

# AREL ÜNİVERSİTESİ

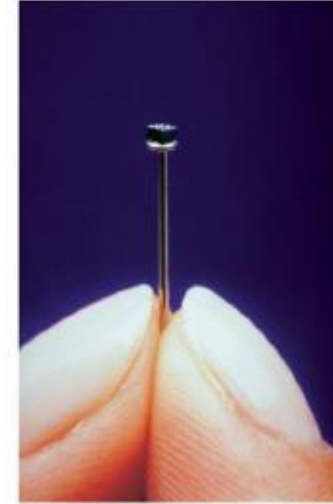
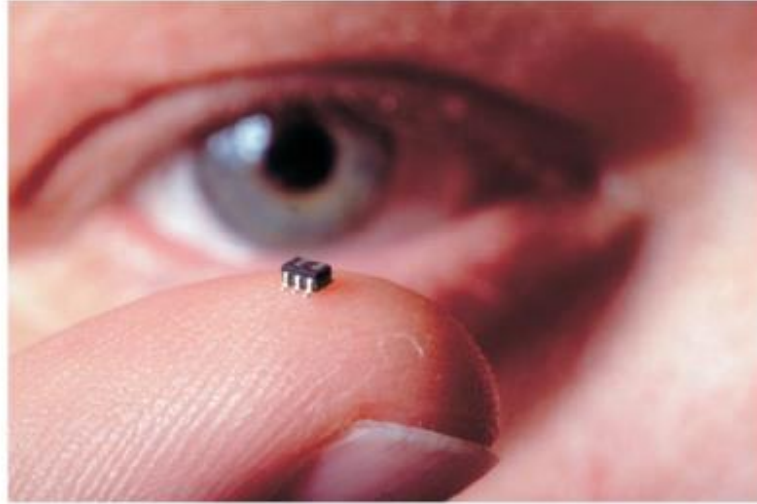
# DEVRE ANALİZİ

İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİLER

DR. GÖRKEM SERBES

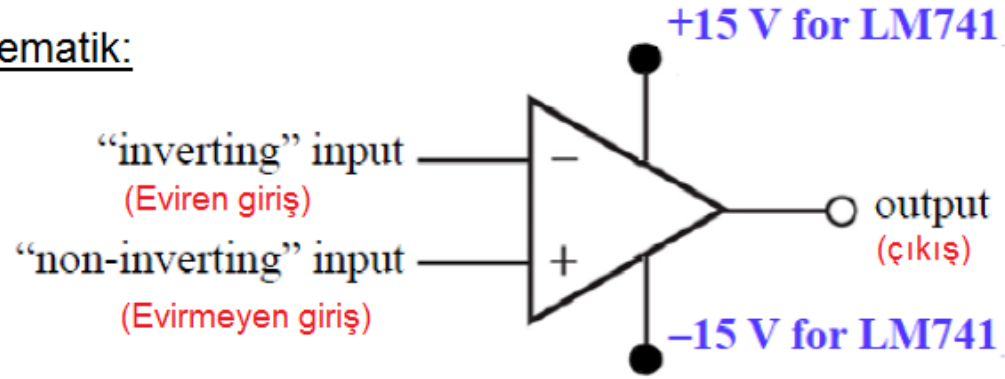
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ

- İşlemsel kuvvetlendirici (Op-Amp); farksal girişi ve tek uçlu çıkışı olan DC kuplajlı, yüksek kazançlı bir elektronik gerilim kuvvetlendiricidir.
- Bir Op-Amp, girişleri arasındaki potansiyel farkın genel anlamda yüzbinlerce katı olan çıkış potansiyeli üretebilir.
- Op-Amp'lar günlük hayatta çok çeşitli elektronik devre uygulamalarında kullanılır.



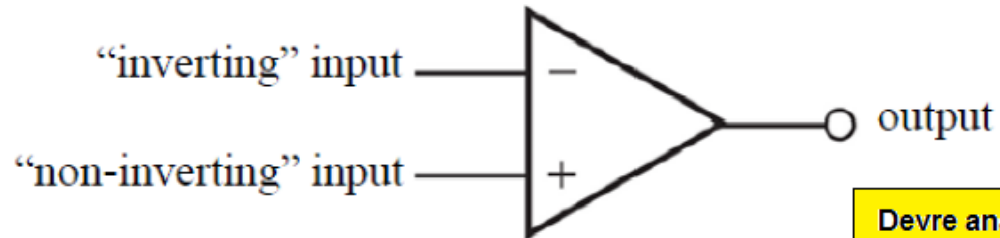
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ

## Ful Şematik:



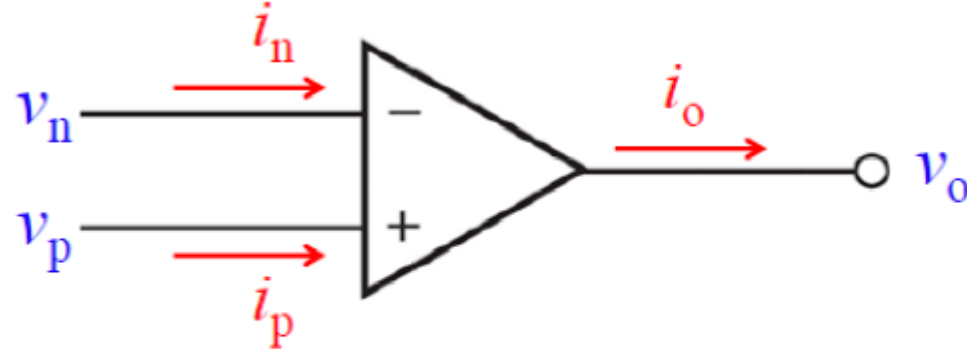
Op-Amp'ın fonksiyonunu yerine getirebilmesi için harici bir güç kaynağına ihtiyacı vardır.

## Sadeleştirilmiş Şematik:



Devre analizi için yeterlidir.

# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ



$$A_v = \frac{v_o}{v_p - v_n}$$

## Op-Amp' ın fonksiyonu:

Harici bir geri besleme ile  $v_p - v_n$  gerilim farkını,  $A_v > 10^6$  gibi bir kazanç ile kuvvetlendirmektedir.

## İdeal Op-Amp Kuralları

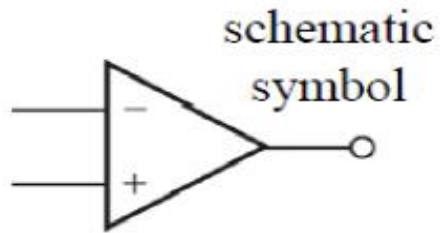
- Herhangi bir giriş terminalinden içeriye hiç akım akmaz
- Giriş terminalleri arasında gerilim farkı yoktur.

$$v_n \approx v_p$$

$$i_n = i_p \approx 0$$

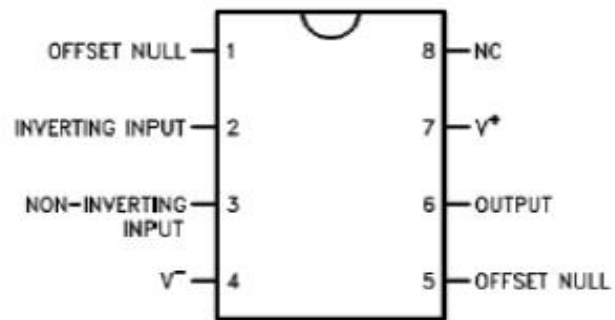
# İŞLEMSEL KUVVETLENDİRİCİ

“Op Amp”

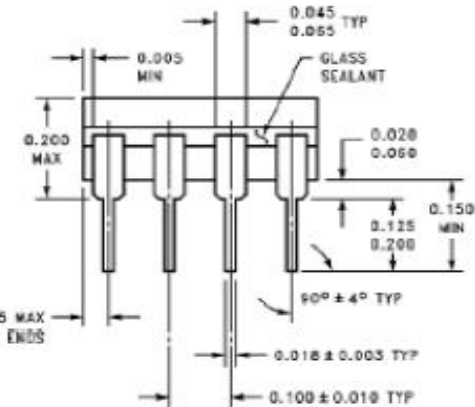
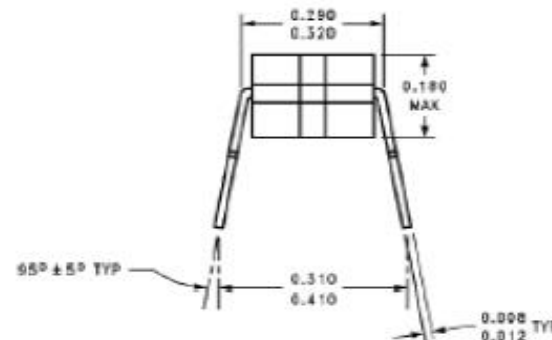
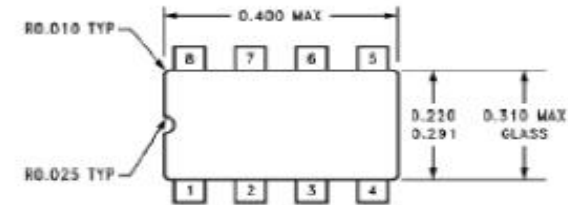


