



**AĞIR TAŞIT, ELEKTRO-PNÖMATİK FREN VALFİ
İÇİN ORANSAL SOLENOİD TASARIMI VE ANALİZİ**

Ercan DÜZGÜN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AĞIR TAŞIT, ELEKTRO-PNÖMATİK FREN VALFİ İÇİN
ORANSAL SOLENOİD TASARIMI VE ANALİZİ**

ERCAN DÜZGÜN

Yrd.Doç.Dr. Gürsel ŞEFKAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

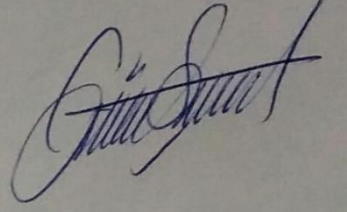
BURSA - 2015

Her Hakkı Saklıdır

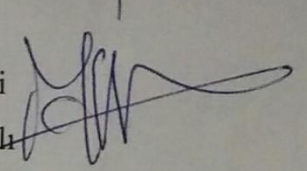
TEZ ONAYI

Ercan DÜZGÜN tarafından hazırlanan “Ağır Taşıt, Elektro-Pnömatik Fren Valfi İçin Oransal Solenoid Tasarımı ve Analizi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

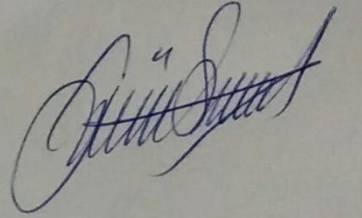
Danışman : Yrd.Doç.Dr. Gürsel ŞEFKAT



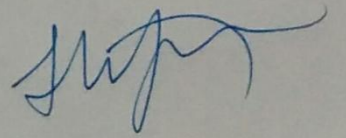
Başkan : Prof.Dr. İbrahim YÜKSEL
Uludağ Üniversitesi Müh. Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Yrd.Doç.Dr. Gürsel ŞEFKAT
Uludağ Üniversitesi Müh. Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Doç.Dr. Hakan GÖKDAĞ
Bursa Teknik Üniversitesi
Doğa Bilimleri, Müh. ve Mim. Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof.Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü

16/06/2015

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16/06/2015

İmza

Ercan DÜZGÜN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AĞIR TAŞIT, ELEKTRO-PNÖMATİK FREN VALFİ İÇİN ORANSAL SOLENOİD TASARIMI VE ANALİZİ

Ercan DÜZGÜN

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Gürsel ŞEFKAT

Bu tez çalışmasında ağır taşıtların elektro-pnömatik fren sistemlerinde kullanılmak üzere oransal çalışan bir elektromekanik valf (solenoid) tasarımı yapılmış, oransal solenoidin statik ve dinamik karakteristikleri incelenmiştir. Solenoide ait statik kuvvet karakteristiği geometrik uzunluk parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle oransallaştırılmıştır. Oransal solenoidin statik kuvvet karakteristikleri ve manyetik akı bağları ANSYS Maxwell sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilmiştir. Oransal solenoidin dinamik davranışı için MATLAB Simulink programında solenoide ait matematiksel modeli kurularak simülasyonu yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, tasarımı ve imalatı yapılan solenoid valfin sağladığı mıknatıs kuvvetinin hava aralığından bağımsız olduğu ve sadece akıma bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Böylece tasarlanan solenoid oransal olarak kullanılabilir.

Oransal solenoidin statik ve dinamik karakteristik testlerinin yürütüldüğü bir test düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir. Bu test düzeneği kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre; yaklaşık 1-3 mm'lik çalışma bölgesinde 1,5A akım ile 45 ± 3 N sabit mıknatıs kuvveti sağlayan ve oransal çalışan bir solenoid valf tasarlanıp imal edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektro-pnömatik valf, oransal solenoid valf, pnömatik fren valfi

2015, v+81 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND ANALYSIS OF A PROPORTIONAL SOLENOID FOR ELECTRO-PNEUMATIC BRAKE VALVE OF HEAVY VEHICLES

Ercan DÜZGÜN

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gürsel ŞEFKAT

In this thesis a proportional solenoid valve used in heavy vehicle electro-pneumatic brake valve systems has been designed, and static and dynamic characteristics of the proportional solenoid valve has also been investigated. The static force characteristic of the solenoid has been proportioned by changing the geometric length parameters. Static force characteristics and magnetic flux linkages of the proportional solenoid have been obtained using ANSYS Maxwell finite element toolbox. Simulation model for the dynamic behavior of the proportional solenoid has been made in MATLAB/Simulink programs.

It is shown that the magnetic force provided by the solenoid valve which has been designed and manufactured in this study is independent of the air gap and is dependent to the current. Thus the designed solenoid valve can be used as a proportional solenoid valve.

A test setup is designed and constructed for the static and dynamic characteristics of the proportional solenoid valve. Obtained experimental results which are using this test setup are compared with the obtained theoretical results.

Finally, a solenoid valve designed and manufactured providing 45 ± 3 N constant magnetic force with 1,5A current at 1-3mm working region.

Key words: Electro-pneumatic valve, proportional solenoid valve, pneumatic brake valve,

2015, v+81 pages

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Hassas konum denetimi, pnömatik/hidrolik akış debisi kontrolü gibi uygulamalarda kullanılan oransal elektromanyetik valfler (solenoidler) günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aç-kapa tipi çalışan solenoidlerin darbe genişlik modülasyon tekniği ile solenoide ayar yapılabilme özelliği kazandırabildiği gibi solenoidin kendisini oransal tipte tasarlayarak da oransal solenoid yapılabilir. Oransal solenoidlerin tasarımının zor olması ve oransallığı sağlayan bazı parçalarının da yüksek toleransla imal edilmesi gerekliliğinden dolayı, aç-kapa tipte çalışan solenoidlere göre fiyatları çok yüksektir.

Endüstride ve özellikle de otomotiv sanayinde elektromekanik eyleyicilere duyulan ihtiyaç son yıllarda artış göstermektedir, ve ilerleyen dönemlerde de bu artışın devam edeceği tahmin edilmektedir. Otomobillerde, havalı fren sistemlerinde pnömatik akışı kontrol edebilen solenoid valflere gereksinim vardır.

Bu çalışmada, ağır vasıta taşıtların havalı fren sistemlerinde akış kontrolünü sağlayan oransal bir solenoid valfin tasarımı, statik ve dinamik analizleri yapılmıştır, oransallığa etki eden parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmayı yöneterek gerçekleştirilmesinde büyük katkı sağlayan ve her türlü yardımı ile çalışmayı destekleyen, ayrıca bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan öğretim üyesi Yrd.Doç.Dr. Gürsel Şefkat'e teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen öğretim üyesi Prof.Dr. İbrahim Yüksel'e teşekkür ederim.

0700.STZ.2014 Kodlu Elektro-Pnömatik Fren Valfi ve PLC Kontrollü Test Düzeneği Geliştirme Projesi isimli Santez projesinin bir kısmını oluşturan bu tez çalışmasına katkılarından dolayı T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na teşekkür ederim. Bu Santez projesinde çalışan tüm proje çalışanlarına teşekkür ederim. Santez projesinin proje ayağını oluşturan May Fren Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti'ne ve Ar-ge mühendisi Kadir İŞBİLEN'e teşekkür ederim.

Beni sonlu elemanlar metodu ile tanıştıran ve sonlu elemanlar metoduna giriş kısmında bana yardımcı olan Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Yusuf YILMAZ'a teşekkür ederim.

Sabır ve desteklerinden ötürü aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	5
ABSTRACT.....	6
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	7
İÇİNDEKİLER	i
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	10
3.1. Materyal.....	10
3.2. Yöntem	13
3.2.1. Solenoid Tasarımı.....	20
3.2.2. Solenoid Ön Tasarımı.....	21
3.2.3. Solenoid Akım-Kuvvet Karakteristiğinin Doğrusallaştırılması ve Oransal Solenoid Tasarımı	30
3.2.4. Solenoid Koniklik Kısmı Geometrisinin Optimizasyonu	34
3.2.5. Solenoid Dinamik Modeli	37
3.2.6. Deney Düzeneği	44
3.2.7. Statik Deneyler	47
3.2.8. Dinamik Deneyler	48
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	51
4.1. Teorik Sonuçlar	51
4.1.1. Aç-Kapa Tipi Solenoidin Statik Karakteristikleri	51
4.1.2. Farklı Uzunluk Parametrelerinin Kuvvet Karakteristiklerine Etkileri	53
4.1.3. Oransal Solenoid Optimizasyon Çalışmaları	58
4.1.4. Optimize Edilen Solenoidin Statik Karakteristikleri.....	61
4.1.5. Oransal Solenoide Ait Manyetik Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	63
4.1.6. Oransal Solenoide Ait Manyetik Akı Bağı ve Kuvvet Tabloları	67
4.1.7. Solenoid Dinamik Model Sonuçları	69
4.2. Deneysel Sonuçlar	70
4.2.1. Statik Deney Sonuçları	70
4.2.2. Dinamik Deney Sonuçları	75
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	76
5.1. Sonuçlar.....	76
5.2. Öneriler.....	78
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	82
ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A_c	Mıknatıs etkin kesit alanı
B	Mıknatıs akı yoğunluğu (Manyetik alan)
H	Mıknatıs alan yoğunluğu
J	Akım yoğunluğu
k	Yay katsayısı
N	Sarım sayısı
T	Sıcaklık
x	Solenoid hareket elemanının (hareketli eleman) konumu
ϕ	Mıknatıs akısı
F_{yay}	Yay kuvveti
F_m	Mekanik kuvvet-solenoidin oluşturduğu çekme kuvveti
m	Kütle
l	Uzunluk
t	Zaman
V	Hız
F	Kuvvet
p	Basınç
ρ	Yoğunluk
v	Hacim – Problem hacmi
W	İş - Enerji
P	Güç
E	Elektrik alan yoğunluğu
D	Elektrik akı yoğunluğu
σ	Geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
R	Elektriksel direnç
\mathfrak{R}	Relüktans
λ	Manyetik akı bağı (flux linkage)
L	İndüktans
e	Gerilim
b	Viskoz sürtünme katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 Bir elektromanyetik eyleyicinin blok şeması.....	11
Şekil 3.2 Akış denetiminde kullanılan solenoid valfin iç yapısı.....	12
Şekil 3.3 1008 Çeliğine ait tipik B-H eğrisi (mıknatıs eğrisi).....	16
Şekil 3.4 Tasarım ölçütü olarak kuvvet-çalışma aralığı karakteristiği.....	20
Şekil 3.5 Tasarım kriteri olarak kuvvet akım grafiği.....	21
Şekil 3.6 Düzyüzlü pistoncuklu(hareketli eleman) tipi solenoid geometrisi parametreleri.....	22
Şekil 3.7 $g=1,00\text{mm}$ için tasarlanan solenoid geometrisi.....	26
Şekil 3.8 $g=1,00\text{ mm}$ 'de hava aralığında manyetik alan.....	27
Şekil 3.9 $g=1,00\text{ mm}$ 'de elde edilen kuvvet.....	27
Şekil 3.10 $NI=716\text{ A}$ -sarıma göre elde edilen kuvvet.....	29
Şekil 3.11 Solenoidin nihai tasarımına ait ölçüler.....	30
Şekil 3.12 Tipik bir aç-kapa tipi solenoid karakteristik grafiği.....	31
Şekil 3.13 Tipik bir oransal solenoid karakteristik grafiği.....	32
Şekil 3.14 Çıkıntı genişliği ile birlikte yeni geometri.....	33
Şekil 3.15 tK kalınlığı eklenmiş ve eklenmemiş durumu karşılaştırması ($I=1\text{ A}$).....	34
Şekil 3.16 Ek çıkıntı kısmı genişliği ve uzunluğu.....	35
Şekil 3.17 Amaç fonksiyonuna ait temsili grafik.....	37
Şekil 3.18 Solenoid (elektromekaniksel) sistemin dinamik modeli.....	38
Şekil 3.19 Solenoid valfin genel yapısı.....	38
Şekil 3.20 Solenoid Simulink Modeli.....	43
Şekil 3.21 Deney düzeneği.....	45
Şekil 3.22 Deney düzeneği şeması.....	46
Şekil 3.23 Akım sürücü devre şeması.....	46
Şekil 3.24 Deney düzeneği şematik görünümü.....	47
Şekil 3.25 Deney düzeneği (Statik).....	48
Şekil 3.26 Dinamik deney düzeneği şematik genel görünümü.....	49
Şekil 3.27 Deney düzeneği (Dinamik).....	49
Şekil 3.28 Dinamik ölçüm ve veri toplama Simulink modeli.....	50
Şekil 4.1 Aç-kapa tipi solenoid statik kuvvet karakteristikleri.....	52
Şekil 4.2 Aç-kapa tipi solenoid $g=1,00$ ve 2.2 mm için akım – kuvvet grafiği.....	52
Şekil 4.3 Farklı tL 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi.....	54
Şekil 4.4 Farklı tD 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($tL=1.0\text{mm}$).....	55
Şekil 4.5 Farklı tD 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($tL=2.5\text{mm}$).....	55
Şekil 4.6 Farklı tD 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($tL=5.0\text{mm}$).....	56
Şekil 4.7 Farklı tM 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($tL=2.5\text{mm}$, $tD=0.5\text{mm}$).....	57
Şekil 4.8 Farklı tM 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($tL=2.5\text{mm}$, $tD=2.5\text{mm}$).....	57
Şekil 4.9 Seçilen tipik 5 farklı parametri için statik karakteristikler.....	59
Şekil 4.10 Seçilen tipik 5 farklı parametre için amaç fonksiyonu büyüklükleri.....	59
Şekil 4.11 En düşük amaç fonksiyonuna sahip parametreler için kuvvet grafiği.....	60
Şekil 4.12 Çalışma aralığındaki kuvvet grafiği.....	61

Şekil 4.13 Tasarlanan solenoidin SEM modeli	61
Şekil 4.14 Farklı akımlar için kuvvet karakteristikleri (teorik).....	62
Şekil 4.15 Farklı hava aralıkları için akım-kuvvet karakteristikleri (teorik)	62
Şekil 4.16 Tasarlanan oransal solenoidin manyetik akı yolları.....	63
Şekil 4.17 Tasarlanan oransal solenoide ait manyetik alan.....	65
Şekil 4.18 Tasarlanan oransal solenoide ait manyetik akı yoğunluğu	65
Şekil 4.19 Tasarlanan oransal solenoide ait enerji dağılımı.....	66
Şekil 4.20 Tasarlanan oransal solenoide ait yüzey kuvvet yoğunluğu.....	66
Şekil 4.21 3-Boyutlu kuvvet karakteristiği	67
Şekil 4.22 Çalışma bölgesinde 3-boyutlu kuvvet karakteristiği	68
Şekil 4.23 Çalışma bölgesinde hava aralığı-akım-manyetik akı bağı karakteristiği	68
Şekil 4.24 Teorik modelden elde edilen akım ve konum karakteristiği.....	69
Şekil 4.25 Farklı akımlara karşılık elde edilen deneysel kuvvet karakteristiği	71
Şekil 4.26 Farklı hava aralığı değerleri için elde edilen akım-kuvvet karakteristiği	72
Şekil 4.27 Teorik ve deneysel kuvvet karakteristiği	73
Şekil 4.28 Teorik ve deneysel kuvvet karakteristiği (çalışma bölgesinde).....	73
Şekil 4.29 Çalışma bölgesi (1-3mm) akım-kuvvet grafiği.....	74
Şekil 4.30 Karşılaştırmalı teorik ve deneysel akım-kuvvet grafiği.....	74
Şekil 4.31 Deneysel akım karakteristiği.....	75
Şekil 4.32 Karşılaştırmalı dinamik karakteristik grafiği	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Maxwell denklemleri	14
Çizelge 3.2 Solenoid tasarım kriterleri	21
Çizelge 3.3 Kabul edilen sabit değerler	23
Çizelge 3.4 Solenoid ön tasarım ölçüleri	25
Çizelge 3.5 Revize edilen solenoidin ön tasarım ölçüleri	26
Çizelge 3.6 Solenoid yarıçapı-kuvvet ilişkisi	30
Çizelge 3.7 tL uzunluğunun incelenmesi için parametreler.....	35
Çizelge 3.8 tD uzunluğunun incelenmesi için parametreler	35
Çizelge 3.9 tM Uzunluğunun incelenmesi için parametreler	36
Çizelge 4.1 5 farklı tipik parametre için <i>Famaç</i> fonksiyonu.....	60

1. GİRİŞ

Hareket halindeki araçların güvenli bir şekilde yavaşlamasını/durmasını sağlayan fren sistemleri araç ve yolcu güvenliği açısından büyük bir önem arz etmektedir ve frenlemenin kontrollü bir şekilde yapılması gerekmektedir. Otomobillerde kullanılan fren sistemlerini; mekanik frenler, hidrolik frenler, havalı (pnömatik) frenler, elektrikli frenler olmak üzere dört başlık altında toplayabiliriz.

Pnömatik frenlerde basınçlı hava kullanılarak frenleme sağlanmaktadır. Araç hızlarının gün geçtikçe artması ağır hizmet tipi araçlarda büyük frenleme kuvvetlerine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Pnömatik frenlerde basınçlı hava akışını kontrol etmek için elektromekanik (solenoid) valfler kullanılmaktadır. Hassas konum ve hassas akış sağlayabilen solenoid valfler, aç-kapa tipindeki solenoid valflerin Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği (DGM) ile arzu edilen oranda sürülebileceği gibi valfin kendisini oransal yapıda tasarlamak suretiyle de oransal olarak sürülebilmektedir.

Bu çalışmada, ağır vasıta taşıtların havalı fren sistemlerinde akış kontrolünü sağlayan oransal bir solenoid valfin tasarımı, statik ve dinamik analizleri yapılmıştır, oransallığa etki eden parametrelerin etkileri incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektromekanik valf ile hareket sağlayan pnömatik sistemler üzerine yapılan çalışmaları; manyetik kısmın tasarımı ve oransallığının araştırılması, dinamik simülasyon için matematiksel model oluşturma üzerine yapılan çalışmalar olmak üzere üç ana başlık altında toplamak mümkündür.

Solenoid kısmın manyetik alan kuvvetinden doğan kuvvetin araştırılması ve çalışma bölgesinde sabit kuvvet elde etme ile ilgili çalışmalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Kajima (1995) yaptığı çalışmada hareketli eleman tipinde solenoid valflerin dinamik modellemesini incelemiştir. Manyetik akı yollarını hem Relüktans metodu ile hem solenoidin manyetik devresinin eşdeğeri bir devre kurarak ve hem de sonlu elemanlar yöntemini kullanarak göstermiştir. Üç farklı akım değeri için yer değiştirmeye bağlı oluşan mıknatıs kuvveti teorik ve test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Ayrıca zamana bağlı olarak oluşan akım ve manyetik akı değerlerinin teorik ve deneysel sonuçlarını karşılaştırmıştır ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuştur.

Bottauscio ve ark. (2003) eksenel simetrik elektromekanik tasarımlarda manyetik yayılım ve histerezis etkisini incelemiştir.

Lequesne (1990) hareketli eleman tipinde ve disk tipinde iki farklı solenoid valfin dinamik modelini çıkarmıştır. Doğru akım (DC) ile sürülen elektromekanik cihazların tasarımının, sistemin dinamik davranışı nonlineer olduğu için zor olduğunu, Relüktans metodu ile tasarım ve hesaplamaların yeterince hassas olmadığını ve özellikle optimizasyon çalışmaları gibi çok sayıda hesap yapılması gereken uygulamalarda uygun olmadığını, sonlu elemanlar yöntemi ile hesap yapmanın hassas sonuç verdiğini belirtmiştir. Sonlu farklar metodu ile yaptığı hesaplamalar ile test sonuçlarını karşılaştırmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

Park ve ark. (2003) benzinli motorlarda yakıt verimliliğini artırmak ve emisyon değerlerini azaltmak için yeni bir uygulama geliştirmişlerdir. Motor üzerinde yapılan çalışmaların ve farklı kontrol metodları üzerine yapılan geliştirme çalışmalarının yapıldığından bahsetmişlerdir. Fakat bu çalışmalardan daha önce yapılması gerekenin

ve hatta daha önemli olanın eyleyicinin kendisi üzerinde tasarımın daha ilk evresinde iyileştirme çalışmaları yapılması gerektiğini açıklamıştır. Tasarım ve çalışma parametrelerinin, eyleyicinin statik, dinamik ve ısıl performansına etkilerini incelemişlerdir. Prototip imalatı gerçekleştirilen model ile teorik sonuçları doğrulamışlardır.

Lequesne (1988) yaptığı diğer bir çalışmada, akışkan kontrolü için sabit kuvvetli solenoid valfin sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiştir. Solenoid armatürün şeklinin, kuvvet-yer değişimi grafiğinin karakteristiğini belirlediğini açıklamıştır. Varolan solenoid tasarımı üzerinde armatürün şeklini değiştirerek yeni bir solenoid geliştirme çalışması yapmıştır. Geometrik parametrelerin etkilerini beş başlık altında toplayarak (1- Kutup genişliği, 2- Koniklik açısı, 3- Armatürün şekli, 4- Armatür ve kutup uzunluğu, 5- İkinci çalışma aralığının tasarımı) bu parametrelerin dinamik sistem üzerindeki etkilerini General Motors sonlu elemanlar programı ANTIC85 ile gerçekleştirmiştir.

So-Nam Yun ve ark. (2008) dizel motorlarda kullanılan tutuculu püskürtme yakıt sistemi için oransal yakıt akışı kontrolü sağlayabilen bir valf geliştirmişlerdir. Çalışma bölgesinde pozisyona bağlı olmaksızın sabit bir kuvvet sağlayabilen solenoid valf tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Solenoid valfin hareketli eleman kısmının koniklik uzunluğunu, genişliğini, boşluk mesafesini ve konik kısmın ucundaki kalınlığı değiştirerek dört farklı tasarımı analiz etmişlerdir. Üretimi ve testleri gerçekleştirilen çalışmada teorik sonuçların ve gerçek sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak akış ve basınç grafiklerinde görülen gürültü ve hizterezis durumlarının DGM tekniğinde kullanılan sinyallerin durumu ile ilgili olduğunu varsaymışlardır.

Douglas (1963) V şeklinde kesilmiş farklı tarzda bir solenoid mıknatıs ile hemen hemen sabit kuvvet üreten, alternatif akımla çalışan bir valf üzerine çalışmalar yapmıştır. V şeklinde kesilen bölgenin açı, paralellik, genişlik, uzunluk değerlerini değiştirerek manyetik geçirgenlik üzerindeki etkisini incelemek üzere optimizasyon çalışması yürütmüştür. Manyetik geçirgenlik üzerindeki değişimleri incelemek üzere yeni formüller elde etmiştir.

So-Nam Yun ve ark. (2012-a) başka bir çalışmasında hidrolik basınç kontrol valfi için oransal solenoid eyleyicilerin çekim kuvvetinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Oransal solenoid valfin statik ve dinamik karakteristikleri 3 farklı çeşit kontrolör ile test etmişlerdir. Kuvvet karakteristiklerini de değişken DGM sinyalleri ile test etmişlerdir. Çalışma bölgesinde kuvvet karakteristiğinin giriş akımına bağlı olduğunu, solenoidin konumuna bağlı olmadığını deneylerle ispat etmişlerdir.

So-Nam Yun ve ark. (2012-b) diğer bir çalışmasında elektromanyetik solenoid eyleyicilerin kontrol konisinin tasarımında yeni bir uygulama geliştirmişlerdir. Kontrol konisi şekline bağlı beş farklı parametre için altı farklı tasarım geliştirmişlerdir. Her bir parametrenin, konum-kuvvet grafiğinde sabit kuvvet elde etmedeki etkisini incelemişlerdir. Bu ilişkiler arasında hareketli eleman şekline bağlı bir optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Optimize edilen yeni valf tasarımının 2 mm'lik çalışma bölgesi içerisinde test değerlerinden %2,5 bir hata ile doğru sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Moses ve ark. (2003) elektromanyetik modellemede analitik hesaplama ile sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama yapmanın karşılaştırmasını yapmışlardır. Sonlu elemanlar yönteminin üstün olan yanlarını, tasarım sürecini kısaltan etkilerini, parametrik çalışmanın avantajlarını açıklamışlardır. Biri 2 boyuta indirgenmiş bir tasarım çalışması, diğeri ise 3 boyutlu bir tasarım için örnek optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir.

Gu ve Li (2013) yaptıkları bir çalışmada ince cidarlı bir solenoid tasarımında manyetik alana ait hesaplamaları, solenoide ait matematiksel formülleri hem silindirik koordinat sisteminde çıkararak analitik olarak hem de ANSYS Maxwell programında sonlu elemanlar programını kullanarak yapmışlardır. Analitik sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca yaptıkları deneylerle, manyetik alanı ölçüm yoluyla da tespit etmişlerdir.

Vogel ve Ulm (2011) oransal etkili solenoid valflerin kuvvet-konum eğrisine etki eden değişkenler üzerinde çalışmışlardır. Manyetik eyleyicinin kutup kısmının geometrisinin kuvvet-konum grafiğine olan etkilerini incelemişlerdir. Hem konik geometriye ait relüktans modeli kurmuşlar hem de COMSOL Multiphysics programının AC/DC

modülünde sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Manyetik kuvveti hesaplamada üç farklı yöntemi kullanmışlar, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını sunmuşlardır. Analitik metod ile hesaplanan değerler ile sonlu elemanlar yöntemi ile alınan sonuçların birbiri ile paralellik gösterdiğini ispat etmişler, ayrıca iki yöntemin avantaj ve dezavantajlarını sıralamışlardır.

Solenoid eyleyicileri içeren pnömatik ve hidrolik sistemlerin tasarımı, dinamik modelinin oluşturulması ve simülasyon çalışmaları alanında yapılan çalışmalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Richer ve Hurmuzlu (2001) yüksek performanslı bir pnömatik kuvvet eyleyicisi için nonlinear matematik model geliştirmişlerdir. Bu nonlinear matematik modeli, kuvvet kontrolünde kullanmışlardır. Valften geçen akışkanın etkisi, pistondaki sızıntılar, havanın sıkıştırılabilirlik özelliği, ölü zaman gecikmesi, strok sonu hacmi gibi etkiler dikkate alınmıştır.

Szente ve Vad (2001) yüksek cevap hızına sahip pnömatik akışlı güç sistemleri için solenoid valf dinamik sistem benzetimi yapmışlardır. Dinamik sistem modelini, manyetik-dinamik alt sistem ve mekanik alt sistem olmak üzere iki alt sistem altında toplamışlardır. Solenoid valfin dinamik modelinin benzetim sonuçlarını test sonuçları ile doğrulanmıştır.

Varseveld ve Bone (1997) hızlı, hassas ve ucuz konum kontrollü pnömatik eyleyici modeli üzerinde çalışmışlardır. Farklı modeller için sistem cevabını incelemişlerdir. Sistemde PID tipi denetleyici ve konum geribeslemesi kullanılarak hata azaltılmıştır.

Nguyen ve ark. (2007) bir kızak sisteminin pnömatik kontrolünü solenoid valf kullanarak gerçekleştirmişlerdir. DGM tekniği kullanmadan konum geribeslemesi kullanarak sistem modeli kurmuşlardır. Yaptıkları deneylerle teorik sonuçlarını doğrulamışlardır.

Taghizadeh ve ark. (2009) DGM tekniği ile sürülen pnömatik ve hızlı anahtarlama yapabilen bir solenoid valf modeli geliştirmişlerdir. Tüm sistemi elektromanyetik, mekanik ve akış alt sistemi olmak üzere üç alt sisteme ayırarak incelemişlerdir. DGM

tekniki ile sürebilmek için sistemde basitleştirme yoluna gidilmiştir. Basitletirilmi statik model deneyle doğrulanmıştır.

Lua ve ark. (2000) hastanelerdeki havalandırma sistemleri için yeni bir oransal havalandırma sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde oransal solenoid valf kullanarak sistem modelini kurmuşlar ve basınç, hacim ve akışa bağlı dinamik sistem karakteristiklerini elde etmişlerdir.

Xu ve ark. (2013) yüksek hızlı oransal solenoid valflerin akım ve basınç analizi ve kontrolü alanında bir çalışma yürütmüşlerdir. Başlangıçta akım ve basınç karakteristik eğrilerinde histerezis olma durumu grlmtır. Sabit akım kontrolü sağlanmış, basınç kontrolünde akım değiştirilerek histerezis etki azaltılmıştır.

Zhang ve ark. (2014) kapalı/açık çalışan valflerin sargı akımı ile basınç farkının sınırlı bir bölgede lineer ilişkisini ve bu duruma etki eden faktörleri incelemişlerdir.

Sorli ve ark. (1999) yaptıkları bir çalışmada çift etkili pnömatik eyleyicilerin dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Hem git-gel hareketi yapan hem de dönme hareketi yapan eyleyicileri ayrı ayrı incelemişlerdir. Modelleme için termodinamik ve enerji denklemlerinin göz önünde bulundurulduğu iki farklı yöntem ve bağ grafik tekniği kullanılmıştır.

Szimandl ve Nemeth (2013) yaptıkları bir çalışmada elektro-pnömatik debriyaj sistemi için dinamik hibrit modeli geliştirmişlerdir. Termodinamik, elektromanyetik ve mekanik alt sistemlere ayrılan sistem uzay durum modeli tekniği kullanılarak modellenmiştir. Benzetim sonuçları ile deney sonuçları karılatırılmıtır.

Sorli ve ark. (2010) yaptıkları bir başka çalışmada pnömatik servo valfin mekatronik modeli üzerinde çalışma yürütmüşlerdir. Üç yollu pnömatik akış sağlayan oransal solenoid ile hareket sağlayan valf için nonlinear sistem modeli kurulmuştur. Hem akımın hem de konum değişkenlerinin mıknatıs kuvveti, manyetik akı ve indüktans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Benzetim sonuçlarını deney sonuçlarının ispatı ile desteklemişlerdir.

Xiang (2002) krank mili kullanılarak yakıt püskürten klasik enjeksiyon sistemleri yerine operasyon süresini kısaltan, yakıt tasarrufu sağlayan ve emisyon değerlerini önemli bir seviyede düşüren lineer elektromekanik eyleyici tasarımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Sistemin dinamik modelini geliştirmiş ve enerji seviyesini anahtarlamayı ve buna bağlı olarak akım darbe modülasyonunu temel alan bir denetim stratejisini önermiş ve prototip sistem üzerinde uygulamıştır. Deneysel çalışmalarında oturma hızını 0,05 m/s olarak elde etmiştir. Kontrol algoritmasını oluşturabilmek için sistemin nonlineer dinamik modelini kurmuştur ve sonuçlarını deney sonuçları ile desteklemiştir.

Tai ve Tsao (2003) kam mili kullanılmayan motorlar için elektromekanik eyleyici tasarımı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaları eyleyicinin oturma anındaki hızının kontrolü üzerinde yoğunlaşmıştır. İki solenoid ve iki yay kullandıkları eyleyici tasarımlarının dinamik sistem modelini oluşturulmuş, kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Kallenbach ve Ströhla (2002) elektromekanik eyleyicilerin çevrinti akımı (eddy current) da içeren ağ modeli ile dinamik benzetim çalışmaları ile ilgili uygulamalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar ve sonlu farklar yönteminin uzun sürelerde ancak hesaplayabildiği sonuçları belli bir hassasiyet dahilinde ağ modeli kurarak daha kısa sürede çözdürmeyi başarmışlardır.

Park ve ark. (2003) yaptıkları bir çalışmada elektromanyetik bir eyleyicinin statik ve dinamik performansında tasarım ve uygulama parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Dizel motorların enjeksiyon sistemlerinde kullanılan eyleyicinin kütlesi, yay sabiti, valfin maksimum varış süresi, maksimum motor hızı gibi tasarım parametrelerini tespit ederek bir tasarım geliştirme prosedürü elde etmişlerdir. Bir dinamik benzetim modeli geliştirilmiş ve armatür ve valfin değişik operasyon koşullarındaki dinamik davranışlarının benzetimi yapılmıştır.

