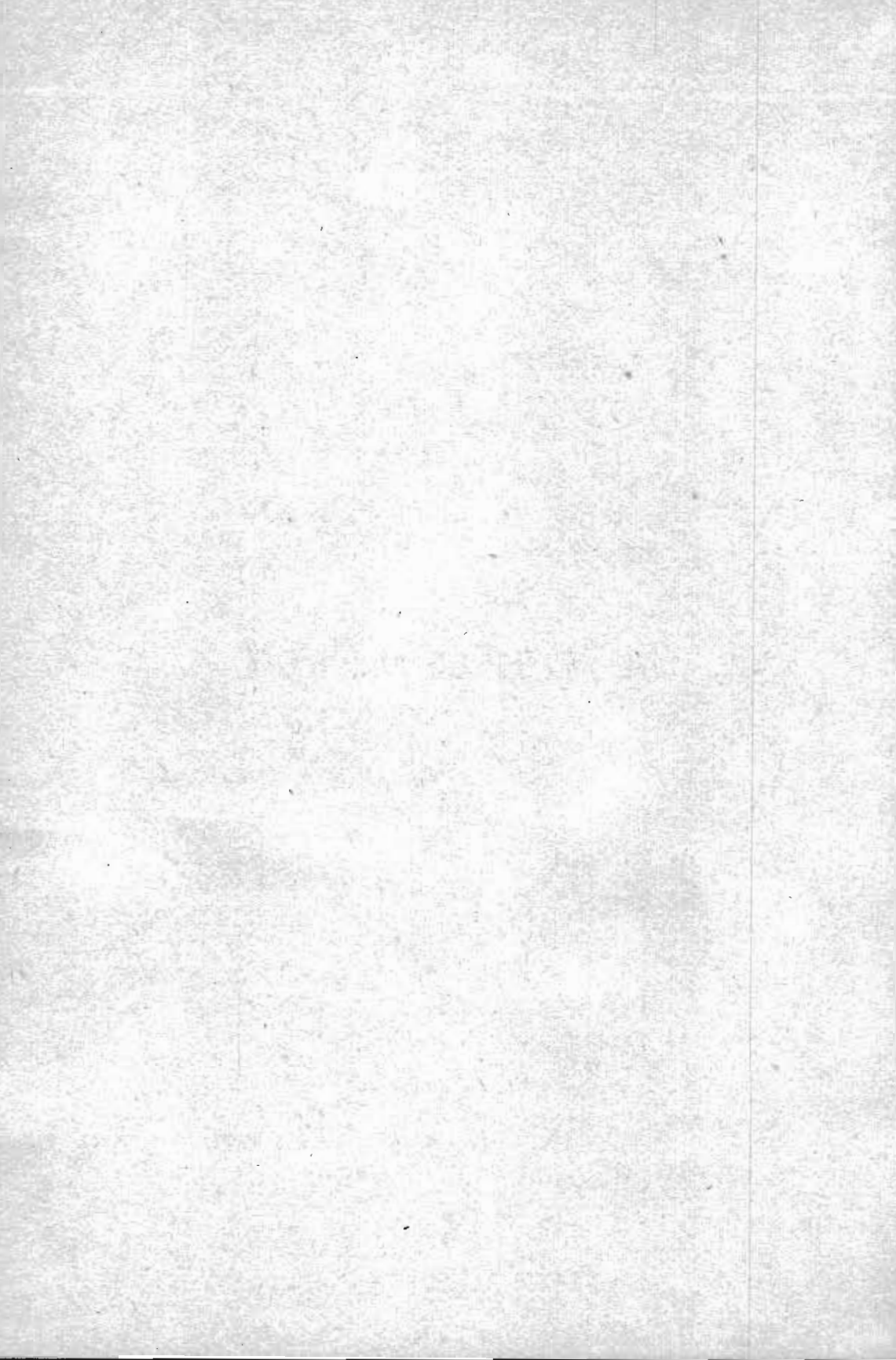


### III. DERLEMELER



## ANALOĞ KOMPÜTERLERİN ESAS TEORİSİ

Battal KUŞHAN<sup>1</sup>

### ÖZET

20-24 Ocak 1975 tarihleri arasında Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi ile Mühendislik Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü tarafından İzmir Ziraat Fakültesi Ziraat Makinaları Kürsüsünde tertiplenen 1. Elektronik Ölçü Teknik seminerinde sunulan bu tebliğle Analog Kompüterlerin esas prensipleri herkesin anlayacağı biçimde izah edilmeğe çalışılmıştır. Ayrıca verilen örnek problem çözümleri ile konu bir defa daha açıklanmış, bu konuda çalışacak elemanlara Analog kompüter teorisine ilişkin esaslar ana hatları ile sunulmuştur.

### 1. GİRİŞ

Elektrik hesap makinalarının, ilmi araştırmalarda, endüstride ve işletmecilikte kullanılışı giderek yaygınlaşmaktadır. Dijital ve analog kompüter olarak bilinen iki esas elektronik hesap makinasının kullanımının teorisinin kısa zamanda yurt sathına yayılması gereklidir. Aksi takdirde özellikle, dış ülkelerde bu makinalar yardımı ile yürütülen ilmi araştırmaların izlenmesi ve değerlendirilmesi olanaksız duruma girecektir.

En karmaşık matematiksel işlemlerin çabucak ve kesin olarak çözümünde yararlı olan bu iki tip hesap makinasının hiç olmazsa üniversitelerimizde kullanımının artırılması ve araştırmalara uygulanması gereklidir. Bu yolda yalnız elektronik analog kompüter (EAK).den söz edilecektir.

Elektronik analog kompüter (EAK) esas olarak, yüksek kazançlı (gain) D-C elektronik amplifikatörlerin, basit resistor -kapasitör (R-C) devreleri ile irtibatlandırılması suretiyle oluşur. Buna ila-

(1) Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Kültürteknik ve Ziraat Alet ve Makinaları Bölümü Doçenti.

veten daha karmaşık problemlerin çözümünü için fonksiyon çarpıcıları fonksiyon üreteçleri, diyotları ve çeşitli tip roleler gibi özel yardımcı elemanlar da kullanılır.

Analoğ kompüterlerle bir promlemin çözümünü analojiye (benzetmeye) dayanır. Yani kompüter o biçimde programlanır ki, kompüter devre denklemleri ile problem denklemleri aynı matematiksel biçime sahip olsunlar. Analog kompüterlerde hız, sıcaklık, kuvvet, yol, ivme vb. gibi fiziki büyüklükler voltajla ifade edilirler. Voltaj değerleri ile fiziki büyüklük değerleri arasındaki sayısal bağıntıyı (yani bir voltun, örneğin kaç kilogramı gösterdiğini) «ölçek faktörü» ifade eder. Programlanmış bir kompüter işlemleri kesintisiz olarak yerine getirdiği için hesaplama süresi ile çözülecek problemin değişkeni arasında bir bağıntı vardır. Bu bağıntıyı belirleyen sayıya «zaman ölçek faktörü» denir.

