

T.C

171111

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜRÜYEN DALGA TIPLI
ULTRASONİK MOTORUN BULANIK
MANTIKLA KONTROLÜ

Engin HÜNER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Şeref N. ENGİN

GEBZE

2005



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU



Engin HÜNER'in tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/11/2005 Tarih ve 2005 / 39 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Şeref N. ENGİN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Vasfi E. ÖMÜRLÜ

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

05.12.2005 Tarih ve 2005 / 41 sayılı kararı.



İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında Yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun(TWUSM) hız kontrolü 'c' programlama dili yardımıyla oluşturulan simülasyon üzerinde gerçekleştirilmiştir. TWUSM'nin basitleştirilmiş eşdeğer devresinin 'c' programlama dilindeki analitik incelemesi sonucunda TWUSM'nin karakteristikleri çıkartılmış ve sonuçlar yapılmış olan çeşitli çalışmalardaki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak modelin ve oluşturulan 'c' programının geçerliliği kanıtlanmıştır. TWUSM'nin basitleştirilmiş modelinden elde edilen karakteristiklerde TWUSM'nin hızının zamanla meydana gelen ısı artışından ve uygulanan yük torkundan etkilendiği görülmüştür. Bu etkileri gidermek için PI ve Bulanık kontrol uygulanmıştır. Alınan sonuçlar neticesinde bulanık kontrolörün PI kontrolöre göre üstünlüğü de gösterilmiştir.

SUMMARY

In this thesis, the speed control of traveling wave ultrasonic motor (TWUSM) has been studied by a simulation model developed using 'c' programming language. Having investigated the TWUSM's simplified equivalent circuit analytically in 'c' programming language, the characteristics of TWUSM has been obtained and then the simulated results has been compared to the experimental results of other investigators to validate the model developed using 'c' programming language. The influence of heat and load torque on the speed of TWUSM has been decreased through PI and fuzzy control. It is concluded that Fuzzy control has performed better than PI control.



TEŞEKKÜR



Sayın Yrd. Doç. Dr. Şeref N. Engin'e araştırma boyunca göstermiş olduğu anlayıştan ve yapmış olduğu rehberlikten dolayı en derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her zaman maddi ve manevi desteklerini arkamda hissettiğim çok değerli aileme, Tekirdağ Anadolu Teknik, Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi öğretmeni Mümin Barut ve değerli meslektaşlarıma, Yrd. Doç. Dr. Fatih Konukçuya, başarıya ulaşmamda beni varlığı ile destekleyen arkadaşşıma teşekkürü bir borç bilirim.

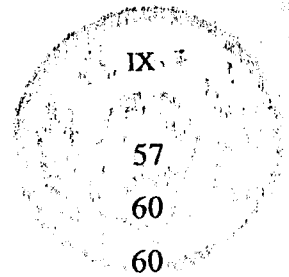




İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	IV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. ULTRASONİK MOTORLAR	7
2.1. Ultrasonik Motorun Özellikleri	8
2.2. Kullanım Alanları	9
2.2.1. Robot Hareket Ettiricilerinde	9
2.2.2. Otomatik Odaklama	9
2.2.3. Yarı İletken Üretiminde	9
2.2.4. Minyatür Makinalarda	10
2.2.5. Uzayda	10
2.3. Ultrasonik Motorların Çalışma Prensibi	10
2.3.1. Eliptik Hareketin Elde Edilişi	11
2.3.2. Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun Yapısı ve Çalışma Prensibi	12
2.4. Piezoelektrik Eleman	14
2.4.1. Piezoelektrik Etki	14
2.4.2. Piezoelektrik Malzemenin Elektrik Alanı İçindeki Zorlanması	15
2.4.3. Piezoelektrik Eşitlikler	16
2.4.4. Eşdeğer Kapasitans	19
2.4.5. Eşdeğer Endüktans	20
3. TWUSM'NİN MODELLENMESİ	22
3.1. TWUSM'nin Eşdeğer Devresi	22
3.2. C Programlama Dili ile TWUSM'in Eşdeğer Devresinin Analitik İncelenmesi	25

3.2.1. TWUSM'nin C Programı	25
3.2.2. Elde Edilen Grafikler	28
4. TWUSM'NİN PI KONTROLÜ	35
4.1. PI Kontrolörün C Programlama Dili	35
4.1.1. PI Kontrolden Elde Edilen Grafik	39
5. BULANIK MANTIK	42
5.1. Giriş	42
5.2. Bulanık Mantığın Kullanım Alanları	42
5.3. Bulanık Mantığın Tarihçesi	43
5.4. Bulanık Mantıkta Kümeler	44
5.4.1. Keskin Kümeler	46
5.4.1.1. Birleşim	46
5.4.1.2. Kesişim	46
5.4.1.3. Tümleyen	46
5.4.2. Temel Bulanık İşlemler ve Bağlıntılar	46
5.4.2.1. Kapsama	46
5.4.2.2. Değil İşlemi	46
5.4.2.3. Birleşim	47
5.4.2.4. Kesişim	47
5.4.2.5. Tümleyen	47
5.4.3. Bulanık Bağlıntılar	47
5.4.3.1. Normal Bulanık Küme	48
5.4.3.2. Konveks Bulanık Küme	48
5.4.3.3. Bulanık Kümelerin Doğrudan Çarpımı	49
5.4.3.4. Kesim İlkesi	49
5.5. Bulanık Kontrol Sistemleri	49
5.5.1. Bulanık Kontrolörün Genel Yapısı	50
5.5.1.1. Bulanıklaştırma Birimi	51
5.5.1.2. Bilgi Tabanı	51
5.5.1.3. Çıkarım Ünitesi	53
5.5.1.4. Berraklaştırıcı	55
6. BULANIK MANTIĞIN UYGULANMASI	56
6.1. Bulanık Mantık Birimleri	56
6.1.1. Bulanıklaştırıcı	56



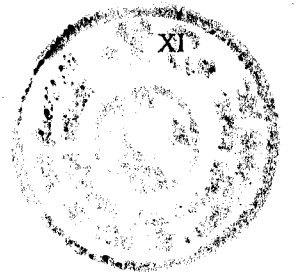
6.1.2. Bilgi Tabanı	
6.1.3. Çıkarım Ünitesi	
6.1.4. Berraklaştırma	
6.1.5. Uygulanacak Frekansın Bulunması	61
6.2. TWUSM'nin Bulanık Mantık ile Kontrolünün C dilindeki Programı	61
6.3. Kontrol Sonuçları	72
6.3.1. Isı Etkisinin Giderilmesi	72
6.3.2. Uygulanan Yük Torku	72
6.3.3. Değişken Yük Torkunun Uygulanması	73
7. SONUÇLAR	75
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ



Simgeler	Açıklamalar
TWUSM	Yürüyen dalga tipli ultrasonik motor
S	Mekanik gerilme sabiti
E	Elektrik alanı, kV/mm
l	Yer değiştirme, metre
Δl	Birim yer değiştirme, metre
I	Akım, A
V	Gerilim, V
F	Kuvvet, Newton
A	Kuvvet faktörü, N/V
Z	Empedans, ohm
v	Titreşim hızı, m/s
Yd	Blokaj admiktansı
h	Yükseklik, metre
l	Uzunluk, metre
b	Uzunluk, metre
x	Yer değiştirme, metre
T	Baskı sabiti
S	Gerilme sabiti
Y_{11}	Young sabiti, N/m ²
d	mekanik gerilme, m/V
K	Yay sabiti
q	Şarj, coulomb
C	Kapasitans, farad
L	Endüktans, henri
m	Ağırlık, kg
rd	Blokaj direnci, ohm
cd	Blokaj kapasitans, farad
rm	Hareketsel direnç, ohm
Lm	Hareketsel endüktans, henri
Cm	Hareketsel kapasitans, farad

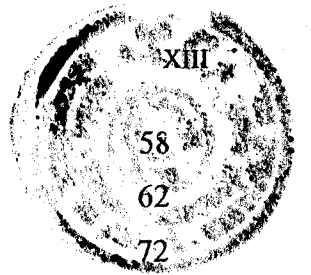


f_m	Mekanik rezonans frekansı, Hz
Y_m	Hareketsel admiktans
w	Açısal hız, rad/sn
R_r	Eksenel şekil katsayısı
ξ	Yürüyen dalga'nın genliği
f	Sürme frekansı
λ	Piezoelektrik malzemenin (+) ve (-) ile kutuplanan bir dalga'nın uzunluğu
k	Stator yüzeyindeki dalga sayısı
n	Devir sayısı, d/dk
T	Sıcaklık, C ⁰
ΔC	Kapasite değişimi



ŞEKİLLER DİZİNİ

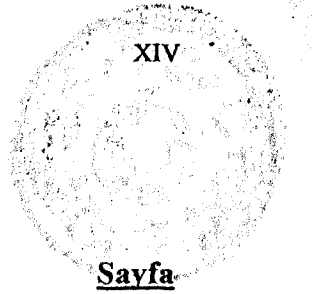
<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çalışması	10
2.2. Eliptik hareket	11
2.3. TWUSM'nin yapısı	12
2.4. TWUSM'nin çalışması	13
2.5. Piezoelektrik disk ve elektrot sıralaması	13
2.6. Feedback gerilim ile hız ilişkisi	14
2.7. Piezoelektrik etki	15
2.8. Elektrik alan kuvveti (kV/mm)	16
2.9. Eşdeğer devre	16
2.10. Enine etki	17
3.1. Eşdeğer devre	22
3.2. Sürme frekansı	23
3.3. Program akış şeması	26
3.4. TWUSM'nin frekans- admiktans grafiği	28
3.5. TWUSM'nin frekans(Hz) – hız(d/dk) grafiği	29
3.6. TWUSM'nin sıcaklık grafiği	30
3.7. TWUSM'nin hız – zaman grafiği	30
3.8. TWUSM'nin frekans – hız grafiği	31
3.9. TWUSM'nin tork grafiği	34
3.10. TWUSM'nin gerilim grafiği	34
4.1. TWUSM'nin PI kontrolü	36
4.2. Uygulanan yük torkunun PI kontrolü	39
4.3. Uygulanan Yük Torkunun PI Kontrolü	40
4.4. Değişken Yük Torku (N)	40
4.5. Değişken Yük Torkunun PI Kontrolü	41
5.1. Bulanık olmayan hız kümesi	44
5.2. Bulanık hız kümesi	45
5.3. Çeşitli üyelik fonksiyonları	45
5.4. Konveks kümeler	49
5.5. Bulanık kontrolörün iç yapısı	51
5.6. Üyelik fonksiyonları	53



6.1. Üçgen üyelik fonksiyonları	58
6.2. Bulanık mantık Tabanlı program akışı şeması	62
6.3. Isı etkisinin giderilmesi	72
6.4. Yük torku 0.3-0.5sn arası	72
6.5. Yük torku 0.2-0.3sn arası	73
6.6. Değişken yük torku	73
6.7. Değişken yük torkunun bulanık mantıkla kontrolü	74
7.1. Yerleşme zamanı	76
7.2. TWUSM'ye Uygulanan yük torku	77
7.3. TWUSM'ye uygulanan değişken yük torku	77



ÇİZELGELER DİZİNİ



Cizelge

Sayfa

5.1. Kural tablosu

52

6.1. TWUSM için kural tablosu

58



1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişimi ile birlikte endüstriyel alanda uygulama bulan farklı çalışma prensiplerinde motorlar yapılmıştır. Ortaya konan motorlar sürekli gelişme göstermekte ve en az enerji tüketen ve en çok iş yapan motorların yanı sıra robotlar, mikro cerrahi sistemler, uzay uygulamaları gibi spesifik alanlarda klasik elektromanyetik motorlardan daha ufak boyutlarda, daha fazla tork veren, motorları üretmek önem kazanmıştır.

1880 yılında ilk olarak J. Curie ve P. Curie kardeşler tarafından keşfedilen piezoelektrik etki sayesinde 1973 yılında H. V. Barth tarafından piezoelektrik malzemelerin kullanılması ile ultrasonik motorun üretilmesi başarılmıştır. Üretilen ultrasonik motor günümüze kadar geliştirilmiş ve bir çok uygulamada kullanılması yeterli olmayan elektromanyetik motorların yerini almıştır.

Ultrasonik motorları oluşturan temel parça piezoelektrik etki gösteren kristallerdir. Piezoelektrik etki iki türdür. Birincisi, üzerine baskı uygulanan kristal malzemenin gerilim üretmesi; ikincisi, üzerine gerilim uygulanan kristal malzemenin titreşim üretmesidir. Piezoelektrik etki gösteren malzemeler doğada kuartz kristali, baryum titanat gibi doğal olarak bulunabildiği gibi daha büyük piezoelektrik etki gösteren malzemelerin üretimi üzerine de çalışılmaktadır. Günümüzde kullanılan en büyük piezoelektrik etkiyi gösteren $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ ana bileşenlerinden oluşan PZT olarak isimlendirilen bileşiktir.

Ultrasonik motorlar, ismini insanın işitebileceği ses sınırı olan 20 kHz'in üzerinde çalıştıkları için aldıkları gibi, bu tip motorlar piezoelektrik malzemelerden imal edildikleri için piezomotor olarak da isimlendirilmektedir.

Ultrasonik motorlar elektromanyetik motorlar ile karşılaştırıldığında bir çok avantaja sahip oldukları görülür. Bu avantajlar düşük hızda yüksek tork, sessiz çalışma, elektromanyetik dalgalar üretmeme, elektromanyetik dalgalardan etkilenmeme, yüksek tutma torku, basit yapısı ve milimetre mertebesindeki boyutlarıdır. Bu avantajlara rağmen ultrasonik motorların elektromanyetik motorlara

göre bazı dezavantajları vardır. Bunlar motor parametrelerinin sıcaklıkla ve zamanla değişmesi, kontrol karakteristiklerinin nonlineer olması ve tam matematik modellerinin çıkartılmasının zorluğu olarak sıralanabilir.

Ultrasonik motorlar sahip oldukları avantajlardan dolayı ticari olarak otomotiv, uzay uygulamaları, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, saatler, fotoğraf makinaları, mikro konumlama tablaları, robot ve mikro robot uygulamaları gibi alanlarda yerini almıştır.

1973 yılında H. V. Barth tarafından üretilen ilk ultrasonik motordan günümüze kadar değişik yapıda açısız veya lineer hareket edebilen ultrasonik motorların yapımı, ultrasonik motorların hız ve konum kontrolleri, ultrasonik motorların sürücüleri ve ultrasonik motorlarda kullanılan piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

1993 yılında Hiroshi Hirata ve Sadayuki Ueha yürüten dalga tipli ultrasonik motorun yük karakteristiğini hesaplamak için bir metot önerdi. Bu metot motor performansının tahmini için yürüten dalga tipli ultrasonik motorun eşdeğer devresini kullanmaya dayanıyordu. Eşdeğer devre kullanılarak elde edilen yük karakteristiğini deneylerle kanıtladılar [Hirata and Ueha, 1993].

1994 yılında Tomonobu Senjyu ve Katsumi Uezato ultrasonik motorda yük torkunun ve zamanla ısı artışı nedeniyle oluşan hız dalgalanmalarını gidermek amacıyla kendinden ayarlamalı hız kontrolörü olan Adaptif kontrol yöntemini önerdiler ve bu çalışmalarını deneysel olarak kanıtladılar [Senjyu and Uezato, 1994].

1995 yılında Hiroshi Hirata ve Sadayuki Ueha yürüten dalga tipli ultrasonik motor (TWUSM) dizaynı için bir yöntem önerdiler. Bu yöntem iki model üzerine kuruludur. Birincisi motor titreşimi ve rotor arasındaki sürtünmeyi tahmin etmek için elastik kontak modelini önerir. İkincisi, titreştiricinin mekanik ve elektrik parçaları arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için elektriksel eşdeğer devre modelini kullanır. Önerilen metot prototip motora uygulandı ve metodun uygulanabilirliği prototip motorun yük karakteristiği ölçülerek kanıtlandı [Hirata and Ueha, 1995].

1997 yılında T. Senjyu, S. Yokoda, H. Miyazato ve K. Uezato kontrol performansını artırmak amacıyla ultrasonik motorun basitleştirilmiş bir matematik modelini kurarak adaptif kontrolör ile hız denetimini sağladılar [Senjyu et al, 1997].

Yürüyen dalga tipli ultrasonik motor (TWUSM)'u sürmek için LLCC rezonans tekniğini kullanan yüksek frekanslı iki faz gerilim kaynaklı inverter F.J. Lin, R.Y. Wai, ve C.M. Hong tarafından önerildi. Öne sürülen bu yeni sürme tekniği deneysel çalışmalarla kanıtlandı [Lin et al, 1999].

Lionel Petit, Nicolas Rizet, Roland Briot, Paul Gonnard yaptıkları çalışma ile TWUSM olan Shinsei firmasının ürettiği USR60 modeli için çalışma frekans aralığını tespit etmişler, ayrıca sabit tork altında ısı değişiminin kompanze edilmesi halinde hız denetiminin gerçekleştirileceğini göstermişlerdir [Petit et al, 1999].

Güngör Bal ve Erdal Bekiroğlu ultrasonik motorun eşdeğer devre modelini kullanarak motor karakteristiklerini ve değişik hız ve yük koşulları altında motor performansını ortaya koymuşlardır [Bal ve Bekiroğlu, 2001].

Açısal hareket eden ultrasonik motorların yanı sıra lineer ultrasonik motorlar üzerine de bir çok tasarım araştırması yapılmaktadır. Bunlardan biri Yongrae Roh, Susung Lee ve Wooseok Han tarafından dizayn edilmiş olan lineer ultrasonik motordur [Roh et al, 2001].

Yürüyen dalga tipli ultrasonik motoru statorda meydana gelen titreşimleri ve stator ile rotor arasında oluşan saplanma ve kayma etkilerini kullanarak analitik olarak modeli çıkartılmış ve modelin uygunluğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Ayrıca sürtünme bölgesinin elastik özellikleri statorun titreşim karakteristiklerine eklenerek modelin geliştirilebileceği önerilmiştir [Dong et al, 2002].

Ultrasonik motorların sürme devreleri elektromanyetik trafoların kullanıldığı DC/AC dönüştürücüden oluşur. Elektromanyetik trafoların yapısal olarak büyüklüğü, elektromanyetik dalga üretmesi gibi dezavantajlarını gidermek amacıyla direkt ultrasonik motorun sürme frekansı yakınlarında çalışan piezoelektrik trafonun kullanıldığı sürme devresi tasarlanmıştır. Yeni sürme metodu sayesinde ekstra

frekans kontrol ünitesine gerek duyulmadan ultrasonik motor maksimum hızda sürülebilmektedir [Hyeoung et al, 2002].



Ultrasonik motorun yüzey ısısı ölçülerek yapay sinir ağları ile hız sensörü kullanmadan motor kontrolünü Senjyu ve arkadaşları deneysel olarak başardılar [Senjyu et al, 2003].

Sonlu eleman analizi yöntemi kullanılarak disk tipli yürüyen dalgalı ultrasonik motor tasarlanıp prototipin çalışma prensibi lazer titreşim ölçer ile saptanarak motor prototipinin hızının sürme frekansına, giriş gerilimine, kontak yüzeyine ve stator ile rotor arasındaki sürtünmeye bağlı olduğu bulundu [Lim and Chen, 2003].

TWUSM'nin sahip olduğu yüksek nonlineeriteyi ve parametrelerinin zamanla değişimini önlemek için direkt pals genişlik modülasyonu ile sürülen Neuro-Fuzzy kontrolörü öne sürüldü. Önerilen kontrol sistemi düşük maliyete sahip TMS320F240 mikro kontrolör ile gerçekleştirilerek deneysel olarak öne sürülen kontrol yönteminin etkililiği saptandı [Chau et al, 2003].

TWUSM'yi dijital kontrollü olarak sürmek için TMSF320F243 mikrokontrolörü kullanılmış ve önerilen sürme sistemi ile hız ve yön kontrolü yüksek etkililikle başarılmıştır [Bal, 2003].

TWUSM'yi hız kontrolünü gerçekleştirmek için kontrolü gerekli olan üç parametre uygulanan gerilimin frekansı, genliği ve faz açısı deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak da yürüyen dalga tipli ultrasonik motoru frekansın değişimi ile kontrol etmenin çok geniş bir aralıkta daha kolay yapılabildiği deneysel olarak gösterilmiştir [Bal ve Bekiroğlu, 2003].

Bal ve Bekiroğlu TWUSM için yeni bir hız kontrol yöntemi önererek ultrasonik motorun hız karakteristiğindeki değişimleri kompanze etmeyi başardılar. Önerdikleri servo hız kontrol sistemini TMS320F243 mikro kontrolörü ile gerçekleştirdiler [Bal and Bekiroğlu, 2003].

TWUSM'yi sürmek için kontrol girişı olarak sürme frekansını alan ve TMS320F243 mikro kontrolörü ile üretilen PWM sinyalinı alçak geçiren filtreden geçirmek suretiyle referans DC gerilim elde edip ultrasonik motoru sürmeye dayanan teknik deneysel olarak uygulamak suretiyle pozisyon kontrolü için etkili bir teknik olduğu kanıtlandı [Bal Güngör and Bekiroğlu Erdal, 2005].

Ultrasonik motorun performansı stator ile rotor arasındaki kontak yüzeyine bağlıdır. Kontak yüzeyi durumunu ölçmek için yeni bir yöntem Qu ve Zhou tarafından ortaya konmuştur. Bu yöntemle durma torku ve yüksüz durumdaki hız ile uygulanan gerilim ölçülmüştür [Qu and Zhou, 2003].

TWUSM'nin pozisyon kontrolü için Bal ve arkadaşları tarafından bulanık mantık tabanlı TMS320F243 mikro kontrolörü ile gerçekleştirilen bir kontrolör geliştirilmiştir [Bal et al, 2004].

