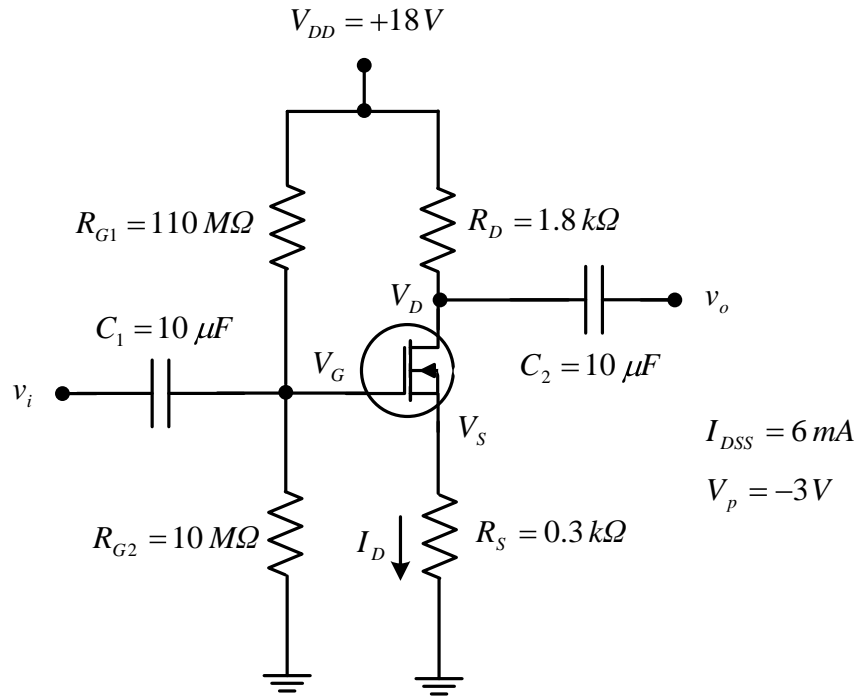
**Soru:** Aynı devre için,  $V_D$ ,  $V_S$  ve  $V_{DS}$  yi belirleyiniz.

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

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

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

**Örnek:** Şekil 5.24 deki n-kanallı kanal ayarlamalı MOSFET in transfer karakteristiğini çizerek  $V_{GS}$ ,  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini bulunuz.



Şekil 5.24 Örnek devre

$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 6 \text{ mA} \times \left(1 - \frac{V_{GS}}{-3V}\right)^2$  ifadesinden aşağıdaki tablo oluşturulur. Ardından bu tablo değerleri göz önüne alınarak şekil 5.25 de verilen transfer karakteristiği çizilir.

