



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ULTRASONİK MOTOR'UN MODELLENMESİ VE BİLGİSYAR DESTEKLİ KONTROLÜ

EBUZER AYGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doc. Dr. M. Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2015



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ULTRASONİK MOTOR'UN MODELLENMESİ VE BİLGİSYAR DESTEKLİ KONTROLÜ

EBUZER AYGÜL

526213703

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doc. Dr. M. Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2015

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Ebuzer AYGÜL'ün "Ultrasonik motorun modellemesi ve bilgisayar destekli kontrolü" başlıklı tez çalışması, 7 Eylül 2015 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. M. Caner AKÜNER (Danışman)
Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Nihat AKKUŞ (Üye)
Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Engin HÜNER (Üye)
Kırklareli Üniversitesi

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/09/2015 tarih ve 2015/21-02 sayılı kararı ile Ebuzer AYGÜL'ün Mekatronik Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Ugur YAHŞI




TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca beni yalnız bırakmayan, çalışmaya teşvik eden, rehberlik ve zamanımı esirgemedi bana yardımcı olan ve yol gösteren değerli tez danışmanım Sayın Doc. Dr. M.Caner AKÜNER' e,

Laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, sorularımı sabırla dinleyip yol gösteren Sayın Uğur Demir'e,

Her konuda sabırla yanımda olan ve benden desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma,

Teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (BAPKO) tarafından FEN-C-YLP proje kapsamında desteklenmiştir.

Temuz , 2015

Ebuzer AYGÜL

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vi
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Ultrasonik Motor Çalışmaları	2
1.2 Ultrasonik (Piezo) Motor Özellikleri.....	3
1.3 Piezo Motor Çalışma Prensibi	4
1.3.1 Piezo Motor Sürücüsü PMD101	4
1.3.2 Motor Sürme Prensibi	5
1.4 Ultrasonik (Piezo) Motor Çeşitleri	6
1.5 Ultrasonikmotor'un Yapısal Karşılaştırılması	9
1.5.1 Duran dalga USM	9
1.3 Yürüyen dalga USM	9
2 PİEZO MOTOR DEVRE ANALİZİ	10
2.1 Piezo Motor Eşdeğer Devresi.....	10
2.1.1 Eşdeğer Devre Elemanları	11
2.1.2 Eşdeğer Kapasitans.....	11
2.1.3 Eşdeğer Endüktans	12
2.1.4 USM'nin Tam Eşdeğer Devresi	12
2.2 Piezo Motor Deneysel Performans Değerleri.....	15
2.2.1 Frekans ve Tork'a Bağlı Performans Değerleri	15
2.2.2 Piezomotor İleri ve Geri Yön Microstep Performans Değerleri.....	16
2.2.3 Piezomotor İleri Yön Microstep Performans Değerleri	17
2.2.4 Piezomotor Hedef Performans Değerleri	18

<u>2.3</u>	<u>Piezo Motor Eşdeğer Devre Parametrelerinin Tahminleme Yöntemi İle Bulunması Ve Matlab Simscape Modelinin Elde Edilmesi.....</u>	<u>18</u>
<u>2.4</u>	<u>Piezo Motor Kontrol Sistem Uygulaması</u>	<u>29</u>
2.4.1	Sistemin Transfer Fonksiyonu	29
2.4.2	Bode Eğrisi	29
<u>2.5</u>	<u>Piezo Motorun Modellenmesi ve Kontrolü</u>	<u>30</u>
2.5.1	Sistem Tanımlama Tekniği ile Uygun Transfer Fonksiyon Değerinin Araştırılması	30
2.5.2	Kontrol ve Tahmin Programı (SISOTOOL)	34
2.5.3	Piezo Motor'un Kontrol Sistem Tasarımı Ortamında Modellenmesi ve Kontrolü	36
<u>2.6</u>	<u>Piezo Motor iYapay Sinir Ağı Uygulaması</u>	<u>42</u>
<u>2.7</u>	<u>Piezomotorun Uyarlanabilir Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile Kontrolü</u>	<u>45</u>
<u>3.</u>	<u>DENEYSEL SONUÇLAR</u>	<u>54</u>
<u>4.</u>	<u>SONUÇLAR.....</u>	<u>56</u>
<u>KAYNAKLAR.....</u>		<u>57</u>
<u>EKLER.....</u>		<u>59</u>
<u>ÖZGEÇMİŞ.....</u>		<u>60</u>

ÖZET

ULTRASONİK MOTOR MODELLENMESİ VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ KONTROLÜ

Günümüzde endüstrideki gelişmeler, teknolojinin hızla ilerlemesi ve çeşitli gereklilikler nedeni ile farklı çalışma prensibine sahip elektrik motorları gereksinimini hızla artırmıştır. Motorların yüksek hız, yüksek moment, düşük ağırlık, düşük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Ayrıca malzeme bilimindeki gelişmeler ve yarı iletken teknolojisinin gelişmesi motor performanslarına doğrudan etki etmiş ve yeni tür motorların yapılmasına olanak sağlamıştır. Bunlardan biride piezoelektrik ultrasonik motordur. Bu çalışmada son yıllarda otomotiv, robot, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, uzay uygulamaları, mikro konumlama tablaları gibi konularda uygulama sahası bulan piezoelektrik malzemelerden yapılmış ultrasonik motorun yapısı, uygulama alanları, diğer motorlara göre avantajları ve çalışma prensibi hakkında yapılmış olan akademik çalışmalardan derlenmiş bilgiler sunularak ultrasonik motorların çok geniş bir alanda kullanılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca piezomotor firmasının üretmiş olduğu LR 17 piezo motor temel alınarak matlab sistem tanımlama tekniği yardımıyla bir motor modeli geliştirilmiş motorun yapay sinir ağı modeli, uyarlanabilir ağ yapılı bulanık çıkarım sistem modeli ve simscape modeli başarılı bir şekilde oluşturulmuştur.

ABSTRACT

ULTRASONIC MOTOR MODELLING AND COMPUTER AIDED CONTROL

Today, due to the rapid advancements in industry, technology and different other requirements; the need to have an electric motor with different operating principle has become very important. The requirement of a high speed, high torque, low weight, low size and durable motor has increased. In addition, advancements in the fields of Material sciences and Semiconductor technology have a direct impact on the performance of motor and have paved the way for the construction of a new type of motor. One of them is Ultrasonic piezo-electric motor. In this paper the information, which is taken from the different published works, regarding the construction, application, advantages and disadvantages in comparison with other motors, and working principle of the piezo-electric motor has been presented. Piezo-electric motor is being used in the field of robotics, space applications, automotive, inkjet printers and in different other fields which shows that it has a very wide range of application. Also LR 17 rotary piezomotor which was produced by the piezomotor company based on all in all studies. With the help of matlab system identification tool a motor model was developed successfully also neural network model, anfis model and matlab simscape model.

SEMBOLLER

x	:Piezobacak sapma miktarı
y	:Piezobacak uzama miktarı
d	:Piezoelektrik jarj sabiti
L	:Bacak uzunluğu
D	:Bacanın yarıcap genişliği
t	:Piezoelektrik tabaka sertlik sabiti
u_1	:Sürücü voltajı
F	:Mekanik bölümde uygulanan kuvvet
v	:Mekanik terminallerdeki hız
A	:Kuvvet faktörü
V	:Uygulanan voltaj
I	:Devrenin akımı
Z	:Seramik malzeme empedansı
Y_d	:Blokaj admiktansı
K	:Yay sabiti
ω	:Açışla hız
R	:Toplam direnç
Y_m	:Hareket admiktansı
A_i	:Düğüm fonksiyonu
O_i^1	:Düğüm çıkışı üyelik fonksiyonu
$mf 1$:Üyelik fonksiyonları

KISALTMALAR

USM	:Ultrasonik Motor
ANFIS	:Uyarlanabilir Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Ünitesi
MSE	:Ortalama Karesel Hata
TF	:Transfer Fonksiyonu
AIC	:Akaike Bilgi Kriteri
SBC	:Schwartz Bayesion Kriteri
SISOTOOL	:Kontrol Sistem Tasarımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.3.1. :Piezo motor

Şekil 1.3.1.1. :PMD101 piezo motor sürücüsü

Şekil 1.3.2.1. :Piezobacak çalışma prensib

Şekil 1.4.1. :Duran dalga usm

Şekil 1.4.2. :Doğrusal çalışan duran dalga usm

Şekil 1.4.3. :Döner çalışan duran dalga usm

Şekil 1.4.4. :Yürüyen dalga tipi usm

Şekil 1.4.5. :Doğrusal çalışan Yürüyen dalga usm

Şekil 1.4.6. :Döner çalışan yürüyen dalga usm

Şekil 2.1.1. :Eşdeğer devre

Şekil 2.1.3.1. :Eşdeğer endüktans devresi

Şekil 2.1.4.1. :Tam eşdeğer devre

Şekil 2.2.1.1. :Piezo motor deney düzeneği

Şekil 2.2.2.1. :250 (Hz) piezo motor performans değeri

Şekil 2.2.2.2. :2500(Hz) piezo motor performans değeri

Şekil 2.2.3.1. :1 dalga periyodu için kapalı çevrim performans değeri

Şekil 2.2.3.2. :1 dalga periyodu için açık çevrim performans değeri

Şekil 2.2.4.1. :250 encoder hedef değeri için piezo motor performansı

Şekil 2.2.4.2. :2500 encoder hedef değeri için piezo motor performansı

Şekil 2.3.1. :Piezo motor eşdeğer devresi

Şekil 2.3.2. :Frekansa bağlı Açısal hız değerleri

Şekil 2.3.3. :Zaman tabanlı sistem girdi ve çıktı değerleri

- Şekil 2.3.4.** :Sistem tanımlama tekniği frekans fonksiyon cevabı
- Şekil 2.3.5.** :Elektromanyetik dönüştürücü
- Şekil 2.3.6.** :Piezo motor simscape modeli
- Şekil 2.3.7.** :250 Hz'de Açısal hız
- Şekil 2.3.8.** :2500 Hz'de Açısal hız
- Şekil 2.3.9.** :Verilerin karşılaştırmalı sonuçları
- Şekil 2.5.1.1.** :Sistem tanımlama tekniği çalışma alanı
- Şekil 2.5.1.2.** :Zaman tabanlı girdi ve çıktı değerlerimiz
- Şekil 2.5.1.3.** :Girdi ve çıktı değerlerine ait model frekans fonksiyonu
- Şekil 2.5.1.4.** :Model çıktımız
- Şekil 2.5.1.5.** :Model frekans cevabı
- Şekil 2.5.2.1.** :Sisotool çalışma ortamı
- Şekil 2.5.3.1.** :Piezo motor modellenmesi ve kontrolü
- Şekil 2.5.3.2.** :Sistem için tasarlanan basamak fonksiyonu
- Şekil 2.5.3.3.** :Model bode diagramı
- Şekil 2.5.3.4.** :Piezo motor basamak cevabı
- Şekil 2.5.3.5.** :Sistem basamak cevabı
- Şekil 2.5.3.6.** :Sistem impulse cevabı
- Şekil 2.5.3.7.** :Sistem bode diagramı
- Şekil 2.6.1.** :Sinir ağı uygulaması için kullanılan piezo motor girdi ve çıktı değerleri
- Şekil 2.6.2.** :Piezomotor yapay sinir ağı modeli
- Şekil 2.6.3.** :Hata diagramı
- Şekil 2.6.4.** :Eğitimli sinir ağı kontrol programı

- Şekil 2.7.1.** :ANFIS yapısı
- Şekil 2.7.2.** :ANFIS’de kullanılan parametrelere bağlı frekans,tork ve konum dğerleri
- Şekil 2.7.3.** :Eğitilen girdi ve çıktı verilerimiz
- Şekil 2.7.4.** :Ortalama karesel hata (MSE) değeri
- Şekil 2.7.5.** :Eğitilen ve gerçek test verilerimiz
- Şekil 2.7.6.** :Bulanık sistem kural çıkarım ünitesi
- Şekil 2.7.7.** :Piezomotor bulanık mantık model
- Şekil 2.7.8.** :Tork değerlerine bağlı üyelik fonksiyonları
- Şekil 2.7.10.** :Girdi ve çıktı değerlerine bağlı konum değişimi
- Şekil 2.7.11.** :Model ve deneysel verilerin karşılaştırılması

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.2.1.1. :Farklı Frekans ve Tork değerlerine bağlı pozisyon değerleri

Tablo 2.3.1. :Piezo motor değerleri

Tablo 2.3.2. :Gerçek ve deneysel veriler

Tablo 2.5.1.1. :Girdi ve çıktı değerleri

Tablo 2.5.3.1. :Sistem bode diagramı ve piezo motor sonuç değerleri

Tablo 2.6.1. :Sinir ağı performans değerleri

Tablo 2.7.1. :Anfis modelinden alınan frekans ve torca bağlı bazı konum değerleri

1 GİRİŞ

Günümüzde endüstrideki gelişmeler ve teknolojinin hızlı ilerlemesi yeni ürün ihtiyacını artırmıştır. Artan ürün ihtiyacı sanayide adeta bir çığır açmış, durmadan artan ürün ihtiyacı, araştırmacıları talepleri karşılamaya yönelik farklı alanlar üzerine çalışmaya yöneltmiştir. Endüstride kullanılan motorlar büyük yer kaplamakta ve yüksek enerji ile iyi verim üretmektedir. Özellikle motorlardan beklenen yüksek hız, moment, düşük ağırlık, düşük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Şüphesiz teknolojik gelişmelerin yüzyılımıza getirmiş olduğu en büyük avantaj farklı disiplinlerin ortak çalışması sonucunda yeni ürünlerin meydana gelmesidir. Böyle bir noktada ultrasonik piezo motor malzeme biliminin ilerlemesi sonucunda yarı iletken teknolojisinin hızlı gelişimi ile ortaya çıkmıştır. Yaygın olarak kullanılan elektromanyetik motorlar özellikle teknolojide nanoçağ yaşadığımız günlerde kullanım açısından önemli sorunlar teşkil etmektedir. Bunların başında yapısında kullanılan sabit mıknatısların ağır olması ve çok yer kaplaması gelmektedir. Ayrıca düşük hız uygulamalarında kullanılan dişli sistemleride motorlarda ek ağırlık ve hacim kaplaması durumuna sebep olmaktadır. Gürüldüğü gibi bu motorların en büyük sorunları boyutları ile ilgilidir. Piezo motorlar ise yükü döndürebilmek için dişli sisteme gereksinim duymazlar. Bu yüzden küçük ölçekli hareket sistemlerinde de kolaylıkla kullanılabilirler [1].

Ultrasonik motor (USM) veya piezoelektrik motor teknolojisinin temelinde piezoelektrik seramik parçalarının bulunmasından kaynaklıdır. Bir piezoelektrik seramik parça üzerine uygulanan alternatif gerilim sonucunda elde edilen titreşimi, hareketli parçaya sürtünme kuvvetiyle aktararak çalışan motorlara "piezoelektrik motor" veya "ultrasonik motor" denir. Buradaki ultrasonik sözcüğü, bu motorların 20 kHz üzerindeki frekanslarda (ultrasonik frekans bölgesinde) çalışmasından dolayı kullanılmaktadır [2].

Piezo elektrik etki ilk olarak J. Curie ve P. Curie kardeşler tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir. Piezo motor kullanımına 1973 yılında H.V. Barth tarafından piezo malzemenin üretilmesi ile başlanmıştır. Daha sonra yaygın olarak birçok uygulamada karşımıza çıkarak yer edinmiştir. Ultrasonik motorların en önemli bileşeni piezoelektrik kristallerdir. Piezo etki iki şekildedir. İlki, üzerine kuvvet uygulandığında piezo kristal gerilim üretir, ikincisi alternatif gerilim uygulanan piezo kristal titreşim üretir. Piezo etki gösteren madde doğada kuartz kristali, baryum titanat gibi doğal olarak bulunduğu gibi daha iyi etki gösteren malzeme üzerinde de araştırmacılar çalışmalarını sürdürmektedir.

Uygulamada kullanılan en iyi etkiyi gösteren piezo elektrik kristal $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ (PZT) ana bileşenlerinden oluşan PZT olarak isimlendirilen bileşiktir. Ultrasonik motorlar; düşük hızlarda yüksek moment üretme, sesiz çalışma, yüksek tutma momenti, elektromanyetik parazitlerden etkilenmeme gibi birçok üstün özelliklere sahiptir. Bu avantajlarından dolayı fotoğraf makinaları lens'lerinde, saatler, radar sistemleri uzay uygulamaları, arabalar, kameralar, robot kolu uygulamalarında yerini çoktan almaya başlamıştır. Ayrıca doğrudan sürebilme özelliği, diğer motorlara göre daha küçük boyutlarda kullanılma, avantajı gibi birçok üstün özelliğe sahiptir [3,4].

Piezo motor'un diğer motorlara göre avantajlarına karşılık birçok dezavantajı da vardır. USM sürme prensibi yüksek frekanslı sürtünme kuvvetine ve mekanik titreşim oluştruma prensibine dayanır, dinamik karakteristikleri lineer değildir, parametreleri çalışma şartları değiştikçe değişir. Bu durum motorun yapısındaki piezokristalin yapısındaki malzemenin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi ilkesi ile açıklanabilmektedir [5].

Bu yüzden motorun matematiksel modeli elde edilmesi oldukça zordur [6].

1.1 Ultrasonik Motor Çalışmaları

1993 yılında H.Hirata ve S.Ueha USM yük karakteristiği performans tahmini için USM'un eşdeğer devresinde kullanıldığı bir yöntem geliştirdi ve bunu da deneylerle başarılı bir şekilde destekledi [7].

1994 yılında T.Senju ve K.Uezato USM motor yük torkunun ve zamanla ısı artışından kaynaklı oluşan hız dalgalanmalarını önlemek amacı ile adaptif hız kontrolü yöntemini deneysel çalışmaları ile kanıtladılar [8].

1995 yılında H.Hirata ve S.Ueha USM dizaynı için bir model geliştirdiler .Bu model iki aşama üzerine kuruluydu birincisi rotor ve titreşim arasındaki sürtünme tahmini için elastik kontak modeli ikincisi ise elektrik ve mekanik parçaları arasındaki ilişki tahmini için eşdeğer devre modelinden oluşmaktaydı. Bu metod deneysel olarak başarılı bir şekilde kanıtlandı [9].

1997 yılında Senjyu ve arkadaşları motorun matematiksel modelini kullanarak adaptif kontrolör ile hız denetimini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiler [10].

Linoel ve arkadaşları 1999 da USM un çalışma frekans değerini bularak ısı değişiminin kompanze edilip sabit tork değeri altında hız kontrolünün yapılabileceğini göstermişlerdir [11].

USM sürücü yapıları elektromanyetik trafolarla kullanılan DC/AC dönüştürücüden meydana gelir. Bu yeni metod sayesinde extra frekans kontrol ünitesine gerek kalmadan, USM'un maximum hızda kontrolü sağlanabilmektedir [12].

Senjyu ve arkadaşları USM'un yüzey ısı ölçümü ile motor kontrolünü başarılı bir şekilde yapmışlardır [13].

USM yapısında bulunan zamansal nonlinearite değişimlerinin önlenmesi için neuro-fuzzy kontrolü ile başarılı bir çalışma gerçekleştirildi [14].

USM performansı genel itibari ile stator ile rotor arasındaki temas yüzeyine bağlıdır. Temas yüzeyi durmu kontrolü Zhou ve Qu tarafından yeni bir yöntem ile gerçekleştirildi. Bu yöntem ile anma torku ve gerilim –hız ölçümü yapılabilmektedir [15].

USM motorlar genel anlamda açısız hareket eden ve doğrusal hareket eden ultrasonik motorlar olarak ikiye ayrılır. En az açısız hareket eden USM kadar doğrusal hareket eden USM ler içinde çalışmalar yapılmıştır. Bununla ilgili bir çalışma Roh ve Kwon tarafından doğrusal hareket eden bir USM geliştirilmiş ve geliştirilen USM'dan her iki yönde de benzer başarılı bir performans elde edilmiştir [16].

USM kontrolü için yarı iletken malzemelerden oluşan yüksek frekanslı bir sürücüye gereksinim vardır. Bir piezoelektrik malzemeyi titreştirmek yüksek kapasitansdan dolayı zordur. Bu yüzden motorun sürme frekansını sağlamak için kapasitansa paralel veya seri endüktans bağlanır. Bu durum motorun sürülmesinde kolaylık sağlar ve kontrolünde paralel-rezonans veya seri-rezonans eviriciler kullanılır [17].

USM parametreleri pek çok faktör tarafından etkilenmektedir. USM motor için iyi bir kontrolör tasarlanmasının yolu bu faktörlerin iyi bir kontrol stratejisi ile kullanımından geçer. USM'un kendine has özel yapısı ve çalışma prensibi iyi bir kontrolör geliştirmek için engel taşımaktadır. Bu yüzden USM giriş nitelikleri verim, tork, güç ve kontrol değişkenleri gerilim genliği, frekans ve faz farkı değerleri çok değişkenli, çok amaçlı bir optimal kontrol algoritması tasarlamak için oldukça önem arz etmektedir. Tüm bunlardan kaynaklı yüksek performansta USM kontrol etmek zordur. USM için yapay zeka teknikleri, PI denetleyiciler önerilen bazı kontrol modelleri tavsiye edilmektedir.

