

# İKİ EKLEMLİ DÜZLEMSEL BİR ROBOT KOLUNUN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONTROLÜ

Yılmaz KOÇAK<sup>1</sup> Şaban ERGÜN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Adana Meslek Yüksekokulu, 01330 Balcalı/ADANA

<sup>2</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş Meslek Yüksekokulu, KAHRAMANMARAS  
<sup>1</sup>ykocak@mail.cu.edu.tr

*Anahtar Kelimeler: Manipülâtör, Yapay Sinir Ağları, PD Kontrol, Geri Yayınım*

## ABSTRACT

In this paper, we controlled two link planar robot arm by using method of artificial neural networks. Robot arm is an articulated manipulator which one end is fixed to the base frame and the other end is free. Joint angles are based to control two degree of freedom planar manipulator. After expressing desired trajectory of robot desired torques, applied joints, are calculated by substituting desired trajectory into inverse dynamic equations. Neural Network is trained by comparing network's output and desired torque and using back propagation algorithm. In this work, proportional and derivative (PD) control algorithm will be used and results are shown graphically. The method of fourth order Runge-Kutta is used to solve differential equation All programs are prepared at Matlab [1].

## 1. GİRİŞ

Robot terimi ilk olarak 1921 yılında kullanılmış ve daha sonra robot, Amerikan Robot Enstitüsü tarafından "malzemeleri, parçaları, takımları hareket ettirmek ve taşımak için tasarlanmış programlanabilir çok fonksiyonlu bir manipülâtördür veya çeşitli özel işleri icra etmek için programlanmış hareketleri yapan özel cihazlardır," şeklinde tanımlanmıştır [2]. İnsan koluna benzeyen mafsallı robotik kol endüstride en fazla karşılaştığımız robot türüdür. Mafsallı robotik kol birbirlerine esnek eklemlerle bağlanmış rijid linklerden oluşan zincir olarak modellenilebilir. Linkler insanın gövdesi, üst kolu ve ön kolu özelliklerini taşınmasma karşılık, eklemler omuz, dirsek ve bilek özelliklerini taşır. Robotik kolun ucu ise tutucu veya el olarak adlandırılır. El genel olarak açılıp kapanabilen iki veya daha fazla parmak içerir

Mevcut robotlar kaynak yapma, boyama, malzeme taşınması, montaj, mayyene ve uzay uygulamaları gibi işlerde sıkça kullanılmaktadır.

Robotları sürücü teknolojisine göre, elektrik, pnömatik, hidrolik, çalışma bölgesinin geometrisine göre kartezyen, silindirik, küresel, scara, mafsallı ve hareket kontrol metodlarına göre de nokta-nokta ve sürekli yol kontrollü olarak sınıflandırabiliriz.

Bir robotu meydana getiren kısımlar aktuatör, iletilci, denetim bilgisayarı, el (uç birim), manipülâtör, güç kaynağı ve algılayıcıdır.

## 2. KİNEMATİK

Kinematik problem bilinen eklem konumlarına karşılık referans noktaya göre takım konumunu hesaplamak için tanımlanır. Bunun için eklem koordinatlarından takım koordinatlarına hem iletimsel hem de rotasyonel transformasyonu hesaplamak gerekir [3].

x-y düzleminde hareket eden iki eklemlili modelimiz için iletimsel ve rotasyonel transformasyonu tek bir matris şeklinde ifade etmemiz gerekir. Homojen transformasyon matrisi;

$$T = \begin{bmatrix} \text{Rotasyon} & ; & \text{Pozisyon} \\ \text{Matrisi} & ; & \text{Vektörü} \\ \text{-----} & & \text{-----} \\ \text{Perspektif} & ; & \text{Ölçekleme} \\ \text{Transformasyon} & ; & \text{Faktörü} \end{bmatrix} \quad (1)$$

formunda ifade edilir. x-y düzleminde hareket eden iki linkli modelimiz için transformasyon matrisi ise;

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. Referans eksene göre manipülâtörün takım eksenini tanımlamak için (2) bağıntısı kullanılabilir.