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

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

$$V_G = 1.5 V$$

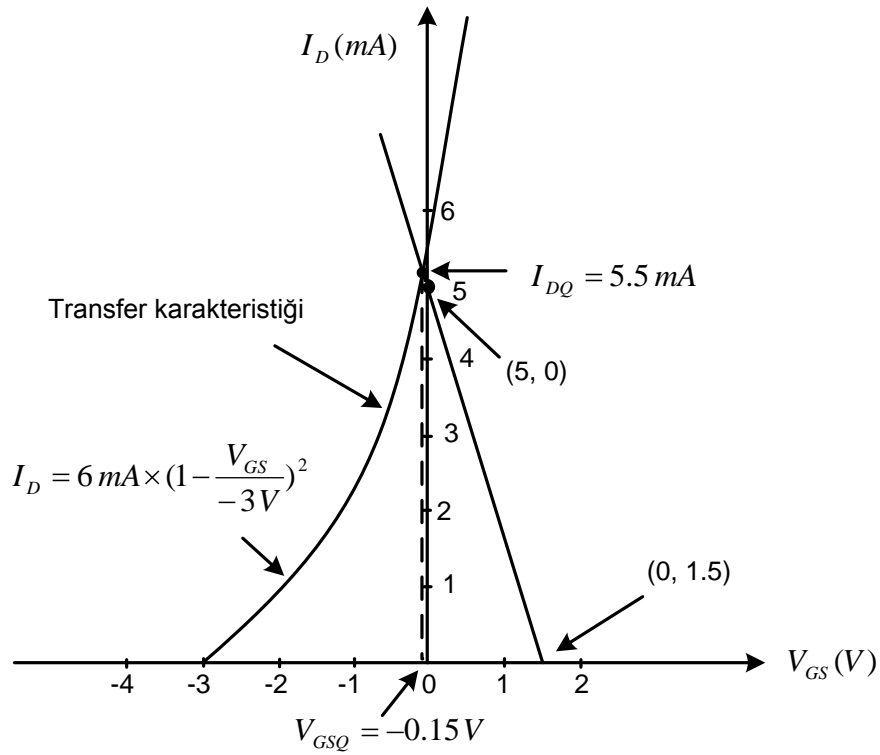
Kendinden öngerilim doğrusu,

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

öngerilim doğrusunu göz önüne almak suretiyle aşağıdaki tablo oluşturulur.

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

Yukarıdaki tablo değerleri şekil 5.25 deki transfer karakteristiği üzerinde gösterildiğinde,



Şekil 5.25 Transfer karakteristiği

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

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

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

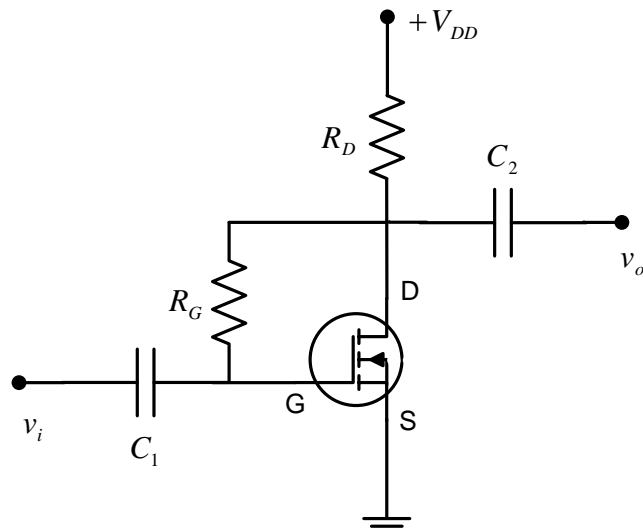
$$V_{DS} = V_D - V_S = 8.1 - 1.65 = 6.45\text{ V}$$

### 5.12 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 büyüklükte 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;

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

sonucu elde edilir.



Şekil 5.26 Kanal oluşturmali MOSFET öngerilim devresi

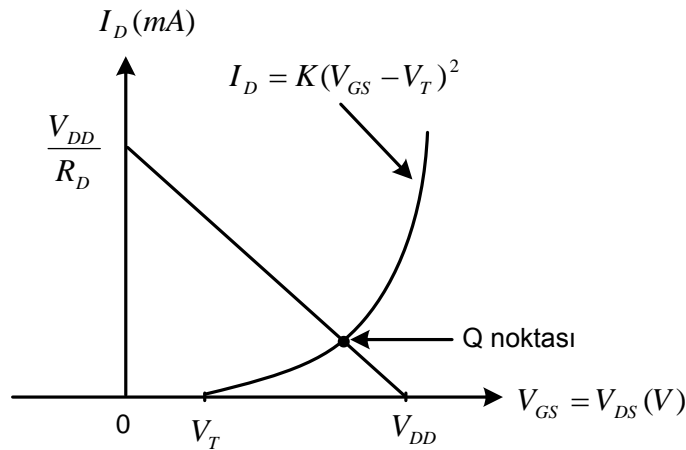
Kapı akımı  $I_G = 0$  olduğundan  $V_{GS} = V_{DS}$  dir. Buradan hareketle aşağıdaki sonuç elde edilir.

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

Ayrıca  $V_S = 0$  olduğundan

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

yazılabilir. 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 5.27 deki gibi çizilebilir.