1.2 Ultrasonik (Piezo) Motor Özellikleri

- 1-Elektromanyetik bir motor yüksek hız ve düşük torkda iyi bir verime sahiptir. Ultrasonik motor ise düşük hızda yüksek torkla verimli olarak çalışabilmektedir.**
- 2-Birim ağırlık başına ürettiği tork yüksektir.**
- 3-Çalışma ve durma anlarındaki kontrol karakteristikleri iyidir.**
- 4-Dişli sisteme gereksinim olmadan değişik hızlarda yüksek tork ile çalışabilmektedir.**
- 5-Pozisyon hatasız sağlanabilmektedir.**
- 6-Elektrik enerjisi kesilse dahi rotor ile stator arasındaki sürtünme kuvvetinden dolayı rotor konumunu koruyabilmektedir.**
- 7-Lineer motor dizaynı oldukça kolaydır.**
- 8-Sessiz çalışır hız azaltma dişli sistemine gereksinim duymaz.**
- 9-Elektromanyetik alan oluşturmaz ve elektromanyetik alanlardan etkilenmez.**
- 10-Ultrasonik motorun hızı azalırken taşıyabileceği yük torku artar.**

1.3 Piezo Motor Çalışma Prensibi

Piezo motor yüksek devir, hızlı tepki süresi, geri tepmesiz hareket ve doğrudan tahrikli olması başlıca özelliklerindedir. Motorun başlıca özelliklerinden tutma pozisyonunda herhangi bir güç yitirmemesi ve sürücü teknolojisinin doğrudan yani hareket için dişli sisteme ihtiyaç duymaması piezo motor teknolojisinin diğer elektromanyetik motorlara göre avantajlarıdır. Piezo motor bütün hız aralıklarında çok iyi bir kontrol hareketi sağlar. Piezo motor'un performansı birçok yönüyle dc veya stepper motordan farklıdır. Piezo motor sürtünme esaslıdır. Bunun anlamı sürücü bacakları ve sürücü disk arasında hareket sürtünme ilişkisi yoluyla iletilir. Bu motoru sürmek için piezo motor sürücüsü PMD101 kullanılmıştır.



Şekil 1.3.1. Piezo motor [18]

1.3.1 Piezo Motor Sürücüsü PMD101



Şekil 1.3.1.1. PMD101 piezo motor sürücüsü [19]

- Nanometre çözünürlük
- Kapalı çevrim operation
- Açık çevrim mode
- Genel I/O

Sürücü piezo motor'un her uzanıp bükülen bacaklarının besleme dalga sinyallerini kontrol eder. Dalga formları özel olarak sürücü bacakları hareketini yüksek tahmin etmek için dizayn edilmiştir. Sürücü bacakları hareketi döner disk boyunca sürtünme teması yoluyla iletir.

1.3.2 Motor Sürme Prensibi

Piezo motor'un çalışabilmesi için yapısında bulunan piezo bacakların dört elektriksel besleme sinyali ile tahrik edilmesi gerekmektedir, besleme sinyalinden sonra bacaklar harekete geçer ve bir tahrik diski yardımıyla motor'da bir döndürme hareketi oluşturur [18]. Piezo motor'a iki faz sinyal uygulanması sonucunda bacak uçlarında uzama ve bükülme oluşur. Bu uzama ve bükülme bacak uçlarında belli bir eğim ve yörünge hareketine neden olur, bu eğim yörüngesi uygulanan sinyal dalgası ile şekillenir, örneğin sinuzoidal dalga uygulamaları bacak uçlarında eliptik yörünge hareketine neden olur, genel olarak kullanılan dalga örneği sinuzoidal dalgadır.

Motor'un sürme dalgası faz ve frekans büyüklüğü değiştirilerek kontrol edilebilir, dalga periyodu ve faz büyüklüğünün değiştirilmesi aynı zamanda piezo motor bacaklarının farklı adım büyüklüğü atmasını sağlar. Bu durum dolaylı yoldan motor'un frekans sinyalini değiştirir, motor'un frekans sinyalinin değişmesi motorun açısal hızının değişmesine neden olur [18].

Piezo motor'un hızı dış tork'a bağlı olarak da değişir. Motor hızının değerini bulmak için, frekans değeri ve bacak adım uzunluğu değeri çarpılır. Piezo motor iki mod'da sürülebilir temas modu ve adımlama modu. Temas modunda bacaklar tahrik diski ile sıkı temas halindedir. Motor'un ileri veya geri yönde çalışmasında asla tahrik diski ile teması kesmezler. Temas modu alt nanometre aralıklarında yüksek hassaslıkla hareket sağlar.

Adımlama modun da ise piezo bacaklar iki çift olarak hareketi sağlarlar, bunun anlamı bacaklar daima tahrik diski ile temas etmezler, iki çift temas eder taki diğer iki çift temas edene kadar, Şekil 1.3.2.1'de bu durum ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Piezo bacaklar pozitif genlikli 48 Volt'a kadar sinyal ile sürülür. Gerilim piezo bacaklarda farklı uzama ve bükülmeye sebep olur, bu uzamayı ve sapmayı anlatan matematiksel piezoelektrik denklem aşağıda verilmiştir.

$$x = \frac{3d_{33}L^2}{4tD} (u_1 - u_2) \quad (1.3.2.1)$$

$$y = \frac{d_{33}L}{2t} (u_1 - u_2) \quad (1.3.2.2)$$

Burada , x ve y sapma ve uzama miktarlarını, d_{33} piezoelektrik şarj sabiti, L bacak uzunluğu, D bacak yarıçap uzunluğu, t piezoelektrik tabaka sertliği, u_1 ve u_2 sürülen voltaj'ı temsil eder [20].



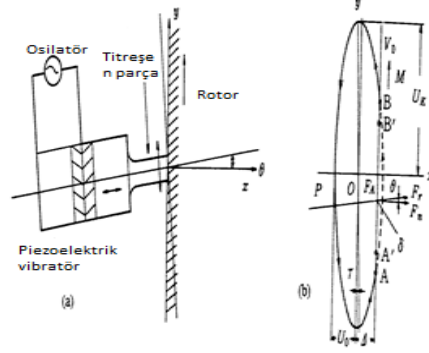
Şekil 1.3.2.1. Piezobacak çalışma prensibi

1.4 Ultrasonik (Piezo) Motor Çeşitleri

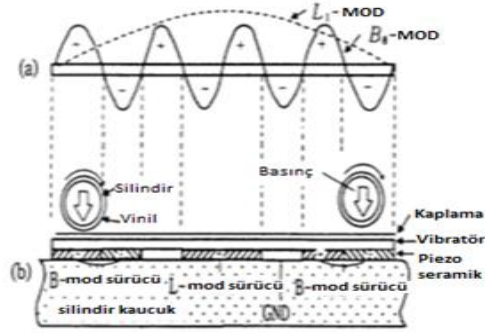
Endüstrideki gelişmelere bağlı olarak motorların yüksek moment, yüksek hız, küçük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı yeni motor tasarımları geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ultrasonik motor yükselen teknoloji ürünü olarak ortaya çıkmış ve birçok sistemde ihtiyaca göre kullanılmaya başlanmıştır. Değişik ultrasonik motor çeşitleri mevcuttur var olan ultrasonik motor türleri aşağıda şekilleri ile birlikte verilmiştir.

- **Duran dalga tipi USM** : Çalışma prensibi basit olarak Şekil 1.4.1'de gösterilmiştir.
 - Doğrusal çalışan USM : Çalışma prensibi basit olarak Şekil 1.4.2'de gösterilmiştir.
 - Döner çalışan USM : Çalışma prensibi basit olarak Şekil 1.4.3'de gösterilmiştir.
- **Yürüyen dalga tipi USM** : Çalışma prensibi basit olarak Şekil 1.4.4'de gösterilmiştir.
 - Doğrusal çalışan USM: Çalışma prensibi basit olarak Şekil 1.4.5'de gösterilmiştir.

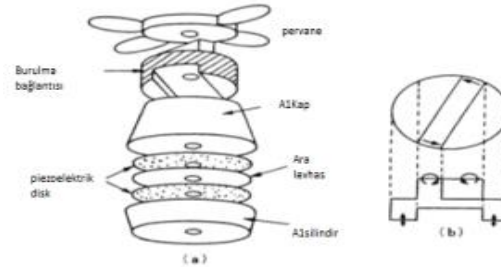
- Döner çalışan USM: Çalışma prensibi basit olarak Şekil 1.4.6'de gösterilmiştir.



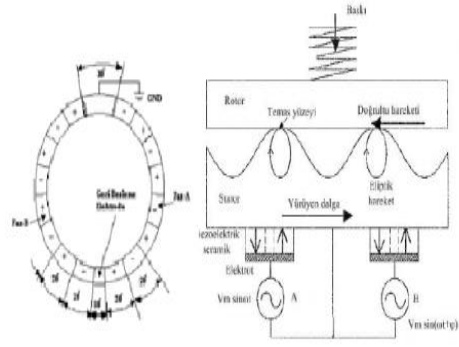
Şekil 1.4.1. Duran dalga USM



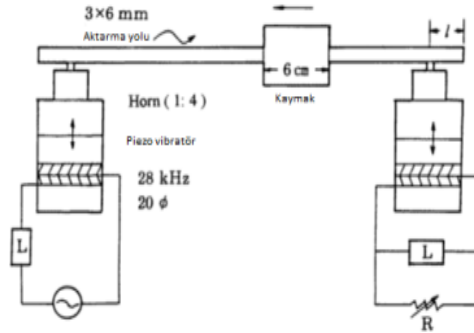
Şekil 1.4.2. Doğrusal çalışan duran dalga USM



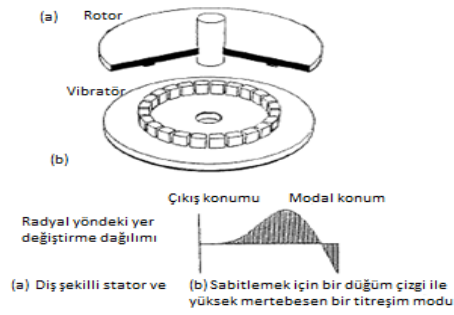
Şekil 1.4.3. Döner çalışan duran dalga USM



Şekil 1.4.4. Yürüyen dalga tipi USM



Şekil 1.4.5. Doğrusal çalışan yürüyen dalga USM



Şekil 1.4.6. Döner çalışan yürüyen dalga USM

1.5 Ultrasonikmotor'un Yapısal Karşılaştırılması

1.5.1 Duran dalga USM

- Düşük maliyet
- Tek titreşim kaynağı
- Yüksek verim
- Tek yön

➤ Bu tip motorlar hareket doğrultusuna göre ikiye ayrılır.

Doğrusal tip duran dalga USM

- Dikdörtgen plaka ultrasonik motor.
- Rezonans frekansı-98 kHz.
- Verimlilik-65%

Döner tip duran dalga USM

- Burulma bağlantı ultrasonik motor,
- Doğrusal motorlardan yüksek hız sağlar çünkü yüksek frekansta(160kHz) ve güçlendirilmiş titreşim ile çalışır
- 1500 rpm hız sağlar 0.08 Nm tork ve % 80 verimlilik

1.5.2 Yürüyen dalga USM

- İki titreşimli kaynak gerektirir.
- Her iki yönde de kontrol edilebilir.
- Mikrofon ile video kameralar için çok uygun sessiz çalışma olanağı sağlar.

➤ Bu tip motorlar hareket doğrultusuna göre ikiye ayrılır.

Doğrusal tip yürüyen dalga USM

- Bükme titreşimi kullanan doğrusal motor
- Her iki ucunda iki piezoelektrik vibratör kurulumundan oluşur
- Yük direnci mükemmel performanslı yürüyen dalga için ayarlanır

Döner tip yürüyen dalga USM

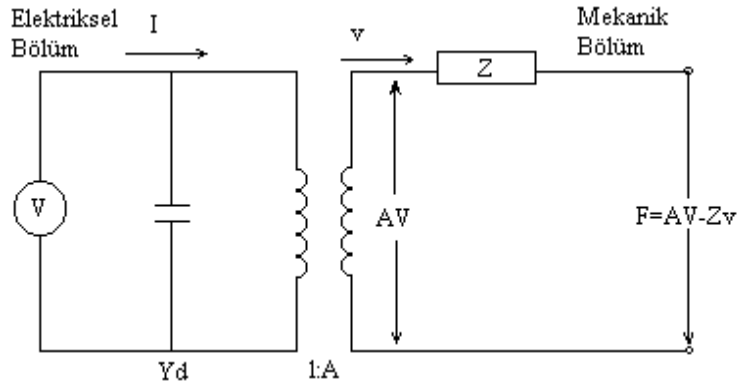
- İki gerilim kaynakları yürüyen dalga üretmek için kullanılır.
- Piezoelektrik materyalin titreşimi stator tırnaklarının sert dolgusu ile amplifiye edilir.
- Sürtünme kuvvetleri nedeniyle rotor döner.

2 PİEZO MOTOR DEVRE ANALİZİ

2.1 Piezomotor Eşdeğer Devresi

Piezo motorda temel olarak iki enerji dönüşümü oluşur. Birincisi elektriksel enerjinin mekanik titreşim enerjisine dönüşmesi ve bu titreşim enerjisininde sürtünme kuvveti vasıtası ile açılmal veya linear harekete dönüşmesidir. USM'un çalışma prensibi parametre değişimlerinden dolayı oldukça karmaşıktır. Bu yüzden USM'un eşdeğer devresi geliştirilirken piezoelektrik malzeme ve eşitlikleri dikate almak oldukça önemlidir. Temel bir piezo malzemenin eşdeğer devresi, eşdeğer kapasite, eşdeğer endüktans, eş değeri direnç büyüklüklerinden meydana gelmektedir.

Piezo malzemeye basınç uygulanması, titreşim elde edilmesi gibi kavramlar genellikle mekaniksel kavramlardır. USM'da eşdeğer devre elde etmenin yolu bu kavramların ortak kullanıldığı bir devre tasarlayıp piezo eşitliklerden yararlanarak bir elektriksel devreye geçiş sağlamaktır. Aşağıdaki şekilde piezomotor eşdeğer devresini anlatan bir devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1.1. Eşdeğer devre [21]

Piezo motor eşdeğer devresi ile alakalı piezo motor mekaniksel ve elektriksel devre ifadelerini veren formüller aşağıda verilmiştir.

$$-F = AV - Zv \quad (2.1.1)$$

$$I = Y_d V + A_v \quad (2.1.2)$$

Burada F (Newton) mekanik bölümde uygulanan kuvvet, v (V^2/m^3) mekanik bölüm terminallerdeki hızı, A (Nm/V) kuvvet faktörü, V (Volt) devrenin gerilimi, I (Amper) devrenin akımı, Z (ohm) seramik malzeme empedansı, Yd (N/m^2) blokaj admitansını temsil eder [20].

2.1.1 Eşdeğer Devre Elemanları

Piezo malzemenin eşdeğer devresi; kapasite, endüktans ve direç büyüklüklerinden oluşmaktadır. Motor modelini oluşturmak için gerekli olan bu parametrelerin elde edilme denklemleri aşağıda ana başlıklar altında anlatılmıştır.

2.1.2 Eşdeğer Kapasitans

Bir piezo malzemeye üzerinde hiçbir yük yokken gerilim uygulanırsa, başlangıçta biraz dezerformasyona uğrar ve daha sonra aynı hale gelir, tıpkı bir yay gibi sabit bir kuvvet uygulandığında yayın davrandığı gibi hareket eder.

$$F = Kx \quad (2.1.2.1)$$

burada F (Newton) kuvvet , x (metre) yer değiştirme, K (Newton/metre) yay sabiti dir.

Ayrıca piezo malzemede kuvvet AV kadar, kuvvet faktörü ise birim hız uygulandığında üretilen akım miktarı

$$I=AV \quad (2.1.2.2)$$

değerine eşit olur.

Zaman ile ilgili terimler yerdeğiştirirse ($i=dq/dt,v=dx/dt$) kuvvet faktörü, birim yer değiştirme cinsinden yazılabilir.

$$q = Ax \quad (2.1.2.3)$$

$$AV = K \left(\frac{q}{A} \right) \quad (2.1.2.4)$$

$$V = \frac{qK}{A^2} \quad (2.1.2.5)$$

$$C = \frac{A^2}{K} \quad (2.1.2.6)$$

Burada K piezo malzeme yay sabitidir [20].

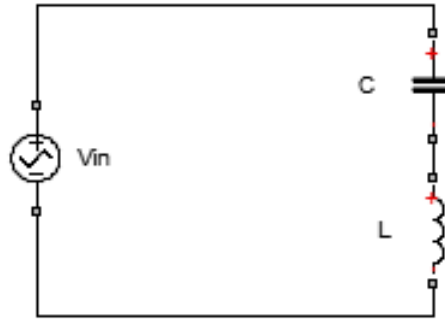
2.1.3 Eşdeğer Endüktans

Piezo malzemenin başka hiçbir yüke maruz kalmadan gerilim altında titreşmesi yay sabiti piezo malzeme yay sabiti K 'ya bağlıdır. Burada m seramik-metal birleşiminin toplam kütlesi, A kuvvet faktörünü belirtir. Eşdeğer endüktans

$$L = \frac{m}{A^2} \quad (2.1.3.1)$$

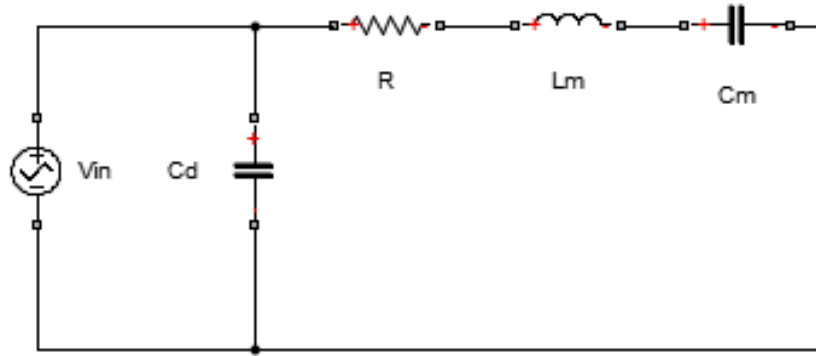
İfadesine eşit olur.

Piezoseramik malzemenin AC gerilim altındaki eşdeğer devresi aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.1.3.1. Eşdeğer endüktans devresi

2.1.4 USM'un Tam Eşdeğer Devresi



Şekil 2.1.4.1. Tam eşdeğer devre

Şimdiye kadar piezo malzemenin özelliğinden kaynaklanan devre elemanları ile ilgili kısımla ilgilendik, bu devre elemanlarını piezo motor için tam eşdeğer devre modeli oluşturmaya yeterli değildir. Bunun için piezo malzemenin birleştirildiği metal malzemede göz önünde bulundurulmalıdır [21].

Eşdeğer devre modelinin eksik kısımlarını tamamlamak için Cd ve R devre elemanları eklenmiştir. Yani blokaj kapasitansı Cd; piezo malzemenin dielektrik özelliğinden kaynaklanan kapasitedir titreşimin olmadığı anda net değeri ölçülür [22].

USM'da Cd'den dolayı oluşan empedansa blokaj empedansı denir. Ayrıca piezo elektrik malzemede histeresis kayıplarına ilaveten stator yüzeyine yapıştırılan elektrotlardan kaynaklı stator ve rotordada bir kayıp oluşur bu kayıpların tümü R ile gösterilmiştir ve bu dirence iç direnç denilmektedir. Cm piezo seramik ve bağlı bulunduğu malzeme esnekliğini, Lm ise piezo seramik malzemenin ağırlığını temsil eden devre elemanlarıdır. Ayrıca piezo motor eşdeğer devresi ideal şartlar altında olduğu kabul edilmiştir.

Aşağıda Şekil 2.1.4.1 piezo motor eşdeğer devresinden hareketle çıkarılan blokaj admitansı Yd ve hareket admintansı Ym verilmiştir [22].

$$Y_d = j\omega C_d \quad (2.1.4.1)$$

$$Y_m = \frac{1}{R + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}} \quad (2.1.4.2)$$

$$Y_m = \frac{1}{R + j\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)} \quad (2.1.4.3)$$

$$Y_m = \frac{R - j\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)}{R^2 + j^2\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} \quad (2.1.4.4)$$

$$Y_m = \frac{r_0}{R^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} + j \frac{\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m}{R^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} \quad (2.1.4.5)$$

$$I_m = VY_m \quad (2.1.4.6)$$

motorun dönmesini sağlayan akımdır.

Seramik yüzeydeki titreşim hızını bulmak için akımı kuvvet faktörüne oranlarız.

$$v = \frac{I_m}{A} \quad (2.1.4.7)$$

gürüldüğü gibi titreşim hızı büyüklüğü akıma bağlıdır ve eğer uygulanan gerilim değerini değiştirirsek bütün bu değerleri değiştirmiş oluruz. Piezo motor eşdeğer devresindeki elektromanyetik kuplaj katsayısı k aşağıdaki gibi bulunur [20].

$$k = \sqrt{\frac{C_m}{C_d + C_m}} \quad (2.1.4.8)$$

Bir seri LC devresindeki açısal rezonans frekansı ω_0

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.1.4.9)$$

ile ifade edilir.