Ultrasonik motorun çalışma prensibi stator ile rotor arasındaki sürtünme kuvvetine dayandığı için zamana bağlı olarak ultrasonik motorun ısısı artmakta ve motoru sabit bir hızda sürmek mümkün olmamaktadır. Zamana bağlı olarak ultrasonik motordaki ısı artışını göz önüne alarak etkili bir hız kontrolörü İda ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Yüksüz durumda PID ve Fuzzy kontrolörlerini içeren çalışmada önerilen yöntemin etkililiğinin ortaya konmasının yanında ultrasonik motorun yüklü durumları için kontrolörün geliştirilmesinin gerekliliği belirtilmiştir [İda et al, 2004].

Kontak katmanlarının analizi ile yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun matematik modeline dayanarak kontak katmanlarının dizaynı ve baskı kuvvetinin motor performansı üzerine etkilerini araştıran bir çalışma ile başlangıç gerilimi ve maksimum uygulanabilecek baskı kuvveti verilen modelle anlaşılabilceği gösterildi [Zhu 2004].

Açısal hareket edebilen yürüyen dalga tipli ultrasonik motorların yanı sıra lineer ultrasonik motorlar üzerine de araştırmalar yapılmaktadır. Roh ve Kwon duran dalga tipli yeni bir lineer ultrasonik motor geliştirmişlerdir. Geliştirilen lineer ultrasonik motor ile her iki doğrultuda da benzer performansın elde edildiği ve



geliştirilen motorun basit bir yapıya sahip olduğu ortaya konmuştur [Rohand Kwon, 2004].

Yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun uzaktan bir GSM mobil telefon ile kontrol edilmesi ile ilgili bir çalışma Bekiroğlu ve Daldal tarafından yapılmış ve uzaktan kontrol ile hız, konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile robot, mikro robot ve kamera gibi sistemlerde hareket ettirici olarak kullanılan ultrasonik motorların uzaktan kontrol edilebileceği de gösterilmiştir [Bekiroğlu and Daldal, 2005].

Ultrasonik motor diğer bir adıyla piezomotor piezoelektrik etkinin bulunmasından günümüze kadar geçen bir süreçte sürekli geliştirilerek ticari olarak fotoğraf makinaları, otomotiv, mikro robotlar, uzay uygulamaları gibi alanlarda yerini almıştır. Bir çok avantajına rağmen nonlineer karakteristikleri, tam matematik modelinin elde edilememesi motorun kontrol gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Bu tez çalışması çerçevesinde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Giriş bölümünde konu kısaca tanıtıldıktan sonra ikinci bölümde ultrasonik motorun genel yapısı, çalışma prensibi ve piezoelektrik etkiden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun eşdeğer devresi ve eşdeğer devrenin 'c' programlama dilinde analitik incelemesi yapılarak karakteristikleri çıkarılmıştır. Dördüncü bölümde yürüyen dalga ultrasonik motorun (TWUSM) PI kontrolü yapılarak hız denetimi sağlanmıştır. Beşinci bölümde bulanık mantıkla ilgili genel bilgiler sunulduktan sonra altıncı bölümde bulanık mantık ile TWUSM'nin kontrolü 'c' programlama dili yardımıyla yapılarak bulanık mantık kontrolörünün TWUSM'nin hız kontrolü için iyi bir yerleşme zamanı ve referans hıza göre düşük bir hata payına sahip olduğu gösterilmiştir. Son bölümde ise elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılmış bu karşılaştırmalar ışığında literatürdeki çalışmalara göre tezde kullanılan modelin ve geliştirilen kontrol yöntemlerinin üstünlükleri ve uygun olmayan yönleri tartışılmıştır. Son olarak bu çalışmaların devamında yapılması gerekenler geleceğe yönelik çalışmaların yön ve nitelikleri hakkındaki düşünceler ortaya konmuştur.

2. ULTRASONİK MOTORLAR



Ultrasonik motor stator yüzeyinde ultrasonik titreşimler oluşturan ve bu titreşimleri rotor vasıtasıyla hareket enerjisine dönüştüren bir çeşit elektrik motorudur. İlk ultrasonik motor 1973 yılında H.V. Barth tarafından önerilmiştir [Sashida and Kenjo, 1993]. Rotor sürtünme kuvveti etkisiyle piezoelektrik malzemede üretilen titreşimlerin hareket enerjisine dönüştürülmesiyle hareket eder.

Değişik mekanizmalar önerilmiştir. Bunlardan biride V. V. Lavrinenko'nun önerdiği USSR'dir. Bu motorlar düşük maliyet, düşük hızda yüksek tork üretme, birim ağırlık başına yüksek güç, tam pozisyon kontrolünün mümkün olması, bakır sargı kullanılmaması gibi değişik özellikleri sayesinde dikkati çekmiştir.

1978'de Vasiliev bir ultrasonik motor önermiştir. Bu motor piezoelektrik malzemenin kullanıldığı bir ultrasonik motordur. Bu motor titreştiricinin boylamsal titreşimlerini rotora aktarmakta, böylece rotor bu titreşimler sayesinde hareket enerjisi kazanmaktadır.

1980'de Japonya'da T. Sashida deneysel olarak üretilmiş olan titreşim tipli motoru yapmıştır. Ultrasonik titreştirici ve rotor aynı düzleme yerleştirilmiştir. Bu motor 27.8 kHz'de çalışmaktadır ayrıca sürgülü Langevin transdüseri kullanılmıştır. Çalışma frekansı işitilebilir frekans eşiği olan 20 kHz'in üzerindedir. 90 Watt giriş gücüyle 0.25Nm tork sağlamaktadır. Mekanik çıkış gücü ise 50 Watt'dır. Bu motor pratik kullanıma sahip ilk motor olması bakımından önemlidir. Buna karşı rotor ile titreştirici parça arasındaki alanda meydana gelen aşınma bir problem teşkil etmiştir. Bu problemi çözmek için T. Sashida 1982 yılında önerdiği yeni bir ultrasonik motoru imal etmiştir. Bu motor yürüyen dalga tipli ultrasonik motordur (TWUSM).

Bu motor elastik olarak yapılmış statorda meydana getirilen yürüyen dalgaları kullanarak çalışan bir motordur. Bu fikir özellikle Japonya'da birçok önerinin ortaya atılmasını teşvik etmiştir ve değişik titreşim modları kullanarak (örnek: boylamsal, kırılğan, burulan) dairesel hareket elde edilmeye çalışılmıştır.

8

Dairesel hareket elde etmek amacıyla kullanılan titreşim modları ikiye ayrılır. Bunlardan birincisi tekli titreşim modudur. İkincisi iki veya daha çok titreşim modu kullanan tipidir. Tek titreşim modunu kullanan tipi ise duran dalga tipi ve yürüyen dalga tipi olarak ikiye ayrılır. Bizim çalışmamızda üstünde duracağımız ultrasonik motor tipi de yürüyen dalga tipli olanıdır. İleriki bölümlerde yürüyen dalga tipli ultrasonik motor üstünde daha çok durulacaktır.

Günümüzde bu motorların uygulamaları ve karakteristikleri üzerinde yoğun bir şekilde çalışıldığı gibi Canon firması kameralarda otomatik odak ayarı için sürme mekanizması olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte mikro motor olarak robot uygulamalarında da kullanılmaktadır.

2.1. Ultrasonik Motorun 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 bir 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- Yapısı basittir.
- 11- Ultrasonik motorun hızı azalırken taşıyabileceği yük torku artar.
- 12- Yüksek frekanslı güç kaynağına gereksinim duyar.
- 13- Rotor ile stator arasında sürtünmeyi azaltıcı direnci yüksek malzemelere ihtiyaç duyar.

14- Birkaç kiloWatt'dan büyük güçde yapılmaları kullandıkları titreşim modları yüzünden zordur.

Yukarıda bahsedilen bir çok özellik sayesinde ultrasonik motorlar elektromanyetik motorların kullanılmasında yetersiz kalınan alanlarda gün geçtikçe yerini almaktadır.

2.2. Kullanım Alanları

2.2.1. Robot Hareket Ettiricilerinde

Endüstriyel robotların büyük bir bölümü yağ basıncını kullanan hareket mekanizmalarına sahiptir. Bu mekanizmalar yağ basıncını sağlayan merkezi basınç birimlerine bağlanmak zorundadır. Dolayısıyla robotların serbest hareket etmesi mümkün değildir. Elektromanyetik prensiple çalışan motorlar ise istenen güç değerleri için hem kendileri hem de sürücülerini çok büyük olmaktadır. Kullanılan bu sistemlerin dezavantajlarını ultrasonik motorlar giderebilmektedir. Ultrasonik motorlar sayesinde hareket ettirici mekanizmalar ufak boyutlarda olabilmekte böylece bu motorlar ile yapılmış robotların evlerimize kadar girecek yapıda olması mümkün kılınmıştır.

2.2.2. Otomatik Odaklama

Fotoğraf makinelerinde otomatik odaklama için halka tipli ultrasonik motorlar kullanılabilir. Bu alanda kullanılmasının sebebi sessiz çalışması boyutları ve tam konumlama yapılabilirliğidir.

2.2.3. Yarı İletken Üretiminde

Yarı iletken üretiminde nanometre boyutlarında tam ve hızlı pozisyonlama yeteneğine sahip ultrasonik motorlar kullanılmaktadır. Ultrasonik motorların direkt kontrol edilebilmesi ve lineer veya açısal hareket edebilen ultrasonik motorlar ile tam

konumlama yapılabilmesi bu motorların gün geçtikçe daha geniş bir alanda kullanılmasını sağlamıştır

2.2.4. Minyatür Makinalarda

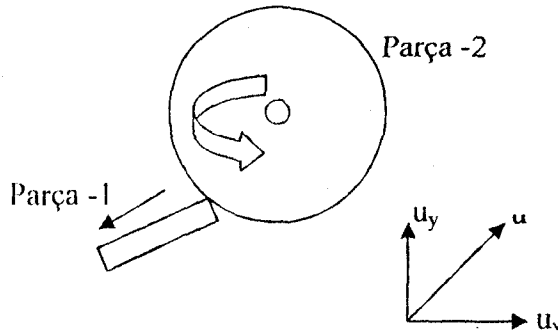
Elektromanyetik motorlar içinde barındırdıkları bakır sargılar nedeniyle en küçük birkaç milimetre çapında yapılabilmesine rağmen ultrasonik motorlar çok daha küçük çaplarda imal edilebilmektedir. Şu an itibariyle ultrasonik motorların ne kadar daha küçültülebileceği konusunda alt bir sınıra ulaşılmamıştır. Bununla birlikte ulaşılan boyutlar sayesinde bir böcek kadar ufak sistemleri sürecekle mikro motorların yapılması mümkün olmuştur.

2.2.5. Uzayda

Yerçekiminin olmadığı ve vakumlu bir ortamda makinalar düşük hızlarda kullanılırlar. Ultrasonik motorlar düşük hızlarda direkt çalışmasından ve yüksek tork vermesinden dolayı uzay koşullarında da çalışabilir.

2.3. Ultrasonik Motorların Çalışma Prensibi

Ultrasonik motorların genel anlamda çalışması Şekil-2.1'de gösterildiği gibi Parça-1'de oluşturulan bir yer değiştirmenin Parça-2'ye aktararak açısal bir hareket elde etmeye dayanır. Bu prensibi öne sürenler H.V. Barth, V.A. Gromakocskii ve T. Sashida'dır. Bu kişiler ultrasonik motorun kurucuları olarak bilinirler [Sashida and Kenjo, 1993].

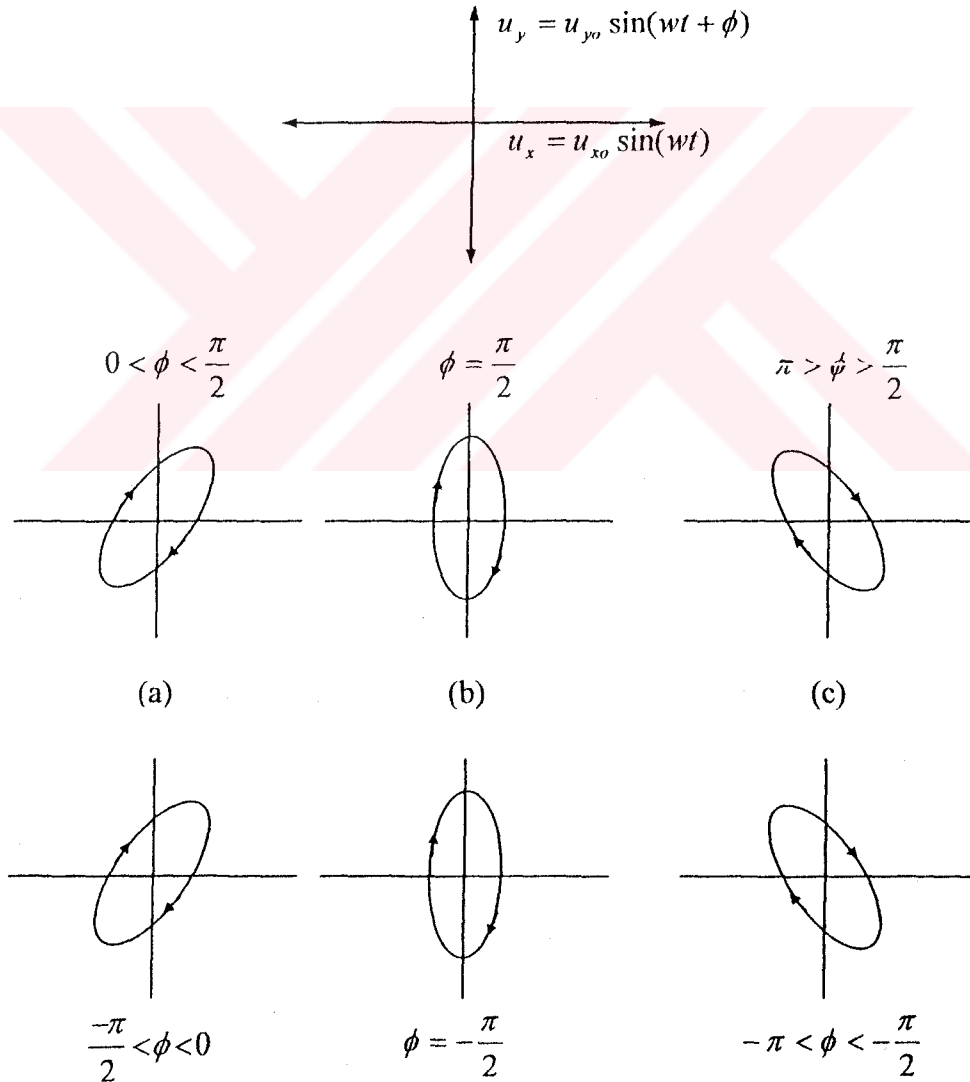


Şekil-2.1 Ultrasonik Motorun Çalışması

Parça-1'deki hareketi Parça-2'ye aktarmak için değişik yöntemler öne sürülmüştür. Yer değiştirme olan u_x ve u_y bağımsız olarak iki titreştirici ile oluşturulabileceği gibi tek titreştirici ile de oluşturulabilmektedir. Burada amaç Parça-1'de titreşimle oluşan hareketi Parça-2'ye aktararak açısız bir hareket elde etmektir. Ultrasonik motorların temel prensibi de budur.

2.3.1. Eliptik Hareketin Elde Edilişi

Ultrasonik motorun hareket edebilmesi için u_x ve u_y yönlerinde yer değiştirmesi gerekir. Şekil-2.2'de u_x ve u_y arasındaki açığa bağlı olarak eliptik hareketin meydana gelişi gösterilmektedir. Eğer aradaki açı sıfır ise u_x ve u_y aynı fazlıdır. Dolayısıyla eliptik hareket oluşmaz. Doğrusal hareket meydana gelir.



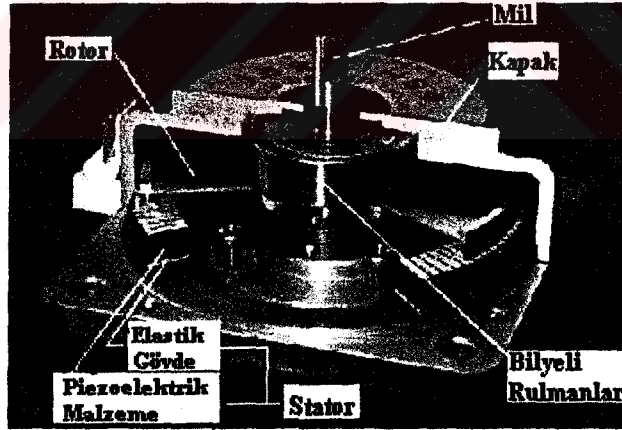
Şekil-2.2. Eliptik Hareket

Şekil-2.2.'de gösterilen eliptik hareket yardımıyla açısal hareket eden ultrasonik motorun yönünü değiştirmek için faz açısı ϕ 'nin işaretini değiştirmek yeterlidir. Bunun içinde motora uygulanan fazların sırası değiştirilir.

2.3.2. Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun Yapısı ve Çalışma Prensibi

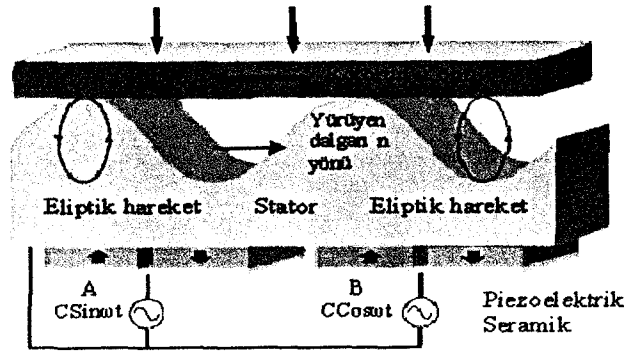
Ultrasonik motorların geliştirilmiş değişik tipleri vardır. Genellikle kullanılan tipi yürüyen dalga ultrasonik motorlardır (TWUSM). TWUSM 90° faz farkı bulunan iki yüksek frekanslı gerilimin statora uygulanması ile sürülürler.

Şekil-2.3'de TWUSM'nin yapısı görülmektedir. TWUSM stator ve rotor olmak üzere temel iki parçadan oluşmaktadır. Stator elastik malzeme ve piezoelektrik seramikten oluşur. Rotor disk yayı vasıtasıyla statora karşı preslenmiş bronz malzemeden imal edilir. Statora 90° faz farklı iki sinüsoidal dalga uygulandığı zaman statorun yüzeyinde eliptik dalgalar meydana gelir. Bu eliptik dalgalar sayesinde sürtünme kuvvetiyle rotor hareket eder.



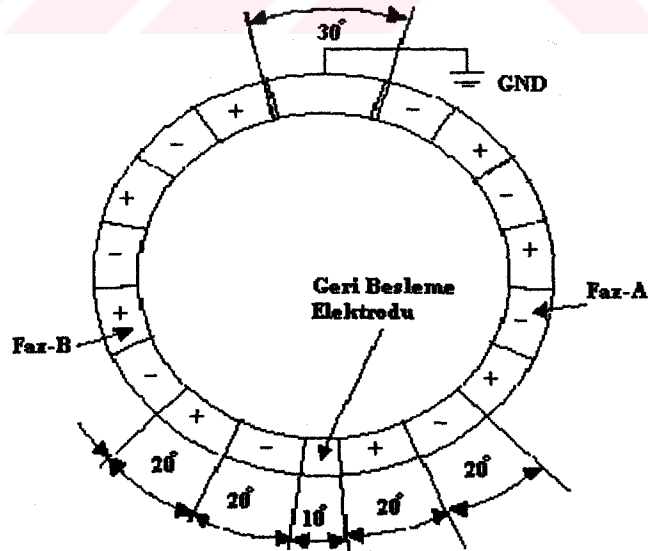
Şekil-2.3 TWUSM'nin Yapısı
[<http://www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/English/html/>]

Statorun üzerinde meydana gelen eliptik hareketler stator yüzeyinde yürüyen dalganın oluşmasına neden olurlar (Şekil-2.4). Yürüyen dalgalar sürtünme kuvvetinin etkisiyle rotoru yürüyen dalganın tersi yönünde hareket ettirirler.

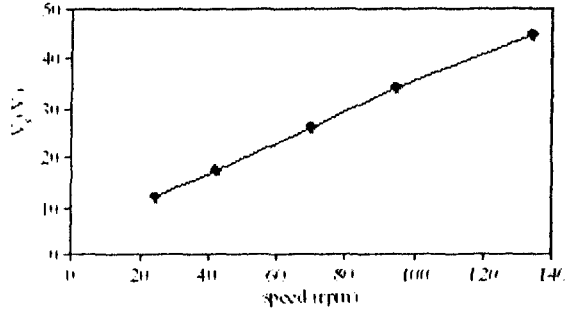


Şekil-2.4 TWUSM'nin Çalışması

Yürüyen dalga elde edebilmek için iki adet mekaniksel mod gereklidir. Şekil-2.5'de elektrot-A $\cos k\theta$ fazının, elektrot-B $\sin k\theta$ fazının oluşumunu sağlar. Uygulanan bu 90° faz farklı iki gerilim zamana bağlı olarak yürüyen dalga oluştururlar. Uygulanan bu sinyallerin işaretinin değişimi motorun dönüş yönünün değişimini sağlar. Ayrıca şekil-2.5'de görüldüğü gibi A ve B bölümleri arasına geri besleme elektrodu yerleştirilmiştir. Bu elektrot stator yüzeyinde mekaniksel titreşimler meydana geldiği zaman yüksek frekanslı AC gerilim üretir. Üretilen gerilimin değişimi şekil-2.6'da verilmiştir. Şekil-2.6'da gösterilen bu ilişki yardımı ile ekstra bir hız sensörü kullanılmadan hız-kontrol uygulamaları rahatlıkla gerçekleştirilebilir.