## 2. ELEKTRONİK ANALOĞ KOMPÜTERİN ESAS ELEMANLARI

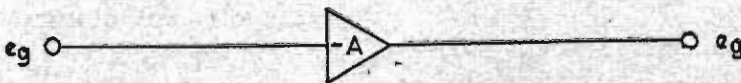
Analoğ kompüterin esas elektronik elemanları sayıca oldukça azdır. Bunların en önemlileri «işlem amplifikatörleri»dir. Bunlar uygun giriş ve fidbek impedansları ile kullanıldıkları takdirde

şu önemli işlemleri yerine getirirler :

- Toplama ve çıkarma
- Sabit bir sayı ile çarpma ve bölme
- İntegral alma.

Bu işlemlerin uygun biçim ve hassasiyetle yapılabilmesi için, çok yüksek negatif kazançlı D-C amplifikatörleri imal edilmiştir. Analoğ kompüterlerde kullanılan negatif kazanç (A) çoğunlukla  $10^5$  ve daha yüksek değerdedir (James ve arkadaşları 1966). Örneğin bu değer Donner Scientific Model 3400 EAC'lerde  $50 \times 10^6$ 'dır (Goss ve arkadaşları 1963). Şekil 1'de D-C yüksek negatif kazançlı bir amplifikatör sembolik olarak gösterilmiştir. Bu şekilde  $e_g$  amplifikatörün giriş kaşvak noktası gerilimini,  $e_o$  amplifikatör çıkış gerilimini, A ise amplifikatörün kazancını ifade eder ve bu üç büyüklük arasında  $e_o = -Ae_g$  bağıntısı vardır. EAK'lerde  $e_o$  çoğunlukla en fazla  $\pm 100$  volt alındığından ve A, çok büyük olduğundan (örneğin  $50 \times 10^6$ )  $e_g$  sifıra yaklaşır ve pratikte ihmal edilebilir. Yani,

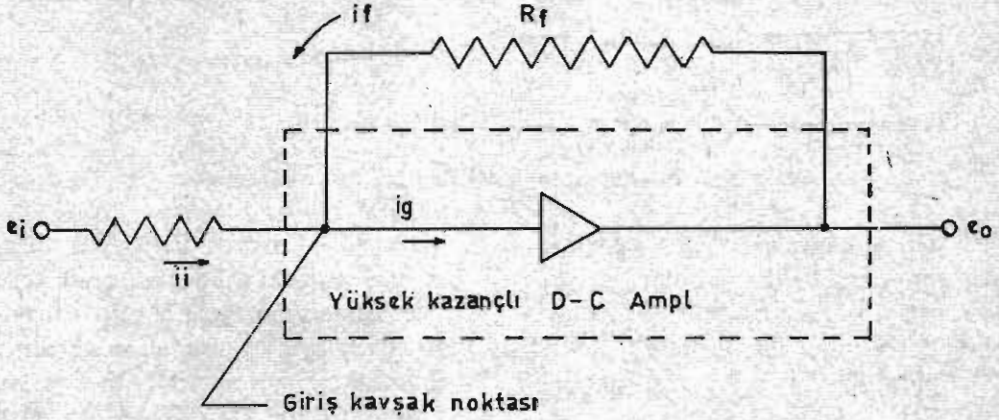
$$e_g = \frac{|e_o|}{|A|} = \frac{100}{50 \times 10^6} = 2 \times 10^{-6} = 2 \mu V = 0 \text{ dir.}$$



Şekil 1 : Amplifikatörün sembolik gösteriliş

Eğer amplifikatörle, C = kapasite ve R = direnç gibi passif elemanlar teker teker veya beraberce kullanılırsa işlem amplifikatörleri elde edilmiş olur. Burada passif eleman deyimi ile amplifikatörün öz elemanı olmayan ve çözülecek probleme göre de-

ğiştirilebilir elemanlar kastedilir. Şekil 2'de bir işlem amplifikatörünün devre diyagramı gösterilmiştir. Amplifikatör gölgeli dik dörtgen içinde gösterilmiştir. Passif elemanlar ise dik dörtgen dışında kalmaktadır.



Şekil 2 : İşlem amplifikatörü devre diyagramı

İşlem amplifikatörlerinde kazanç passif elemanlar cinsinden tanımlanır ve amplifikatörün kendi kazancı ile ilgili değildir.

Eğer Şekil 2'de görüldüğü gibi amplifikatöre  $R_i$  giriş ve  $R_f$  geri besleme (feed-back) dirençleri bağlanırsa bir işlem amplifikatörü elde edilmiş olur. Çıkış voltajı  $e_o$ 'nın belirtilen değerleri için giriş kavşak noktası voltajı  $e_g$  ve akımı  $i_g$  ihmal edilecek derecede küçük olduklarından Kirc-hoff kanununa göre  $i_i + i_f = 0$  yazılabilir. Bu ifadeyi voltaj ve direnç cinsinden yazarsak;

$$\frac{e_i}{R_i} + \frac{e_o}{R_f} = 0 \quad (1)$$

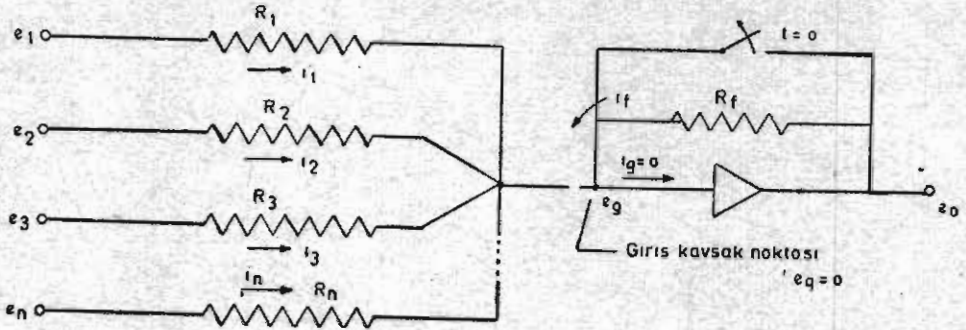
ve

$$e_o = - \frac{R_f}{R_i} e_i \quad (2)$$

yazılabilir. Burada görülen  $R_f/R_i$  terimine işlem amplifikatörünün «kazanç»ı denir. Eğer  $R_f = R_i$  ise çıkış voltajı giriş voltajının işaretçe tersi olur. Eğer  $R_f$  ve  $R_i$  eşit değilseler giriş voltajı  $e_i$  işlem amplifikatörünün kazancı olan sabit bir değerle çarpılmış olur. Kazanç =  $R_f/R_i$  birden küçük olabilir. Bu durumda çıkış voltajı  $e_o$ , giriş voltajından küçük olur. Buna bir bölme işlemi gözü ile de bakılabilir. Eğer  $R_f/R_i > 1$  ise  $e_o > e_i$  olur. Bu ise bir çarpma işlemi olarak düşünülebilir.

