

# İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR ROBOT KOLU

Tuğrul Çavdar

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon 61080  
e-posta: ulduz@ktu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Robot kolu, Manipulatör, Sürücü devresi, Eklem modeli

## ABSTRACT

*In this work, two degree of freedom robot arm is designed, implemented, modelled and controlled. The mechanical arm, the computer software providing to control this arm, and the electrical interface circuits connecting the computer software to the arm are presented in details. After the structure of the arm is shown, the components of the circuit to drive the arm, the design parameters are investigated and it is given how the circuit works, then the user interface software is told. Additionally the phase and the gain graphics of the arm are obtained, afterwards the junction model is derived by using unit step response.*

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel otomasyon sistemlerinin önemli bir kısmı, gereken iş gücünün kesintisiz olarak sağlanabildiği programlanabilir mekanik düzeneklerdir. Robotlar kalifiye bir işçinin sağlayabileceği hassasiyetteki iş gücünü daha yüksek bir hızda üretebilmektedir. Robot teknolojisinin endüstride kullanımı giderek yaygınlaşmakta ve günümüzde robotlar laboratuvar uygulamalarından uzay çalışmalarına, endüstriden hizmet sektörüne kadar pek çok alanda kullanılmaktadır [1].

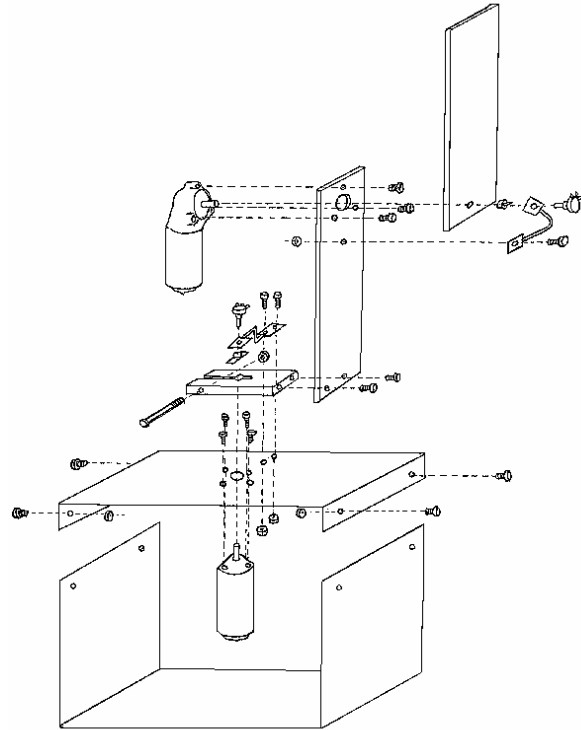
Bu çalışmada da iki serbestlik dereceli prototip bir robot kolu gerçekleştirilmiştir. Serbestlik derecesi iki olmasına rağmen, gerek sürücü devresi, gerekse arayüz yazılımı çok daha fazla serbestlik derecesini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır.

## 2. KOLUN YAPISI

### 2.1. MANİPULATÖR

Kolun genel yapısı Şekil 1’ de verilmiştir. Eklemlerde algılayıcı olarak potansiyometreler kullanılmıştır. Eklemlerdeki motorlar ise 12 V’luk sürekli mıknatıslı DC servomotorlardır. Kullanılan motorların devirleri 416.666 derece/s’dir. Şekil 1’den de izlenebildiği gibi alt eklemdaki motor, mili yukarıya doğru olacak şekilde dik yerleştirilmiştir ve bu motoru iki link takip etmektedir. Üst eklemdaki motor ise mili yana yatık olacak şekilde yerleştirilmiş ve bu motoru sadece bir link takip etmektedir. Aslında kol çalışmanın başında dört serbestlik dereceli tasarlanmış, fakat istenilen özelliklere sahip motorlar

(mili köşeli veya yarım ay şeklinde adım motorları) ekonomik sebeplerden dolayı bulunamadığı için iki serbestlik dereceli olarak gerçekleştirilmiştir. Eklemlerde artımlı kodlayıcı yerine potansiyometrenin kullanılma sebebi de yine aynıdır. Linkler, hafif olması ve atalet momentini azaltması amacıyla alüminyumdan yapılmıştır. Taban ise demirden imal edilmiştir.