Piezometal birleşiminin rezonans frekansı ise

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.1.4.10)$$

ile ifade edilir.

Dolayısıyla rezonans frekansı

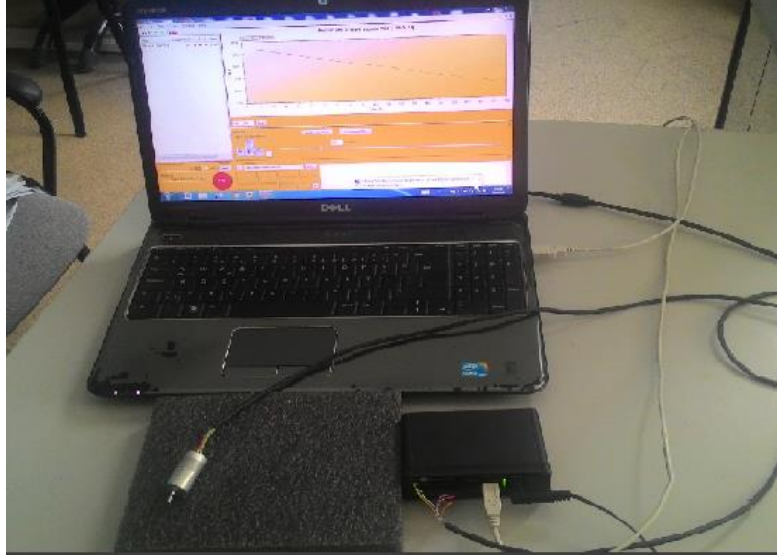
$$f_r = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (2.1.4.11)$$

Değerine eşit olur.

2.2 Piezo Motor Deneysel Performans Değerleri

2.2.1 Farklı Frekans ve Tork Değerlerine Bağlı Piezo Motor Konum Değerleri

Aşağıdaki şekilde bu çalışmada kullanılan piezo motor ve sürücüsüne bağlı deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 2.2.1.1. Piezo motor deney düzeneği

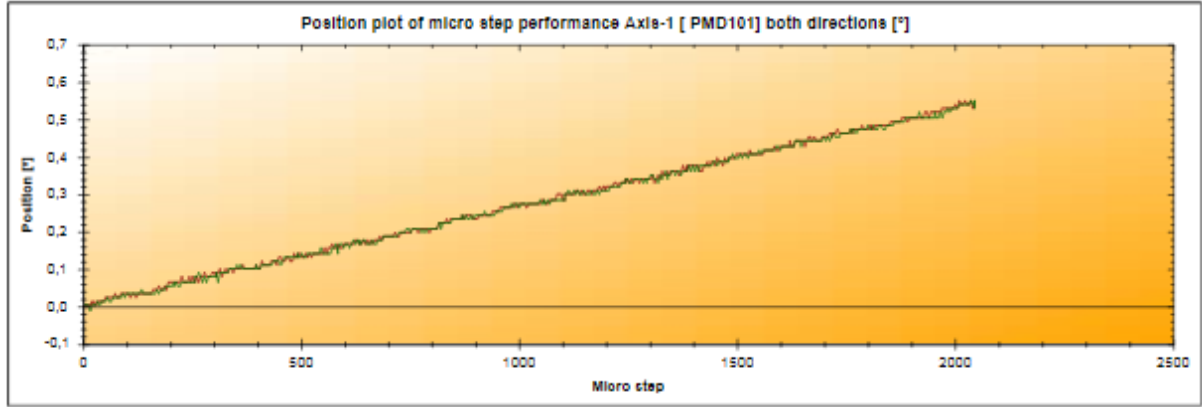
Tablo 2.2.1.1. Farklı frekans ve tork değerlerine bağlı konum değerleri

Piezomotor	250 (Hz)	500 (Hz)	750 (Hz)	1000 (Hz)	1250 (Hz)	1500 (Hz)	1750 (Hz)	2000 (Hz)	2250 (Hz)	2500 (Hz)
değerler	Konum (mrad)	Konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)	konum (mrad)
0(mNm)	9154	18575	26901	39530	55140	53235	80372	90640	98950	123550
2,5(mNm)	9472	19598	27028	40568	56257	54268	82409	91998	100000	129500
5(mNm)	10176	21004	30273	41705	57094	56038	86287	108572	101780	129536
7,5(mNm)	10471	21681	31676	43361	59120	61991	87693	98782	109735	138933
10(mNm)	10448	21893	31801	43287	59402	62972	88598	98765	109999	139000
12,5(mNm)	11017	22384	32236	43794	58967	63352	89254	95166	104029	139203
15(mNm)	11074	23767	35197	46082	61651	68538	91794	106615	111225	142520

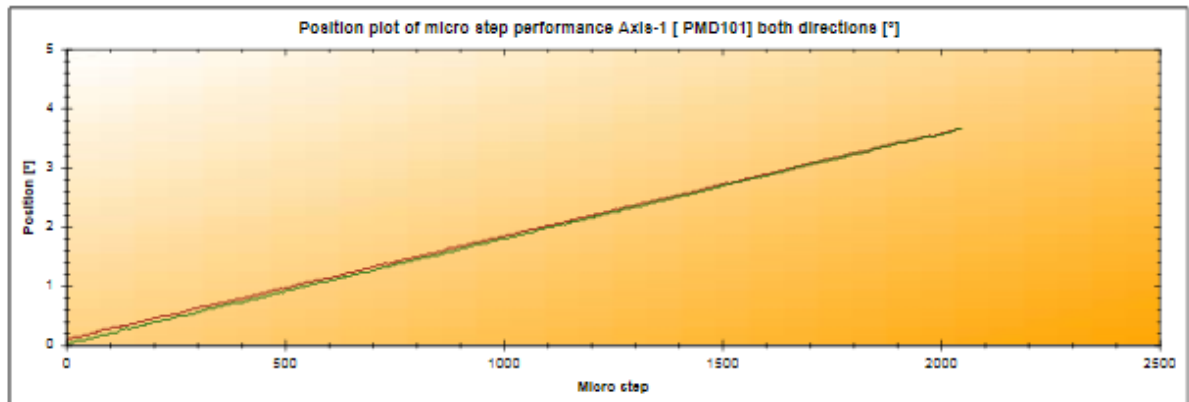
Tablo 2.2.1.1’de bulunan piezo motor konum (mRad) değerleri 250(Hz)-2500(Hz) frekans değerleri ve 0(mNm)-15(mNm) tork değerleri altında toplamda piezo motor 1 dk boyunca çalıştırılarak elde edilen değerler mevcuttur. Piezo motor konum değerlerinin kesin doğruluğu için herbir değerin 10 örnekleme sonucunun ortalama değeri alınmıştır.

2.2.2 Piezo Motor İleri ve Geri Yön Performans Değeri

Motor ileri ve geri yön performans değeri; kırmızı çizgi ileri yön yeşil çizgi geri yöndeki performans değerini temsil etmektedir çizgiler arasında boşluk bulunmaması piezo motor’un iyi performans gösterdiği anlamına gelir, piezo motor’un uygun çalışma değeri 1500(Hz)-2000(Hz) civarındır bu değerlerden sonra çizgiler arasında boşluk oluştuğu yani performans değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. şekil 2.2.2.1’de çizgilerin st üste olduğu görülür. şekil 2.2.2.2’de çizgiler hafif ayrılaşmaya başlamıştır.

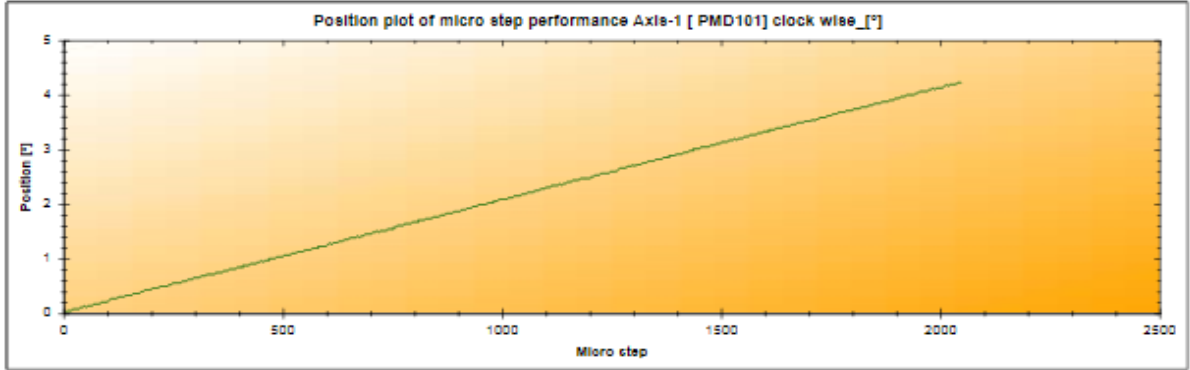


şekil 2.2.2.1.250 (Hz) piezo motor performans değeri

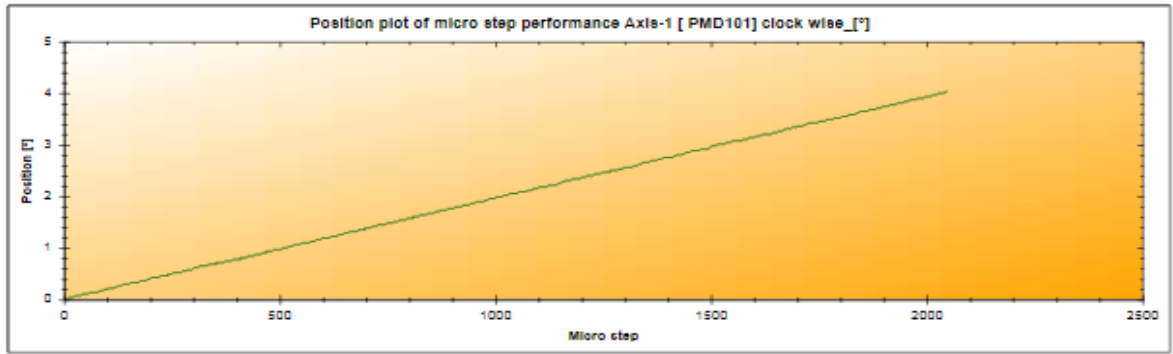


şekil 2.2.2.2. 2500(Hz) piezo motor performans değeri

2.2.3 Piezomotor ileri yön Microstep performans değerleri



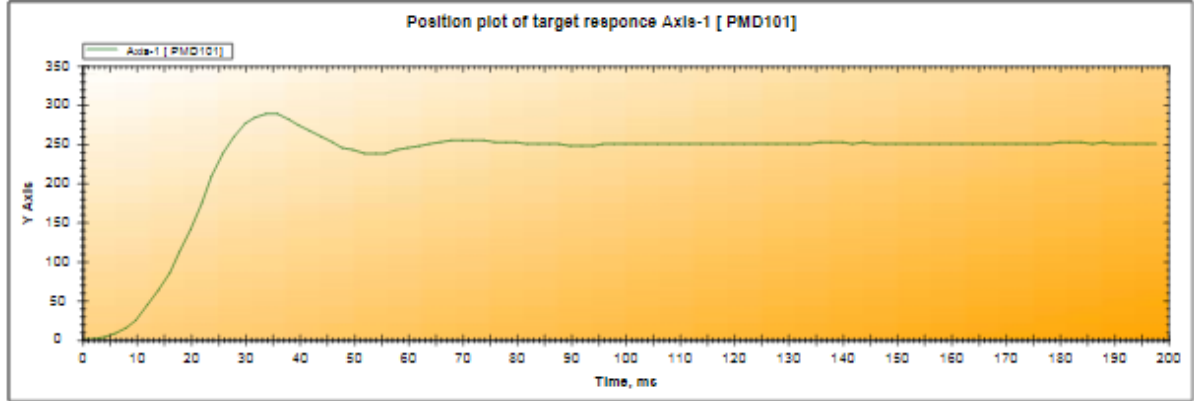
Şekil 2.2.3.1. 1 dalga periyodu için kapalı çevrim performans değeri



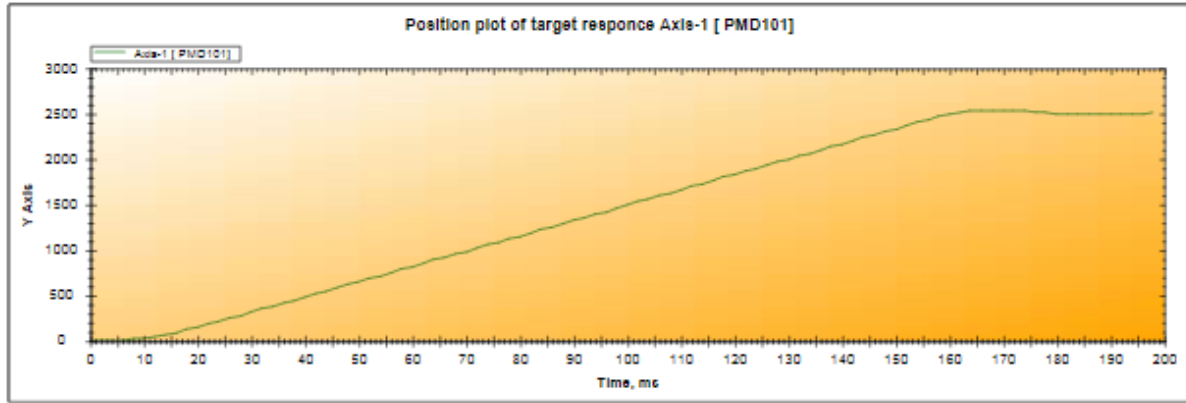
Şekil 2.2.3.2. 1 dalga periyodu için açık çevrim performans değeri

Yukarıdaki şekillerde bir dalga periyodu dönemi boyunca piezo motor kapalı çevrim ve açık çevrim performans değerleri gösterilmiştir. Beklendiği gibi kapalı çevrim performans değeri daha iyi sonuç vermiştir. Bir dalga periyodu piezo motorun besleme sinyali boyunca attığı bacak adım sayısı kadardır.

2.2.4 Piezomotor hedef performas değerleri



Şekil 2.2.4.1. 250 encoder hedef değeri için piezo motor performansı



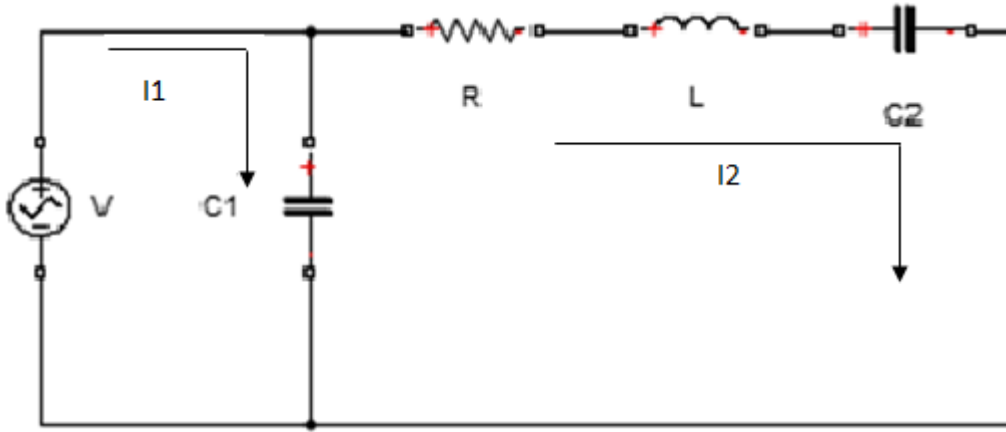
Şekil 2.2.4.2. 2500 encoder hedef değeri için piezo motor performansı

Yukarıdaki şekillerde piezo motor basmak cevabı 250Hz ve 2500Hz için gösterilmiştir. piezo motor frekans değeri artıkça yerleşme zamanının arttığı net biçimde görülmektedir.

2.3 Piezo Motor Eşdeğer Devre Parametrelerinin Tahminleme Yöntemi İle Bulunması Ve Matlab Simscape Modelinin Elde Edilmesi

Piezo motor çalışma prensibi karmaşık ve kompleks dir. Yapısında birden fazla doğrusal olmayan parametre mevcuttur (yük, baskı, sıcaklık) ve üstelik hiçbir üretici firma 1 dalga periyodu boyunca piezo motorun attığı adım uzunluğu, bir sonraki dalga dönemindeki adım uzunluğuna eşit olacağını garantisini vermez. Yukarıda piezo motor eşdeğer devre elemanlarının belirlenmesinde gerekli olan değerlerin bulunmasının ne kadar zor olduğuna değinilmişti. Bu bölümde piezo motor eşdeğer devresi üzerinden piezo motor transfer fonksiyonu bulunup; MATLAB araç kutularından biri olan sistem tanımlama tekniği tahminleme yöntemi ile transfer fonksiyonu bulmaya imkan vermektedir.

Tahminleme yöntemi ile bulunan transfer fonksiyonu eşdeğer devre üzerinden çıkarılan transfer fonksiyonuna eşitlenerek, piezo motor eşdeğer devre parametreleri belirlenmiştir. Sistem tanımlama tekniği ile yapılan bu işlem hem çok kolay hemde gerçek zamanlı müdahale imkanı tanımakta değişimlerin incelenmesi imkanı sunmaktadır. Sistem tanımlama tekniği çalışma prensibine bir sonraki bölümde ayrıntılı değinilecektir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri uygunluğunun incelenmesi adına, piezo motor eşdeğer devresine benzer bir devre MATLAB simscape düzleminde oluşturulmuştur. Oluşturulan devre üzerinde piezo motor açısal hızı ölçülüp gerçek veriler ile karşılaştırılarak piezo motor için uygun bir eşdeğer devre MATLAB simscape ortamında tasarlanmıştır.



Şekil 2.3.1. Piezo motor eşdeğer devresi

Piezo motor teknolojisinin yeni olması araştırmacıları cezbetmektedir. Piezo motor yapısı itibari ile diğer motorlardan oldukça değişiktir. Yapısında bulunan piezo malzemenin narinliği ve çalışma sisteminin karmaşık olması araştırmacıları piezo motor modeli oluşturmaya teşvik etmektedir. Şu ana kadar yapılan piezo motor modelleri tamamen piezo motorun elektriksel eşdeğer devresini bulmaya yönelik çalışmalardır. Yukarıda eşdeğer devre elde edilemsi ile ilgili zorluklara ayrıntılı bir şekilde değinilmiştir. Bu çalışmada gerçek zamanlı müdahale imkanı sunan bir piezo motor MATLAB simscape modeli verilmiştir. Bu model piezo motor parametrelerinin birbiri ile ilgili değişimlerini kolayca gösterme imkanı sunmakta ayrıca, elektriksel bir devreden mekaniksel bir devreye nasıl geçileceği kısaca anlatılmaktadır.