McNair ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada kam mili yerine elektromanyetik eyleyici kullanılan motorlarda yarı iletken kullanan bir elektomekanik sistem tasarımı üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Sistem modeli oluşturulmuştur. Konum ve akım kontrolü algoritmaları oluşturulmuştur.

Şefkat (2002) yaptığı bir çalışmada düz yüzölçümlü disk tipi elektromekanik sistemin dinamik davranışını incelemiştir. Elektromagnetik aygıtın elektrik, mekanik ve mıknatıs denklemleri çıkarılarak manyetik geçirgenliğin hesaba katıldığı ve katılmadığı iki farklı yöntem ile sistemin davranışını belirleyen akım, kuvvet ve konumun zaman alanı cevabı incelenmiştir.

Tehrani (2008) ağır vasıta taşıtlarda frenleme sistemi ile ilgili bir çalışma yürütmüştür. Scania marka araçlarda kullanılan hız kesici sistemlerde kullanılan bir tane olan ve oransal çalışan valf yerine aç-kapa çalışan iki adet valf kullanmayı önermiştir. Bu valfler frenleme torkunu düzenlemede kullanılacaktır. Elektriksel alt sistem, manyetik alt sistem, mekanik alt sistem ve pnömatik alt sisteme ait matematiksel modeller ayrıntılı şekilde çıkarılmıştır. Tüm sistemin matematiksel modeli ise uzay-durum modeli metodu ile oluşturulmuştur. PID tipi geri besleme kullanılmıştır.

Cheung (1995) yaptığı çalışmada yeni tarzda oransal, doğrusal olmayan ve kısa hareket mesafesine sahip, çift kademeli bir solenoid valf kontrol modeli geliştirmiştir. Doğrusal olmayan manyetik akı - akım - konum karakteristiklerini içeren yeni bir kontrol modeli oluşturulmuştur. Manyetik alana ilişkin bilgileri elde edebilmek için farklı konumlarda farklı akımlar uygulanarak manyetik akı ölçümleri yapılmıştır. Kontrol modeli, histerezis olma durumu, girdap akımı, doğrusal olmayan kuvvetin ve düzgün olmayan sürtünmenin etkilerini içerecek şekilde tekrar düzenlenmiştir.

Ackermann ve ark. (2004) küresel bir elektromagnetik eyleyici ve kontrol sistemi üzerinde yaptıkları çalışmada kuvvet geri beslemeli ve yüksek doğruluğa sahip bir oyun kumanda kolu geliştirmişlerdir. Cihaz iki serbestlik derecesine sahiptir.

Akkaya ve ark. (2005) doğrusal bir pnömatik hareketlendirici sistemin dinamik özelliklerinin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Benzetim MATLAB/Simulink bilgisayar programında oluşturulan model kullanılarak geliştirilmiştir. Sistem parametrelerindeki değişikliğin sistem üzerindeki etkileri konum bode diyagramı üzerinde incelenmiştir.

Belforte ve ark. (2004) dijital valfler ile pnömatik servo sistemlerin dinamik performansını iyileştirici bir metod geliştirmişlerdir. Darbe Genişlik Modülasyon

tekniki kullanılarak bir tankın basınç kontrolünü örnek bir çalışma olarak incelemiştir. Bu çalışmalarında 4 adet valf kullanmışlardır. Farklı akış oranları ve farklı tepki süreleri için servosistemin pnömatik kontrolü gerçekleştirilmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Günümüz araç teknolojileriyle (örneğin; ABS, EPS) uyum içerisinde çalışacak modern bir fren sistemine olan gereksinim giderek artmaktadır. Bu gereksinimin karşılanabilmesi, sürekli olarak iyileştirilen hidrolik pompalar ya da manyetik valfler içeren frenleme sistemleri ile mümkün olabilmektedir. Ağır vasıta araçlarda klasik fren sistemine ek olarak pnömatik fren sistemleri de yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında amaç; ağır taşıt vasıta araçların pnömatik fren sistemlerinde fren için gerekli olan hava akışını kontrol eden oransal solenoid valfin tasarımını gerçekleştirmek, analizlerle bu tasarımı doğrulamak ve sonraki çalışmalarda yapılması planlanan pnömatik fren kontrol uygulaması için ilk basamağı oluşturmaktır.

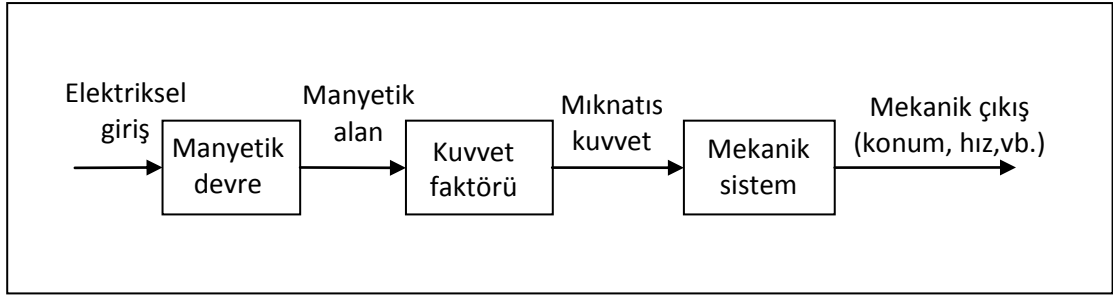
Bu bölümde, tasarım ölçütlerine göre solenoid ön tasarımı yapılmıştır. Ön tasarımı yapılan solenoid klasik aç-kapa tipi solenoiddir. Ön tasarımı yapılan solenoidin geometrisinde yapılan değişikliklerle oransal solenoid elde edilmiştir. Oransal solenoidin oransal karakteristikleri, bilgisayar ortamında ANSYS Maxwell yardımıyla optimize edilmiştir. Bu şekilde solenoidde oransallığı sağlayan en uygun geometri sağlanmaya çalışılmıştır. Solenoidin dinamik davranışını tanımlayan denklemler MATLAB ortamında Simulink modeli kurularak çözülmüştür.

Tasarımı ve imalatı yapılan solenoid sistemin statik ve dinamik testlerini yürütmek amacıyla bir deney düzeneği geliştirilmiş ve deneyler bu deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Materyal

Solenoidler temelde elektromekanik sistemler sınıfından olup, bu sistemler elektrik ve mekanik sistemlerin birleşiminden meydana gelir. Solenoidler, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Elektromekanik sistemler ya dönme ya da öteleme hareketi yaparlar. Enerji dönüşümü sonucu ortaya çıkan mekanik enerji dönme hareketi oluyorsa elektrik motoru, doğrusal bir öteleme hareketi oluyorsa elektromagnet(solenoid) adını almaktadır. Solenoidler genelde

akışkan kontrolü sağlayan valfleri açıp kapamak için kullanılır. Şekil 3.2’de buna ait bir örnek verilmiştir.

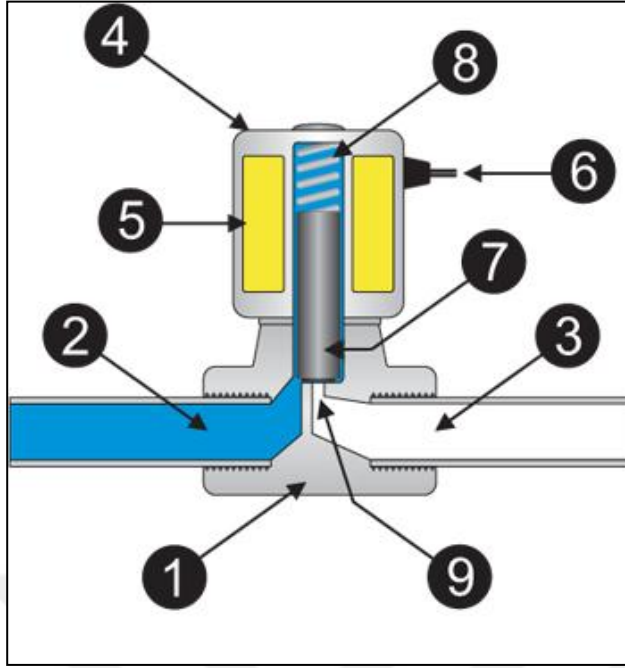


Şekil 3.1 Bir elektromanyetik eyleyicinin blok şeması

Şekil 3.1’de gösterilen manyetik bir eyleyicinin bloklarının, alt bileşenleri genelde non-linear (lineer olmayan) alt sistemler içerir. Örneğin; manyetik alandan, mıknatıs kuvvete geçerken kullandığımız kuvvet faktörü bloğu, genellikle manyetik alanın karesi ile doğru orantılı bir mıknatıs kuvveti oluşturur.

Manyetik eyleyicilerin blok şemasından görüldüğü gibi, çalışma prensibi olarak, manyetik eyleyicinin girişi elektriksel bir büyüklük, çıkışı ise mekanik bir büyüklüktür.

Elektrik enerjisi ile çalışan solenoid valfler gaz, hava, su, buhar ve yağ gibi akışkanların geçişini kontrol altında tutan elektromekanik valflerdir. Valfin akışkan akışını denetleyen tapası solenoid bobini içinde hareket eden demir çekirdek veya nüve yardımıyla hareket ettirilir. Genelde kapalı olan bu valfler solenoid bobinine elektrik enerjisi uygulamak suretiyle açık konuma getirilir. Elektrik enerjisi kesildiğinde, bir yay yardımıyla valfin tapası akışkan akışını kesecek şekilde kapanır. Solenoidler doğru akım veya alternatif akımda çalışacak şekilde ve çeşitli anma değerlerinde yapılırlar. Solenoid mıknatıs devresi sabit ve hareketli iki kutuptan oluşur ve hareketli kutup demir çekirdek (nüve) veya pistoncuk (hareketli eleman) adını alır. Elektrik akımı verildiğinde sabit ve hareketli kutuplar arasında oluşan mıknatıs alanı hareketli kutubu sabit kutuba çekerek demir çekirdek kısmının hareketini sağlar. Bobin kullanım durumuna göre çekirdeği aşağıya veya yukarıya doğru hareket ettirir. Bu şekilde akışkan yolu açılır veya kapanır.



1. Vana gövdesi
2. Giriş hattı
3. Çıkış hattı
4. Solenoid gövdesi
5. Bobin
6. Kablo girişi
7. Armatür (hareketli eleman)
8. Yay
9. Orifis

Şekil 3.2 Akış denetiminde kullanılan solenoid valfin iç yapısı

Solenoidler gündelik hayatımızda oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çamaşır ve bulaşık makinelerinin su alma ve boşaltma sistemlerinde, otomatik musluklarda, soğutucu gibi makine ve ekipmanlarda, bahçe sulama sistemleri ve merkezi ısıtma sistemlerinde ısıtıcı elemanlardan akan sıcak suyun hareketini düzenlemek için termostat kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel kullanım alanları; pnömatik otomasyon sistemlerinin kontrolünde, hidrolik güç sistemlerinin kontrolünde şeklinde sıralanabilir. Bunların yanında solenoidlerin taşıt araçlarında kullanımı sayısal denetim sistemlerinin gelişmesine paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır.

Solenoidlerin otomobillerdeki kullanımına örnek olarak; yakıt püskürtme sistemleri, otomatik kapı kilitleme mekanizmaları, vites kutusu vites değiştirme mekanizmaları, klima ve iklimlendirme sistemleri kontrolü, güvenlik sistemleri, ABS fren sistemleri, elektrikli fren sistemleri verilebilir.

Bu tez kapsamında, ağır vasıtalarda kullanılmakta olan pnömatik frenler için fren kontrolünü sağlayan solenoid valf tasarımı, statik ve dinamik davranışları incelenmiştir.

3.2. Yöntem

Solenoid ön tasarımı yarı ampirik formüllere dayanan sistematik bir yöntemle gerçekleştirilmiştir (Roters, 1941). Aç-kapa tipte ön tasarımı gerçekleştirilen solenoidin geometrisinde değişiklikler yapılarak oransal karakteristik sağlayan oransal solenoid tasarımına geçilmiştir. Oransal solenoid tasarımında, geometrik parametreler değiştirilerek oransallığı sağlayan en uygun oransal solenoid geometrisi tayin edilmiştir. Bu aşamada ANSYS Maxwell elektromanyetik sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Geometri optimizasyonunda, amaç fonksiyonu minimize edilmeye çalışılmıştır. Optimize edilen bu oransal solenoidin dinamik davranışını veren matematiksel modeli elde edilmiştir. Matematiksel modele bağlı dinamik modeli MATLAB Simulink programında oluşturulmuştur. Simulink modelinde, Relüktans metodu yerine hava aralığı-akım-kuvvet ve hava aralığı-akım-manyetik akı bağı tablolarının (look-up table) önceden hazırlanarak dinamik modelin içine adapte edildiği yöntem uygulanmıştır. Dinamik modelde kullanılan manyetik akı bağı ve kuvvet tabloları ANSYS Maxwell programından aktarılmıştır.

ANSYS Maxwell paket programı, elektromanyetik alan problemlerini, seçilen malzemelerin özellikleri için, sınır koşulları altında, giriş kaynaklarını girdi kabul ederek, Çizelge 3.1’de verilen Maxwell denklemlerini sınırlı bir uzay bölgesinde çözer.

Maxwell programının 3 ve 2 boyutlu geometri oluşturma seçenekleri mevcuttur. 2 boyutlu geometri modunda (Maxwell 2D) iki farklı koordinat sistemi moduna sahiptir, bunlar Kartezyen (XY) Koordinat Sistemi ve Asimetrik (RZ) Koordinat Sistemi’dir.

ANSYS Maxwell programı yardımıyla elektrik alan ve manyetik alan problemlerinin çözümlenmesi yapılabilmektedir. Manyetik alan çözümlenmesinde Magnetostatic, Eddy Current ve Transient Magnetic olmak üzere 3 farklı çözücü mevcuttur. Kullanıcı, çözeceği problemin niteliğine göre uygun geometri modunu ve uygun çözücü seçmektedir.

ANSYS Maxwell programı parametrik çalışmaya izin verdiği için, parametrik oluşturulan ölçülerle pratik bir şekilde program oluşturmaya ve birden fazla sayıda manyetik analizin tanımlamalarını aynı anda yapabilmeye imkan tanımaktadır. Ayrıca,

sonlu elemanlar ağı(mesh) adaptif olduğu için parametrik çalışan birden fazla sayıda analiz probleminde her bir problem için ağ yapısını kullanıcıdan bağımsız olarak program kendisi oluşturmaktadır.

ANSYS Maxwell programından, elektromanyetik alan analizi çıktısı olarak mıknatıs kuvveti, tork, kapasitans, indüktans, direnç ve impedans değerleri alınabilmektedir. Ayrıca manyetik iş ve işe bağlı olarak hesaplanabilecek diğer değerler de çıktı olarak(manyetik akı bağı gibi) alınabilmektedir.

Maxwell denklemleri ve Maxwell programı ile ilgili tanımlar aşağıda verilmiştir.

Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri, Faraday Kanunu, Manyetizma için Gauss Kanunu, Ampere Kanunu, Elektrik için Gauss Kanunu olmak üzere 4 denklemi içerir ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Maxwell denklemleri

Maxwell denklemleri			
	Diferansiyel formu	İntegral formu	
1-Faraday Kanunu	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot dA$	(3.1)
2-Manyetizma için Gauss Kanunu	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint B \cdot dA = 0$	(3.2)
3-Ampere Kanunu	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint H \cdot dl = \int \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dA = NI$	(3.3)
4-Elektrik için Gauss Kanunu	$\nabla \cdot D = \rho$	$\oint D \cdot dA = \int \rho \cdot dV$	(3.4)

1’nci Maxwell denklemi Faraday Kanunudur: kapalı devre boyunca elektrik alanın çizgi integrali, bu devrece çevrelenen yüzeydeki manyetik alan akısının zamanla değişimiyle orantılıdır.

2’nci Maxwell denklemi Manyetizma için Gauss Kanunudur: kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akısının sıfır olduğunu ve dolayısı ile manyetik yüklerin var olmadığını belirtir.

3'ncü denklem Ampere Kanunu'nun Maxwell tarafından düzenlenmiş halidir. İlk terim (J), bu kapalı yolun sınırladığı yüzeyden geçen net akımı içerir. İkinci terim ($\frac{\partial D}{\partial t}$) kapalı yolun sınırladığı yüzeydeki elektrik alan akısının zamanla değişimini ifade eder. Maxwell bu düzenlemesi ile elektrik alandaki zamanla değişimin manyetik alan oluşturduğunu göstermektedir.

4'ncü denklem Gauss Kanunu'dur. Statik alanlar için bu yasa Coloumb Kanunu'na eşittir. Gauss Kanunu kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akısının, bu yüzey tarafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan toplam net yükü orantılı olduğunu ifade eder.

Manyetik Kuvvet, Manyetik Akı ve Akı Yoğunluğu

Manyetik kuvvet, manyetik enerji, elektromanyetik sonlu eleman eşitliği konularının işlendiği bu bölümdeki bilgilerin aktarılmasında Brauer(2006)'den yararlanılmıştır.

Manyetik Kuvvet

Manyetik vektör potansiyeli A ve manyetik akı yoğunluğu B, sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanarak, buradan ilgili işlemlerle manyetik eyleyici ve algılayıcılardaki miknatıs kuvveti bulunabilir. Manyetik kuvvete bağlı olarak manyetik akı çizgileri, manyetik enerji, manyetik basınç ve manyetik tork da bulunabilir.

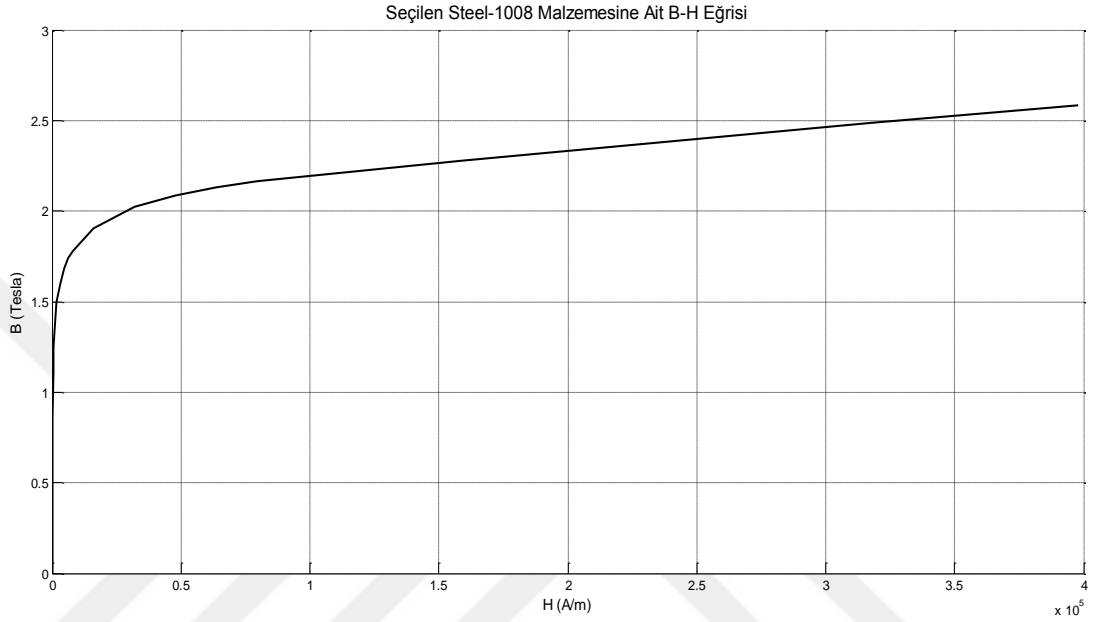
Manyetik Akı Çizgileri

2 boyutlu düzlemsel üçgen sonlu elemanlar çözümlerinde manyetik vektör potansiyeli A yalnızca xy düzlemine dik Az bileşeninden oluşur. Sabit Az kontürlerinin çizimleri 2 boyutlu model üzerinde gösterildiğinde buna manyetik akı çizgileri çizimi veya kısacası manyetik akı denir. Sabit Az değerlerinin kontür şeklinde çizimi, sıcaklık haritalarındaki eş sıcaklık eğrilerine benzetilebilir.

Manyetik akı çizgileri, bazen kuvvet çizgileri olarak da kullanılabilir. Kuvvet en yüksek akı yoğunluğunun olduğu bölgede yoğunlaşır. Böylece birbirine en yakın olan akı çizgilerinin olduğu bölge yüksek akı yoğunluğunun olduğu bölgeyi temsil eder.

Manyetik Malzemeler

Birçok malzeme içinde değişkenlik gösteren manyetik özellik, o malzemenin manyetik geçirgenliğidir. Serbest uzayın (vakum) geçirgenliği μ_0 'dır ve hava için de aynı değer geçerli olmaktadır.



Şekil 3.3 1008 Çeliğine ait tipik B-H eğrisi (mıknatıs eğrisi)

Bir çok manyetik cihaz doğrusal olmayan B-H eğrisine sahip olduğundan dolayı çelikteki manyetik akı yoğunluğu önemli bir ilgi konusudur. Eğer akı çizgileri çelikteki yoğunluğun 1.5 T'dan az olduğunu gösterirse B-H eğrisinin doğrusal giden kısmındaki tahmini eğim değeri kullanılır, doğrusal olmayan kısmı göz ardı edilebilir. Şekil 3.3'de 1008 çeliğine ait tipik bir mıknatıslanma eğrisi verilmiştir.

Manyetik Enerji

Bir manyetik alanda saklanan enerji Denklem (3.5) ile ifade edilir (Brauer 2006):

$$W_{mag} = \int \frac{B^2}{2\mu} dv \quad (3.5)$$

Burada μ geçirgenliği sabit kabul edilmiştir. Genellikle W enerjisinin tüm çeşitleri w enerji yoğunluğunun bir hacim boyunca integre edilmesi ile bulunur:

$$W = \int w \, dv \quad (3.6)$$

Böylece birim hacim başına joule birimi cinsinden enerji yoğunluğu, sabit geçirgenliğe sahip malzemeler için

$$w_{mag} = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2}BH \quad (3.7)$$

olduğu çıkarılabilir.

Doğrusal olmayan B-H eğrisine sahip malzemelerde, enerji yoğunluğu

$$w_{mag} = \int H \cdot dB \quad (3.8)$$

integrali ile hesaplanabilir.

Demire Etki Eden Manyetik Kuvvet

Kuvvet, enerji ile ilişkili olup onun bir bileşenidir. Mekanik enerji kısaca kuvvet ile yolun çarpımına eşittir. Buna göre verilen bir yöndeki kuvvet; örneğin y yönündeki kuvvet saklı enerjinin aynı yöndeki kısmi türevinden belirlenebilir:

$$F_y = \frac{\partial W}{\partial y} \quad (3.9)$$

Çeliğin (veya farklı bir malzemenin) geçirgenliğinin havanın geçirgenliğinin 1000 katı olduğunu varsayalım. Böylece havadaki enerji yoğunluğu çelikteki enerji yoğunluğunun 1000 katı olur ve denklemi şu şekilde verilir:

$$w_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (3.10)$$

(3.5) denklemi v hacmi için çözülecek olursa;

$$W_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} V \quad (3.11)$$

denklemi elde edilir. Buradan da;

$$W_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} Ay \quad (3.12)$$

yazılabilir. Burada hava boşluğuki akı yoğunluğu B uniform kabul edilmiştir.

Enerji denkleminin hareket miktarına göre kısmi türevinde, $F_{mag} = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{AB^2}{2\mu_0}$ şeklinde mıknatıs (manyetik) kuvvet elde edilmiş olur. Burada μ_0 boşluğun veya havanın mıknatıs geçirgenliği olup

$$F_{mag} = AB^2/(2\mu_0) \quad (3.13)$$

Formülü hareketli kutup ile sabit kutup arasındaki mıknatıs çekim kuvvetini verir. Bu formül yardımıyla belli bir mıknatıs kuvveti için gerekli mıknatıs çekim alanı, A'nın hesaplanmasını sağlar.

eşitliği çıkarılır. Bu mıknatıs kuvveti eşitliği, çeliğin sonsuz yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu kabul etmiş olsa bile çok kullanışlı ve çok basit bir eşitlik. Kuvvetin akı yoğunluğunun karesi ile doğru orantılı olduğuna dikkat edilmelidir. Kuvvetin yönü çelik kutbundan hava boşluğuna doğrudur. Böylece çelik kutupları B yönünden bağımsız bir şekilde birbirlerine etkiler. Çünkü bu kuvvet, manyetik devrenin mıknatıssal direncini azaltıcı yönde etki eder ve kuvvet bazen mıknatıssal direnç kuvveti olarak tanımlanabilir.

Eğer çelik kutupları sonlu μ_s geçirgenliğine sahipse kuvvet eşitliği şu şekli alır:

$$F_{mag} = S \left[\frac{B^2}{2\mu_0} - \frac{B^2}{2\mu_s} \right] \quad (3.14)$$

$\mu_s > \mu_0$ olduğundan, kuvvet yönü aynen kalır. Bir çok durumda $\mu_s > 1000\mu_0$ olduğundan, üstte verilen basit eşitlik yeterli bir şekilde hassastır.

MATLAB programı, temel olarak sayısal hesaplama, grafiksel veri gösterimi ve programlamayı içeren teknik ve bilimsel hesaplamalar için yazılmış yüksek performansa sahip bir yazılımdır. MATLAB'ın tipik kullanım alanları; matematik ve hesaplama işlemleri, algoritma geliştirme, modelleme, simülasyon(benzetim) ve

önprototipleme, veri analizi ve görsel efektlerle destekli gösterim, bilimsel ve mühendislik grafikleri, uygulama geliştirme şeklinde özetlenebilir.

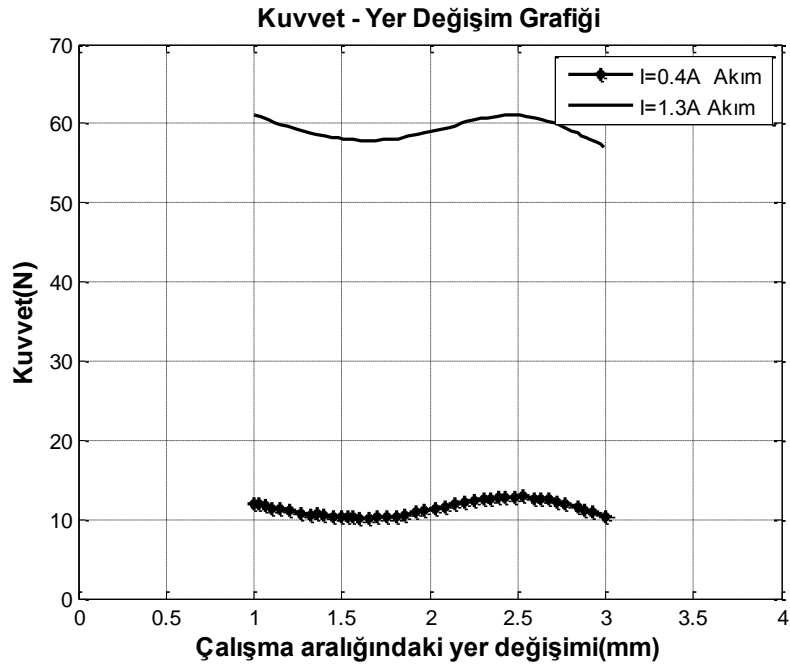
Simulink, karmaşık sistemleri tasarlama ve simülasyon yapma olanağı sağlayan, MATLAB programı ile entegre çalışan bir program paketidir. Simulink, geniş bir kullanıcı kütüphanesine sahiptir ve Simulink, kütüphanesinde barındırdığı Simulink blokları ile programlama mantığına sahiptir. Bloklar, programlama dillerinde kullanılan fonksiyonlara benzetilebilir. Her bir dinamik sistem için yazılmış hazır fonksiyonlardır.



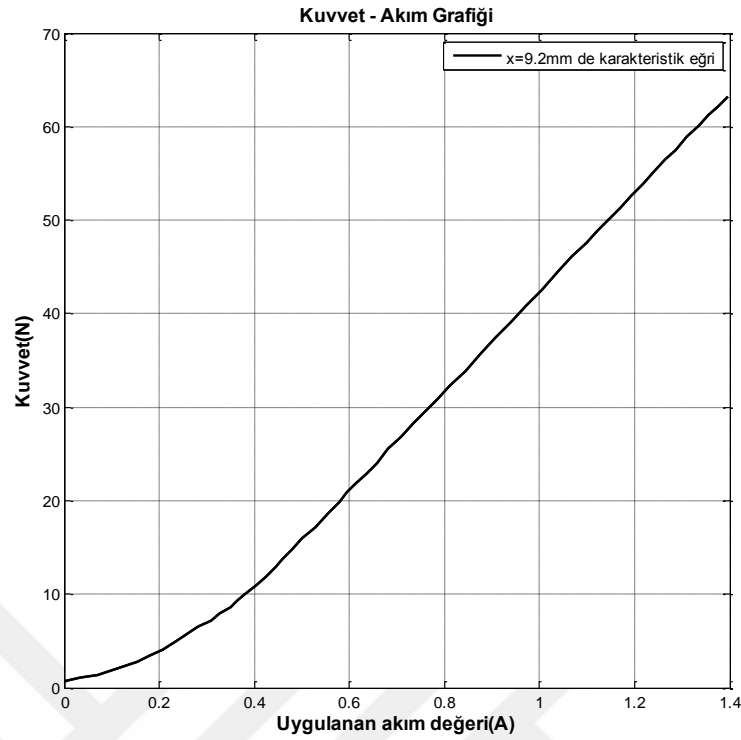
3.2.1. Solenoid Tasarımı

Tez kapsamında tasarımı ele alınan solenoid Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki tasarım ölçütlerine göre tasarlanmış ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu ölçütler, bir ağır vasıtada kullanılacak elektrikli fren sisteminde (EBS) gerekli oransal solenoidin karakteristiklerini karşılayacak şekilde seçilmiştir. Solenoidin oransal çalışmasını sağlayan ölçütlerden birisi, Şekil 3.4'de görüldüğü gibi belli bir çalışma bölgesinde mıknatıs kuvvetinin sabit tutulması ve diğeri de Şekil 3.5'de görüldüğü gibi buna bağlı olarak bobine uygulanan akım girişine karşılık elde edilen mıknatıs kuvvetinin oransal olmasıdır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilen tasarım ölçütleri kısaca aşağıda olduğu gibi özetlenebilir:

- Çalışma gerilimi 0-8 Volt; maksimum akım 1,6 A; çalışma sıcaklığı $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında olacaktır.
- 2 mm çalışma mesafesinde(airgap) solenoid alt ve üst toleranslar dahilinde yaklaşık sabit bir kuvvet eğrisine sahip olmalıdır.
- Çalışma mesafesi 1,2 mm mesafesinde iken 1,0 A akımda 42 N kuvvet elde edilmesi baz alınmıştır.