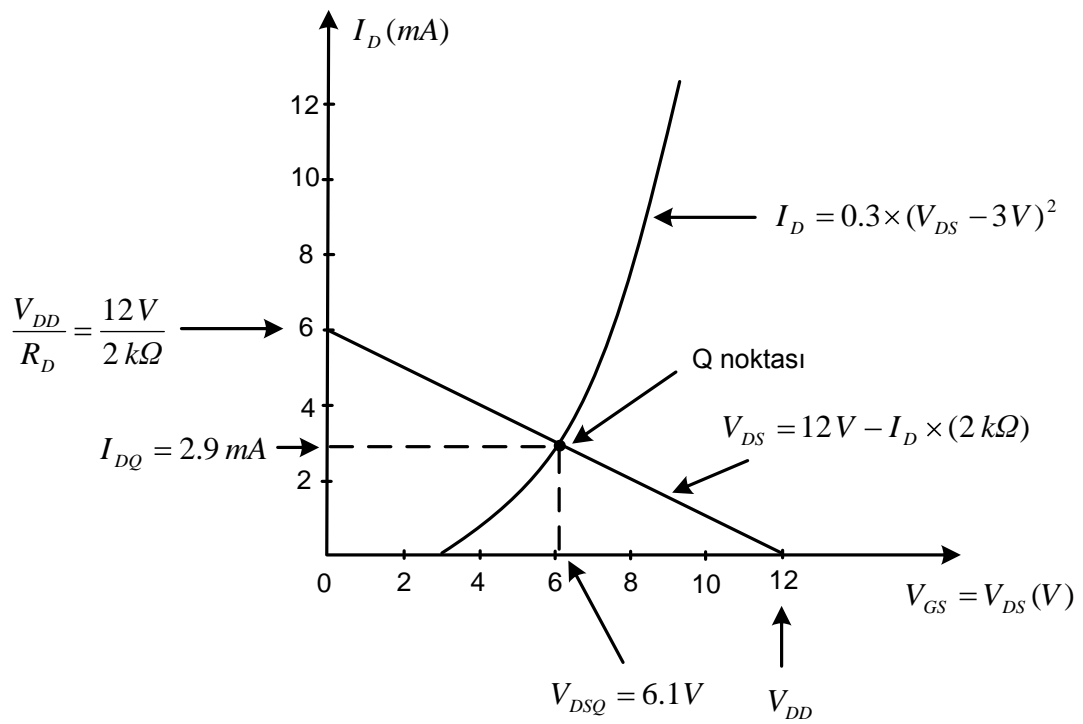
Şekil 5.27 Kanal oluşturmali MOSFET öngerilim devresinin transfer karakteristiği

**Örnek:** Şekil 5.26 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 MOSFET 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 5.28 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



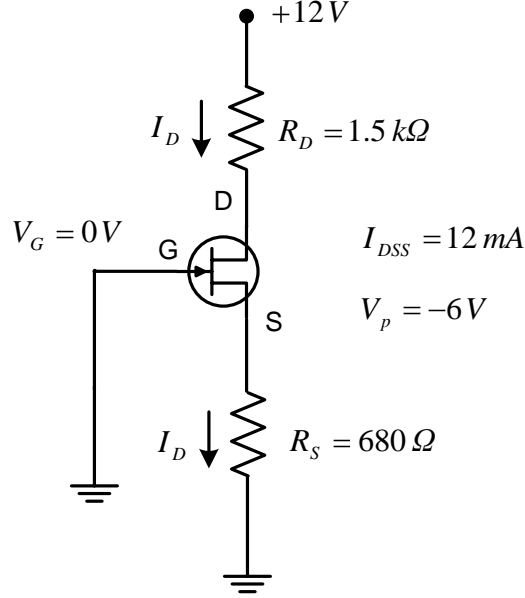
Şekil 5.28 Akaç-kaynak transfer karakteristiği ve yük doğrusu

Şekil 5.28 de verilen iki karakteristiğin kesişmesinden çalışma noktaları  $I_{DQ} = 2.9 \text{ mA}$  ve  $V_{DSQ} = 6.1 \text{ V}$  olarak tespit edilir.