Şekil-2.5. Piezoelektrik Disk ve Elektrot Sıralaması



Şekil-2.6 Geri Besleme Gerilimi ile Hız İlişkisi

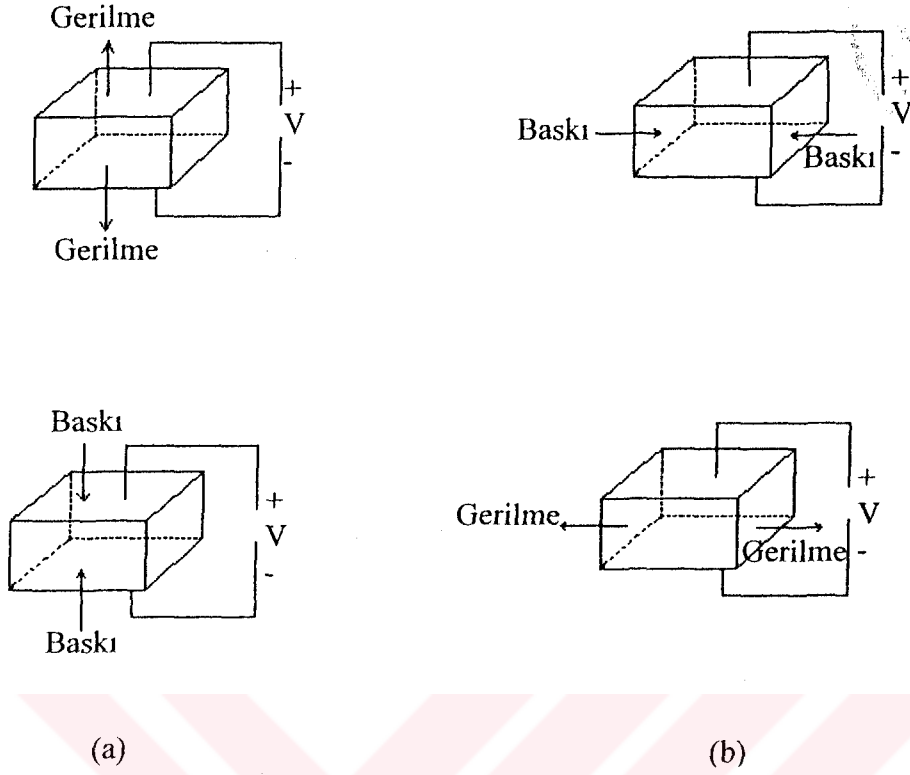
2.4. Piezoelektrik Eleman

Piezoelektrik eleman, üzerine basınç uygulandığı zaman elektrik üreten, tersi yapıldığında yani elektrik uygulandığı zaman titreşen bir malzemedir. Piezoelektrik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar, piezoelektrik özellik gösteren yeni malzemeler geliştirmeye yönelik olduğu gibi bir piezoelektrik malzemede matematiksel olarak elektrik enerjisinden mekanik enerjiye geçiş yolları üzerine yoğunlaşmaktadır.

2.4.1. Piezoelektrik Etki

Piezoelektrik etki ilk olarak quartz malzemedede J. Curie ve P. Curie kardeşler tarafından 1880 yılında bulunmuştur. Piezoelektrik malzemeye baskı uygulandığı zaman gerilim üretir, gerilim uygulandığı zaman da titreşim oluşturur. Bu etkiye piezoelektrik etki denir. Kristaller değişik miktarlarda piezoelektrik etki gösterirler.

Piezoelektrik malzemeye gerilim uygulandığı zaman meydana gerilme ve baskı uygulandığı zaman oluşan gerilim ile bunların ters etkileri Şekil-2.7.'de gösterilmiştir.



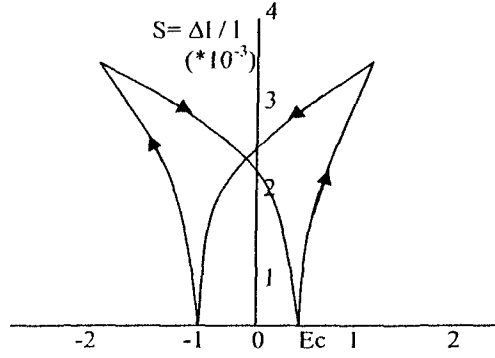
Şekil- 2.7. Piezoelektrik Etki

2.4.2. Piezoelektrik Malzemenin Elektrik Alanı İçindeki Zorlanması

Kristal malzemeler elektrik alanı içine konuldukları zaman iki tür etki gösterirler. Bunlardan birincisinde, kristalde oluşan zorlanma uygulanan elektrik alan kuvveti ile orantılıdır. İkincisinde ise uygulanan elektrik alanının karekökü ile orantılıdır. Genel anlamda birincisi *piezoelektrik etki* olarak tanımlanırken ikincisi *elektrostriktif etki* olarak isimlendirilir.

Mikroskop altında incelenen bir kristalin kompleks bir yapı içinde olduğu ve kompleks davranış gösterdiği görülür. Şekil-2.8 bir PLZT'nin ((Kurşun Pb, Lantan La), ((Zirkonyum Zr, Titanyum Ti)O₃ ana bileşenlerinden oluşan kristal) elektrik alanı içindeki zorlanmasını verir. Verilen eğri mekanik histerezis eğrisi gibidir. Görüldüğü gibi çok kompleks bir yapıya sahiptir. Kompleks yapısından dolayı yeni

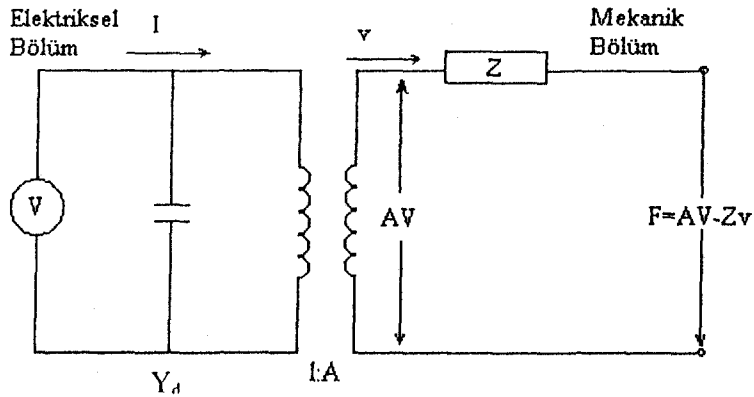
terminoloji ve model üzerinde kristal malzemenin elektrik alanı içindeki etkileşimi açıklanır. Bu model kutuplanma olarak da isimlendirilir.



Şekil-2.8. Elektrik Alan Kuvveti (kV/mm)

2.4.3. Piezoelektrik Eşitlikler

Ultrasonik motordan hareket enerjisi elde edebilmemiz için şu ana kadar bahsettiğimiz piezoelektrik malzemenin üzerine baskı uygulanması, malzemenin gerilmesi, gibi mekanik kavramlardı. Bu kavramların yanında, ultrasonik motora gerilim uygulayıp belli bir tork (moment) almaktayız. Mekanik terimlerden elektriksel terimlere geçişi bu bölümde açıklayarak temel eşitliklerden bahsedip eşdeğer devre modeline geçeceğiz. Şekil-2.9'da böyle bir eşdeğer devre gösterilmiştir. Bu devreye bakıldığında elektriksel ve mekanik bölümden oluştuğu görülür. Bu eşdeğer devre yardımı ile Formül-2.1 ve Formül-2.2 elde edilmiştir.



Şekil-2.9. Eşdeğer Devre

Piezoelektrik malzemenin davranışını tanımlamada öncelikle aşağıdaki ifadeler önemlidir.

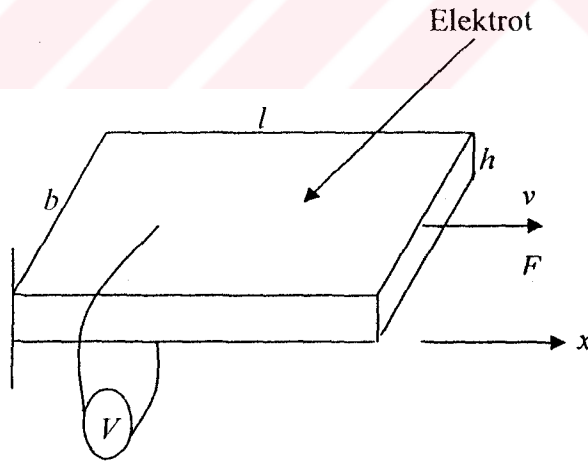
$$-F = AV - Zv \quad (2.1)$$

$$I = Y_d V + Av \quad (2.2)$$

Burada, F mekanik bölümdeki kuvvet, v mekanik bölümdeki hız, V elektrik bölümdeki gerilim, I elektrik bölümdeki akım, Z seramik malzemenin mekanik empedansı, Y_d blokaj admiktansı, A kuvvet faktörüdür.

Formül-2.1'de uygulanan kuvvet (F), uygulanan gerilim (V) ile kuvvet faktörünün (A) çarpımından mekanik empedans (Z) ile hızın çarpımının (v) çıkarılması ile bulunur. Böylece birim gerilim uygulanan seramikte kuvvet faktörü bir kuvvet meydana getirir.

Formül-2.2'de $Y_d V$ kapasitör sayesinde akan akımdır. Ayrıca Av akımı seramik malzeyi deforme eden akımdır. A 'nın birimi NV^{-1} 'dir. Kuvvet faktörü A seramik malzemenin boyutlarına ve özelliklerine bağlıdır.



Şekil-2.10. Enine Etki

Şekil-2.10. Kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir.

$$\text{Alan Kuvveti} \quad E = V / h \quad (2.3)$$

$$\text{Baskı} \quad T = F / bh \quad (2.4)$$

$$\text{Gerilme} \quad S = x / l \quad (2.5)$$

$$\text{Hü} \quad v = dx / dt = j\omega x = j\omega Sl \quad (2.6)$$

$$\text{Akı} \quad I = bldD / dt = j\omega bldD \quad (2.7)$$

Yukarıda h , b ve l sırasıyla piezoelektrik malzemenin kalınlığı, genişliği ve uzunluğunu temsil eder. x yer değiştirme ve D akı yoğunluğunu ifade eder.

Şekil-2.6'dan yararlanılarak bulunan eşitlikler Formül-2.1 ve 2.2 içine yerleştirilip gerekli dönüştürmeleri yaparsak ana formüllerimiz aşağıdaki biçimini alır.

$$-Tbh = AEh - j\omega ZSl \quad (2.8)$$

$$j\omega bldD = YdEh - j\omega SSl \quad (2.9)$$

$$T = j\omega Z \frac{l}{bh} S - \frac{A}{b} E \quad (2.10)$$

$$D = \frac{A}{b} S + \frac{Yd}{j\omega bl} E \quad (2.11)$$

Elde ettiğimiz Formül-2.10 ve 2.11'i aşağıdaki gibi düzenlersek. Piezoelektrik seramiğin karakteristiklerini açıklayan ve e-form olarak bilinen eşitliği elde etmiş oluruz.

$$\Delta D = eS + \epsilon \Delta E \quad (2.12)$$

$$\Delta T = cS - e \Delta E \quad (2.13)$$

Bu iki eşitliğin karşılaştırılmasından kuvvet faktörü formül-2.14'deki gibi elde edilir.

$$A = be \quad (2.14)$$

Formül-2.13'de c baskı ve gerilme arasındaki ilişkiyi gösterir ($\Delta E=0$ olduğu durumda).

Aşağıdaki Formül-2.15'de gösterilen d elektrik alanı E ile gerilme S arasındaki ilişkiyi verir ($T=0$ durumunda).

$$d_{31} = \frac{S}{\Delta E} = \frac{e}{c} = \frac{e}{Ey} \quad (2.15)$$

buradan

$$e = d_{31} Y_{11} \quad (2.16)$$

$$A = b d_{31} Y_{11} \quad (2.17)$$

bulunur.

2.4.4. Eşdeğer Kapasitans

Yüksüz durumda piezoelektrik seramiğe bir dc gerilim uygulandığı zaman piezoelektrik malzeme esneme yaptıktan sonra ilk konumuna geri döner. Bu formül-2.18 ile açıklanır.

$$F = Kx \quad (2.18)$$

Burada F (N) uygulanan kuvvet x (m) yer değiştirme K (N/m) ise yay sabitidir.

Piezoelektrik malzemede üretilen kuvvet daha öncede gösterildiği gibi AV 'ye eşittir. A birim hızda üretilen akıma eşittir. Birim yer değiştirmede depolanan enerji Formül-2.19'daki gibidir.

$$q = Ax \quad (2.19)$$

buradan Formül-2.18'de yerine konursa

$$AV = K\left(\frac{q}{A}\right) \quad (2.20)$$

$$V = \frac{K}{A^2} q \quad (2.21)$$

$$C = \frac{A^2}{K} \quad (2.22)$$

ilişkileri elde edilir.

Görüldüğü gibi kapasitans, kuvvet faktörü ve yay sabitine bağlıdır. Kuvvet faktörü piezoelektrik seramiğin özellikleri yanı sıra stator ve rotor yüzeyleri arasına konan metal parçanın özelliklerinden de etkilenir.

2.4.5. Eşdeğer Endüktans

Piezoelektrik seramiğe AC gerilim uygulandığı zaman birleşim yüzeyindeki metal titreşim yapar. Bu titreşimin genliği yay sabiti K 'ya bağlıdır. Ayrıca seramik ve metal birleşiminin ağırlığı da bunda etkili olur. Formül-2.23'de endüktansın formülü verilmiştir.

$$L = \frac{m}{A^2} \quad (2.23)$$

Bu bölümde ultrasonik motorun çalışması ve piezoelektrik eşitliklerden bahsedildi. Üçüncü bölümde ise yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun (TWUSM)

modellenmesi üzerinde durularak çalışma karakteristikleri çıkartılacak ve çeşitli araştırmacıların deneysel çalışmaları ile karşılaştırılarak yapılacak analitik çözümlemenin doğruluğu gösterilecektir.

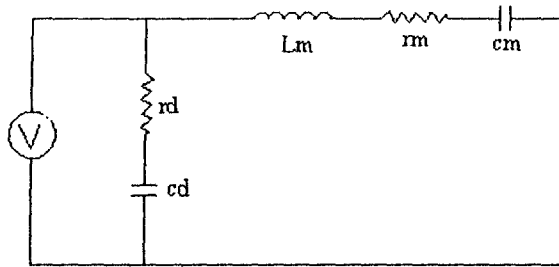


3. TWUSM'NİN MODELLENMESİ

3.1. TWUSM'nin Eşdeğer Devresi

Ultrasonik motorda iki adet enerji dönüşümü meydana gelir. Birincisi elektro-mekanik enerjinin dönüşümü yani elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümüdür. İkincisi mekanik titreşimlerin sürtünme kuvveti ile lineer veya açısal harekete dönüşmesidir.

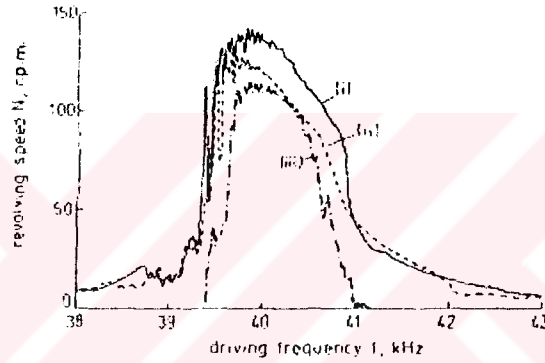
Şekil-3.1'de ultrasonik motorun bir fazının eşdeğer devresi verilmiştir. Eşdeğer devrede bulunan C_d , sönümlenme kapasitesini ifade eder. C_d piezoelektrik malzemenin dielektrik özellikleri ile ilgilidir. Bu kapasitans statorda herhangi bir titreşim gelmediği anda ölçülür. USR60 için bu değer 9nF'dır [Bal 2003]. r_d piezoelektrik seramiğin dielektrik kayıplarını gösterir. Ultrasonik motorun çalışma frekansında r_d ihmal edilebilecek düzeydedir. C_m statorun mekanik esnekliğini ifade eder. L_m statorun ağırlığından dolayı meydana gelen etkileri temsil eder. Histerezis dolayısıyla metal ve piezoelektrik malzeme arasında meydana gelen mekanik kayıplar r_m ile gösterilir. C_m , L_m ve r_m 'nin oluşturduğu empedansa hareketsetel empedans denir.



Şekil-3.1 Eşdeğer Devre

$C_m = A^2/k$ ve $L_m = m/A^2$ 'dir. k statorun yay sabiti, m metal parçalar ve stator seramik malzemenin ağırlığı, A kuvvet faktörüdür. A genellikle materyallerin özelliği ile belirlenir.

Eşdeğer devrede, C_m ve L_m arasında rezonans oluşturularak ultrasonik motor sürülebilir. Şekil-3.2'de değişik frekanslarda motorun hızı verilmiştir. Şekil-3.2 (i) ve (ii) de uygulanan frekansa bağlı olarak elde edilen hız verilmiştir. Motorun çok yüksek değerlerde nonlineerite içermesi, hızında da zamana ve frekansa bağlı olarak ani değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimlere motorun ısısındaki artışların büyük etkisi vardır. Şekil-3.2 (iii)'de motora yük torku uyguladığımızda motorun sadece rezonans frekansı etrafındaki değerlerde döndüğünü görürüz [Lin et al, 1997].



Şekil-3.2 Sürme Frekansı

Ultrasonik motor için Şekil-3.1'de verilen eşdeğer devre yardımı ile mekanik rezonans formül-3.1'de gösterilmiştir.

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/s}} \quad (3.1)$$

Sönüm admiktansı Y_d ve hareketsetel admiktans Y_m aşağıdaki formüllerde gösterilmiştir [Hüner ve Engin, 2005].

$$Y_d = \frac{1}{rd + 1 / j\omega Cd} \quad (3.2)$$

$$Y_m = \frac{1}{(rm + j\omega L_m + 1 / j\omega C_m)} \quad (3.3)$$

$$Y_m = \frac{r_o}{rm^2 + (\omega L_m - 1 / \omega C_m)^2} + j \frac{1 / \omega C_m - \omega L_m}{rm^2 + (\omega L_m - 1 / \omega C_m)^2} \quad (3.4)$$

$$I_m = V * Y_m \quad (3.5)$$

Seramik yüzeyindeki titreşim hızı [Bekiroğlu, 2002].

$$vib = I_m / A \quad (3.6)$$

Yürüyen dalga [Sashida and Kenjo, 1993].

$$\text{Mod-A} : \cos(\omega t) \cos(k\theta) \quad (3.7)$$

$$\text{Mod-B} : \sin(\omega t) \sin(k\theta) \quad (3.8)$$

$$\varpi = \cos(\omega t) \cos(k\theta) + \sin(\omega t) \sin(k\theta) \quad (3.9)$$

$$\varpi = \cos(\omega t - k\theta) \quad (3.10)$$

k: stator yüzeyindeki dalga sayısı

$$k = 2 \Pi / \lambda \quad (3.11)$$

λ : Piezoelektrik malzemenin (+) ve (-) ile kutuplanan bir dalgaının uzunluğu

ξ : üretilen dalgaının genliği

Rr: yürüyen dalgaının eksenel şekil katsayısı

Yürüyen dalga'nın hızı

$$\frac{d\varpi}{dt} = -\omega R_r \xi \sin(\omega t - k\theta) \quad (3.12)$$

$$\frac{d\varpi}{dt} = -v \sin(\omega t - k\theta) \quad (3.13)$$

Motorun hız ifadesi

$$vib = \omega R_r \xi \quad (3.14)$$

Devir sayısının deney sonuçlarından titreşim hızı ile k gibi bir sabitin çarpımına eşit olduğu gözlenmiştir.

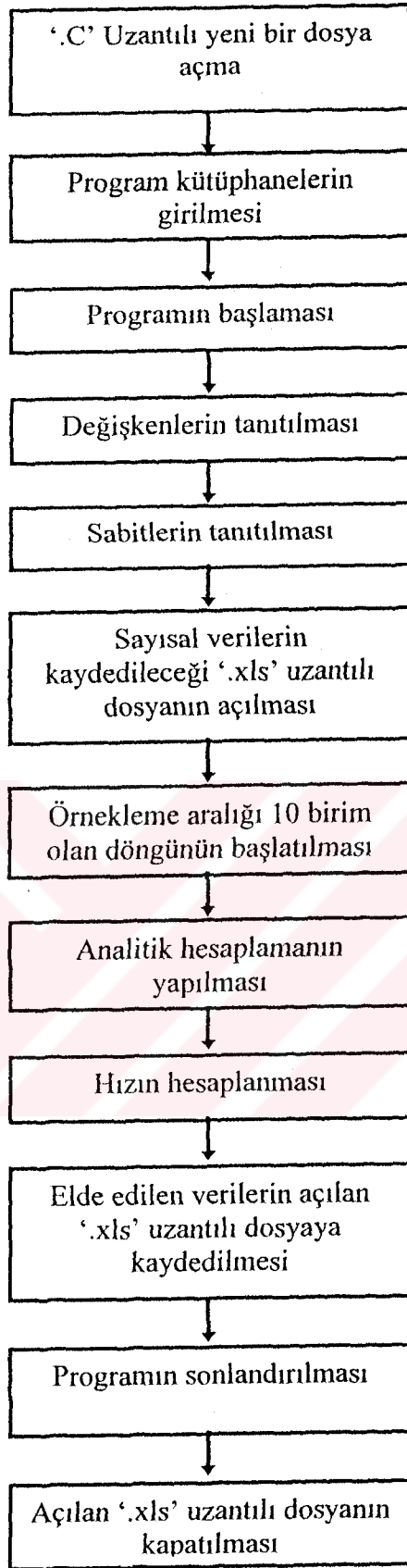
$$n = vib * k \quad (3.15)$$

3.2. C Programlama Dili ile TWUSM'in Eşdeğer Devresinin Analitik İncelenmesi

Bu bölümde bölüm 3.1'de verilen eşitlikler yardımıyla 'c' programlama dili kullanılarak TWUSM'nin analitik incelemesi yapılmıştır. Analitik inceleme deneysel olarak yapılmış çalışmalardaki sonuçlarla da karşılaştırılarak basitleştirilmiş eşdeğer devrenin ve oluşturulan c programının geçerliliği kanıtlanmıştır.