National  
Semiconductor  
**LM741** datasheet

**Dual-In-Line or S.O. Package**

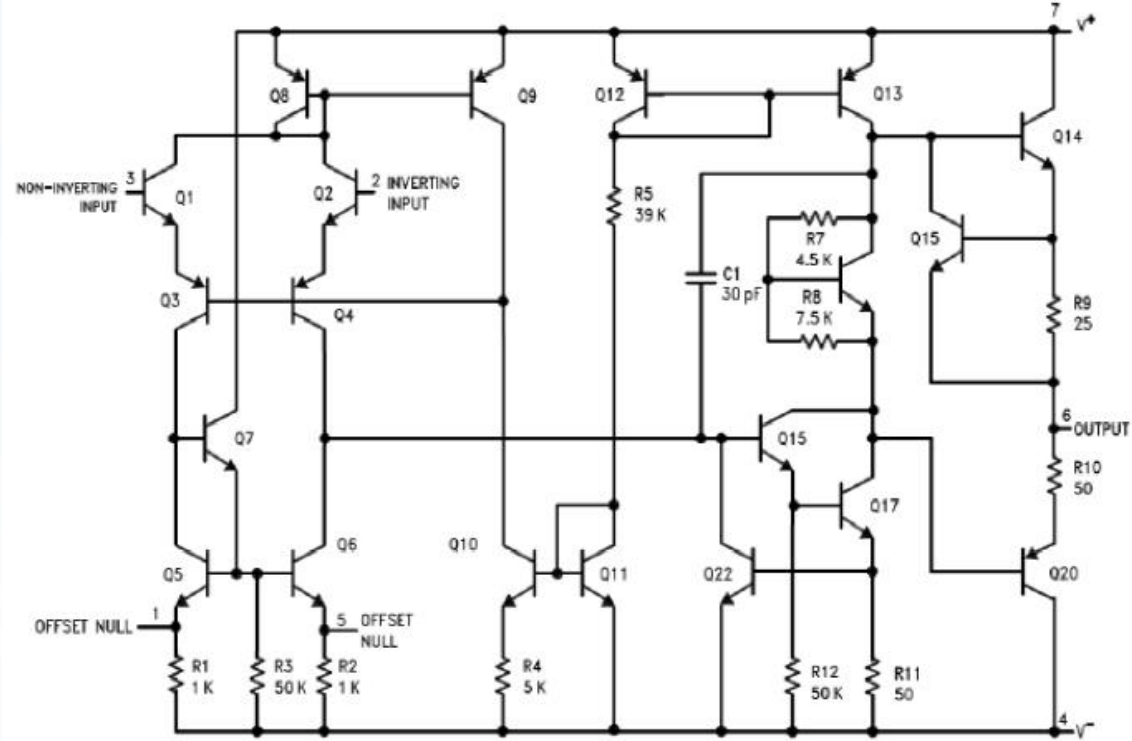


Order Number LM741J, LM741J/883,  
LM741CM, LM741CN or LM741EN



Ceramic Dual-In-Line Package (J)  
Order Number LM741CJ or LM741J/883

# LM741 Entegresinin İç Yapısı



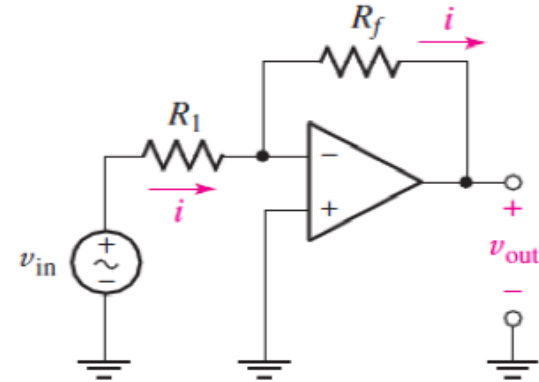
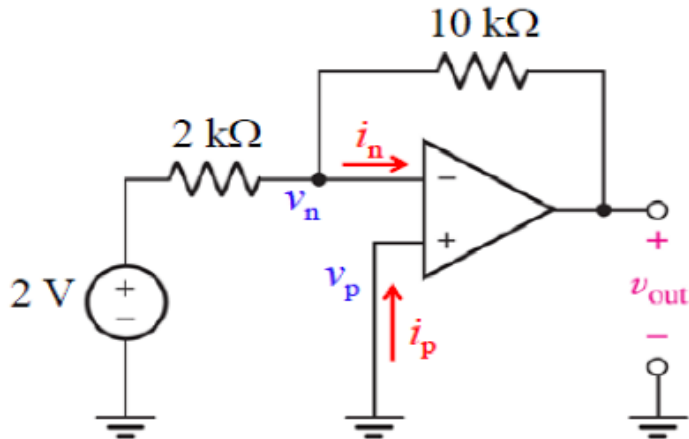
National  
Semiconductor  
LM741 datasheet

# Op-Amp Devresi #1

- $V_{in} = 2V$ ,  $R_f = 10\text{ k}\Omega$  ve  $R_1 = 2\text{ k}\Omega$  ise  $V_{out}$  gerilimini belirleyin.

$$v_n = v_p$$

$$i_n = i_p = 0$$



$$\text{KCL @ } v_n: \frac{v_{out} - v_n}{10} + \frac{2 - v_n}{2} - i_n = 0$$

$$v_p = 0$$

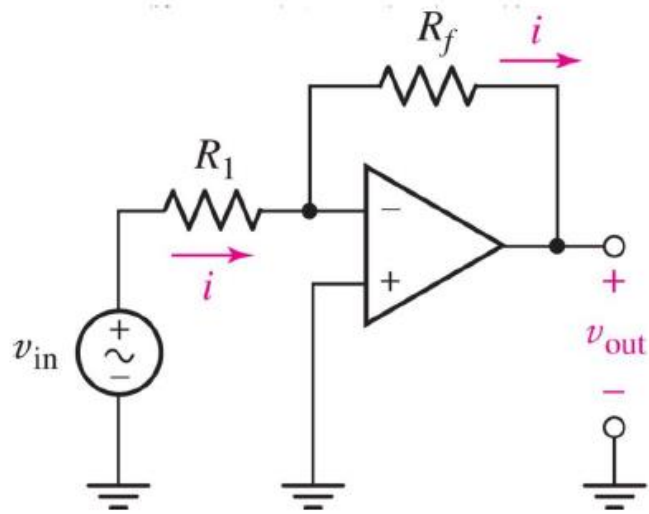
$$v_{out} = -10\text{ V}$$

(Eviren Kuvvetlendirici)

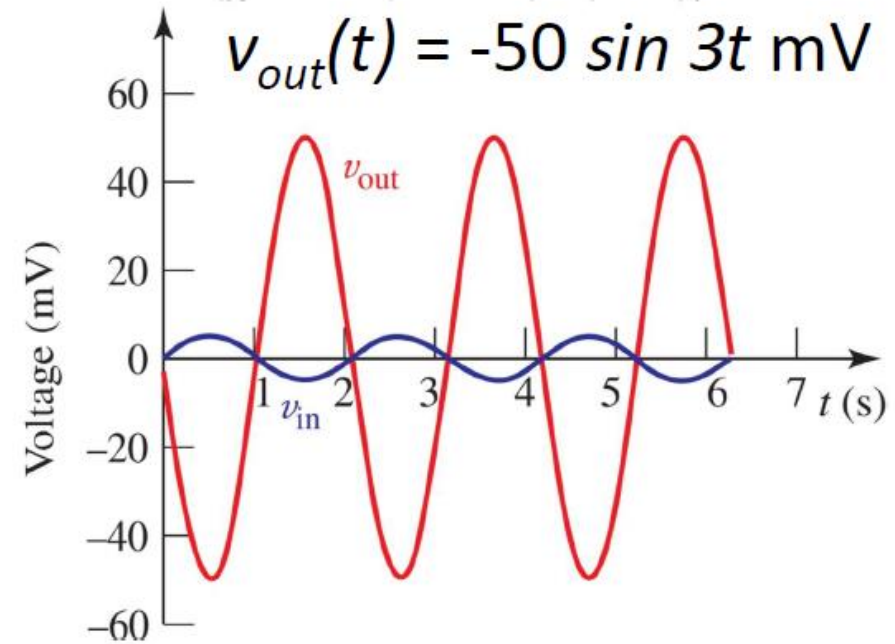


# ÖRNEK

- $v_{in}(t) = 5 \sin 3t \text{ mV}$ ,  $R_f = 47 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$



$$v_{out} = -\frac{R_f}{R_1} v_{in}$$





# Op-Amp Devresi #2

- $v_{out}$  gerilimini  $v_{in}$ ,  $R_f$  ve  $R_1$  cinsinden ifade ediniz.

$$v_n = v_p$$

$$i_n = i_p = 0$$

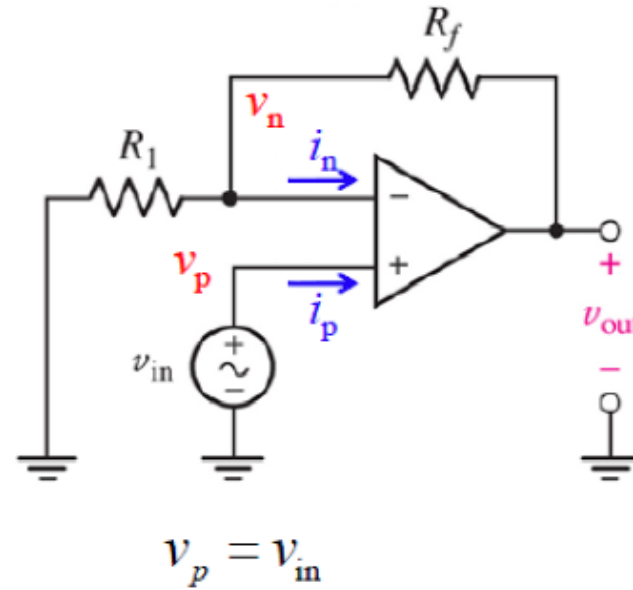
$$v_p = v_{in}$$

$$\frac{-v_{in}}{R_1} + \frac{v_{out} - v_{in}}{R_f} = 0$$

$$\frac{v_{in}}{R_1} + \frac{v_{in}}{R_f} = \frac{v_{out}}{R_f}$$

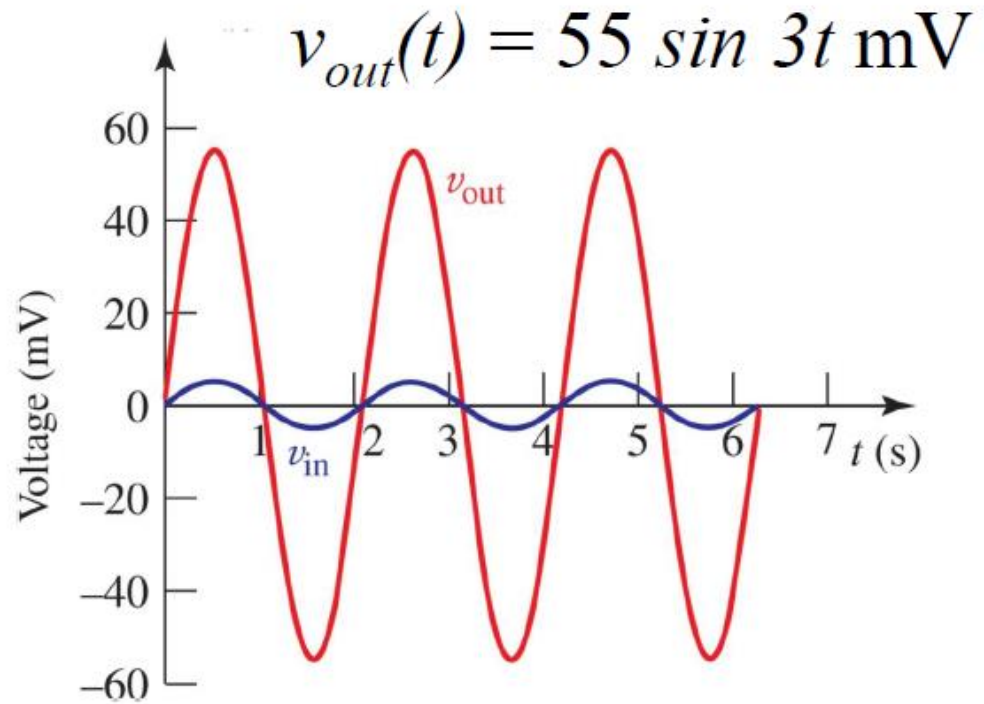
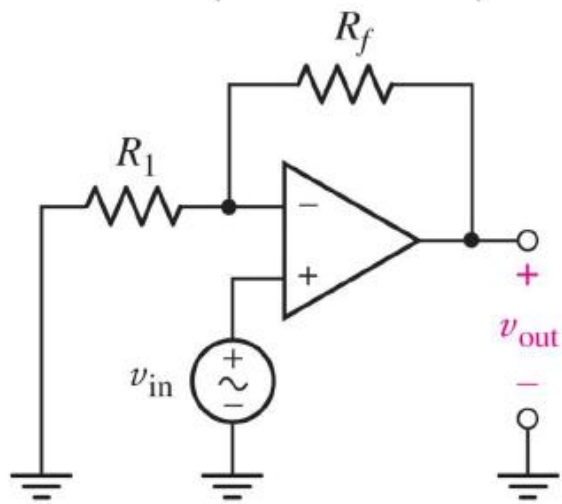
$$v_{out} = \left( \frac{R_f}{R_1} + 1 \right) v_{in}$$