Şekil 2.3.1’de gösterilen piezo motor eşdeğer devresi üzerinden elde edilen transfer fonksiyonu ve aşamaları aşağıda verilmiştir.

$$V(s) = \frac{1}{C_1 s} I_1(s) - \frac{1}{C_1 s} I_2(s) \quad (2.3.1)$$

$$RI_2(s) + LsI_2(s) + \frac{1}{C_2s}I_2(s) + \frac{1}{C_1s}I_2(s) = 0 \quad (2.3.2)$$

$$I_2(s) \left[R + Ls + \frac{1}{C_2s} + \frac{1}{C_1s} \right] - \frac{1}{C_1s}I_1(s) = 0 \quad (2.3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{C_1s} & -\frac{1}{C_1s} \\ -\frac{1}{C_1s} & R + Ls + \frac{1}{C_2s} + \frac{1}{C_1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix} \frac{1}{C_1s} & V(s) \\ -\frac{1}{C_1s} & 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \frac{1}{C_1s} & -\frac{1}{C_1s} \\ -\frac{1}{C_1s} & R + Ls + \frac{1}{C_2s} + \frac{1}{C_1s} \end{bmatrix}} \quad (2.3.5)$$

$$I_2(s) = \frac{-\frac{V(s)}{C_1 s}}{\left(R + Ls + \frac{1}{C_2 s} + \frac{1}{C_1 s}\right) \frac{1}{C_1 s} - \frac{1}{C_1^2 s}} \quad (2.3.6)$$

$$\frac{I_2(s)}{V(s)} = -\frac{1}{C_1 s} \times \frac{1}{\frac{LsC_1 sC_2 s + RC_1 sC_2 s + C_1 s + C_2 s}{C_1^2 sC_2 s} - \frac{1}{C_1^2 s}} \quad (2.3.7)$$

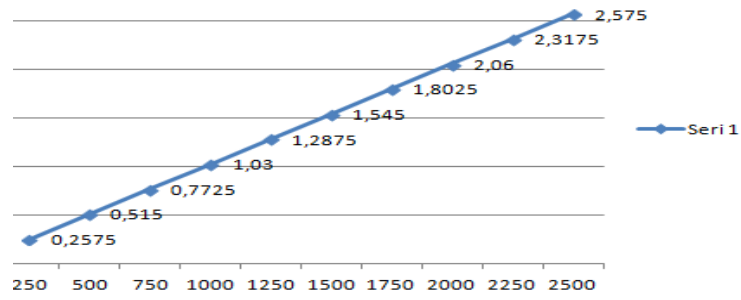
$$G(s) = - \times \frac{C_1^2 sC_2 s}{LsC_1 sC_2 s + C_1 s + RC_1 sC_2 s + C_2 s - C_2 s} \quad (2.3.8)$$

$$G(s) = \frac{C_2 s}{(LsC_2 s + 1 + RC_2 s)C_1 s} \quad (2.3.9)$$

Tablo 2.3.1. Piezo motor değerleri

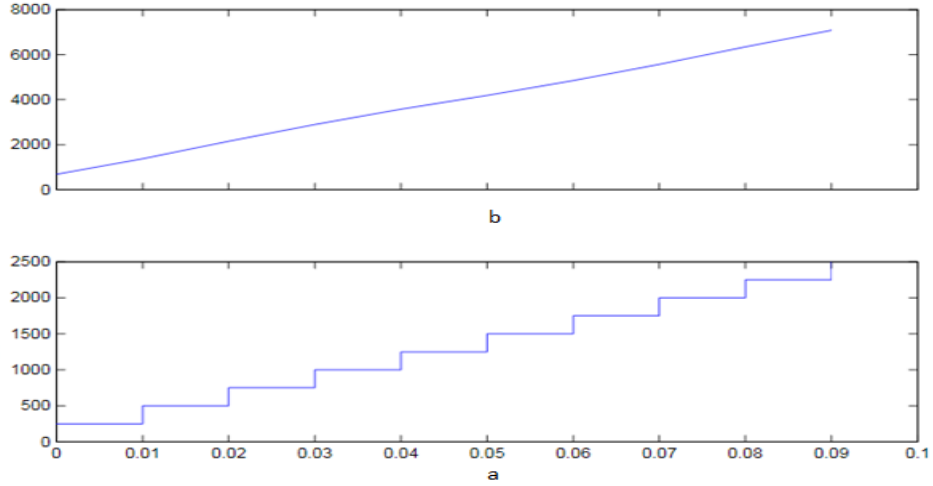
Frekans(Hertz)	Encoder	Hız(Rad/Sn)	Pozisyon(mRad)
250	677	0,2575	113
500	1368	0,515	233
750	2147	0,7725	372
1000	2896	1,03	522
1250	3572	1,2875	673
1500	4190	1,545	817
1750	4842	1,8025	912
2000	5569	2,06	1087
2250	6347	2,3175	1278
2500	7082	2,575	1384

Tablo 2.3.1:Piezo motor girdi değeri olarak kullanılan frekans, çıktı değeri olarak kullanılan encoder değerlerine bağlı, piezo motor açısai hız ve açısai konum değerleri verilmiştir



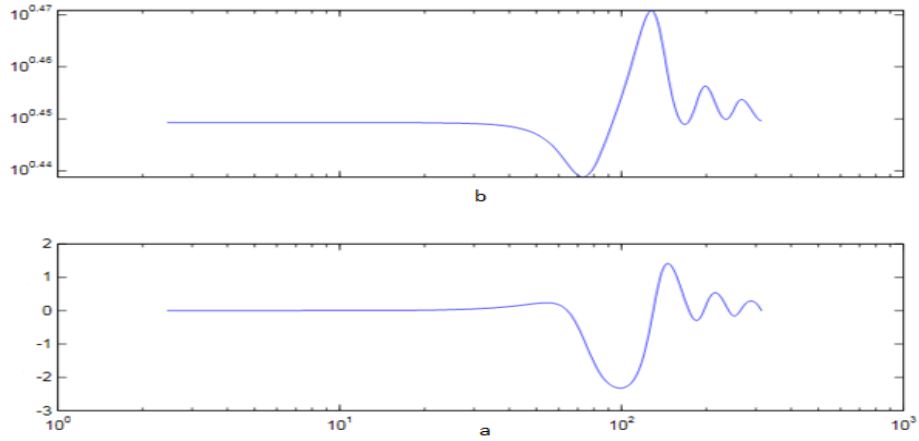
şekil 2.3.2. Frekans bağlı Açısai hız değerleri

Tablo 2.3.1’de çalışmamız da kullandığımız piezo motora bağlı frekans ve konum değerleri verilmiştir.



Şekil 2.3.3. Zaman tabanlı sistem girdi ve çıktı değerleri

Şekil 2.3.3'a: Sistem tanımlama tekniği girdi değerleri verilmiştir. Şekil 2.3.3'b: Çıktı değerlerine ait zaman tabanlı değerler verilmiştir. Sistem tanımlama tekniği için kullanılan girdi değerleri piezo motor frekans değerleri uygun gürülmüştür, çıktı değerleri ise buna bağlı encoder değeridir.



Şekil 2.3.4. Sistem tanımlama tekniği frekans fonksiyon cevabı

Şekil 2.3.4'a: Sistem girdi değerine ait frekans fonksiyonu ve cevabı. Şekil 2.3.4'b: Sistem çıktı değerine ait frekans fonksiyon değeri ve büyüklüğü verilmiştir.

Sistem tanımlama tekniği kullanılarak 2 kutuplu bir transfer fonksiyon değeri araştırılmıştır, çünkü yukarıda piezo motor eşdeğer devresi üzerinden bulduğumuz transfer fonksiyon değeri iki kuruplu idi, burda temel amacımız eşdeğer devre parametrelerini tahminleme yöntemi ile bulmaktır.

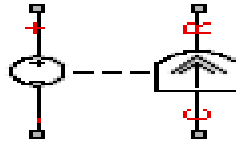
Bu işlem sonunda Transfer fonksiyonu tanımlama tahmini verileri, zaman tabanında 1 giriş, 1 çıkış , 10 örnekten, 2 kutup ‘dan oluşmaktadır ve sıfır sayısı 0 ‘dır. Tahminleme sonucu elde edilen değer %91.03’ ile sistemimize uyumluluk göstermiştir.

$$G(s) = \frac{C_2 s}{(LsC_2s+1+RC_2s)C_1s} = \frac{2,335e06}{s^2+3085s+8,222e05} \text{ olduğundan}$$

$$C_2=C_m=2,335e06, \quad C_1=C_d=8,822e05,$$

$$L_m=8,6995410510^{-7}, \quad R=2,68380841410^{-3}$$

Değerleri modelden elde edilmiştir.



Şekil 2.3.5. Elektromanyetik dönüştürücü

Elektromanyetik dönüştürücü elektrik ile mekanik bölüm arasındaki elektriksel sinyali mekanik bölümdeki dairesel tabanlı sinyale çevirmek için bir geliştirilmiş bir MATLAB aracıdır. Matlab simscape de oluşturulan modellerden elde edilen elektriksel sinyalleri mekaniksel sinyallere çevirmek için kullanılır. Bunun sonucunda elektriksel bölümdeki sinyallerin, mekanik bölüme geçişi sağlanır. Ayrıca dairesel hareket sensörü yardımıyla sistemin açısal hızı ölçülerek gerçek açısal hız ile karşılaştırıldı ve sistemin uygunluğunu test edildi.

$$V=K\omega$$

V elektrik bölümdeki gerilim

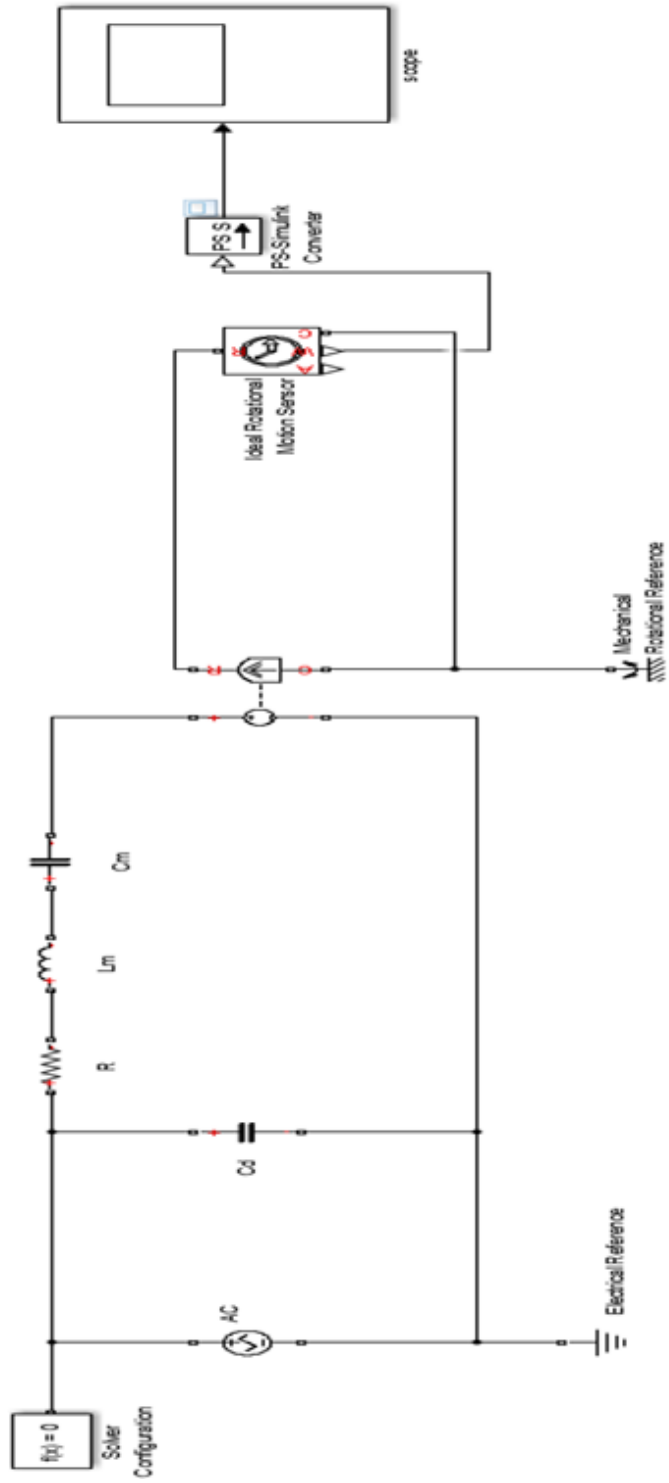
ω açısal hız

K enerji dönüşüm sabiti

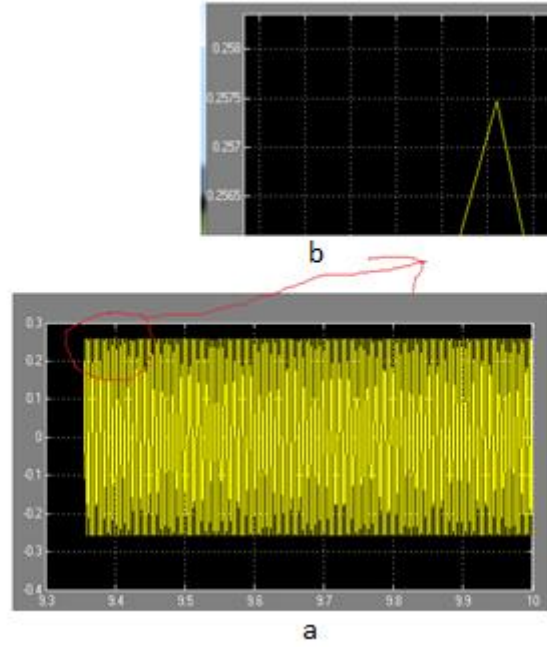
250(Hz)-2500(Hz) arasında değişen piezo motor hız ifadesi için K parametresi' de değişir.

- 250Hz için: $V=48\text{Volt}$, $\omega=0,2575$, ise $K=V/\omega$ 'den $K=186,40$ olur.
- 2500Hz için: $V=48\text{Volt}$, $\omega=2,575$, ise $K=V/\omega$ 'den $K=18,640$ olur.

Bu şekilde bütün K değerleri ayrı ayrı hesaplanır.

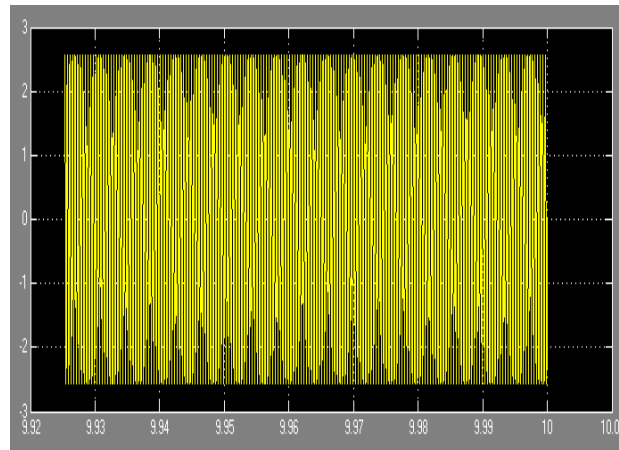


Şekil 2.3.6. Piezo motor simscape model



Şekil 2.3.7. 250 Hz'de Açısal hız

Şekil 2.3.7'a: Piezo motor simscape modeli 250Hz de açısal hız değeri. Şekil 2.3.7'b: Piezo motorun açısal hız değerinin tepe noktası gösterilir.

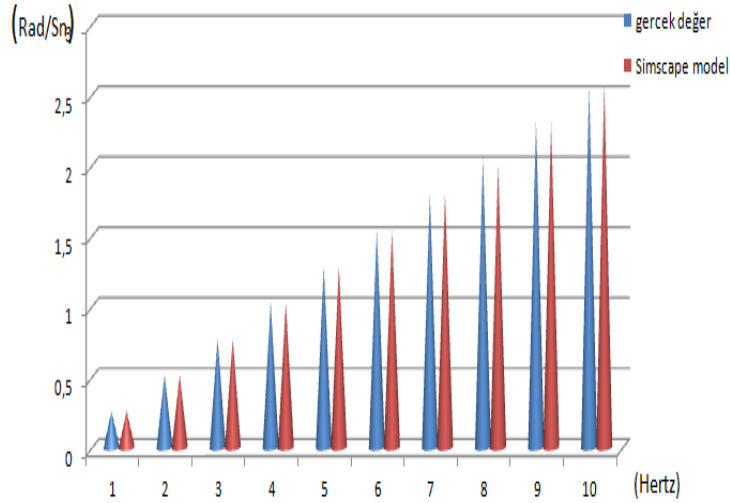


Şekil 2.3.8. 2500 Hz'de Açısal hız

Tablo 2.3.2. Gerçek ve deneysel veriler

Piezomotor deneysel hız(Rad/Sn)	SimScape model hız(Rad/Sn)	Hata (%)
0,2575	0,2574	0,38
0,515	0,514	0,19
0,7725	0,771	0,22
1,03	1,025	0,48
1,2875	1,2872	0,023
1,545	1,541	0,25
1,8025	1,8	0,34
2,06	2,01	0,22
2,3175	2,3175	0,19
2,575	2,574	0,38

Tablo 2.3.2: Piezo motor gerçek açısal hız değerleri ile simscape model açısal hız değerleri karşılaştırılmıştır ve bulunan hata değerleri verilmiştir.



Şekil 2.3.9. Verilerin karşılaştırmalı sonuçları

Şekil 2.3.9: Piezo motor simscape açısal hız değeri ve piezo motor gerçek açısal hız değerleri verilmiştir.

2.4 PİEZO MOTOR KONTROL SİSTEM UYGULAMASI

Otomatik kontrol sistemler dört kısımda incelenir.

- Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler
- Sürekli işaretli ,ayrık zaman işaretli ve olasıl işaretli sistemler
- Tek girişli-tek çıkışlı ve çok girişli-çok çıkışlı sistemler
- Zamanla değişen ve zamanla değişmeyen sistemler

Bu çalışmada doğrusal (linear) – zamanla değişmeyen (time invariant) sürekli zamanlı bir sistem olarak incelenecektir. Modelimizin farklı gösteriş biçimlerde incelenecek ve gerekli görüldüğü takdir de birbirine dönüştürülecektir. Bunun için uygun matlab formülleri ile programları kullanılacaktır. Ayrıca frekans cevap eğrisi, ve bode diagramları çizdirilerek sistemin karalılığı hakkında bilgi verilecektir. Kontrol edilen bir sistem çeşitli şekillerde modellenebilir bunlar başlıca aşağıda verilmiştir.

- Sistemin zaman (t-domeni) ekseninde diferansiyel denklem takımlarından oluşan modelidir.
- Durum uzay modeli, sistemin durum denklemlerinin kullanıldığı
- Sistemin transfer fonksiyonu, s-domeninde gösterildiği
- Ayrık zaman modeli, Z- domeni

2.4.1 Sistemin Transfer Fonksiyonu

Bir sistem ne kadar kompleks olursa olsun, sistemin girişi ile çıkışı arasında bir ilişki mevcuttur. Bu ilişkiyi de transfer fonksiyonu verir. Bir sistem doğrusal ve zamanla değişmez olduğu sürece transfer fonksiyonu belirlenebilir. Doğrusal sistemlerde sistemin giriş ve çıkış büyüklüklerinin laplace dönüşümleri alınır ve birbirine oranlanır ise sisteme ilişkin transfer fonksiyonu elde edilir. Verilen sistemin bazen s-domeninde transfer fonksiyonu verilmez, bu durumda sisteme ilişkin t-domeni eşitliklerinden hareketle sistemin transfer fonksiyonu bulunmaya çalışılır.

2.4.2 Bode Eğrisi

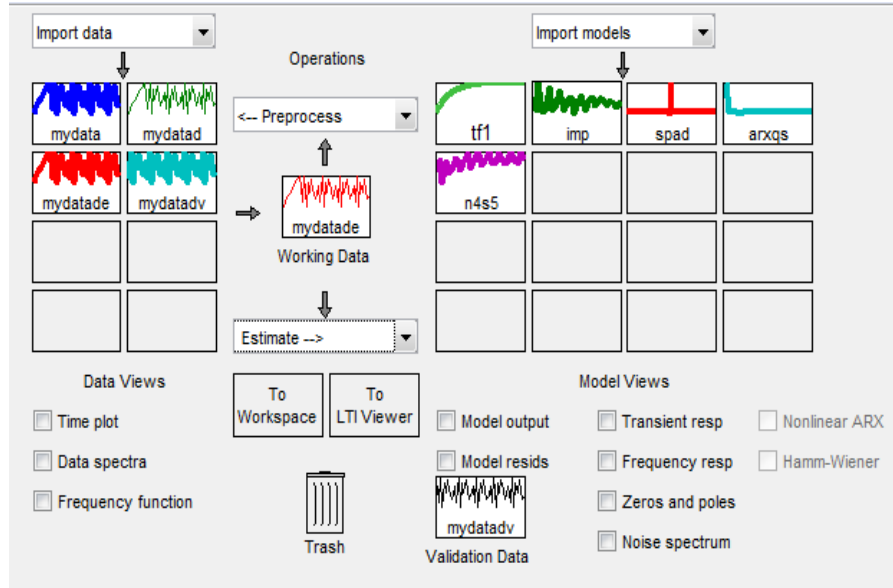
Bode eğrileri iki parçadan oluşur. Bunlardan ilki sistem çıkış genliğinin sistem giriş genliğine oranı $Vç/Vg$ 'nın frekans ile değişimini gösteren eğridir. Girişe uygulanan her farklı frekans değeri için $Vç/Vg$ oranı hesaplanır ve bu değişim çizilir. Bu değişimin geniş bir frekans bandında izlenebilmesini mümkün kılmak için yatay ve düşey eksen logaritmik yapılıdır. Bu eğrilerin ikinci parçası ise çıkış fazı ile giriş fazı arasındaki değerin frekans ile değişimini gösteren eğridir. Burada yatay eksen logaritmik düşey eksen ise derece cinsinden dağarlere sahiptir.

2.5 PİEZOMOTOR MODELLENMESİ VE KONTORLÜ

2.5.1 Sistem Tanımlama Tekniği ile Uygun Transfer Fonksiyonu Değerinin Araştırılması

Girilen girdi ve çıktı değerlerini karşılık bir sistem benzetim çalışmasını yapan Matlab çalışma ortamıdır. Öncelikle sistem prosesinize uygun elinizdeki verilerde dayanarak genel modellerden uygun olan seçilerekten başlanır. Model belirlendikten sonra sistem AIC (Akaike bilgi kriteri), SBC(Schwartz bayesian kriteri) gibi istatistiksel yöntemler kullanarak model uygunluğu için Geçici parametre tahminlerini yapmaktadır geçici parametre tahminleri sistemin son şeklinin ne olacağı hakkında kara vermek adına oldukça önemlidir. Uygun parametre değerlerinin bulunabilmesi için doğrusal regresyon algoritmalarından faydalanılmaktadır.

Bunlardan en önemlisi ve yaygın kullanılanı, en küçük kareler yöntemidir. Sistem tanımlama tekniği oto korelasyon yöntemi ile sistemin hangi modele uygun olduğunu tamamen sezgisel olarak belirler. Fakat model mertebesi için, AIC testi kullanılır.



Şekil 2.5.1.1. Sistem tanımlama tekniği çalışma alanı

Kontrol sistemi modelleme yöntemlerinde önemli noktalardan biride sisteme verilen girdi değişkenine karşılık sistemin çıktı değişkeni arasındaki yanıtların incelenmesidir. Diğer bir deyişle sistemimize girdi değişkenlerinin bir veya birkaç adım sonra sisteme nasıl etki edeceği sistemin ne cevap vereceği oldukça önem arz etmektedir. Yani temel amac sisteme x girdiği zaman y elde edilip edilmediğidir. Bu durumun yapılabilmesi için modelin doğru tahmin edilebilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada kullanılan girdi değerleri piezomotor frekans değerleri ve çıktı olarak buna karşılık gelen encoder değerleri kullanılmıştır.