## 2.1. Toplama Amplifikatörü

Toplama işlemini yapabilecek



Şekil 3 : Bir toplama amplifikatör devre diyagramı

Giriş kavsak noktası gerilimi ve amplifikatörün içinden geçen akımın ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu düşünülerek Şekil 3'e göre Kirchoff kanunu yazılırsa,

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n + i_f = 0 \quad (3)$$

veya gerilim ve dirençlere göre,

$$\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} + \dots + \frac{e_n}{R_n} + \frac{e_o}{R_f} = 0 \quad (4)$$

yazılabilir. Bu da  $e_o$ 'e göre çözülecek olursa,

$$e_o = \left( \frac{R_f}{R_1} e_1 + \frac{R_f}{R_2} e_2 + \frac{R_f}{R_3} e_3 + \dots + \frac{R_f}{R_n} e_n \right) \quad (5)$$

elde edilmiş olur. 5 numaralı denklem bize şunu ifade eder: Amplifikatörün çıkış voltajı ( $e_o$ )

bir amplifikatör diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.

giriş voltajlarının  $R_f/R_n$  faktörleri ile çarpımları toplamının ters işaretlisine eşittir. Eğer  $R_f$  direnci sıfıra eşit olursa  $e_o = 0$  olur. Problem çözümlerinde başlangıç anından önce ( $t < 0$ )  $e_o$ 'nın sıfır olması gereklidir. Bunun sağlanabilmesi için  $R_f$  direncine paralel bağlanmış bir kesici  $t < 0$ 'da kapalıdır.  $t = 0$  anında ise açılır.

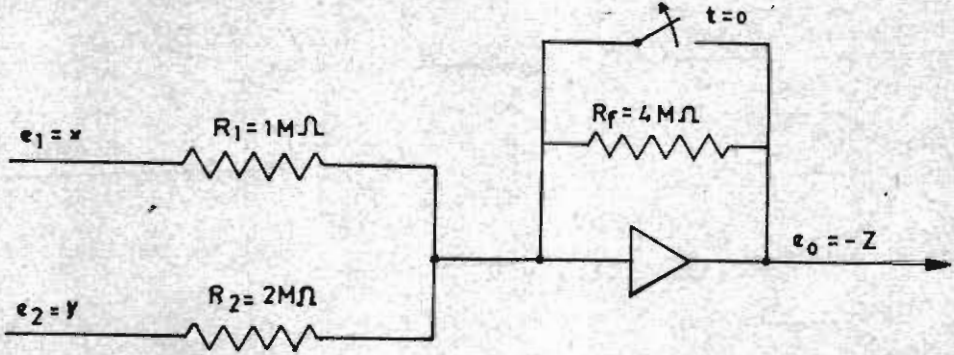
Toplama amplifikatörünün daha iyi anlaşılabilmesi için basit bir denklemin çözümünü düşünelim.

$$Z = 4X + 2y \quad (6)$$

Burada  $Z = -e_o$ ;  $X = e_1$  ve  $y = e_2$  düşünülecek olursa, yani denklemdeki büyüklükleri gerilim değerleri ile ifade edersek,  $X$ 'in 4 veya  $y$ 'nin de 2 katsayısı (kazanç) ile çarpılmaları gerekir. Bu katsayıları elde etmek için keyfi olarak  $R_f = 4 \text{ M } \Omega$  (megaom) alacak olursak  $R_1 = 1 \text{ M } \Omega$ ;  $R_2 = 2 \text{ M } \Omega$  olur. Böylece

$$e_o = - \left( \frac{4}{1} e_1 + \frac{4}{2} e_2 \right)$$

yazılabilir. Buna ait işlem amplifikatör diyagramı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4

Çözümü istenen denklemlerde katsayılar çoğunlukla yukarıdaki örnekte görüldüğü gibi tam sayılar olmamaktadır. Diğer yandan işlem amplifikatörlerinde kullanılan passif elemanların değerleri dirençler için 0,2 MΩ, 0,5 MΩ, 1MΩ 2MΩ, 10MΩ vb. ve kapasiteler için genellikle 0,01; 0,1 ve 1µf (mikrofarad) gibi kesin nominal sayılar alınır. Bu nominal sayılarla her çeşit kesirli katsayıların elde edilmesi olanak dışıdır. Bu nedenle esasen voltaj bölücüsü olarak işlem yapan katsayı potansiyometreleri kullanılır. Bunların kullanımını aşağıdaki denklemin çözümünde görelim.

$$Z = 3,53 X + 2,37 y \dots\dots\dots$$

$$\dots\dots\dots (7)$$

7 numaralı denklemdaki katsayıları (3,53 ve 2,37) passif dirençlerle oluşturulan kazançlarla ( $R_f/R_1$ ,  $R_f/R_2$ ) elde etmek pratik değildir, hatta olanaksızdır. O halde yine  $X = e_1$ ,  $y = e_2$  ve  $Z = -e_o$

gerilim değerleri ile ifade edilirken keyfi olarak  $R_f = 4M\Omega$ ,  $R_1 = 1\ 4M\Omega$  ve  $R_2 = 1\ 4M\Omega$  alınsın. X in katsayısını (3,53) elde etmek için  $R_f/R_1$ 'yi  $K_1$  sayısı ile (y'nin katsayısının (2,37) elde etmek için de  $R_f/R_2$ 'yi  $K_2$  sayısı ile çarpmak gerekecektir. Buna göre 7 numaralı denklemin işlem amplifikatörü cinsinden yazılışı:

$$e_o = - \left( \frac{K_1 e_1 4}{1} + \frac{K_2 e_2 4}{1} \right)$$

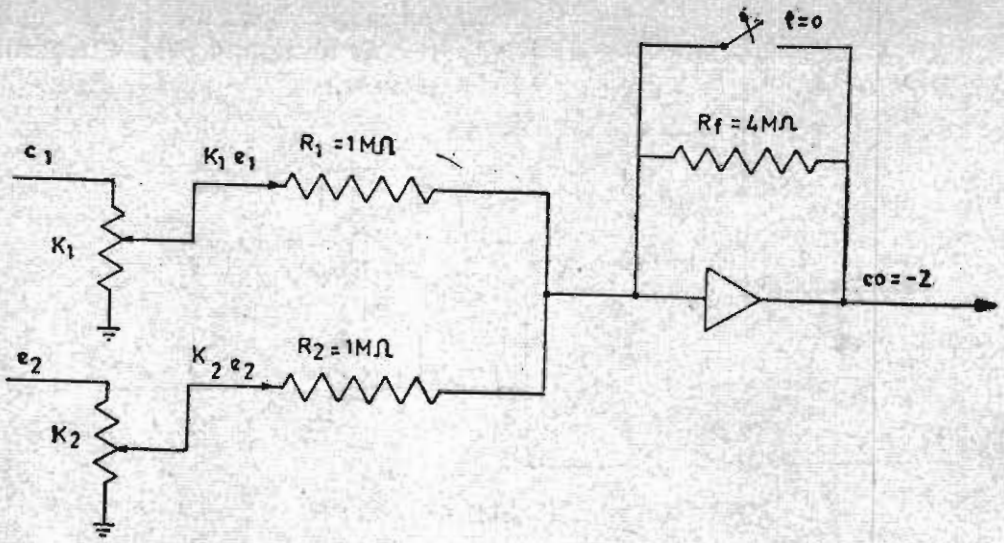
şeklinde olur. Burada  $e_o = -Z$ ;  $e_1 = X$  ve  $e_2 = y$ 'dir. Buna göre,

$$4 K_1 = 3,53 \text{ ve } K_1 = 0,88$$

$$4 K_2 = 2,35 \text{ ve } K_2 = 0,59$$

olur. 7 numaralı denklemin çözümünde ait işlem diyagramı Şekil 5'te görülmektedir.

Potansiyometreler esasen voltaj bölücüsü olarak fonksiyon yaptıklarından ayarlama değerleri ( $K_1$ ,  $K_2$  ..... vb.) daima birden küçük olacaktır. Potansi-



Şekil 5

yometrenin sembolik gösterilişi Şekil 6'da görüldüğü gibi bir dairesidir.