Evirmeyen Kuvvetlendirici



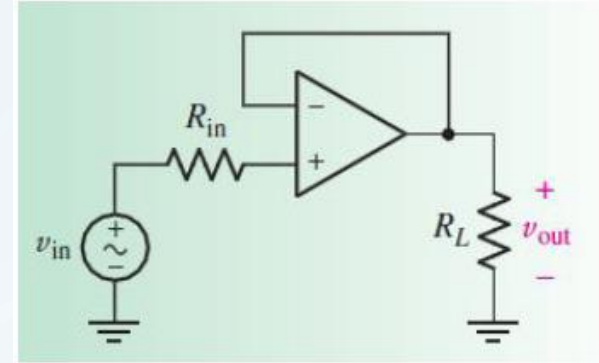
# ÖRNEK

- $v_{in}(t) = 5 \sin 3t$  mV,  $R_f = 47$  k $\Omega$ ,  $R_1 = 4.7$  k $\Omega$



# Op-Amp Devresi #3

- Şekildeki devre  $R_1$  direnci sonsuz,  $R_f$  direnci sıfıra ayarlanmış evirmeyen (non-inverting) kuvvetlendirici Op-Amp devresidir. Çıkış gerilimi hem büyüklük hem işaret bakımından giriş gerilimi ile aynıdır.
- Bu yeni devre **Gerilim İzleyici (Voltage Follower)**,  $v_{out} = v_{in}$ , diye adlandırılır, ayrıca **Birim Kazanç Kuvvetlendirici (Unity Gain Amplifier)** olarak da bilinir.
- Op-Amp'ın giriş empedansı çok yüksektir. Sinyal kaynağı ile çıkış arasında etkili bir izolasyon sağlar. Sinyal kaynağından çok az güç çekilir ve böylece yüklenme (loading) etkilerinden kaçınılır.

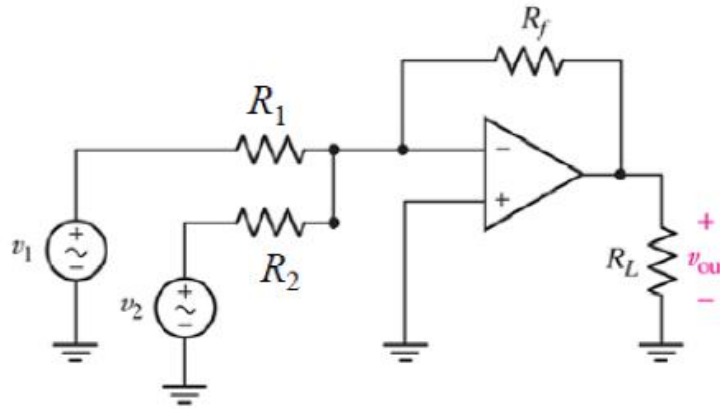


$$v_{out} = v_{in}$$

# Op-Amp Devresi #4

- $v_{out}$  gerilimini  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $R_f$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  ve  $R_L$  cinsinden ifade ediniz.

$$v_n = v_p \quad i_n = i_p = 0$$



$$\frac{v_{out}}{R_f} + \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} = 0 \quad v_{out} = -R_f \frac{v_1}{R_1} - R_f \frac{v_2}{R_2}$$

$$v_{out} = -\left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 \right)$$

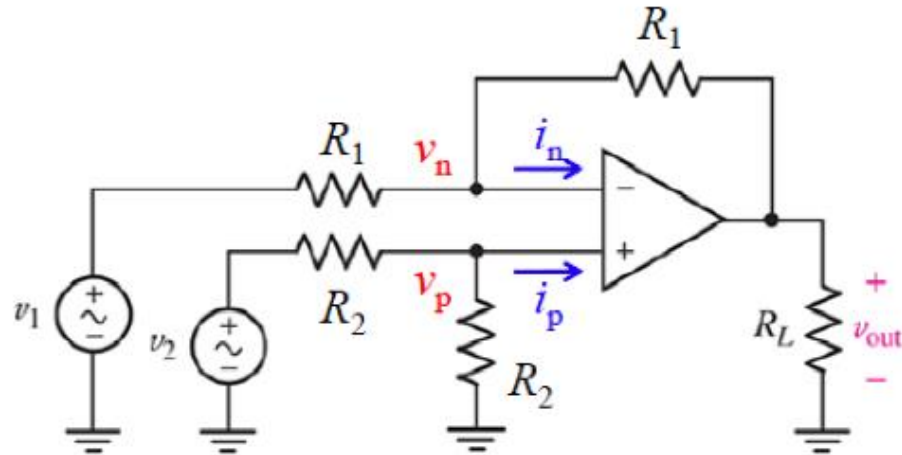
(inverting) summing amplifier  
eviren toplayıcı kuvvetlendirici

# Op-Amp Devresi #5

- $v_{out}$  gerilimini  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  ve  $R_L$  cinsinden ifade ediniz.

$$v_n = v_p$$

$$i_n = i_p = 0$$



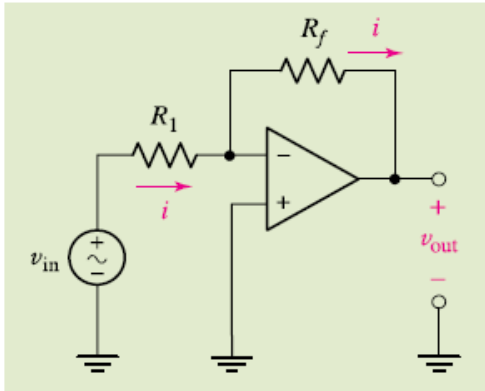
$$v_{out} = v_2 - v_1$$

difference amplifier

(fark alıcı kuvvetlendirici)

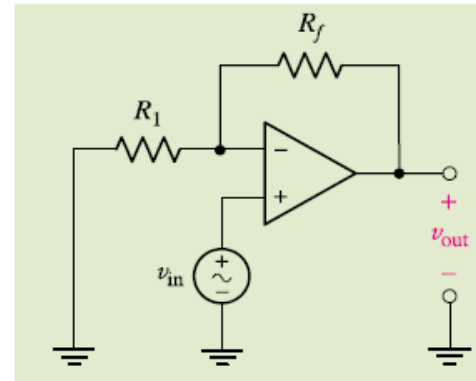
# Basit Op-Amp Devrelerinin Özeti (1)

Inverting Amplifier  
(Eviren Kuvvetlendirici)



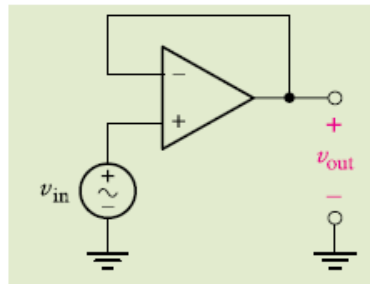
$$v_{out} = -\frac{R_f}{R_1} v_{in}$$

Noninverting Amplifier  
(Evirmeyen Kuvvetlendirici)



$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_{in}$$

Voltage Follower (Gerilim İzleyici)  
ya da  
Unity Gain Amplifier  
(Birim Kazanç Kuvvetlendirici)