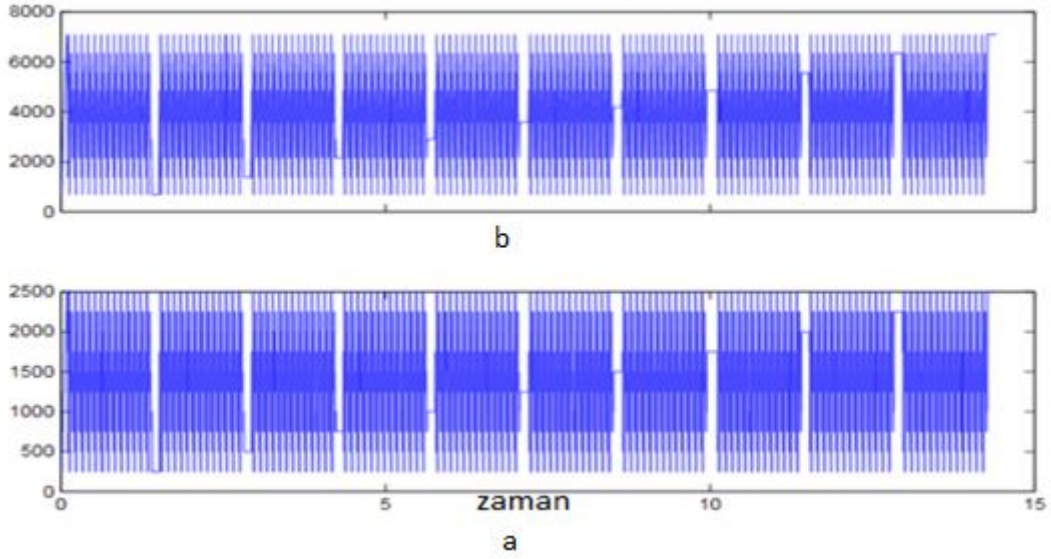
Sistem girdi ve çıktıları için bu değerleri seçmekteki temel amacımız piezomotor çalışma prensibinin bilindiği gibi tamamıyla adımlama frekansiteknolojisi üzerine kurulmuş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden piezomotorun adım frekans performansı en belirleyici karakteristik özelliğidir.

Tablo 2.5.1.1. Girdi ve çıktı değerleri

Frekans(Hertz)	Encoder	Hız(Rad/Sn)	Pozisyon(mRad)
250	677	0,2575	113
500	1368	0,515	233
750	2147	0,7725	372
1000	2896	1,03	522
1250	3572	1,2875	673
1500	4190	1,545	817
1750	4842	1,8025	912
2000	5569	2,06	1087
2250	6347	2,3175	1278
2500	7082	2,575	1384

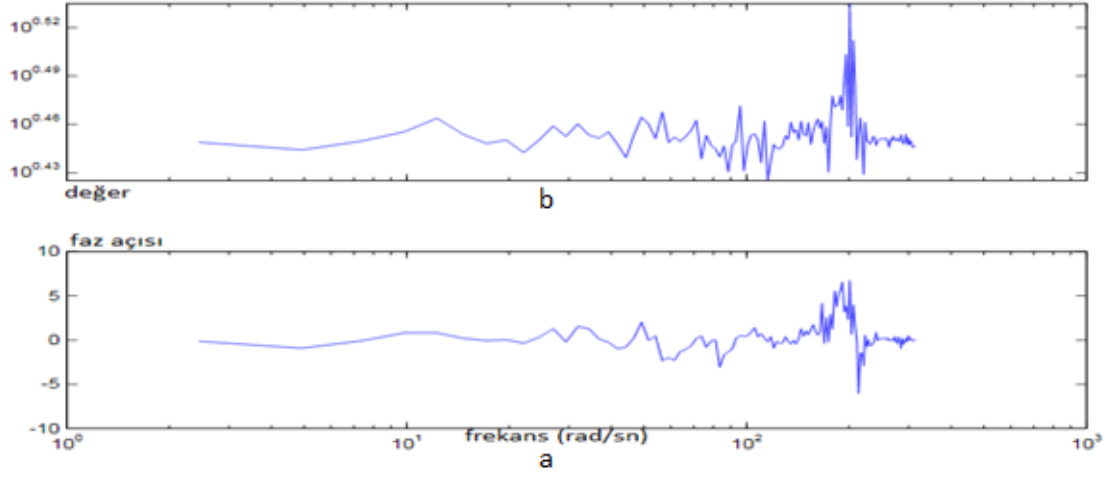
Sistemde Tablo 2.5.1.1’de görülen frekans ve encoder değerleri girdi ve çıktı olarak kullanılmıştır, girdi değerleri olduğu gibi sisteme verilmez bu değerlerden Şekil 2.5.1.2’de görülen 1450 örneklem oluşturulmuş, ayrıca bulunan transfer fonksiyonu’nun doğruluğunu kanıtlamak adına girdiler rastgele belli bir kurala bağlı kalmaksızın karıştırılmış ondan sonra girdi olarak kullanılmıştır. Sisteme ilişkin transfer fonksiyonu t- domeni eşitliklerinden hareketle girdi olarak frekans, çıktı olarak encoder değerleri kullanılarak bulunmuştur. Tahminleme sonucu elde edilen transfer fonksiyonu sistemimize %90,1 uyumludur. Bulunan transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$TF_{LR17} = \frac{2,815s+5135}{s+1826} \quad (2.5.1.1)$$



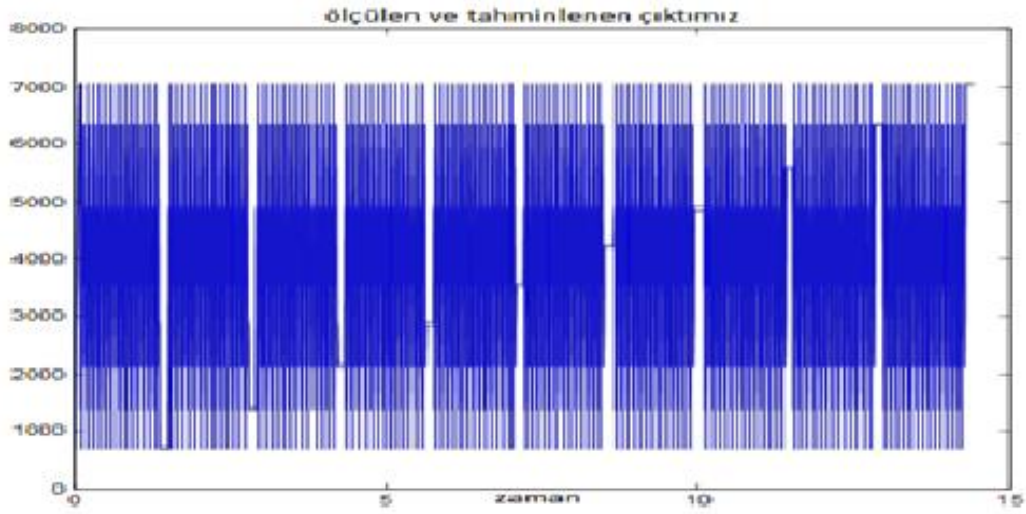
Şekil 2.5.1.2. Zaman tabanlı girdi ve çıktı değerlerimiz

Şekil 2.5.1.2. Sistem tanımlama tekniğinde uygun transfer fonksiyonunu bulmak için kullanılan değerlerimiz: Şekil 2.5.1.2'a; kısmı zaman tabanlı girdi değerlerini, Şekil 2.5.1.2'b; kısmı ise zaman tabanlı çıktı değerlerini göstermektedir.



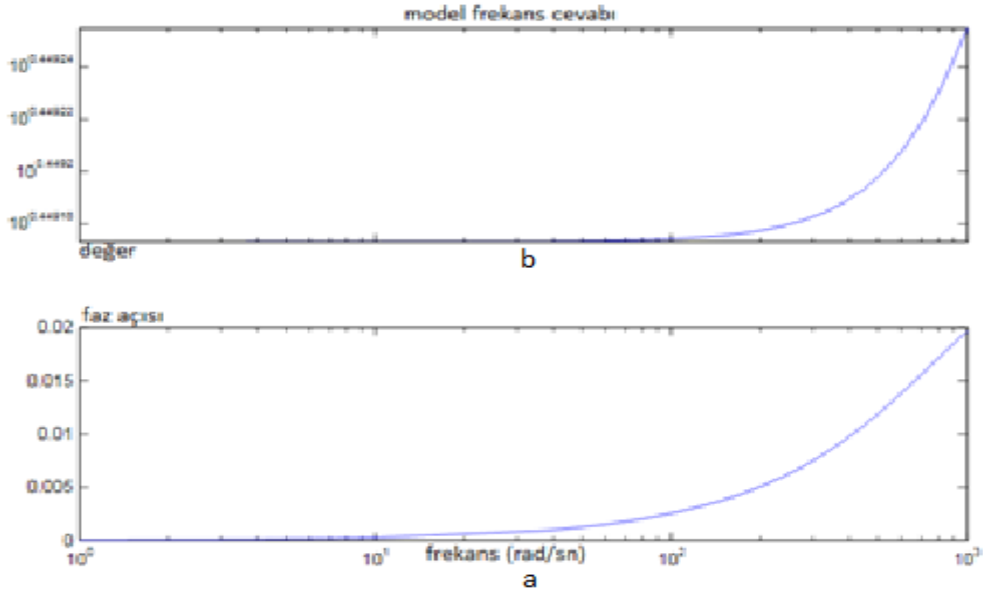
Şekil 2.5.1.3. Girdi ve çıktı değerlerine ait model frekans fonksiyonu

Şekil 2.5.1.2: Sistem tanımlama tekniğinde girilen girdi ve çıktı değerlerine karşın oluşturulan frekans fonksiyonu görülmektedir. Şekil 2.5.1.2'a;girdi, Şekil 2.5.1.2'b; çıktı değerine aittir şeklin x-ekseni model frekansını (rad/sn), y-ekseni ise model girdi ve çıktı değerine ait faz açısı ve değeri vermektedir.



Şekil 2.5.1.4. Model çıktımız

Şekil 2.5.1.4: Sistem tanımlama tekniğinde çıktı değerlerine karşın ölçülen ve tahminlenen çıktı değeri görülmektedir. Tahminlenen değerimiz % 97,43 uyumludur.



Şekil 2.5.1.5. Model frekans cevabı

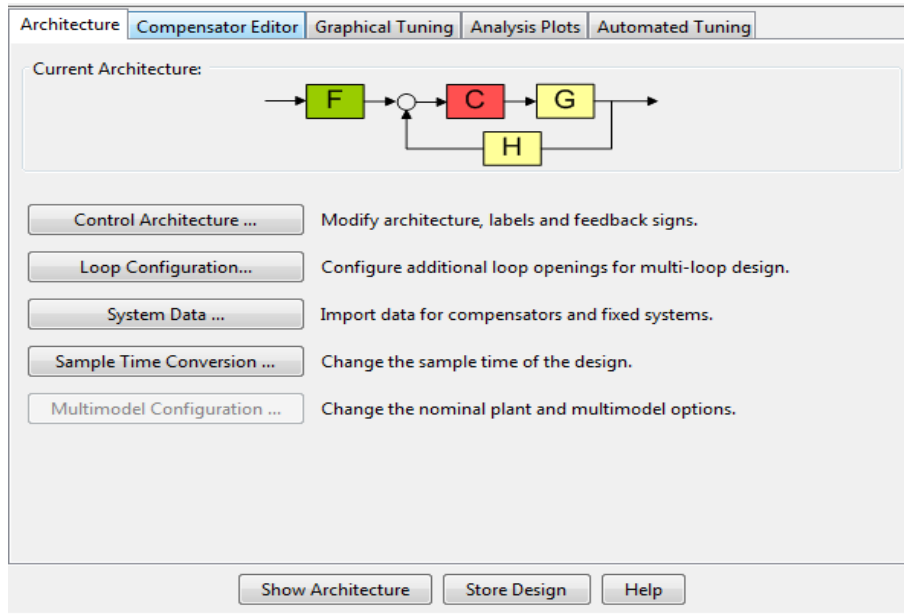
Şekil 2.5.1.5: Sistem tanımlama tekniğinde oluşturulan modelin frekans cevabı görülmektedir, Şekil 2.5.1.5'a; frekans ve ilgili faz açısı değerleri, Şekil 2.5.1.5'b; ise frekans ve frekansa bağlı genlik değeri gösterilir.

2.5.2 Kontrol ve Tahmin programı (SISOTOOL)

Matlab, mühendislik alanında karşılaşılan matematik problemlerinin çözümünde, analizinde ve bu hesaplamalara yönelik uygulamaların hazırlanmasında kullanılmak üzere geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır [23]. Açılımı (Matrix Laboratory) olan Matlab, her alan için özel olarak geliştirilmiş araç adı verilen paket kütüphaneleri sayesinde çeşitli mühendislik dalları için vazgeçilmez bir program haline gelmiştir. Bu araçlar sayısal işaret işleme, test ve ölçüm, finansal modelleme ve analiz, haberleşme gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Matlab araçlarından biri ise kontrol ve tahminleme programı geniş kütüphanesi ve kullanışlı fonksiyonları ile daha çok kontrol mühendisleri ve otomatik kontrol ile ilgilenenler tarafından kullanılmaktadır. Kontrol ve tahmin programı ile transfer fonksiyonu, durum-uzay modeli gibi model gösterim biçimleri arasında geçişler yapılabilir ve istenilen model gösterim biçimi üzerinde sistem ile ilgili çeşitli analizler yapılabilmektedir [23]. Aşağıda bu araç kutusunda bulunan kontrol sistem tasarımında ve kendi çalışmamızda kullandığımız, model üzerinde gerçek zamanlı müdahale imkanı veren araç kutusuna ait özellikler verilmiştir.

- Kök-yer eğrisi yardımı ile incelenen kontrol sisteminin kapalı çevrim dinamiklerini değiştirmek
- Sistemin açık çevrim bode eğrisini biçimlendirmek
- Sisteme yerleştirecek kontrole sıfır ve kutup ilave etmek

- Sisteme ileri veya geri faz kaydırıcı devre ve centik filtre ilave etmek ve ayarlamak
- LTI wiewer penceresini kullanarak sist kapalı çevrim cevabını incelemek
- Faz ve kazanç paylarını ayarlamak
- Elde edilen modeli ayırık sistem sürekli sistem eşdeğerine dönüştürmek
- Şekilde de görüldüğü G,H,F,C seçenekleri default olarak 1 değerini alabilirler $G(s), H(s), F(s), C(s)$ ve $F(s)$ fonksiyonları matlab ortamında çeşitli bir şekilde saklanmış olabilirler biz örneğimizde ise $G(s)$ fonksiyonumuzu sys adı altında worksapce ortamında sakladık sistemimizi oluşturmaktadır. Aynı şekilde $C(s)$ fonksiyonumuz sys1 adı altında pid kontrolümüzü temsil etmektedir.
- G kontro edilen motoru
- H sensör dinamiği
- F önfiltre
- C kompanzatör
- F,H,C nin default değerleri 1 dir



Şekil 2.5.2.1. Sisotool çalışma ortamı

2.5.3 Piezo Motor'un Kontrol Sistem Tasarımı Ortamında Modellenmesi ve Kontrolü

Sisotool, MATLAB programındaki tek giriş-tek çıkışlı doğrusal sistemlerin zaman ve frekans boyutundaki yöntemler ile tasarlanmasına ve analiz edilmesine olanak sağlayan bir kullanıcı arayüzüdür [23].

Bu kullanıcı arayüzü aşağıdaki beş sekmeden oluşmaktadır:

”Oluşturma”-”Kompansatör Editör”-”Grafiksel Ayar”-”Durum Analizi” -”Otomatik Ayarlama”

Oluşturma: Kısımında sistemde bulunan blok diyagram yerleşimleri ve döngü yapıları belirlenebilir. İstenen bloklar için dışarıdan veri aktarma ve tanımlama işlemleri de bu sekmede gerçekleştirilir [24] .

Kompansatör Editör: Kısımında sisteme yeni kazançlar, kutuplar veya sıfırlar eklenebilir ya da değerleri değiştirilebilir [24] .

Grafiksel ayar: Sekmesinde altı adet farklı grafik üzerinden, açık döngü yapılarında kök yereğrisi, açık döngü Bode ve Nichols diyagramları, kapalı döngü yapılarında kapalı döngü Bode diyagramı kullanılarak grafiksel ayarlama ile analiz ve tasarım yapmak mümkündür [24].

Durum Analizi: Kısımında sistemler için basamak ve impuls cevapları, Bode, Nyquist, Nichols diyagramları ve kutup sıfır haritaları elde edilerek sistemlerin analizi gerçekleştirilebilir [24].

Otomatik Ayarlama: Sekmesinde tasarlanan denetleyicinin ayarlanması için otomatik ayarlama yapan beş farklı yöntem bulunmaktadır [24].

Optimizasyon Tabanlı Ayarlama: Metodunda kullanıcı tarafından belirlenen sistemin performans kriterlerini sağlayacak şekilde denetleyici parametrelerini otomatik olarak ayarlanır. Bu metodun kullanılabilmesi için “MATLAB Simulink Optimizasyon tasarımı ” aracının yüklü olması gerekmektedir [24].

Model Kontrol Ayarlama: Metodu matematiksel modeli hatasız olarak bilinen sistemler için daha uygundur. Çünkü sistemin modeli hatasız ise IMC metodunda oluşturulacak geribesleme ile oluşan kapalı-döngü sistem kararlı olacaktır. Bu metod hem kararlı hem de kararsız sistemler için uygulanabilir [24].

LQG Synthesis: Yönteminde de oluşturulacak geribesleme ile oluşan kapalı-döngü sistem kararlıdır. Bu yöntemde ise modelin hatasız olarak bilinmesine gerek yoktur [24].

Loop Shaping: metodunu kullanabilmek için “MATLAB Robust kontrol aracı” yazılımı yüklü olmalıdır. Bu yöntemde döngü şekli bantgenişliği ya da açık döngü frekans cevabı olarak tanımlanabilir

PID Aracı: metodunda temel olarak iki farklı ayarlama söz konusudur. Bunlarda “Robust response time” seçeneği ile denetleyici tasarımı yapılırsa denetleyici parametreleri sistemin robust ve kararlı olmasını sağlayacak şekilde hesaplanır. Eğer bu seçenek altında tasarım metodu olarak “Interactive” seçilmiş ise PID parametreleri kullanıcı tarafından belirlenen bandgenişliği ve faz payına göre hesaplanır [23].

Yaklaşık MIGO Frekans Cevabı: seçeneğinde kapalı döngü sistemlerin frekans boyutunda MConstrained Integral kazancının yakınsaması kullanılır. -”yaklaşık MIGO adım cevabı” seçeneğinde açık döngü sistemlerin zaman boyutunda M-Constrained Integral kazancının yakınsaması kullanılır.

Skogestad IMC: Seçeneği kullanılırsa sistem, zaman gecikmeli birinci derece modele yakınsar ve denetleyici parametreleri Skogestad formülü ile hesaplanır. - “Ziegler – Nichols frequency response” seçeneğinde denetleyici parametreleri ZN frekans cevabı tablosuna göre hesaplanır. - “Ziegler - Nichols step response” seçeneğinde denetleyici parametreleri ZN basamak cevabı tablosuna göre hesaplanır. -“Chien – Hrones - Reswick” seçeneğinde denetleyici parametreleri CHR metodunun 0 aşım ve yük dağılım tablosuna göre hesaplanır [25].

Şekil 2.5.3.1 Sisotool ortamında oluşturulan piezomotor modeli verilmiştir. Bu modelde bulunan ifadeler **F,C,G,H** aşağıda verilmiştir.

F: Önfiltr kısımdır. Kontrol edilen parametre değeri girilir, başlangıç değeri 1’dir.