Şekil-1. Gerçekleştirilen İki Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Monte Edilmemiş Hali

### 2.2. ELEKTRONİK DONANIM

Gerçekleştirilen donanım, robot kolunun kullanıcı tarafından kontrol edilmesini sağlayan bilgisayar programı ile mekanik kol arasında bir arayüz görevi yapmaktadır. Bir çok modülden oluşmaktadır. Bunlar veri edinim kartı, güç kaynağı, motor sürücü devreleri, toplayıcılar, örnek/tut devreleridir. Veri edinim kartı dışındaki tüm donanım yazar tarafından tasarlanmıştır. Veri edinim kartında yine yazar tarafından bazı modifikasyonlar yapılmıştır.

## 2.2.1. VERİ EDİNİM KARTI

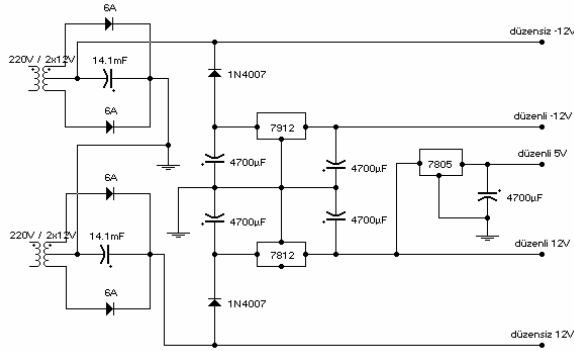
Kullanılan veri edinim kartı 12 bitlik çözünürlüğe sahip olup 16 tane analog/sayısal kanalı ve bir tane de sayısal/analog kanalı mevcuttur. Kartın özellikleri kısaca şöyle sıralanabilir.

Sayısal/Analog: 12 bitlik kanal desteği; çıkış gerilimi tek kutuplu modda 0V - 9V arasında, çift kutuplu durumda -9V - 9V arasında; setleme zamanı 500ns; Nonlinearite % 0.2.

Analog/Sayısal: 16 tane 12 bitlik kanal desteği; giriş gerilimi tek kutuplu modda 0V - 9V arasında, çift kutuplu durumda -9V - 9V arasında; başarılı yaklaşım (successive approximation) yöntemi; dönüşüm zamanı 60  $\mu$ s.

## 2.2.2. GÜÇ KAYNAĞI

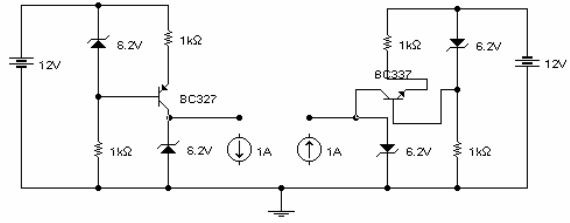
Güç kaynağı düzensiz +12 V ve -12 V, ve düzenli +12 V, -12 V ve +5 V verecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan güç kaynağının devre şeması Şekil 2'de verilmiştir. Düzensiz +12 V ve -12 V motor sürücüsü devresini beslemek için, düzenli +12 V ve -12 V ise devredeki işlemsel yükselteçleri ve örnekle/tut devrelerini beslemek için, +5 V da devredeki TTL elemanları beslemek için kullanılmıştır. Güç kaynağının bazı parametreleri deneysel yollarla ölçülmüştür. Bunlar: Açık devre gerilimi: +16.25 V ve -16.25 V, kısadevre akımı: 5.6 A, iç direnci: 2  $\Omega$ ,  $R_{yük}=160 \Omega$  iken kaynak gerilimi: +15.25 V ve -15.25 V,  $R_{yük}=5.1 \Omega$  iken kaynak gerilimi: 11.5 V ve -11.5 V.



Şekil-2. Güç Kaynağı

Motor sürücü devresinde kazanç çok yüksek olduğundan dolayı besleme gerilimindeki en ufak değişimler sistemin çalışmasını kararsızlığa sürüklemektedir. Bundan dolayı güç kaynağındaki 7812, 7912 ve 7805 gibi düzenleyicilerin hem girişine hem de çıkışına 4700  $\mu$ F'lık kondansatörler yerleştirilmiştir; ayrıca transformatör çıkışlarındaki tam doğrultucuların çıkışlarına da üçer tane 4700  $\mu$ F'lık kondansatörler paralel bağlanmıştır. Ayrıca düzenleyicilerden ters yönde akım akma ihtimaline karşı düzenleyicilerin girişlerine diyotlar konulmuştur.