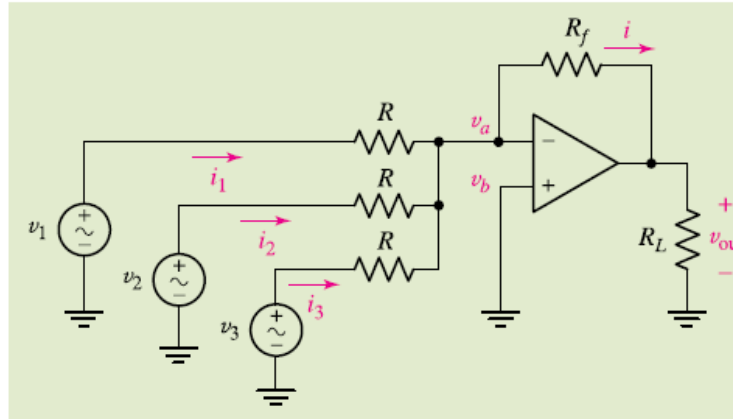


$$v_{out} = v_{in}$$

# Basit Op-Amp Devrelerinin Özeti (2)

Summing Amplifier

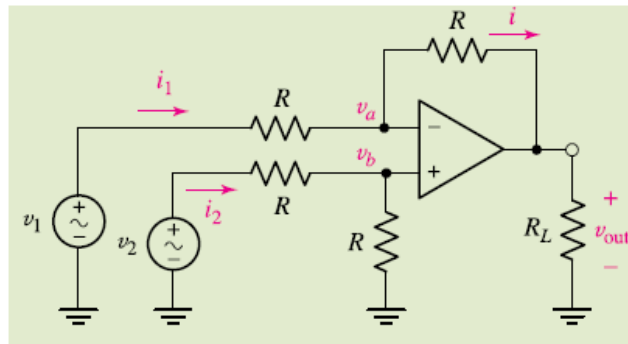
Toplayıcı  
Kuvvetlendirici



$$v_{out} = -\frac{R_f}{R} (v_1 + v_2 + v_3)$$

Difference Amplifier

Fark alıcı  
Kuvvetlendirici

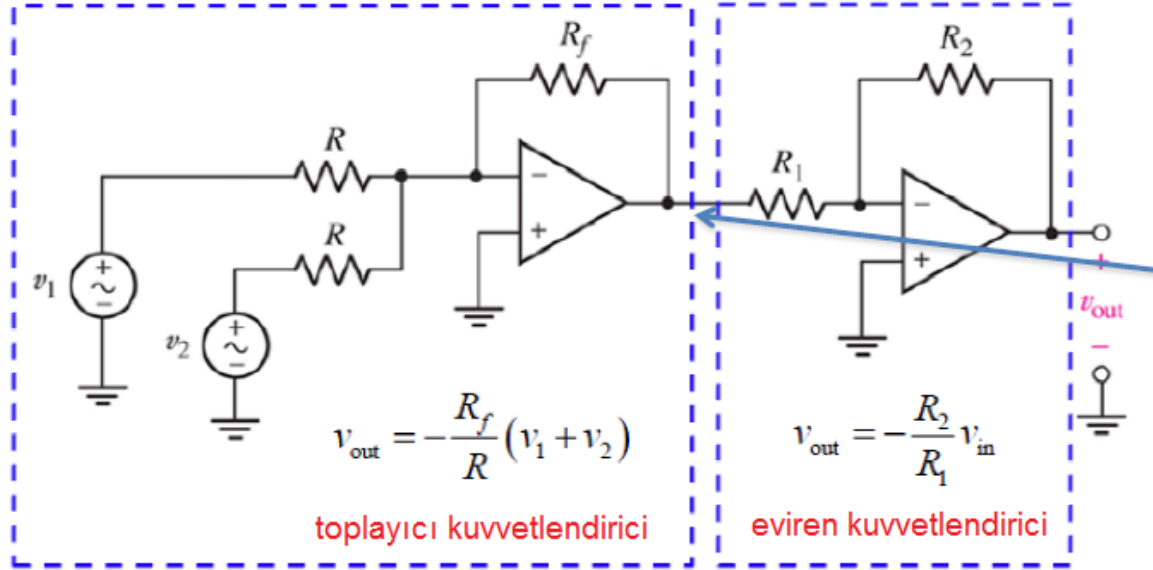


$$v_{out} = v_2 - v_1$$



# Ardışık (Kaskat) Bağlı Op-Amp Devreleri

- Op-Amp devreleri, girişler ve çıkışlar arasındaki arzu edilen bağıntıyı elde etmek için ardışık katlar şeklinde kombin edilebilir.



Bu düğümdeki gerilim  
sağdaki devreden  
etkilenmez.

$$v'_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \left\{ -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2) \right\}$$

$$v_{out} = \frac{R_2 R_f}{R_1 R}(v_1 + v_2)$$

# Op-Amp Devresi #6 Tasarım Örneği (1)

Yandaki çıkış gerilimi ifadesini sağlayan bir devre tasarlayınız.

$$v_{\text{out}} = 2v_1 - 3v_2 + 4v_3 - 6v_4$$

$$v_{\text{out}} = \left( \frac{R_y}{R_x} + 1 \right) v_{\text{in}}$$

non-inverting amp

$$v_{\text{out}} = -\frac{R_b}{R_a} v_{\text{in}}$$

inverting amp

$$v_{\text{out}} = -\left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \dots \right)$$

inverting sum

$$v_{\text{out}} = v_2 - v_1$$

difference

$$v_{\text{out}} = -\left\{ \underbrace{\frac{R_f}{R_1} \left( -\frac{R_b}{R_a} v_1 \right)}_{\text{invert}} + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \underbrace{\frac{R_f}{R_3} \left( -\frac{R_d}{R_c} v_3 \right)}_{\text{invert}} + \frac{R_f}{R_4} v_4 \right\}$$

inverting sum

$$v_{\text{out}} = \frac{R_f R_b}{R_1 R_a} v_1 - \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f R_d}{R_3 R_c} v_3 - \frac{R_f}{R_4} v_4$$

# Op-Amp Devresi #6 Tasarım Örneği (2)

$v_{\text{out}} = 2v_1 - 3v_2 + 4v_3 - 6v_4$  ifadesini sağlayan devreyi tasarlayınız

$$v_{\text{out}} = \frac{R_f R_b}{R_1 R_a} v_1 - \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f R_d}{R_3 R_c} v_3 - \frac{R_f}{R_4} v_4$$

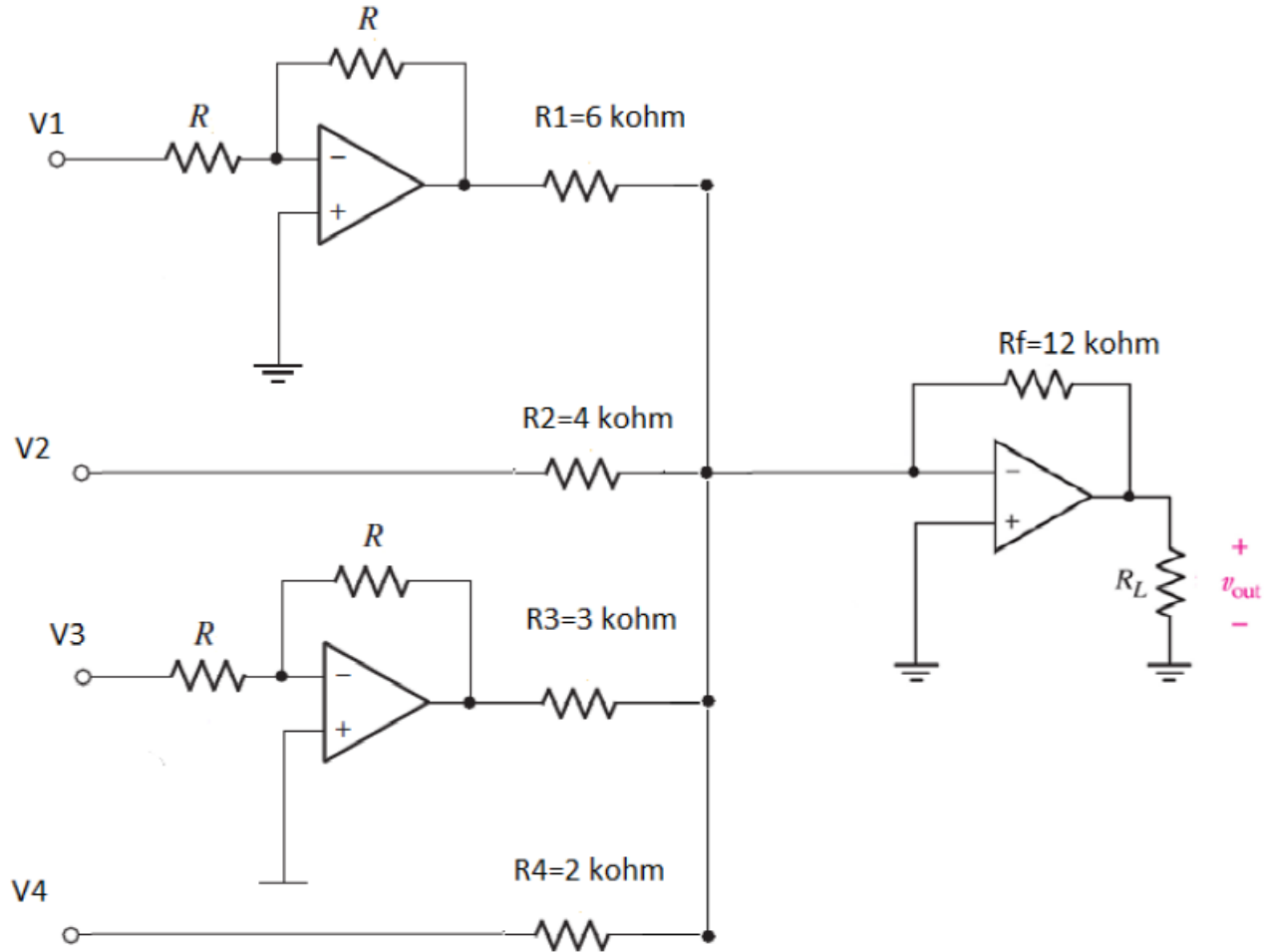
$$R_a = R_b = R_c = R_d = 2 \text{ k}\Omega \dots \text{ Seçildi}$$

$$v_{\text{out}} = \frac{R_f}{R_1} v_1 - \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 - \frac{R_f}{R_4} v_4$$

$$R_f = 12 \text{ k}\Omega \rightarrow R_1 = 6 \text{ k}\Omega, R_2 = 4 \text{ k}\Omega, R_3 = 3 \text{ k}\Omega, R_4 = 2 \text{ k}\Omega \dots \text{ Seçildi}$$

$$v_{\text{out}} = \frac{12}{6} v_1 - \frac{12}{4} v_2 + \frac{12}{3} v_3 - \frac{12}{2} v_4$$

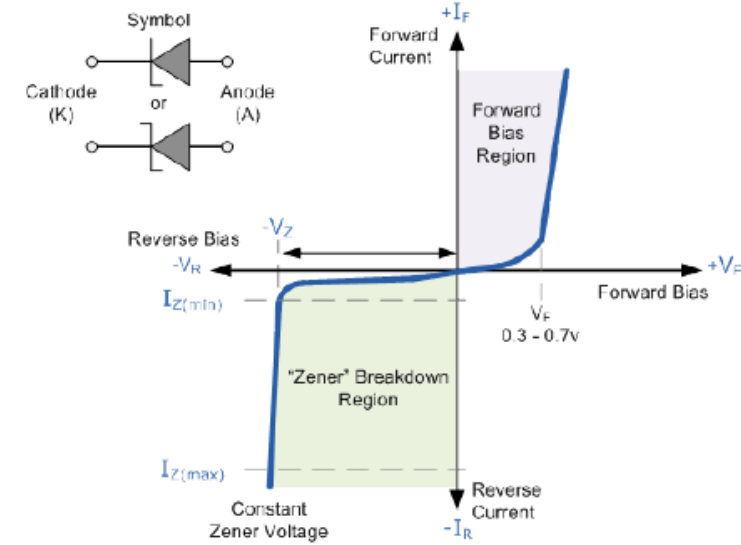
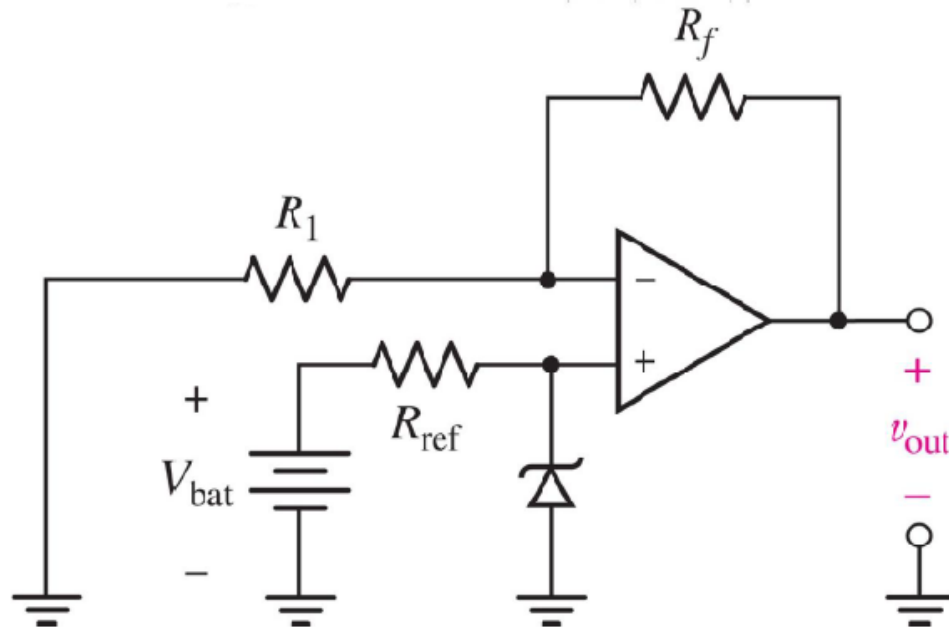
# Op-Amp Devresi #6 Tasarım Örneği (3)