3.2.1. TWUSM'nin C Programı

C programlama dili kullanılarak Şekil-3.1'in devre çözümlemesi sayesinde yürüyen dalga ultrasonik motorun karakteristiklerini Şekil-3.3'deki akış şemasına uyularak oluşturulan program vasıtasıyla elde edildi.. Alınan sonuçlar da bölüm 3.2.2'de açıklandı.



Şekil-3.3 Program Akış Şeması



```
/* Kütüphanelerin yazılması */
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>

/* Programın Başlangıcı */
void main(void)
{
    FILE *dg;
    /*Değişkenlerin tanıtılması */
    double ro,lm,cm,cd,d,m,V,k,h,rm,f,w,Y,Zd,Zm,Z,i,id,im,vib,spd;
    clrscr();
    k=9.0;
    h=1.5e-3;
    rm=26.75e-3;
    ro=520.0;
    lm=0.102;
    cd=9e-9;
    cm=1.68e-10;
    V=100.0;

    /* Program değerlerinin kaydedileceği excel dosyasının oluşturulması */
    dg=fopen("C:\\proje4\\engin1.xls","wt");
    if(dg==NULL)
    {printf("\n dosya açılmıyor..");
    exit(1);
    }
    printf("\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",f,i,id,Y,vib,spd);
    fprintf(dg,"\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",f,i,id,Y,vib,spd);

    for(f=37000;f<=42500;f=f+10)
    {
        w=2.0*3.14*f;
        Zd=1.0/(w*cd);
```



```
Zm=sqrt(pow(ro,2)+pow((w*lm-1.0/(w*cm)),2));
```

```
Z=(Zd*Zm)/(Zd+Zm);
```

```
Y=1/Z;
```

```
i=V/Z;
```

```
id=V/Zd;
```

```
im=i-id;
```

```
vib=im/0.726;
```

```
spd=24.0*vib*k*h/pow(rm,2);
```

```
/* Elde edilen verilerin excel dosyasına yazdırılması */
```

```
printf("\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",f,i,id,Y,vib,spd);
```

```
fprintf(dg,"\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",f,i,id,Y,vib,spd);
```

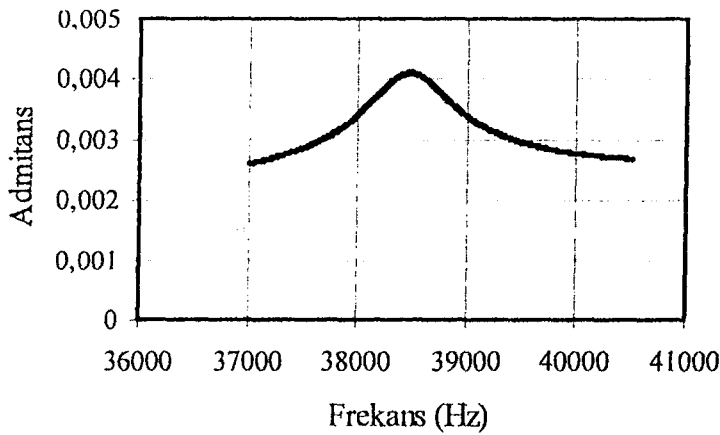
```
}
```

```
getch();
```

```
fclose(dg);
```

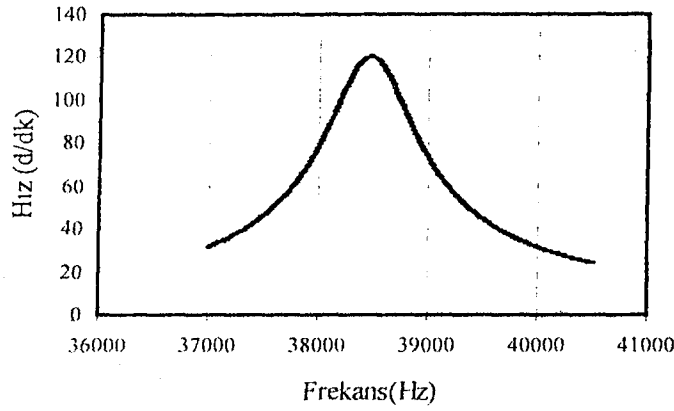
3.2.2. Elde Edilen Grafikler

Şekil-3.4'de TWUSM'nin frekan-admiktans eğrisi verilmiştir. Şekil-3.4'de görüldüğü gibi ultrasonik motor rezonans frekansı etrafındaki admiktans değeri daha büyüktür. Diğer bir deyişle empedansın en küçük olduğu ve motorun kolaylıkla sürülebileceği aralık rezonans frekansı etrafıdır.



Şekil-3.4 TWUSM'nin Frekans – Admiktans Grafiği

Şekil-3.5’de TWUSM’nin frekans devir sayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ultrasonik motor rezonans frekansı etrafında çalışabilmektedir. Bu değer 38-39 KHz civarındadır. Bunun dışındaki frekanslarda ultrasonik motorun hızı 20 d/dk’ya kadar düşmekte ve bazı frekanslarda ise motor çalışmamaktadır.



Şekil-3.5 TWUSM’nin Frekans (Hz)– Hız (d/dk) Grafiği

Şekil-3.5 ve Şekil-3.2’yi karşılaştırdığımızda deneysel sonuçlara dayanılarak elde edilmiş Şekil-3.2’deki nonlineeritelerden kaynaklanan bazı pikleri dikkate almadığımızda önerilen modelin gerçeği yansıttığını görebiliriz.

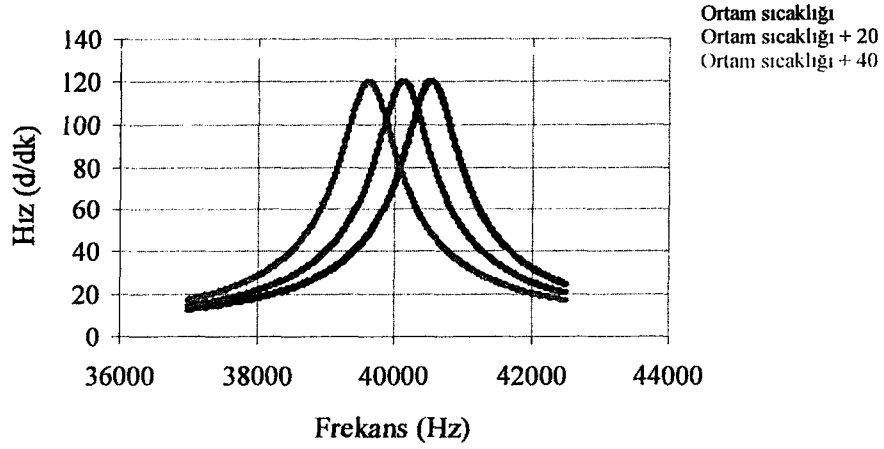
Yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun ana çalışma prensibi rotor ile stator arasındaki sürtünmeye dayanır. Sürtünme sonucu ise zamanla motorun ısısı artar. Motorun ısısının artması blokaj kapasitans değerinin formül-3.15 ve 3.16’da verildiği gibi değişmesine neden olur[Bekiroğlu, 2002].

$$T = -0.7405t^2 + 8.7286t + 19.09 \quad (3.15)$$

$$\Delta C = 0.5T - 10 \quad (3.16)$$

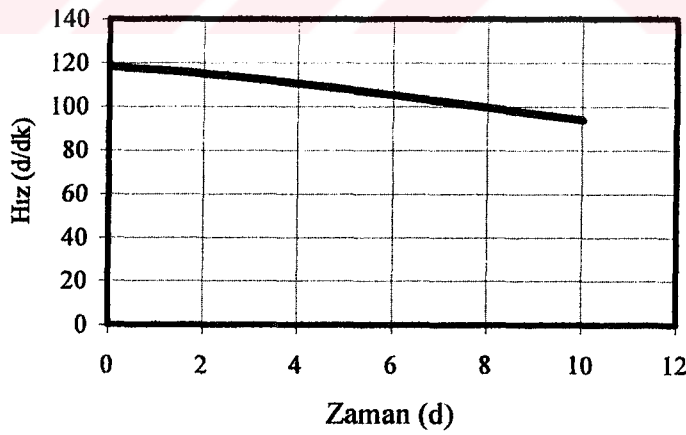
Formül-3.15 ve 3.16’yı programımıza eklediğimizde motorun ısı karakteristiklerini ve zamanla devir sayısındaki değişimi aşağıdaki şekillerdeki gibi elde ederiz. Görüldüğü gibi ısı artışı ile birlikte ultrasonik motorun çalışma frekansı

değişmektedir. Sabit frekansta göz önüne alındığında ısı artışı ile hızın düştüğü görülür.



Şekil-3.6 TWUSM'nin Sıcaklık Grafiği

Şekil-3.7'de ise ultrasonik motorun zamanla devir sayısının değişimi verilmektedir. Grafik ultrasonik motorun sabit bir frekansta(40600) çalıştırılması ile elde edilmiştir. Görüldüğü gibi zamanla motorun hızı düşmektedir. Bunun nedeni zamana bağlı olarak ısının artması ve motor parametrelerinin değişimi ile ultrasonik motor hızının azalmasıdır.

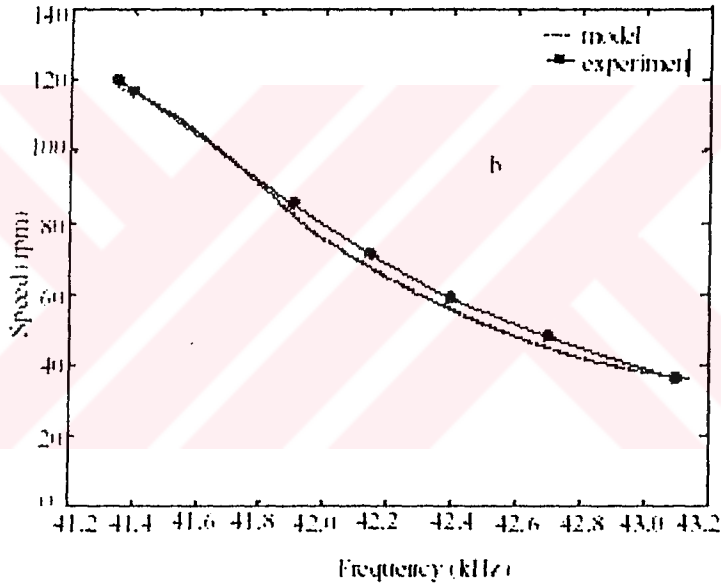


Şekil-3.7 TWUSM'nin Hız – Zaman Grafiği

Şu ana kadar verilen grafikler TWUSM'in eşdeğer devresinin 'c' dilinde analitik çözümlemesi ile elde edilmiştir. Bu karakteristiklerin doğruluğunu

kanıtlamak için yapılmış olan deneysel çalışmalardan faydalanılacaktır. Güngör Bal'ın "A Digitally Controlled Drive System For Travelling Wave Ultrasonic Motor" adlı çalışmasından alınmış olan Şekil-3.8'yi incelediğimizde yapılan modellemenin uygunluğu da görülmüş olur.

Şekil-3.8 incelendiğinde modelden alınan sonuçlarla deneysel sonuçların yakınlığı görülmektedir. Bizim şekil-3.5'de elde ettiğimiz model sonuçlarının da yapılmış olan bu çalışmaya yakınlığı görülmektedir. Dolayısıyla 'c' dilinde oluşturulan programın basitleştirilmiş eşdeğer devrenin analitik incelemesini gerçekleştirebildiği ve ultrasonik motor için çıkarılan frekans-hız karakteristiğinin uygunluğu kanıtlanmış oldu.



Şekil-3.8 TWUSM'nin Frekans- Hız Grafiği

Ultrasonik motorun bilinmesi gereken diğer bir karakteristiği de uygulanan yükün motor üzerindeki etkisidir. Bu etki Şekil-3.2'de verildiği gibidir. Şekil-3.2'den görüldüğü gibi ultrasonik motora yük torku uygulandığı zaman hızı azalmakta ve sadece rezonans frekansı etrafında dönebilmektedir. Lin'in deneysel çalışmaları sonucu alınmış Şekil-3.2 [Lin et al, 1997]'i modellemek için verilen 'c' koduna uygulanan torku ifade eden program satırları eklenir.

$$\Delta \text{spd} = \text{beta} * T;$$

$$\text{respd} = \text{spd} - \Delta \text{spd};$$

Uygulanan farklı değerlerdeki torku 3 ile 4'üncü dakikalar arasında yansıtabilmek için programımızı aşağıdaki gibi düzenleriz.

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>

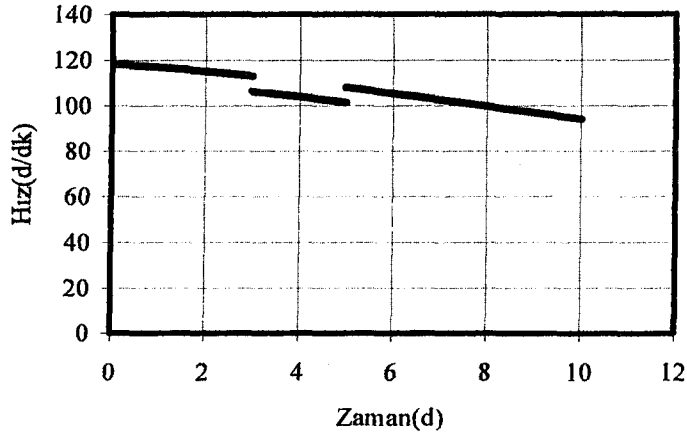
void main(void)
{
FILE *dg;
double
beta,dspd,T,sonhiz,ro,lm,cm,cd,V,k,h,rm,f,ft,w,Zd,Zm,Z,i,id,im,vib,spd,kp,ki,
e,m,t,l,Temp;
clrscr();
k=9.0;
h=1.5e-3;
rm=26.75e-3;
l=5.0;
Temp=20.0;
ro=520.0;
lm=0.102;
cd=9e-9;
V=100.0;
f=40600.0;
beta=6.7;
T=0.1;
dg=fopen("C:\\proje4\\USMT.xls","wt");
if(dg==NULL)
{printf("\n dasya açılamiyor..");
exit(1);
}
for(t=0.0;t<=100.0;t=t+0.1)
{
```

```

Temp=Temp+0.05;
ft=40000.0-(1*Temp);
cm=1.0/(lm*2.0*3.14*ft*2.0*3.24*ft);
w=2.0*3.14*f;
Zd=1.0/(w*cd);
Zm=sqrt(pow(ro,2)+pow((w*lm-1.0/(w*cm)),2));
Z=(Zd*Zm)/(Zd+Zm);
i=V/Z;
id=V/Zd;
im=i-id;
vib=im/0.726;
spd=24.0*vib*k*h/pow(rm,2);
if(t>30.0&& t<50.0)
{
dspd=beta*T;
sonhiz=spd-dspd;
printf("\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",t,f,id,im,vib,sonhiz);
fprintf(dg,"\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",t,f,id,im,vib,sonhiz);
}
else
{
dspd=0.0;
sonhiz=spd-dspd;
printf("\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",t,f,id,im,vib,sonhiz);
fprintf(dg,"\n%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t%4f\t",t,f,id,im,vib,sonhiz);
}
}
getch();
fclose(dg);
}

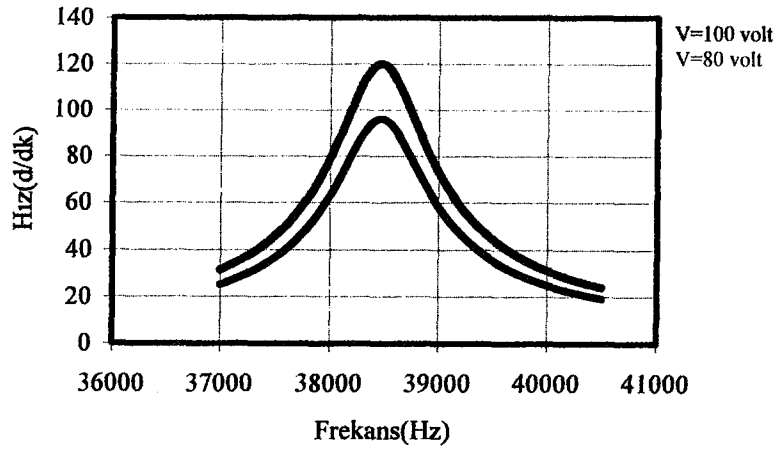
```

Program uygulanan yük torkuna göre düzenlendikten sonra ultrasonik motora $T=0.1N$ 'luk bir yük torku uygulanarak Şekil-3.8'deki karakteristik elde edilmiştir. Elde edilen karakteristikten de görüldüğü gibi 3 ve 4'üncü dakikalarda uygulanan yük torku nedeniyle hız direkt düşmektedir.



Şekil-3.9 TWUSM'nin Tork Grafiği

TWUSM'nin son karakteristiği de uygulanan gerilim ile devir sayısı arasındaki ilişkidir. Bu ilişki simülasyona değişik gerilim değerleri verilerek elde edilmiştir. Elde edilen Şekil-3.10'de görüldüğü gibi gerilim düştükçe hız azalmaktadır. Dolayısıyla ultrasonik motoru uygulanan gerilimi değiştirerek de kontrol etmemiz mümkündür.



Şekil-3.10 TWUSM'nin Gerilim Grafiği

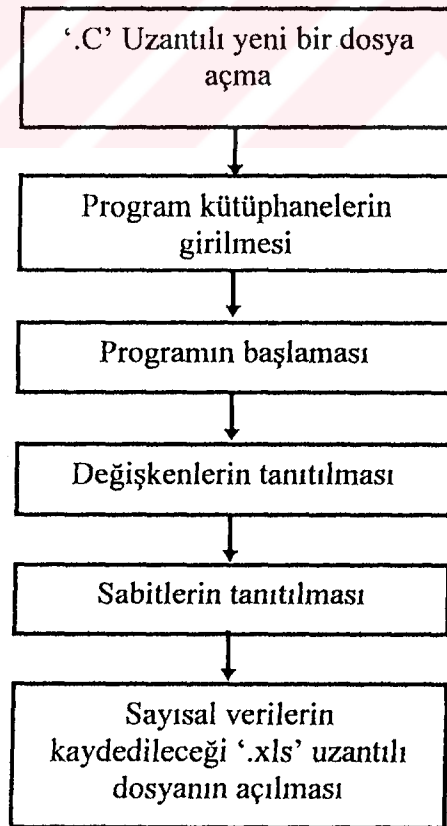
4. TWUSM'nin PI KONTROLÜ

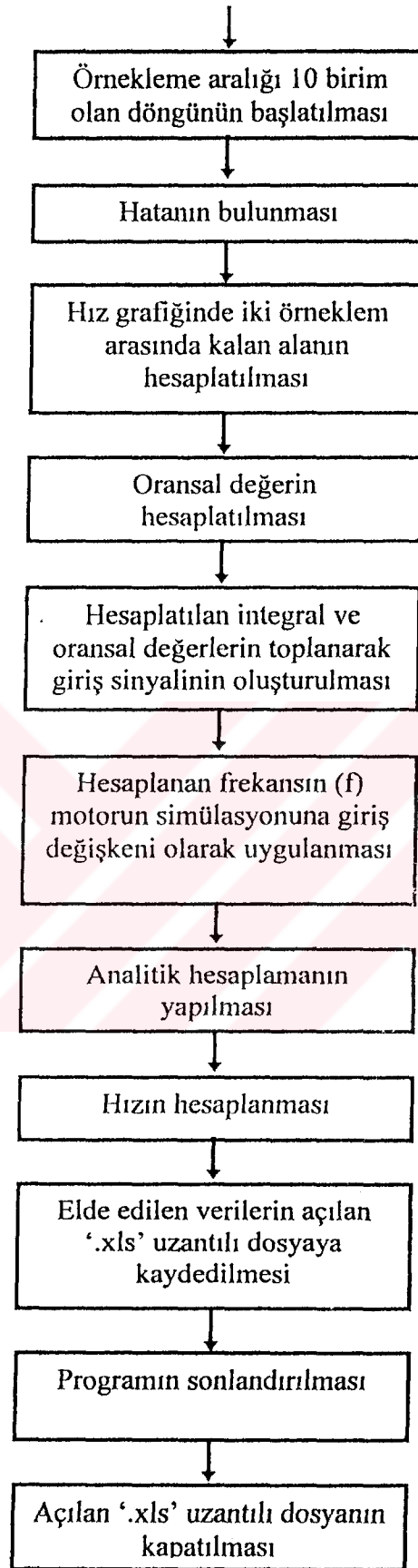
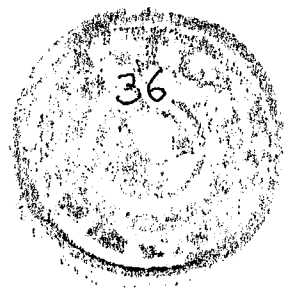
Bu Bölüme kadar ultrasonik motorlar hakkında genel bilgilerin yanı sıra Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun (TWUSM) karakteristikleri hakkında da bilgi verildi. 3. Bölümde TWUSM'nin modellenmesi ve karakteristikleri hakkında verilen bilgilerden yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun zamana ve yüke bağlı olarak hızında değişimler olduğu görülür. Kontrol uygulamalarında ise amaç sabit hız elde edebilmektir. Bunun için sistemler değişik yöntemlerle kontrol edilir. Bu kontrol yöntemlerinden biride PI kontrol olarak adlandırılan oransal ve integral kontrolüdür.

Bu bölümde TWUSM'ye PI kontrol uygulayarak ultrasonik motorun istenmeyen karakteristikleri düzeltilecektir.

4.1. PI Kontrolörün C Programlama Dili

Ultrasonik motorun modeline PI kontrolör ekleyerek Şekil-4.1'de verilen program akışına göre 'c' programı oluşturulur.





Şekil-4.1 PI Akış Şeması