## 2.2. Toplama İntegratörü

Eğer bir amplifikatör Şekil 6'da görüldüğü gibi R-C devreleri ile kullanılırsa bir toplama integratörü elde edilir.

Burada  $e_s$  ve  $I_s$  ihmal edile-

$$de_o = - \left( \frac{K_1 e_1}{R_1 C_f} + \frac{K_2 e_2}{R_2 C_f} + \frac{K_3 e_3}{R_3 C_f} \right) dt$$

Şekil 6'da kondansatörün uçları arasında paralel bağlı başlangıç sabit voltajı (E) göz önünde tutulursa  $t > 0$  için aşağıdaki bağlantı

$$\int_E^{e_o} de_o = - \int_0^t \left( \frac{K_1 e_1}{R_1 C_f} + \frac{K_2 e_2}{R_2 C_f} + \frac{K_3 e_3}{R_3 C_f} \right) dt$$

cek kadar küçük olduklarından Kirchoff kanununa göre

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

veya

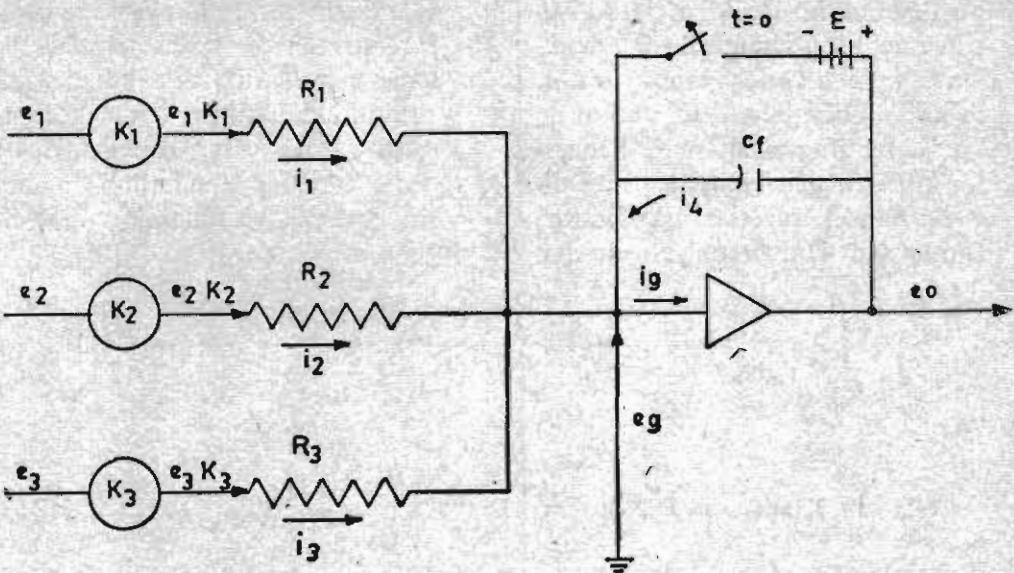
$$\frac{e_1 K_1}{R_1} + \frac{e_2 K_2}{R_2} + \frac{e_3 K_3}{R_3} + C_f \frac{de_o}{dt} = 0 \dots (9)$$

yazılabilir. Denklem de  $e_o$ 'a göre çözümlürse,

yazılabilir. (Burada t integrasyon süresi olup işlem, amplifikatörlerin yapı özelliği olarak saniye cinsinden belirtilmiştir).

veya





Şekil 6

$$e_o = - \int_0^t \left( \frac{K_1 e_1}{R_1 C_f} + \frac{K_2 e_2}{R_2 C_f} + \frac{K_3 e_3}{R_3 C_f} \right) dt + E \dots \dots \dots (10)$$

Son denkleme gösteriyor ki, çıkış voltajı  $e_o$  daima, giriş voltajlarının cebirsel toplamalarının integraline eşittir ve işareti toplam integralinin tersidir.

10 numaralı denklemin solunda görülen (E) voltajı daha sonra açıklanacağı gibi belli bir ölçekte fiziksel problemin  $t = 0$  anına ait durumunu ifade etmektedir.

Toplam integratörünün çeşitli linear diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanımına ait örnekler vermeden önce, programlama ve çözüm esnasında kullanılan bazı sembolik işaretlerden ölçek faktöründen ve işaret değiştirme işlemlerinden bahsedilecektir.

### 2.3. Sembolik İşaretler

Bir problemin kompüter için programlanmasında kompüter devresinin çizimi gereklidir. Bu devrelerin çiziminde bazı kolaylaştırıcı sembolik işaretler kullanılır. Bu işaretlere ait örnekler Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda ayrıca bu işaretlerin ifade ettiği kompüter devreleri, bu devrelerle gerçekleştirilen matematiksel işlemler ve ayrıca bu devrelere ait transfer fonksiyonlar gösterilmiştir.

Analoğ kompüter ile problem çözümünü esasen benzetmeye dayandır. Problem çözümünde kompüter için öyle bir devre hazırlanır ki,

bu devreye ait denklem fiziki p-  
robleme ait matematiksel denk-  
lemle aynı biçime sahip olsun.  
Problemin matematiksel ifadesi ile  
kompüter ifadesi arasında benzer-  
lik kurmak için kolaylık olsun di-  
ye «işlemsel işaretler» kullanılır.  
Bunlardan D difransiyel olmayı,

$$D^n X = \int \frac{d^n X}{dt^n} \dots\dots\dots (11)$$

ve

$$(1/D) D^n X = \int D^n X dt = D^{n-1} X \left| \begin{array}{l} D^{n-1} x \\ D^{n-1} x_0 \end{array} \right. \dots\dots\dots (12)$$

Burada  $D^{n-1}x_0$ ,  $D^{n-1}x$ 'in ilk limit  
değeridir. Son denklemin sağ tara-  
fında limit değerler yerine konsa

1/D ise integral almayı ifade eder.  
Bu işaretler bir diferansiyel denk-  
leme uygulandıkları takdirde çö-  
zümün elde edilmesi için kompü-  
terin yerine getirmek zorunda ol-  
duğu işlemler belirtilmiş olur.  
Bu işaretler ve anlamları aşağıda  
gösterilmiştir :

ve terimler tanzim edilirse denkle-  
min işlem formu

$$D^{n-1} X = \frac{1}{D} \left( D^n X \right) + D^{n-1} x_0 \dots\dots\dots (13)$$