$$v_{out} = 2v_1 - 3v_2 + 4v_3 - 6v_4$$

# Güvenilir bir gerilim kaynağı

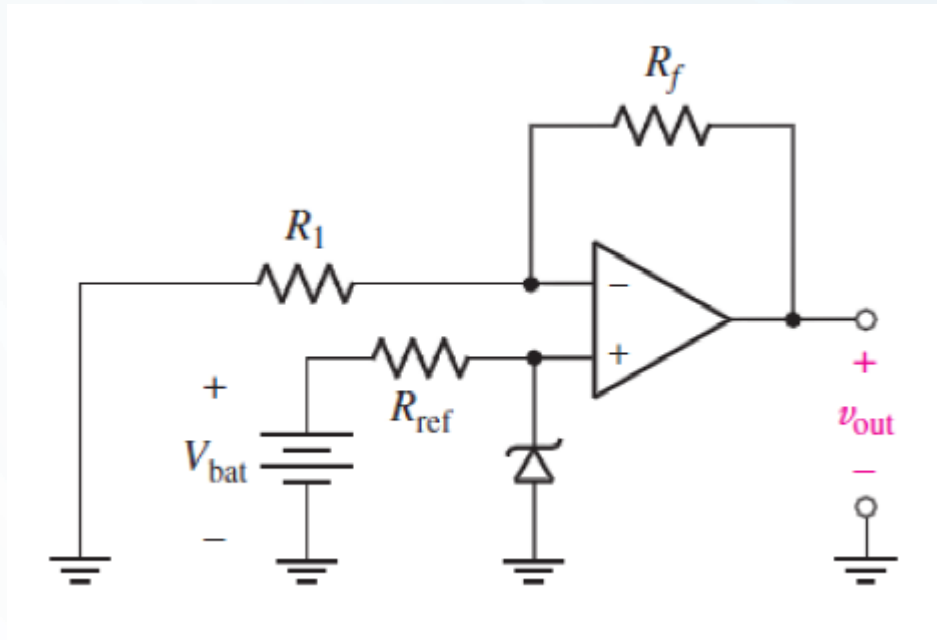
- Bu devre bataryanın zamanla değişimine bakmaksızın doğru bir çıkış gerilimi üretir.



Zener diode:  $i=0$  if  $v < 4.7$  volts  
For 1N750 Zener Diode

# UYGULAMA 6.4

- 6V referans gerilimi sağlayacak bir devreyi 1N750 Zener diyet ve evirmeyen kuvvetlendirici kullanarak tasarlayınız.  $V_{\text{bat}} = 9\text{V}$ ,  $R_{\text{ref}} = 115\ \Omega$

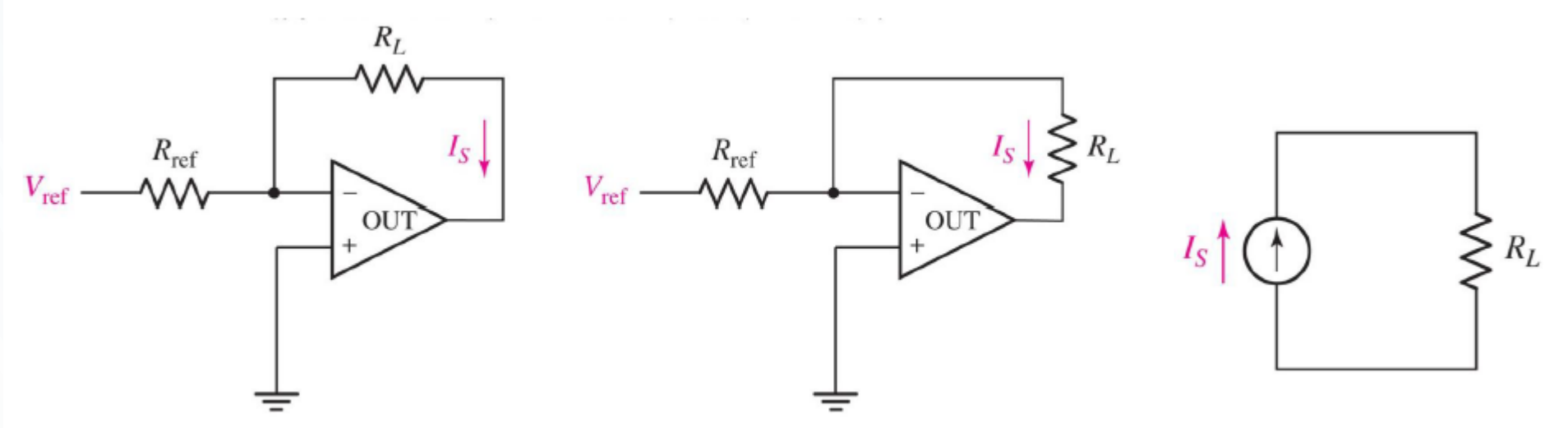


$$V_{\text{bat}} = 9\text{ V},$$

$$R_{\text{ref}} = 115\ \Omega, R_1 = 1\text{ k}\Omega, \text{ and } R_f = 268\ \Omega$$

# Güvenilir bir akım kaynağı

- Herhangi bir yük üzerinden sabit bir referans gerilim kaynağı,  $V_{ref}$ , ile sabit bir  $I_S = V_{ref} / R_{ref}$  akımını sürebiliriz.
- $R_L$  yüküne sağlanan akım, onun direncine bağlı değildir. – (İdeal bir akım kaynağının temel özelliği)

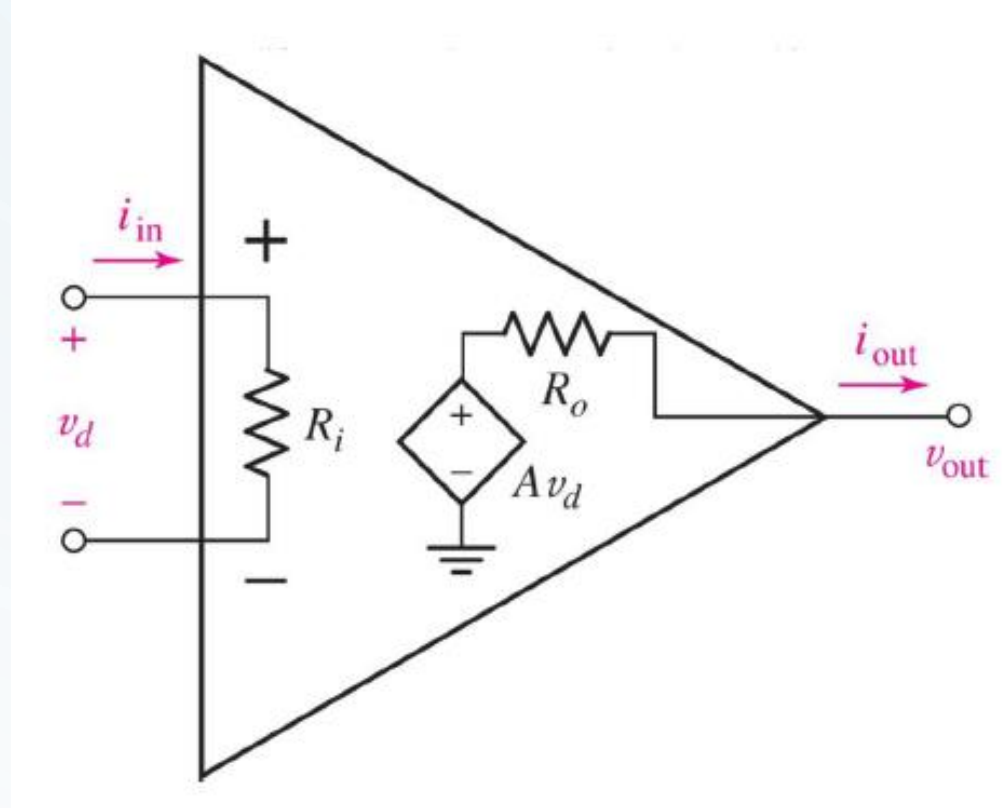




# Daha detaylı bir Op-Amp modeli

➤ Op-Amp aşağıda verilen bileşenlerle birlikte bağımlı bir gerilim kaynağı olarak modellenenebilir:

- Giriş direnci,  $R_i$
- Çıkış direnci,  $R_o$
- Açık çevrim kazancı,  $A$

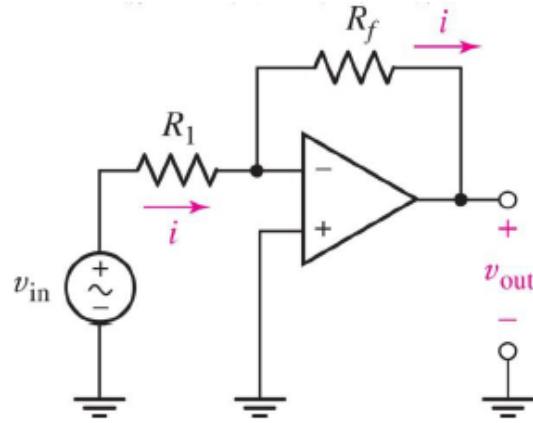


# Op-Amp Parametreleri

**TABLE 6.3** Typical Parameter Values for Several Types of Op Amps

Part Number	$\mu$ A741	LM324	LF411	AD549K	OPA690
Description	General purpose	Low-power quad	Low-offset, low-drift JFET input	Ultralow input bias current	Wideband video frequency op amp
Open loop gain $A$	$2 \times 10^5$ V/V	$10^5$ V/V	$2 \times 10^5$ V/V	$10^6$ V/V	2800 V/V
Input resistance	2 M $\Omega$	*	1 T $\Omega$	10 T $\Omega$	190 k $\Omega$
Output resistance	75 $\Omega$	*	$\sim 1$ $\Omega$	$\sim 15$ $\Omega$	*
Input bias current	80 nA	45 nA	50 pA	75 fA	3 $\mu$ A
Input offset voltage	1.0 mV	2.0 mV	0.8 mV	0.150 mV	$\pm 1.0$ mV
CMRR	90 dB	85 dB	100 dB	100 dB	65 dB
Slew rate	0.5 V/ $\mu$ s	*	15 V/ $\mu$ s	3 V/ $\mu$ s	1800 V/ $\mu$ s
PSpice Model	✓	✓	✓		