Transformatör çıkışlarındaki tam doğrultucularda ise 6 A'lık diyotlar kullanılmıştır.



Şekil-3. İki Yönlü Akım Kaynağı

Motor sürücü devresindeki transistörlerin anahtarlama anlarında, eklemlerde algılayıcı görevi gören potansiyometrelerin uçlarındaki gerilimlerde 1 V'a kadar gerilim düşümü görülmesi üzerine, potansiyometreleri beslemek için, güç kaynağında kullanılmak üzere Şekil 3'teki akım kaynağı tasarlanmıştır. Burada 12 V Zener diyotu tıkamaya sokar. Zener diyotun uçlarındaki 6.2 V, transistörün baz-emetör arasına uygulandığından transistör hep iletimde kalır ve baz-emetör gerilimi sabit olduğundan transistörün emetör akımı da sabittir. Transistörün kollektöründe başka bir Zener diyot bulunduğundan transistörün kollektör akımı dışarıya doğru akar. Bu Zener diyot aynı zamanda tıkamada kalarak çıkıştaki gerilimin de sabit kalmasını sağlar.

## 2.2.3. ROBOT SÜRÜCÜ DEVRESİ

Robot sürücü devresi bilgisayardan gelen, istenilen konum bilgisini robota iletir ve robotun istenilen noktada durmasını sağlar. Bilgisayar tarafındaki veri edinim kartında sadece bir sayısal/analog kanal olduğu daha önce söylenmiştir. Buradaki iki eklemdaki motoru bu tek kanalla kontrol etmek için örnekle/tut devreleri kullanılmıştır.

Devrede olabilecek olası aşırı gerilimlere karşı bilgisayara herhangi bir zarar gelmemesi için tamponlar kullanılmıştır. Analog tampon olarak gerilim takipçisi, sayısal tampon olarak AND kapısı kullanılmıştır. Konum ve hata bilgileri veri edinim kartına gitmekte veya gelmekte, kod çözücüye giden kod ise paralel bağlantı noktasından gelmektedir. Burada kod çözücü amacıyla 74139 kullanılmıştır. Tasarlanan devrenin açık hali Şekil 4'te verilmiştir.  $A_1A_0$  kodu 00 gönderildiğinde üstteki eklem seçilecek ve üstteki motora ilişkin örnekle/tut devresi aktif hale getirilecek ve o anda veri edinim kartından gelen sayısal/analog çıkışı örnekleyecek, tutacak ve bunu üst motora uygulayacaktır; daha sonra  $A_1A_0$  kodu 01 gönderildiğinde alttaki eklem seçilecek ve alttaki motora ilişkin örnekle/tut devresi aktif hale getirilecek ve o anda veri edinim kartından gelen sayısal/analog çıkışı örnekleyecek, tutacak ve bunu alt motora uygulayacaktır. O sırada üst motora ilişkin örnekle/tut devresi eski gerilimi hala üst motora uygulamaktadır. Paralel bağlantı noktasından hangisinin kodu gönderiliyorsa ona ait konum bilgisi gönderilmektedir.

Robot sürücü devresinin bilgisayarla haberleşmesinde kullandığı bağlantı noktasının pin yapısı Tablo 1’ de verilmiştir.

Devrede örnekle/tut devresi olarak *LF398* kullanılmıştır. 6 nolu ucuna bağlanan kondansatör girişindeki işareti örneklemeden sonra dolarak çıkışın, giriş gerilimi değişse bile o gerilimde kalmasını sağlamaktadır. 8 nolu ucuna lojik seviyeler uygulanmaktadır. 1 iken örnekler, 0 iken tutar.