şeklinde yazılır. Bu, diferansiyel  
denklemin çözümünün elde edilme-  
si için gerekli işlemleri göstermek-  
tedir. Örnek olarak ikinci derecede

diferansiyel denklemin çözümünü  
düşünelim.  $n=2$  değeri için 13  
numaralı denklemin alışılmış in-  
tegral formunu yazacak olursak,

$$\frac{dX}{dt} = \int \frac{d^2 X}{dt^2} dt + \left( \frac{dX}{dt} \right)_0$$

ve

$$X = \int \frac{dX}{dt} dt + X_0$$


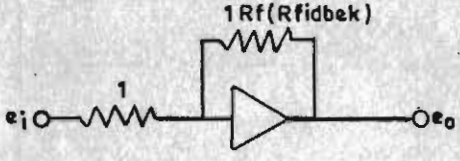
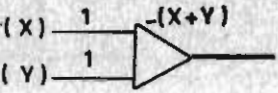
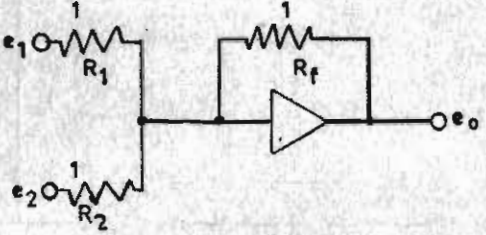
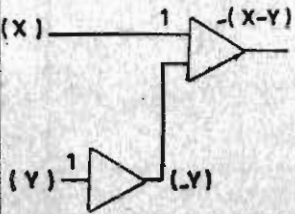
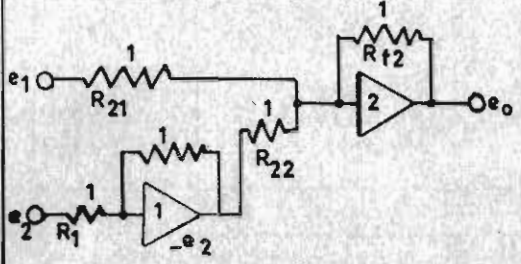
olur. Bu iki denklemin kompüter-  
de beraber çözümü sonucu, verilen  
diferansiyel denkleme bir çözüm  
verir.

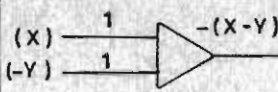
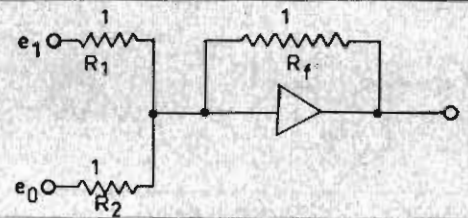
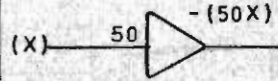
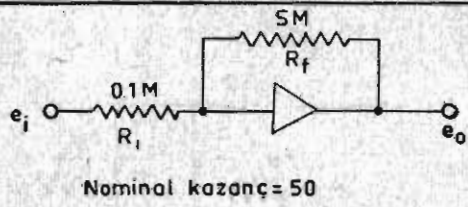
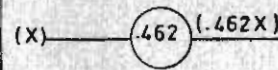
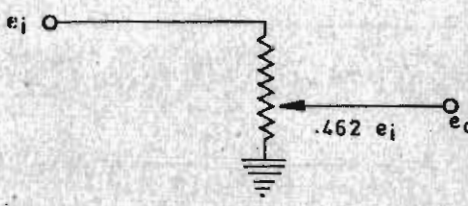
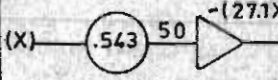
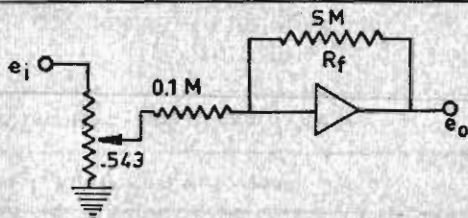
### 2.4. Ölçek Faktörü

İşlem amplifikatörlerinde  
maksimum çıkış voltajı  $e_0 = \pm$   
100 V olduğu görülmüştü. Hal-  
buki bu volt değerleri çözülecek  
pıblemdeki değişken fiziki büyük-

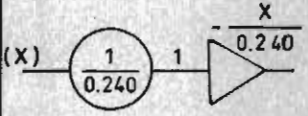
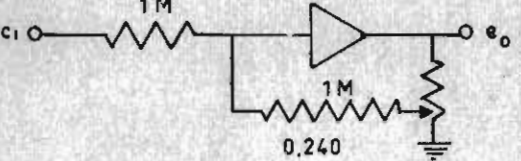
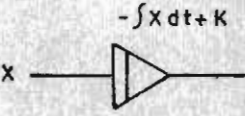
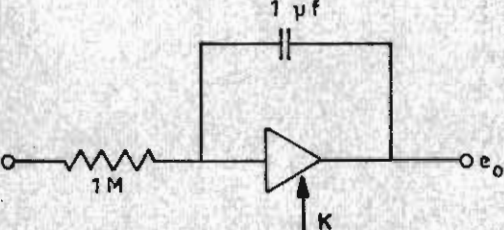
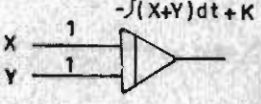
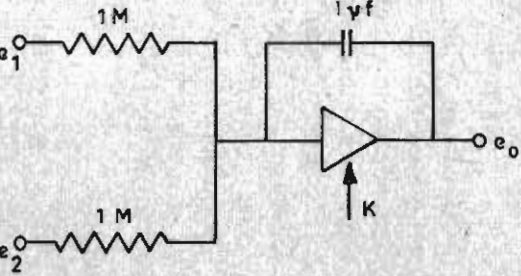
Bu tip çözümlere ait örnekler  
verilecektir.

Tablo 1. Kompüter notasyon

Matematiksel işlem	İşlemsel semboller	Kompüter devre sembolleri	Transfer fonksiyonlar
1. İşaret değiştirme -1.X		 (e <sub>i</sub> n)      R <sub>i</sub> (R giriş)      (e çıkış)	$e_o = -e_i$ (R <sub>f</sub> =R <sub>i</sub> herhangi bir pozitif direnç)
2. Toplama -(X+Y)			$e_o = -(e_1 + e_2)$ veya: $e_o = - \left[ R_f \left( \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \dots + \frac{e_n}{R_n} \right) \right]$
3. Çıkarma (Eldi+Yvarken) -(X-Y)			$e_o = -(e_1 + e_2)$ veya: $e_o = - \left[ \frac{R_{f2}}{R_{21}} e_1 - \left( \frac{R_{f1}}{R_1} \right) e_2 \frac{R_{f2}}{R_{22}} \right]$

Tablo 1 devam			
Matematiksel işlem	İşlemsel semboller	Komputer devre sembolleri	Transfer fonksiyonlar
4. Çıkarma elde -Y varken $-(X-Y)$			$e_o = -(e_1 - e_2)$ veya: $e_o = R_f \left( \frac{e_1}{R_1} - \frac{e_2}{R_2} \right)$
5 Çarpma nominal kazançla $-50(X)$		 Nominal kazanç = 50	$e_o = \frac{5}{0.1} e_i = -50 e_i$ veya $e_o = -\frac{R_f}{R_i} e_i$
b Bir kat sayı ile $0.462(X)$			$e_o = .462 e_i$ veya: $e_o = a e_i$
Nominal passif direnc değerleri kullanılarak kesirli kazançla .543 (-50)X			$e_o = -.543 \left( \frac{5}{0.1} \right) e_i$ $e_o = -27.2 e_i$ veya $e_o = -a \left( \frac{R_f}{R_i} \right) e_i$