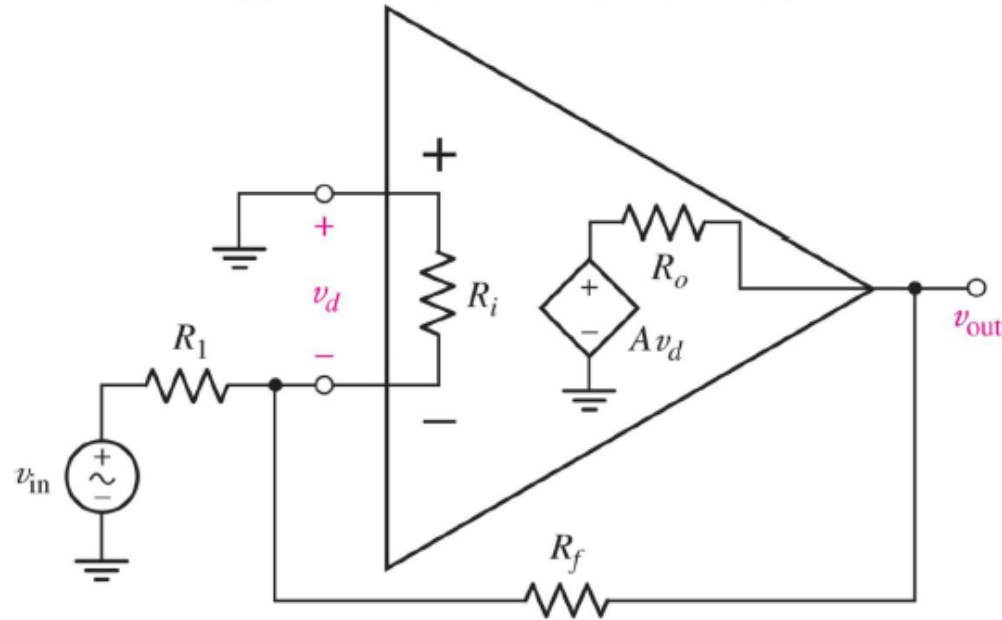
## ÖRNEK 6.6 (1)



- 741 Op-Amp için ( $A=200,000$ ,  $R_i=2\text{M}\Omega$ ,  $R_o=75\Omega$ )
- $v_{out}(t) = -49.997 \sin 3t \text{ mV}$ .  
İdeal bir Op-Amp  $v_{out}(t) = -50 \sin 3t \text{ mV}$  gerilimini üretiyor.  
[Düğüm analizi ile detaylı Op-Amp modelini analiz ediniz]

Örnek:

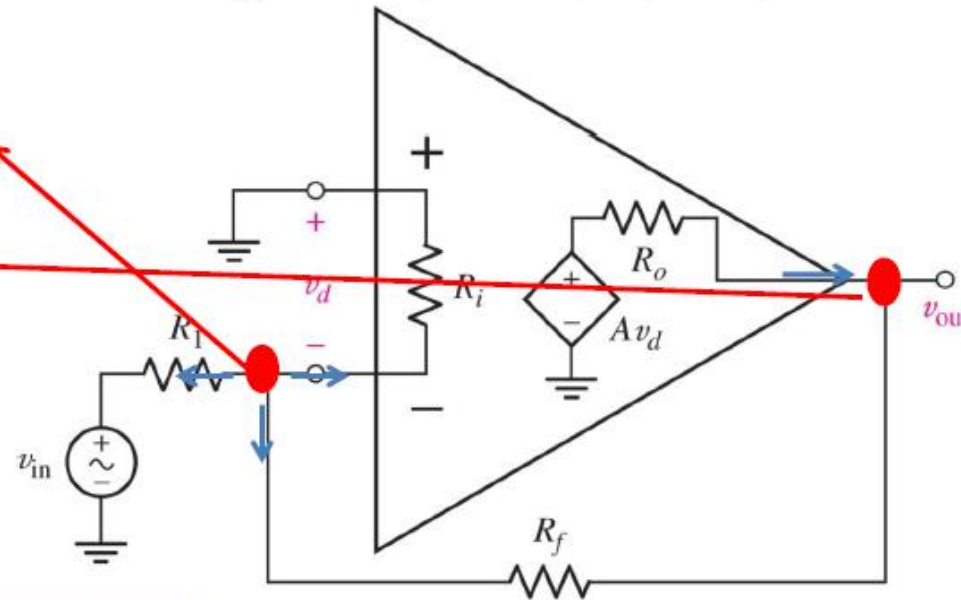
$$v_{in}(t) = 5 \sin 3t \text{ mV},$$
$$R_f = 47 \text{ k}\Omega,$$
$$R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$$



## ÖRNEK 6.6 (2)

- $A = \infty$ ,  $R_o = 0 \Omega$  ve  $R_i = \infty \Omega$  iken, Op-Amp ideal davranış gösterir. ( $v_d = 0$ ,  $i_{in} = 0$ )
- Artık ideal Op-Amp modelini kullanmadığımız için ideal Op-Amp kurallarını da kullanamayacağımıza dikkat etmeliyiz.

$$0 = \frac{-v_d - v_{in}}{R_1} + \frac{-v_d - v_{out}}{R_f} + \frac{-v_d}{R_i}$$
$$0 = \frac{v_{out} + v_d}{R_f} + \frac{v_{out} - Av_d}{R_o}$$

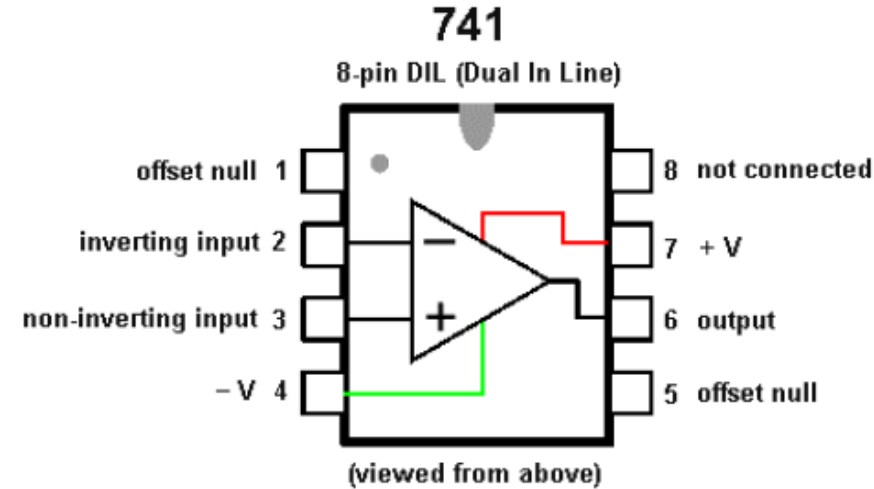
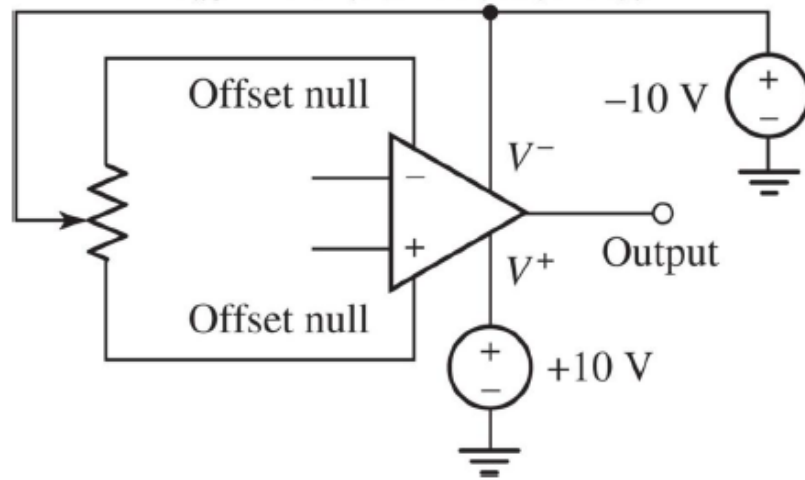


$$v_{out} = \left[ \frac{R_o + R_f}{R_o - AR_f} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_i} \right) - \frac{1}{R_f} \right]^{-1} \frac{v_{in}}{R_1}$$

$$v_{out} = -9.999448v_{in} = -49.99724 \sin 3t \quad \text{mV}$$

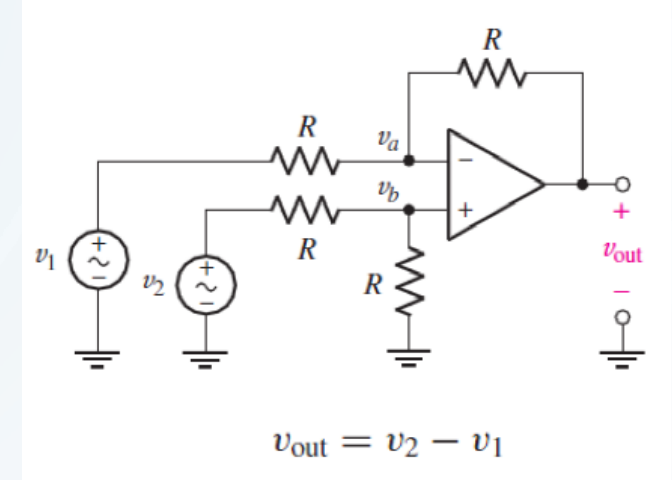
# Giriş Besleme (Bias) Akımı ve Giriş Ofset Gerilimi

- Pratikte Op-Amp' lar, besleme koşullarına bağlı olarak (BJT girişler durumunda) veya kaçaklara (leakage) bağlı olarak (MOSFET tabanlı girişler durumunda) her bir girişinden küçük bir akım (**Giriş besleme akımı**) çeker.  $(I_1+I_2)/2$
- İdeal bir Op-Amp farksal girişleri kuvvetlendirir; eğer bu giriş 0 ise (örneğin iki giriş geriliminde ground a göre aynı gerilimde olması durumu) çıkış da 0 olmalıdır. Ancak üretim proseslerine bağlı olarak gerçek Op-Amp' ların farksal giriş transistörleri tam olarak birbirine uymayabilir (matching problem). Bundan dolayı farksal girişlerin sıfırdan farklı bir gerilim değeri için çıkış gerilimi sıfır olacaktır ve buna da **giriş ofset gerilimi** denir.