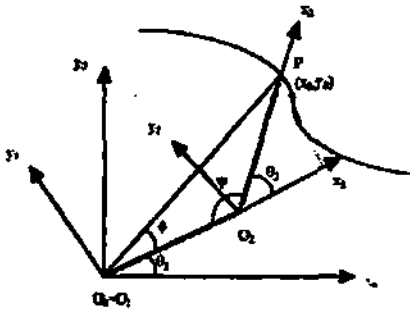
## 3. TERS KİNEMATİK

Ters kinematik problem için çözüm yollarından bir tanesi geometrik yaklaşım kullanarak sonucu elde etmektir. Şekil 1'de iki linkli dönele bir manipülâtör gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi  $O_0$  ve  $O_1$  koordinat merkezleri çıkışıktır. Manipülâtörün uç noktası,  $(x_0(t), y_0(t))$  parametrik gösterimle ifade edilen C eğrisi üzerinde hareket etsin.  $O_1O_2P$  üçlüsüne kosinüs teoremi uygulanarak;

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{r_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \quad (3)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y_0}{x_0} - \sin^{-1} \frac{L_2}{r_0} \sqrt{1 - \left( \frac{r_0^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right)^2} \quad (4)$$

eşitlikleri elde edilir. Böylece verilen uç nokta değerlerine karşılık eklem yer değiştirme ifadeleri elde edilmiş olur.



Şekil 1. İki linkli dönel manipülör

#### 4. LAGRANGE DİNAMİĞİ

Dinamik davranış eklem torakları ile ilgili olan manipülör konfigürasyonunun zamanla değişimi açısından tanımlanabilir. Bu ilişki eklem torakları girişlerine manipülörün dinamik cevabını ifade eden ve hareket denklemleri olarak da adlandırılan diferansiyel denklemlerle sistemleri ile ifade edilir. Hareket denklemlerini elde edebilmek için Newton-Euler Formülasyonu ve Lagrange Formülasyonu olmak üzere iki metod kullanılır.

Lagrange formülasyonu dinamik sistemin davranışını iş ve depolanan enerji açısından tanımlar. Sistemin içerdiği bağımlı kuvvetler otomatik olarak elimine edilirler. Kapalı form dinamik denklemler herhangi bir koordinat sisteminde sistematik olarak elde edilebilir.  $q_1, q_2, \dots, q_n$  dinamik sistem için genelleştirilmiş koordinatlar T toplam kinetik enerji, U ise dinamik sistemde depolanan potansiyel enerji olmak üzere Lagrange operatörü;

$$L(q_i, \dot{q}_i) = T - U \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Lagrange operatörü kullanılarak, sistemin hareket denklemleri ise;

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Kinetik enerji;

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_{ij} \cdot \dot{q}_i \cdot \dot{q}_j \quad (7)$$

$H_{ij}$ ,  $q_1, q_2, \dots, q_n$  nin fonksiyonudur ve manipülör eylemsizlik tensörüdür.

Elde ettiğimiz bu kinetik enerji denklemlerine ek olarak potansiyel denklemleri de elde etmemiz gerekir.

$$U = \sum_{i=1}^n m_i g^T r_{0,i} \quad (8)$$

Kinetik ve potansiyel enerji denklemlerini Lagrange denklemlerinde yazarsak;

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j - \sum_{i=1}^n m_i g^T r_{0,i} \quad (9)$$