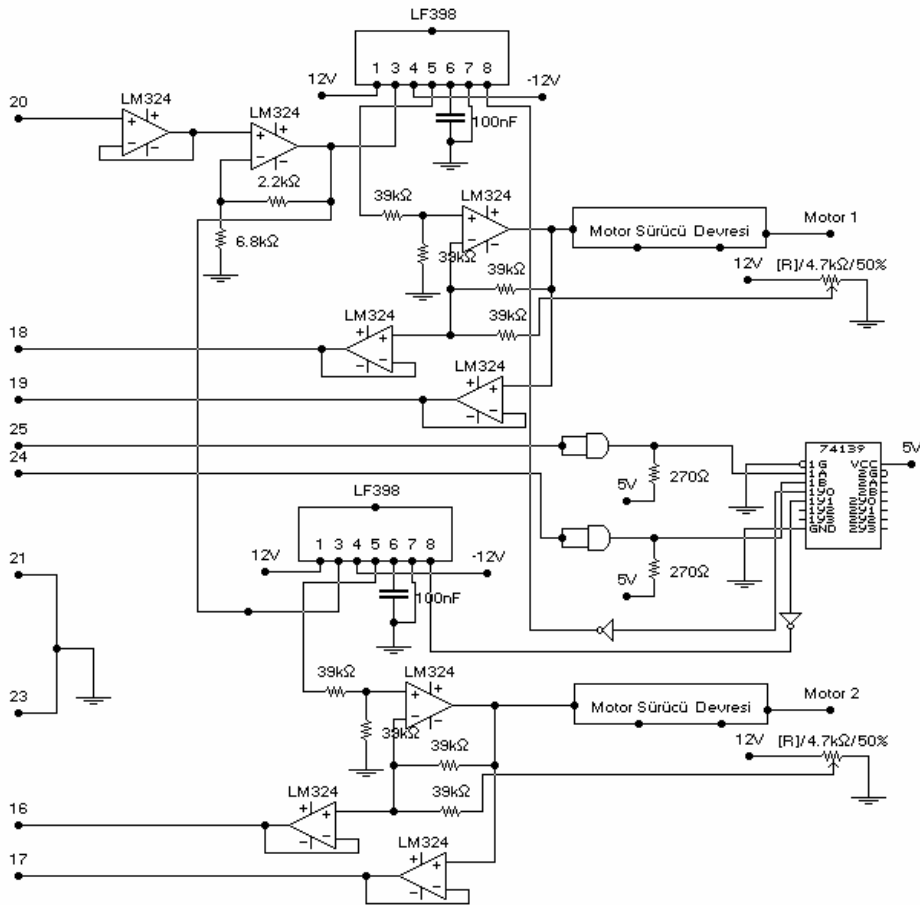
Robot sürücü devresinde referans gerilimden, eklemde algılayıcı olarak bulunan potansiyometreden gelen o anki konum bilgisi çıkarılarak hata gerilimi elde edilir. Fakat bu hata gerilimi doğrudan motora verilmez, ilk önce motor sürücü devresine verilir.

Motor sürücü devresinde hata işareti belli bir kazançla yükseltilir. Daha sonra motorlar yüksek akımla çalıştılarından dolayı üç transistörlü bir Darlington devresinden geçirilir. Tasarlanan motor sürücü devresi Şekil 5’de verilmiştir.

Devredeki işlemsel yükselticinin kazancı görüldüğü gibi 11’ dir. İşlemsel yükselticinin geri beslemesi, Darlington devresini de kazanç devresine katmak için çıkışından değil de motordan alınmaktadır. 0.8 A kollektör akımı olan *BC* transistörler, 1.5 A kollektör akımı olan *BD* transistörleri, onlar da 15 A kollektör akımı olan *2N* transistörleri sürmektedir. Bu sürücü devre 1 MHz’ e kadar verimli sonuç verebilmektedir.

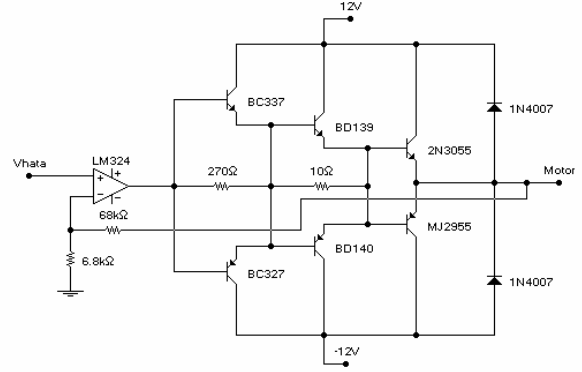
Tablo-1. Robot sürücü devresi bağlantı noktasının pin yapısı

Pin	İşlev	Pin	İşlev	Pin	İşlev
16	A/D kanal 12 - Motor <sub>2</sub> konum	19	A/D kanal 12 - Motor <sub>1</sub> hata	23	Toprak
17	A/D kanal 13 - Motor <sub>2</sub> hata	20	D/A kanal	24	A <sub>1</sub>
18	A/D kanal 14 - Motor <sub>1</sub> konum	21	Toprak	25	A <sub>0</sub>