### 5.13 Çeşitli öngerilim devrelerine ait örnekler

**Örnek 1:** Şekil 5.29 daki devrenin  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 5.29 Örnek devre

Devrenin sağlaması 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

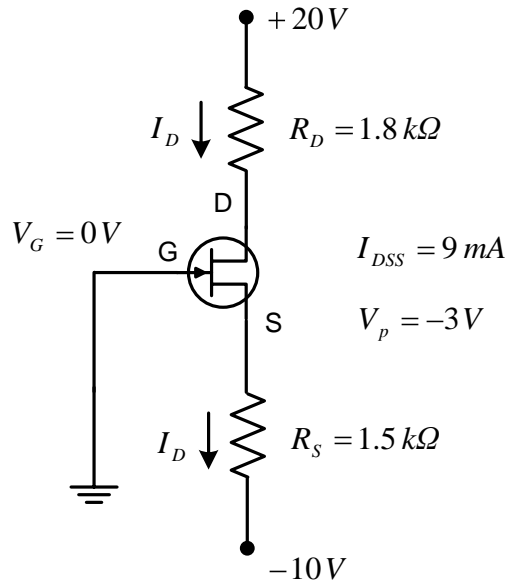
$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 12\text{ V} - (1.5\text{ k}\Omega) \times (3.84\text{ mA}) = 6.24\text{ V}$$

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

bulunur. 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 5.30 daki devrenin  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 5.30 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	$9 I_{DSS}$
$-0.3V_p$	$4.5 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$
$-1.5V_p$	$2.25 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$
$-3.0V_p$	0

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

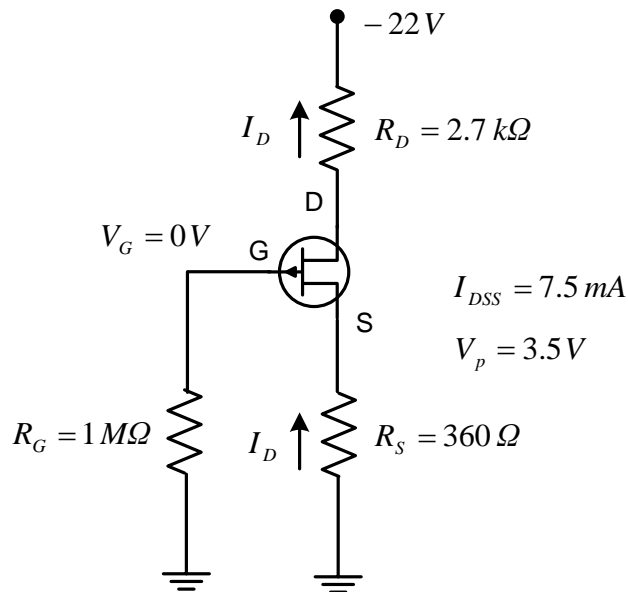
Bu iki karakteristiğin kesişme noktasından  $I_{DQ} = 6.9 \text{ mA}$  ve  $V_{GSQ} = -0.35 \text{ V}$  bulunur.

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

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

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

**Örnek 3:** Şekil 5.31 deki devrenin (p-kanallı JFET)  $I_D$  ve  $V_{DS}$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 5.31 Örnek devre

Kapı-kaynak çevre denkleminde aşağıdaki ifade yazılır.

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

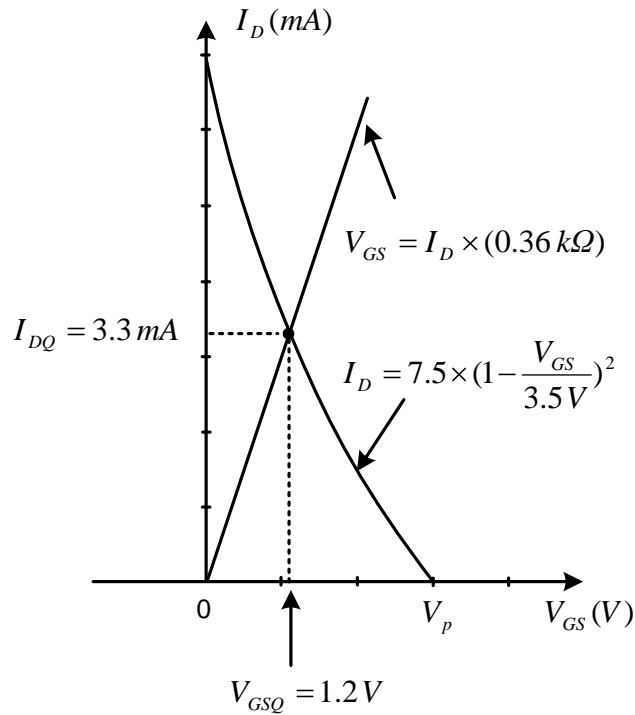
$$V_{GS} = I_D \times (0.36 \text{ k}\Omega)$$

Eleman denkleminde de aşağıdaki ifade yazılır.