# Common Mode Rejection (Ortak Modu Bastırma)

- Eğer giriş terminallerinin ikisine aynı gerilim uygulanırsa, çıkış geriliminin sıfır olmasını bekleriz. Op-Amp'ın bu yeteneği en cazip niteliğidir ve *ortak modu bastırma* olarak bilinir.
- Eğer  $v_1 = 2 + 3\sin 3t$  volt ve  $v_2 = 2V$  ise, çıkış geriliminin  $-3\sin 3t$  volt olmasını bekleriz;  $v_1$  ve  $v_2$  için ortak olan 2V bileşeni kuvvetlendirilmez.
- Gerçekte Op-Ampları için pratik uygulamalarda ortak modlu işaretlerin cevabında çıkışta küçük bir katkı bulunur. Op-Amp'ın ortak modu bastırma yeteneğini ifade eden *ortak mod bastırma oranı*,  $CMRR$ , parametresi bir Op-Amp tipini diğerinden ayırt etmek için bize sık sık yardımcı olmaktadır.
- $V_{o_{cm}}$ 'yi girişler birbirine eşit olduğunda ( $v_1=v_2=v_{cm}$ ) elde edilen çıkış gerilimi olarak tanımlayarak Op-Amp'ın ortak mod kazancını aşağıdaki gibi belirleyebiliriz.



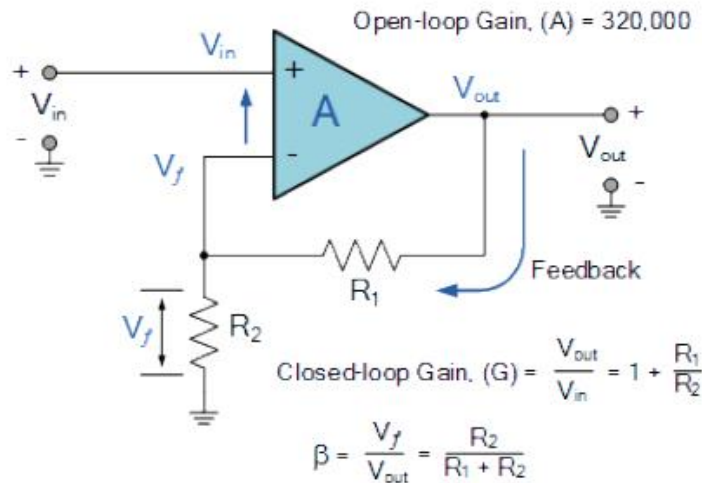
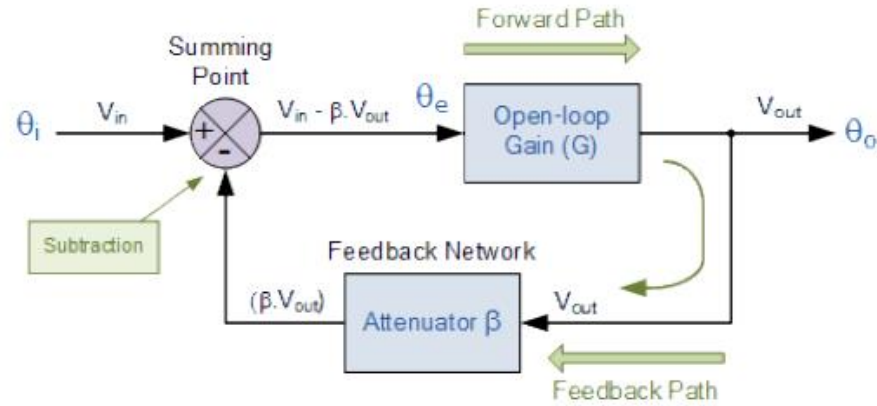
$$A_{CM} = \left| \frac{V_{o_{CM}}}{V_{CM}} \right| \quad CMRR \equiv \left| \frac{A}{A_{CM}} \right| \quad CMRR_{(dB)} \equiv 20 \log_{10} \left| \frac{A}{A_{CM}} \right| \text{ dB}$$

A: farksal kazanç

$A_{CM}$ : ortak mod kazancı

- $CMRR$  parametresi bize farksal girişli kuvvetlendiricinin gürültüyü ne kadar iyi bastırdığını anlatır

# Negatif Geri besleme



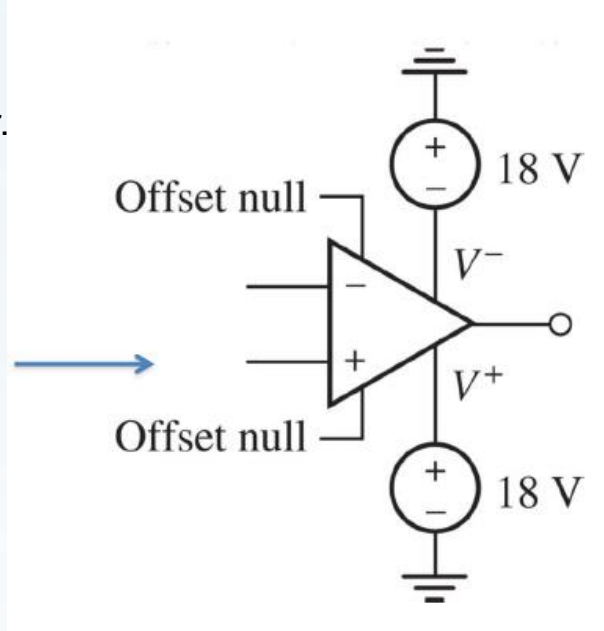
- Kuvvetlendirici devrelerinde negatif geri besleme kullanılmasının başlıca avantajları; kararlılığı iyileştirmek, bileşenlerin değişimlerine karşı daha iyi tolerasyon gösterme, DC driftlere karşı stabilizasyon ve bunlara ilaveten kuvvetlendiricinin band genişliğini artırmasıdır.



# Doyma (Saturation)

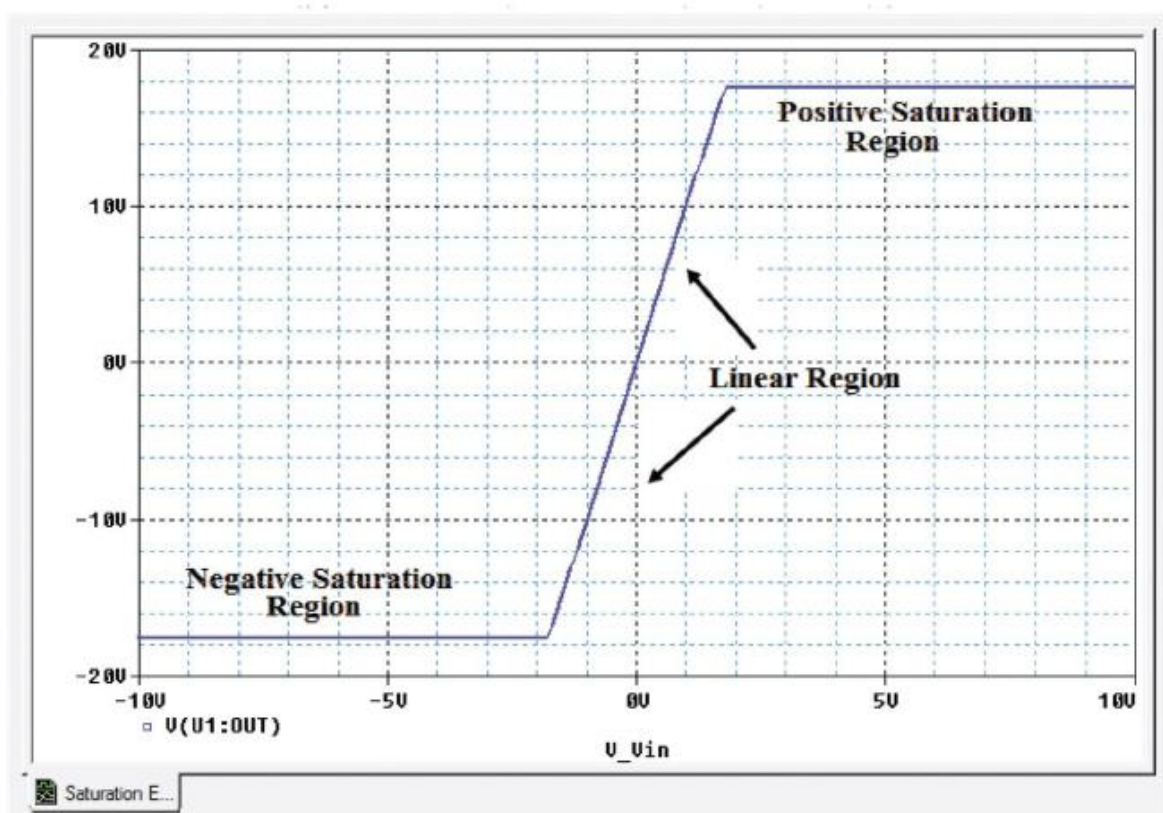
- Bir Op-Amp güç kaynağına ihtiyaç duyar.
- Genellikle eşit büyüklükte ve zıt işaretli gerilimler  $V^+$  ve  $V^-$  terminallerine bağlanır.
- Tipik gerilim değerleri 5V ile 24V arasındadır.
- Güç kaynağı ve sinyalin toprakları aynı olmalıdır.

- Bu örnekte +18V  $V^+$  'ya ve -18V  $V^-$  'ye bağlıdır.