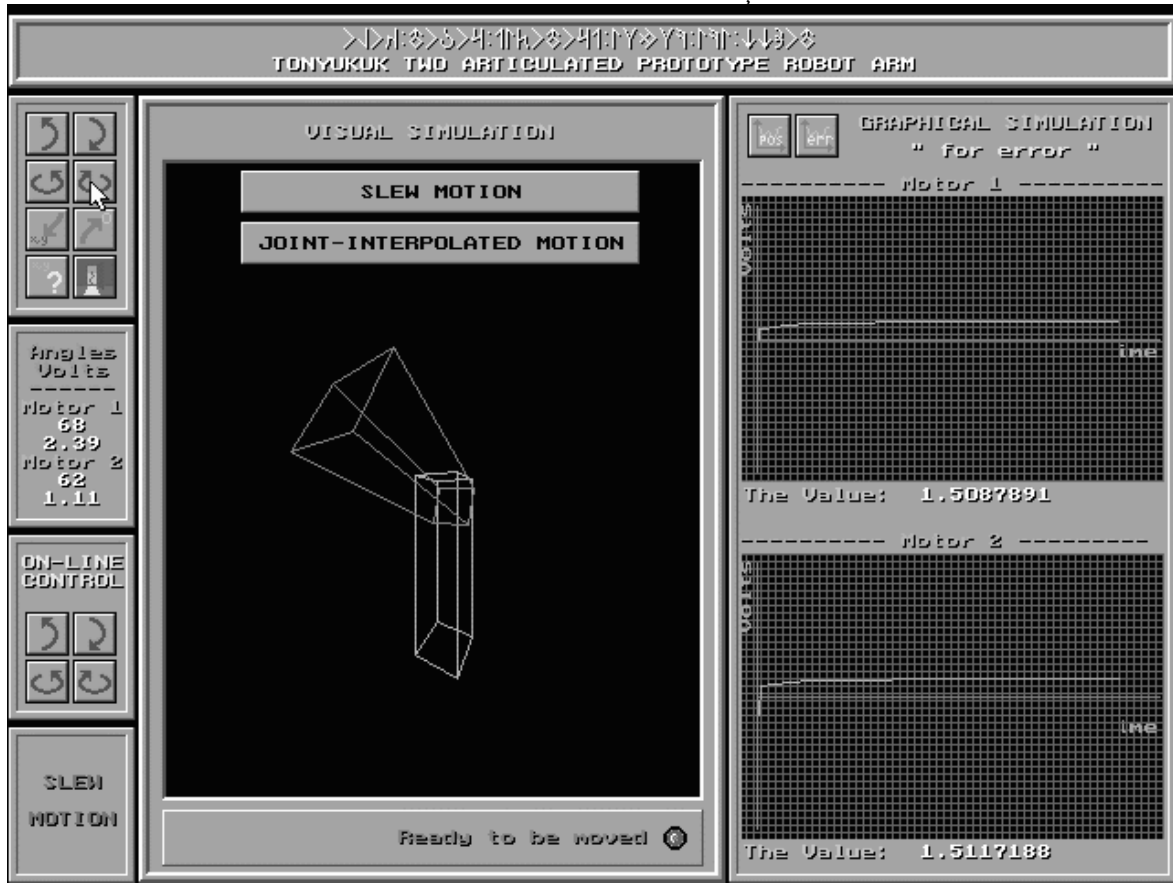


Şekil-4. Robot Sürücü Devresi

Sistemin kazanç devresine türev devresinin eklenmemesinin sebebi, geçici durumda hatayı sifira indirmesine karşın bunun sürekli zamandaki hatanın artmasına sebep olması ve oturma zamanının uzamasıdır. İntegral devresinin eklenmemesinin sebebi ise sürekli zamanda hatayı sifira indirmek için oturma zamanını uzatmasıdır. Burada optimizasyon en kısa zamanda konumlanma üzerine yapılmıştır. Oransal kontrol devresinde kazanç istenilen değere ayarlanarak sistem kompanze edilmiştir.