(9) denklemlerinden yararlanarak;

$$H_{11} = m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(\theta_2)) + I_2$$

$$H_{12} = m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(\theta_2) + I_2$$

$$H_{21} = m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(\theta_2) + I_2$$

$$H_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$h_{111} = 0, h_{112} = -m_2 2l_1 l_{c2} \sin(\theta_2)$$

$$h_{121} = 0, h_{122} = -m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2)$$

$$h_{211} = m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2), h_{212} = -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2)$$

$$h_{221} = \frac{1}{2} m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2), h_{222} = 0$$

$$G_1 = -m_1 g l_{c1} \sin(\theta_1) + m_2 g l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) l_{c1} \cos(\theta_1)$$

$$G_2 = -m_1 g l_1 \sin(\theta_1) - 2m_1 g l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + m_2 g l_1 \cos(\theta_1)$$

$$H_{11} \ddot{\theta}_1 + H_{12} \ddot{\theta}_2 + h_{122} \dot{\theta}_2^2 + (h_{112} + h_{121}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + G_1 = \tau_1$$

$$H_{21} \ddot{\theta}_1 + H_{22} \ddot{\theta}_2 + h_{211} \dot{\theta}_1^2 + G_2 = \tau_2 \quad (10)$$

sonuç olarak elde edilen (10) eşitlikleri ( $\tau_1$  ve  $\tau_2$ ), iki linkli düzlemsel manipülörün dinamik hareket denklemlerini ifade eder.

#### 6. SINIR AĞLARI

En genel ifade ile bir sinir ağı fonksiyonları ve görevleri gerçekleştiren bir beyin görevi yapabilecek şekilde tasarlanmış bir makinedir. Genel olarak ağ, elektronik parçalardan oluşturulur ve bilgisayarda yazılımla simüle edilir. Buna göre uyumlu makine olarak sinir ağının tanımı ; "bir sinir ağı, deneysel bilgileri depolamaya meyilli paralel dağıtık işlemcidir" şeklinde tanımlanabilir [6].

##### 6.1. GERİ YAYINIM ALGORİTMASININ ELDE EDİLMESİ

n'nci iterasyonda j nöronunun çıkışındaki hata sinyali

$$e_j = d_j(n) - y_j(n) \quad (11)$$

ile ifade edilir. Bütün çıkış nöronlarının  $1/2e_j^2(n)$  değerlerinin toplamı;

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (12)$$

ile ifade edilir. Eğitilen N grupta bulunan bütün örneklerin sayısını gösterirse hata karelerinin ortalaması;

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e_j^2(n) \quad (13)$$

Verilen bir eğitim seti için  $E_{av}$ , eğitim setinin performans ölçüsü olarak maliyet fonksiyonunu ifade eder. Öğrenme işlevinin amacı,  $E_{av}$  değerini en aza indirmek için ağı serbest parametrelerini

düzenlemektir. Şekil 2'de gösterilen j nöronunun v<sub>j</sub> iç aktivite seviyesi;

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^p w_{ji}(n) y_i(n) \quad (14)$$

ile hesaplanır. Çıkışta görünen fonksiyon aşağıda verildiği gibidir.

$$y_j(n) = \phi_j(v_j(n)) \quad (15)$$

Geri-yayının algoritması, w<sub>ji</sub>(n) ağırlığına  $\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)}$  ile orantılı bir  $\Delta w_{ji}(n)$  düzeltme değeri uygular.

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = e_j(n) \phi_j'(v_j(n)) y_i(n) \quad (16)$$

$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)}$  ifadesi duyarlılık faktörü olarak bilinir.

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (17)$$

w<sub>ji</sub>(n)'e uygulanan  $\Delta w_{ji}(n)$  doğrultma değeri delta kuralı ile tanımlanır. Burada  $\eta$  geri-yayının algoritmasının öğrenme oranı parametresidir. (16) ve (17) eşitlikleri kullanılarak;