Tablo 1 devam

Matematiksel işlem	İşlemsel semboller	Kampüter devre semboller	Transfer fonksiyonlar
<p>d.) Karsıt katsayı ile</p> <p><math>-\frac{1}{0.240} (X)</math></p>			<p><math>e_o = -\frac{1}{0.240} e_i</math></p> <p>Veya</p> <p><math>e_o = -\frac{1}{\alpha} \left( \frac{R_f}{R_i} \right) c_i</math></p>
<p>6. İntegral alma</p> <p><math>-\int X dt + K</math></p> <p><math>t = 0</math> anında <math>X = K</math></p>		<p>( Fıdbek kapasitörü - <math>C_f</math> )</p> 	<p><math>e_o = -\int_0^t c_i dt + K</math></p> <p>Veya</p> <p><math>e_o = -\frac{1}{R_i C_f} \int_0^t e_i dt + K</math></p>
<p>7. Bir cebirsel toplamın integrali</p> <p><math>-\int (X+Y) dt + K</math></p> <p><math>t = 0</math> anında <math>X = Y</math></p>			<p><math>e_o = -\int_0^t (e_1 + e_2) dt + K</math></p> <p>Veya</p> <p><math>e_o = -\frac{1}{C_f} \int_0^t \left( \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} \right) dt + K</math></p>

lükleri ifade eder. O halde problemdeki büyüklüğün maksimum değerini ifade eden voltaj değeri 100 V olabilir. Eğer fiziki büyüklüğün maksimum değeri 500 ise ölçek faktörü 5 olacaktır. Örnek olarak fiziki problemde hız  $dy/dt$  (zamana göre türev  $\dot{y}$  olarak gösterilir) değişken olarak alınсын ve bu büyüklük kompüter-

100

$$S = \frac{100}{\text{Tahmin edilen büyük } \dot{y} \text{ değeri}}$$

Çoğu zaman  $\dot{y}$ 'nin en büyük değeri kolayca tahmin edilemeyeceğinden lalettayın büyük bir değer alınır ve kompüter çıkış voltajı izlenir. Eğer alınan değer gerçek değerden çok büyük ise kompüter çıkış voltajı ( $e_0$ ) küçük olur. Eğer alınan değer % 100 doğru ise ve ölçek faktörü buna göre alınırsa  $e_0 = 100 V$ 'u gösterir.

#### ÖRNEK 1

Yalnız yerçekimi altındaki

de voltajla ( $e$ ) temsil edilsin. Bu durumda;

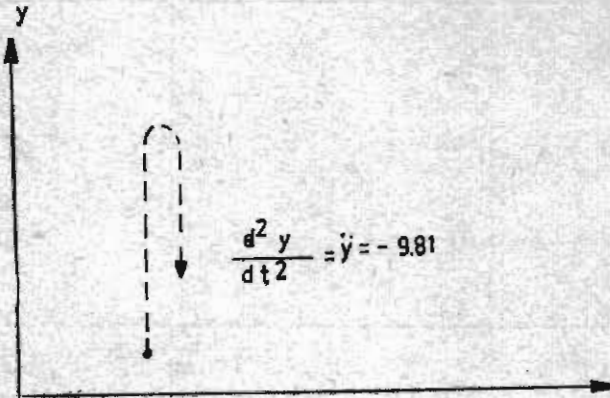
$$e = S\dot{y}$$

yazılabilir. Burada,  $S$ , ölçek faktörü olur. Eğer  $\dot{y}$ 'nin boyutu  $m/sn$  ise ölçek faktörünün boyutu  $V/m/sn$  olur. Ölçek faktörünün değeri aşağıdaki bağıntı ile tesbit edilir.

bir kütle için yukarı doğru dikey olarak  $\dot{y}_0 = 40,2 m/sn$  ilk hızı ile atıldığını varsayalım. Yol değeri ( $y$ )'nin yukarı doğru olan yönünü Şekil 7'de olduğu gibi pozitif kabul ederek ve hava direncini ihmal edersek, bu hareketin diferansiyel denklemi,

$$\ddot{y} = -9,81$$

olur.



Şekil 7 : Örnek 1'in sistemi

Bu sistem için 13 numaralı denklemde gösterilen işlem for-

mu yazılacak olursa,

$$\dot{y} = \frac{1}{D} [\ddot{y}] + \dot{y}_0 \frac{1}{D} (-9,81) + \dot{y}_0 \dots \dots \dots (14)$$

ve

$$y = \frac{1}{D} [\dot{y}] + y_0 \dots \dots \dots (15)$$

denklemleri elde edilmiş olur. Bu denklemler gerekli kompüter işlemlerini göstermekte olup, dikkat edilirse iki adet integratöre ihtiyaç olduğu anlaşılır. 14 ve 15 numaralı denklemlerle ifade edilen işlemler şöyle özetlenebilir: 1 — Hız ( $\dot{y}$ ) fonksiyonunu elde etmek için ivme ( $y$ ) fonksiyonu integre edilip,  $t = 0$  anındaki ilk hız ila-

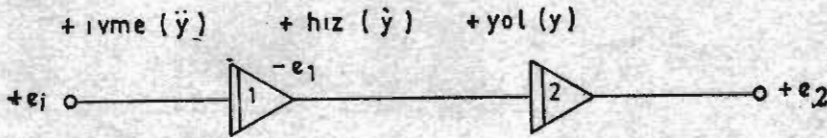
ve edilecek. 2 — Yol ( $y$ ) fonksiyonunu elde etmek için hız ( $\dot{y}$ ) fonksiyonunu integre dilecek,  $t = 0$  anındaki yol değeri fonksiyona eklenecektir. 14 ve 15 numaralı denklemler, sıra ile  $S_1$  ve  $S_2$  ölçek faktörleri ile çarpılarak, voltaj formunda aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$e_1 = S_1 \dot{y} = - \frac{L}{D} \left( - S_1 (9,81) \right) - S_1 y_0 \dots \dots \dots (16)$$

$$e_2 = S_2 y = - \frac{1}{D} [S_2 y] + S_2 y_0 \dots \dots \dots (17)$$

Şimdide, probleme ait denklemleri işlem formundan voltaj formuna çevirirken işaretlerdeki değişimleri inceleyelim. Evvela Şe-

kil 8'e bakacak olursak iki integratörlü sistemde giriş voltajı ( $e_1$ ) ivmeyi 1 nolu amplifikatör çıkış voltajı ( $e_1$ ) hızı, 2 nolu amplifika-



Şekil 8

tör (yüksekteç) çıkış voltajı  $e_2$  ise yolu temsil edecektir. Burada görüldüğü gibi  $e_2$  ile  $y$  arasında «pozitif işaret bağıntısı»  $e_1$  ile  $\dot{y}$  arasında ise «negatif işaret bağıntısı» vardır. Bu nedenle problemin