```
/* Kütüphanelerin tanıtılması */
```

```
#include<stdio.h>
```

```
#include<math.h>
```

```
#include<conio.h>
```

```
#include<stdlib.h>
```

```
/* Programın başlaması */
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
FILE *dg;
```

```
/* Değişkenlerin tanıtılması */
```

```
double
```

```
ro,lm,cm,cd,V,k,h,rm,f,ft,w,Zd,Zm,Z,i,id,im,vib,spd,kp,ki,e,m,t,l,Temp;
```

```
clrscr();
```

```
/* Sabitlere değer verilmesi */
```

```
k=9.0;
```

```
h=1.5e-3;
```

```
rm=26.75e-3;
```

```
l=5.0;
```

```
Temp=20.0;
```

```
ro=520.0;
```

```
lm=0.102;
```

```
cd=9e-9;
```

```
V=100.0;
```

```
spd=0.0;
```

```
m=0.0;
```

```
/* Oransal ve integral katsayılarının verilmesi */
```

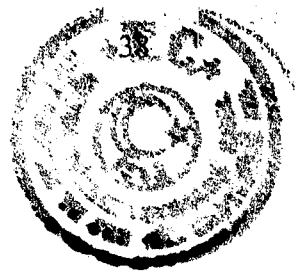
```
kp=5.0;
```

```
ki=10.0;
```

```
/* Verilerin kaydedileceği excel dosyasının açılması */
```

```
dg=fopen("C:\\proje4\\USMP.xls","wt");
```

```
if(dg==NULL)
```



```
{printf("\n dosya açilamiyor..");  
exit(1);  
}
```

```
/* Döngünün başlaması */
```

```
for(t=0.0;t<=100.0;t=t+0.1)  
{
```

```
/* Referansa bağlı olarak hatanın hesaplatılması */
```

```
e=(110.0-spd);  
m=m+ki*0.1*e;  
f=(kp*e)+m;  
Temp=Temp+0.05;  
ft=40000.0-(l*Temp);  
cm=1.0/(lm*2.0*3.14*ft*2.0*3.24*ft);  
w=2.0*3.14*f;  
Zd=1.0/(w*cd);  
Zm=sqrt(pow(ro,2)+pow((w*lm-1.0/(w*cm)),2));  
Z=(Zd*Zm)/(Zd+Zm);  
i=V/Z;  
id=V/Zd;  
im=i-id;  
vib=im/0.726;
```

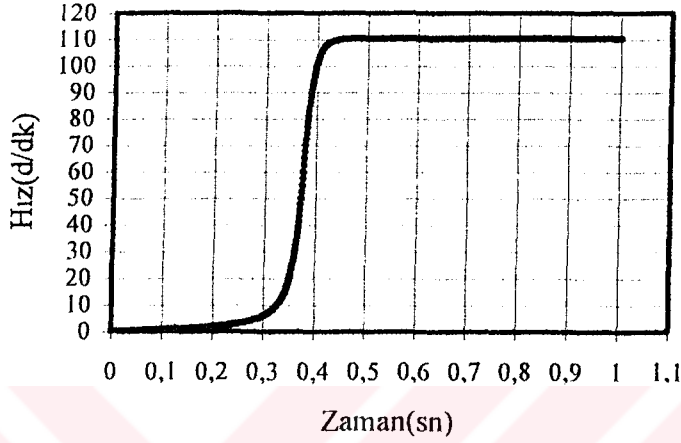
```
/* Hızın elde edilmesi ve dosyaya yazdırılması */
```