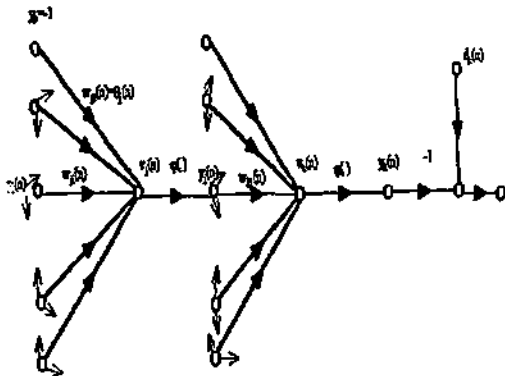
$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n) \quad (18)$$

elde edilir. Burada yerel eğim olarak adlandırılan  $\delta_j(n)$  delta fonksiyonu;

$$\delta_j(n) = e_j(n) \phi_j'(v_j(n)) \quad (19)$$

$\Delta w_{ji}(n)$  ve  $\delta_j(n)$  değerleri ilgili nöronun çıkış nöronu ve gizli nöron olmasına göre değişir. Delta fonksiyonu çıkış nöronu için (30), gizli nöron için (31) eşitliklerinde verildiği gibidir.

$$\delta_j(n) = \phi_j'(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (20)$$



Şekil 2. j gizli nörona bağlanmış k çıkış nöronunun işaret akış diyagramı

Geri yayının metodunda delta kuralının uygulanması iki evrede gerçekleşir. Birinci evrede girişler uygulanır ve her bir çıkış ünitesinin çıkışını hesaplamak için ağ üzerinde ileri doğru iletilir. Bu

çıkışlar beklenen çıkış değerleriyle karşılaştırılarak hata sinyali bulunur. İkinci evrede ise hata sinyali ağ üzerinde geriye doğru iletilerek ağırlıklar hesaplanır.

## 6.2. KONTROL SİSTEMLERİNDE SİNİR AĞLARI VE AKILLI KONTROL

Kontrol sistemlerinde en çok kullanılan sinir ağı tipi ileri beslemeli çok katmanlı ağ olarak adlandırılan ve işlevi esasında geri besleme bilgisi içermeyen ancak eğitim esnasında geri besleme içeren türdür. Kendisine sunulan giriş/çıkış ünitelerini öğrenmesi için ağ eğitilir ve burada genellikle denetimli öğrenme metodu kullanılır. Geri yayının algoritmaları eğitim esnasında ağı ağırlıkların düzenlemek için kullanılır, fakat bu algoritma yavaş çalışır ve işlem esnasında zaman kaybına sebep olur. Tek bir nöronun aktivasyon fonksiyonu olarak genellikle Sigmoidal fonksiyon kullanılmaktadır. Çevresini hissedebilme, belirsizlikleri azaltmak için bilgi işleme, planlama, kontrol aksiyonlarını çalıştırabilme ve üretebilme yeteneğine sahip olan sistemler akıllı kontrol sistemleri oluşturmaktadır. Kompleks sistemlerin kontrolündeki zorluklar en geniş ifadeyle üç kategoride incelenebilir. Karmaşıklık, sistemin doğrusal olmaması ve belirsizlik. Son zamanlardaki çalışmalar yapay sinir ağlarının bu zorlukların üstesinden gelebileceğini göstermiştir [8].

## 7. ROBOT KONTROLÜ

Manipülâtör kontrolünün zorluğu onun doğrusal olmayan karakteristiği ve bilinmeyen

$$H(\theta) \frac{d^2\theta}{dt^2} + V(\theta, \frac{d\theta}{dt}) \frac{d\theta}{dt} + G(\theta) = \tau \quad (21)$$

karakteristikleridir. Genelde mafsallı mekanizmaların özelde robot manipülâtörlerin dinamikleri eklemler arasında merkezci ve Coriolis kuvvetleri gibi doğrusal olmayan etkileri içerir. Bu bölümde daha önce anlatılan doğrusal olmayan kontrol metodu robot manipülâtörüne uygulanacaktır. Manipülâtörün hareket denklemi aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