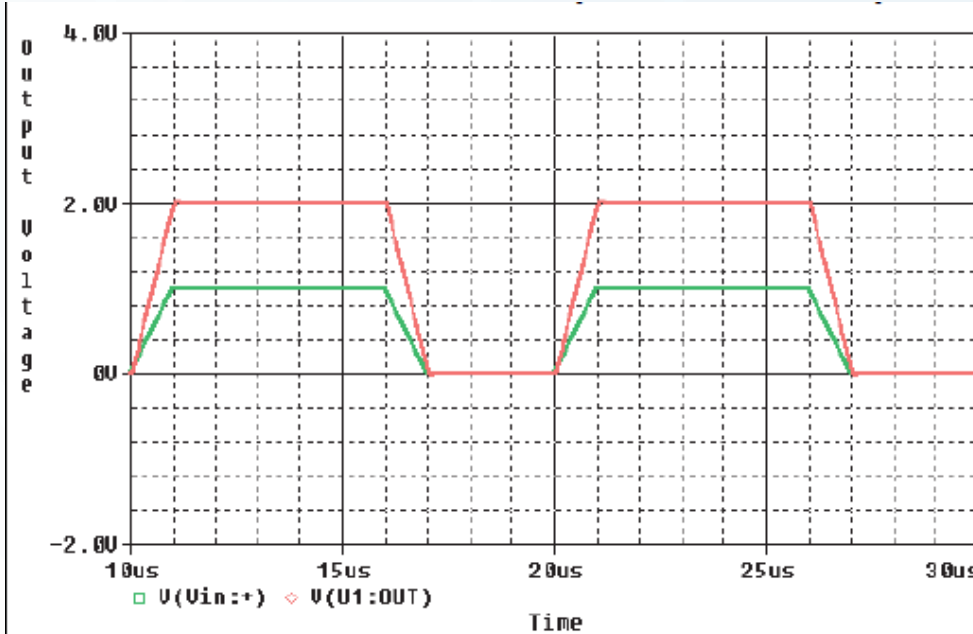
# Doyma (Saturation)

- $V_{out}=10V_{in}$  ; fakat sadece  $\pm 18V$  kaynaklara kadar geçerlidir.



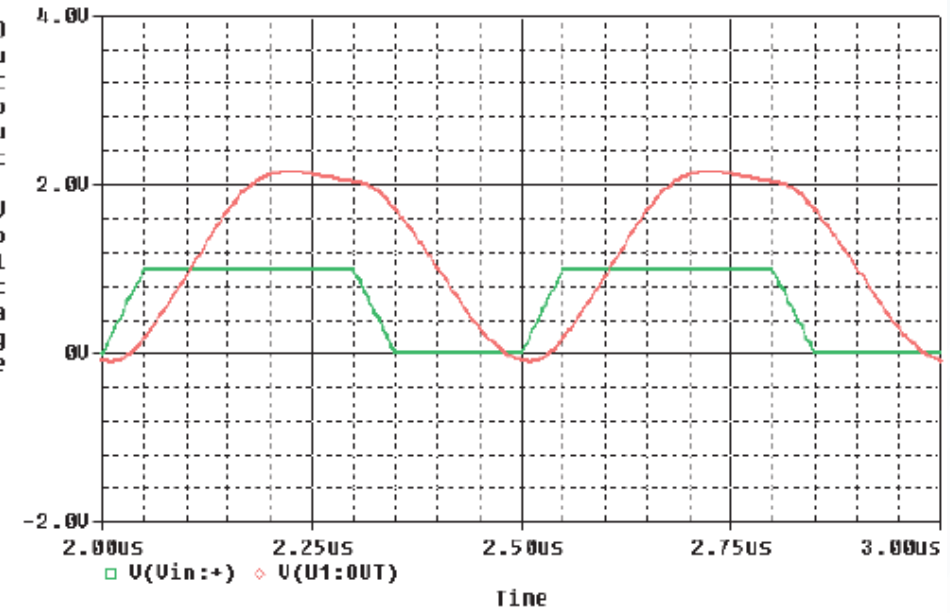
# Slew Rate (Değişim/Yükselme Hızı)

- Bir Op-Amp'ın frekans performansının bir ölçüsü de onun slew rate'idir. Op-Ampın girişine büyük genlikli bir darbe gerilimi uygulandığında, çıkış geriliminin ne kadar hızlı değiştiğini gösteren bir özelliktir. En çok  $V/\mu s$  ile ifade edilir. Slew rate çıkış için maksimum  $V/\mu s$ 'dir.



Yükselme/düşme süreleri : 1µs  
Darbe (pulse) genişliği : 5µs

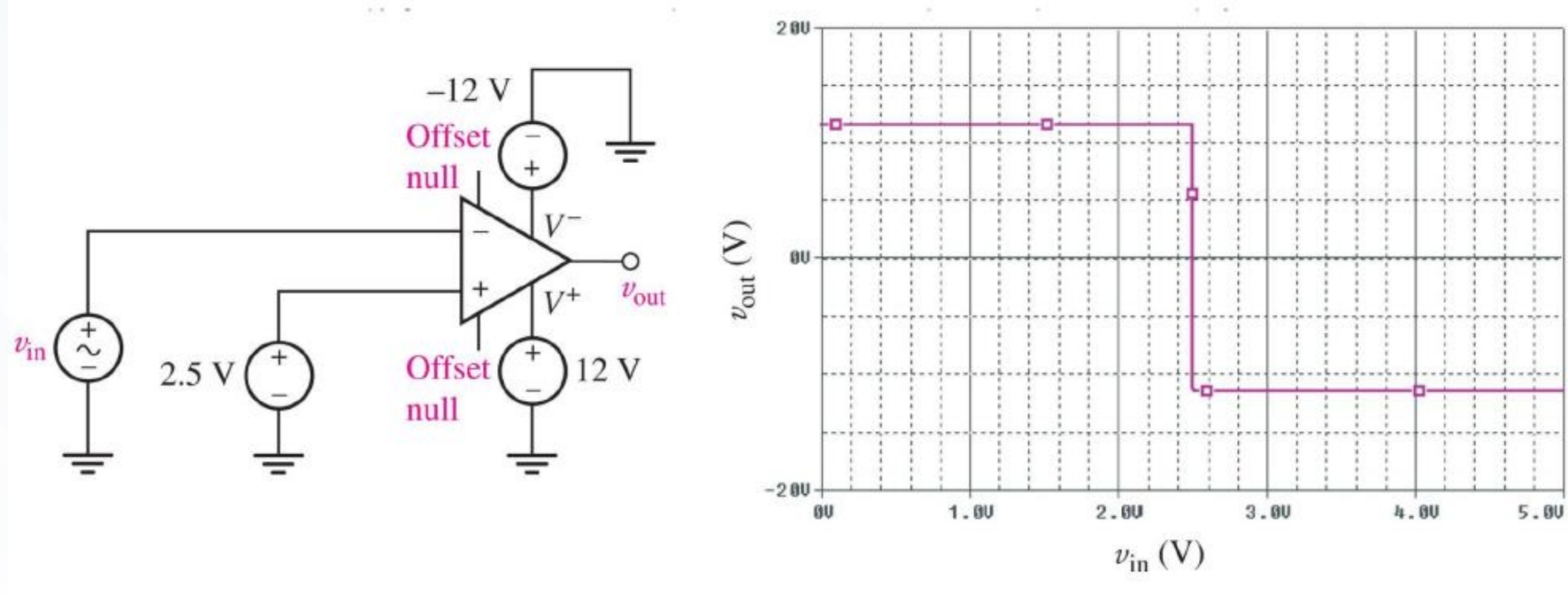
Örnek: Giriş (Yeşil), Çıkış (Kırmızı)



Yükselme/düşme süreleri : 50ns  
Darbe genişliği : 250ns

# The Comparator (Karşılaştırıcı)

- Op-Amp' lar açık çevrimde kararlar vermek için kullanılabilir. Aşağıda verilen durumda  $v_{in} > 2.5V$  koşulunda ne oluyor?

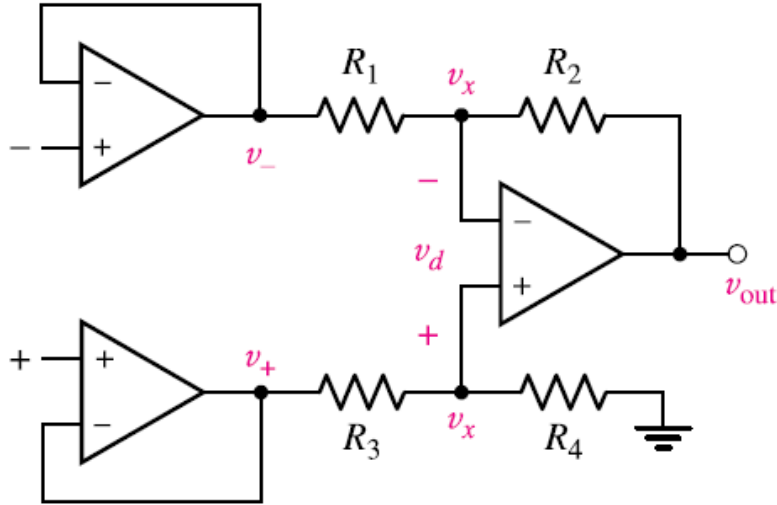


# Enstrümentasyon Kuvvetlendiricisi

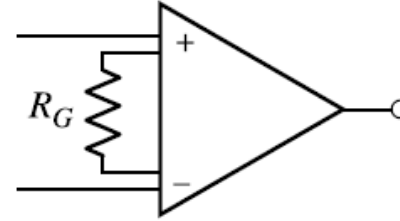
- Bu cihaz küçük gerilim farklarının hassas/kesin bir şekilde kuvvetlendirilmesine izin verir.

$$v_{out} = K(v_+ - v_-)$$

$$R_4/R_3 = R_2/R_1 = K$$



(a)



(b)

- (a) Basit enstrümentasyon kuvvetlendiricisi
- (b) Yaygın kullanılan sembol

# Chapter 6 Özet & Tekrar

## ➤ İşlemsel Kuvvetlendirici

- Kurallara uygun bir şekilde uygulandığında (güç, geri besleme) toplama, fark alma ve gerilim/akım girişlerini (akım taşıma kapasitesine ve belli bir opampın giriş-güç seviyelerine bağlı) kuvvetlendirme işlerini yapan lineer bir devre elemanıdır.

## ➤ Op-Amp Analizi

- İki ideal Op-Amp kuralı:
  1. Giriş terminallerindeki gerilimler eşittir ( $v_n = v_p$ )
  2. Her bir giriş terminalinden içeri akan akım sıfırdır ( $i_n = i_m = 0$ )
- Tek katlı bir Op-Ampın giriş ve çıkışı düğüm analizi yapıldığında birbirleriyle ilişkilidir. (tipik olarak Op-Ampın bir/iki girişinde KCL)

## ➤ Ardışık bağlı Op-Amplar

- Girişten çıkışa doğru bir seferde tek bir kat analiz edilir.
- Bir katın çıkışı, kendinden hemen sonra gelen katın girişi olur.

## ➤ Op-Amp'ın doymaya girmesi

- Bu durumda bir Op-Amp'ın çıkış gerilimi  $\pm V_{cc}$ 'yi geçemez.
- Analog sinyallerden dijital sinyaller üretirken kullanışlıdır (lineer olmayan davranış).