Şekil 3.4 Tasarım ölçütü olarak kuvvet-çalışma aralığı karakteristiği



Şekil 3.5 Tasarım kriteri olarak kuvvet akım grafiği

3.2.2. Solenoid Ön Tasarımı

Solenoid tasarımında literatürde (Roters, 1941) düzyüzlü pistoncuklu (hareketli eleman) tipi solenoid geometrisi tercih edilmiştir. (Bkz. Şekil 3.6)

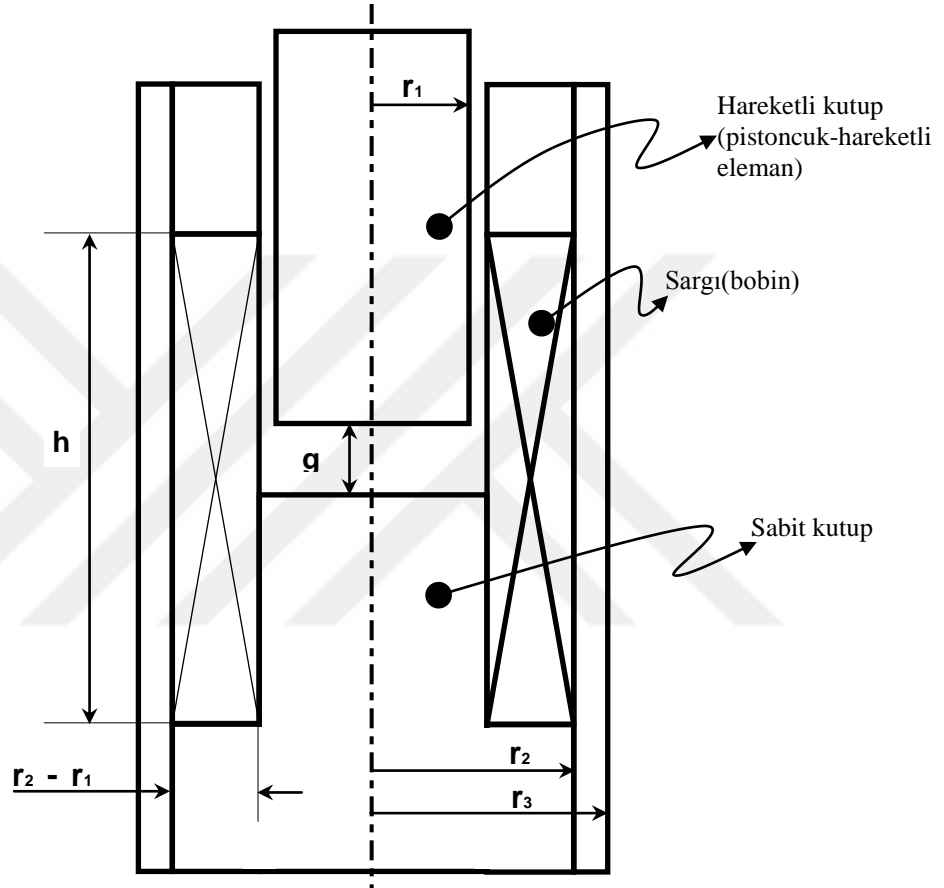
Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki grafiklerden tasarım kriteri olarak 1 A akımda ve 3mm çalışma aralığında 42N kuvvet sağlayacak solenoid tasarımı gerçekleştirilmiştir. Solenoid tasarımında başlangıç kriterleri Çizelge 3.2'de gösterilen değerler alınarak yapılmıştır:

Çizelge 3.2 Solenoid tasarım kriterleri

g=	3,00 mm	Malzeme:	SAE 1008
F=	42,0 Newton	Çalışma Sıcaklığı=	-20° 80°C arası
E=	8 Volt	Uyarı Sinyali=	0,1

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (3.15)$$

Solenoid ön tasarımı, belli bir çekim kuvvetini sağlayacak olan mıknatıs çekim alanı A , hesaplanarak başlatılmıştır. Bunun için (3.13) nolu denklemden A alanı çekilerek gerekli hesaplama yapılır.



Şekil 3.6 Düzüzlü pistoncuklu(hareketli eleman) tipi solenoid geometrisi parametreleri

Başlangıçta mıknatıs kuvvetini sağlayan mıknatıs akı yoğunluğu, B bilinmediğinden maksimum hava aralığı veya maksimum çalışma aralığına bağlı bir indeks numarası belirlenir. Bu indeks numarasına karşılık gelen B mıknatıs akı yoğunluğu(manyetik alan) grafikten tespit edilir. Mıknatıs kuvveti ve hava aralığına bağlı indeks numarası $\sqrt{F}/g = \sqrt{42}/3 = 2,16$. Bu indeks numarasına karşılık gelen B manyetik alan değeri Roters (1941)'den $B=0,682$ T olarak okunmuş ve birim dönüşümü yapılmıştır.

Denklem (3.13) düzenlenip silindir kesit alanına karşılık gelen r_1 ;

$$r_1 = \sqrt{\frac{2\mu_0 \cdot F}{B^2}} = 8,49\text{mm}$$

olarak bulunur. Bu değer hareketli kutubun (pistoncuk-hareketli eleman) yarıçapıdır.

Mıknatis devresinde, mıknatis akısını ve dolayısı ile mıknatis kuvvetini sağlaması gerekli magnetomotiv kuvveti NI yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir. Burada toplam NI'nın %70'nin hava aralığı üzerinden, %30'unun ise demir üzerinden geçtiği varsayılmıştır:

$$NI = \frac{Bg}{\mu} + 0,30NI \quad (3.16)$$

Buna göre;

$$NI = \frac{Bs}{0,70\mu} \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Burada verilen değerler yerine konursa NI=2327 A-sarım olarak hesap edilir. Solenoid bobinine uygulanan NI girişine karşılık oluşacak sıcaklık değeri

$$\theta_f = \frac{q\rho}{2kf(r_2 - r_1)} \left(\frac{NI}{h}\right)^2 \quad (3.18)$$

ifadesine göre hesaplanabilir. (3.17) nolu formül yardımıyla, Çizelge 3.3'de verilen fiziksel parametre ve kabul edilen değerlere göre, magnetomotiv kuvvet NI'yi sağlayacak bobin için gerekli boyutlar hesaplanabilir.

Çizelge 3.3 Kabul edilen sabit değerler

$\theta_f =$	60°C (Varsayılan en yüksek bobin sıcaklığı)	$f =$	0,45 (Boşluk faktörü)
$q =$	0,1 (Varsayılan çalışma sıcaklığı)	$\frac{h}{r_2 - r_1} =$	6,38 (Bobin alanı yükseklik/en oranı)
$\rho_{bakır} =$	2,1257x10 ⁻⁸ (Ω m) (80°C'de bakır telin özgül direnci)	$k =$	11,780 Watt/m ² °C (Malzemenin ısı iletim katsayısı)

(3.18) nolu ısı denklemi, h bobin yüksekliği mesafesi için çözülürse;

$$h = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{h}{r_2 - r_1}\right) (q)(\rho)(NI)^2}{2(k)(f)(\theta_f)}} \quad (3.19)$$

elde edilir. (3.19) denkleminde değerler yerine konursa; $h = 49,23\text{mm}$ hesaplanır.

$\frac{h}{r_2 - r_1} = 6,38$ 'den $r_2 - r_1 = 7,7\text{mm}$ hesaplanır. Buradan da $r_2 = 16,20\text{mm}$ olarak bulunur.

Genellikle solenoid dış kısmında kullanılan malzeme, hareketli kutupta(hareketli eleman) kullanılan malzemenin mıknatıs özelliğinden (mıknatıs akı yoğunluğu) daha düşük olabilir. Bu durumda hareketli kutup kesit alanı ile sabit kutup kesit alanları arasında 0,8 oranı kabulü ile $\pi(r_1)^2 = 0,8\pi((r_3)^2 - (r_2)^2)$ formülünden r_3 yarıçapı çekilerek $r_3 = 18,78\text{mm}$ olarak hesaplanır.

Ohm yasasına da dayandırılarak belli bir gerilim ve NI değerlerini sağlayacak tel çapı hesabı ise aşağıdaki formüle göre yapılabilir:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho(r_2 + r_1) NI}{E}} \quad (3.20)$$

Değerler yerine konarak tel çapı hesaplanır ve $d = 0,787\text{mm}$ bulunur. Bu tel çapına en yakın standart tel çapı, ilgili standarttan bakılarak 20AWG tel çapı seçilmiştir. 20AWG tel çapı ise yaklaşık $d=0,813 \text{ mm}$ 'e karşılık gelmektedir.

Hareketli kutubun etrafını kaplayan pirinç malzeme boyutu için, hareketli eleman çapına en yakın ve uygun pirinç çapı olarak 17,8mm pirinç boru çapı seçilir. Pirinç borunun et kalınlığını 0,15mm olarak alırsak, iç çapı 17,5mm olur. Pirinç boru ile hareketli eleman arasında 0,05mm boşluk bırakılırsa yeni hareketli eleman yarıçapı 8,71mm olarak bulunur. Bu durumda hareketli eleman kesit alanı $238,8 \text{ mm}^2$ bulunur. Bu kesit alanı, solenoid kabuk kısmı kesit alanına eşitlenirse ve t_1 ve t_2 kalınlıkları hesap edilirse;

$$t_1 = \frac{1213}{2\pi r_1} = 22,2\text{mm} , t_2 = \frac{1213}{2\pi r_2} = 11,9\text{mm} \text{ olarak bulunur.}$$

Solenoidin kaba ölçüleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Solenoid ön tasarım ölçüleri

$r_1 =$	8,72mm	$h =$	49,23mm
$r_2 =$	16,20mm	$t_1 =$	22,16mm
$r_3 =$	16,70mm	$t_2 =$	11,93mm
$r_2 - r_1$	7,48mm		

Ön tasarım hesaplarına göre elde edilen solenoid ölçüleri **Çizelge 3.4**’de verilmiştir. Tasarımı bu ölçülere göre yapılan solenoid çizilmiş, modellenmiş, uygun malzeme tanımları ve B-H eğrileri tanımlanmıştır. Tasarımı tamamlanan solenoidin Maxwell programında mıknatıs analizi yapılmış ve tasarım ölçülerine göre 47,8 Newton mıknatıs kuvveti sağladığı görülmüştür.

Başlangıçta tasarım ölçütü olarak $g=3,00\text{mm}$ ’de $F=42\text{N}$ tanımlanmıştı. Tasarımı yapılan solenoid modelinin sonlu elemanlar analiz sonucuna göre $g=3,00\text{mm}$ ’de $F=47,8\text{N}$ kuvvet hesaplanmıştır ve %13,8 hatalı bulunmuştur. %5’lik hata toleransının dışında kaldığı için tasarımda iyileştirme ve düzenlemelere yapılmıştır.

Ayrıca, teorik olarak hesaplanan $NI=2327$ A-sarım değerinde akım değeri $I=1\text{A}$ alındığı için $N=2327$ sarım sayısı bulunmuştur. Bu sarım sayısının ise $h=49,23\text{mm}$ ve $r_2 - r_1 = 7,48\text{mm}$ ölçülerine sığacak şekilde ve tel çapı da $d=0,813\text{mm}$ olacak şekilde sığması fiziksel olarak mümkün değildir. Bu alana $d=0,813\text{mm}$ tel çapında sığabilecek maksimum sarım sayısı 540 tanedir. Bu nedenle tasarım ölçütleri değiştirilmiştir.

Solenoid Ön Tasarım Ölçütlerinin Değiştirilmesi ($g=1,00\text{ mm}$)

Solenoidin ön tasarımda $g=3,00\text{mm}$ seçilmiştir ve bu tasarım ölçütü değiştirilerek $g=3,00\text{mm}$ yerine $g=1,00\text{mm}$ kabul edilmiştir ve $g=1,00\text{ mm}$ ’den sonra kuvveti yaklaşık sabit tutacak şekilde bir manyetik akı yolu çizmesi sağlanmıştır. Başlangıçta tasarım stratejisi olarak planlanan $3,00\text{mm}$ ’de $F=42\text{N}$ sağlayıp $1,00-3,00\text{mm}$ arasında kuvveti düşürmek fikri pratikte mümkün olmadığı için tersten gidilerek yani $g=1,00\text{mm}$ ’de $F=42\text{N}$ sağlanarak $1,00-3,00\text{mm}$ arasında elde edilen kuvvetin artırılması sağlanmıştır.

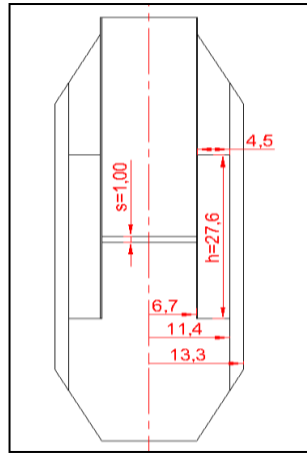
Tasarımı gerçekleştirilen aç-kapa tipi solenoidten oransal karakteristikler sağlayan bir solenoid elde etmek için çalışma bölgesinde (1-3mm aralığında) sabit kuvveti sağlayacak şekilde solenoid tasarımı revize edilmiştir.

Bu durumda, yeni tasarım ölçütlerine göre bir önceki gibi oluşturulan solenoid ölçüleri Çizelge 3.5’de verildiği gibi bulunur. Buradaki ikinci tasarım aşamaları, birinci tasarımdaki aynı silsileyi takip ettiği için tekrar adım adım anlatılmamış yalnızca final değerleri özet şeklinde Çizelge 3.5’de verilmesi yeterli görülmüştür.

Çizelge 3.5 Revize edilen solenoidin ön tasarım ölçüleri

$r_1 =$	6,69mm	$h =$	27,55mm
$r_2 =$	11,38mm	$t_1 =$	20,58mm
$r_3 =$	13,34mm	$t_2 =$	12,10mm
$r_2 - r_1$	4,69mm		

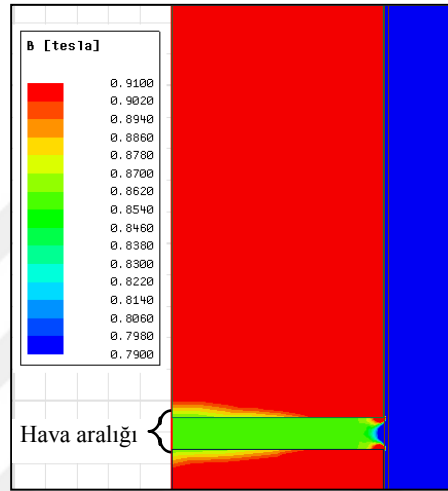
İkinci aşama ön tasarımı tamamlanan ve oransal solenoid tasarımına esas teşkil eden yeni solenoid tasarıma ait teknik resimler EK 2’de verilmiştir.



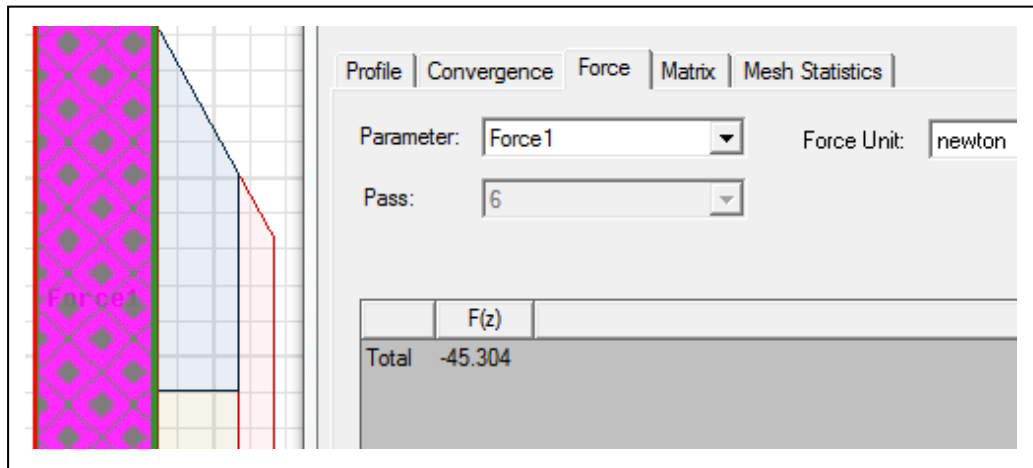
Şekil 3.7 $g=1,00\text{mm}$ için tasarlanan solenoid geometrisi

Nihai ön tasarımda mıknatıs akı yoğunluğu yaklaşık $B=0,946$ Tesla kullanılmıştır. Buna göre; $NI=1075$ A-sarım, $d=0,455\text{mm}$ (tel çapı) hesaplanmıştır. I akımı 1A kabul edildiği için sarım sayısı $N=1075$ sarım çıkmıştır. Oysa, bobin alanına sığabilecek maksimum sarım sayısını hesapladığımızda ise; $\frac{27,6}{0,455} \times \frac{4,5}{0,455} \cong 60 \times 9 = 540$ sarım olarak bulunur.

Bu noktada, hava aralığındaki B manyetik akı yoğunluğu değerinin grafikten okuduğumuz tahmini değeri daha net sonuç veren sonlu elemanlar analizi yönteminden ilgili geometri çizilerek yaklaşık olarak bulunmuştur. Buna göre ilgili B manyetik alan değeri yaklaşık olarak $B=0,85$ T olduğu tespit edilmiştir ve bu değeri gösteren şekil aşağıda Şekil 3.8’de verilmiştir. Ayrıca, tasarım ölçütü olarak kullandığımız $F=42$ Newton’a yakın bir değer, $F=45,3$ Newton değeri bulunmuştur ve sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz sonucu da Şekil 3.9’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 $g=1,00$ mm’de hava aralığında manyetik alan



Şekil 3.9 $g=1,00$ mm’de elde edilen kuvvet

Başlangıçta kabul edilen manyetik akı yoğunluğu $B=0,946$ T yerine, sonlu elemanlar programından bulunan yaklaşık $B=0,86$ T kullanılmak suretiyle hesaplamaların geri kalanı buna göre yapılmıştır. Buna göre NI;

$$NI = \frac{Bg}{0,7\mu_0} = \frac{0,86 \times (1 \times 10^{-3})}{0,7 \times (12,57 \times 10^{-7})} = 977 \text{ A} - \text{sarım} \quad (3.21)$$

olarak bulunur.

Hava aralığında harcanan NI için;

$$NI_{hava} = \frac{Bg}{\mu_0} = \frac{0,86 \times (1 \times 10^{-3})}{(12,57 \times 10^{-7})} = 684 \text{ A-sarım bulunur.}$$

Çelik içinde harcanan NI için;

$$\phi = BxA = 0,86 \times \left(\frac{\pi(13,4 \times 10^{-3})^2}{4} \right) = 12,13 \times 10^{-5} \text{ W}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{(95 \times 10^{-3})}{(2000 \times 12,57 \times 10^{-7}) \times \frac{\pi(13,4 \times 10^{-3})^2}{4}} = 267,95 \times 10^3 \text{ A/Wb}$$

$$NI_{çelik} = \phi \times \mathfrak{R} = (12,13 \times 10^{-5}) \times (267,95 \times 10^3) \cong 32 \text{ A-sarım}$$

Buna göre Relüktans metoduna göre toplam NI;

$$NI = NI_{hava} + NI_{çelik} = 684 + 32 = 716 \text{ A-sarım}$$

olarak bulunur. Çelik malzemedeki NI oranı, $\frac{NI_{çelik}}{NI_{toplam}} \times 100 = \frac{32}{716} \times 100 = \%4,47$

olduğu görülür. Toplam NI, sonlu elemanlar programında $NI=716$ A-sarım olarak tekrar analiz edilirse Şekil 3.10'de görüldüğü gibi $F=41,2$ N kuvvet hareketli kutuptan sağlanmaktadır ve bu da tasarım ölçütü olan $F=42$ N'a yakın bir değerdir. Denklem (3.18)'de $NI=716$ A-sarım'a göre hesaplanırsa, $\theta_f = 29,3$ °C hesaplanır.

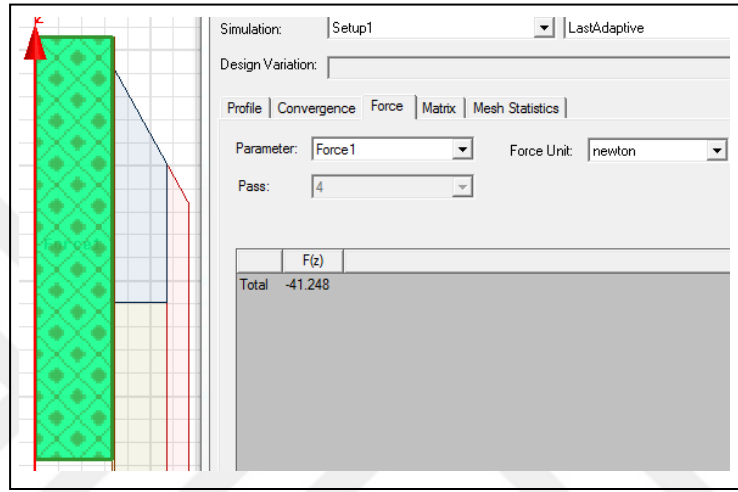
Belirlenen geometri ve sarım sayısına bağlı olarak bobinin direnci;

$$R = \rho_m l$$

İfadesi ile hesaplanır. Burada, ρ_m metre başına miliohm cinsinden direnci, l ise metre cinsinden tel boyunu gösterir. Tel boyu, boyutlara bağlı olarak 76m bulunmuştur. Buna göre;

$$R = 66,79 \frac{m\Omega}{m} \times 76m = 5076.04m\Omega = 5\Omega$$

olarak hesaplanır.



Şekil 3.10 NI=716 A-sarım'a göre elde edilen kuvvet

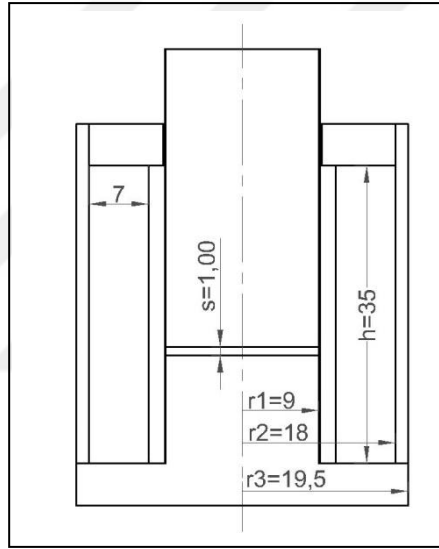
Solenoidde bobinin ısının hareketli eleman üzerinden solenoidden uzaklaştırılması için hareketli eleman ile bobin arasında ince pirinç boru kullanılmıştır (Pirinç boru kalınlığı: 0,12mm). Pirinç boru ile solenoid kabuk kısmı arasında, hareketli eleman'ın aksel yönde hareket edebilmesi için 0,18mm boşluk bırakılması gerektiği kabul edilmiştir.. Bu tasarım kriterlerine göre tasarım yeniden düzenlenirse; hareketli eleman yarıçapı $r_1 = 7mm$ için elde edilen kuvvet $F=28,44N$, $r_1 = 8mm$ için elde edilen kuvvet $F=34,78N$, $r_1 = 9mm$ için elde edilen kuvvet $F=41,19N$, $r_1 = 10mm$ için elde edilen kuvvet $F=52,22N$ olarak bulunmuş ve Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Buna göre arzu edilen $F=42 N$ kuvvet değerini sağlaması için $r_1 = 9mm$ hareketli eleman yarıçapı ile $F=41,19 N$ kuvvet sağlanması yeterli görülmüş ve hareketli eleman yarıçapı olarak 9mm seçilmiştir.

Çizelge 3.6 Solenoid yarıçapı-kuvvet ilişkisi

	Çekirdek Yarıçapı	Kuvvet
1-	$r_1 = 7mm$	$F = 28,44 \text{ Newton}$
2-	$r_1 = 8mm$	$F = 34,78 \text{ Newton}$
3-	$r_1 = 9mm$	$F = 41,19 \text{ Newton}$
4-	$r_1 = 10mm$	$F = 52,22 \text{ Newton}$

Tasarlanan solenoide ait ölçüler Şekil 3.11’de görüldüğü şekildedir. Bu solenoide göre analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.2 ve Şekil 4.1’de verilmiştir.



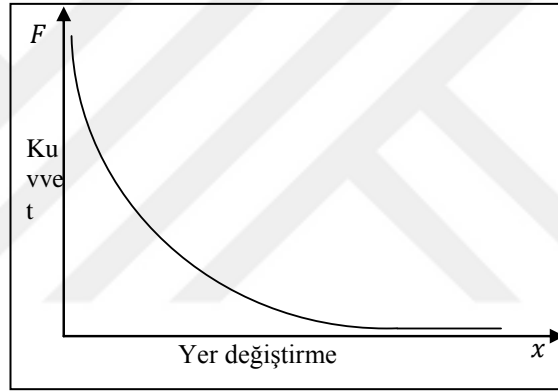
Şekil 3.11 Solenoidin nihai tasarımına ait ölçüler

3.2.3. Solenoid Akım-Kuvvet Karakteristiğinin Doğrusallaştırılması ve Oransal Solenoid Tasarımı

Ön tasarımı yapılan solenoid çekim kuvveti; (3.10) ve (3.16) nolu denklemlerden, uygulanan akım ve hareket miktarına bağlı olarak aşağıdaki (3.22) nolu denklemdeki şekilde de ifade edilebilir:

$$F_m = \frac{\mu_0 A_c (NI)^2}{2(x_t - x)^2} \quad (3.22)$$

(3.22) nolu denklemden görüldüğü gibi, mıknatıs çekim kuvveti uygulanan akımın karesi ile doğru ve sonuçlanan mekanik hareket miktarı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Buna göre mıknatıs kuvveti akım ve yerdeğiştirmenin fonksiyonu olarak doğrusal olmayan (non-linear) şekilde değişmektedir. Bu durum, belli bir akım değerinde yer değiştirmeye (hareket miktarı) karşılık mıknatıs kuvvet grafiği olarak Şekil 3.12’de verildiği gibi gösterilebilir. Şekilden görüldüğü gibi sabit kutup ile hareketli kutup arasındaki mesafenin çok küçük olduğu (mm veya kesri mertebesinde) çekim kuvveti çok yüksek, buna karşılık mesafe arttıkça çekim kuvveti ani olarak düşmektedir. Benzer şekilde belli bir mesafede akım değişimine karşılık gelen kuvvet eğrisinde doğrusal olmayan karakteristik gösterecektir. Bu durumda bu tip solenoidler aç-kapa tipi valfler için uygun olup oransal valf için uygun değildir.



Şekil 3.12 Tipik bir aç-kapa tipi solenoid karakteristik grafiği

Oransal solenoidlerde, konum ile kuvvet arasında belli bir çalışma aralığında sabit bölge(kuvvet yaklaşık sabit) oluşturarak akım değişimine orantılı mıknatıs kuvveti sağlamak mümkündür.

Standart aç-kapa tipi solenoidin geometrik yapısını değiştirmek suretiyle oransal solenoid elde etmek mümkün olup, literatürde bu konuda çeşitli çalışma ve uygulamalar mevcuttur. Bu çalışmada da bilgisayar destekli Maxwell analiz ve tasarım programı yardımıyla ön tasarımı yapılan solenoidten oransal solenoid tasarımı yapılmıştır.

Standart solenoidlerde (3.22) nolu denklemden görüldüğü gibi mıknatıs kuvveti $F_m = f(i, x)$ akım ve yerdeğiştirmenin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Oransal karakteristiklere sahip sabit-kuvvet tipi oransal solenoidde ise çekim kuvveti hareket

miktarından bağımsız olarak sadece akım değişimine bağlı $F_m = f(i)$ şeklinde ifade edilebilir.

Genellikle solenoidle kontrollü valflerde hareketli eleman (çekirdek) bir yay kuvvetine karşı çalışmakta olup çekim kuvveti ile arasındaki dengeden

$$F_m + F_{yay} = 0 \quad (3.23)$$

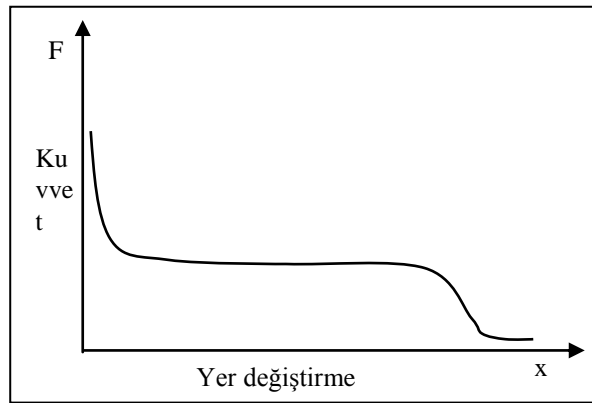
şeklinde veya

$$f(i) - kx = 0 \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan hareket miktarı veya konum;

$$x = \frac{1}{k} f(i) \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir. $f(i)$ fonksiyonu doğrusaldır, akım değiştirilerek konum kontrol edilebilir. Hareketli elemanın (nüve) konumu x ile bobinden geçen i akımı arasında bir oransallık kurulabilir. f fonksiyonun doğrusallığından dolayı, bu tipteki solenoidler oransal solenoid (lineer solenoid) olarak da geçmektedir. Belli bir akım değerine karşılık oransal soenoidin kuvvet-yer değiştirme karakteristiği Şekil 3.13’de verildiği gibidir. Burada kuvvetin sabit kaldığı yer değiştirme aralığı oransal çalışma bölgesi olarak tanımlanır.



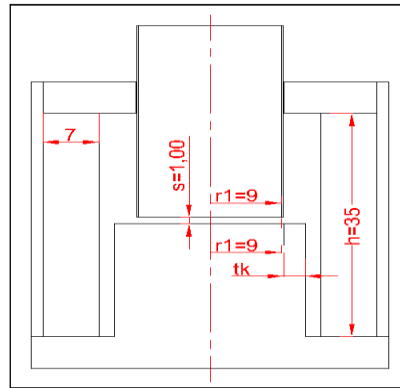
Şekil 3.13 Tipik bir oransal solenoid karakteristik grafiği

Arzu edilen mıknatıs kuvveti karakteristiğini elde edebilmek için, çekirdek (pistoncuk) konumundan bağımsız, çekirdek geometrisi dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir. Bu çeşit bir geometrinin karmaşıklığından dolayı, kapalı form çözümü ile ilgili kurallar elde edilmelidir (Lequesne,1988).

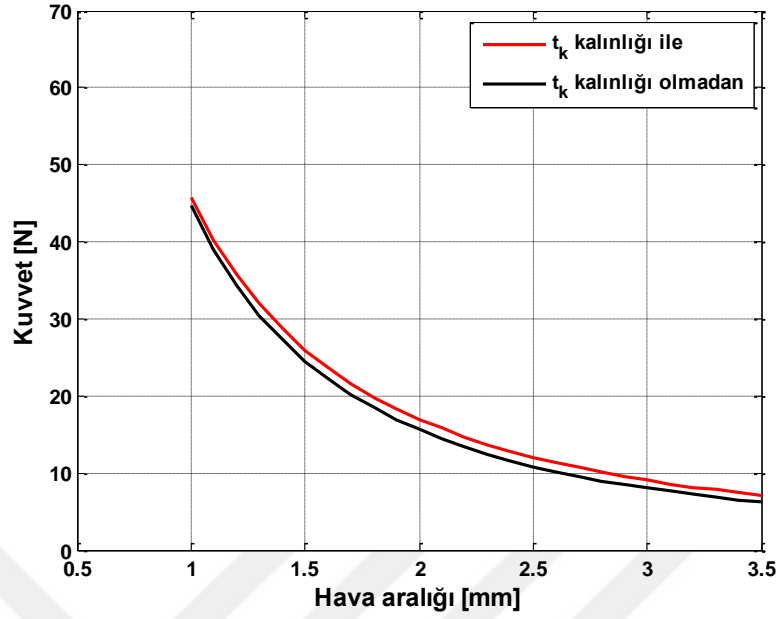
Solenoid akım-kuvvet karakteristiğinin doğrusallaştırılması çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir ve bunlar literatürde belirtilmektedir. Bunlarla ilgili çalışmalar tezin Kaynak Araştırması kısmında yer verilmiştir.

Bu tez kapsamında hareketli kutubun karşısında bulunan sabit kutubun üzerinde bir çıkıntı oluşturularak solenoidin geometrisinde değişiklik yapılmıştır. Bu şekilde düşük hava aralığı mesafesinde mıknatıs akısının bir kısmı demir malzeme üzerinden akması sağlanmış ve aşırı kuvvet artışı önlenmiştir.

Bu işlemin yapılabilmesi için çıkıntı malzeme kısmının genişliği kadar ek malzeme de sabit kutup boyunca uzunlamasına eklenmiştir. Bu durumda da sabit kutup parçasının yarıçapı, çıkıntı genişliği (t_K) kadar artırılmıştır. Bunun sonucunda oluşturulan geometrisi Şekil 3.14’de verilmiştir. Bu yeni şekil değişikliği ile kuvvet karakteristiğinin çok fazla bozulmadığı Şekil 3.15’de yeni şekle(Şekil 3.14) ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilerek gösterilmiştir. Sabit kutubun çapının artırılması ile oluşturulan yeni geometrinin tasarım ölçütlerini ($s=1\text{mm}$ ’de $I=1\text{A}$ akımda $F=42$ Newton kuvvet) sağlayıp sağlamadığı bu noktada tekrar incelenmiştir ve Şekil 3.14’den görüldüğü gibi $F=45,81$ Newton kuvvet sağladığı gözlenmiştir.