Manipülâtörün sağladığı toplam tork ise;

$$\tau = H(\theta)u + \hat{V}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \hat{G}(\theta) \quad (22)$$

denkleminde ifade edilir, burada u kontrol giriş işaretidir ve PD kontrol algoritmasında,

$$u = \ddot{\theta}_d + K_p(\theta_d - \theta) + K_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\theta$  eklemlerin zamanla değişen açı vektörü,  $H(\theta)$  manipülâtörün simetrik ve tersi alınabilir eylemsizlik-kütle matrisi,  $V(\theta, d\theta/dt)$  merkezci ve Coriolis kuvvetleri,  $G(\theta)$  yerin çekim etkisinden doğan potansiyel enerji ve  $\tau$  ise aktuatör tarafından uygulanan eklemler tork vektörüdür

(21) denkleminde  $x_1 = \theta$  ve  $x_2 = d\theta/dt$  komularak durum denklemi (24) denkleminde belirtildiği gibi elde edilir.

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

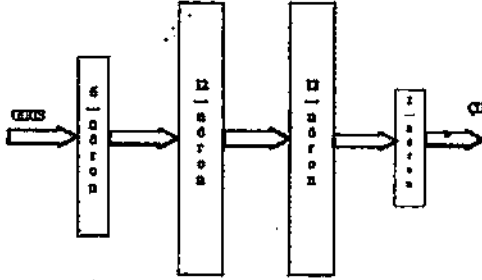
$$\frac{dx_2}{dt} = -H^{-1}(x_1)V(x_1, x_2)x_2 + H^{-1}(x_1)\tau - G(x_1)\tau \quad (24)$$

Bu denklem manipülâtörün hareket denkleminin durum uzay ifadesini belirtir. Simülasyonda kullandığımız manipülâtörün parametreleri Çizelge 1' de verilmiştir.

Çizelge 1: İki eklemlî düzlemsel manipülâtörün parametrik değerleri

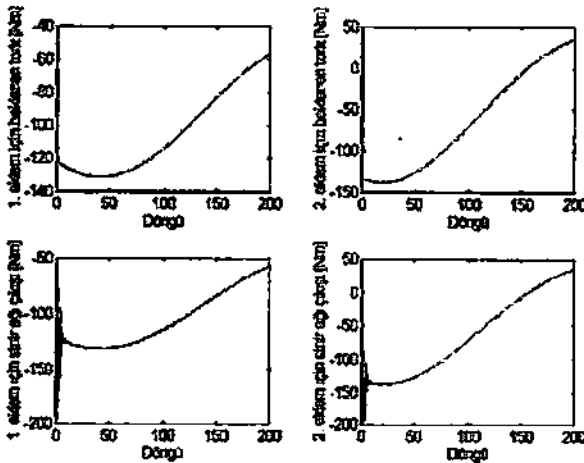
İki Eklemlî Robot		Linkler	
		Link 1	Link 2
Parametreler	Kütle $m_i$ (Kg)	10	8
	Atalet $I_i$ (Kg.m <sup>2</sup> )	0.15	0.14
	Uzunluk $l_i$ (m)	1	1

## 8. SİMÜLASYON SONUÇLARI

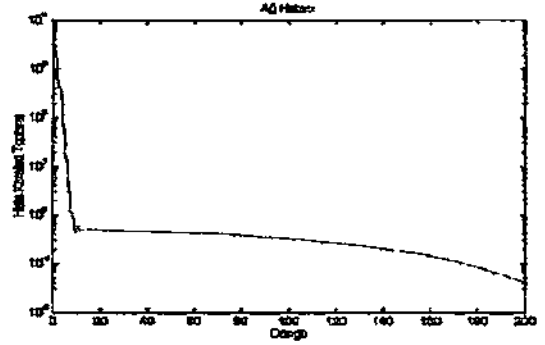


Şekil 3. İki gizli tabakaya sahip sinir ağının şematik yapısı

Denetimde kullanılan ve Şekil 3.'te gösterilen sinir ağı, giriş tabakasında 6, birinci ve ikinci gizli tabakada 12 ve çıkış tabakasında 2 nörona sahiptir. Sinir ağının girişine yörünge, hız ve ivme uygulamı, çıkışı ise robota uygulanacak torqları verir [1].