Şekil-5. Motor Sürücü Devresi



Şekil-6. Kullanıcı Arayüz Programından Genel bir Görünüm

## 2.3. YAZILIM

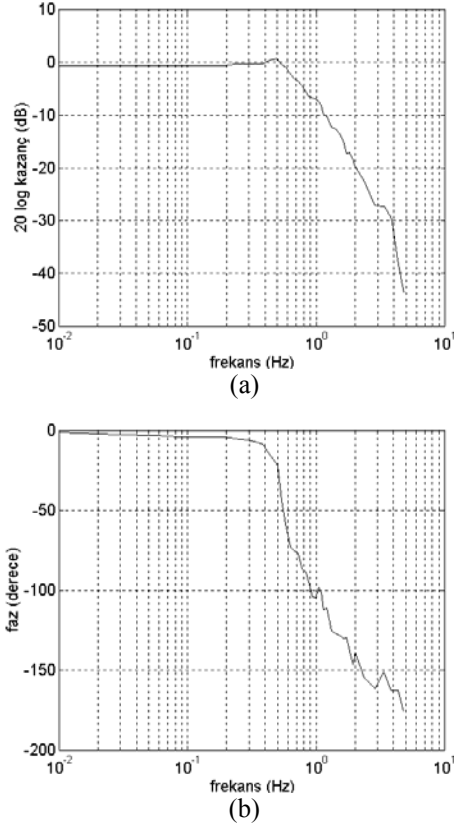
Robot kolunu kontrol etmek için kullanılan bilgisayar programı denetim, grafik ve canlandırma olmak üzere üç ana modülden oluşur. Programın denetim kısmında robot ister online kontrol edilebilir, istenirse de robotun gitmesi istenilen koordinat doğrudan verilerek kolun oraya gitmesi sağlanabilir. Ekranda robotun o anki konumu sabit kalmak üzere sanal görüntüsü, gitmesi istenilen konuma getirilirken, her iki eklem motoru için ayrı ayrı uygulanması gereken gerilimler hesaplanır. Hareket emri verildiğinde de bu gerilimler giriş/çıkış'a yolların. Canlandırma kısmında ise kolun üç boyutlu görüntüsü gerçek zamanlı olarak çizilmektedir. Bu çizim, kinematik

hesaplamalar sonucu değil, mekanik kol hareket ederken, eklemlerde bulunan algılayıcılardan gelen işaretlere göre gerçekleştirilir. Yani robot kolu görülmeyecek bir yerde olsa bile ekrandaki şekil bize gerçek konumunu gösterecek ve yanlışlamayı önleyecektir. Programın grafik kısmında ise her iki eklemdaki algılayıcılardan gelen konum bilgileri ve hata bilgileri grafik olarak ekranda çizilir. Programın genel bir görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir.

### 3. KOLUN MODELİ

#### 3.1. FAZ VE KAZANÇ EĞRİLERİ

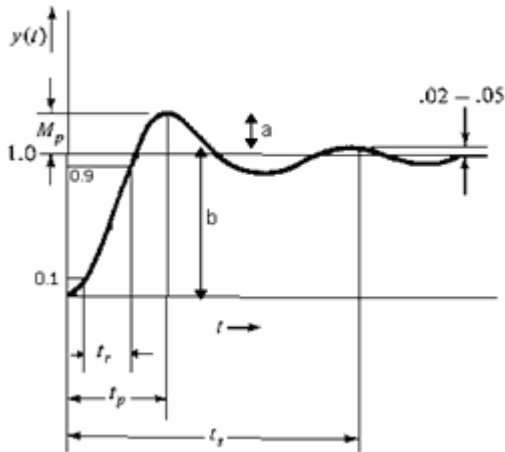
Bir eklem için kapalı çevrim içerisinde, çıkışta yük yokken kazanç ve faz farkının frekansa göre değişimi deneysel olarak ölçülmüş ve grafiksel olarak Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil-7. Motor Sürücü Devresinin (a) Genlik ve (b) Fazının Frekansa göre Değişimi

#### 3.2. TRANSFER İŞLEVİ

Burada eklem birim basamak işareti uygulanmış, Şekil 8'deki gibi alınacak cevabından elde edilen parametrelerle eklem transfer işlevi çıkartılmıştır.