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

$I_D \text{ (mA)}$	$V_{GS} \text{ (V)}$
0	0
9.72	3.5

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



Şekil 5.32 Akaç-kaynak transfer karakteristiği ve yük doğrusu

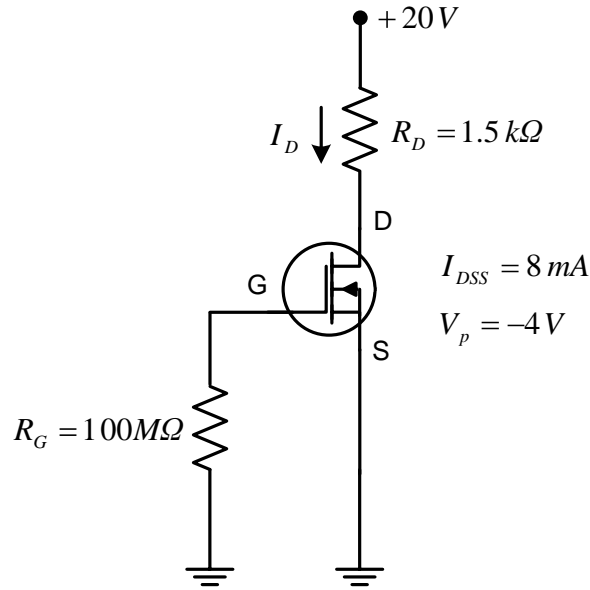
Bu iki karakteristiğin kesişme noktasından, çalışma noktaları olarak  $I_{DQ} = 3.3 \text{ mA}$  ve  $V_{GSQ} = 1.2 \text{ V}$  değerleri bulunur. Bu değerlerden faydalananak aşağıdakileri bulabiliriz.

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

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

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

**Örnek 4:** Şekil 5.33 deki n-kanallı kanal ayarlamalı bir MOFSET devresi için  $I_D$  ve  $V_D$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 5.33 Örnek devre

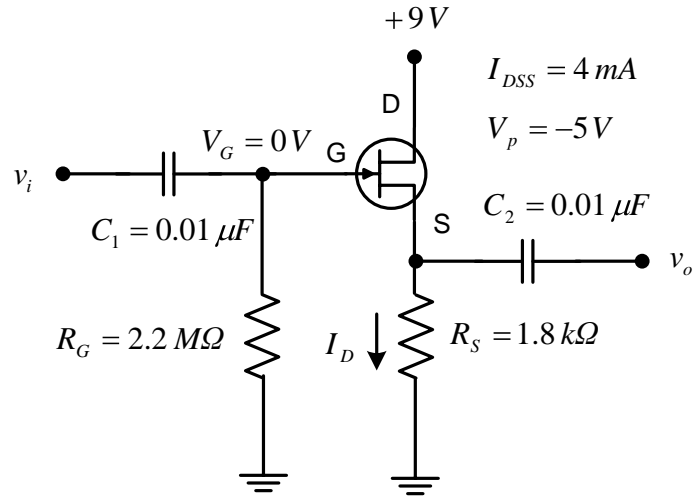
$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - 0 = 0$$

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

Akaç gerilimi ise aşağıdaki 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 5.34 deki n-kanallı bir JFET devresi için  $I_D$  ve  $V_S$  değerlerini hesaplayınız.



Şekil 5.34 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	$4 \text{ mA} = I_{DSS}$
$-1.5 \text{ V} = 0.3 V_p$	$2 \left[ \frac{I_{DSS}}{2} \right]$
$-2.5 \text{ V} = 0.5 V_p$	$1 \left[ \frac{I_{DSS}}{4} \right]$
$-5 \text{ V} = V_p$	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.

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