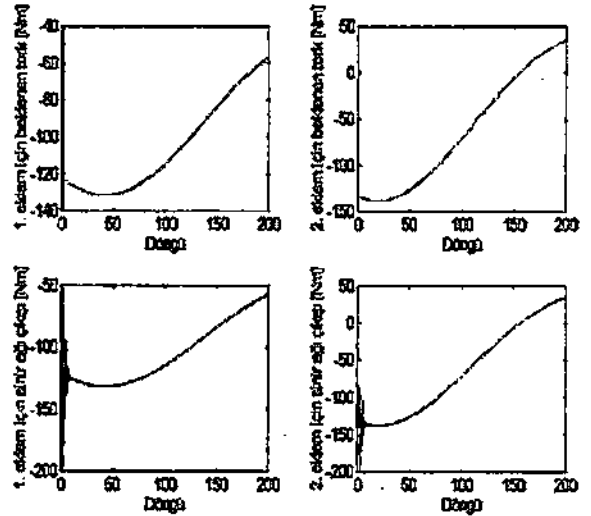


Şekil 4. Beklenen yörünge için sinüsoidal fonksiyon alınması durumunda torq grafikleri

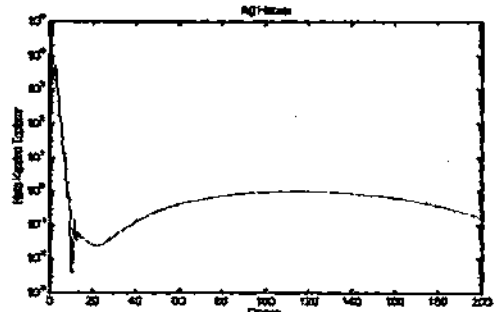


Şekil 5. Ağ Çıkış Hatası

( $\eta=0.1243$ , döngü sayısı=200, hata sınırı= $5.10^{-7}$ ,  $t=5$  s,  $q_{bek}=[\sin(\pi.t/5); \cos(\pi.t/5)]$ )

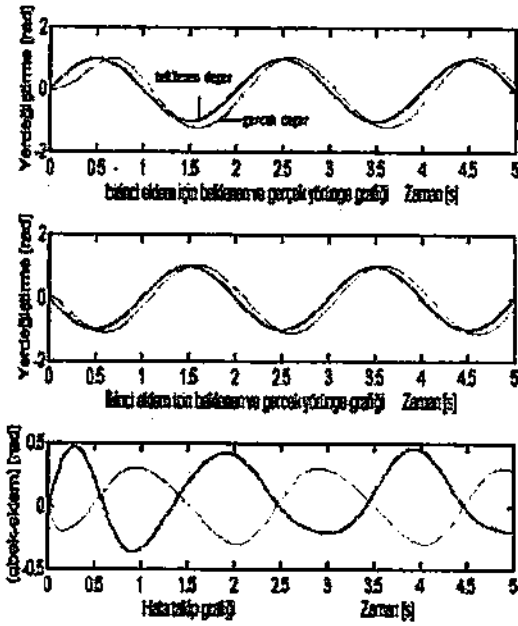


Şekil 6. Beklenen yörünge için doğrusal fonksiyon alınması durumunda torq grafikleri