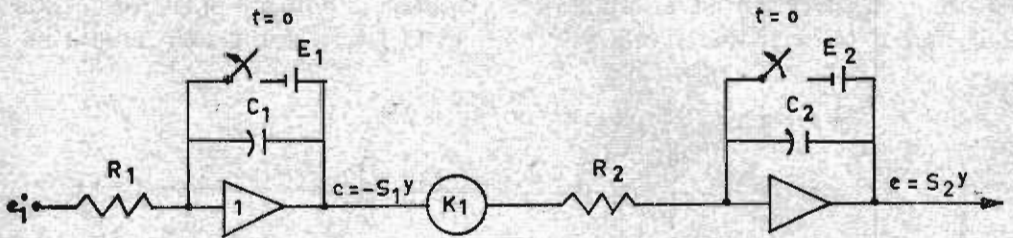
işlem formundaki denklemlerden (14 ve 15'inci denklemler) voltaj formundaki denklemlere (16 ve 17 nolu denklemler) geçerken, negatif işaret bağıntısı göz önüne alınarak,  $e_1 = S_1 \dot{y}$  yerine  $e_1 = - S_1 \dot{y}$

yazılmıştır. Böylece  $e_1$  negatif ise  $\dot{y}$  pozitif, aksine  $e_1$  pozitif ise  $\dot{y}$  negatif olacaktır. Çıkış voltajı ve bunun temsil ettiği mekanik büyüklük arasındaki negatif işaret bağıntısını belirtmek için, 16 nolu denklemde olduğu gibi başlangıç sınır değeri önüne eksi işareti konulur böylece daha sonra denklem değişkeni gerçek işareti ile elde edilmiş olur. İntegral işlemini gösteren 1/D işaretinin önüne daima (—) işareti konulması integratörün işaret değiştirme özelliğini gösterir. Büyük parantez içerisindeki her terimin işareti problem denklemindeki işaretlerin aynıdır. 14 ve 16 numaralı denklemlerin karşılaştırılması göstermektedir ki, negatif işaret bağıntısından dolayı 14 nolu denklem yazılırken her terimin (—1) ile çarpılması gerekmektedir.

17 numaralı denklemde  $e_2 = S_2 y$  yazılmıştır. Böylece  $e_2$  voltajı ile  $y$  değişkeninin daima aynı işa-

rete sahip oldukları yani  $y$  değişkeni ile bunu kompüterde temsil eden  $e_2$  voltajı arasında «pozitif işaret bağıntısı» var olduğu gösterilmiş olur. Bu takdirde problemin işlem formundan, voltaj formuna geçişte bütün terimlerin işaretleri aynen bırakılır. Ancak integrasyon işleminin özelliğinden dolayı 1/D işlem işaretinin önüne konan (—) işaretinin etkisini ortadan kaldırmak için büyük parantezindeki terimlerde (—1) ile çarpılır. Böylece aynı terim iki defa (-1) ile çarpıldığından işaret aynı kalmış olur. Bu işaret bağıntıları kompüter devre diyagramlarının çizilişinde daha açık olarak anlaşılır. Verilen probleme ait devre diyagramı, 16 ve 17 numaralı denklemler yardımı ile Şekil 9'da görüldüğü gibi çizilebilir.

Toplayıcı integratörün genel denklemi (10 numaralı denklem) göz önünde bulundurularak Şekil 9'a göre aşağıdaki devre denklemleri yazılabilir.



Şekil 9

$$e_1 = S_1 \dot{y} = -\frac{1}{D} \left[ \frac{e_1}{R_1 C_1} \right] + E_1 \dots \dots \dots (18)$$

$$e_2 = S_2 y = -\frac{1}{D} \left[ \frac{-K_1 S_1 y}{R_2 C_2} \right] + E_2 \dots \dots \dots (19)$$



Burada da dikkatedilecek husus amplifikatör giriş voltajı ( $e_1$ ) ve ilk limit değerlerini temsil eden voltajları ( $E_1$  ve  $E_2$ ) devre denklemlerinde daima artı işareti ile gösterilirler. Bunların gerçek işaretleri benzetme (analoji) yapılırken ortaya çıkar. Bu özellik aşağı-

$$\frac{e_1}{R_1 C_1} = - S_1 (9,81) \dots\dots\dots (20)$$

$$E_1 = - S_1 y_0 = - S_1 (40,2) \dots\dots\dots (21)$$

olduğu yazılabilir. Aynı şekilde 17 ve 19 numaralı denklemler ele alı-

da görülecektir. Voltaj denklemleri ile devre denklemleri karşılaştırılacak olursa 16 ile 18 ve 17 ile 19 numaralı denklemlerin benzer oldukları görülür. Bu benzerliğe göre analogi yapılacak olursa, 16 ve 18 numaralı denklemlere göre

$$\frac{- K_1 S_1 y}{R_2 C_2} = - S_2 y \text{ buradanda}$$

$$\frac{K_1}{R_2 C_2} = \frac{S_2}{S_1} \dots\dots\dots (22)$$

ve

$$E_2 = S_2 y_0 = 0 \dots\dots\dots (23)$$

20, 21, 22 ve 23 numaralı denklemlere analogi (benzetme) denklemleri denir. Dikkat edilecek olursa 20 numaralı denklemin tam benzer olabilmesi için  $e_1$  giriş voltajının negatif olması gereklidir. Aynı şekilde 21 numaralı denklemden başlangıç limit şartını ifade eden voltajın ( $E_1$ ) da negatif olması gerekçesi ortaya çıkmaktadır. Eğer başlangıç hızı + 40,2 m/sn yerine - 40,2 m/sn olsa idi, başlangıç voltajı ( $E_1$ ) pozitif olacaktır.

22 numaralı denklemden gerçek analogi vardır. Eğer burada benzerlik görülmesi idi, bir prog-

ram hatasına hükmedilebilirdi. Gerçekten bu denklemden işareti değiştirilebilecek büyüklük yoktur. Aynı denklemden probleme ait değişkenler de birbirini götürmüştür. Eğer bu da gerçekleşmese idi gene bir programlama hatasının varlığı ortaya çıkardı. Analogilerin tamam olduğu kontrol edildikten sonra yapılacak iş, bu benzerliklerdeki komponentlerin değerlerinin saptanmasıdır.

Direnç, kapasite ve giriş voltajının belirtilmesi için ölçek faktörlerinin bilinmesi gerekir. Özel olarak problemimizde maksimum hız 40,2 m/sn ve maksimum yol

$$Y_{\max} = \frac{1}{2} \frac{(\dot{y}_0)^2}{g} = \frac{(40,2)^2}{19,6} = 82,4 \text{ m}$$

olacağından,

$$S_1 = \frac{100}{\dot{y}_{\max}} = \frac{100}{82,4} = 2,49 \text{ buna 2 diyelim.}$$

2,49 yerine 2 ve 1,21 yerine de 1 almak kolaylık bakımından daha uygun olacaktır. Böylece 20 ve 21

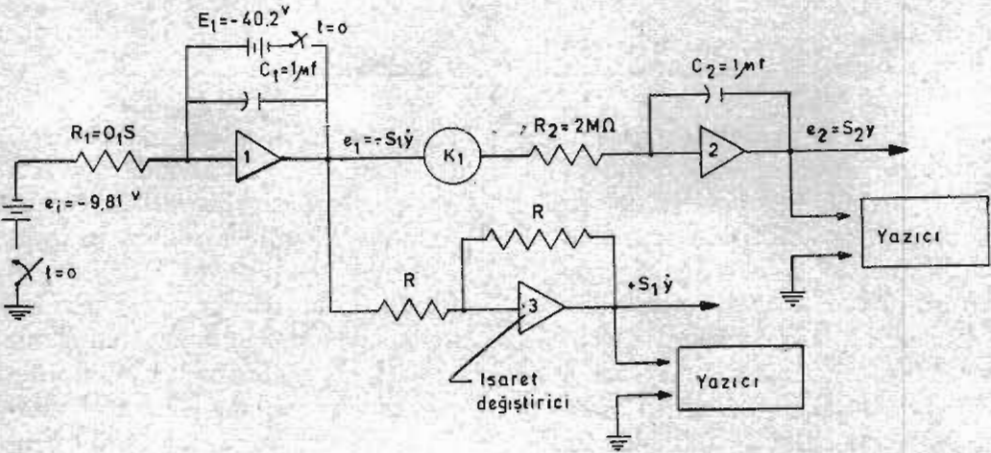
numaralı denklemlerden bir değerler grubu seçilebilir.