Şekil 3.14 Çıkıntı genişliği ile birlikte yeni geometri



Şekil 3.15 t_K kalınlığı eklenmiş ve eklenmemiş durumu karşılaştırması ($I=1$ A)

t_K kalınlığının büyüklüğünü hesaplamak için solenoid kabuk kısmından geçen manyetik akının geçtiği alan hesaplanmış ve sanki tüm manyetik akı sadece bu t_K çıkıntı kalınlığından geçecekmiş gibi bu alana eşitlenmiştir. Burada solenoid hareketli kutubu, sabit kutup ve solenoid kabuk kısmının aynı malzemedan yapıldığı varsayılarak alan katsayısı 1 seçilmiştir.

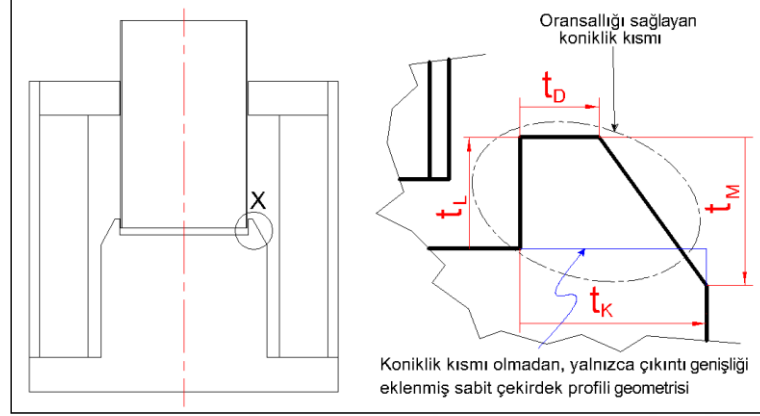
$$\pi(22,4)^2 - \pi(20,8)^2 = 1x(\pi(9 + t_k)^2 - \pi(9)^2) \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'dan $t_K = 3,25mm$ hesaplanmış ve imalat kolaylığı açısından sabit kutup kısmının yarıçapı 12mm olacak şekilde seçilmesi uygun görülmüştür.

3.2.4. Solenoid Koniklik Kısmı Geometrisinin Optimizasyonu

Solenoid akım-kuvvet karakteristiğinin doğrusallaştırılmasında yani solenoidin oransallaştırılması için farklı yöntemler olmakla birlikte tez kapsamında solenoid sabit kutbuna koniklik kısmı ilave edilmesi suretiyle farklı durumlar için kuvvet karakteristikleri incelenmiştir. Başlıca değişken parametreler t_K sabit çekirdeğin yarıçapına eklenen koniklik kısmı genişliği, t_L koniklik kısmı uzunluğu, t_D koniklik kısmı uç kısmının genişliği, t_M koniklik yüksekliği parametreleri kabul edilmiştir. Bu

geometrik parametreler Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Tez kapsamında bu parametrelerin değişimi ile kuvvet karakteristiklerine etkileri incelenmiştir.



Şekil 3.16 Ek çıkıntı kısmı genişliği ve uzunluğu

t_L Uzunluğunun İncelenmesi

t_L 'deki değişim Çizelge 3.7'deki değerler arasında değiştirilerek analiz edilmiş ve sonuçları Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 t_L uzunluğunun incelenmesi için parametreler

	g (hava aralığı)	t_L parametresi	t_D parametresi	t_M parametresi
1-	$g = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5mm$	$t_L = 0 - 5mm$ arasında 1mm adımlarla	$t_D = t_K$	$t_M = 0,0mm$

t_D Uzunluğunun İncelenmesi

t_D 'deki değişim aşağıda verilen Çizelge 3.8'deki değerler arasında değiştirilerek incelenmiş, analizleri yapılmış ve ilgili grafikleri Şekil 4.7'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.8 t_D uzunluğunun incelenmesi için parametreler

	g (hava aralığı)	t_L parametresi	t_D parametresi	t_M parametresi
2-	$g = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5mm$	$t_L = 1,0mm$	$t_D = 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 2,7mm$	$t_M = t_L mm$
3-	$g = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5mm$	$t_L = 2,5mm$	$t_D = 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 2,7mm$	
4-	$g = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5mm$	$t_L = 5,0mm$	$t_D = 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 2,7mm$	

t_M Uzunluğunun İncelenmesi

t_M 'deki değişim Çizelge 3.9'de verilen değerler arasında değiştirilerek incelenmiş ve ilgili grafikler Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 t_M Uzunluğunun incelenmesi için parametreler

	g (hava aralığı)	t_L parametresi	t_D parametresi	t_M parametresi
5-	$g = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ $3,0; 3,5mm$	$t_L = 2,5mm$	$t_D = 0,5mm$	$t_M = 0 - 5mm$ için 0,1mm adımlarla
6-	$g = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ $3,0; 3,5mm$		$t_D = 2,5mm$	

t_L, t_D, t_M Uzunluklarının Optimizasyonu

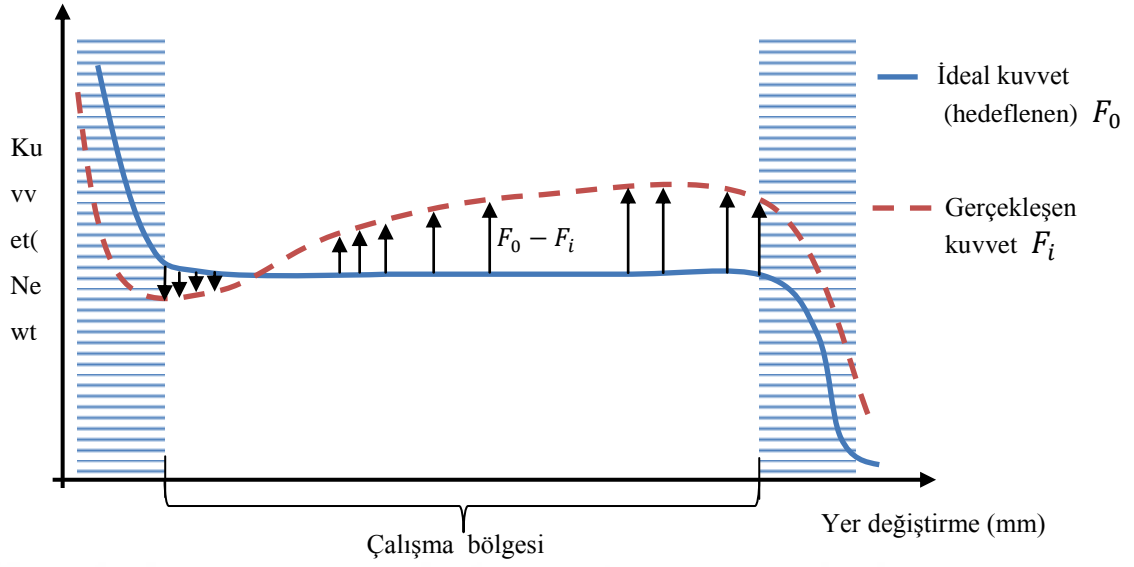
Çalışma bölgesinde belli bir akım altında, yerdeğiştirmeden bağımsız sabit bir çekim kuvveti elde etmek için, Şekil 3.16'da gösterilen kontrol konisi şekli optimize edilmiştir. Optimizasyonda t_L uzunluğu, t_D uzunluğu, t_M uzunluğu tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir. Bu uzunluk parametrelerinin farklı kombinasyonları için kuvvet karakteristikleri incelenmiştir.

t_L uzunluğu en az 1mm'den uzun olmalıdır çünkü; hava aralığı olarak kalıcı mıknatıslanma durumunu engellemek için en az $s=1mm$ seçilmiştir ve t_L uzunluğu da hava aralığından büyük seçilmelidir.

Amaç fonksiyonu;

$$F_{amaç} = \sum_{i=1}^N (F_0 - F_i)^2 \quad (3.27)$$

olarak tanımlanmıştır. (3.27) nolu denklemde N hesaplanacak kuvvet karakteristiği sayısıdır, F_0 amaçlanan kuvvet büyüklüğüdür, F_i hareketli kutubun farklı x konumlarındaki hesaplanan manyetik kuvvet değerleridir.

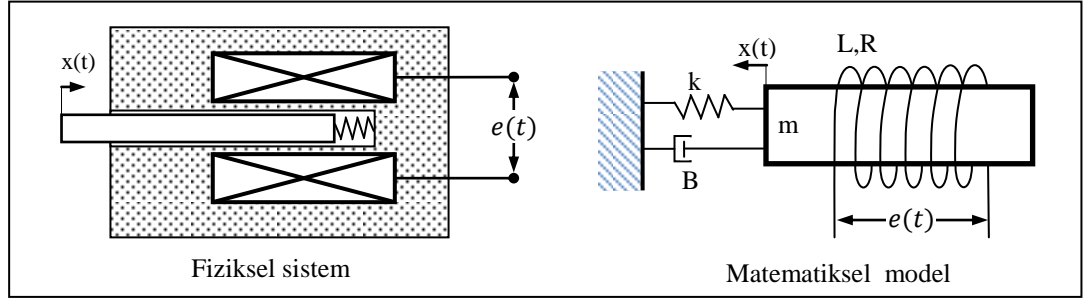


Şekil 3.17 Amaç fonksiyonuna ait temsili grafik

Şekil 3.17’de gösterilen grafikteki ideal kuvvet karakteristiğini elde edebilmek için farklı t_L , t_D , t_M parametreleri için farklı $F_{amaç}$ fonksiyonu büyüklükleri hesaplanmış ve bunlar minimize edilmeye çalışılmıştır.

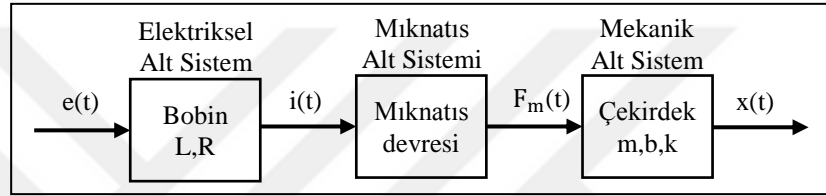
3.2.5. Solenoid Dinamik Modeli

Tasarımı yapılarak Maxwell yazılım programı ile statik analizi ve karakteristikleri elde edilen oransal solenoidin dinamik analizi de yapılmıştır. Dinamik analize konu olan solenoid sistemin fiziksel yapısı, matematik şeması ilgili parametreler ile birlikte Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Bobinin uçlarına bir $e(t)$ gerilimi uygulanarak oluşan indüktans ve R direncine bağlı olarak $i(t)$ akımı oluşur. Mıknatıs devresinde ise akım değişimi sonucu oluşan mıknatıs alanı hareketli kutup üzerinde bir mıknatıs çekim kuvveti oluşturur. Bu çekim kuvveti de mekanik sistemin hareketine neden olur. Bobin uçlarına uygulanan gerilim kesilince mekanik kısımda bulunan yay elemanı geri çağırma kuvveti ile hareketli elemanı başlangıç konumuna geri getirir.



Şekil 3.18 Solenoid (elektromekaniksel) sistemin dinamik modeli

Solenoid (elektromekaniksel eyleyici) sisteminin genel yapısı ise Şekil 3.19'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Solenoid valfin genel yapısı

Elektromekanik bir eyleyici olan solenoid sistemi, Şekil 3.19'da gösterildiği gibi, elektrik alt sistemi, mıknatıs alt sistemi ve mekanik alt sistemi olmak üzere üç alt sistemden oluşur. Sistemin dinamik davranış modeli bu alt sistemin fiziksel ve matematiksel özelliklerine göre kurulur. Burada elektrik sistemi R direnci ve L indüktansı elemanlarından oluşmuş bir bobindir. Bu sistemde gerilim giriş değişimine karşılık devrede bir $i(t)$ elektrik akımı değişimi ve bunun sonucunda bir mıknatıs alanı oluşur. Mıknatıs devresinde oluşan mıknatıs akısı değişimine karşılık, mıknatıs devresinin sabit kutbu ile hareketli kutbu arasında bir mıknatıs çekim kuvveti oluşur. Bu çekim kuvveti de kütlesi m , yaylılığı k ve sürtünme katsayısı b olan mekanik sistemi $x(t)$ mekanik harekete zorlar.

Matematik modele esas teşkil eden dinamik davranış denklemleri, her bir alt sistem için aşağıda olduğu gibi çıkarılmıştır.

Elektriksel alt sistem

Solenoid valfin elektriksel kısmın esasını teşkil eden bobin ideal olarak seri bağlı bir direnç ve bir indüktans elemanından ibaret ele alınabilir. Bobine uygulanan elektrik

gerilimine karşılık oluşan akım değişimi sonucu devrede bir mıknatıs akısı değişimi meydana gelir.

Sisteme uygulanan elektriksel gerilime karşılık R direnç ve L indüktans elemanı üzerinde bir gerilim düşümü meydana gelir ve bu durum kısaca;

$$e(t) = e_R(t) + e_L(t) \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilir. Burada indüktans üzerinde meydana gelen $e_L(t)$ gerilim farkı zıt elektro-motor kuvvet adını alır ve oluşan mıknatıs akı bağı $\lambda(t)$ cinsinden $e_L(t) = \frac{d\lambda}{dt}$ eşittir. Mıknatıs akı bağı λ ise indüktans değişimi veya mıknatıs akısı değişimine bağlı olarak iki şekilde ifade edilir.

$\lambda = Li$ şeklinde ifade edildiğinde (3.28) nolu denklemin açılımı aşağıdaki şekilde (3.29) nolu denklemde verildiği şekilde ifade edilir.

$$e = Ri + \frac{d}{dt}(Li) = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3.29)$$

Burada $\frac{dL}{dx}$ indüktansın harekete bağlı değişimini temsil eder.

$\lambda = N\phi$ şeklinde N sarımlı bobinde oluşan mıknatıs akısına göre ifade edildiğinde, denklem (3.28)'nin elektriksel açılımı aşağıda denklem (3.30)'da verildiği şekilde olur:

$$e = Ri + N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.30)$$

Burada manyetik akı $\phi(i, x)$ şeklinde akım ve yerdeğiştirmenin bir fonksiyonudur.

Bu iki denklemin (Denklem (3.29) ve Denklem (3.30)) açık bir analitik çözümü mevcut değildir. Bu denklemlerin sayısal çözümleri ise ya indüktans yöntemine göre ya da mıknatıs akısı değişimi yöntemine göre yapılır.

Mıknatıs alt sistemi

Mıknatıs alt sistemi bakır tel sargısından ibaret bir bobin ile bu bobinin içine yerleştirildiği, elektromıknatıs malzemedan sabit kutup ile yine elektromıknatıs malzemedan oluşan hareketli bir kutuptan oluşur.

Bu alt sistemde oluşan mıknatıs enerjisi değişiminin sonucunda bir mıknatıs çekim kuvveti oluşur. Mıknatıs çekim kuvveti ise indüktans değişimine bağlı olarak, dolaylı yoldan

$$F_m = \frac{\mu_0 A (Ni)^2}{2(x_t - x(t))^2} \quad (3.31)$$

şeklinde ifade edilir ve indüktans yönteminde kuvvetin hesaplanmasında bu denklem kullanılır. Mıknatıs akısı değişimine bağlı olarak ise çekim kuvveti,

$$F_m = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (3.32)$$

veya

$$F_m = \frac{\phi^2}{2A\mu_0} \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilir ve mıknatıs akısı yönteminde bu denklem kullanılır.

Mekanik alt sistem

Mıknatıs alt sisteminde oluşan mıknatıs çekim kuvveti $f_m(t)$, kütlesi m , yaylılığı k ve sürtünme katsayısı b olan mekanik alt sistemi hareket ettirir. Newton'un II. Hareket Yasası'ndan mekanik alt sistemin hareket denklemi,

$$f_m(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) \quad (3.34)$$

şeklinde ifade edilir.

Dinamik davranış denklemlerinin çözümü

Solenoid sistemin her bir alt sistemleri için çıkarılan ve sistemin tümünü tanımlayan denklemler doğrusal olmadığından (özellikle elektrik ve mıknatıs alt sisteme ait denklemler açısından) bunların açık bir analitik çözümü yoktur. Bu durumda bilgisayar destekli sayısal çözüm uygulanır ve bu tez çalışmasında da dinamik sistemlerin benzetiminde en yaygın olarak kullanılan MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır.

Dinamik davranış denklemlerinin çözümüne esas olan Simulink modeli ise iki yöntem (Topçu ve ark., 2008) kullanılarak iki farklı şekilde kurulabilmektedir.

Birinci yöntemde üç alt sisteme ait üç adet temel denklem yanında mıknatıs devresine ait relüktans ve geçirgenlik (perminans) denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklem ise mıknatıs devresinin geometrisine bağlı karmaşık cebirsel ifadeler olup tam olarak çıkarılması çok zordur. Ayrıca Simulink modelinde yer alan cebirsel ifadeler çözüm süresini uzatmakta ve çoğunlukla da çözülmez hale getirmektedir.

Diğer bir yöntem ise elektrik akımı ve yer değiştirmeye bağlı relüktans ve mıknatıs akısı değerlerine ait tablolar kullanmaktır. Deneysel ve statik analiz veya hesaplamalar yoluyla hazırlanan bu tablolar Simulink modelinde Look-up Table fonksiyonu olarak kullanılabilir. Bu şekilde çözümler daha hızlı ve benzetim sonuçları da gerçek sonuçlara daha yakın çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında dinamik davranış denklemlerinin Simulink ortamındaki çözümünde Look-up Table yöntemi kullanılmıştır. Look-up Table'da yer alan veriler ise mıknatıs devresinin Maxwell sonlu elemanlar programı ile çözümünden elde edilmiştir.

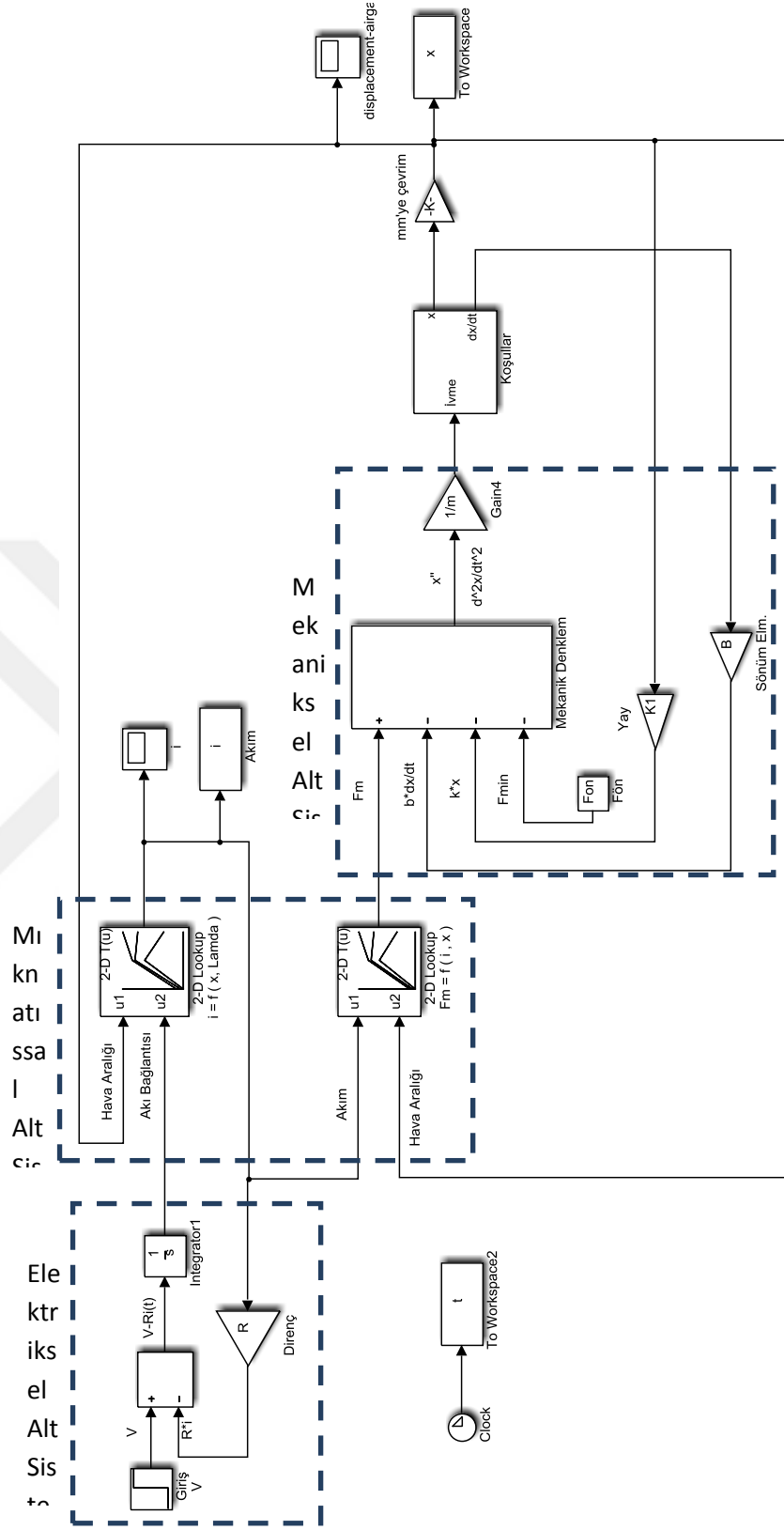
Maxwell programından; akım-hava aralığı değerlerine karşılık kuvvet ve manyetik akı bağı, λ değerlerini veren matrisler oluşturulmuştur.

Akım-hava aralığına karşılık kuvvet $F_m = f(i, x)$ bağıntısı ile yorumlanabilen bu değerler Şekil 3.20'de Look-up Table 2 adlı blokta tanımlanmıştır. Diğer taraftan akım-hava aralığına karşılık manyetik akı bağı, λ 'ı veren değerlerden, farklı hava aralığında akı bağıntısına karşılık akımı veren bir MATLAB programı (bakınız EK 14)

hazırlanmıştır. Manyetik akı bağı-hava aralığına karşılık akım, $i = f(x, \lambda)$ bağıntısı ile verilen değerler Şekil 3.20’de Look-up Table 1 adlı blokta tanımlanmıştır.

Şekil 3.20’den görülen dinamik modelin elektriksel alt sistemi Denklem (3.30)’da verilen ifade kullanılarak hazırlanmıştır. Mekanik alt sistem ise Denklem (3.34) ile verilen ifade kullanılarak oluşturulmuştur. Oransal solenoidlerde bir hareketli eleman ve bir sabit kutup bulunur. Çalışma esnasında bobine akım sürüldüğünde hareketli eleman; harekete başlama ($F_m < F_{ön}, x = 0$), hareket anı ($F_m > F_{ön}, 0 < x < x_{max}$) ve hareketin sonlanması ($x \geq x_{max}$) olmak üzere hava aralığındaki hareketini 3 aşamada tamamlar. Bu aşamalar, dinamik modelin Koşullar alt sisteminde tanımlanmıştır.

Bu modelde direnci $R=5\Omega$ olarak hesaplanan solenoide giriş potansiyel farkı olarak $e=8\text{Volt}$ uygulanmıştır. Hareketli elemanın 3 mm hareket ettiği varsayılmıştır. Ön gergi kuvveti, yay katsayısı, ve viskoz sürtünme katsayısı ihmal edilmiştir.



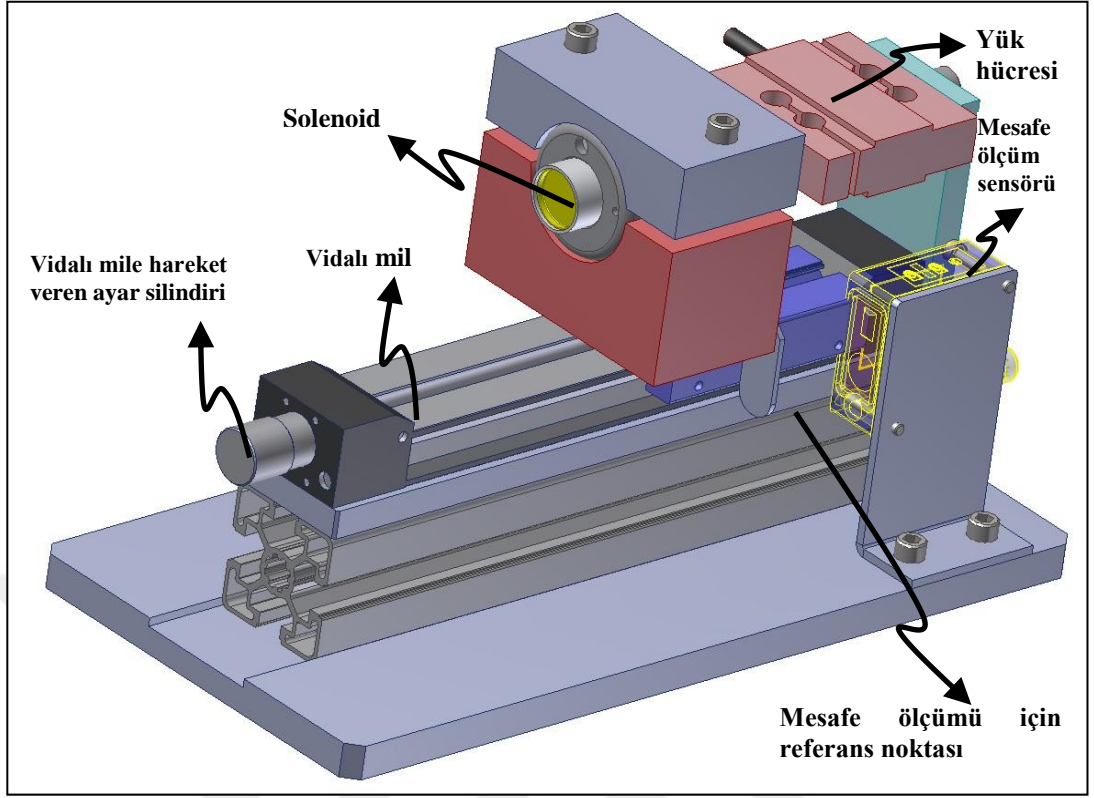
Şekil 3.20 Solenoid Simulink Modeli

3.2.6. Deney Düzeneği

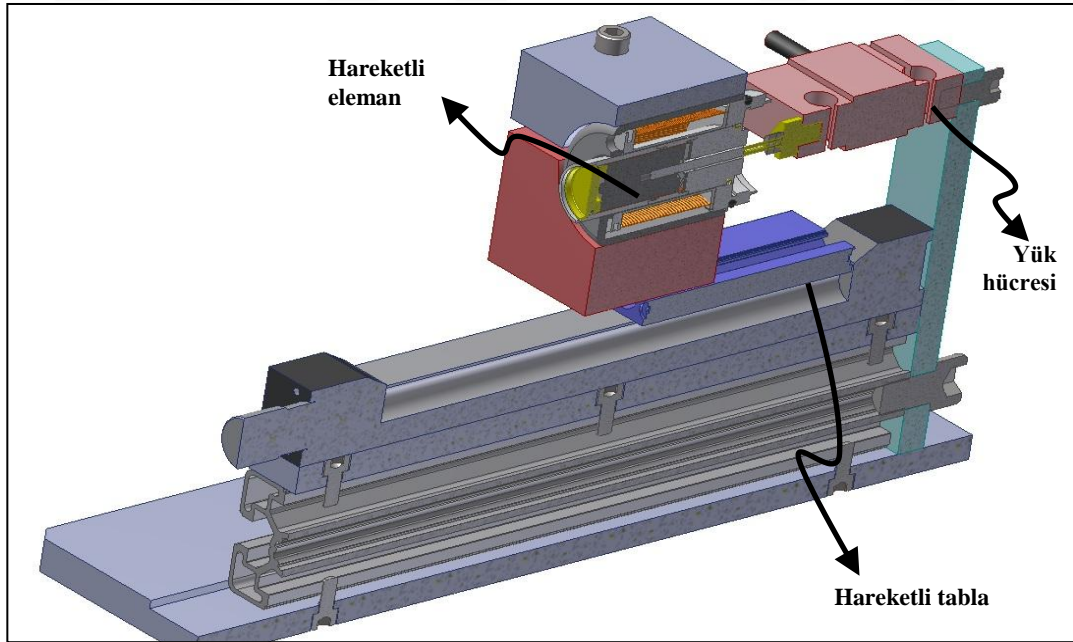
Prototip imalatı yapılan oransal solenoidin statik ve dinamik karakteristiklerini ölçmek için bir deney düzeneği tasarlanmış, imalatı yapılmış ve testler bu deney düzeneğinde yürütülmüştür. Deney düzeneğinin genel görünümü ve kesiti Şekil 3.21’de verilmiştir.

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi deney düzeneği, ölçümü yapılacak solenoidin bağlanacağı bir aparat, aparatı hareket ettiren bir vidalı mil sistemi, kuvvet ölçümünün yapıldığı bir yük hücresi (Puls Elektronik STA Serisi Yük Hücresi-50kg) ve mesafe ölçümünde kullanılan lazer konum algılayıcı (Panasonic Laser Sensor HL-G105-A-C5) ile bu parçaların sabitlendiğı bir platformdan oluşmaktadır. Ayrıca yük hücresi ve lazer konum algılayıcısı için elektriksel besleme, sinyal işleme ve gösterge elemanları da mevcuttur. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ise Şekil 3.22’de verilmiştir. Deneylede kullanılan solenoidi sürmek için, Şekil 3.23’de görülen akım sürücü devresi tasarlanmış ve testlerde kullanılmıştır. Testler, U.Ü. Makine Mühendisliğı, Otomatik Kontrol Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiş olup testlerde elde edilen veriler bir PC’ye bağlı veri toplama kartında toplanmış ve değerlendirilmiştir (veri toplama kartı NI National Instruments PCI-6221, deneyde kullanılan bilgisayar Intel (R) Core(TM) i5-3570 CPU 3,40GHz(4 işlemcili), 4,00 GB Ram).

Deneylelerin yürütüldüğü veri toplama ve deney düzeneği şematik olarak Şekil 3.22’de verilmiştir.