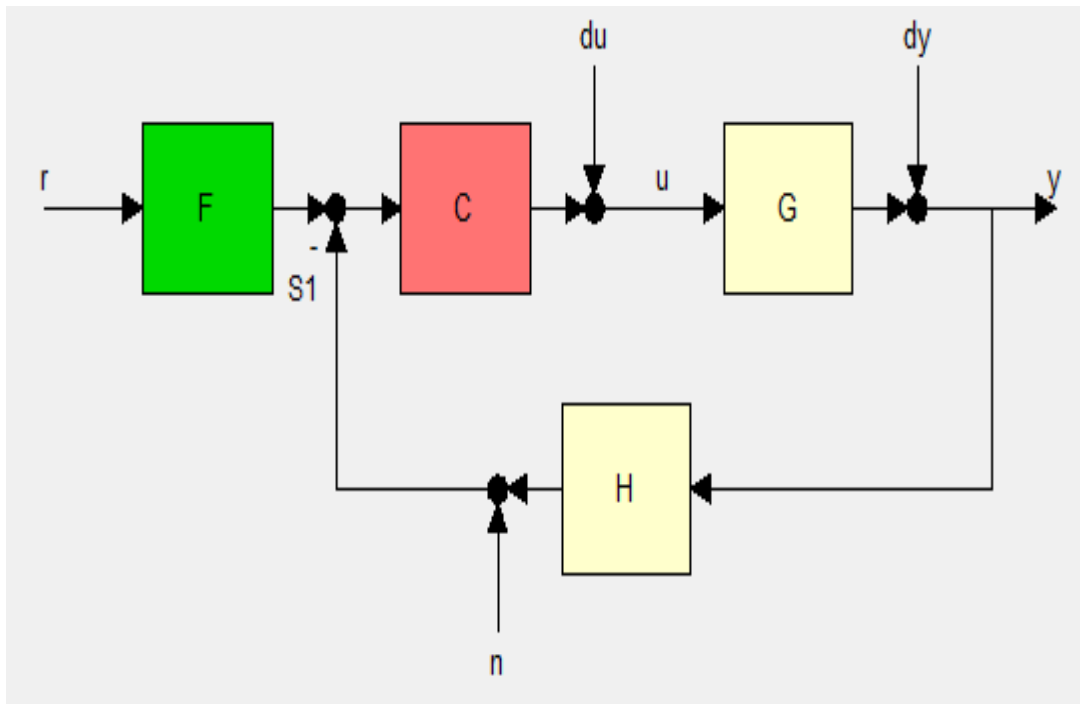
C: Sistem için tasarlanan Kontrolörü temsil eder. Hangi kontrolörün kullanılacağı araştırmacı belirler, SISOTOOL üzerinde bulunan araç kutusu kontrolör tasarlamaya imkan verdiği gibi, kullanıcı MATLAB üzerinde bulunan başka kontrol tasarımı programı kullanarak da kontrolör tasarlayıp daha sonra bu kısma ilave edebilir. Örneğin bu çalışmada tasarlanan kontrolör PID araç kutusu içerisinde tasarlanmış daha sonra MATLAB workspace ortamında kontrolör dosyası sys2_kontrolör adı dosyaya çevrilerek SISOTOOL ortamında kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken her progamın kendine has komut adı olduğu ve bu komutların birbirine doğru çevrilmesi gerektiğidir.

G: Kontrol edilen sistemi temsil eder. Bu çalışmada kullanılan G değeri piezo motor transfer fonksiyon değeri ve bu değeri, sistem tanımlama tekniğinde tahminleme yöntemi ile bulunmuştur.

Piezo motor transfer fonksiyonunu bir önceki bölümde sistem tanımlama tekniğinden nasıl elde ettiğimizi ayrıntılı bir şekilde anlatık. Sistem tanımlama tekniğinden elde ettiğimiz transfer fonksiyonunu sisotool modelimize aktarmak için sys_piezomotor adlı dosya altında workspace ortamında sakladık ve daha sonra SISOTOOL araç kutusuna ekledik.

H: Sensör dinamiğidir, bu değeri başlangıç değeri 1 olarak kullandık.

Sisotool ortamı modelleme ve kontrol için oldukça kolay ve önemli bir arayüzdür özellikle modelimize baktığımızda görülebileceği gibi r, du, dy, u, y, n girişleri arasındaki açık-kapalı çevrim sistemin step, impulse, bode, nyquist, nichols diagramları ve kutup ve sıfırları hakkında ayrıntılı inceleme imkanı sunmaktadır.



Şekil 2.5.3.1. Piezo motor modellenmesi ve kontrolü

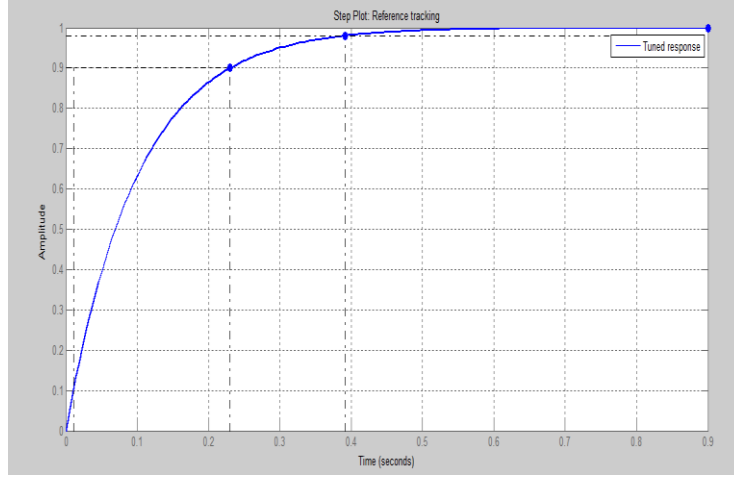
Piezo motor model üzerinde kullanılan değerlerimiz aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{G} = \frac{1,037s+1299}{1256} \quad (2.5.3.1)$$

$$\mathbf{C} = \frac{16,4421}{s} \quad (2.5.3.2)$$

$$\mathbf{H} = 1 \quad (2.5.3.3)$$

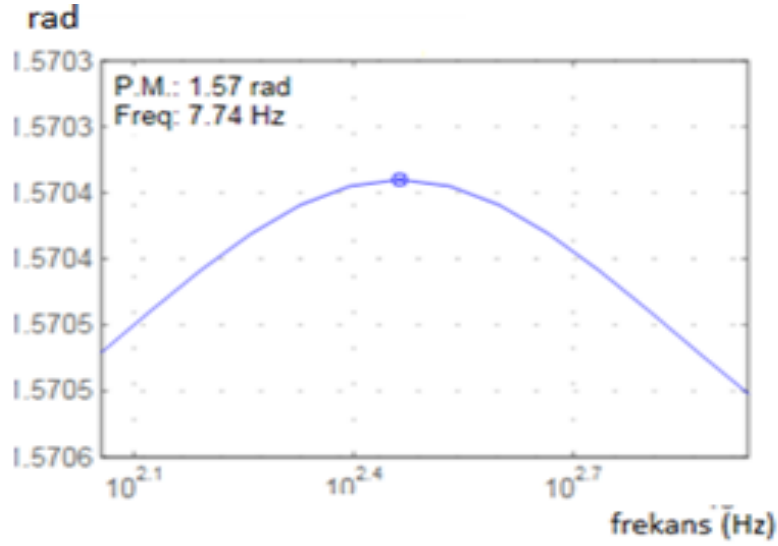
$$\mathbf{F} = 1500 \quad (2.5.3.4)$$



Şekil 2.5.3.2. Sistem için tasarlanan basamak fonksiyonu

Şekil 2.5.3.2 PID araç kutusu ortamında piezo motor kontrolü için tasarlanan, kontrolörü göstermektedir. PID araç kutusu kullanımı oldukça kolaydır ve gerçek zamanlı müdahale imkanı verdiği için kullanımı tercih edilmiştir. Grafik üzerin yerleşme zamanı, yükselme zamanı değeri ayrıntılı biçimde verilmiştir.

Tasarlanan kontrolür değeri. $\frac{16,4421}{s}$

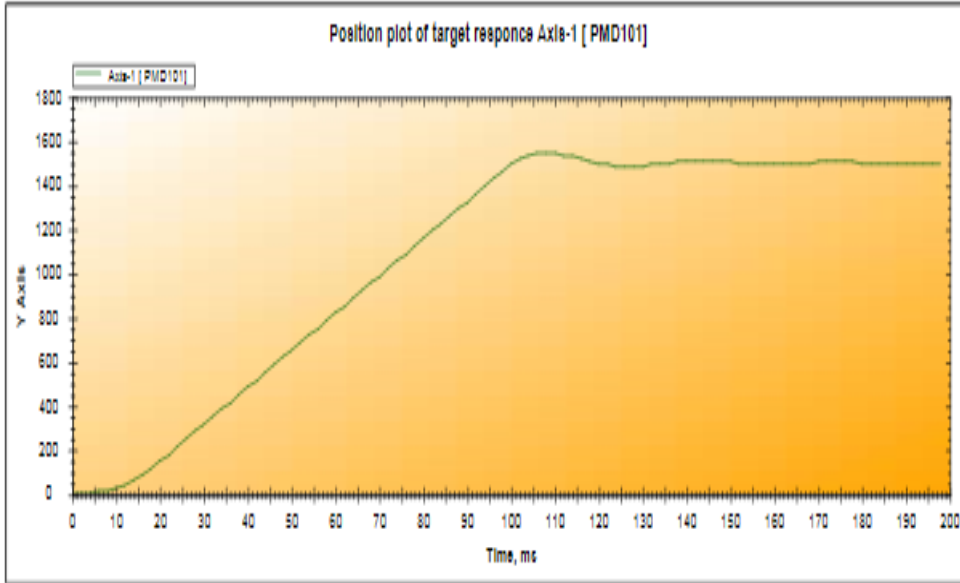


Şekil 2.5.3.3. Model bode diagramı

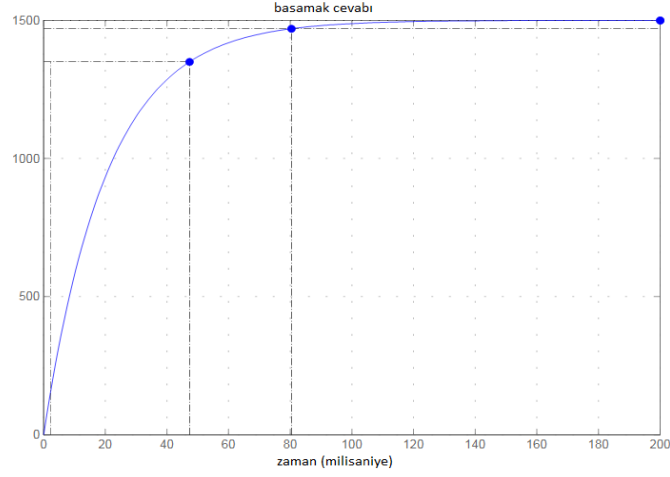
Tablo 2.5.3.1. Sistem bode diagramı ve piezo motor sonuç değerleri

Birim	Konum(mRad)	Frekans(hertz)
Piezomotor	1570	2770
Model	1570	2327

Doğrusal olmayan, zamanla değişmeyen bir kontrol sisteminin frekans domeni davranışı şöyle tanımlanır. Sistemin girişine genliği sabit fakat frekansı değişken bir sinüzoidal giriş işareti uygulandığında sistemin çıkışında elde edilen çıkış işaretini belirlemek, sistemin frekans domeni davranışını belirlemek demektir. Bu durumu inceleme adımlarından biriside bode diagramıdır. Şekil 2.5.3.3 Model bode diagramını gösterir. Bode diagramının ikinci eğrisindeki değer Tablo 2.5.3.1’de piezo motor’un gerçek değeri ile karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir.

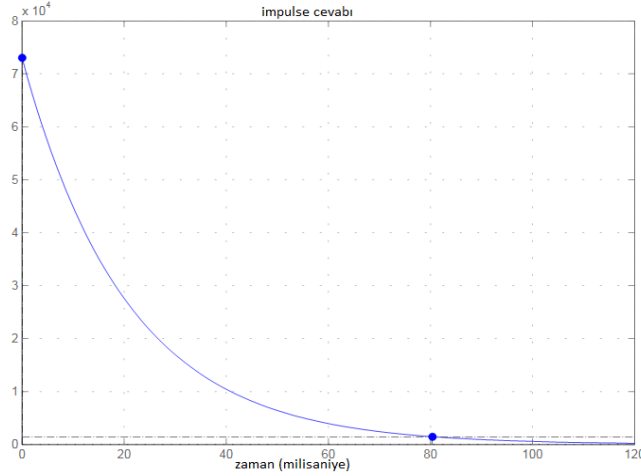


Şekil 2.5.3.4. Piezo motor basamak cevabı



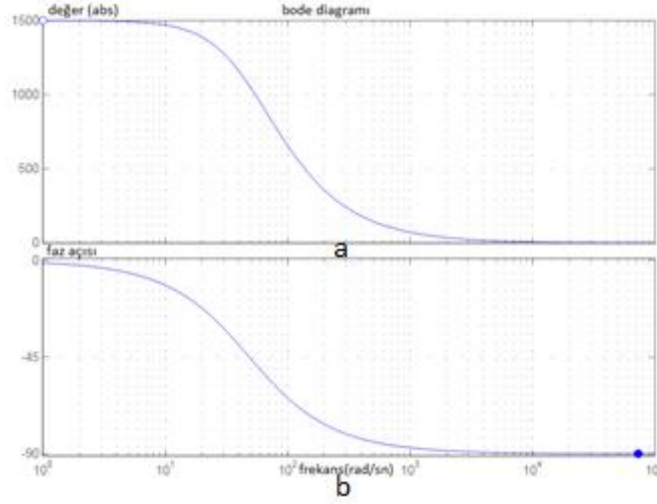
Şekil 2.5.3.5. Sistem basamak cevabı

Şekil 2.5.3.4: Piezo motor basamak cevabı. Şekil 2.5.3.5: Tasarlanan modelin basamak cevabı verilmiştir. Bu iki şekile baktığımızda genel olarak piezo motor aşırı sönümlü, model ise kritik sönümlüdür. Piezo motor yellerşme zamanı 125 milisaniye iken, model 80 milisaniyedir. Model'den daha iyi sonuç alınması piezo motor yapısındaki doğrusal olmayan parametreler iyileştirildiği zaman piezo motor için daha iyi bir kontrolörün tasarlanabileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.5.3.6. Sistem impulse cevabı

Şekil 2.5.3.6: Tanımlanmış olan piezo motor sisteminin birim darbe (impulse) cevabı gösterilmiştir. Birim darbe cevabıda tıpkı birim basamak cevabı gibi sistem tanımlamada kullanılır. Bir sistemin girişine birim darbe fonksiyonu uygulanırsa sistemin çıkışından alınan sinyale, sistemin birim darbe cevabı denir.

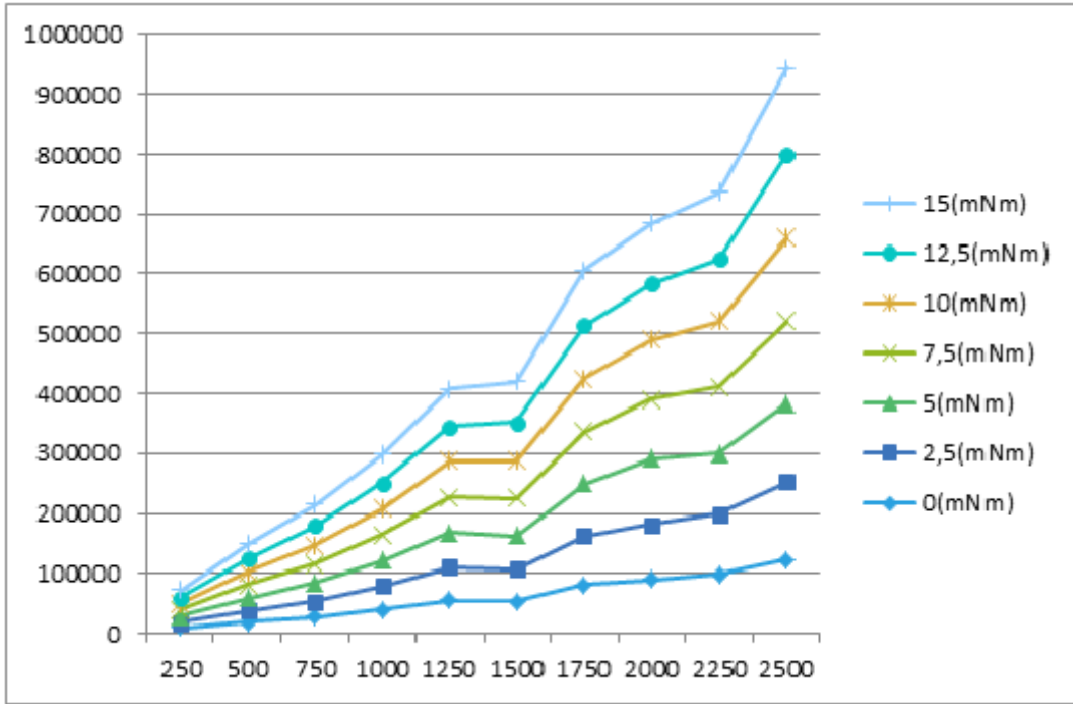


Şekil 2.5.3.7. Sistem bode diagramı

Şekil 2.5.3.7: Şeklin a kısmında kontrol edilen piezo motor konum değerine karşılık frekans cevabı ve b kısmı ise bu değerlere ait frekans , faz açısı değeri verilmektedir. Tablo 2.5.3.1’de modelin bode diagramından elde edilen konum ve frekans değeri, piezo motor’un gerçek verileri ile karşılaştırılmıştır. Modelden elde edilen değerlerin gerçek değerler ile uyumluluğu görülmekte ve bu değerlerin aynı zamanda piezo motor başlangıç değerleri ile uyumlu olması modelin uygunluğunu göstermiştir.

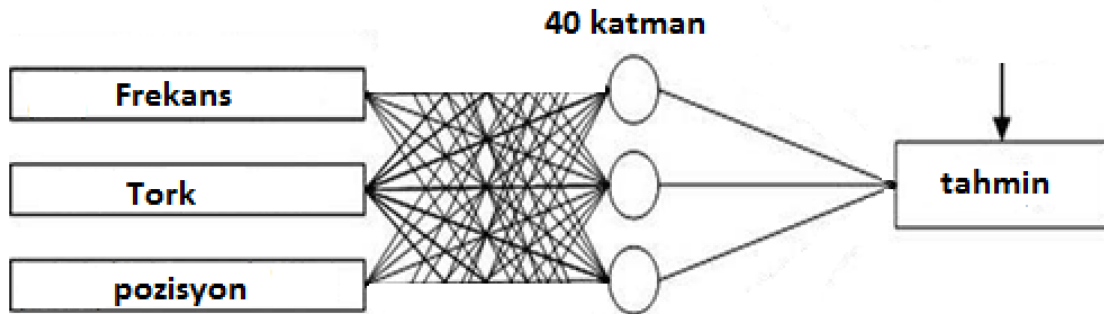
2.6 Piezo Motor Yapay Sinir Ağı Uygulaması

Kontrol tasarımı yöntemlerinde kullanılan yapay sinir ağları insan beyninin öğrenme şekli örnek alınarak oluşturulmuştur. Bu durum tamamıyla deneyerek öğrenme ve genelleştirme esasına dayalıdır. Biyolojik sinir sistemi merkezinde sürekli olarak bilgiyi alan yorumlayan ve bilgiye uygun bir karar üreten üç aşamalı bir sistem mevcuttur. Alıcı sinirler canlı organizmanın dışında veya içerisinde aldıkları uyarıları beyne bilgi ileten elektriksel sinyallere dönüştürürler. Beyin ise tepki sinirleri sayesinde ürettiği elektriksel sinyalleri organizma çıktısı olarak uygun tepkilere dönüştürür. Yapay sinir ağlarında ise girdi değerleri ve buna karşılık gelen çıktı değerleri verilmekte ve sinir ağına bunlar arasındaki ilişkiyi öğrenmesi amaçlanmaktadır. Böylece sinir ağının eğitimi sağlanmış olunur. Yapay sinir ağlarında bilgi akışı geri beslemeli ve ileri yönlü beslemeli şeklinde olmaktadır. Bu çalışma da uygulanan sistem ileri yönlü beslemeli bir sistemdir. İleri yönlü beslemeli bir sistem de bilgi akışı ileri yönde, bir girdi katmanı, bir çıktı katmanı bulunur. Bunlara ek olarak gizli katmanlarda bulunmaktadır. Bütün aşamalarda katman sayısı oldukça önem arz etmektedir, bu sayı her ne kadar giriş ve çıkış değerlerine bağlı olarak belirlense de kesin olarak ancak deneme yolu ile gerçek sayısı bulunur.



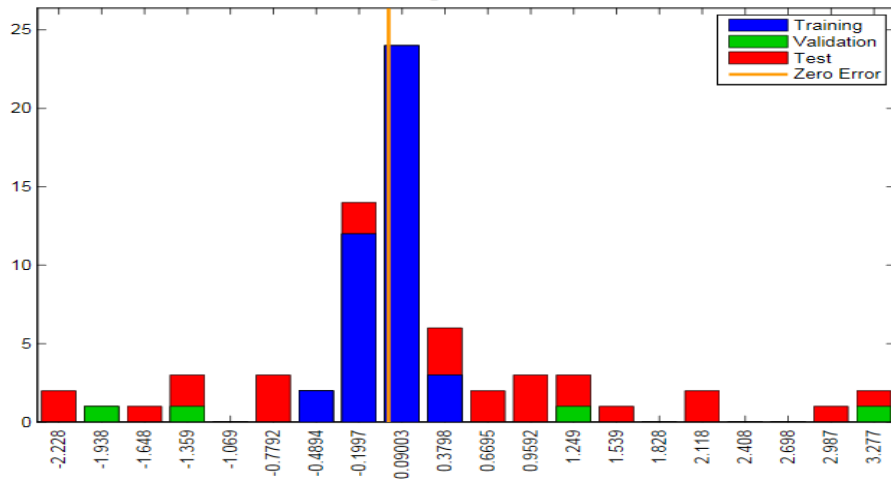
Şekil 2.6.1. Sinir ağı uygulaması için kullanılan piezo motor girdi ve çıktı değerleri

Piezo motor sinir ağı uygulamasında piezo motor'un 250(Hz)-2500(Hz) değerleri arasındaki değerleri 250(Hz) artırarak, ayrıca motor torkunda 0(mNm)-15(mNm) değerine kadar 2,5(mNm) artırarak konum değerlerine bağlı piezo motor için bir sinir ağı uygulaması yapılmıştır. Oluşturulan kontrolör belirli tork değerlerinin çeşitli frekanslardaki konum değerlerini kontrol etmektedir. Öncelikle belirlenen girdi ve çıktı değerleri excel ortamında hazırlanmış, yapay sinir ağlarında eğitime tabi tutulacak şekilde kullanılmıştır. Eğitim için hazırlanan veriler daha sonra matlab workspace ortamı üzerinden yapay sinir ağı programına'a eklendi, en son kısımda program için gerekli olan optimum tabaka sayısı deneme yöntemi ile bulundu.