Şekil-8. Birim Basamak Cevabı

$\omega_n$  sistemin doğal frekansı olmak üzere, maksimum cevap

$$M_p = \frac{a}{b} \quad (1)$$

olur ve sönüm katsayısı [2]

$$\xi = \frac{\left| \frac{\ln M_p}{\sqrt{\pi^2 + (\ln M_p)^2}} \right|}{\sqrt{\pi^2 + (\ln M_p)^2}} \quad (2)$$

ve çıkış işaretinin maksimum olduğu süre

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (3)$$

çıkış işaretinin kararlı duruma ulaştığı süre yani oturma zamanı

$$\frac{3}{\omega_n \xi} \leq t_s \leq \frac{4}{\omega_n \xi} \quad (4)$$

olmalıdır. Bu durumda sistemin transfer işlevi,  $\xi < 1$  için [3]

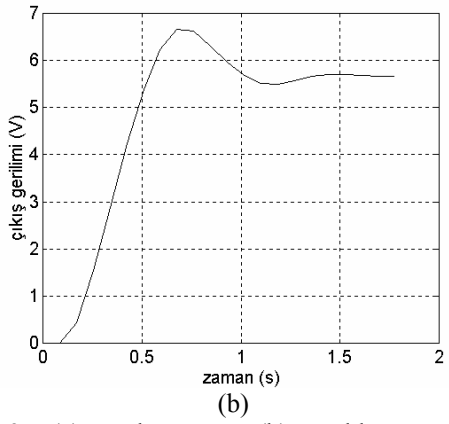
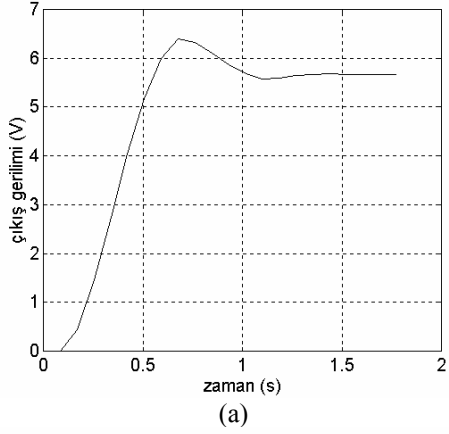
$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

Kolun bir eklemının, hem yüksüz hem de yükte iken transfer işlevlerini çıkarmak üzere, eklem 5.67 V'luk birim basamak işareti uygulandığında Tablo 2'deki değerler bulunmuştur.

Tablo 2. Kolun ölçülen ( $t_r$ ,  $t_s$ ,  $t_p$ ) ve hesaplanan ( $M_p$ ,  $\xi$ ,  $\omega_n$ ,  $T(s)$ ) parametreleri

	Yüksüz	Yükte
$t_r$	757 ms	685 ms
$t_p$	970 ms	1.08 s
$t_s$	1.27 s	1.47 s
$M_p$	0.1287478	0.1816578
$\xi$	0.54646	0.4771338
$\omega_n$	3.867243 Hz	3.309946 Hz
$T(s)$	$\frac{14.955568}{s^2 + 4.2266s + 14.955568}$	$\frac{10.955743}{s^2 + 3.15857s + 10.955743}$

Sistemin yükte ve yüksüz modeli çıkarılırken, her iki modelde de sönüm katsayısının birden küçük çıktığı görülmüştür. Dolayısıyla her iki durumda da sistem az sönümlü sistem gibi davranır. Yüksüz durumda teorik olarak bulunan  $f_n$  doğal frekans (0.6155 Hz) pratikte bulunan doğal frekansa çok yakındır. Sisteme yük eklendiğinde yükün atalet momentinin etkisinden dolayı sönüm katsayısı 0.54646' dan 0.4771338' e ve doğal frekans da 0.6155 Hz'den 0.52679 Hz'e düşmüştür. Yüksüz ve yüklü sisteme aynı birim basamak işareti uygulanmasına rağmen yüklü olduğu zamanki aşımı (1.03 V), yüksüz olduğu zamanki aşımından (0.73 V) beklendiği gibi daha büyüktür. Elde edilen modellerin birim basamak cevapları Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil-9. (a) Yüksüz ve (b) Yüklü Durumdaki Modellerin Birim Basamak Cevapları

#### 4. SONUÇLAR

Sonuçta iki serbestlik dereceli bir robot kolu tasarlanmış, gerçekleştirilmiş, kontrol edilmiş, modellenmiştir. Teorik çalışmalar pratik çalışmalarla desteklenmiştir. Bunlar yapılırken bilgisayar grafiklerinden, kinematikten, kontrol sistemlerinden, makine ve elektronik bilgilerinden faydalanılmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] Groover M P, Weiss M, Nagel R N, Odrey N G, "Industrial Robotics: Technology, Programming and Application", McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1986.
- [2] Asfahl C R, "Robots and Manufacturing Automation", 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
- [3] Luh J Y S, "Conventional Controller Design for Industrial Robots – A Tutorial", IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Volume: SMC-13, No: 3, May/June 1983.