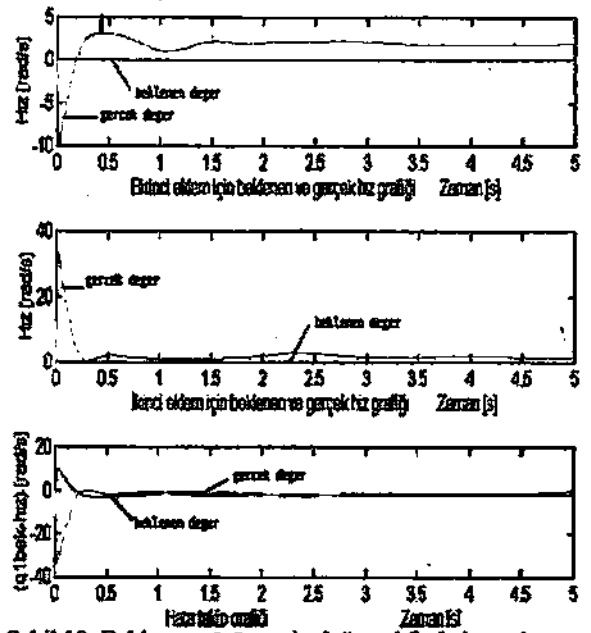


Şekil 7. Ağ Çıkış Hatası

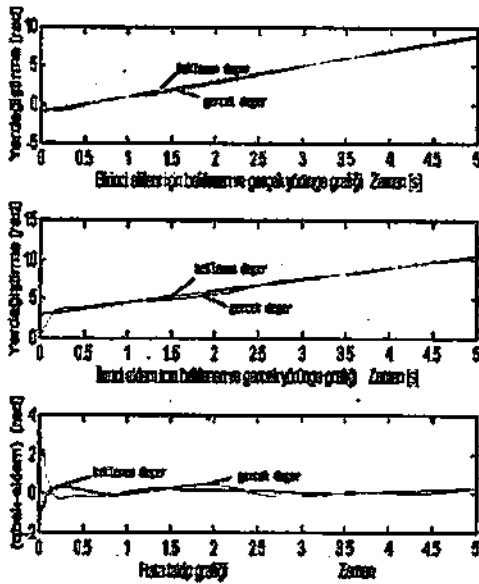
( $\eta=0.1247$ , döngü sayısı=200, hata sınırı= $1.10^{-6}$ ,  $t=5$  s,  $q_{bek}=[2.t+1; 0.5.t-5]$ )



Şekil 8. Beklenen yörüngenin sinüsoidal fonksiyon alınması durumunda beklenen ve gerçek yörünge grafikleri. ( $t_{son}=5s, f=150 Hz., kd=30^{\circ}eye(2), kp=1/4*kd^2, qbek=[\sin(\pi.t);-\sin(\pi.t)]$ )



Şekil 10. Beklenen yörüngenin doğrusal fonksiyon alınması durumunda beklenen ve gerçek hız grafikleri. ( $qbek=[2.t-1;1.5.t+3]$ )



Şekil 9. Beklenen yörüngenin doğrusal fonksiyon alınması durumunda beklenen ve gerçek yörünge grafikleri. ( $qbek=[2.t-1;1.5.t+3]$ )

## KAYNAKLAR

- [1] KOÇAK, Y.,1999, Robotik Uygulamalı Dinamik Sinir Ağları Kullanarak Akıllı Kontrol,Master Tezi, K.S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 112s.
- [2] NALBANT, M., 1997. Bilgisayarlı Bütünleşik Tasarım ve İmalat. Beta BasınYayın Dağıtım A. Ş., İstanbul, 882s.
- [3] ASADA, H., SLOTINE, J.J.E.,1986. Robot Analysis And Control. John Wiley and Sons Inc., New York, 266s.
- [4] BEKEY, G. A., 1992. Robotics and Neural Networks (B. KOSKO Editör). Neural Networks For Signal Processing, Prentice-Hall Inc.,New Jersey,339s.
- [5] CRAIG, J. J., 1989. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Addison-Wesley Publishing Company Inc.,Massachusetts, 450s.
- [6] HAYKIN, S., 1994. Neural Networks A Comprehension Foundation. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 696s.
- [7] ANTSAKLIS, P. J., 1992. Neural Networks in Control Systems. IEEE Control Systems Mag.,(vol. 12,no. 2),s.8-10.
- [8] NARENDRA, K., MUKHOPADHYAY, S., 1992. Intelligent Control Using Neural Network. IEEE Control Systems Mag.,(vol.12,no.2),s.11-18.