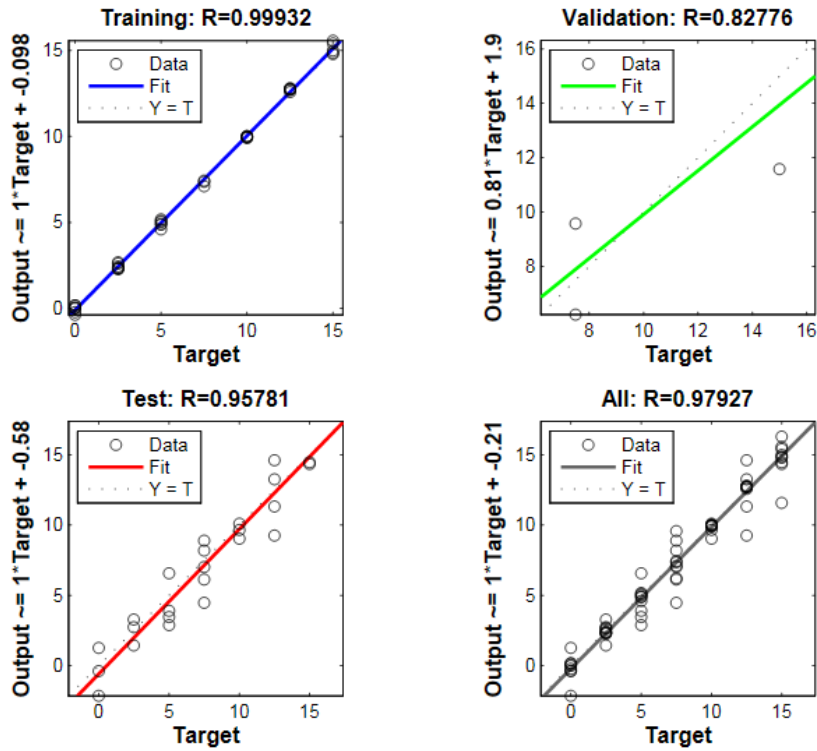
Şekil 2.6.2. Piezomotor yapay sinir ağı modeli

Bu çalışma için gerekli olan katman sayısı deneme yöntemi ile 40 olarak saptanmıştır.



Şekil 2.6.3. Hata diagramı

Eğitilmiş sinir ağı hata diyagramı sinir ağının data'ya uygunluğunu ölçen yöntemlerden bir tanesidir. Diyagram hata boyutlarının nasıl dağıldığını gösterir. Genellikle çoğu hatalar sifıra yakın olur, çok az istisnai durumda gözlemlenebilmektedir. Burada mavi bar eğitim verilerini temsil eder, yeşil olan doğrulama verilerini kırmızı olan ise test verilerini temsil eder.



Şekil 2.6.4. Eğitilmiş sinir ağı kontrol programı

Tablo 2.6.1. Sinir ağı performans değerleri

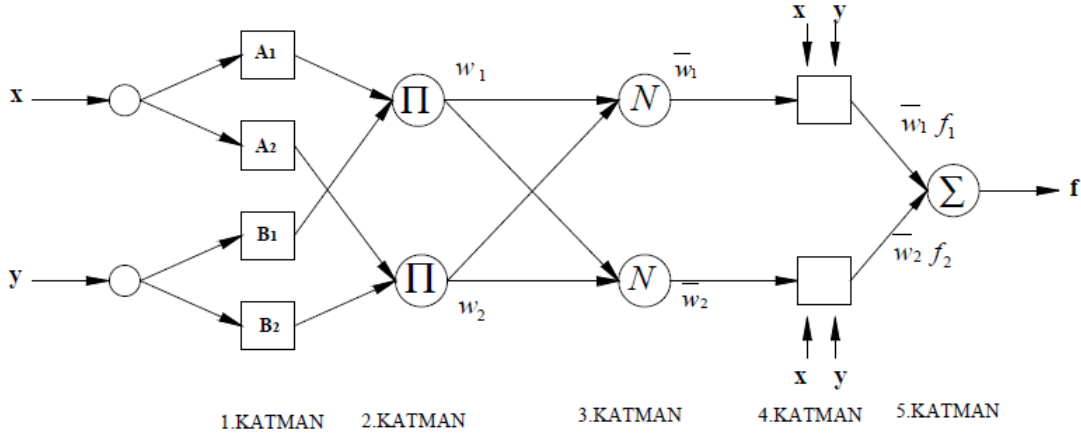
Katman sayısı	Tüm durum	Eğitim
40	0,97	0,99
30	0,95	0,97
55	0,96	0,97
150	0,72	0,95

Eğitilmiş yapay sinir ağları artık test numunelerine göre ölçülebilir hale gelmiştir. Bu durum gerçek dünyadan eğitilmiş sinir ağına data uyguladığımız anda sistem hakkında daha iyi bir yorum hissi vericaktır. Özellikle Şekil 2.6.4'e bakılırsa grafiğin eğim değerinin 0,97 olması modelin uygunluk değerini temsil eder. Özellikle araştırmacılar arasında yaygın olarak kabul edilen değer % 90 ve üzeri değer iyi sonuç verdiğidir. Şekil 2.6.4'ü incelediğimizde 0(mNm) ile 15(mNm) değerleri arasındaki datalar için sinir ağı bir uygunluk fonksiyonu bulmaya çalışmış ve %97,9 başarı performansı ile 40 katman değerinde bunu gerçekleştirmiştir. Sinir ağı performans grafiğindeki (Şekil 2.6.4)'de bulunan Eğitim, Onaylama, Test, Ortak Performans bunlar arasında bir ilişkiden doğrusal bir ilişkiden söz edilemez, yani bir değer yüksek olması diğer değerinde yüksek olacağı anlamına gelmez ama genel anlamda yüksek bir değer ortak performansı da yükseltir bu durumu özetleyen Tablo 2.6.1 piezo motor kontrol tasarım çalışması üzerinden alınan sonuçları içermektedir.

2.7 Piezomotorun Uyarlanabilir Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile Kontrolü

Endüstriyel gelişmeler, teknolojik yenilikler düşük enerji ile yüksek verimli iş üretimi 21.Yüzyılın önemli gelişmelerinden olmuştur. Şüphesiz otomasyon ve kontrol sistemleri çağımızda teknolojinin ve sanayinin üretim merkezine yerleşmiş durumdadır ve bu sistemlerin kontrol kabiliyeti iş ayağının en önemli kısmını teşkil etmektedir. Bu yüzden iş ayağının bu kısma yapay zeka teknikleri kullanılarak yapılmaya çalışılmaktadır. Yapay zeka teknikleri içinde ise gerçeğe en yakın sonucu veren bulanık mantık tır. Sinir ağları ile alakalı kısımda ise yukarıdaki kısımda değinilmiştir. Bir de bu iki sistemin kullanıldığı ANFIS sistemi mevcuttur. ANFIS bu iki sistemin birlikte kullanıldığı önemli bir bileşendir, yapay sinir ağı ham veriler ile iyi sonuç veren düşük seviyeli bir yapıdır. Bulanık mantık ise uzman görüşü bilgilerini kullanarak daha yüksek seviyeli sonuçlar çıkarmaktadır. Bulanık mantığın öğrenme kabiliyeti yoktur. Yapay sinir ağı tamamıyla öğrenme kabiliyetlidir. Bu iki sistem birlikte kullanılan tamalayıcı araçlardır. ANFIS, ele alınan bütün problemler için oluşturulan yapılara göre olası tüm kuralları atayabilmekte veya kuralların veriler yardımıyla uzman tarafından oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

ANFIS'in kural oluşturabilmesi veya kural atanmasına imkan vermesi uzman görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle birçok tahmin probleminde yapay sinir ağlarına uzman görüşlerinden faydalanma imkânı tanıdığı için ortalama hata kareler kriterine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 2.7.1. Anfis yapısı [26]

Şekil 2.7.1’de 5 katmandan oluşan 2 girişi ve 1 çıkışı olan 2 kurala sahip bir ANFIS yapısı gösterilmektedir. Şekil’de gösterilen ANFIS yapısında bulunan katmanlar ve işlevleri aşağıda verilmiştir [27].

1.Katman: Giriş katmanı olarak adlandırılır. Buradaki her bir düğümden alınan giriş değerleri diğer katmanlara aktarılır. Bulanıklaştırma katmanı olarak adlandırılır. Bu katmanda yer alan her bir i düğümü adaptif bir düğümdür ve çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanı

$$O_i^1 = \mu A_i(x) \quad (2.7.1)$$

Burada x inci düğümünün girişidir ve A_i bu düğüm fonksiyonuna ilişkin dilsel etikettir (küçük, büyük, vb). Başka bir deyişle, O_i^1 düğüm çıkışı A_i 'nin üyelik fonksiyonudur ve fonksiyonu genellikle maksimumu 1 ve minimumu 0 olan çan-biçimli olarak seçilir [26].

2.Katman: Kural katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, Sugeno bulanık mantık çıkarım sistemine göre oluşturulan kuralları ve sayısını ifade etmektedir. Bu katmandaki her bir düğüm, kendisine gelen işaretlerin çarpımını çıkış olarak üreten sabit bir düğümdür [26].

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) \quad (2.7.2)$$

3.Katman: Normalizasyon katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm kural katmanından gelen tüm düğümleri giriş değeri olarak kabul eder ve her bir kuralın normalleştirilmiş seviyesini aşağıdaki eşitlik ile hesaplar [26].

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (2.7.3)$$

4.Katman: Durulaştırma katmanıdır. Durulaştırma katmanındaki her bir düğümde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değeri hesaplanır. Bu katmana ait her i düğümünün fonksiyonu aşağıdaki gibi adaptif bir düğümdür [26].

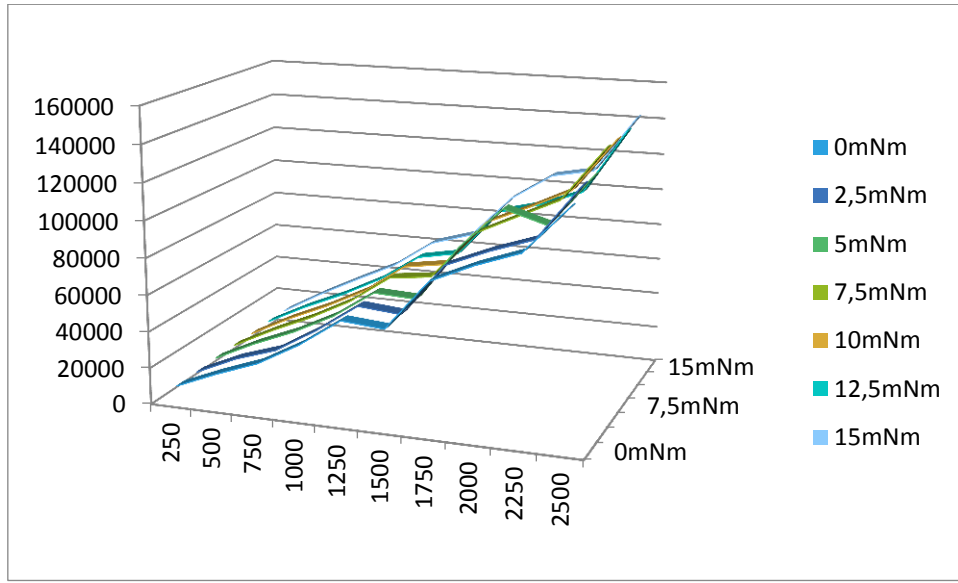
$$\bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (P_i x + q_i y + r_i) \quad (2.7.4)$$

Burada \bar{w}_i üçüncü katmanın çıkışı olup, (P_i, q_i, r_i) ise bu katmanda bulunan düğüm parametrelerinden oluşan parametre kümesidir. Bu katmana ait parametreler çıkış parametreleri olarak ifade edilmektedir.

5. Katman: Çıkış katmanı olarak adlandırılır. Bu katmanda sadece bir düğüm vardır ve nihai tahmini değeri üretir [26].

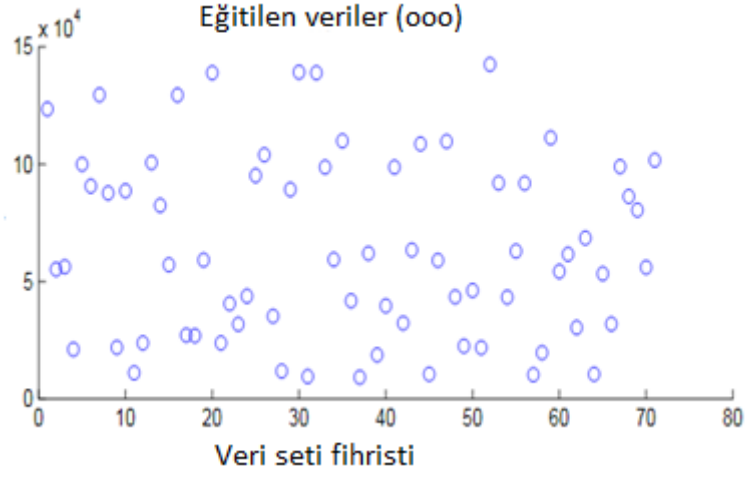
$$f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (2.7.5)$$

Bu çalışmada kullanılan girdiler piezo motor frekans ve tork değerleri, çıktı ise girdilere bağlı konum değerleridir. Bu çalışmada ANFIS'in kullanılmasının temel nedeni diğer kontrol programlarına oranla daha doğru sonuçlar vermesinden kaynaklanmaktadır. ANFIS yapısında bulunan bulanık mantık ve sinir ağı modeli ayrıntılı bir şekilde yukarıda verilmiştir. Çalışmada kullanılan piezo motor girdi ve çıktı değerleri Şekil 2.7.2'de verilmiştir. ANFIS yapısının piezo motor değişkenleri ile kullanımı adım adım çalışma içerisinde anlatılarak verilmiş, hem ANFIS programının kullanımı hemde piezo motor üzerindeki değişiklikler anlatılmıştır.

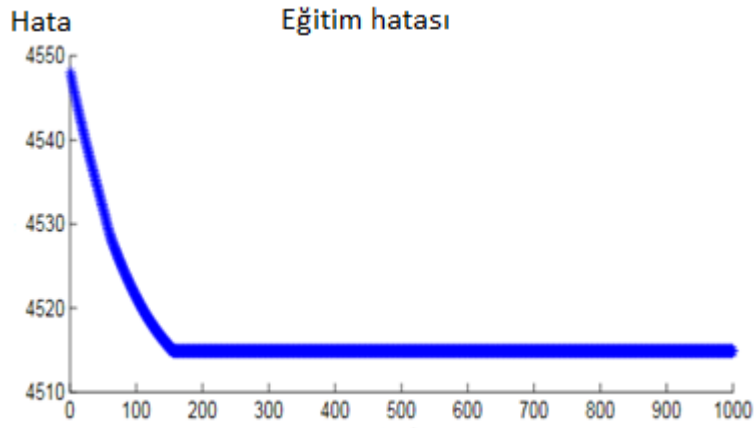


Şekil 2.7.2. ANFIS’de kullanılan parametrelere bağlı frekans,tork ve konum dğerleri

ANFIS’de kullanılan girdi ve çıktı değerleri öncelikle bir excel dosyası içerisinde rastgele karıştırılmalıdır, aksi taktirde sonuç doğru olsada programın doğruluğu tartışılır. Çünkü rastgele girilen verilerimizin ANFIS programı içerisinde programın yapısı gereği eğitime tabi tutulması gerekir Şekil 2.7.3’de ANFIS programında eğitilen verilerimiz gürülmektedir.

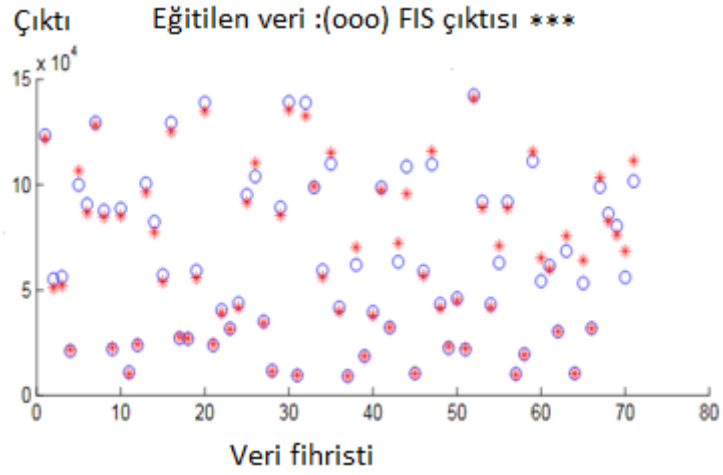


Şekil 2.7.3. Eğitilen girdi ve çıktı verilerimiz

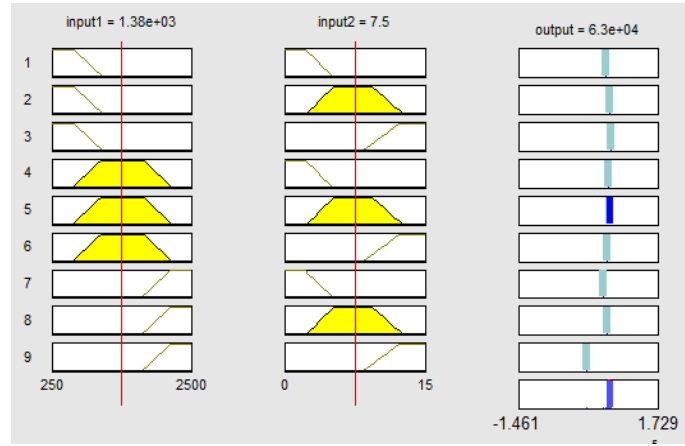


Şekil 2.7.4. Ortalama karesel hata (MSE) değeri

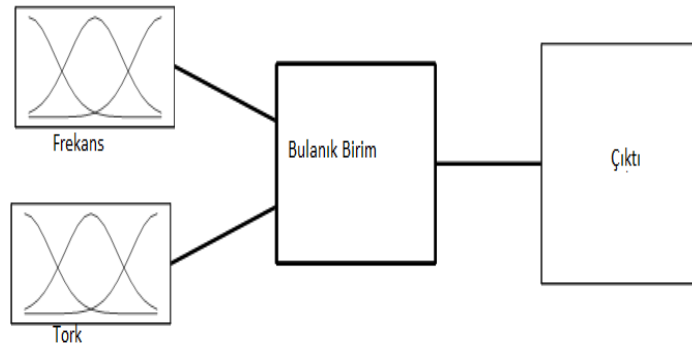
Oratalama karesel hata (MSE) değerleri girdi değerlerini tahmin etmede kullanılır Şekil 2.7.4 de MSE değeri 1000 değer için hesaplandıktan sonra girdi değerleri olan Şekil 2.7.3 ‘teki değerler Şekil 2.7.4 tahmin edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.7.5. Eğitilen ve gerçek test verilerimiz

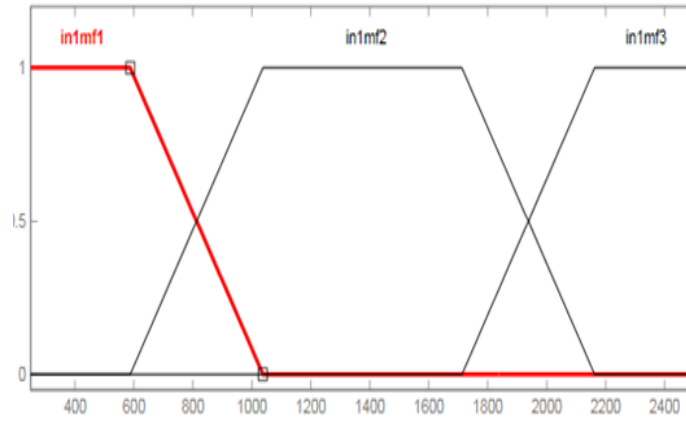


Şekil 2.7.6. Bulanık sistem kural çıkarım ünitesi

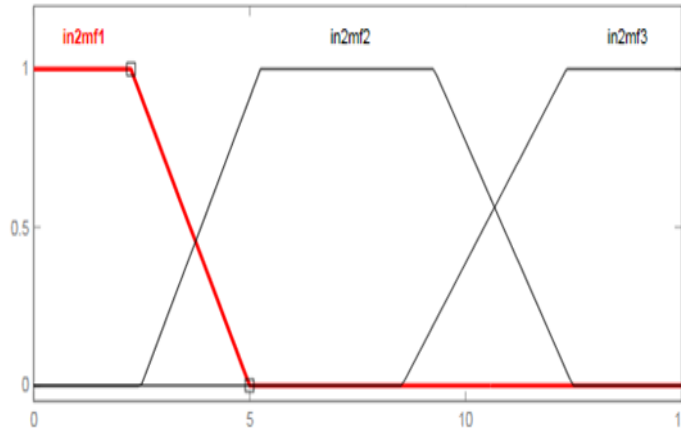


Şekil 2.7.7. Piezomotor bulanık mantık model

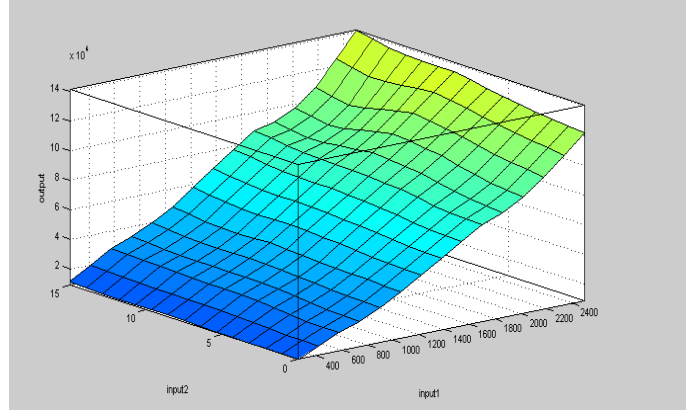
Bulanık kümeler klasik kümelere farklı yapılarında üyelik fonksiyonları bulundurlar. Bu fonksiyonlar bir olgunun bulanık kümeye ne kadar ait olduğunu belirtir. Örneğin bir eleman klasik kümedeki değeri 1 veya 0 dır. Eğer küme elemanı ise 1 elemanı değilse 0 dır. Bulanık kümede ise bir eleman örneğin %60 A kümesine ait iken %50 B kümesine ait olabilir ve küme bulanıklaşmış olur işte bulanık mantığın temelinde yatan durum budur Şekil 2.7.8 ve Şekil 2.7.9’da frekans ve tork değerlerine bağlı olarak bulanıklaştırılmış kümeler gösterilmiştir.