```
spd=24.0*vib*k*h/pow(rm,2);  
printf("\n%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f",t,f,id,im,vib,spd);  
fprintf(dg,"\n%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f",t,f,id,im,vib,spd);  
}  
getch();  
fclose(dg);  
}
```



4.1.1. PI Kontrolden Elde Edilen Grafik

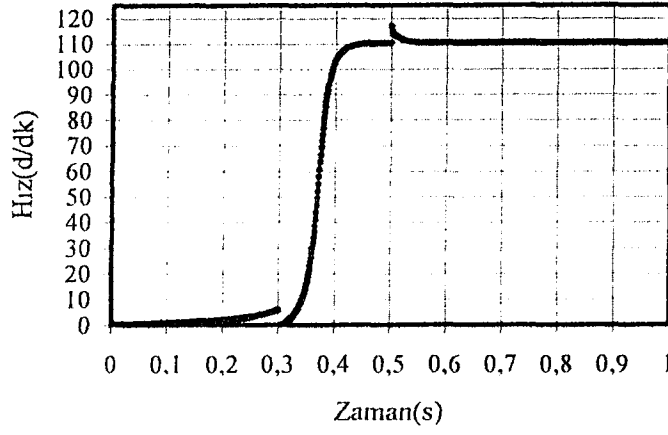
Şekil-4.2’de görüldüğü gibi referans hız olan 110d/dk hıza ultrasonik motor 0.5sn’ye yakın bir sürede ulaşmıştır. Hata oranı 0.25 d/dk’dır. Önerilen kp oransal ve ki integral katsayıları ile motorun istenilen referans hıza küçük bir sürede yerleşmesi mümkün olmuştur.



Şekil-4.2. TWUSM’nin PI Kontrolü

Ultrasonik motorun Şekil-4.2’de görüldüğü gibi zamana bağlı olarak azalan hızı PI kontrolör vasıtasıyla kontrol edilebilmiştir. Ultrasonik motora 0.3sn ve 0.5sn aralığında yük torku uygulandığı zaman ise Şekil-3.7’de görüldüğü gibi ultrasonik motorun hızı düşmektedir. Hızdaki bu düşüşü karşılamak için PI kontrol uygulanmıştır. PI kontrol sonucunda ise Şekil-4.3’de görüldüğü gibi 0.3sn ve 0.5sn’lerde hızda bir dalgalanma olsa bile ultrasonik motor 110 d/dk hıza erişmiştir.

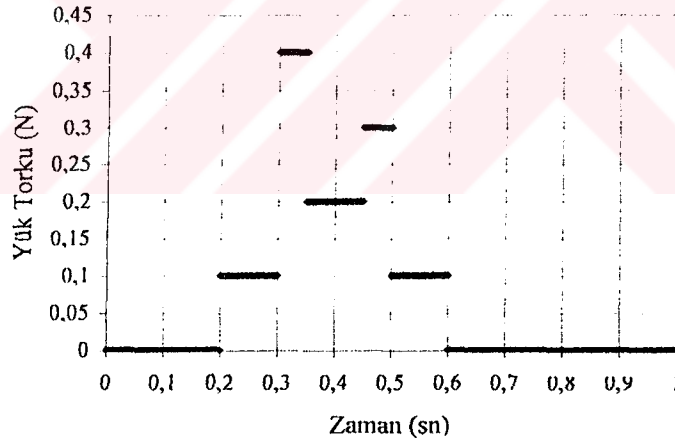
Ultrasonik motorun PI kontrolünde Şekil-4.2 ve 4.3’de görüldüğü gibi 0.5sn’ye yakın bir sürede yerleşme zamanı elde edilmiştir. Yapılan “Fuzzy Logic DSP Controlled Servo Position Control for Ultrasonic Motor” adlı çalışmada verilen yerleşme zamanı bakımından uygunluğu da gerçekleştirilmiştir [Bal ve Bekiroğlu, 2004].



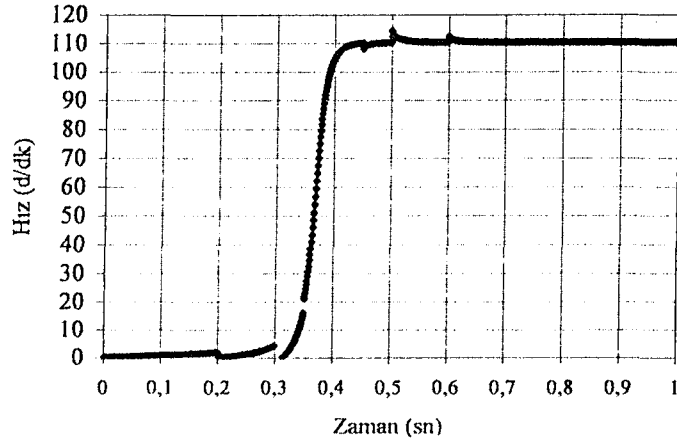
Şekil-4.3. UygulananYük Torkunun PI Kontrolü

4.1.1.2. Değişken Yükte TWUSM'nin PI Kontrolü

TWUSM'ye zamana bağlı olarak Şekil-4.4'deki yük torku uygulandığı zaman nominal yük torku 0.4N) PI kontrolör, Şekil-4.5'de gösterildiği gibi zamana bağlı olarak değişen yük torkuna karşı hızı sabitlemeyi başarmıştır.



Şekil-4.4. Değişken Yük Torku (N)



Şekil-4.5. Değişken Yük Torkunun PI Kontrolü

5. BULANIK MANTIK

5.1. Giriş

Fuzzy lojic Türkçe'deki karşılığı ile puslu veya bulanık mantığa karşılık gelir. Klasik mantık ile bulanık mantık, küme teoremleriyle açıklanır.

Klasik mantıkla oluşturulan bir kümede bulunan elemanlar kesinlikle kümeye aittirler. Örneğin; futbol oynayan insanlar kümesini oluşturduğumuzda futbol oynayan kişiler kümenin üyeleri olur. Diğer insanların tümü küme dışındadır ve bu kesin sınırlar ile çizilmiştir. Aynı şekilde Tekirdağ'da oturan insanlardan oluşan bir küme oluşturduğumuzda kümedeki üyeler kesinlikle Tekirdağ'da oturmalıdır. Görüldüğü gibi bütün önermeler kesinlik taşır ve bulanıklığa müsaade etmezler. Belirgin tanımlamalarda klasik küme teoremi oldukça tatminkar sonuçlar verir fakat günlük yaşamda kullandığımız bazı belirsiz bulanık ifadeler vardır, örneğin "akıllı adam" "genç kadın" "hızlı araba" "sıcak su" "serin oda" tüm bunlar aslında önermedir. Klasik küme teorisiyle "akıllı adam" lar kümesini kesin olarak tanımlamak imkansızdır. Mesela yapılacak bir zeka testi sonuçlarına göre değerlendirme yapalım. Teste katılan 100 kişiden 90'nı 120-110 aralığında, 10 kişi ise 120 ve üstü puan alsın. Test sonucuna göre 120 ve üstü olanları akıllı adam olarak kabul edeceğiz. Test sonucu 119 çıkmış ise kişiye klasik mantığa göre deli raporu verilmelidir. Oysa ki kişi 119 puanla akıllı adamlara çok yakın insan olarak tanımlanmalıdır. Fakat klasik mantık buna izin vermez. Burada bulanık mantık ve bulanık mantık ile oluşturulan kümeler devreye girer.

5.2. Bulanık Mantığın Kullanım Alanları

Bulanık mantık kullanan sistemlerle metroların işleyişi kontrol edilir. Televizyonların alıcıları ayarlanır, bilgisayar disklerinin kafaları kontrol edilir, kameralar görüntüye odaklanır, klimalar, çamaşır makineleri, elektrikli süpürgeler ayarlanır, buzdolaplarının buzlanması engellenir, asansörler ve trafik lambaları programlanır, otomobillerin motorları, süspansiyonları, emniyet firen sistemleri kontrol edilir, füzeler, çimento karıştırıcılar kontrol edilir, robot kolları yönlendirilir, karakterler, nesneler tanınır, golf kulüpleri seçilir, hatta çiçek düzenlemesi

yapılabilir. Görüldüğü gibi bulanık mantık sistemleriyle birçok uygulama yapılabilmektedir ve tüm bu sistemlerin temelinde kesin olmayan önermeler yatar.

5.3. Bulanık Mantığın Tarihçesi

Mantıksal paradokslar ve Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, 1920'ler ve 1930'larda çok değerli mantık sistemlerinin gelişmesine yol açtı. Kuantum teorisyenleri, iki değerli mantık sistemlerinin 'doğru' ve 'yanlış'tan oluşan değer kümesine, bir üçüncü veya orta doğruluk değeri ekleyerek 'belirlenemezlik'in ifade edilebilmesine imkan sağladılar. Bundan sonraki aşamada, 'doğru' ve 'yanlış', 'belirlenemezlik' tayfının sınır koşulları olarak görülüp belirlenemezlik derecelendirildi.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, 'belirlenemezliğin sürekliliğiyle, bilimi çok değerliliğe zorladı. Pek az batılı filozof çok değerliliği benimsemesine rağmen, Lukasiewicz, Gödel, ve Black, ilk çok-değerli ya da bulanık mantık ve küme sistemlerini geliştirdiler.

1930'ların başlarında Polonyalı mantıkçı Jan Lukasiewicz ilk üç-değerli mantık sistemini geliştirdi. Lukaziewicz, daha sonra doğruluk değerlerinin kümesini tüm sayılara genelleştirdi.

1930'larda kuantum filozofu Max Black, sürekli değerlere sahip mantığı, eleman düzeyinde kümelere uyguladı. Black, bulanık-küme üyelik fonksiyonlarından bahseden ilk kişi oldu. Black, ifade etmeye çalıştığı yapılardaki belirsizliği 'müphemlik' olarak adlandırdı. Zadeh'in bulanık-küme teorisinin aksine, Black'in çok değerli kümelerindeki her bir eleman, sürekli değerlere sahip bir mantık çerçevesinde ele alınan bir cümleyle eş-değerdi.

1965'te Azeri kökenli sistem bilimci Lotfi Zadeh, bir çok-değerli küme teorisi geliştirdi, ve 'bulanık' kelimesini teknik terimlere dahil etti.

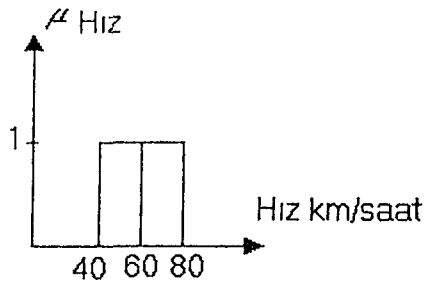
Ayrıca Zadeh bulanık küme teorisinin, büyük bir yaklaşıklıkla insanın karar verme sistemini modelleyebilecek yeterlikte olduğu fikrini ortaya atmıştır. Daha sonra Mamdani (1974), Kickert (1976), Tong (1977) ve Rutherford (1979) gibi birçok araştırmacı bulanık küme teorisinin kontrol sistemlerine uygulamaları üzerinde

çalışmış ve bulanık kontrolör yapısını kurmuşlardır. Mamdani ve Asselian (1975) küçük bir buhar makinesinin kontrolünü bulanık küme teorisiyle gerçekleştirdiler. Bu kontrolcüde makinenin hızı ve buhar basıncı, buhar makinesinin ısıtıcısı ve vana aracılığı ile ayarlanmaktaydı. Aynı yıllarda Nauta Lemke ve Kickert (1976) bir su ısıtma sisteminde de bulanık kontrolcünün performansını ölçtüler. Bu başarılı çalışmalar King ve Mamadani'ye (1976) bulanık algoritmayı kimyasal reaktör ısını düzenleyen bir kontrolcu geliştirmede öncülük etti. Rutherford (1976) ve Ostergaard (1976) ısı değiştiren bir işlemciye bulanık algoritmayı uyguladılar. Daha sonra Tong (1976) sıvı içeren bir tankın basınç kontrolünü bulanık denetimle gerçekleştirdi. Bu çalışmada bulanık algoritma, toplam basıncı ve tanktaki sıvı seviyesini kontrol etmekteydi.

5.4. Bulanık Mantıkta Kümeler

Bulanık mantık kümeleri kesin olmayan önermelerin oluşturduğu değerler ile oluşturulur. Önermelerin kümeye ait olma derecelerini ise, üyelik fonksiyonlarının değerleri belirler.

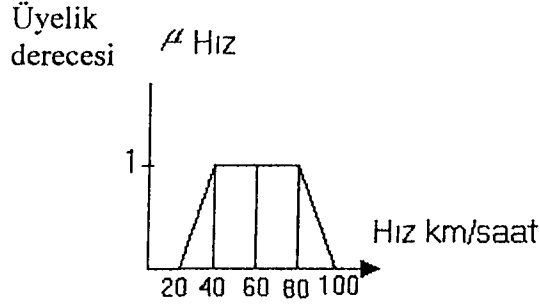
Klasik mantıkta üyelik fonksiyonlarını aldığı değerler 0-1 arasında değişir. Örneğin bir araba 40 km/saat ile 80 km/saat hız aralığında ilerlesin. Klasik mantıkta bu hız sınırları içinde araba gidiyorsa üyelik değeri 1, hız sınırlarını dışında seyrediyorsa üyelik değeri 0'dır (Şekil 5.1.).



Şekil-5.1. Bulanık Olmayan Hız Kümesi.

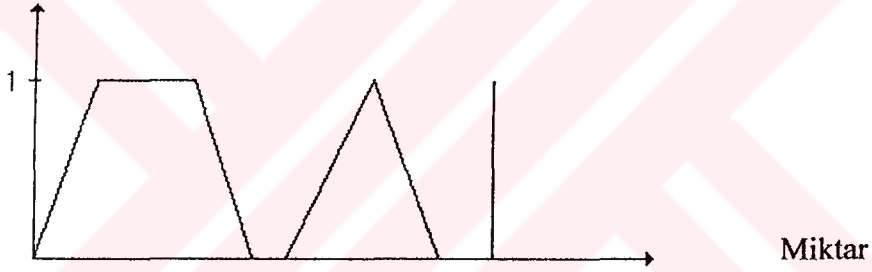
Bulanık mantıkta ise Şekil 5.2'de görüldüğü gibi arabanın hızı 20-40km/saat arasında iken üyelik fonksiyonu 0-1 arasında değer almaktadır. Yani oluşturduğumuz kümede istediğimiz aralıktaki araba hızına ne kadar ulaşıldığı derecelendirilerek

belirtilmiştir. Böylece kesin önermeler yerine yaklaşık önermelerde bulunabiliyoruz.. Ayrıca bu önermeleri az yaklaştı, çok yaklaştı, çok az yaklaştı, çok yakın gibi dilsel ifadelerle formüle edebiliyoruz.



Şekil 5.2. Bulanık Hız Kümesi.

Üyelik yani bir kümeye ait olma derecesi şekil-5.2'deki gibi üyelik fonksiyonunun yanında çeşitli üyelik fonksiyonları ile de belirtilir (Şekil-5.3).



Şekil 5.3. Çeşitli Üyelik Fonksiyonları.

Üyelik fonksiyonları farklı uygulama alanlarında çeşitli sayıda ve isimde etiket alabilirler. Genelde 7 ayrı etiket kullanılmaktadır.

NB: Negatif büyük

NM: Negatif orta

NS: Negatif küçük

ZE: Sıfır

PS: Pozitif küçük

PM: Pozitif orta

PB: Pozitif büyük

5.4.1. Keskin Kümeler

Keskin kümeler iki değerlidir. Eğer x E 'yi içeriyorsa 1, E 'yi içermiyorsa 0 olur. Keskin kümeler için 3 temel işlem vardır. Birleşme kesişim ve tümleyen.

$$x_E = \begin{cases} 1 & \text{.....} x \in E \\ 0 & \text{.....} x \notin E \end{cases} \quad (5.1)$$

5.4.1.1. Birleşim

A ve B bulanık kümelerin birleşimi $A \cup B$ aşağıdaki üyelik fonksiyonuyla tanımlanan bulanık kümedir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (5.2)$$

5.4.1.2. Kesişim

A ve B 'nin kesişimi $A \cap B$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (5.3)$$

5.4.1.3. Tümleyen

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.4)$$

5.4.2. Temel Bulanık İşlemler ve Bağlılıklar

5.4.2.1. Kapsama

X ve T iki bulanık küme ve T , X kümesinin elemanlarını içeriyorsa $X \subset T$ 'nin alt kümesidir.

$$X \subset T \text{ ise } \mu_x \subset \mu_y \quad (5.5)$$

5.4.2.2. Değil İşlemi

Bulanık X alt kümesinin değili $\bar{X}$ ile gösterilir. Bu durum aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu_{\bar{X}}(y) = 1 - \mu_X(y)$$

5.4.2.3. Birleşim

A ve B gibi bulanık kümenin birleşimi C bulanık kümesi olsun. $C = A \cup B$ ya da $C = A + B$ biçiminde yazılır. Toplam kümesinin üyelik fonksiyonu şu şekilde tanımlanır.

$$\mu_C(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (5.7)$$

5.4.2.4. Kesişim

A ve B gibi iki bulanık kümenin kesişimi C olsun. $C = A \cap B$ şeklinde yazılır. Üyelik fonksiyonu şu şekilde yazılabilir.

$$\mu_C(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (5.8)$$

5.4.2.5. Tümlen

A bulanık kümesinin tümleniyi $\bar{A}$ olarak gösterilir ve üyelik fonksiyonu şu şekilde yazılabilir.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.9)$$

5.4.3. Bulanık Bağlıntılar

Bir kontrol sistemini bulanık mantığın esaslarına göre kontrol etmek istediğimizde, kontrol sisteminin giriş ve çıkışları arasında dilsel ifadeleri kullanarak ilişkileri belirlememiz gerekir. Giriş ve çıkışlar arasındaki ilişkileri ise önermeler yardımıyla belirleyebiliriz. Örneğin bulanık A giriş değişkeniyle, bulanık B çıkış değişkeni arasındaki koşullu önerme, dilsel bir önermeyle verilir.

$A \rightarrow B$ veya EĞER A O HALDE B

Bu önermeyi şu şekilde ifade edebiliriz. Giriş şartı A ise çıkış şartı B 'yi gerektirir. Bir TWUSM için dilsel gerektirme bağıntısına bir örnek gerilim ve devir sayısı için şu şekilde olsun:

EĞER {uygulanan frekans 41000'den yüksekse} O HALDE {çıkış devir sayısı referans devir sayısından fazla olur}.

Giriş ve çıkış arasındaki bu bağıntı " R " A ve B kümelerinin kartezyen çarpımı olarak gösterilir.

$$R = A \times B = \sum_{U \times Y} \frac{\mu_A(x) \cap \mu_B(y)}{(u, y)} \quad (5.10)$$

$$R = A \times B = \begin{bmatrix} \min[\mu_A(u_1), \mu_B(y_1)] & \dots & \min[\mu_A(u_1), \mu_B(y_n)] \\ \min[\mu_A(u_m), \mu_B(y_1)] & \dots & \min[\mu_A(u_m), \mu_B(y_n)] \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Verilen U ve Y değişik söylem evrenini ifade eder.

5.4.3.1. Normal Bulanık Küme

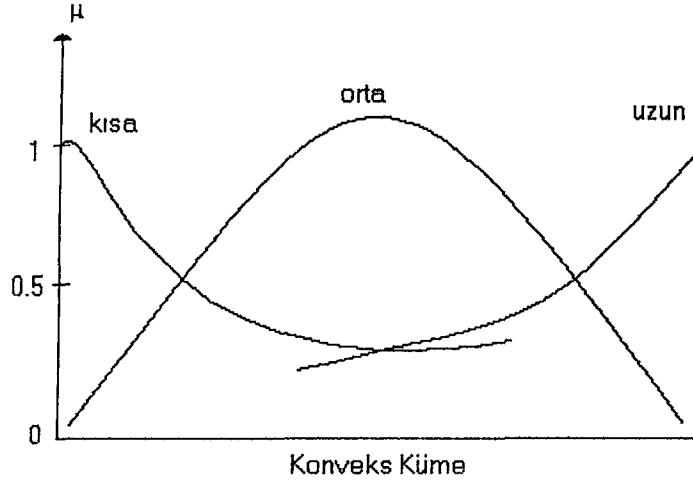
Üyelik fonksiyon derecesi 1 olan bir A bulanık kümesine, normal bulanık küme denir.

$$\max \mu_A(x) = \leftrightarrow A \quad (5.12)$$

5.4.3.2. Konveks Bulanık Küme

Herhangi bir $[a, b]$ aralığında tüm $x \in [a, b]$ için aşağıdaki formül geçerli ise A bulanık kümesi, konvekstir (Şekil 3.4.).

$$\mu_A(x) \geq \mu_A(a) \wedge \mu_A(b) \quad (5.13)$$



Şekil 5. 4. Konveks Kümeler.

5.4.3.3. Bulanık Kümelerin Doğrudan Çarpımı

$A \subset X$ (A, X 'in alt kümesi) ve $B \subset Y$ (B, Y 'in alt kümesi) olmak üzere A ve B 'nin doğrudan çarpımı; $A \times B$ şu şekilde ifade edilir.

$$A \times B \leftrightarrow \mu_{A \times B}(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \quad (5.14)$$

5.4.3.4. Kesim İlkesi

α kesim; üyelik derecesinin α oranında kesilmesi demektir. 0-1 arasındaki değişimin bulanık kümeye aitlik derecesini bulmak amacıyla kesim ilkesi uygulanır.

5.5. Bulanık Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri genel ifadeyle giriş bilgilerini yorumlayan ve çıkış değerleri üreten kontrol birimleri olarak tanımlanabilir.

Kontrol sistemleri açık sistemler ve kapalı sistemler olarak ikiye ayrılırlar. Açık devre sistemler verilen giriş bilgisine göre çıkış üretirler. Örnek olarak bir tost makinesi verilebilir. Tost makinesinde girdiğimiz sıcaklık değerine göre ısıtıcıya

çıkış verilebilir. Fakat ortamdan bilgi alınıp ayarlama olanağı olmadığı için sistemi manuel olarak durdurmamız gerekir.

Kapalı devre sistemlerde geri besleme bulunmaktadır. Ortamdan sensörler aracılığı ile alınan bilgilere göre zamana bağlı olarak giriş bilgileri değiştirilir. Örnek olarak klima sistemleri verilebilir. İstedığımız oda sıcaklığını yakalamak için klima, sensörler yardımıyla oda sıcaklığını ölçer ve yeni girdi değerleri üreterek otomatik olarak oda sıcaklığını istenilen değerde tutar.

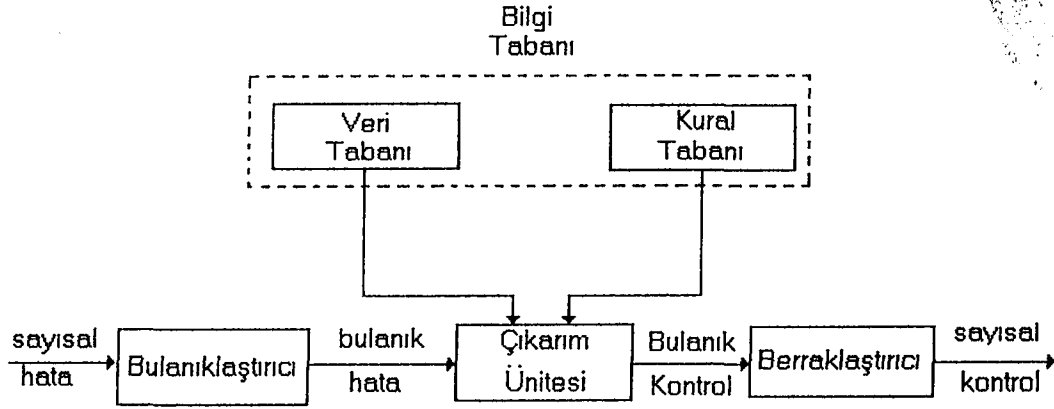
Kapalı çevrim sistemlerinin kontrolü klasik mantık kullanan sistemlerde çok uğraş gerektiren bir işlemdir. Bulanık algoritmalar kullanarak yapılan geri bildirimli sistemler ise kolaylık sağlar.

Bulanık kontrolörlerin genel çalışma prensibi, sensörler yardımıyla aldıkları bilgileri dilsel ifadelere dönüştürmek ve yine dilsel olarak kontrol ifadeleri göndermektir. Bu işlem insanın düşünme tarzına benzer. İnsanın karar verme mekanizması, aldığı verileri yorumlamak ve hareket mekanizmalarını harekete geçirecek sinyalleri üretme temeline dayanır. Bizde bir nevi insanın düşünme mekanizmasını algoritmalara dökerek kontrol işlemini gerçekleştirmiş oluyoruz.

Bulanık kontrolör uygulamalarında en büyük zorluğu sistemdeki dilsel ifadelerin belirlenmesi oluşturur. Çünkü dilsel ifadeler, sisteme uygulanacak etkiye karşı hangi tepkileri vereceğinin bilinmesi ile oluşturulur. Bunun içinde dilsel ifadelerin yazılmasında sistemin çalışmasını bilen uzman kişilere ihtiyaç duyulur. Sistemle ilgili uzman kişi bulamazsak sistemin etki-tepki ilişkilerini denemeler yaparak veya çeşitli simülasyonlar ile öğrenebiliriz.

5.5.1. Bulanık Kontrolörün Genel Yapısı

Bulanık kontrolörün genel yapısı şekil-5.5'de verilmiştir. Verilen yapı genel olarak 5 ana bölümden oluşur.



Şekil 5.5. Bulanık Kontrolörün İç Yapısı.

1. Kontrol kurallarını içinde barındıran “kural tabanı”.
2. Kural tabanında kullanılan dilsel ifadelerin üyelik fonksiyonlarını tanımlayan bir “veri tabanı”.
3. Bulanık kontrol kurallarını değerlendiren “çıkarım ünitesi”.
4. Sensörlerden alınan kesin sistem bilgilerini bulanık bilgiye dönüştüren “bulanıklaştırma birimi”.
5. Bulanık kontrol işaretlerini sayısal değere çevirerek sisteme uygulayan “berraklaştırma birimi”.

5.5.1.1. Bulanıklaştırma Birimi

Bulanık kontrol sistemlerinde sensörler yardımıyla alınan giriş değerleri yeni bir sayı sistemine çevrilirler. Böylelikle giriş bilgileri üyelik fonksiyonlarındaki dilsel niteleyicilere dönüştürülmüş olur. Giriş bilgilerini az, çok, çok fazla gibi dilsel niteleyicilere çevirmekle bulanıklaştırma yapmış oluyoruz.

5.5.1.2. Bilgi Tabanı

Bilgi tabanı veri tabanı ve kural tabanından oluşur. Kural tabanı uzman kişiler tarafından belirlenmiş kontrol davranışlarını tespit eden kontrol kurallarını içerir. Kontrol kuralları sistemin giriş ve çıkışları arasındaki mantıksal ilişkileri ifade eder.

Kural tabanı hazırlanmasında izlenecek 4 adet yol vardır.

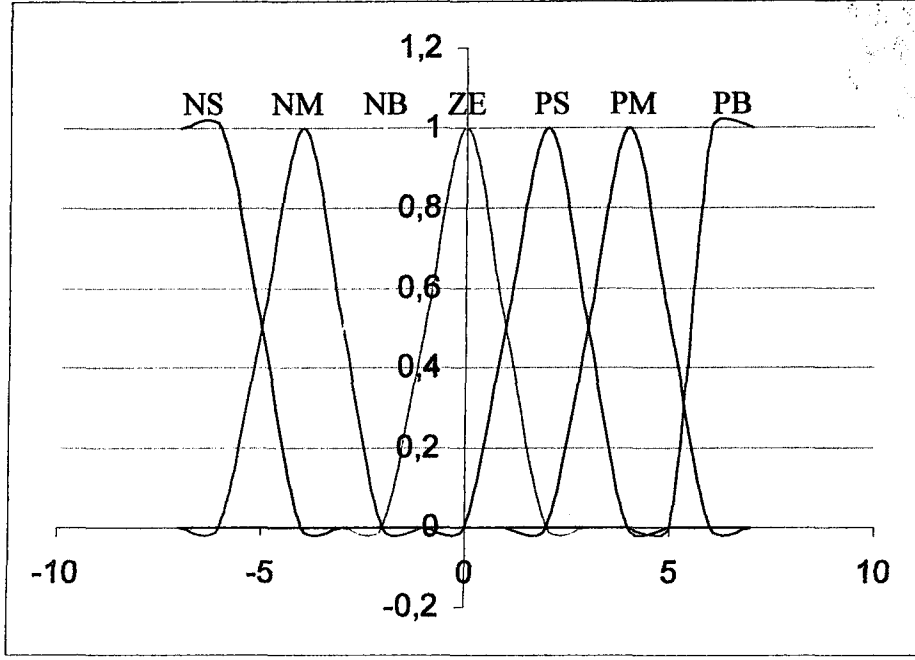
1. Kontrol kuralları doğrudan operatörün sisteme ait bilgi ve deneyiminden oluşturulabilir.
2. Kurallar sistemin bulanık modellemesinden üretilebilir.
3. Operatörün kontrol davranışları gözlenerek bulanık model oluşturulabilir.
4. Kurallar kontrol edilecek sistemin matematiksel modellemesinden çıkartılabilir.
5. Kurallar kontrolör tarafından gözlenir.

Örneğin giriş değişkeni gerilim, çıkış değişkeni devir sayısı olan bir sistemde kural tabanına ilişkin bir kural yazalım. “Eğer giriş gerilimi çok artmış ise çıkış değerini orta düzey artır”. Şeklinde sisteme ait tüm kurallar kural tabanına yazılır. Genel olarak sistemlerde kullanılan bir kural tabanı Çizelge-5.1’de verilmiştir. Fakat bu kural tabanı tüm uygulamalar için geçerli değildir.

Çizelge 5.1. Kural Tablosu.

e \ de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Veri tabanı ise hangi üyelik fonksiyonlarının kullanılacağını tanımlar. Örnek olarak şekil-5.6’da verilmiştir.



Şekil-5.6. Üyelik Fonksiyonları

5.5.1.3. Çıkarım Ünitesi

Bulanık kontrol sistemlerinde çıkarım ünitesi; sistem değişkenlerine ait kurallar ile, sistem değişkenlerini temsil eden bulanık büyüklükleri berraklaştırarak bir döngü içinde bulanık kontrol değerlerini bulur.

U ve V düzlemlerinde, sırasıyla A ve B bulanık kümeler ile tanımlandığında, A ve B arasındaki ilişkiyi temsil eden $R_{A \rightarrow B}$ bulanık ilişkisi, bir matris şeklinde elde edilir. Eğer birçok kural varsa, çok boyutlu matrisi oluşturmak, depolamak ve üzerinde işlem yapmak oldukça zordur. Bu nedenle $R_{A \rightarrow B}$ bulanık ilişkisini bulmak için bir çok bulanık ilişki yöntemi geliştirilmiştir.

X ve Y evrenlerinde girişi A , çıkışı B ile temsil eden iki bulanık küme tanımlansın. Bu iki bulanık küme arasındaki kural ise “Eğer A ise B ” şeklinde verilsin. Bu ifadelerin oluşturduğu kural tabanı, $X \times Y$ evrenindeki bir $R \rightarrow A \times B$ bulanık ilişkisiyle yorumlanır. Bu şekilde verilen bir bulanık ilişki; $R \rightarrow A \times B$ cebrik çarpım, aritmetik kural, minimum ilişki gibi değişik yöntemler kullanılarak elde edilmektedir. Verilen bulanık ilişki minimum ilişki yöntemiyle aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$mR(x,y) = (mA(x) \dot{\cup} mB(y))$$

(5.15)

“Eğer A' ise B' ” şeklinde verilen bir kural, “Eğer A ise B ” şeklindeki bir kurala uygulanırsa elde edilecek B' çıkışı, A' ile R' nin kompozisyonu alınarak bulunmaktadır.

$$B' = A' \circ R$$

(5.16)

Yukarıdaki “o” işlemi bir bileşimi göstermekte olup bulanık yorumlama kuralları kullanılarak elde edilmektedir. Bu işlem, max - min yöntemiyle yorumlanırsa aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$mB'(y) = \max[mA'(x) \dot{\cup} mR(x,y)]$$

(5.17)

mR' nin değeri 5.17' de yerine yazılırsa;

$$mB'(y) = \max[mA'(x) \dot{\cup} (mA(x) \dot{\cup} mB(y))]$$

$$= \max[mA'(x) \dot{\cup} mA(x) \dot{\cup} mB]$$

$$a = \max(mA'(x) \dot{\cup} mA(x)) \text{ ise}$$

$$mB'(y) = a \dot{\cup} mB(y)$$

(5.18)

Bulanık kontrolcüsü sistemlerinde n tane kural birbirine “veya” bağlacı ile bağlanır. n adet kuraldan oluşan bir kural tabanında bir çok kural aktif hale gelebilmektedir. Bu durumda minimum ilişki yöntemiyle tespit edilen kurallar, kendi arasında tekrar değerlendirmeye tabi tutulmaktadır.

Minimum ilişki yöntemi kullanılarak elde edilen çıkarım sonuçları, “ve” bağlacı kullanılarak yorumlanmaktadır. Bulanık mantıkta “veya” bağlacı max işlemine karşılık gelmektedir. İlk olarak girişler arasında minimum işlemi uygulanarak, her bir kuralın çıkış üzerinde ne kadar etkili olacağı bulunur. Sonra çıkışlar üzerinde max işlemi uygulanarak bulanık sonuç elde edilmektedir. Eğer

kurallar arasında aynı çıkışı veren kurallar mevcut ise bunların en büyüğü seçilerek diğer kural iptal edilmektedir.

5.5.1.4. Berraklaştırıcı

Bu ünite, çıkarım ünitesinden gönderilen kontrol işaretinin fiziksel ve kesin sayılara getirilmesini sağlamaktadır. Durulayıcı, bu işlemi aşağıda kullanılan yöntemlerden birini kullanarak yapmaktadır.

1- *Üyelik Fonksiyonunun Max Noktası*: Bu yöntemde aktif olan kuralların en büyük üyelik derecesi sayısal kontrol işareti olarak alınmaktadır.

2- *Maksimum ortalama değer metodu*: Bu metot da aktif kuralların çıkışlarına ilişkin üyelik fonksiyonlarının maksimum değerdeki skaler ağırlıklarının ortalaması kontrol işareti olarak alınır. Buna göre aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$U = \sum_{i=1}^l \frac{W_i}{l} \quad (5.19)$$

U sayısal kontrol işaretini, w üyelik fonksiyonun maksimum seviyeye ulaştığı değeri, l ise aktif kural sayısını temsil etmektedir.

3- *Ağırlık merkezi yöntemi*: Bu, uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Burada üyelik fonksiyonların bulanık çıkışlarının skaler ağırlıkları çarpılarak toplamaları alınır. Elde edilen değer, üyelik fonksiyon değerlerinin toplamına bölünmesiyle sayısal kontrol değeri bulunur. Aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu(w_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(w_i)} \quad (5.20)$$

Formülde, $\mu(w_i)$ üyelik fonksiyonunu, n kural sayısını temsil etmektedir.

6. BULANIK MANTIĞIN UYGULANMASI

Bölüm-1’de ultrasonik motorların tarihsel gelişimi üzerine literatür taraması verildi. Bölüm-2’de ultrasonik motorların genel yapıları ve çalışma prensipleri üzerine bilgi verildi. Bölüm-3’de ultrasonik motorun modellenmesi hakkında bahsedilip karakteristikleri verildi ve bölüm-4’de ultrasonik motorun PI kontrolü gerçekleştirildi. Bölüm-5’de ise bulanık mantığın genel yapısı hakkında bahsedildi.

Bu bölümde tezin ana amacı olan ultrasonik motorun bulanık mantıkla kontrol edilmesi üzerinde durulacaktır. Bölüm-5’de açıklanan bulanık mantık ultrasonik motora uygulanarak simülasyon gerçekleştirilecek ve simülasyon sonuçları yorumlanacaktır.

6.1. Bulanık Mantık Birimleri

6.1.1. Bulanıklaştırıcı

Alınan giriş değişkeni devir sayısıdır. Buna bağlı olarak çıkış frekansı kontrol edilerek devir sayısı ayarlanır. Bulanıklaştırma için önce bir önceki devir sayısına göre hatayı ve hatanın değişimi hesaplatılır. Ayrıca yapılan program simülasyon olduğu için sensörlerden direk bilgi almak yerine TWUSM simülasyonundan faydalanıldı. Alınan hata ve hatanın değişimi Formül-6.1’e göre hesaplatıldı.

$$\begin{aligned} hata &= (r - N); \\ dhata &= hata - hata1; \end{aligned} \tag{6.1}$$

Formül-6.1’de “*r*” referans devir sayısını, “*N*” simülasyon sonucu hesaplanan devir sayısı, “*dhata*” hatanın değişimini, “*hata1*” bir önceki hatayı gösteriyor. Pratik uygulamalarda ise, “*N*” direk algılayıcılar yardımıyla alınıyor.

Formül-6.2’de hata ve hatanın değişimine bulanıklaştırma işlemi yapılmıştır. “*e*” bulanıklaştırılmış hatayı ifade ediyor, “*de*” ise bulanıklaştırılmış hatanın değişimini ifade ediyor. “*ud*”ye söylem evreni denir. Üyelik fonksiyonlarının uç sınırlarını belirler.

$$e=ud*(hata/400.0);$$

$$de=ud*(dhata/400.0);$$

Formül-6.2'de hata ve hatanın değişimi üyelik fonksiyonlarının sınırlarını belirleyen 4000 değerine bölünerek yeni bir cetvel oluşturulmuştur. Bölümdeki bu değeri genişletmekle üyelik fonksiyonlarının tabanının yatay ekseninde uzaması sağlanır. Ayrıca bu değer PID'deki integral sabiti gibi görev yapar. Örneğin hata 4000 olduğunda $e=ud*1$ olur. Böylece hatayı "0" ile " $ud*1$ " aralığında ayarlamış oluyoruz. Üyelik fonksiyonlarındaki " ud " söylem evrenine göre ise ud yazılır ve giriş değişkeni dilsel ifadelerle dönüştürülmüş olur. Bu işlemle giriş değişkenleri bulanıklaştırılmıştır.

6.1.2. Bilgi Tabanı

Bilgi tabanını, veri tabanı ve kural tabanı oluşturur.

Veri tabanı üyelik fonksiyonlarından oluşur. Üyelik fonksiyonları sistemin giriş bilgilerinin dilsel olarak işlendiği fonksiyonlardır. Çan, üçgen, konveks gibi değişik üyelik fonksiyonları kullanılır. Simülasyonu yapılan bulanık kontrolörde, genelde yaygın olarak kullanılan üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır (Şekil 6.1).

Kullanılan ifadeler sırasıyla;

NS: Negatif küçük

NM: Negatif orta

NB: Negatif büyük

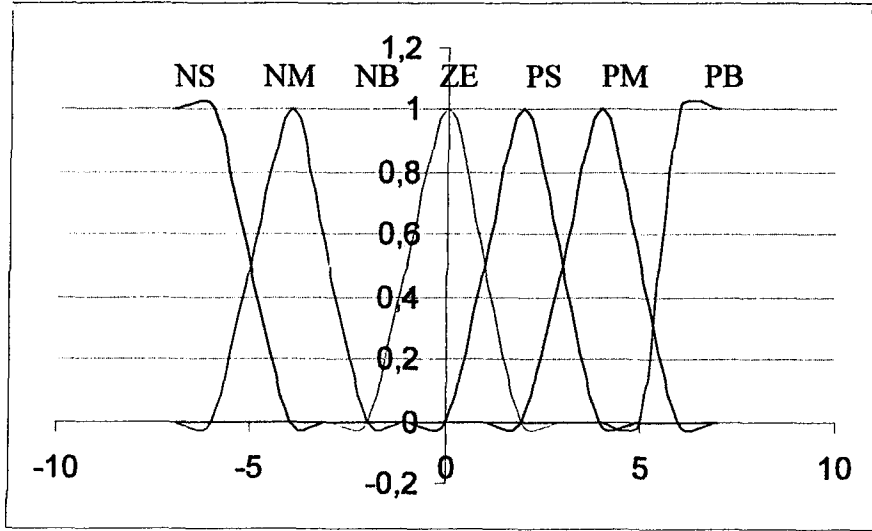
ZE: Sıfır

PS: Pozitif küçük

PM: Pozitif orta

PB: Pozitif büyük

Ud: söylem evreni



Şekil-6.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonları

Kural tabanı oluşumu üyelik fonksiyonlarındaki dilsel ifadeler arasındaki ilişkileri ifade eder. Yaygın olarak kullanılan Çizelge-6.1.'de gösterilen kural tabanı baz alınmıştır.

Çizelge 6.1. TWUSM İçin Kural Tablosu

e de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Çizelgede verilen kurallar aşağıdaki gibi yorumlanır;

- 1- Hatanın değişimi NB Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı NB
- 2- Hatanın değişimi NB Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı NB
- 3- Hatanın değişimi NB Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı NB

- 4- Hatanın değişimi NB Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı NB
- 5- Hatanın değişimi NB Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı NM
- 6- Hatanın değişimi NB Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı NS
- 7- Hatanın değişimi NB Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı ZE
- 8- Hatanın değişimi NM Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı NB
- 9- Hatanın değişimi NM Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı NB
- 10- Hatanın değişimi NM Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı NB
- 11- Hatanın değişimi NM Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı NM
- 12- Hatanın değişimi NM Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı NS
- 13- Hatanın değişimi NM Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı ZE
- 14- Hatanın değişimi NM Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı PS
- 15- Hatanın değişimi NS Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı NB
- 16- Hatanın değişimi NS Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı NB
- 17- Hatanın değişimi NS Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı NM
- 18- Hatanın değişimi NS Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı NS
- 19- Hatanın değişimi NS Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı ZE
- 20- Hatanın değişimi NS Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı PS
- 21- Hatanın değişimi ZE Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı PM
- 22- Hatanın değişimi ZE Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı NB
- 23- Hatanın değişimi ZE Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı NM
- 24- Hatanın değişimi ZE Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı NS
- 25- Hatanın değişimi ZE Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı ZE
- 26- Hatanın değişimi ZE Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı PS
- 27- Hatanın değişimi ZE Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı PM
- 28- Hatanın değişimi ZE Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı PB
- 29- Hatanın değişimi PS Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı NM
- 30- Hatanın değişimi PS Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı NS
- 31- Hatanın değişimi PS Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı ZE
- 32- Hatanın değişimi PS Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı PS
- 33- Hatanın değişimi PS Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı PM
- 34- Hatanın değişimi PS Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı PB
- 35- Hatanın değişimi PS Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı PB
- 36- Hatanın değişimi PM Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı NS
- 37- Hatanın değişimi PM Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı ZE



- 38- Hatanın değişimi PM Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı PS
- 39- Hatanın değişimi PM Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı PM
- 40- Hatanın değişimi PM Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı PB
- 41- Hatanın değişimi PM Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı PB
- 42- Hatanın değişimi PM Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı PB
- 43- Hatanın değişimi PB Ve Hata NB İse Çıkışın ağırlığı ZE
- 44- Hatanın değişimi PB Ve Hata NM İse Çıkışın ağırlığı PS
- 45- Hatanın değişimi PB Ve Hata NS İse Çıkışın ağırlığı PM
- 46- Hatanın değişimi PB Ve Hata ZE İse Çıkışın ağırlığı PB
- 47- Hatanın değişimi PB Ve Hata PS İse Çıkışın ağırlığı PB
- 48- Hatanın değişimi PB Ve Hata PM İse Çıkışın ağırlığı PB
- 49- Hatanın değişimi PB Ve Hata PB İse Çıkışın ağırlığı PB

6.1.3. Çıkarım Ünitesi

Bulanık kontrol sistemlerinde çıkarım ünitesi; sistem değişkenlerine ait kurallar ile, sistem değişkenlerini temsil eden bulanık büyüklükleri berraklaştırarak bir döngü içinde bulanık kontrol değerlerini bulur. Bulanık değerleri bulmak amacı ile minimum yöntemi uygulanmıştır.

“ $p(i)$ ” ile ifade edilen bulanık sayılar, kural tabanına göre 49 tane kuraldaki hata (e) ve hatanın değişimi (de) değerlerini minimum yöntemi baz alarak, minimum değerini seçilmesi ile hesaplanır.

6.1.4. Berraklaştırma

Bulanık kontrol sistemlerinde berraklaştırma; çıkarım ünitesinden elde edilen bulanık sayıların kural tabanına göre ağırlıklarını Formül-6.3’e göre işleme katarak bulunmasıyla elde edilir. Bulanık değerlerin bulunması amacı ile ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır (Formül-6.3).

$$Du = \frac{\sum_{i=0}^{48} center(i) \times p(i)}{\sum_{i=0}^{48} p(i)} \quad (6.3)$$

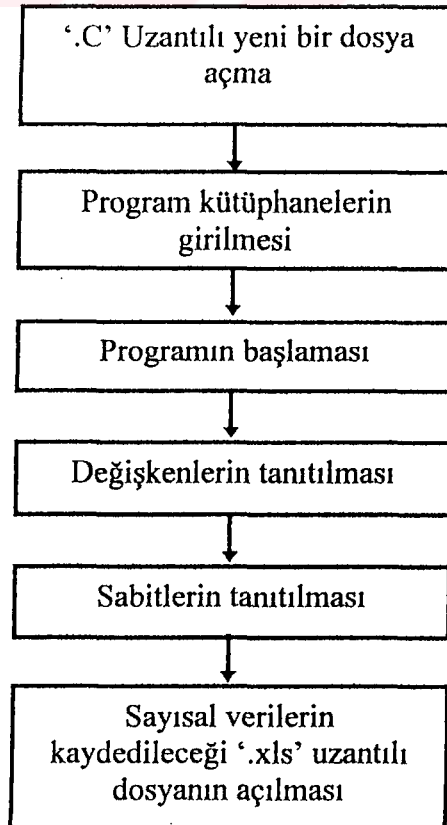
“*Du*” uygulanacak çıkış frekansındaki değişimi ifade eder. “*center(i)*” 0-48 arasında 49 tane kuralın kural tabanındaki ağırlığını ifade eder.

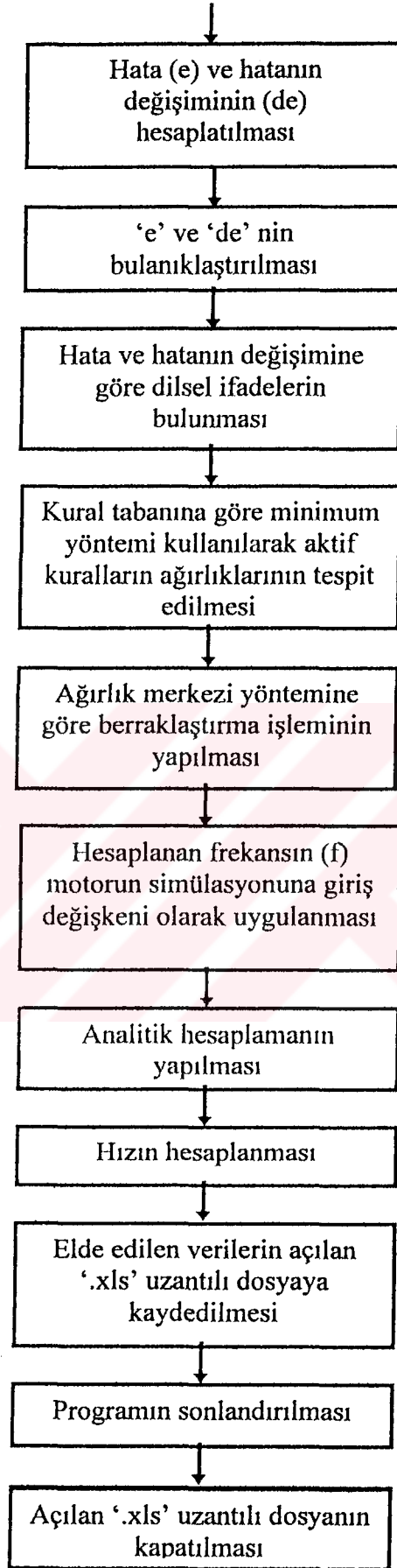
6.1.5. Uygulanacak Frekansın Bulunması

Uygulanacak çıkış frekansı $f = (f + (k * DU))$; formülü ile hesaplanır. Formülde her giriş değişkenine göre algoritmalarla hesaplanan çıkış değişkeni “*Du*” bir önceki giriş değişkeni sonucunda bulunan frekans “*f*” değerine eklenerek bulunur. Ayrıca *Du* “*k*” sabiti ile çarpılarak *Du*’nun sisteme etkisi ayarlanır.

6.2. TWUSM’nin Bulanık Mantık ile Kontrolünün C Dilindeki Programı

Yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun (TWUSM) ‘c’ programlama dilinde bulanık mantıkla hız kontrolünü gerçekleştiren programın yazımında Şekil-6.2’de verilen akış şeması göz önünde tutulur.





Şekil-6.2. Bulanık Mantık Tabanlı Program Akışı Şeması

/*Bulanık Mantık ile Ultrasonik Motor Kontrol Programı*/

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>
#include<string.h>
#include<dos.h>
```

```
double fuzzy(double low, double mid, double high, double ud, double e);
```