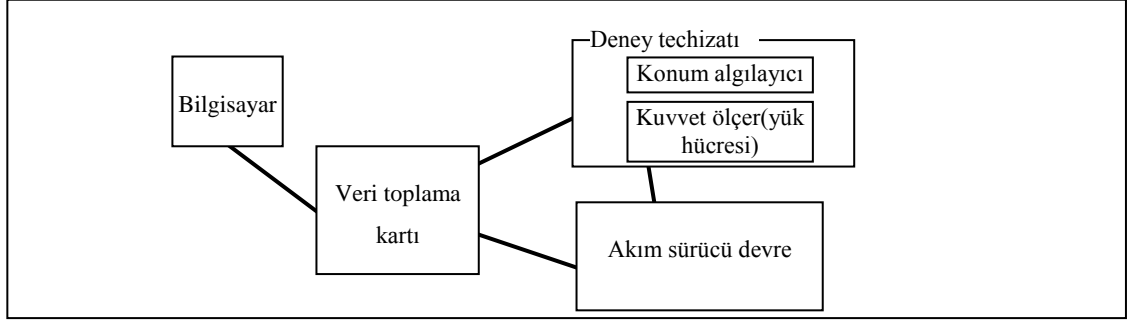


(a) Genel görünüm

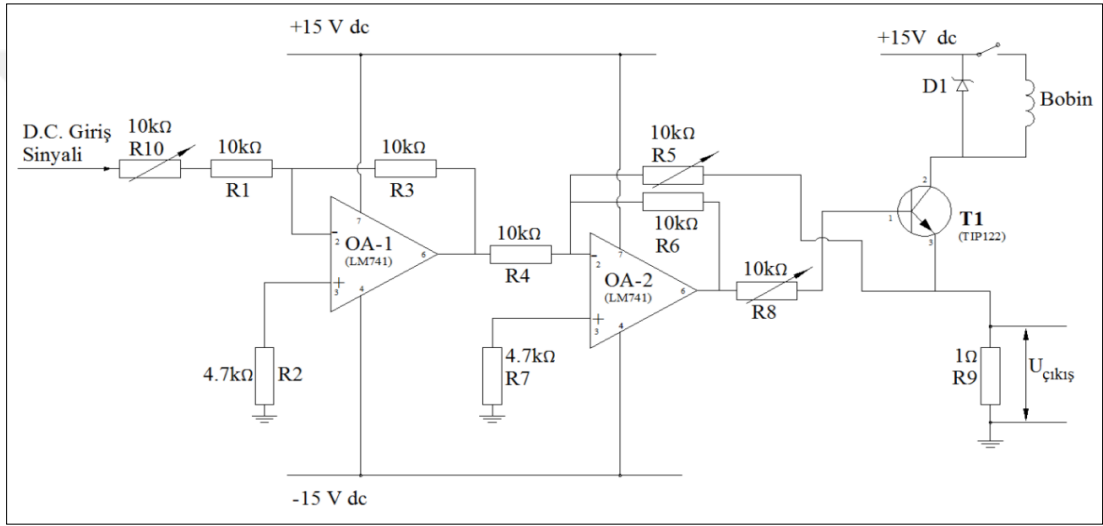


(b) Kesit görünüm

Şekil 3.21 Deney düzeneği



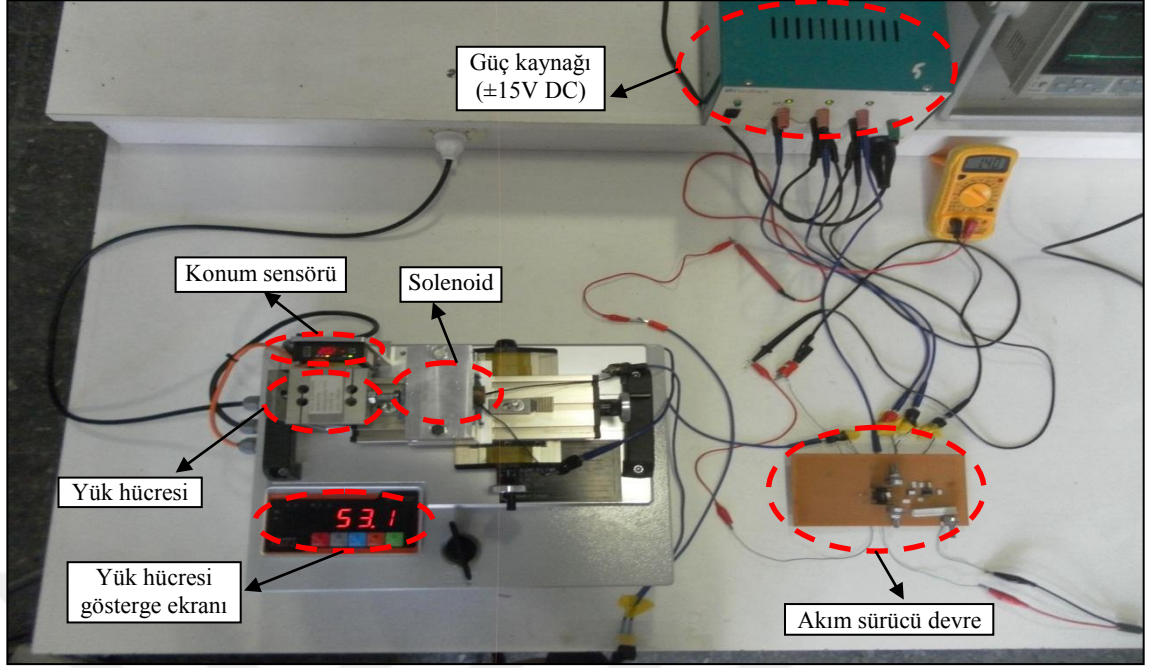
Şekil 3.22 Deney düzeneği şeması



Şekil 3.23 Akım sürücü devre şeması

Bu deney düzeneğini kullanarak oransal solenoidin statik karakteristiklerini elde etmek için 0.1-1.6 Amper aralığında farklı akım değerleri ile sürülen bobinin hareketli eleman ile sabit kutup arasındaki mesafesi 1-5mm aralığında değiştirilerek kuvvet değerleri ölçülmüştür.

Oransal solenoidin dinamik karakteristiklerini elde etmek için deney düzeneğinde bulunan lazer konum algılayıcısı kullanılarak hareketli elemanın sabit kutba olan mesafesi 4mm'ye getirilmiştir. 1mm tutma aralığı olduğundan 3mm'lik bir hareket mesafesi ayarlanmıştır. Sabit akım değerleri ile sürülen bobinin zamana göre değişen akım ve konum eğrileri, kullanılan PC ve veri toplama kartı yolu ile elde edilmiştir.



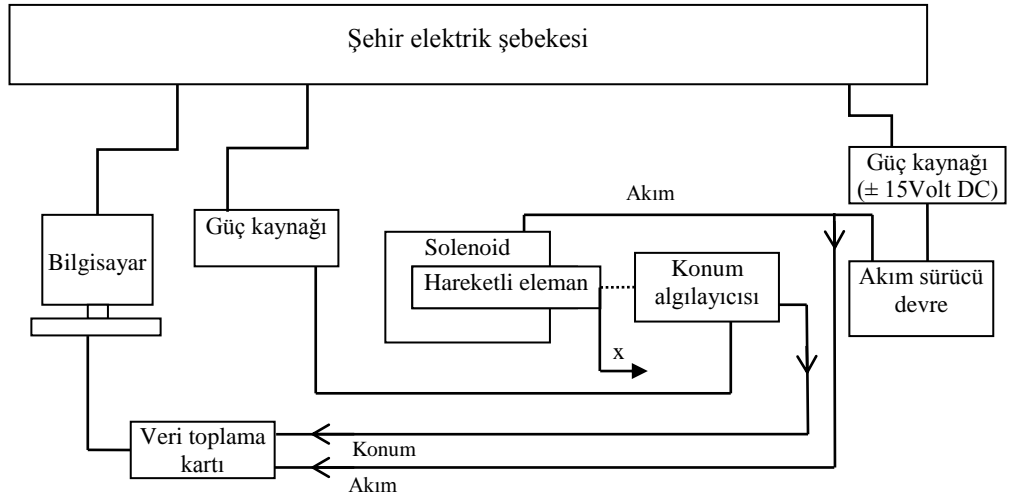
Şekil 3.25 Deney düzeneği (Statik)

3.2.8. Dinamik Deneyler

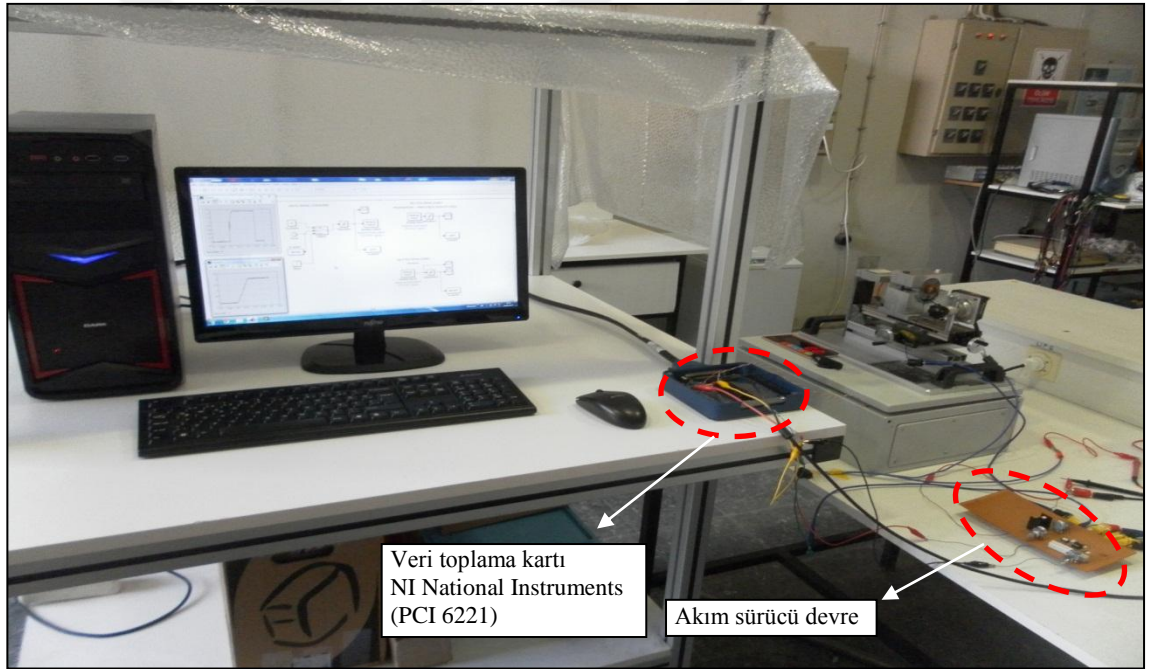
Dinamik deneyler, deney düzeneğinde bazı değişiklikler yapılarak yerine getirilmiştir. Öncelikle vidalı mil mekanizması, yük hücresi hareketli kutba değmeyecek şekilde en son konumuna getirilmiştir. Dinamik deneyler hareketli kutbun zamana bağlı değişiminin ölçümü esas alındığından konum algılayıcısı hareketli kutbun tam karşısına monte edilmiştir. Konum algılayıcısının analog çıkışları veri toplama kartına bağlanmıştır.

Dinamik deneylerde ayrıca akım değişimi de ölçülmüştür. Bunun için Şekil 3.23 Akım sürücü devre şemasında R9 olarak gösterilen direnç elemanı üzerinden geçen potansiyel fark veri toplama kartının analog girişine bağlanarak ölçülmüştür (R9 nolu direnç 1ohm olduğu için okunan potansiyel fark $V=Ri$ formülüne göre i akımına eşittir).

Deney düzeneğinin dinamik deneylere göre düzenlenmiş şeması Şekil 3.26'da verilmiştir. Dinamik deney takımının fotoğrafı da Şekil 3.27'de verilmiştir.

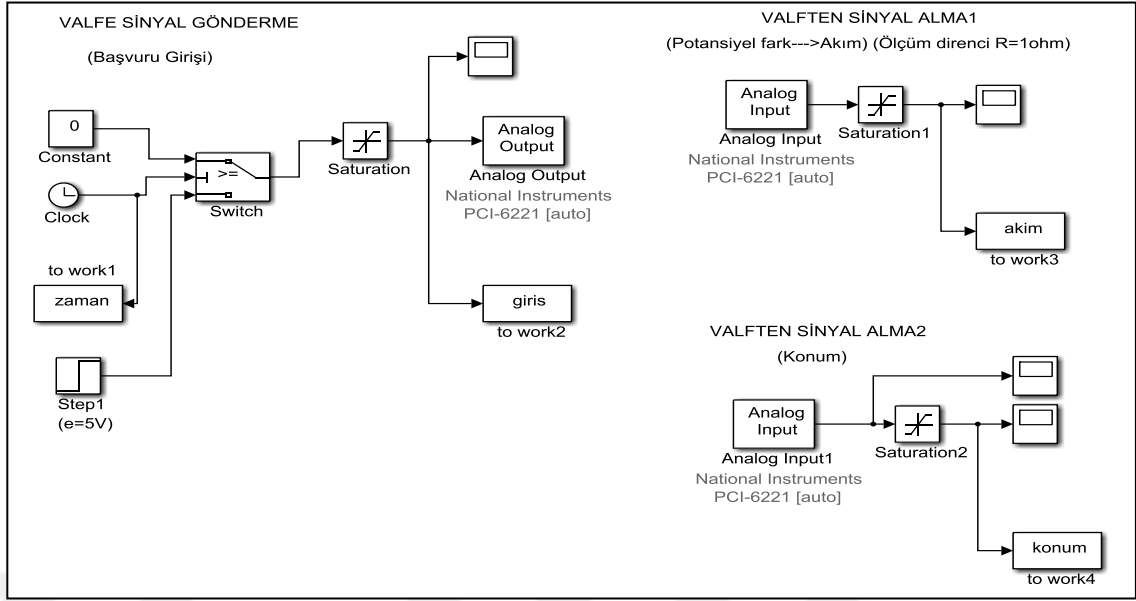


Şekil 3.26 Dinamik deney düzeneği şematik genel görünümü



Şekil 3.27 Deney düzeneği (Dinamik)

Dinamik testlerde; bobinin sürülmesi için veri toplama kartının analog çıkışından 5V seviyesinde bir sinyal gönderilmiştir. Bu giriş sinyaline karşılık sistemden akım ve konum verilerinin depolanması amacıyla Şekil 3.28’de görülen Simulink modeli tasarlanmıştır ve kullanılmıştır.



Şekil 3.28 Dinamik ölçüm ve veri toplama Simulink modeli

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, ön tasarımı yapılan aç-kapa tipi solenoidin karakteristikleri elde edilmiştir. Oransal solenoid tasarımına esas teşkil eden bu tasarım, geometrik boyutların (t_L, t_M ve t_D) parametrik olarak tanımlanan bir tasarım ile Maxwell programı kullanılarak irdelenmiş ve en uygun kombinasyonuna göre oransal solenoid tasarımı elde edilmiştir. Tasarımı yapılan bu oransal solenoidin statik karakteristiği Maxwell programı, dinamik karakteristiği ise MATLAB/Simulink programı kullanılarak teorik sonuçlar elde edilmiştir.

Tez kapsamında tasarımı ve imalatı yapılan deney düzeneğinde statik ve dinamik testler yürütülerek deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra bu teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulup yorumlanmıştır.

4.1. Teorik Sonuçlar

4.1.1. Aç-Kapa Tipi Solenoidin Statik Karakteristikleri

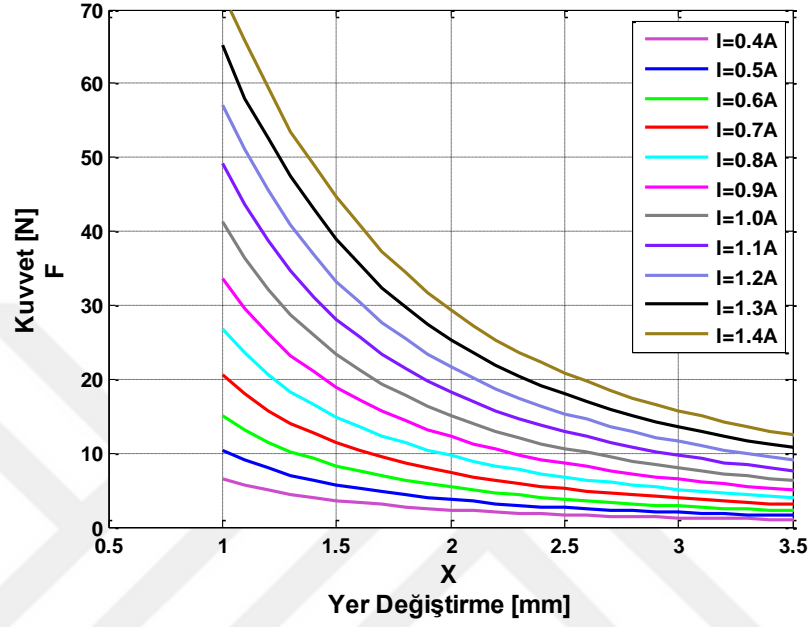
Bu çalışmada kullanılan Maxwell, manyetik analiz sonlu elemanlar programındaki model kullanılarak kuvvet yerdeğiştirme karakteristikleri elde edilmiştir.

Aç-kapa tipi solenoidin statik karakteristiği olarak tanımlanan hava aralığı-mıknatıs kuvveti eğrileri farklı akım değerlerine karşılık Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.2’de sabit hava aralığına karşılık akım-kuvvet eğrisi sunulmuştur.

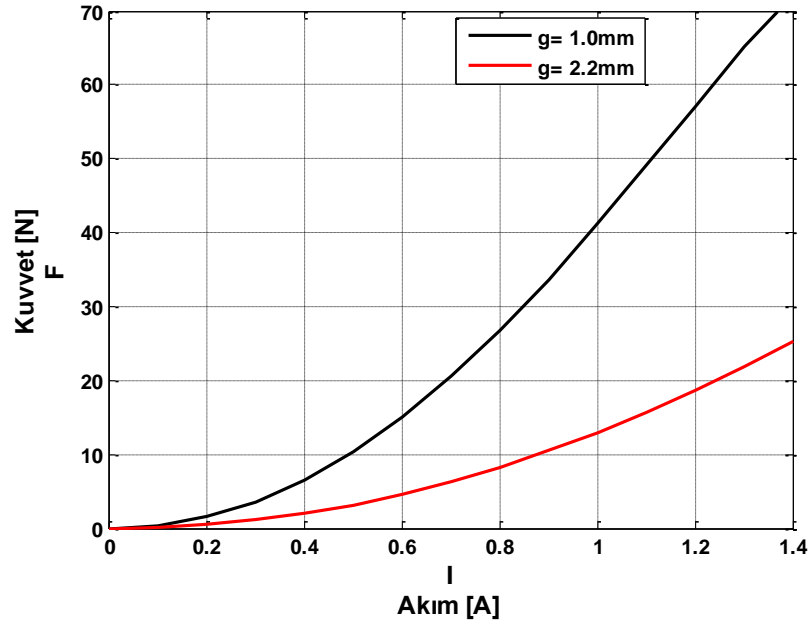
Şekil 4.1’de verilen grafikten 1 Amper akım değerine karşılık gelen hava aralığı-kuvvet eğrisi incelendiğinde 1mm hava aralığına karşılık yaklaşık 40 N kuvvet elde edilirken 3.0mm hava aralığına karşılık 8 N gibi oldukça düşük bir mıknatıs kuvveti elde edilebilmektedir. Şekil 4.1’den görüldüğü gibi farklı akım değerlerine karşılık kuvvet karakteristiği benzer bir eğilim sergilemektedir.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi 1 Amper akıma karşılık $x=1.0$ mm hava aralığında yaklaşık 40 N kuvvet elde edilirken $x=2.2$ mm hava aralığına karşılık yaklaşık 12N kuvvet elde edilmiştir.

Aç-kapa tipi solenoidlerin hava aralığı – kuvvet karakteristiği Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den görüldüğü gibi, düşük hava aralığında çok yüksek kuvvet elde edilebilirken, hava aralığının artmasına bağlı olarak mıknatıs kuvveti hızla düşmektedir. Ayrıca bu değişim doğrusal olmayan bir karakteristik sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.1 Aç-kapa tipi solenoid statik kuvvet karakteristikleri



Şekil 4.2 Aç-kapa tipi solenoid $g=1,00$ ve 2.2 mm için akım – kuvvet grafiği

4.1.2. Farklı Uzunluk Parametrelerinin Kuvvet Karakteristiklerine Etkileri

Aç-kapa solenoidden ornsal solenoid tasarımına geçilirken; sabit kutup ile hareketli kutup arasındaki akı yolunu etkileyen geometrik boyutların değişimi yolu izlenmiştir. Bu geometrik boyutların (Şekil 3.16) mıknatıs kuvvetine etkisi, her bir parametre için ayrı ayrı yapılmıştır. Analiz esnasında bu geometrik boyutların hangi sınırlar arasında alındığı Çizelge 3.7, Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da verilmiştir.

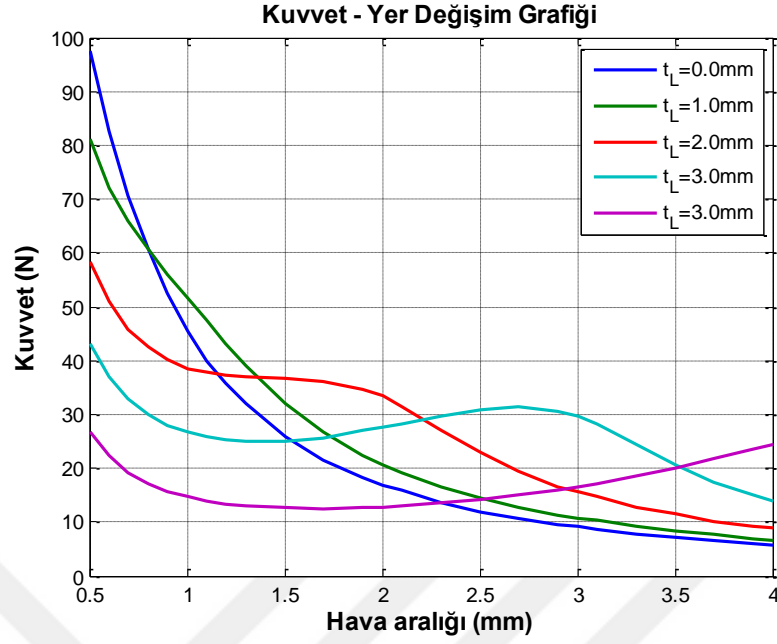
Koniklik Uzunluğu, t_L Parametresine Göre Kuvvet Değişimi

Çizelge 3.7’de verilen farklı t_L uzunluk değerlerinin kuvvet karakteristiklerine olan etkileri, Maxwell programında parametrik olarak tanımlanmış ve belli bir aralıktaki değerleri için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda t_L parametresinin solenoid mıknatıs kuvvet karakteristiğine olan etkisi, Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Buna göre, t_L uzunluğunun artmasıyla, düşük hava aralığındaki (1mm-1,5mm) kuvvet değerlerini düşürdüğü ve hava aralığı sonuna doğru (2,5mm-3,00mm) mıknatıs kuvveti değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.3 incelendiğinde, $t_L = 0,0mm$ koniklik uzunluğunun olmadığını ifade eder ki bu aç-kapa tipi solenoid olarak kabul edilir. Dolayısıyla $t_L = 0,0mm$ durumunda aç-kapa tipi soenoid kuvvet karakteristiği sergiler.

t_L uzunluğunun artmasıyla düşük hava aralığındaki mıknatıs kuvvetlerinin düşmesi ve hava aralığı sonunda mıknatıs kuvveti değerlerinin artmasının bir sonucu olarak hava aralığının belli bir bölgesinde kuvvet değerinin sabit kaldığı görülmektedir.

t_L ’nin 3mm’den daha büyük değerleri için hareketli elemanın başlangıç konumundaki (hava aralığının en düşük değerinde) mıknatıs kuvveti çok düşük değerlere düşmektedir. Ve hava aralığı sonundaki mıknatıs kuvveti ise izafî olarak daha büyük kuvvet değeri sağlamaktadır.

Şekil 4.3’e göre t_L koniklik uzunluğunun ne çok düşük, ne de çok yüksek seçilmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır. t_L ’nin çok düşük ve yüksek değerlerinde sabit kuvvet eğrisinin bozulduğu görülmüştür.



Şekil 4.3 Farklı t_L 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi

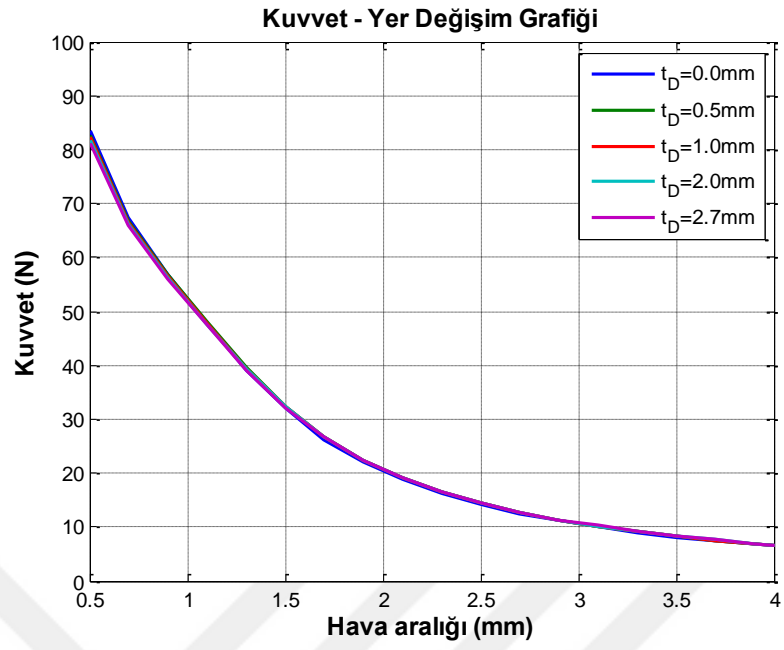
Koniklik Uç Genişliği, t_D Parametresine Göre Kuvvet Değişimi

t_D uç genişliği parametresinin kuvvet karakteristiğine etkisi, t_L 'nin 3 farklı değerine karşılık yapılmıştır. Bu analizler esnasında t_L değeri 1.0, 2.5 ve 5.0 mm alınmıştır.

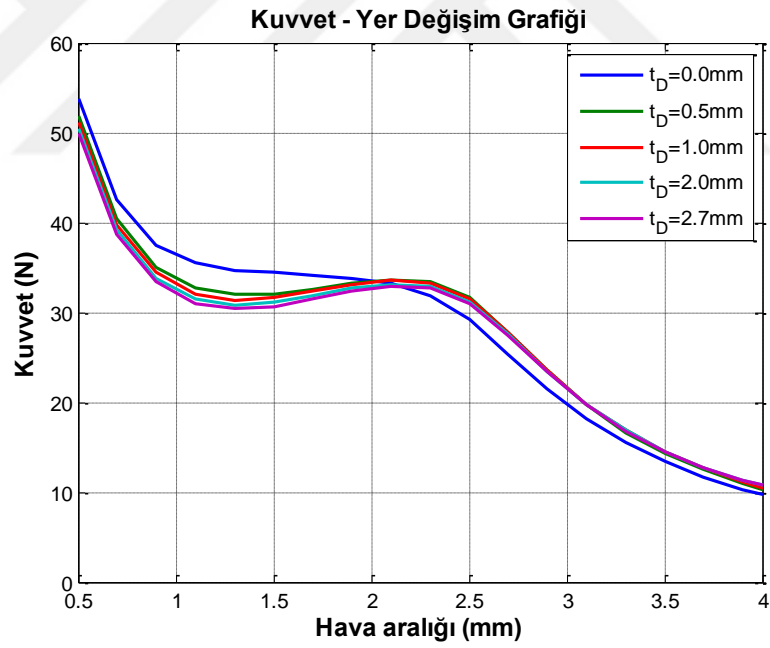
$t_L = 1,0mm$ iken t_D parametre değişiminin statik kuvvet karakteristiğine etkisi Şekil 4.4'de gösterilmiştir, şekilden görüldüğü gibi t_D değişiminin kuvvet karakteristiğine etki etmediği görülmüştür.

$t_L = 2,5mm$ iken t_D parametre değişiminin statik kuvvet karakteristiğine etkisi Şekil 4.5'de gösterilmiştir, şekilden görüldüğü gibi t_D artışı, düşük hava aralığındaki mıknatıs kuvveti değerleri düşerken hava aralığı sonuna doğru (2.5-3.0 mm) mıknatıs kuvveti değerleri düşük de olsa bir artış göstermiştir.

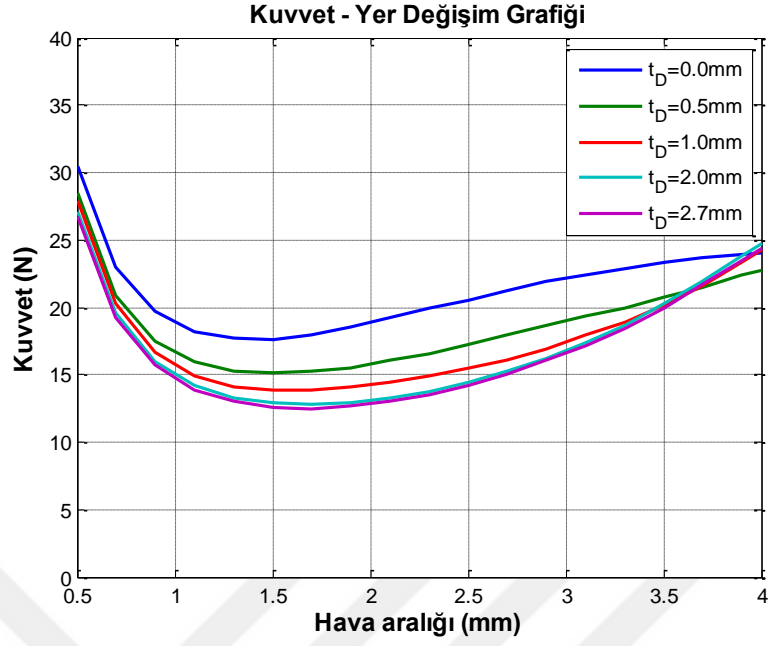
$t_L = 5,0mm$ iken t_D parametre değişiminin statik kuvvet karakteristiğine etkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir, şekilden görüldüğü gibi t_D artışı, mıknatıs kuvvet değerlerinde düşüşe sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4 Farklı t_D 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($t_L=1.0\text{mm}$)



Şekil 4.5 Farklı t_D 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($t_L=2.5\text{mm}$)

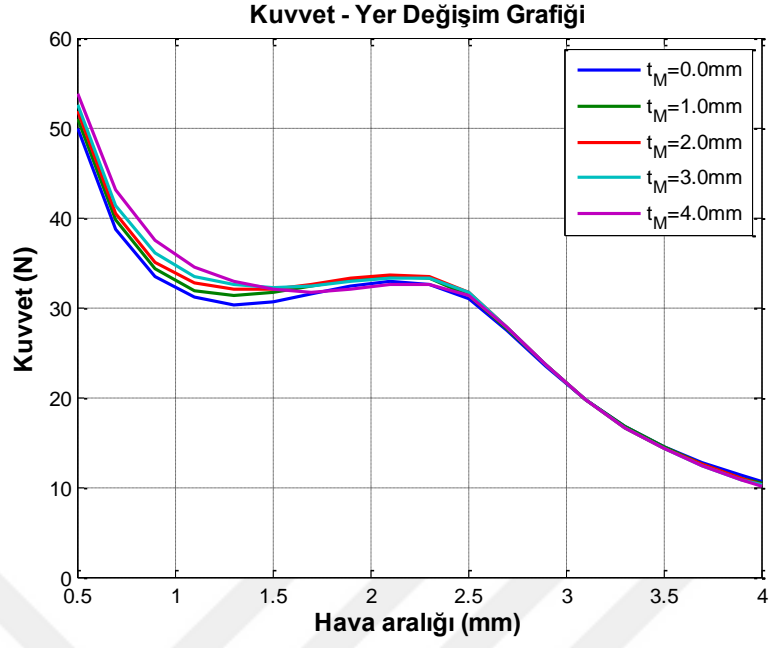


Şekil 4.6 Farklı t_D 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($t_L=5.0\text{mm}$)

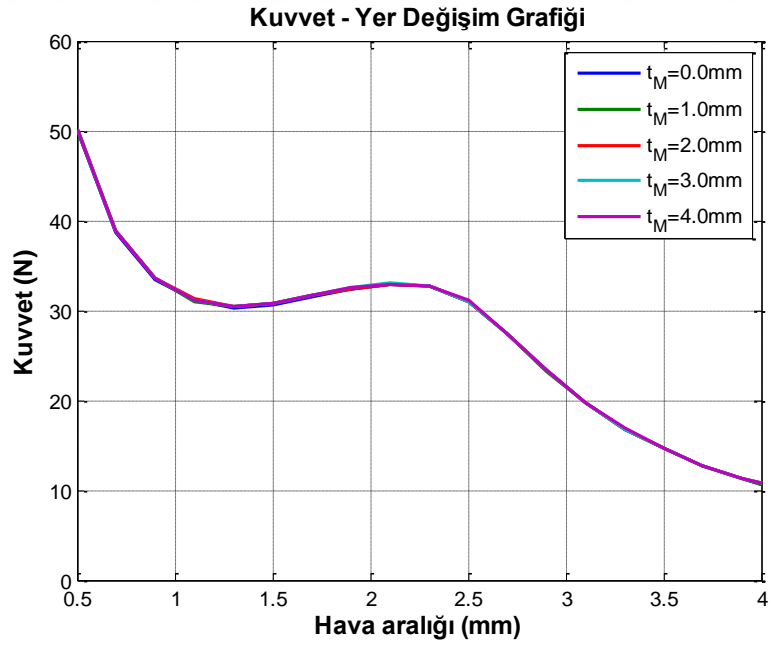
Koniklik Yüksekliği, t_M Parametresine Göre Kuvvet Değişimi

Koniklik yüksekliği, t_M parametresinin değişimi incelenmesinde, t_L ve t_D için ortalama birer değer seçilerek (t_L için 2.5mm, t_D için 0.5 ve 2.5mm), t_M uzunluğunun statik kuvvet karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den görüldüğü üzere, t_M koniklik yüksekliği değerinin artmasıyla, düşük hava aralığı değerlerinde kuvvet değeri artış göstermektedir. Hava aralığının 1,5-2,5 mm değerleri arasında kuvvetin değişmediği görülmüştür. Bu durum, özellikle düşük hava aralığı bölgesinde t_M 'nin artmasıyla sabit kuvvet karakteristiğini sağladığını göstermektedir. Ancak t_M değeri çok artırılmasıyla (örneğin $t_M = 4,0\text{mm}$), düşük hava aralığında mıknatis kuvveti sabit kuvvet eğrisini bozacak kadar artmaktadır. Böylece sabit kuvvet karakteristiği için t_M değerinin, ne çok büyük ne de çok küçük seçilmemesi gerektiği sonucu çıkmaktadır.