Şekil 2.7.8. Frekans değerlerine bağlı üyelik fonksiyonları



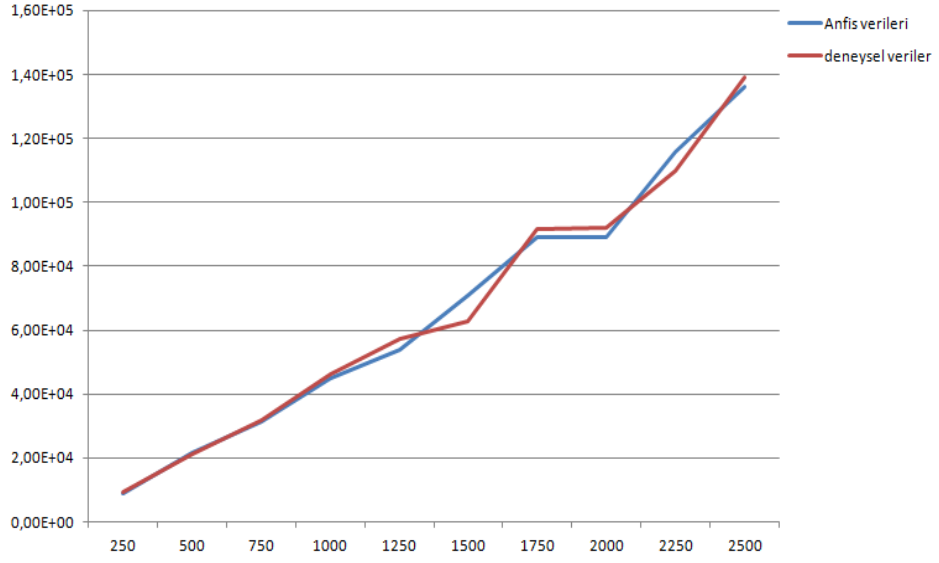
Şekil 2.7.9. Tork değerlerine bağlı üyelik fonksiyonları



Şekil 2.7.10. Girdi ve çıktı değerlerine bağlı konum değişimi

Tablo 2.7.1. Anfis modelinden elde edilen frekans ve torca bağlı bazı konum değerleri

Frekans(Hertz)	Tork(mNm)	Pozisyon(mRad)
250	0	9090
500	5	21600
750	7,5	31400
1000	15	44900
1250	5	53900
1500	10	71000
1750	15	89000
2000	2,5	89100
2250	7,5	11600
2500	12,5	13600



Şekil 2.7.11. Model ve deneysel verilerin karşılaştırılması

Piezo motor'un yapısında birden fazla doğrusal olmayan durum mevcuttur, bu yüzden piezo motor için düzgün bir kontrolör tasarlamak oldukça önem arz etmektedir. Literatüre bakıldığında ANFIS kontrol ve tahminleme için önemli bir yer edindiği görülmüştür. Çalışma sonucuna baktığımızda ANFIS verilerinin ve motor verilerimizi kontrol ettiğimizde hem modelimizin doğruluğunun kanıtlandığı hemde ANFIS modlinden elde ettiğimiz grafiğin daha iyi olması ANFIS ile kontrolün önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Piezo motor için doğrusal olmayan durumlar yük, baskı, sürtünme, sıcaklık gibi parametreler üzerinde iyileştirme yapıldığı zaman piezo motor'un daha iyi kontrol edilebileceği ANFIS modeli ile ispat edilmiştir. ANFIS programı içerisinde bulanık mantık ile alakalı kısımdan bulanıklaştırma, sinir ağı ile alakalı kısımdan da verilerin eğitilme ilkesi bulundurulması, kontrol ve tahminlemedeki üstünlüğünü göstermiştir.

3 DENEYSEL SONUÇLAR

Günümüzde endüstrideki gelişmeler, teknolojinin hızla ilerlemesi ve çeşitli gereklilikler nedeni ile farklı çalışma prensibine sahip elektrik motorları gereksinimini hızla artırmıştır. Motorların yüksek hız, yüksek moment, düşük ağırlık, düşük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Ayrıca malzeme bilimindeki gelişmeler ve yarı iletken teknolojisinin gelişimi motor performanslarına doğrudan etki etmiş ve yeni tür motorların yapılmasına olanak sağlamıştır. Bunlardan biride piezoelektrik ultrasonik motordur. Bu çalışmada son yıllarda robot, uzay uygulamaları, otomotiv, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, mikro konumlama tablaları gibi konularda uygulama sahası bulan piezoelektrik malzemelerden yapılmış ultrasonik motorun yapısı, uygulama alanları, diğer motorlara göre avantajları ve çalışma prensibi hakkında yapılmış olan akademik çalışmalardan derlenmiş bilgiler sunulmaktadır. Ultrasonik motorların çok geniş bir alanda kullanılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Genel olarak bu çalışmada piezo motor teknolojisi, piezo motor kullanım alanları, piezo motor yapısı, çalışma prensibi, çeşitleri, özellikleri, avantajları hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Bu çalışma da piezo motor için öncelikle eşdeğer devre tasarlanmış, tasarlanan devre parametreleri tahminleme yöntemi ile bulunmuş ve MATLAB Simscape modeli yardımı ile model açısal hızı, gerçek açısal hız ile karşılaştırılarak eşdeğer devre modelinin doğruluğu gösterilmiştir. Sonraki adımda piezo motor kontrol sistemi uygulanması için; piezo motor frekans ve konum değerleri kullanılarak sistem tanımlama tekniği üzerinden, piezo motor için uygun transfer fonksiyon değeri araştırılıp bulunmuştur. Bulunan transfer fonksiyon değeri SISOTOOL ortamına aktararak, bir piezo motor kontrol sistemi tasarlanmıştır. Son olarak da ANFIS yapısına ayrıntılı bir şekilde değinilerek piezo motor ANFIS uygulaması yapılmış ve elde edilen sonuçlar, piezo motor deneysel değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Öncelikle piezo motor'un farklı frekans ve tork değerleri altındaki konum değerleri belirlenmiştir. Bilindiği gibi piezo motor adımlama teknolojisi üzerine kurulmuş bir sisteme sahiptir. Piezo motor yapısından kaynaklı farklı sebepler yüzünden birçok doğrusal olmayan parametreye sahiptir. Bunlardan bazıları, piezo malzemenin sıcaklıktan çabuk etkilenmesi, 1 dalga periyodundaki piezo bacak adım aralığının bir sonraki dalga periyodundaki adım aralığına eşit oluğunun bir garantisinin olmaması gibi veya baskı, yük, sürtünme gibi etkenler de piezo motor performansını olumsuz yönde etkiler. Bu yüzden piezo motor'un frekans ve tork'a bağlı konum değerleri alınırken, piezo motor'un 1 dakikalık çalışmasının 10 örneklem ortalama değerleri alınmış ve böylece doğru değer üzerinden işlem yapılması hedeflenmiştir.

Sonraki adımda ise piezo motor yapısından kaynaklı, elektrik ve mekanik kısımdan oluşan bir devre üzerinden piezo motor eş değer devresine ulaşılmaya çalışılmış eşdeğer devre parametreleri, Tahminleme yöntemi ile elde edilmiş ve bir MATLAB simscape modeli ile piezo motor'un gerçek eçısal hızı ve simscape modelden ele edilen açısıl hızı karşılaştırılarak modelin uygunluğu gösterilmiştir. Sistem tanımlama tekniği ile tahminleme yöntemi oldukça kullanışlı ve basit bir yöntemdir, gerçek zamanlı müdahale imkanı vermekte ve parametrelerin değişimi ile alakalı yorum yapma imkanı sunmaktadır. Sistem tanımlama tekniği ile alakalı genel bilgi ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

ANFIS sonucuna bakıldığında ANFIS verilerini ve piezo motor verilerini karşılaştırdığımızda hem modelimizin doğruluğunun kanıtlandığı hemde ANFIS'in kontrol becerisinin üstünlüğünü ortaya koymuştur. Çünkü bulanıklaştırma birimi ve sinir ağları gerçek hayatta piezo motor ile alakalı karşılaşılabilecek doğrusal olmayan durumları içermez ve daha doğrusal bir tahmin yapar. ANFIS kolay ve kullanışlı bir yöntemdir, sadece girdi ve çıktıları doğru bir şekilde kullanılmalı ve bulanıklaştırma birimine dikkat edilmelidir. Çünkü her ne kadar bulanık mantık, üyelik fonksiyonlarının bulanıklaştırılması üzerine kurulmuşsa da. Bulanıklaştırma miktarı uzman kişinin kara vereceği kadar yapılmalı, gereğinden fazla üyelik fonksiyonlarının bulanıklaştırılması programın gerçek değerlerden uzak, hatalı tahmin yapmasına neden olur.

Yapay sinir ağları öğrenme ve öğrendiklerini geneleştirmeye yönelik bir yöntemdir. Kontrol edilmek istenen sistem doğru bir şekilde eğitildiği zaman başarılı sonuçlar elde edilir. Bu yüzden test verileri excel ortamında hazırlanırken dikkatli düşünölmeli ve veriler doğru tasarlanmalıdır. Yapay sinir ağlarında kullanılan katman sayısı tamamen deneme yöntemi ile bulunur. Genellikle zor problemler için fazla katmana, daha az zor olanlar için daha az sayıda katman kullanılır.

SONUÇLAR

Piezo motor yeni geliştirilmiş bir motor olmasına rağmen geleneksel motorlara oranla sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Ayrıca yapısı ve çalışma prensibinin geleneksel motorlardan farklı olması araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Piezo motor çalışma prensibi, değişik çalışma koşulları altında değişir. Bu durum yapısında bulunan piezo seramik malzemenin sıcaklıkla değişmesi ilkesi ile açıklanabilmektedir. Ayrıca baskı, yük, sürtünmede piezo motor doğrusal kontrolünü olumsuz yönde etkileyen faktörlerdir. Bu çalışma içerisinde yer alan piezo motor ile alakalı uygulamalar ve sonuçları aşağıda 4 temel durumda verilmiştir.

- Piezo motor yapısında bulunan piezoelektrik seramik malzemenin elektriksel gerilim altında titreşmesi ilkesine göre çalışmaktadır. Bu yüzden piezo motor teknolojisini bilmek için yapısında bulunan piezo seramik malzemenin çalışma koşulları ve prensibi bilinmelidir. Ayrıca piezo seramiklerde oluşan yüksek frekanslı titreşimden sürtünme kuvveti vasıtasıyla hareket enerjisi elde etmek için nasıl bir mekanizma kullanılacağı piezo motor çalışma prensibini belirler. Piezo motorun yapısal farklılığı ve çalışma prensibi tamamıyla geleneksel motorlardan farklı olması araştırmacıları yukarıda bahsedilen piezo motor yapısını oluşturan sisteminin avantajları, dezavantajları ve doğrusal kontrol kısmına iletmelidir.
- Piezo motorda iki enerji dönüşümü söz konusudur. Birincisi elektriksel enerjiden mekanik titreşim enerjisinin elde edilmesi. İkincisi mekanik titreşim enerjisinden hareket enerjisinin elde edilmesidir. Bu yüzden piezo motor eşdeğer devresinden bahsetmek için öncelikle piezo seramik eşdeğer devresinden bahsetmek gerekir. Ayrıca piezo seramik malzeme dielektrik özelliği ve histerisiz kayıplarında göz önünde bulundurularak bir piezo motor eşdeğer devre modeli çıkarılmıştır. MATLAB simscape yararlı araç kutuları sayesinde elektriksel bir devre ile mekaniksel bir devrenin bir arada olduğu bir devre tasarlama imkanı vermektedir. Bu sayede oluşturulan piezo motor simscape modeli ve aşamaları tez içinde yapılmış ve ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.
- Bir sistem için model oluşturmak, oluşturulan model için kontrolör tasarlamak oldukça zahmetlidir. Fakat MATLAB içerisinde bulunan araç kutuları bu zor işlemleri dahi yapısında bulunan otoregresyon algoritmaları sayesinde kolayca yapabilmektedir. Böyle bir uygulama için gerekli programlar ve kullanımları piezo motor model oluşturma temel alınarak ayrıntılı gösterilmiştir.
- Piezo motor çalışma parametreleri baskı, yük, sıcaklık ve sürtünmeden kaynaklı değişmektedir. Bu nedenlerden kaynaklı piezo motor doğrusal kontrolü için yapay zeka teknikleri önerilmiştir. Piezo motor için yapay sinir ağı ile bir kontrolör tasarlanmış ve daha sonra ANFIS ile konum kontrolü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağı ve ANFIS özellikleri kullanım aşamaları ayrıntılı bir şekilde anlatılarak yapay zeka teknikleri ile piezo motor için doğrusal kontrolör tasarlanabileceği gösterilmiştir. Ayrıca yapay zeka tekniklerinin doğrusal kontrol algoritmaları oluşturmadaki üstün becerileri bir kez daha kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Koç, B., “Robotik2 piezo-elektrik ultrasonik motorlar”, *Bilim ve Teknik dergisiei*, 7: 7 (2003).
- [2] Bal, G. Bekiroğlu, E. Bayındır, R. Ve Görgün, A., 2006, Yürüyen dalga tip ultrasonik motor denetimi ve bilgisayarla izlenmesi, *journal of polytechnic*, Vol 9, No.4, p.225-231.
- [3] Bekiro*lu, E., “Yürüyen dalga ultrasonik motorun hz ve konum denetimininbulank mantk denetleyici kullanarak gerçekte2tirilmesi”, Doktora tezi, *GaziÜniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 9-115 (2002).
- [4] Ferreira, A. and Minotti, P., “High-performance load-adaptive speed control forultrasonic motors”, *Control Engineering pratice*, 6: 1-13 (1998).
- [5] Cheng, Y., Lei, F., Xu, W. and Zhong, Y., “Speed Control of Ultrasonic Motorsby Auto-Tuning Fuzzy PI Control”, *Proceedings of the 4th World Congress on intelligent Control and Automation*, Shanghai, 10-14 (2002).
- [6] Bal, G., “A Digital Controlled Drive System for Travelling-wave Ultasonic Motor”, *Turk. J. Elec. Engin.*, 11(3): 155-168 (2003).
- [7] Hirata H, Ueha S. 1993, Characteristic Estimation of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor, *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.40
- [8] Senjyu T, Uezato K. 1994, Adjustable Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control, *IEEE*.
- [9] Hirata H, Ueha S. 1995, Design of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor, *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.42 no. 2.
- [10] Senjyu T, Yokoda S, Miyazato H, Uezato K. 1997, Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control with a Simplified Matematical Model, *IEE Proc-Electr. Power Appl. Vol. 145 No.3*.
- [11] Lin F.J, Duan R.Y, Wai R.J, Hong C.M. 1997, LLCC Resonant Inverter for Piezoelectric Ultrasonik Motor Drive, *IEE Proc.-Elec. Power Appl. Vol.146. No.5*.
- [12] Hyeung Woo Kim, Shuxiang Dong, Pitak Laoratanakul, Kenji Uchino. 2002, Novel Metod for Driving the Ultrasonik Motor, *IEEE Transaction on Ultrasaonic, Ferroelectrics and Frequency Control* vol.49, No.10.
- [13] Senjyu T, Yoshida T, Uezato K, Urasaki N, Panda S.K. 2003, Speed Sensorless Control of Ultrasonik Motors Using Neural Network, *IEEE*

- [14] Chau K.T, Chung S.W, Chan C.C. 2003, Neuro-Fuzzy Speed Tracking Control of Travelling Wave Ultrasonic Motor Drives Using Direct Pulsewidth Modulation, *IEEE Transaction on Industry Applications* vol.39, No.4.
- [15] Qu Jianjun, Zhou Tieying. 2003, An Electric Contact Method to Measure Contact State Between Stator and Rotor in a Traveling Wave Ultrasonic Motor, *Elsevier Ultrasonics* 41.
- [16] Roh Yongrae, Kwon Jaehwa. 2004, Development of a New Standing Wave Type Ultrasonic Linear Motor, *Elsevier Sensors and Actuators*
- [17] Bal, G., Bekiroglu, E, "Characteristics estimation of travelling wave ultrasonic motors using equivalent circuit model", *Int. Conf. on Electrical and Electronics Eng. ELECO'2001*, Bursa-Turkey, 62-66 (2001).
- [18] [14.07.2015] <http://www.piezomotor.com/products/rotary/lr17/>
- [19] [14.07.2015] <http://www.piezomotor.com/products/drivers/pmd101/>
- [20] Edin Golubovic, Tarik Uzunovic, Zhenishbek Zhakypov, Asif Sabanovic Adaptive Control of Piezoelectric Walker Actuator, *IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2013, Vicenza (ITALY) – February 27-28 , March 1 2013.*, in press.
- [21] Hüner, Engin, and Şeref Naci ENGİN. "Yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun modellenmesi.", *emo.org.tr*.
- [22] Bekiro*lu, E., "Yürüyen dalga ultrasonik motorun hız ve konum denetiminin bulanık mantık denetleyici kullanarak gerçekleştirilmesi", *Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 9-115 (2002).
- [23] Zharii, O.Y., "An exact mathematical model of travelling wave ultrasonic motor", *Ultrasonic Symposium*, 545-548 (1994).
- [24] <http://www.mathworks.com/help/control/ug/using-the-siso-design-task-in-the-controls-estimation-tools-manager.html>
- [25] U. Arifoğlu, *Matlab 7.6 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları*, İstanbul, Alfa Yayınları, 2008.
- [26] Jang, J. S. R., (1993). ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 23 (03): 665-685,.
- [27] Yörük, Nevin, et al. "Sermaye Yapısını Etkileyen Faktörler ve Finansal Oranlar ile Hisse Getirisi Arasındaki İlişkinin ANFIS Yöntemi ile İncelenmesi: İMKB 100'de Bir Uygulama." (2013).

EKLER

TÜR	PIEZOMOTOR	BİRİM
Çap	17	mm
Encoder çözünürlüğü	0,2	mRad
Max voltaj	48	V
Materyal	alüminyum, paslanmaz çelik	
Uygun değer sıcaklık	0-50	°C
Motor şaft max	5	N
Tutma torku	>30	N
Encoder tip	magnetik absolute	

TÜR	PMD101
Eksen sayısı	1
Voltaj sinyal aralığı	0-45
Max çözünürlük	2048 µstep her dalga sinyali boyunca
Genel I/O	3 giriş 2 çıkış
Boyut	103/65/30,4mm
Güç kaynağı	12-24V

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ebuzer AYGÜL
Doğum Yeri ve Tarihi : Silvan, 1988
Yabancı Dili : İngilizce
E-Posta : ebuzer.aygul@marmara.edu.tr

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite/Lise	Mezuniyet Yılı
Lise	Sayısal	Semiha Şakir Lisesi	2007
Üniversite	Fizik	Yıldız Teknik Üniveritesi	2012
Y. Lisans	Mekatronik	Marmara Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü	2015

İş Deneyimi

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013	Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü	Araştırma Görevlisi

Bilimsel Eserler:

1. Kongre(Sempozyum) Etkinlikleri

Modeling of Barrage Water Level Control Using Fuzzy Logic TOK.2015