/*ana program*/

```
double main()
{
    FILE *dg;
```

/*değişkenlerin tamsayı ve gerçel sayı olarak tanımlanması*/

```
double ro,lm,cm,cd,V,k,h,rm,f,ft,w,Zd,Zm,Z,i,id,im,vib,spd,e,t,l,Temp;
double U,W1,I1,a,b,c,d,k11,k12,k13,k21,k22,k23,k31,k32,k33,k41,k42,k43;
double y,hata,hata1,dhata,de,e2,DNB,DNM,DNS,DZO,DPS,DPM,DPB, low,
mid, high,ud,
a1,a2,a3,memNB,memNM,memNS,memZO,memPS,memPM,memPB;
double p[48],center[48],b1,DU,b2,s,q,q1,b3;
```

/*ekranın temizlenmesi*/

```
clrscr();
```

/*üyelik fonksiyonlarının aralıkların tanımlanması*/

```
a1=2.0;    a2=4.0;    a3=6.0;
```

/*kurallara uygulanacak aralıkların tanımlanması*/

```
b1=2.0;    b2=4.0;    b3=6.0;
```

/*sistem evreninin sınırının tanımlanması*/

```
ud=10.0;          ro=520.0;
k=9.0;            lm=0.102;
h=1.5e-3;         cd=9e-9;
rm=26.75e-3;      V=100.0;
```

```
l=5.0;
```

```
/*dosya açma algoritması*/
```

```
dg=fopen("C:\\proje4\\fuzzyson.xls","wt");
if(dg==NULL)
{printf("\n dosya açılmıyor..");
exit(1);
}
```

```
/*belirtilen harflerin ekranın ve dosyanın ilk satırına 7 satır boşluk bırakılarak
basılması*/
```

```
printf("\n t\t ft im\t vib\t spd\t N ");
fprintf(dg,"\n t\t ft im\t vib\t spd\t N");
```

```
/*döngüde kullanılan değerlerin döngü öncesi sıfırlanması. "mem" ile belirtilenler
hatanın üyelik fonksiyonları, "D" ile belirtilenler hatanın değişiminin üyelik
fonksiyonlarıdır.*/
```

```
memNB=0.0;           DZO=0.0;
memNM=0.0;           DPS=0.0;
memNS=0.0;           DPM=0.0;
memZO=0.0;           DPB=0.0;
memPS=0.0;           de=0.0;
memPM=0.0;           hatal=0.0;
memPB=0.0;           f=0.0;
DNB=0.0;             Temp=0.0;
DNM=0.0;             spd=0.0;
DNS=0.0;
for(s=0.0;s<=48.0;s++)
{
center[s]=0.0;
p[s]=0.0;
}
```

```
/* Döngünün başlaması */
```

```
for(t=0.0;t<=50.0;t=t+0.1)
```



```
{

/*giriş değerlerini referansla karşılaştırarak bulanık ifadenin üretilmesi*/
    hata=(110.0-spd);
    dhata=hata-hata1;
    hata1=hata;
    e=ud*(hata/400.0);
    de=ud*(dhata/400.0);

/*hata ve hatanın değişimine göre dilsel ifadelerin bulunması*/
    memNB= fuzzy (-a3, -a3, -a2, ud, e);
    memNM=fuzzy(-a3,-a2,-a1,ud,e);
    memNS=fuzzy(-a2,-a1,0.0,ud,e);
    memZO=fuzzy(-a1,0.0,a1,ud,e);
    memPS=fuzzy(0.0,a1,a2,ud,e);
    memPM=fuzzy(a1,a2,a3,ud,e);
    memPB=fuzzy(a2,a3,a3,ud,e);
    DNB= fuzzy (-a3, -a3, -a2, ud, de);
    DNM=fuzzy(-a3,-a2,-a1,ud,de);
    DNS=fuzzy(-a2,-a1,0.0,ud,de);
    DZO=fuzzy(-a1,0.0,a1,ud,de);
    DPS=fuzzy(0.0,a1,a2,ud,de);
    DPM=fuzzy(a1,a2,a3,ud,de);
    DPB=fuzzy(a2,a3,a3,ud,de);

/*aktif olan kuralların bulunması, çıkarım ünitesinde ifade edilen minimum değer
yöntemine göre bulanık sayıların elde edilmesi, kural tabanına göre dilsel
değişkenlerin ağırlıklarının belirtilmesi*/
    if((memNB>0.0)&&(DNB>0.0)
    {
        p[0]=min(memNB,DNB);
        center[0]=-b3;
    }
    if((memNB>0.0)&&(DNM>0.0)
    {
        p[1]=min(memNB,DNM);
        center[1]=-b3;
    }
    if((memNB>0.0)&&(DNS>0.0))
    {
        p[2]=min(memNB,DNS);
        center[2]=-b3;
    }
}
```

```

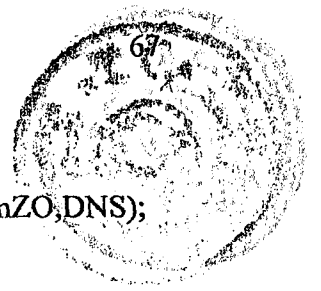
    }
    if((memNB>0.0)&&(DZO>0.0))
    {
        p[3]=min(memNB,DZO);
        center[3]=-b3;
    }
    if((memNB>0.0)&&(DPS>0.0))
    {
        p[4]=min(memNB,DPS);
        center[4]=-b2;
    }
    if((memNB>0.0)&&(DPM>0.0))
    {
        p[5]=min(memNB,DPM);
        center[5]=-b1;
    }
    if((memNB>0.0)&&(DPB>0.0))
    {
        p[6]=min(memNB,DPB);
        center[6]=0.0;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DNB>0.0))
    {
        p[7]=min(memNM,DNB);
        center[7]=-b3;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DNM>0.))
    {
        p[8]=min(memNM,DNM);
        center[8]=-b3;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DNS>0.0))
    {
        p[9]=min(memNM,DNS);

```

```

        center[9]=-b3;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DZO>0.0))
    {
        p[10]=min(memNM,DZO);
        center[10]=-b2;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DPS>0.0))
    {
        p[11]=min(memNM,DPS);
        center[11]=-b1;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DPM>0.0))
    {
        p[12]=min(memNM,DPM);
        center[12]=0.0;
    }
    if((memNM>0.0)&&(DPB>0.0))
    {
        p[13]=min(memNM,DPB);
        center[13]=b1;
    }
    if((memNS>0.0)&&(DNB>0.0))
    {
        p[14]=min(memNS,DNB);
        center[14]=-b3;
    }
    if((memNS>0.0)&&(DNM>0.0))
    {
        p[15]=min(memNS,DNM);
        center[15]=-b3;
    }
    if((memNS>0.0)&&(DNS>0.0))
    {

```



```
p[16]=min(memNS,DNS);
center[16]=-b2;
}
if((memNS>0.0)&&(DZO>0.0))
{
p[17]=min(memNS,DZO);
center[17]=-b1;
}
if((memNS>0.0)&&(DPS>0.0))
{
p[18]=min(memNS,DPS);
center[18]=0.0;
}
if((memNS>0.0)&&(DPM>0.0))
{
p[19]=min(memNS,DPM);
center[19]=b1;
}
if((memNS>0.0)&&(DPB>0.0))
{
p[20]=min(memNS,DPB);
center[20]=b2;
}
if((memZO>0.0)&&(DNB>0.0))
{
p[21]=min(memZO,DNB);
center[21]=-b3;
}
if((memZO>0.0)&&(DNM>0.0))
{
p[22]=min(memZO,DNM);
center[22]=-b2;
}
if((memZO>0.0)&&(DNS>0.0))
```

```
{
p[23]=min(memZO,DNS);
center[23]=-b1;
}
if((memZO>0.0)&&(DZO>0.0))
{
p[24]=min(memZO,DZO);
center[24]=0.0;
}
if((memZO>0.0)&&(DPS>0.0))
{
p[25]=min(memZO,DPS);
center[25]=b1;
}
if((memZO>0.0)&&(DPM>0.0))
{
p[26]=min(memZO,DPM);
center[26]=b2;
}
if((memZO>0.0)&&(DPB>0.0))
{
p[27]=min(memZO,DPB);
center[27]=b3;
}
if((memPS>0.0)&&(DNB>0.0))
{
p[28]=min(memPS,DNB);
center[28]=-b2;
}
if((memPS>0.0)&&(DNM>0.0))
{
p[29]=min(memNS,DNM);
center[29]=-b1;
}
```

```

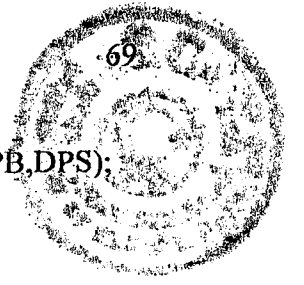
if((memPS>0.0)&&(DNS>0.0))
{
p[30]=min(memPS,DNS);
center[30]=0.0;
}
if((memPS>0.0)&&(DZO>0.0))
{
p[31]=min(memPS,DZO);
center[31]=b1;
}
if((memPS>0.0)&&(DPS>0.0))
{
p[32]=min(memPS,DPS);
center[32]=b2;
}
if((memPS>0.0)&&(DPM>0.0))
{
p[33]=min(memPS,DPM);
center[33]=b3;
}
if((memPS>0.0)&&(DPB>0.0))
{
p[34]=min(memPS,DPB);
center[34]=b3;
}
if((memPM>0.0)&&(DNB>0.0))
{
p[35]=min(memPM,DNB);
center[35]=-b1;
}
if((memPM>0.0)&&(DNM>0.0))
{
p[36]=min(memPM,DNM);
center[36]=0.0;

```

```

}
if((memPM>0.0)&&(DNS>0.0))
{
p[37]=min(memPM,DNS);
center[37]=b1;
}
if((memPM>0.0)&&(DZO>0.0))
{
p[38]=min(memPM,DZO);
center[38]=b2;
}
if((memPM>0.0)&&(DPS>0.0))
{
p[39]=min(memPM,DPS);
center[39]=b3;
}
if((memPM>0.0)&&(DPM>0.0))
{
p[40]=min(memPM,DPM);
center[40]=b3;
}
if((memPM>0.0)&&(DPB>0.0))
{
p[41]=min(memPM,DPB);
center[41]=b3;
}
if((memPB>0.0)&&(DNB>0.0))
{
p[42]=min(memPB,DNB);
center[42]=0.0;
}
if((memPB>0.0)&&(DNM>0.0))
{
p[43]=min(memPB,DNM);

```



```
center[43]=b1;
}
if((memPB>0.0)&&(DNS>0.0))
{
p[44]=min(memPB,DNS);
center[44]=b2;
}
if((memPB>0.0)&&(DZO>0.0))
{
p[45]=min(memPB,DZO);
center[45]=b3;
}
if((memPB>0.0)&&(DPS>0.0))
{
```

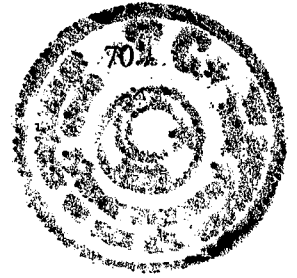
```
p[46]=min(memPB,DPS);
center[46]=b3;
}
if((memPB>0.0)&&(DPM>0.0))
{
p[47]=min(memPB,DPM);
center[47]=b3;
}
if((memPB>0.0)&&(DPB>0.0))
{
p[48]=min(memPB,DPB);
center[48]=b3;
}
```

/*ağırlık merkezi yöntemine göre berraklaştırma işleminin yapılması*/

```
q=0.0;
q1=0.0;
for(s=0.0;s<=48.0;s++)
{
q+=center[s]*p[s];
q1+=p[s];
}
DU=(q/q1);
```