Şekil 4.7 Farklı t_M 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($t_L=2.5\text{mm}$, $t_D=0.5\text{mm}$)



Şekil 4.8 Farklı t_M 'nin kuvvet karakteristiğine etkisi ($t_L=2.5\text{mm}$, $t_D=2.5\text{mm}$)

4.1.3. Oransal Solenoid Optimizasyon Çalışmaları

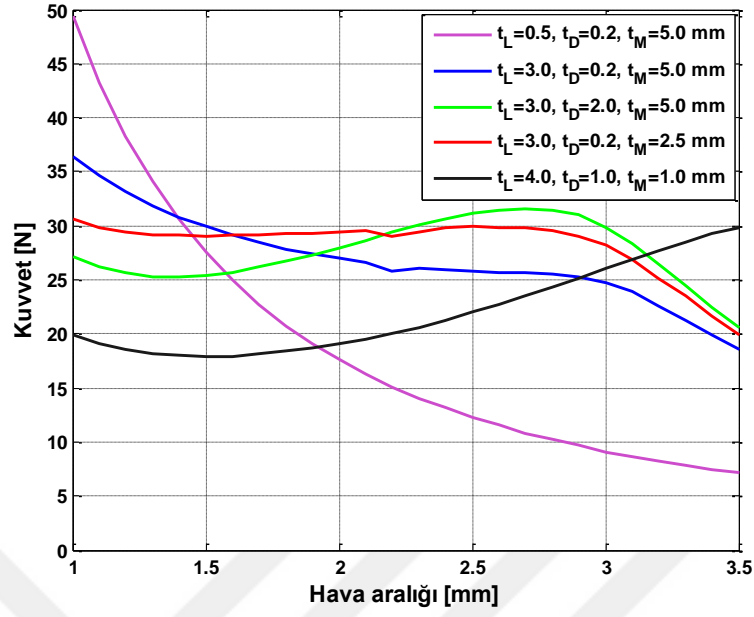
Sabit kutup ile hareketli kutup arasındaki akı yolunu etkileyen koniklik ile ilgili t_L , t_D , t_M geometrik parametre değişiminin statik kuvvet karakteristikleri üzerindeki etkileri Bölüm 4.1.2’de incelenmiştir. Buna göre, bu 3 farklı parametre değerinin seçimi, statik kuvvet karakteristikleri üzerinde ve yaklaşık sabit kuvvet elde etmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu parametrelerin büyüklüklerinin tayini, yaklaşık sabit kuvvet bölgesinin tolerans aralığını ve bu bölgenin uzunluğunu(hava aralığı uzunluğunu) değiştirdiği için oransal solenoidin yapısını, oransal solenoidden elde edilecek kuvvet büyüklüklerini, oransal solenoidin çekirdeğinin hareket miktarını ve bunlara bağlı olarak diğer alt sistemlerin yapısını da değiştirmektedir.

Bu nedenle, solenoid geometrisine ait bu farklı parametre değerlerinin, istenen statik kuvvet karakteristiğine uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, optimizasyonu Bölüm 3.2.1’de belirtildiği gibi $F_{amaç}$ fonksiyonunu minimize ederek yapılmıştır.

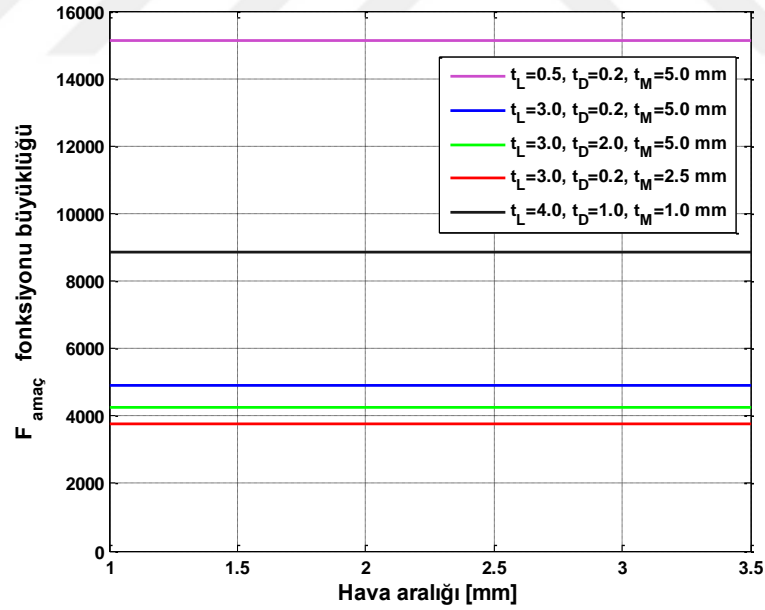
- t_L parametresi 0,25mm artımlı olarak, 2-4mm aralığında,
- t_D parametresi 0,9mm artımlı olarak, 0.5-2.5mm aralığında,
- t_M parametresi 1.0mm artımlı olarak, 0.5-5mm aralığında,

seçilmiş olup hava aralığı ise 0.5mm adımla, 1-3.5mm aralığında olmak üzere Maxwell programında parametrik olarak statik karakteristik analizleri farklı parametre değerleri için (toplam 2268 kez) analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarının tipik olanları Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Amaç fonksiyonun sayısal değerleri Şekil 4.10

t_L parametresi 2mm’den 4mm’e 0,25mm’lik adımlarla; t_D parametresi 0,5mm’den 2,5mm’e 0,9mm’lik adımlarla ve ayrıca $t_D = 0,1mm$ ’de ve $t_D = 0,3mm$ ’de; t_M parametresi 0,5mm’den 5mm’ 1’er mm’lik adımlarla artırılarak hava aralığı ise 1mm’den 3,5mm’e 0,5mm’lik adımlarla artırılarak 2268 adet analiz yapılmıştır; analiz sonuçları Şekil 4.9’de verilmiştir. Aynı analize ait $F_{amaç}$ fonksiyonlarının büyüklük değerleri Şekil 4.10’de verilmiştir.



Şekil 4.9 Seçilen tipik 5 farklı parametri için statik karakteristikler



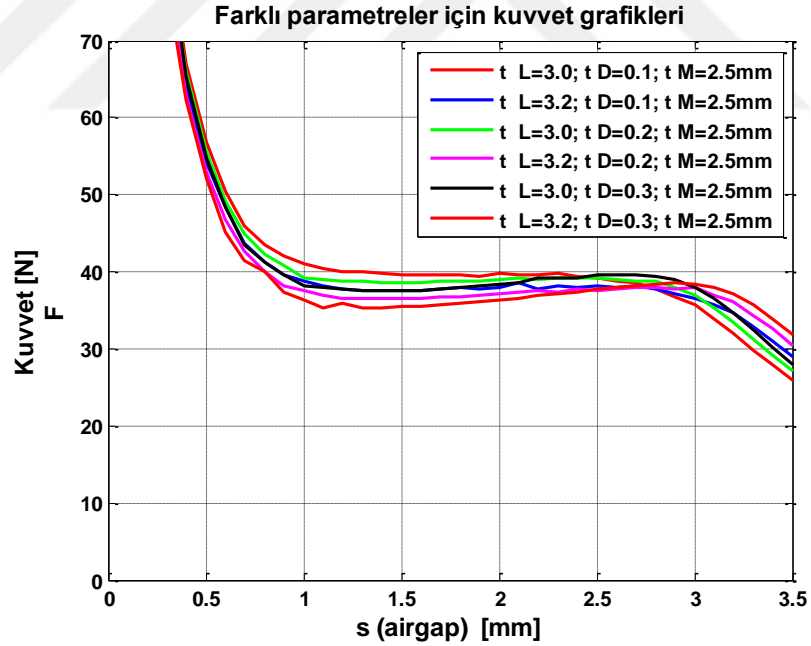
Şekil 4.10 Seçilen tipik 5 farklı parametre için amaç fonksiyonu büyüklükleri

Seçilen tipik 5 farklı parametre için hesaplanan $F_{amaç}$ fonksiyonu büyüklükleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 5 farklı tipik parametre için $F_{amaç}$ fonksiyonu

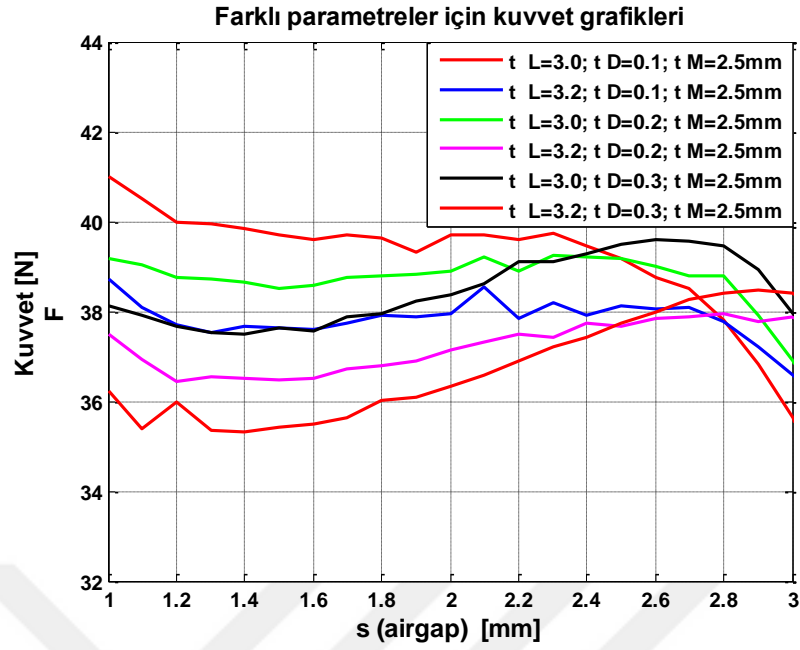
	$\sum_{i=1}^N (F_0 - F_i)^2$	Açıklama
1-	15133	$t_L = 0,5mm, t_D = 0,2mm, t_M = 5,0mm$
2-	4895	$t_L = 3,0mm, t_D = 0,2mm, t_M = 5,0mm$
3-	4236	$t_L = 3,0mm, t_D = 2,0mm, t_M = 5,0mm$
4-	3761	$t_L = 3,0mm, t_D = 0,2mm, t_M = 2,5mm$
5-	8849	$t_L = 4,0mm, t_D = 1,0mm, t_M = 1,0mm$

En düşük amaç fonksiyonu değerlerini veren t_L, t_D, t_M değerleri tespit edilmiş, bu değerler için hava aralığı $g=1.0-3.5mm$ arasında $0.1mm$ adımlarla analiz yapılmış ve analiz sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 En düşük amaç fonksiyonuna sahip parametreler için kuvvet grafiği

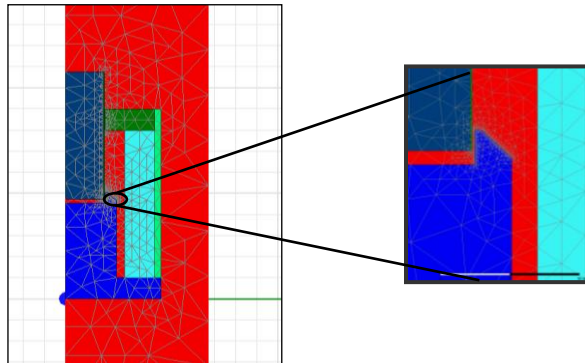
Şekil 4.11’den $g=1mm$ hava aralığından itibaren kuvvet eğrilerinin yaklaşık sabit olduğu görülmektedir. Bu bölgedeki grafik eğrisi Şekil 4.12’de daha yakından görülmektedir.



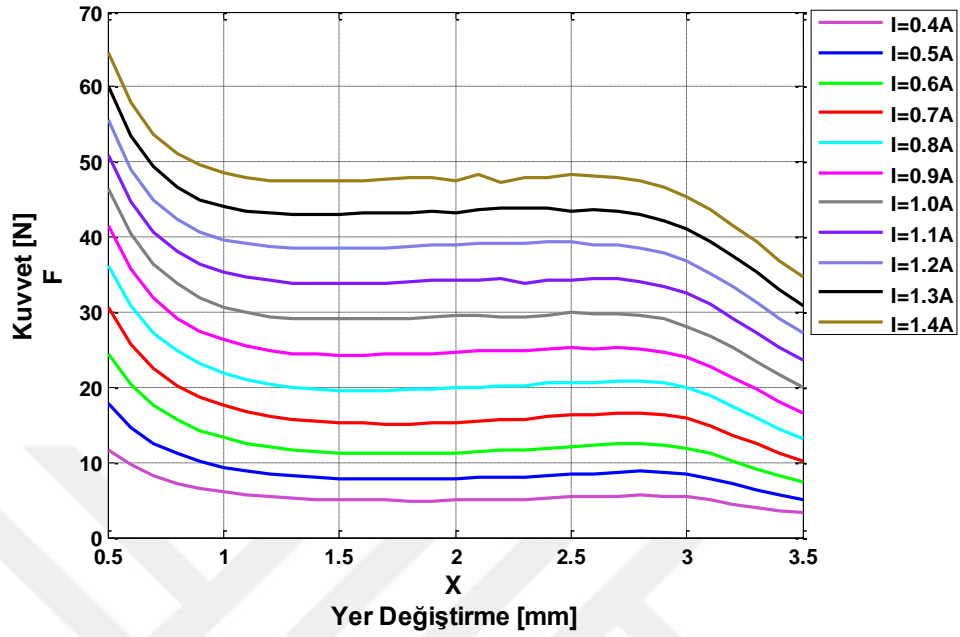
Şekil 4.12 Çalışma aralığındaki kuvvet grafiği

4.1.4. Optimize Edilen Solenoidin Statik Karakteristikleri

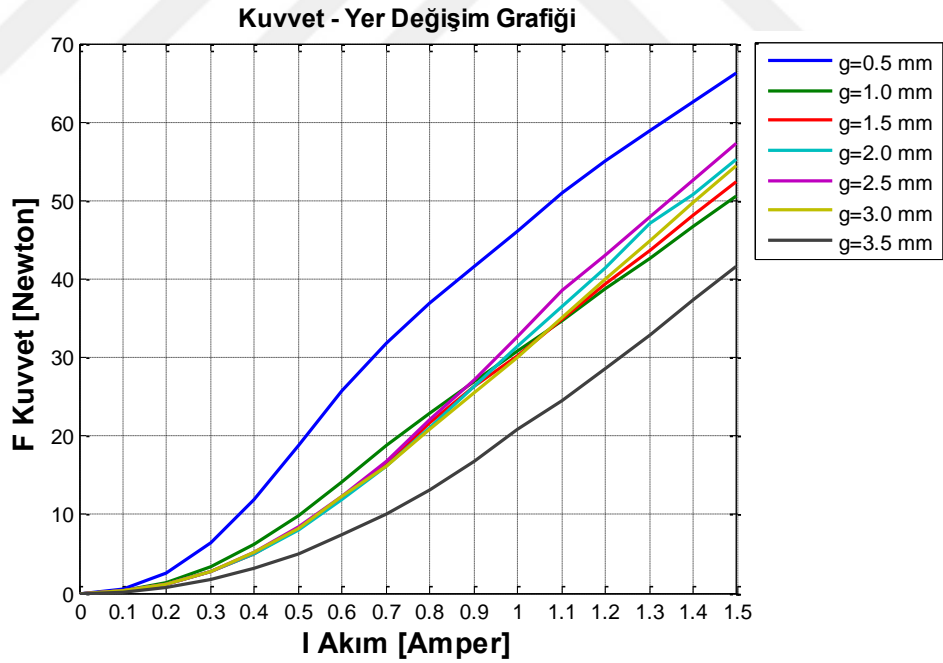
Yapılan optimizasyon sonucu; $t_L = 3,0mm$, $t_D = 0,2mm$, $t_M = 2,5mm$ parametrelerinin tasarım için amaç fonksiyonunun en düşük değerine sahip boyut kombinasyonu olduğu belirlenmiştir. Bu optimize edilmiş geometrik parametreler için farklı akım değerlerinde Maxwell programı kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli(Şekil 4.13) üzerinden analizler yapılmış ve analiz sonuçları Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Farklı hava aralığı değerleri için, kuvvet-akım grafiği Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Tasarlanan solenoidin SEM modeli



Şekil 4.14 Farklı akımlar için kuvvet karakteristikleri (teorik)



Şekil 4.15 Farklı hava aralıkları için akım-kuvvet karakteristikleri (teorik)

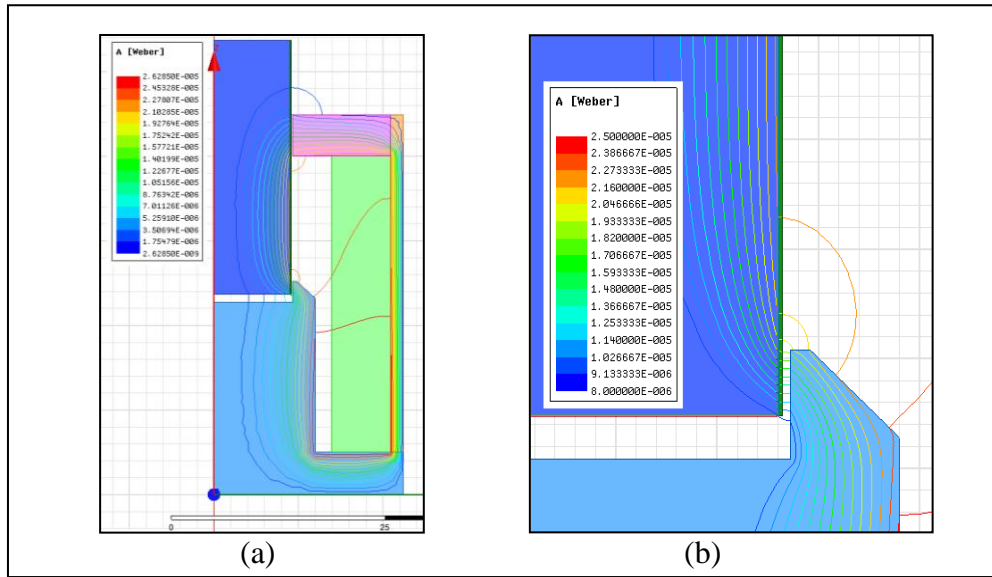
Şekil 4.14'de optimize edilen solenoidin farklı akım değerleri için hava aralığı-kuvvet değişim eğrileri verilmiştir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'ten solenoidin 1.0-3.0mm hava aralığında her bir akım değeri için yaklaşık sabit kuvvetler verdiği görülmektedir.

Optimize edilen solenoidin farklı hava aralığına karşılık akım-kuvvet grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, hava aralığı 1.0-3.0mm çalışma bölgesinde iken akım-kuvvet eğrileri birbiri üzerine toplanmıştır. Ancak hava aralığının 1.0-3.0mm dışında kalan değerleri için ($g= 0.5\text{mm}$ ve $g=3.5\text{ mm}$) akım-kuvvet eğrileri aşağı ve yukarı saçılmıştır. Bu bölge çalışma bölgesi içine alınmaz.

Çalışma bölgesi içerisinde her bir farklı akım değeri için, hava aralığından bağımsız olarak farklı kuvvetler elde edildiği Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Bu şekilde kuvvet fonksiyonu iki bağımsız değişkenli $F_m = f(i, x)$ formundan tek bağımsız değişkenli $F_m = f(i)$ halini alarak akımın bir fonksiyonu olarak doğrusallaştırıldığı gösterilmiştir.

4.1.5. Oransal Solenoide Ait Manyetik Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Optimizasyon sonucu elde edilen geometrik boyutlara göre tasarımı tamamlanan oransal solenoidin sonlu elemanlar modelinin manyetik analizleri Maxwell programında yapılmıştır. Manyetik akı yolları analiz sonuçları Şekil 4.16’da, manyetik alan yoğunluğu sonuçları Şekil 4.17’de ve manyetik akı yoğunluğu sonuçları Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.16 Tasarlanan oransal solenoidin manyetik akı yolları

Şekil 4.16’da oransal solenoidin manyetik akı yolları analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.16-a’da gösterilen analiz sonuçlarına göre eş değer manyetik akı çizgilerinin

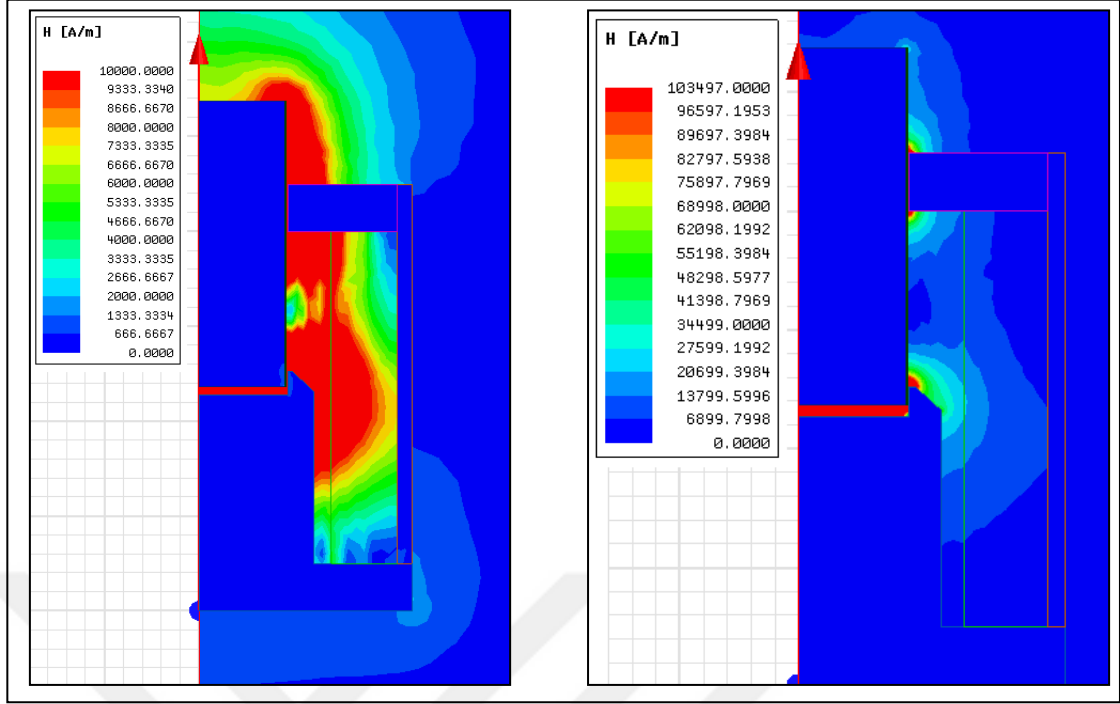
yaklaşık %54'ü ilave edilen konik bölgeden geçerken %23'ü sabit kutbun düz yüzünden geçtiği kalan %23'ünün de saçaklama akısı olduğu görülmektedir.

Manyetik akı çizgileri için Maxwell programında ölçek 10^{-6} Wb olarak seçilerek Şekil 4.16-b'de gösterilen analiz sonuçları elde edilmiştir. Manyetik akının $8 \times 10^{-6} \text{ Wb}$ ve daha düşük değerleri ekranda gösterilmediği için solenoidin düz kısımdan geçen düşük akılar görülmemektedir. Faydalı manyetik akının büyük çoğunluğunun konik kısımdan geçtiği sonucu elde edilmiştir.

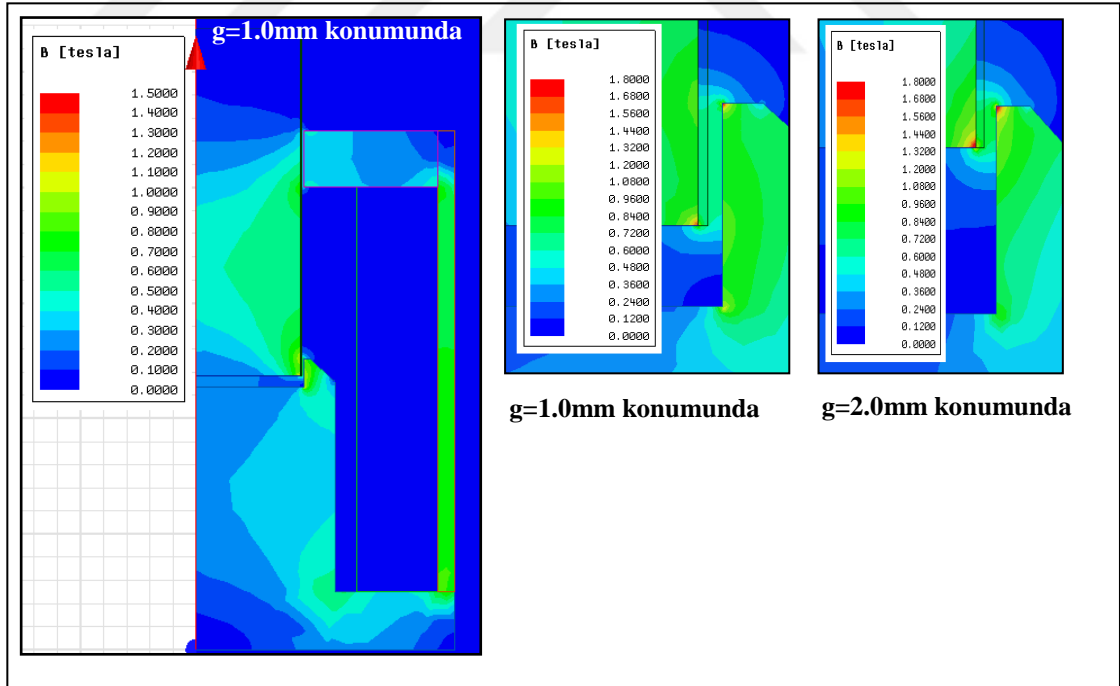
Şekil 4.17'de modelin manyetik alan yoğunluğu sonuçları görülmektedir. Şekil 4.17-a'ya göre ölçek sınırları ayarlandığında Şekil 4.17-b'de görüldüğü gibi manyetik alan yoğunluğu en yüksek değerine ($H = 1 \times 10^5 \text{ A/m}$) hava aralığında ulaştığı görülmektedir.

Şekil 4.18'de manyetik akı yoğunluğunun maksimum 1,8 Tesla olduğu görülmektedir.

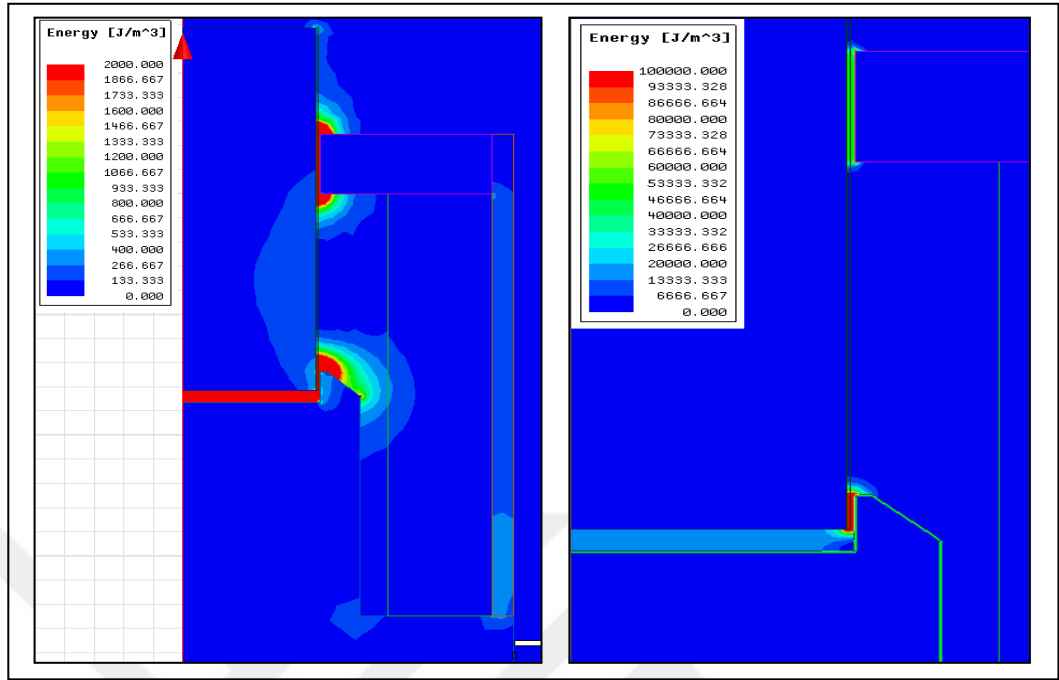
Şekil 4.19'da, manyetik enerjinin hava aralığı ve civarına yayıldığı görülmektedir. Bu bölgeler, Şekil 4.17'de gösterilen manyetik alanın yüksek olduğu bölgeler ile paralellik göstermektedir. Dolayısı ile manyetik enerjinin yüksek olduğu bölgelerin manyetik alanın da yüksek olacağı söylenebilir. Solenoide ait kuvvet yoğunlukları analizleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.20'de solenoidin sabit kutup bölgesinin düz olan kısmında kuvvet yoğunluğunun $4,8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ mertebelerinde oluştuğu görülmektedir.