$R_1 = 8,5 \text{ M}\Omega$ ;  $C_1 = 1 \mu\text{f}$ ;  $e_1 = -9,81 \text{ v}$ ;  $E_1 = -40,2 \text{ v}$ ;  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$   
 $C_2 = 1 \mu\text{f}$  ve  $K_1 = 0,5$  alınırsa 22 numaralı denklem yardımı ile

$$\frac{K_1}{R_2 C_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{2} = 0,5$$

yazılır. Mamafih eğer  $R_2 = 2 \text{ M}\Omega$  ve  $C_2 = 1 \mu\text{f}$  alınırsa idi  $K_1 = 1,0$  olacaktı ki, bu potansiyometrenin

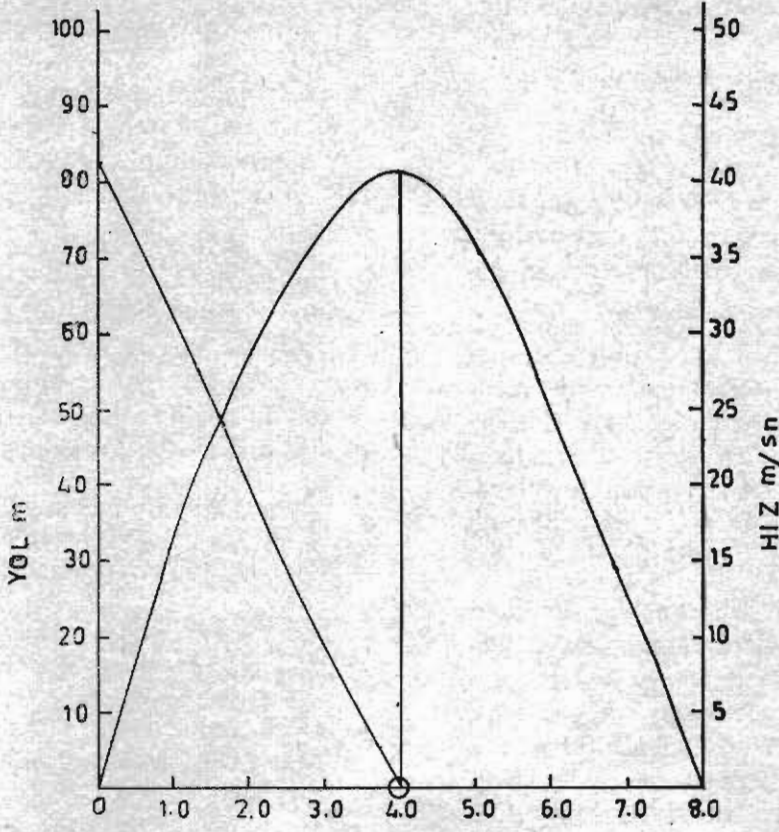
devreden çıkartılışını ifade edecekti. Probleme ait tam kompüter devresi Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10

2 ve 3 numaraları amplifikatör çıkışları bir X—Y yazıcısı yardımı ile kaydedilecek olursa, yol ve hız eğrileri Şekil 11'de verdiği biçimde elde edilirler. Yazıcının kağıt ilerleme hızı çeşitli büyüklük-

lerde ayarlanabilir. Grafikte pozitif yön yukarı doğru olduğundan, Şekil 10'da görüldüğü gibi 1 numaralı amplifikatör çıkışı işaret değiştirici amplifikatöre sokulmuştur. Bu işlem yapılmasa idi, grafik



Şekil 11 : Örnek 1'in Kompüter Çözümü

başlangıç noktası ordinat ekseninin — 40,2 noktasında ve grafik koordinat düzleminin 4. bölmesine düşecekti.

Yazıcı kalemlerin dikey hareketleri amplifikatör çıkış voltaj-

lar,  $S_1$  ve  $S_2$  ölçek faktörleri ve kağıt genişliği göz önünde tutularak saptanır. Şekil 11'de yazıcı kalemi hız için 10 volt/cm ve yol için gene 10 volt/cm. alınmıştır. Böylece hız ölçeği

$$\frac{10 \text{ V/cm}}{S_1 \text{ V}/(\text{m/sn})} = \frac{10 \text{ V/cm}}{2 \text{ V}/(\text{m/sn})} = 5 (\text{m/sn})/\text{cm}$$

ve yol ölçeği ise

$$\frac{10 \text{ V/cm}}{S_2 \text{ V/m}} = \frac{10 \text{ V/cm}}{1 \text{ V/m}} = 10 \text{ m/cm}$$

olacaktır. Yayı şekilde görüldüğü gibi ordinat eksenini üzerindeki her santimetre 5 m/sn'lik hızı 10 m'lik yolu ifade etmektedir.

## 2.5. SONUÇ

Şu ana kadar izahına çalışılan bilgisayar programlama prensipleri aşağıdaki gösterilen sıraya göre özetlemek olmaktadır.

1. Fiziksel bir problemin matematiksel denklemlerinin yazılması. Bu denklemler genellikle çeşitli tipten diferansiyel denklemler olabilir. Bazan bunlara ilaveten basit cebirsel denklemler de işin içerisine girebilir.

2. Her diferansiyel denklem en yüksek derecesine göre çözülecek, sıra ile daha aşağı derecedeki ifadeler ve bağlı değişkenler denklem 13'deki işlem formunda yazılacak. Varsa cebirsel denklemler en uygun tarzda tanzim edilecek.

3. Gerekli ölçek faktörleri saptanarak işlem formundaki denklemler voltaj formunda düzenlenecek.

4. İşlem amplifikatörleri, R—C devreleri ve yardımcı elemanları kullanılarak, voltaj denklemlerine uyan devreler şematik olarak çizilecek, irtibatlar belirtilecek.

5. Hazırlanan devrelere ait devre denklemleri yazılacak. Bu denklemler, voltajlar, dirençler,

kapasitörler, potansiyometre ayar değerleri ve devre sabitleri cinsinden yazılmış olacak.

6. Fiziksel problemde değişkenlerin maksimum değerleri tahmin edilerek bunlarla ilgili ölçek faktörleri saptanacak.

7. 3 üncü ve 5 inci maddelerde belirtilen denklemler arasında analogi (benzetme) yaparak, devrede bulunabilecek sabit giriş voltajı, ilk sınır değer voltajları, direnç, kapasitör, potansiyometre ayar v.b. değerler saptanacak.

8. 7. maddede sağlanan değerler devre diyagramında ilgili semboller yanına yazılacaktır.

## LİTERATÜR

1. Goss, John, R.; Dvoracek, Marvin J. ve Morrison, Stanton R. 1963. Introduction to Engineering Methods College of Engineering University of California-Davis (Ders Teksiri)
2. James, M.L, Smith, G.M. ve Wolford, J.C. 1966. Analog-Computer Simulation International Text book Company.
3. Meier, HansPeter, (Tercüme, S. Palavan ve H. Öztepe) 1960. Elektronik Hesap Ootomatlarının Kullanılması. İstanbul Teknik Üniversite Matbaası.