/*"Du" çıkışının uygulanan frekans üzerindeki değişimi*/

```
U=(60.0 *DU);
f=f+U;
Temp=Temp+0.1;
ft=(40000.0-(1*Temp));
cm=(1.0/(lm*2.0*3.14*ft*2.0*3.14*ft));
w=2.0*3.14*f;
Zd=1.0/(w*cd);
Zm=sqrt(pow(ro,2)+pow((w*lm-1.0/(w*cm)),2));
```



```
Z=(Zd*Zm)/(Zd+Zm);
i=V/Z;
id=V/Zd;
im=i-id;
vib=im/0.726;
spd=24.0*vib*k*h/pow(rm,2);
printf("\n%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t",t,f,Temp,Zm,id,im,vib,spd);
fprintf(dg,"\n%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t",t,f,Temp,Zm,id,im,vib,spd);
for(s=0;s<=48;s++)
{
center[s]=0.0;
p[s]=0.0;
}
}

/*programın sona ermesi ve açılan dosyanın kapatılması*/
getch();
fclose(dg);
}

/*alt program */
double fuzzy(double low, double mid, double high, double ud, double e)
{

/*alt program içinde kullanılan değişkenin tanımlanması*/
double y;
/*7 tane üyelik fonksiyonunun matematiksel ifadesi ve alt programa gönderilen hata,
hatanın değişiminin 0-1 arasındaki üyelik değerinin hesaplanması*/
if((low==(-ud)) &&(mid== (-ud)))
{
if(e<=mid)
y=1.0;
```

```
else if((e>mid)&&(e<high))
y=(e-high)/(mid-high);
else
y=0.0;
}
else if((mid==ud)&&(high==ud))
{
if(e>=mid)
y=1.0;
else if((e<mid)&&(e>low))
y=(e-low)/(high-mid);
else
y=0.0;
}
else
{
if( (e>low)&&(e<mid))
y=(e-low)/(mid-low);
else if(e==mid)
y=1.0;
else if((e>mid)&&(e<high))
y=(e-high)/(mid-high);
else
y=0.0;
}
```

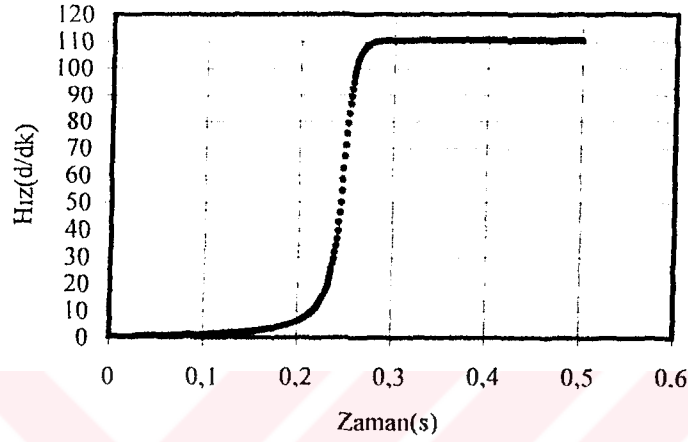
/*hesaplanan değerin ana programa gönderilmesi*/

```
return (y);
}
```

6.3. Kontrol Sonuçları

6.3.1. Isı Etkisinin Giderilmesi

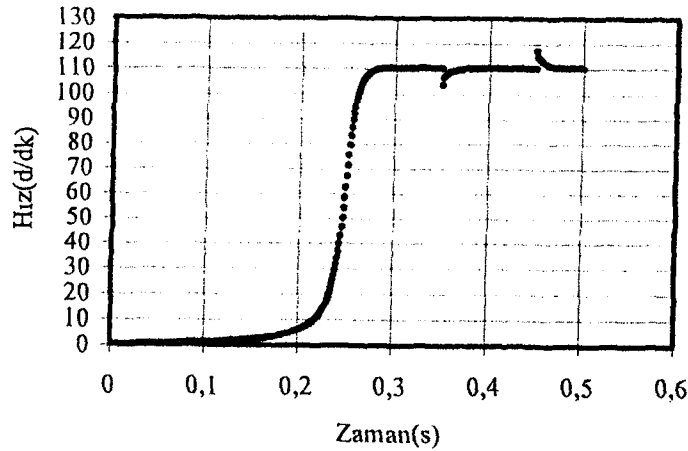
Şekil-6.3'de görüldüğü gibi bulanık mantık ile yapılan TWUSM'nin kontrolünde ısıdan dolayı oluşan devir sayısındaki azalma giderilmiştir.



Şekil-6.3. Isı Etkisinin Giderilmesi

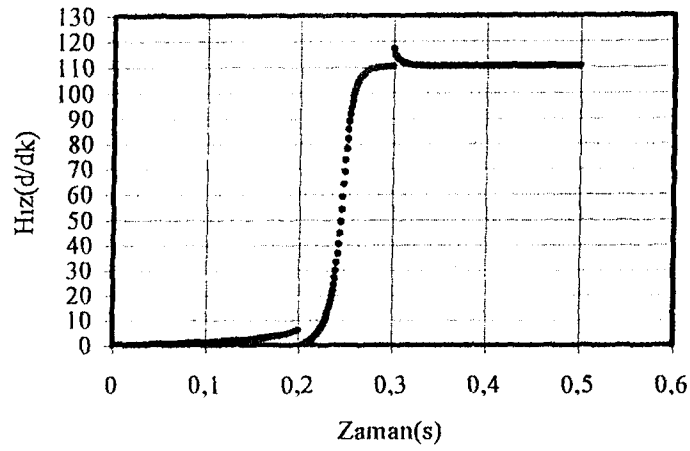
6.3.2. Uygulanan Yük Torku

Açık çevrimde TWUSM'ye yük torku uygulandığı zaman motorun hızı düşer. Kontrol uygulamanın diğer bir amacı da bunu önlemektir. Şekil-6.4'de 0.1N'luk bir yük torkuna karşı ultrasonik motorun davranışı verilmiştir. Görüldüğü gibi 0.3 ve 0.5sn arasında uygulanan yük torku nedeniyle sadece ufak bir pik oluşmaktadır.



Şekil-6.4. Yük Torku 0.3-0.5sn Arası

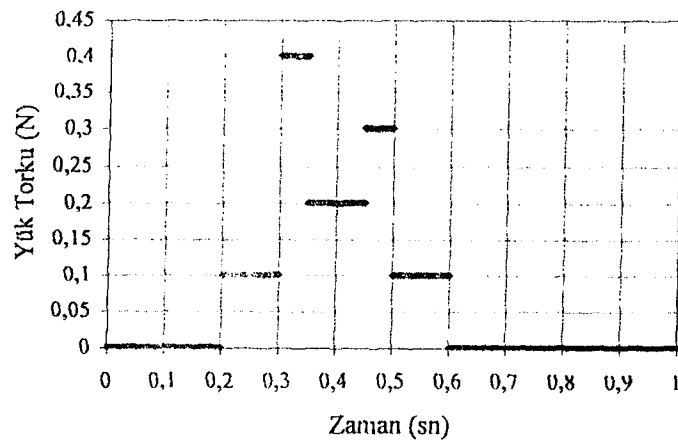
Şekil-6.5’de ise sadece uygulanan yük torkunun zamanı değiştirilmiştir. Her iki şekilde bulanık kontrolörün işlevselliğini göstermektedir.



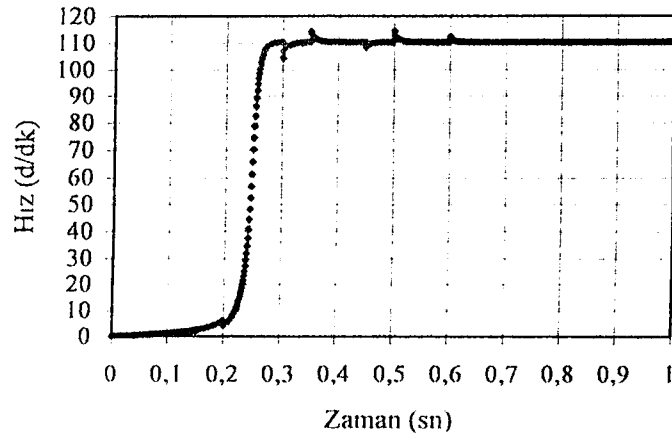
Şekil-6.5. Yük Torku 0.2-0.3sn Arası

6.3.3. Değişken Yük Torkunun Uygulanması

Yürüyen dalga tipli ultrasonik motora (TWUSM) zamana bağlı olarak değişen Şekil-6.6’da gösterilen yük torku uygulandığı zaman TWUSM’nin hızında azalmalar ölçülür. Bu etkiyi gidermek amacıyla uygulanan bulanık mantık tabanlı hız kontrolörü TWUSM’nin hızındaki bu düşmeleri Şekil-6.7’de gösterildiği gibi gidermiştir.



Şekil-6.6. Değişken Yük Torku



Şekil-6.7. Değişken Yük Torkunun Bulanık Mantıkla Kontrolü

7. SONUÇLAR

Bölüm 1’de ultrasonik motor hakkında literatür çalışması verildi. Yapılan çalışmaların değişik yapıda ultrasonik motor geliştirme, ultrasonik motorun karakteristiklerinin çıkartılması, sürücü devre tasarımları, pratik uygulamaları ve ultrasonik motorun kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır.

Bölüm 2’de ultrasonik motorun çalışma prensibi ve yapısı üzerinde durulmuştur.

Bölüm 3’de ultrasonik motorun eşdeğer devre modeli çıkarılarak ‘c’ programlama dili ile analitik inceleme yapılmış ve karakteristikleri çıkarılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre:

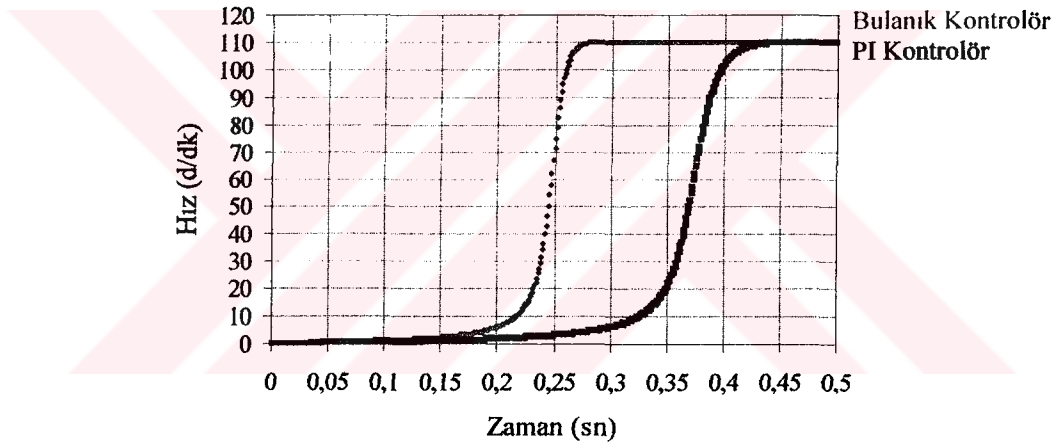
- Ultrasonik motorun admiktansı rezonans frekansı etrafındadır (Şekil-3.4).
- Ultrasonik motor sadece rezonans frekansı etrafında sürülebilmektedir. Çünkü motorun empedansı rezonans frekansı etrafında en küçük değeri almaktadır (Şekil-3.5).
- Ultrasonik motorda oluşan ısı artışı ultrasonik motorun çalışma frekansını düşürmektedir (Şekil-3.6).
- Ultrasonik motorun hızı zamana bağlı olarak rotor ve statorun sürtünmesinin sebep olduğu ısıdan dolayı azalmaktadır (Şekil-3.7)

Bölüm 4’de ultrasonik motorun hız kontrolü PI kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. Kontrol sonucu ultrasonik motor 0.4-0.5 sn aralığında referans hıza yerleşmiştir (Şekil-4.2). 0.3 ve 0.5 sn aralığında uygulanan 0.1N’luk yük torku karşısında sadece küçük iki pik yapmıştır (Şekil-4.3). Şekil-4.4’de gösterilen değişken yük torkunun TWUSM’ye uygulanması sonucunda ise, Şekil-4.5’de gösterildiği gibi PI kontrolör TWUSM’nin hızındaki değişimi gidermiş ve referans devir sayısına (110 d/dk) yerleşmesini sağlamıştır.

Bölüm 5’de bulanık mantık hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 6’da ultrasonik motora bulanık mantık uygulanarak sonuçlar alınmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre:

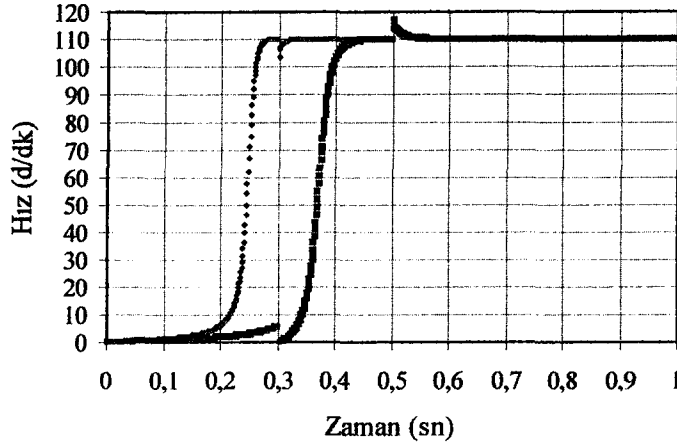
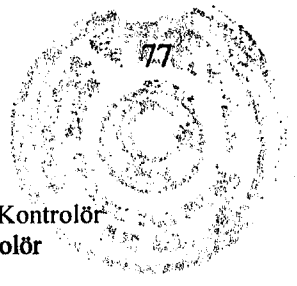
- Kontrol sonucunda ultrasonik motor referans hıza 0.3 sn'den daha kısa bir sürede yerleşmiştir (Şekil-6.3).
- Şekil-6.4 ve 6.5'de gösterildiği gibi uygulanan yük torkunun TWUSM'nin hızındaki azaltıcı etkileri giderilmiştir.
- Şekil-6.6'da verilen zamana bağlı olarak değişen yük torku TWUSM'ye uygulandığı zaman, değişken yük torkunun TWUSM'nin hızındaki azaltıcı etkileri bulanık kontrolör tarafından giderilmiştir.

Bölüm-4'de uygulanan PI kontrolör ile Bölüm-6'da uygulanan Bulanık Kontrolör yük torku uygulanmadığı durumda yerleşme zamanları karşılaştırıldığında Şekil-7.1'de gösterildiği gibi Bulanık Kontrolörün daha kısa sürede yerleşme zamanına sahip olduğu görülür.

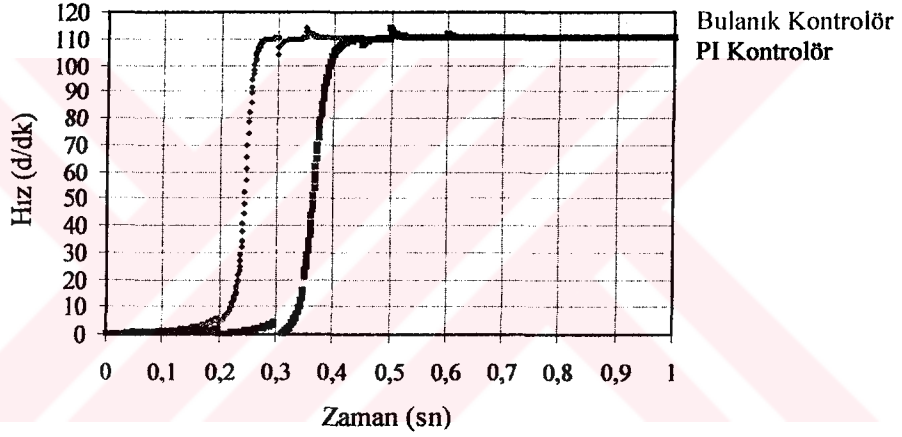


Şekil-7.1. Yerleşme Zamanı

Bölüm-4 ve Bölüm-6'da TWUSM'ye uygulanan yük torku baz alınarak PI ve Bulanık kontrolör karşılaştırıldığı zaman, Şekil-7.2'de gösterildiği gibi Bulanık Kontrolörün PI kontrolöre göre daha kısa sürede yerleştiği görülür. Ayrıca değişken yükler açısından PI ve Bulanık Kontrolörü karşılaştırdığımızda da Şekil-7.3'deki gibi Bulanık Kontrolörün yerleşme zamanı bakımından üstün olduğu görülür.



Şekil-7.2. TWUSM'ye Uygulanan Yük Torku

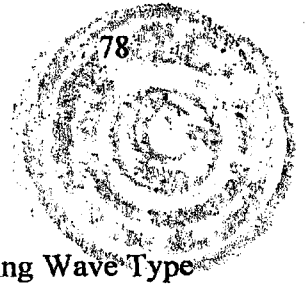


Şekil-7.3. TWUSM'ye Uygulanan Değişken Yük Torku

Yapılan bu çalışma ile bulanık mantık tabanlı bir kontrolör ile motorun tam matematik modeline gerek duyulmadan başarıyla hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ultrasonik motorun kontrol parametrelerinin zamanla değişimine rağmen bulanık kontrolör iyi bir yerleşme zamanı vermiştir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalar kural tablosunun optimize edilmesi üzerine olabileceği gibi değişik kontrol yöntemleri ile daha iyi sonuçlar almaya yönelik olabilir. Ultrasonik motorun simülasyon çalışmalarının yanında deneysel çalışmalarla önerilen kontrolörler daha iyi performanslara ulaştırılabilirler.

KAYNAKLAR



1. Hirata H, Ueha S. 1993, Characteristic Estimation of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor, IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.40.
2. Senjyu T, Uezato K. 1994, Adjustable Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control, IEEE.
3. 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.
4. Senjyu T, Yokoda S, Miyazato H, Uezato K. 1997, Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control with a Simplified Mathematical Model, IEE Proc-Electr. Power Appl. Vol. 145 No.3.
5. Lin F.J, Duan R.Y, Wai R.J, Hong C.M. 1997, LLCC Resonant Inverter for Piezoelectric Ultrasonic Motor Drive, IEE Proc.-Elec. Power Appl. Vol.146. No.5.
6. Petit Lionel, Rizet Nicolas, Briot Roland, Gonnard Paul. 1999, Frequency Behavior and Speed Control of Piezomotors, Elsevier Sensors and Actuators.
7. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal. 2001, Characteristic Estimation of Travelling Wave Ultrasonic Motor Using Equivalent Circuit Model, Eleco 2001 International Conference on Electrical and Electronics Engineering.
8. Roh Youngrae, Lee Susung, Han wooseok. 2001, Design and Fabrication of a New Traveling Wave Type Ultrasonic Linear Motor, Elsevier Sensors and Actuators.
9. Dong Sun, Jinbo Liu, Xing Ai. 2002, Modeling and Performance Evaluation of Traveling Wave Piezoelectric Ultrasonic Motors with Analytical Method, Elsevier Sensors and Actuators.
10. Hyeung Woo Kim, Shuxiang Dong, Pitak Laoratanakul, Kenji Uchino. 2002, Novel Method for Driving the Ultrasonic Motor, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control vol.49, No.10.
11. Senjyu T, Yoshida T, Uezato K, Urasaki N, Panda S.K. 2003, Speed Sensorless Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network, IEEE.

12. Lim Chee Kian, Chen I-Ming. 2003, Systematic Design and Prototyping of a Disc-Typed Traveling Wave Ultrasonic Motor, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.
13. 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.
14. Bal Güngör. 2003, A Digitally Controlled Drive System For Travelling Wave Ultrasonic Motor, Turk J Elec Engin Vol.11 No.3 Tübitak.
15. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal. 2003, Experimental Examination of Speed Methods for a Travelling Wave Ultrasonic Motor, 3. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu Ankara.
16. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal. 2003, Servo Speed Control of Travelling Wave Ultrasonic Motor Using Digital Signal Processor, Science Direct Sensors and Actuators.
17. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal. 2005, A PWM Tecniqe for DSP Controlled Ultrasonic Motor Drive System, Electric Power Components and Systems, 33:21-38.
18. Qu Jianjun, Zhou Tieying. 2003, An Electric Contact Method to Measure Contact State Between Stator and Rotor in a Traveling Wave Ultrasonic Motor, Elseiver Ultrasonics 41.
19. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal, Demirbaş Şevki, Çolak İlhami. 2004, Fuzzy Logic DSP Controlled Servo Position Control for Ultrasonic Motor, Elseiver Energy Conversion and Management 45.
20. İda K, Yano Y, Sakabe K, Yabugami K, Nakata Y. 2004, Approach to Speed Control Using Temperature Characteristics of Ultrasonic Motor, The 47th IEEE International Midwest symposium on Circuits and Systems.
21. Zhu Meiling. 2004, Contact Analysis and Mathematical Modeling of Traveling Wave Ultrasonic Motors, IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequecy Control, Vol.51, No.56.
22. Roh Yongrae, Kwon Jaehwa. 2004, Development of a New Standing Wave Type Ultrasonic Linear Motor, Elseiver Sensors and Actuators.
23. Bekiroğlu Erdal, Daldal Nihat. 2005, Remote Control of an Ultrasonic Motor by Using a GSM Mobile Phone, Elseiver Sensors and Actuators.



24. Sashida T, Kenjo T. 1993, An Introduction to Ultrasonic Motor, Oxford University Press, New York.
25. Hüner Engin, Engin N. Şeref. 2005, Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun Modellenmesi, EMO 11. Ulusal Kongresi ve Fuarı.
26. Bekiroğlu Erdal. 2002, Yürüyen Dalga Ultrasonik Motorun Hız ve Konum Denetiminin Bulanık Mantık Denetleyicisi Kullanılarak Gerçekleştirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Doktora Tezi.
27. <http://www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/English/html/>





ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı : Engin
Soyadı : Hüner
Doğum Yeri : Almanya
Doğum Tarihi : 1980

EĞİTİM

1991-1994 : Tekirdağ Namık Kemal Lisesi (ortaokul)
1994-1997 : Tekirdağ Endüstri Meslek Lisesi (T11 mezunu)
1998-2002 : Abant İzzet Baysal Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Elektrik Öğretmenliği
2002..... : Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans

İŞ DENEYİMİ

2001 : Tekirdağ Tredaş İşletme Bakımda okul stajı
2002 : Düzce Endüstri Meslek Lisesi Öğretmenlik Stajı
2004-2005 : Tekirdağ Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünde ücretli
öğretmen olarak Elektrik Makinaları II, Elektrik Makinaları ve
Laboratuvar III, Atölye II derslerini verdi.

YAYINLAR

Hüner Engin, Engin N. Şeref. 2005, Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun
Modellenmesi, EMO 11. Ulusal Kongresi ve Fuarı.