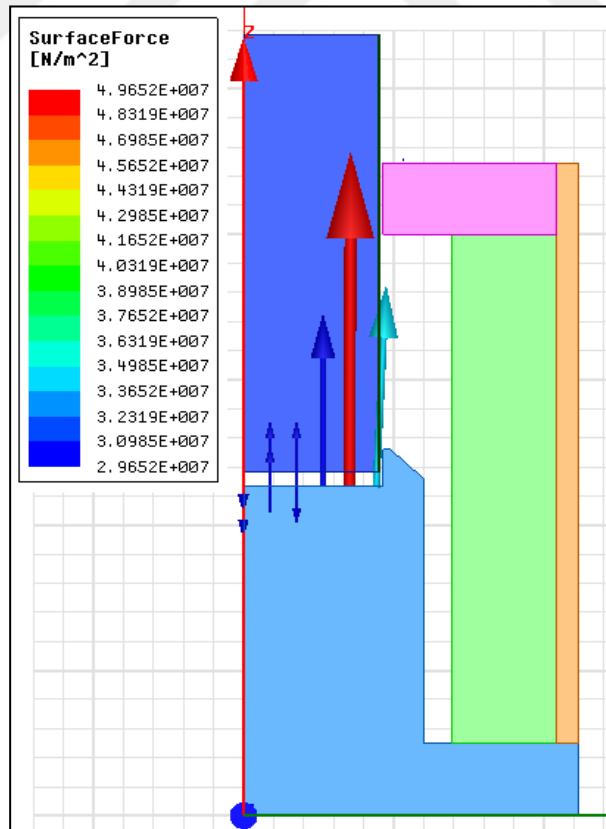
Şekil 4.17 Tasarlanan oransal solenoide ait manyetik alan yoğunluğu



Şekil 4.18 Tasarlanan oransal solenoide ait manyetik akı yoğunluğu



Şekil 4.19 Tasarlanan oransal solenoide ait enerji dağılımı



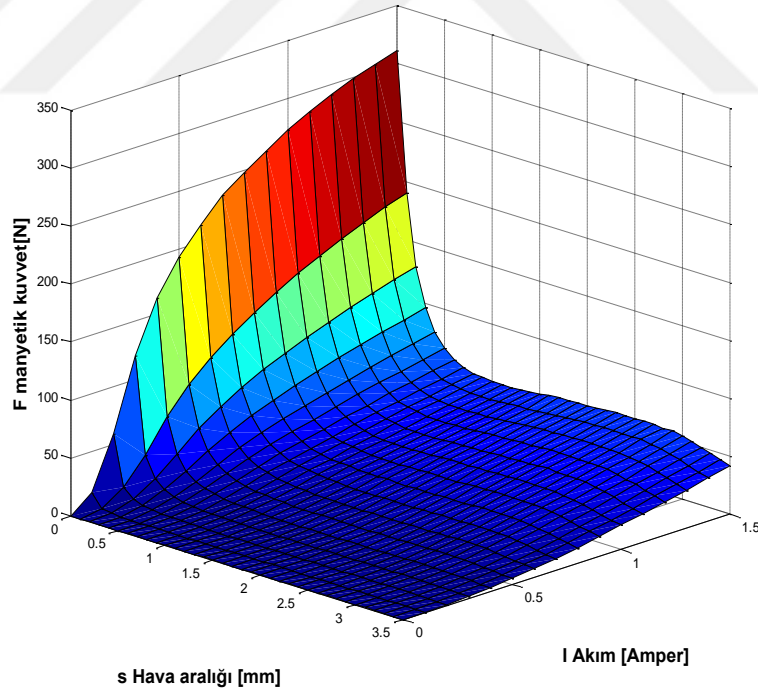
Şekil 4.20 Tasarlanan oransal solenoide ait yüzey kuvvet yoğunluğu

4.1.6. Oransal Solenoide Ait Manyetik Akı Bağı ve Kuvvet Tabloları

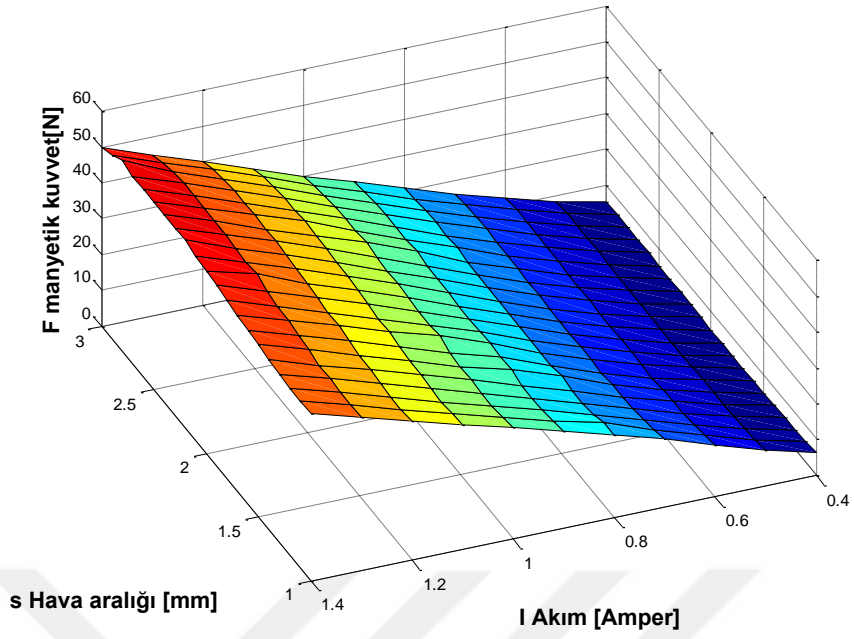
Maxwell mıknatıs devresi analiz programı ile yapılan analizler sonucunda; farklı akım ve hava aralığına bağlı olarak elde edilen manyetik kuvvet ve manyetik akı bağı değerlerini içeren matrisler tablo halinde elde edilmiştir. Bu veriler hava aralığı-akım değerlerine karşılık mıknatıs kuvveti, $F_m=f(x,i)$ ve manyetik akı bağı $\lambda=g(x,i)$ fonksiyonları olarak yorumlanıp 3 boyutlu grafikleri Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

Şekil 4.21'de gösterilen kuvvet eğrileri hava aralığının 0-3.5 mm ve akımın 0-1.5 A aralığındaki değerlerine karşılık çizdirilmiştir. Çalışma bölgesinde $g=1-3\text{mm}$ aralığında bu fonksiyonun 3-boyutlu grafiği Şekil 4.22'de görülmektedir. Çalışma bölgesi içinde kuvvet yüzeyi yaklaşık doğrusal bir artış göstermekte yani hava aralığından bağımsız, sadece akımla doğrusal değişen kuvvet değerinin elde edildiği görülmektedir.

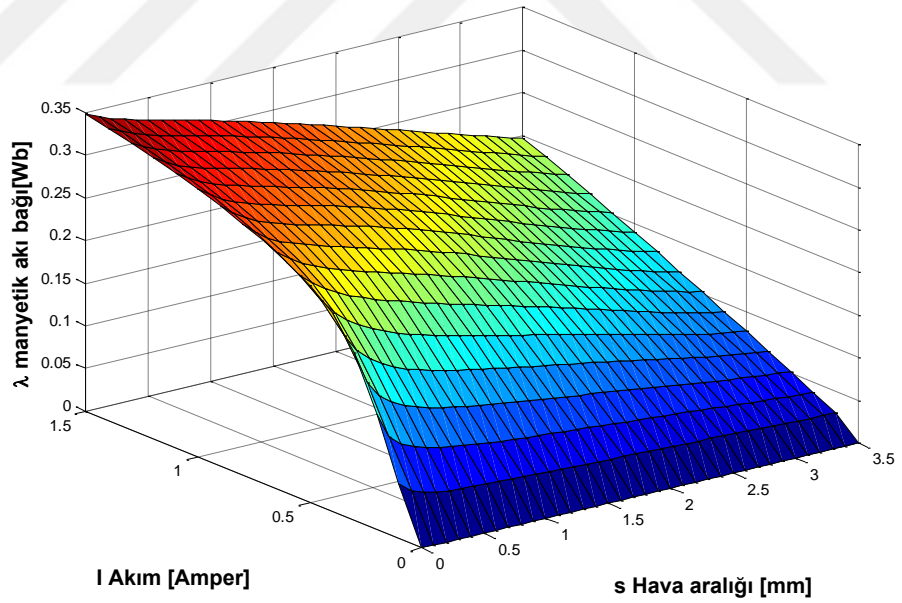
Şekil 4.23'de manyetik akı bağı fonksiyonunun 3 boyutlu grafiği çizdirilmiştir.



Şekil 4.21 3-Boyutlu kuvvet karakteristiği



Şekil 4.22 Çalışma bölgesinde 3-boyutlu kuvvet karakteristiği



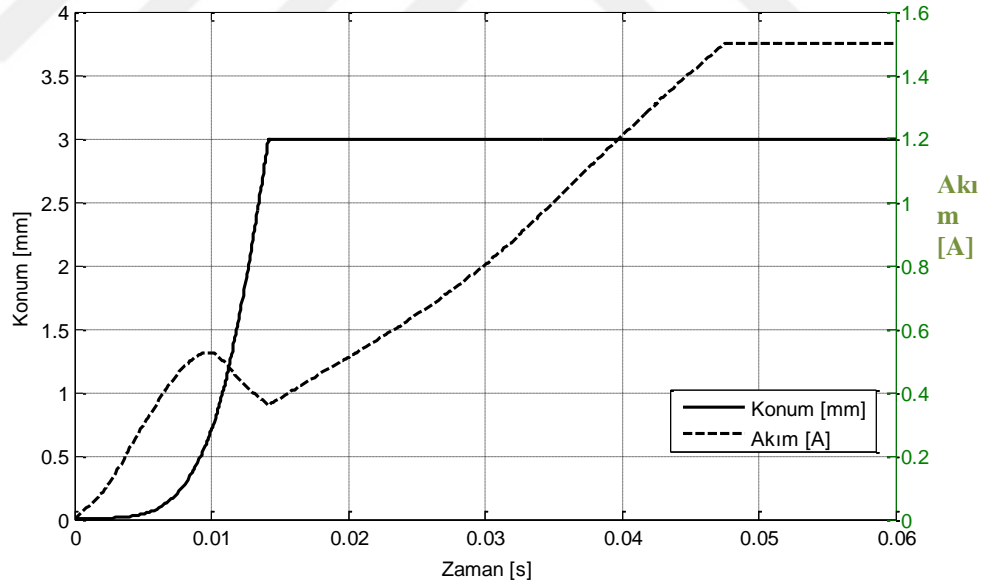
Şekil 4.23 Çalışma bölgesinde hava aralığı-akım-manyetik akı bağı karakteristiği

4.1.7. Solenoid Dinamik Model Sonuçları

Değişken λ manyetik akı bağı değişimine bağlı olarak L bobin indüktansının da değişken olduğu Simulink sistem modeli Şekil 3.20’de gösterildiği gibi kurulmuştur. Şekil 3.20’de verilen dinamik modelin, $I=1.5A$, $g=3.0mm$ için çalıştırıldığında simülasyon sonuçları Şekil 4.24’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu grafikte konum eğrisi incelendiğinde 3mm’lik hava aralığını yaklaşık 15ms’de tamamladığı görülmektedir. Akım eğrisinin de 15ms’de bir minimum yaparak artışına devam ettiği izlenmektedir.

Benzetim sonuçlarına göre, 1.5A akım için, hareketli elemanın hareketini tamamladığı süre yani anahtarlama zamanı 15ms, nihai akım değerine oturma süresi de 48ms okunmuştur.

Hareketin tamamlandığı sürede akım eğrisinin bir çukur yaptığı görülmektedir. Bu tip elektromekanik sistemlerde akımın çukur yaptığı süre anahtarlama zamanı dolayısı ile cevap hızını belirlemede kullanılır (Şefkat 2002).



Şekil 4.24 Teorik modelden elde edilen akım ve konum karakteristiği

4.2. Deneysel Sonuçlar

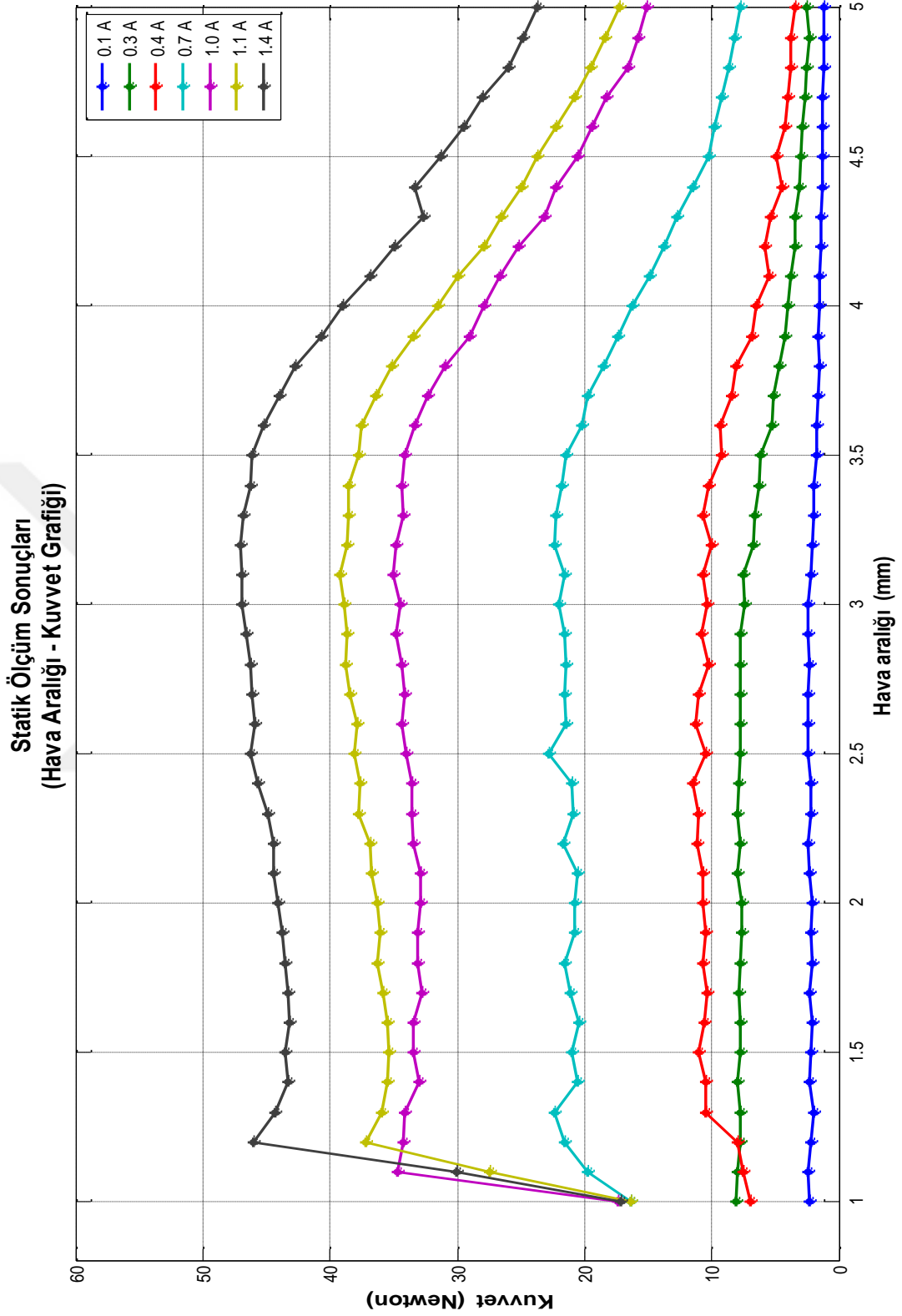
Oransal solenoide ait deneyler statik ve dinamik olmak üzere iki kısımda ayrı ayrı yapılmıştır. Tez kapsamında tasarımı ve imalatı yapılan deney düzeneği üzerinde önce statik deneyler ardından dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Statik Deney Sonuçları

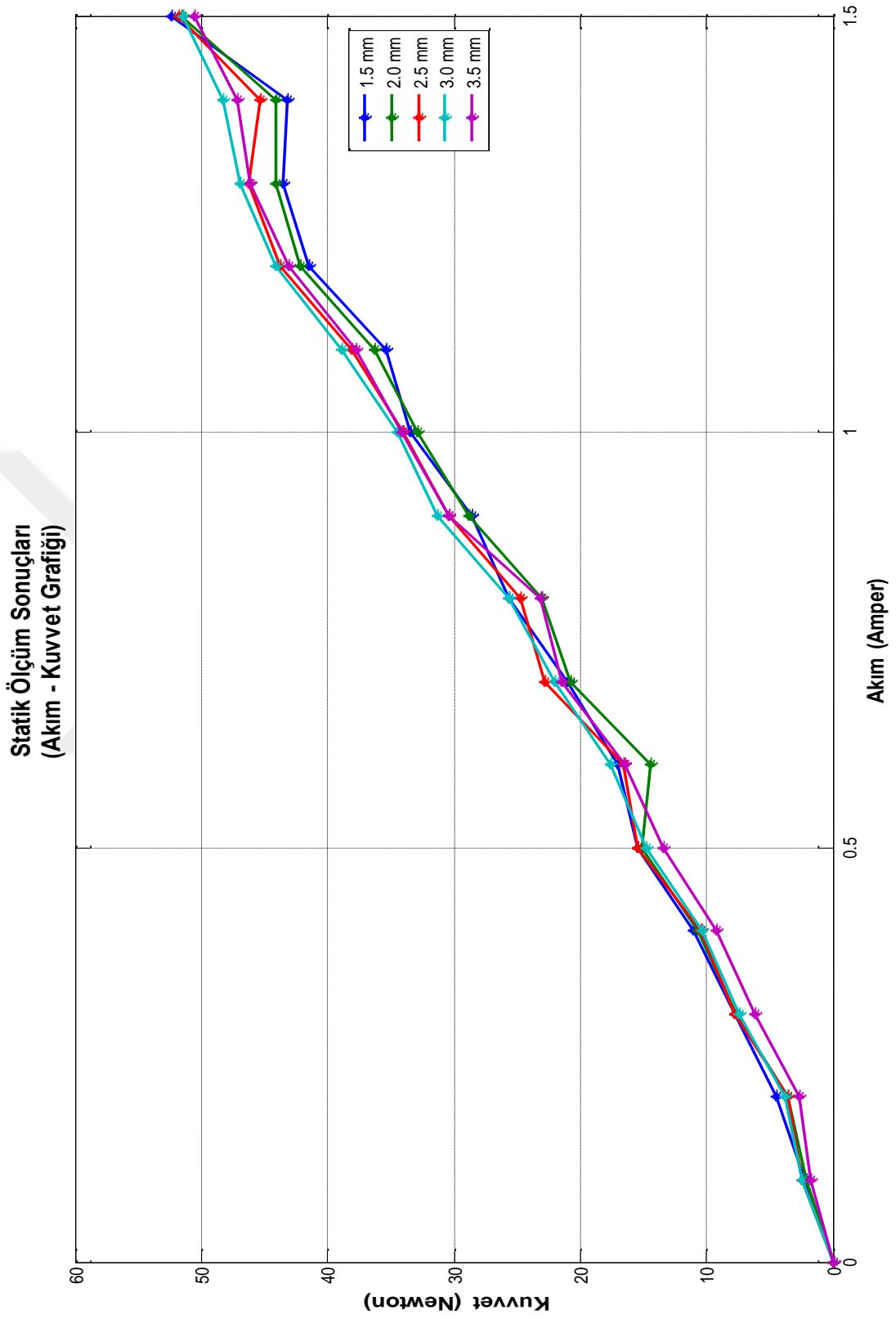
Oransal solenoide ait statik deneylerin nasıl yapıldığı/yürütüldüğü, Statik Deneyler başlığı kısmında verilmiştir. Farklı hava aralığı ($x=1-5\text{mm}$) ve farklı akım ($i=0,1-1,5\text{A}$) değerleri için ölçülen mıknatıs kuvveti değerleri Şekil 4.25’de sunulmuştur.

Hava aralığı-kuvvet ölçüm sonuçlarından (Şekil 4.25), farklı hava aralıkları değerlerine karşılık akım-kuvvet eğrileri elde edilmiş ve Şekil 4.26’de verilmiştir.

Her iki grafikten de çalışma bölgesinde ($g=1-3\text{mm}$) hava aralığına karşılık sabit kuvvet, akıma karşılık da doğrusal değişen kuvvet elde edildiği görülmektedir.

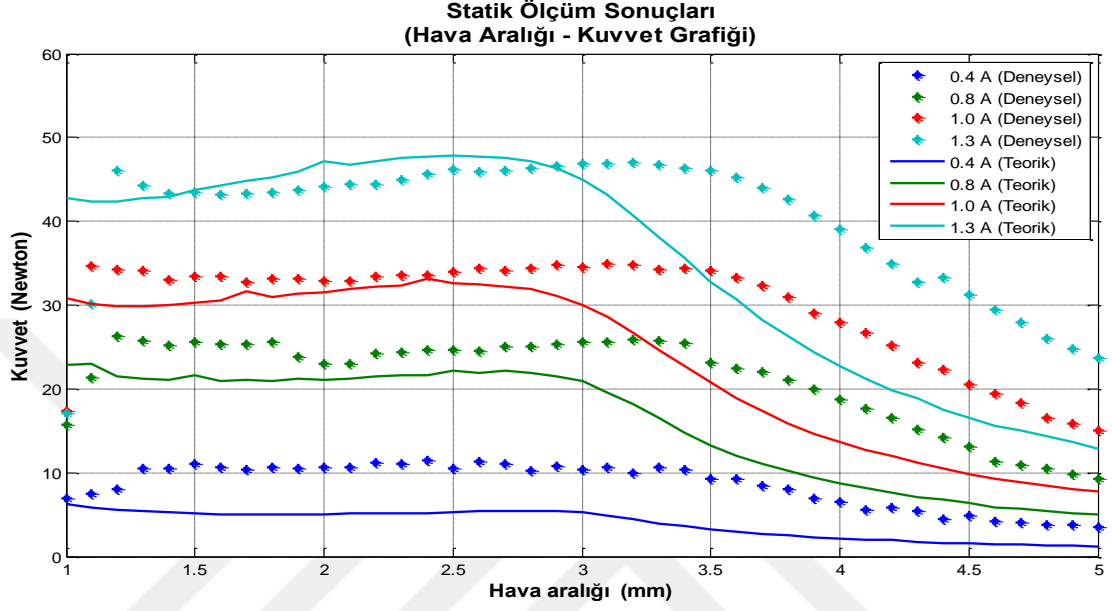


Şekil 4.25 Farklı akımlara karşılık elde edilen deneysel kuvvet karakteristiği

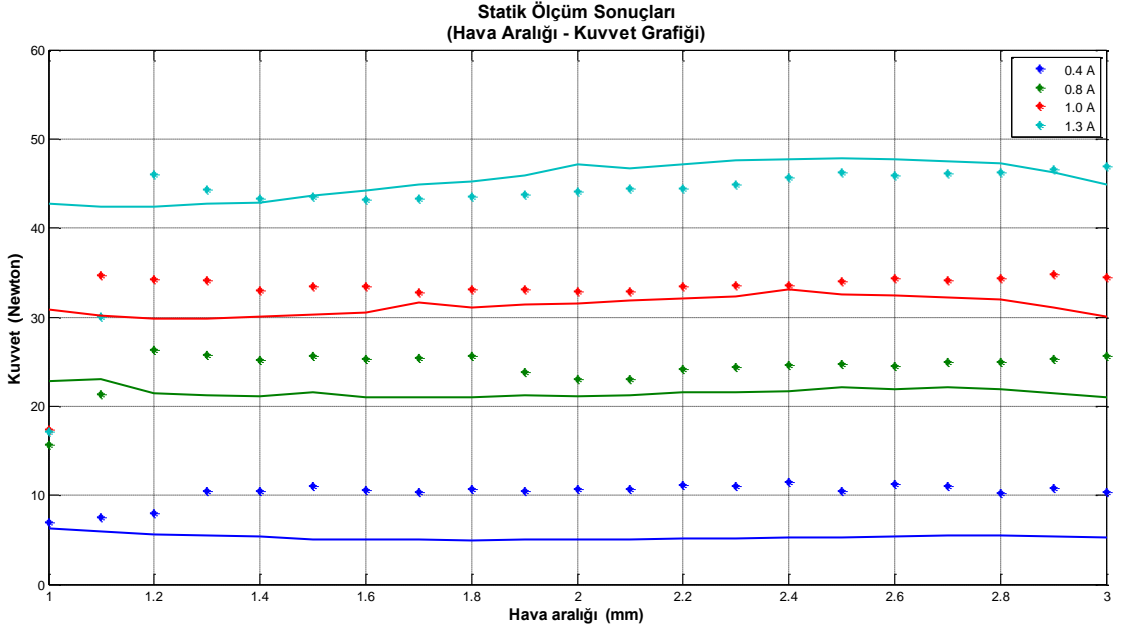


Şekil 4.26 Farklı hava aralığı değerleri için elde edilen akım-kuvvet karakteristiği

Yapılan deneysel ve teorik çalışmaların sonuçlarının karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmuştur. Farklı akım değerlerine karşılık, oransal solenoidin statik kuvvet karakteristiklerinin teorik ve deneysel sonuçları Şekil 4.27’de verilmiştir. Şekil 4.28’de bu solenoidin çalışma bölgesi ile sınırlandırılmış (1-3mm) sonuçlar gösterilmiştir.

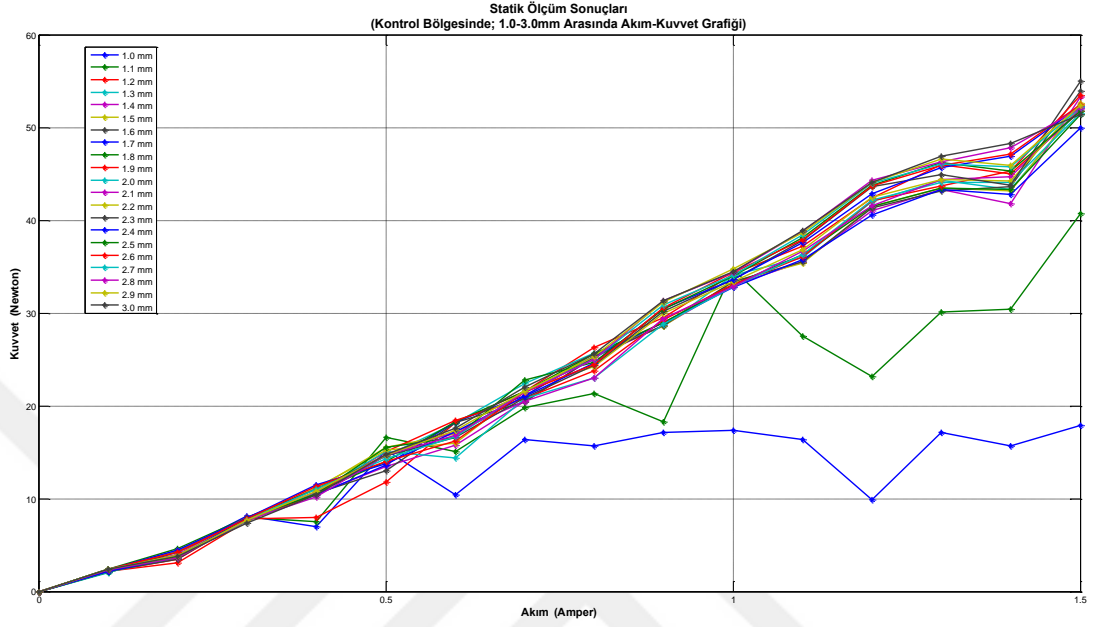


Şekil 4.27 Teorik ve deneysel kuvvet karakteristiği

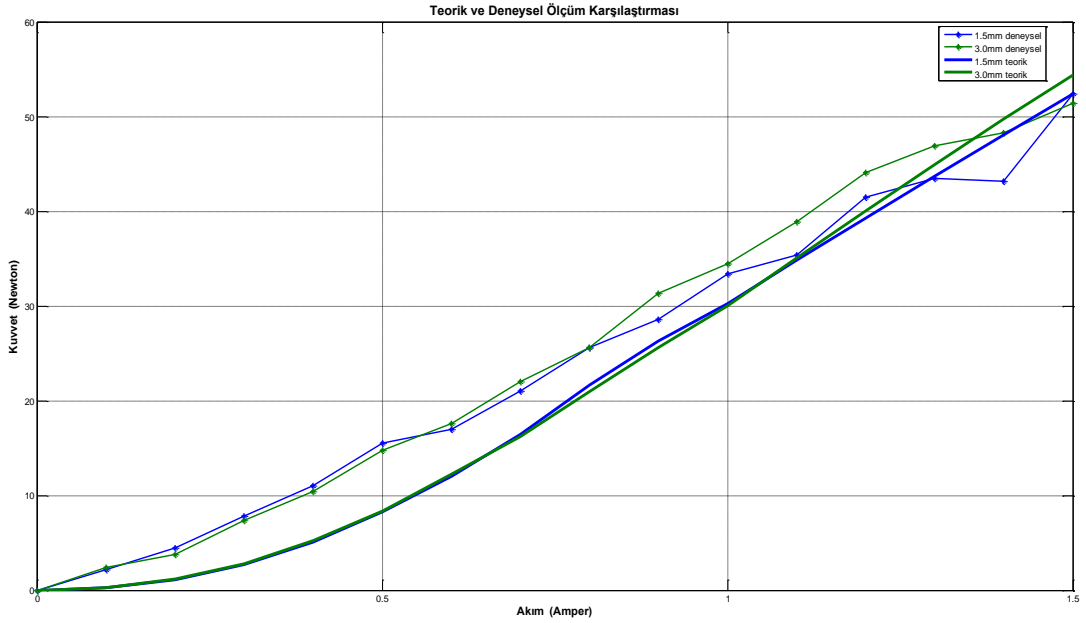


Şekil 4.28 Teorik ve deneysel kuvvet karakteristiği (çalışma bölgesinde)

Sabit hava aralığına karşılık, oransal solenoidin akım-kuvvet grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir. Çalışma bölgesi içinde kalan (1.5-3 mm hava aralığı değerleri için seçilen iki tipik teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 4.30'da verilmiştir.



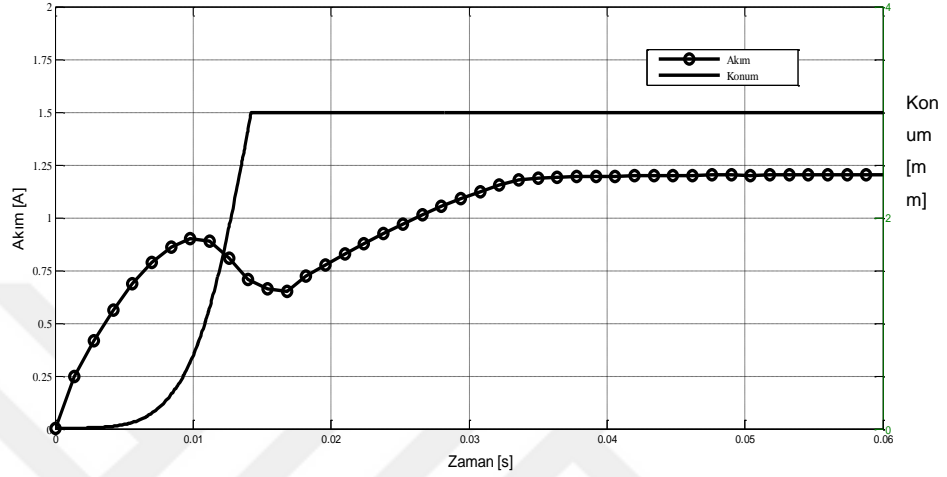
Şekil 4.29 Çalışma bölgesi (1-3mm) akım-kuvvet grafiği



Şekil 4.30 Karşılaştırmalı teorik ve deneysel akım-kuvvet grafiği

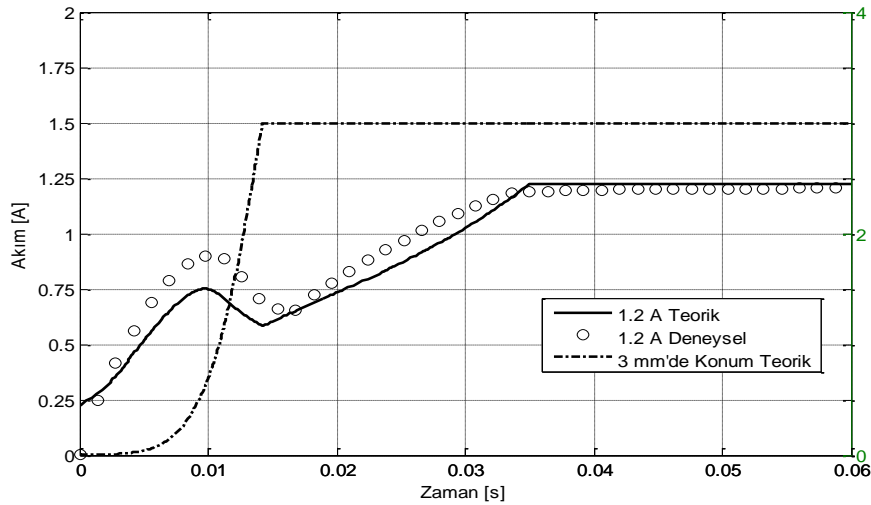
4.2.2. Dinamik Deneysel Sonuçları

Dinamik deney sonuçları basamak giriş sinyaline göre elde edilmiş ve deneylerde belli bir akıma karşılık gerilim sinyali giriş olarak uygulanmıştır. Şekil 4.31’de akım için tipik basamak cevabı eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.31 Deneysel akım karakteristiği

Deneyde kullanılan lazer konum algılayıcısının kapasitesi, bu hızdaki solenoid hareketli eleman konum ölçümü için uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu yüzden Şekil 4.31’deki konum eğrisi teorik modelden elde edilerek sunulmuştur. Dinamik Simulink modeli 1,2A akım değeri için çalıştırılarak elde edilen akım ve konum sonuçları ile 1,2A akım için yapılan deneyden elde edilen akım eğrisi karşılaştırmalı olarak Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32 Karşılaştırmalı dinamik karakteristik grafiği

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, ağır taşıt vasıtalarında kullanılan elektro-pnömatik fren valfinin pilot kademesini teşkil eden oransal bir solenoidin tasarım ve analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarıma esas teşkil eden tasarım ölçütleri, uygulamada kullanılan bir sistemden alınmış ve ön tasarım aşamasında oransal valfinin tasarımına esas teşkil etmek üzere standart aç-kapa tipi bir solenoid tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ön tasarımı yapılan aç-kapa tipi solenoidin mıknatıs devresinin geometrisi değiştirilmek suretiyle, tez çalışmasında hedeflenen oransal karakteristikler sağlayan bir solenoid tasarımı elde edilmiştir. Bunun için mıknatıs devresini oluştururken sabit kutup çapı, hareketli kutba göre artırılmış ve hareketli kutbun içinde çalıştığı konik bir çıkıntı oluşturulmuştur. Bu şekilde mıknatıs akısının yolu, küçük hava aralıklarında saptırılarak, belli çalışma aralığında sabit çekim elde edilmesi sağlanmıştır. Bu sonuçta, belli çalışma bölgesinde çekim kuvvetini hareket miktarından bağımsız hale getirerek, çekim kuvvetini sadece giriş akımı değişimine orantılı hale getirmiştir.

Solenoidin mıknatıs devresi ve kuvvet-akım değişimi arasında doğrudan bir matematiksel bağıntı yazmak mümkün olmadığından, oransal karakteristikleri sağlayan geometrinin optimizasyonu, sonlu elemanlar yöntemine dayanan Maxwell elektromıknatıs analiz programı yardımıyla gerçekleştirilebilmiştir. Bu şekilde, geometrik şekil değişikliğine konu olan 3 önemli parametrenin uygun değerlerini tespit edecek bir optimizasyon yapılmış ve bu optimizasyon tanımlanan bir amaç fonksiyonu sağlayacak şekilde, sına-yanılma yoluyla en uygun değerler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için analiz programı 2000'den fazla çalıştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, tasarımı ölçütlerini sağlayan, belli bir çalışma bölgesinde (1 mm- 3 mm hareket mesafesinde) sabit çekim kuvveti sağlayan bir oransal solenoid geometrisi elde edilmiştir.

Tasarımı tamamlanan veya geometrik boyutları belirlenen solenoidin, Maxwell sonlu elemanlar analiz programı yoluyla yapılan analizleri sonucunda kuvvet-hava aralığı karakteristiğinin 1.6 A akım ve 1-3 mm aralığında yaklaşık istenen 42 N kuvveti

sağladığı gösterilmiştir. Bu aşamada farklı akım değerleri için kuvvet-hava aralığı eğrileri elde edilmiş ve bu sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde sunulmuştur. Ayrıca, çalışma bölgesinde oransal olarak çalışan yani hava aralığından bağımsız sadece akımın değişimine orantılı çalışan oransal solenoidin sabit hava aralığında akım- kuvvet karakteristikleri elde edilerek tezin söz konusu bölümünde sunulmuştur. Bu bulgulardan da tasarımı yapılan solenoidin çalışma bölgesinde oransal çalıştığı gösterilebilmiştir.

Oransal solenoidin dinamik karakteristikleri ise MATLAB-Simulink ortamında çözülmüş ve analiz edilmiştir. Solenoide ait mıknatis devresine ait matematiksel bağıntılar çok karmaşık olduğundan, çözümde Maxwell mıknatis devresi analiz programı ile hazırlanan elektromıknatis karakteristiklere ait tablolar kullanılmıştır. MATLAB programcılığında LookUp table olarak bilinen bu yöntemde, hava aralığı-akıma bağlı kuvvet $F_m=f(x,i)$ ve hava aralığı manyetik akı bağına bağlı akım $i=f(x,L)$ değerleri veri olarak alınmıştır. Maxwell programında elde edilen sonuçlardan LookUp Table yapısına uygun matrisler elde etmek için de MATLAB ortamında çalışan bir program yazılmıştır.

Dinamik karakteristiklere ait benzetim ve deneysel sonuçlar arasında yeterli bir uyum sağlanmış olup, solenoidin yaklaşık 15 ms bir cevap süresine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu cevap süresi ise hedeflenen sonuca uygun bir değerde bulunmuştur. Ayrıca bu cevap süresi de bu tip oransal solenoid valflerin kullanıldığı özellikle ağır vasıta ticari araç fren sistemlerinde yeterli olduğu görülmüştür.

Tez kapsamında proje konusu oransal solenoidin statik ve dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine uygun bir test düzeneği tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek bu çalışmadaki deneyler yanında bundan sonraki benzeri çalışmalar için de kullanılabilecek nitelikte olup, önemli bir kazanım sağlanmıştır.

Sonuç olarak, proje kapsamında hedeflenen bir oransal solenoid tasarım ve prototip imalatı gerçekleştirilmiş olup, bu solenoid de tasarım ölçütlerini sağladığı görülmüştür. Ayrıca yapılan analizler sonucu ve deneyler sonucunda elde edilen teorik ve deneysel sonuçların, bu çalışma alanı için makul seviyede uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

Tez kapsamında analiz sonuçları sabit çevre koşulları için hesaplanmıştır. Solenoidin ısınmasından dolayı meydana gelecek sıcaklık artışı bobin direncini değiştirecektir. Tez kapsamında sabit direnç değeri varsayılmıştır. İlerleyen çalışmalarda sıcaklığın etkisinin de hesaba katıldığı analizler yapılabilir. Böylelikle gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir.

Bu tez kapsamında uygun bir konum algılayıcısı alımı gerçekleştirilememiştir. İleriki çalışmalarda uygun bir konum algılayıcısı kullanılarak deneysel konum eğrileri de elde edilebilecektir.

Elektro-pnömatik fren valfinin önemli bir bileşeni olan oransal solenoid tasarımı ve analizini içeren bu tez daha sonraki fren valfinin pnömatik çalışmalarında ve endüstriyel anlamda nihai bir ürüne dönüşecek kontrol çalışmalarına bir basamak oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

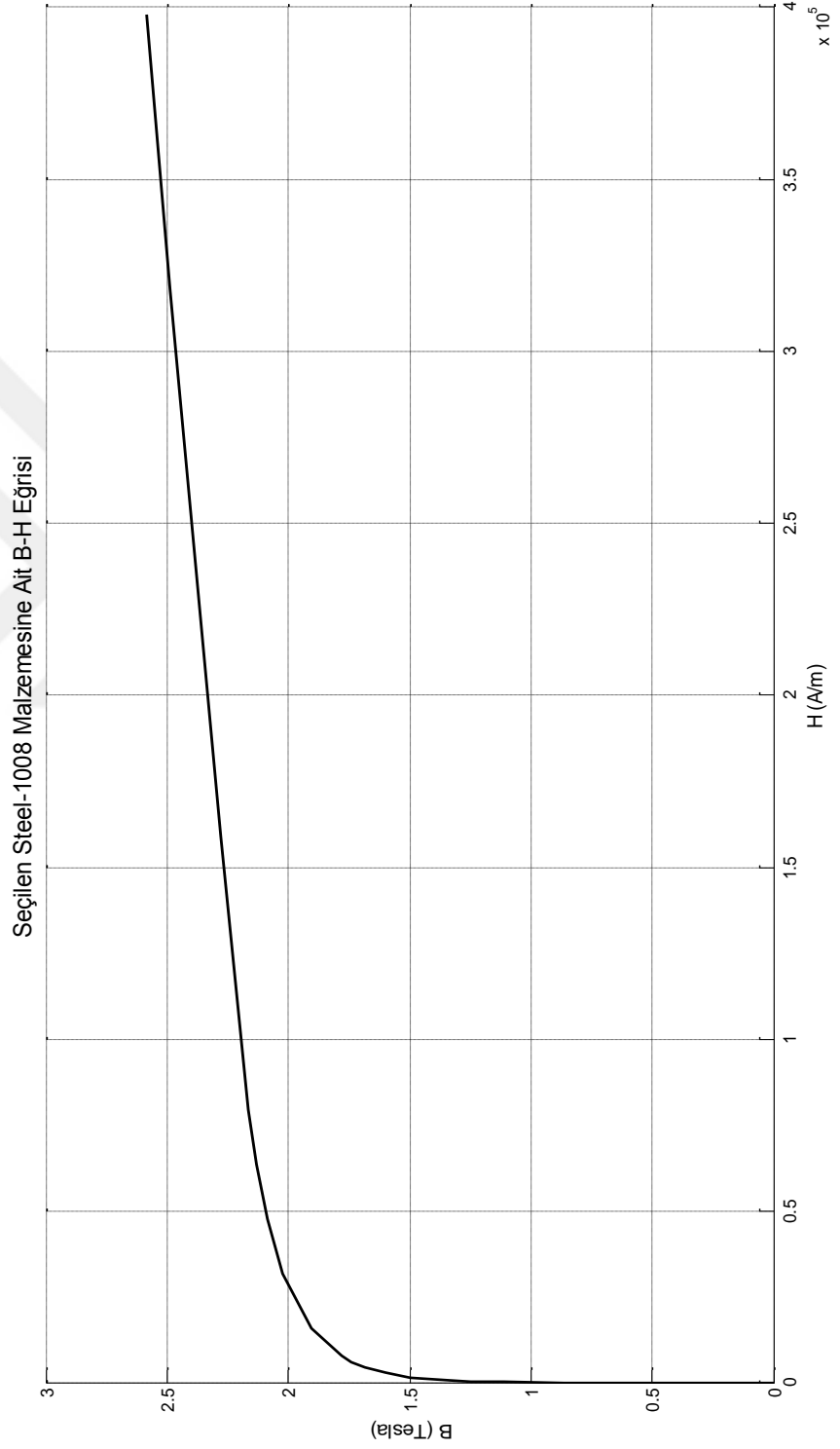
- Ackermann, B., Steinbusch, H., Vollmer, T., Wang, J., Jewell, G.W., Howe, D. 2004.** A spherical permanent magnet actuator for a high-fidelity force-feedback joystick, *Mechatronics*, 14:327-339
- Akkaya, A.V., Sevilgen S.H., Erdem, H.H., Çetin B. 2005.** Simulink kullanarak bir pnömatik sistemin simülasyonu. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6 (2):155-162
- Belforte, G., Mauro, S., Mattiazo, G., 2004.** A method for increasing the dynamic performance of pneumatic servosystems with digital valves. *Mechatronics*, 14:1105-1120
- Bottauscio, O., Chiampi, M., Manzin, A. 2003.** Diffusion and hysteresis in axisymmetric electromechanical devices. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39:990-997
- Brauer, J.R. 2006.** Magnetic actuators and sensors, Wiley-Interscience, Kanada,308.
- Cheung, N.C. 1995.** A nonlinear, short stroke proportional solenoid. Doktora Tezi, The University of New South Wales, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Galler.
- Douglas, J.F.H., 1963.** Solenoid hareketli eleman magnet with nearly constant force., *IEEE Transactions on Applications and Industry*, 82:331-334
- Gu, X., Li, Y. 2013.** Comprehensive investigations on magnetic field distribution in a solenoid. Proceedings of the ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems , 16-18 Eylül 2013, Utah, ABD.
- Kajima, T., 1995.** Development of a high-speed solenoid valve: investigation of solenoids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 42:1-8
- Kallenbach, E., Ströhla, T., 2002.** Dynamic simulation of electromagnetic actuators using network models including eddy currents. *Actuator*, 55:23-32
- Lequesne, B.P., 1988.** Finite-element analysis of a constant-force solenoid for fluid flow control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 24:574-581
- Lequesne, B., 1990.** Dynamic model of solenoids under impact excitation, including motion and eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26:1107-1116
- Lua, A.C., Shi, K. C., Chua, L. P. 2001.** Proportional assist ventilation system based on proportional solenoid valve control. *Medical Engineering & Physics*, 23:381-389
- McNair, K.M. 2001.** System-level partitioning using mission-level design tool for electronic valve application. *Society of Automotive Engineers*, 03:28-42

- Moses, A.J., Al-Naemi, F., Hall, J. 2003.** Designing and prototyping for production. Practical applications of electromagnetic modelling. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254:228-233
- Nguyen, T., Leavitt, J., Jabbari, F., Bobrow, J.E. 2007.** Accurate sliding-mode control of pneumatic systems using low-cost solenoid valves. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12:216-219
- Park, S.H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D., Park, K. 2003.** Effects of design and operating parameters on the static and dynamic performance of an electromagnetic valve actuator. *Proc. Instn Meech. Engrs*, 217:193-201
- Richer, E., Hurmuzlu, Y. 2000.** A high performance pneumatic force actuator system part 1 – nonlinear mathematical model. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 122:416-425
- Roters, H.C. 1941.** Electromagnetic devices, John Wiley and Sons Inc., New York, 561.
- Sorli, M., Gastaldi, L., Codina, E., Heras, S. 1999.** Dynamic analysis of pneumatic actuators. *Simulation Practice and Theory*, 7:589-602
- Sorli, M., Figliolini, G., Almondo, A. 2010.** Mechatronic model and experimental validation of a pneumatic servo-solenoid valve. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 132:054503-1-10
- Szente, V., Vad, J. 2001.** Computational and experimental investigation on solenoid valve dynamics. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, 8-12 Temmuz 2001, Como, İtalya
- Szimandl, B., Nemeth, H., 2013.** Dynamic hybrid model of an electro-pneumatic clutch system, *Mechatronics*, 23:21-36
- Şefkat, G., 2002.** Bir elektromekanik aygıtın statik ve dinamik karakteristiğinin araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8:273-282
- Taghizadeh, M., Ghaffari, M., Najafi, F. 2009.** Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications. *C.R.Mecanique*, 337:131-140.
- Tai, C., Tsao, T., 2003.** Control of an electromechanical actuator for camless engines. Proceedings of the American Control Conference, 4-6 Haziran 2003, Denver, Colorado.

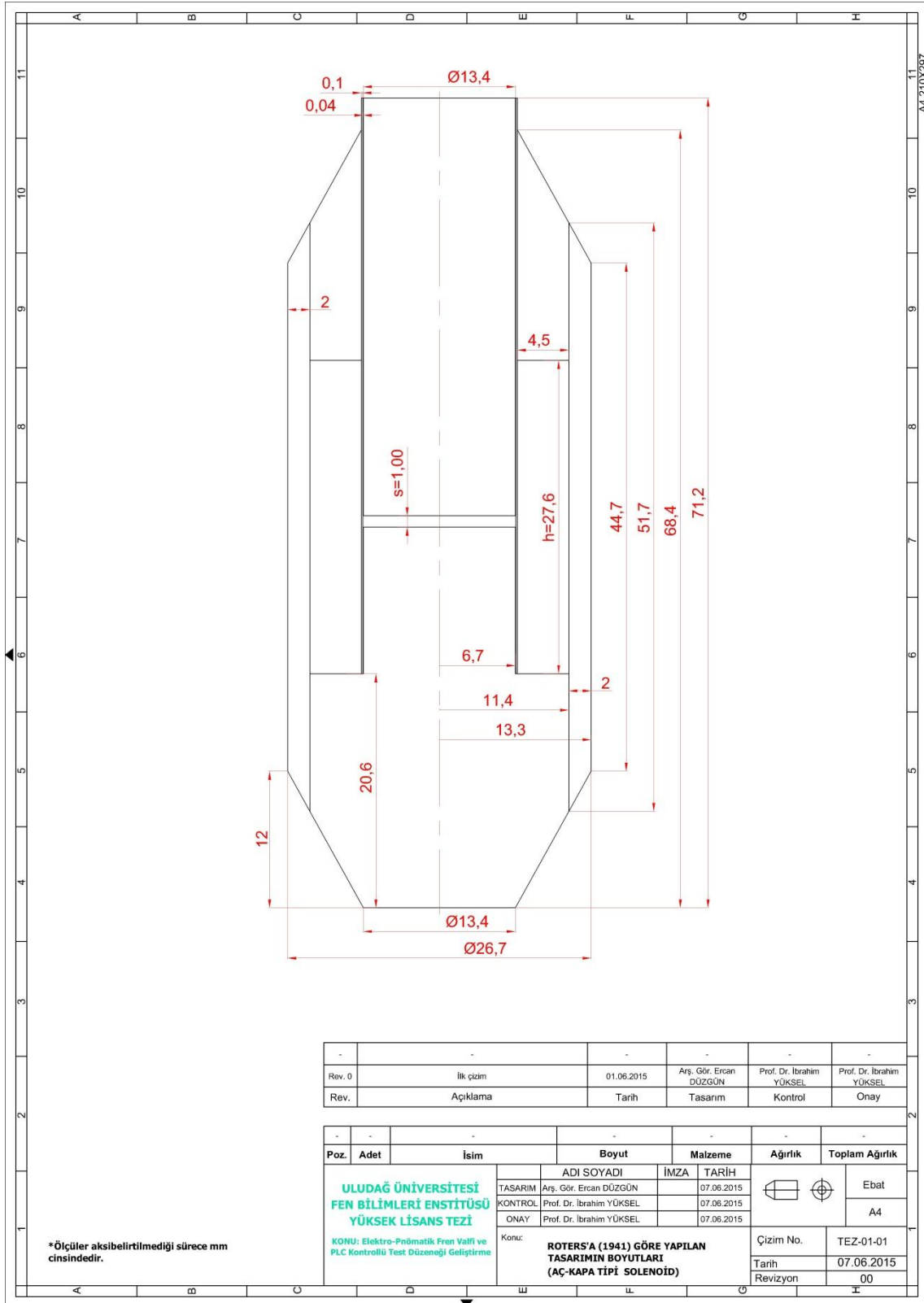
- Tehrani, M.J., 2008.** Pressure control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves. Yüksek Lisans Tezi, İsveç Kraliyet Teknoloji Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Stockholm, İsveç.
- Topçu, E.E., Kamaş, Z., Yüksel, İ., 2008.** Simplified numerical solution of electromechanical systems by look-up tables . *Mechatronics*, 18:559-565
- Varseveld, R.B., Bone, G.M. 1997.** Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2:195-204
- Vogel, O.,Ulm, J., 2011.** Theory of Protortional Solenoids and Magnetic Force Calculation Using COMSOL Multiphysics. COMSOL Conference, 4-6 Haziran 2011, Stuttgart
- Xiang, J.Y., 2002.** Modeling and control of a linear electro-mechanical actuator (LEMA) for operating engine valves. IAS Annual Meeting(IEEE Industry Applications Society), 1 Şubat 2002
- Xu, Q., Wei, G., Li X., 2013.** Characteristic analysis and control for high speed proportional solenoid valve. IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, 19-21 June 2013, Melbourne, Australia
- Yun, S.N., Ham, Y.B., Park, J.H. 2012-a.** Attraction force improvement strategy of a proportional solenoid actuator for hydraulic pressure control valve. 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems, 1123-1127, 17-21 Ekim 2012, Jeju Adaları,Kore
- Yun, S.N., Ham, Y.B., Park, J.H. 2012-b.** New approach to design control cone for electro-magnetic proportional solenoid actuator. The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 982-987, 11-14 Temmuz 2012, Kaohsiung, Tayvan
- Yun, S.N., Ham, Y.B., Shin, H.B.. 2008.** Proportional fuel flow control valve foe diesel vehicle. International Conference on Control, Automation and Systems 2008, 94-98, 14-17 Ekim 2008, Seul,Kore
- Zhang, J., Lv, C., Yue, X., Li, Y., Yuan, Y. 2014.** Study on a linear relationship between limited pressure difference and coil current of on/off valve and its influential factors. *ISA Transactions*, 53:150-161.

EKLER

EK 1 Solenoidde Kullanılan Manyetik Malzemeye Ait B-H Eğrisi



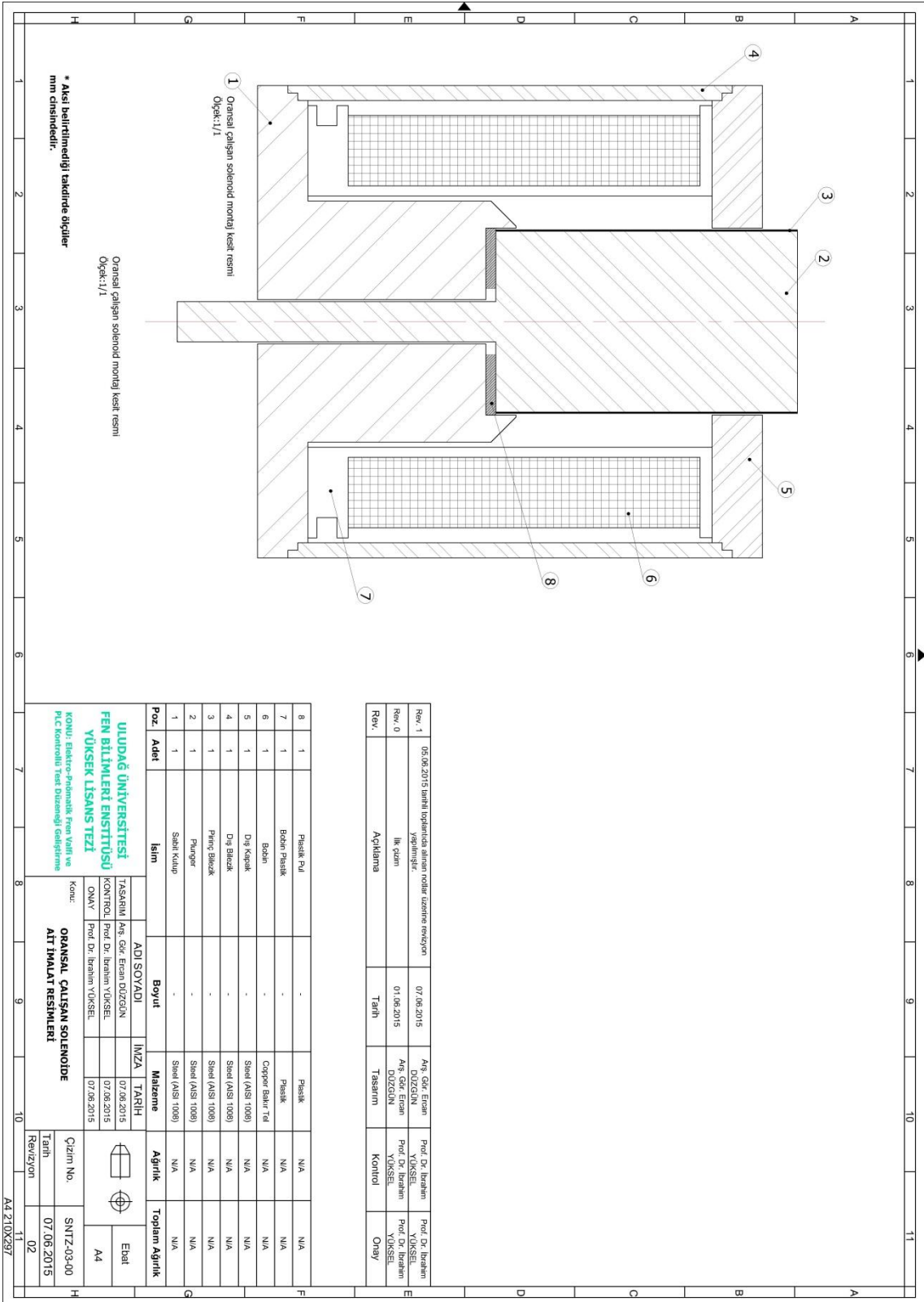
EK 2 A-Kapa Tipi Solenoid Boyutları



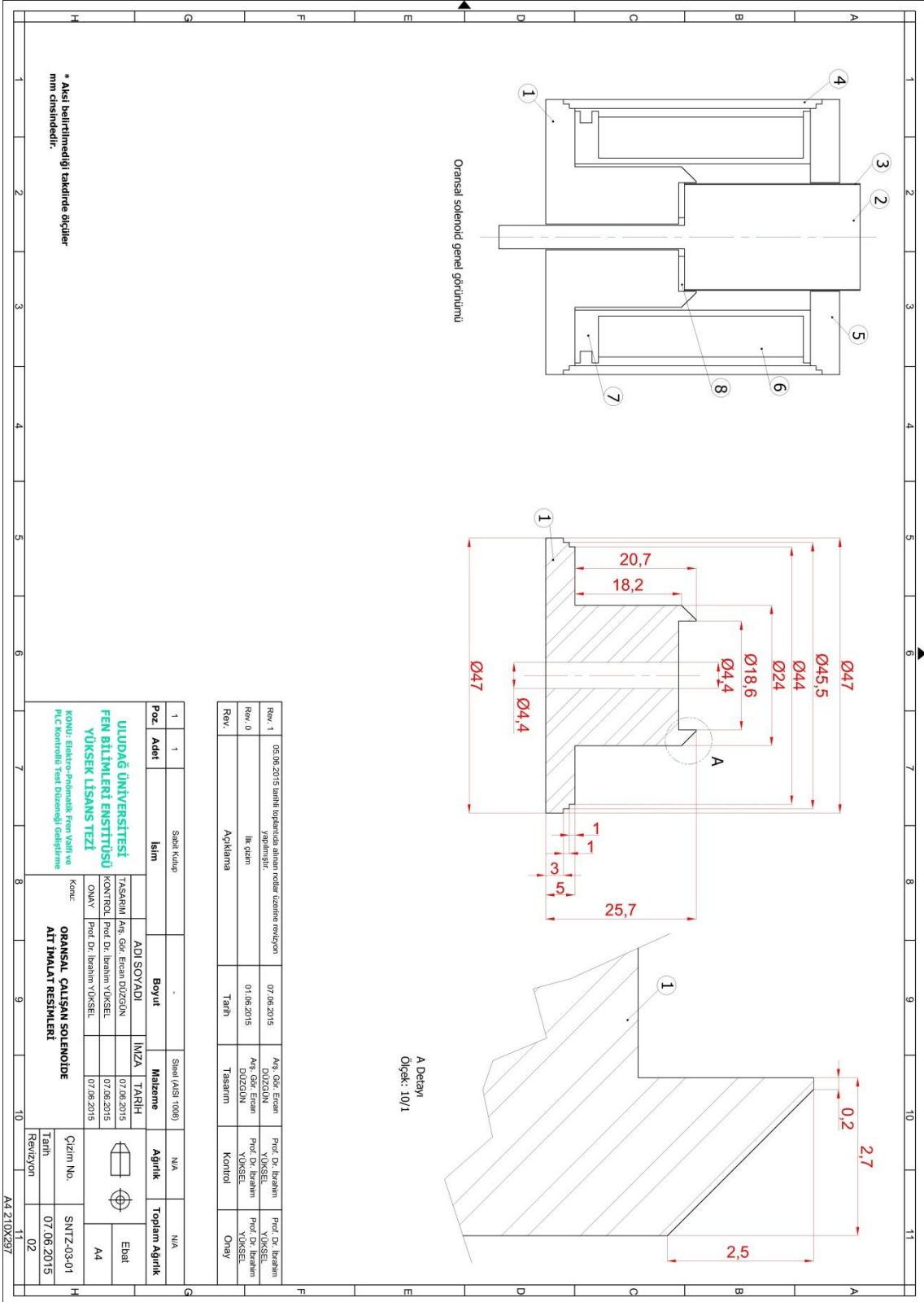
EK 3 Revize Edilen Solenoid Tasarımının Boyutları



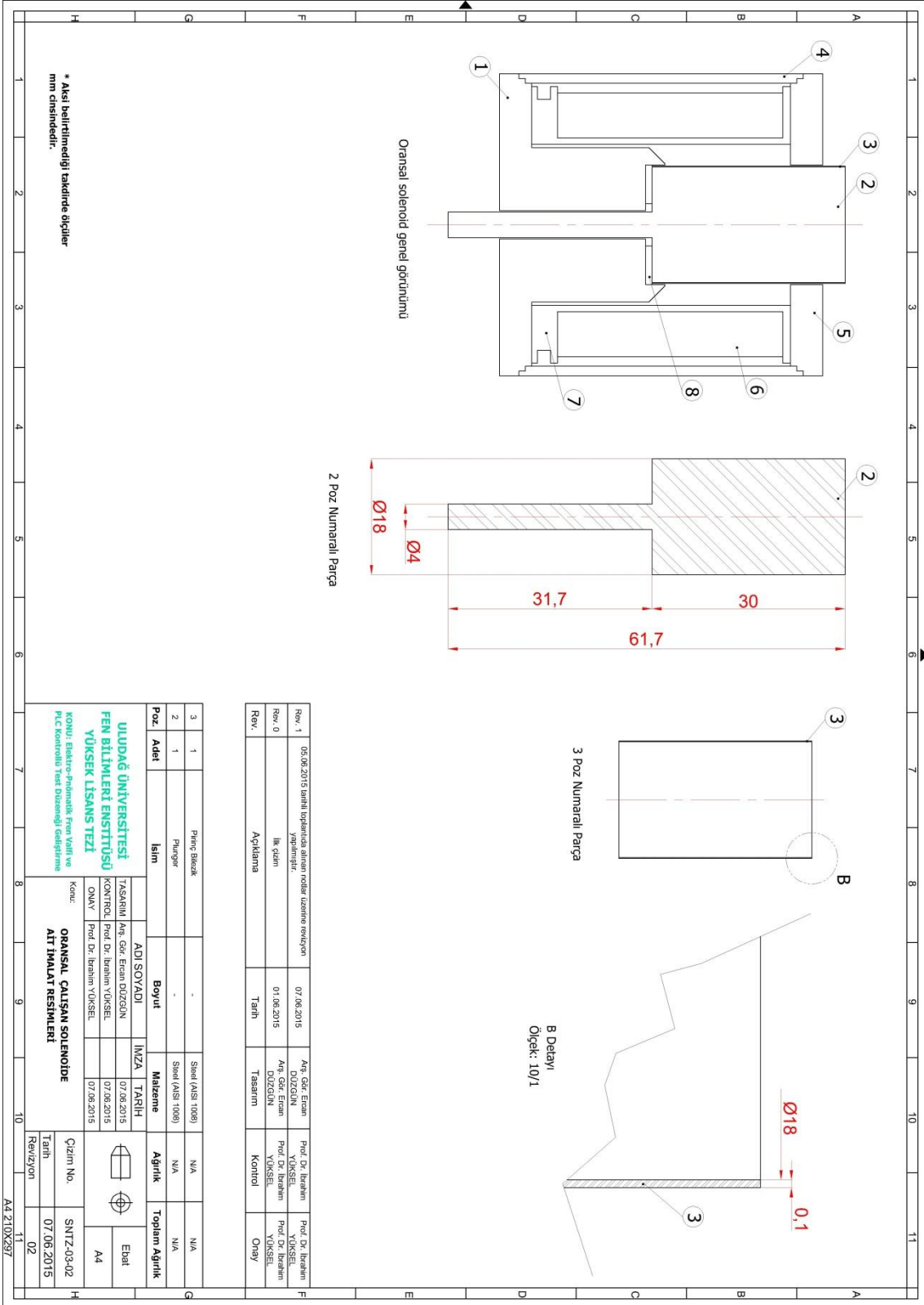
EK 4 Oransal Solenoid İmalat Resimleri-1



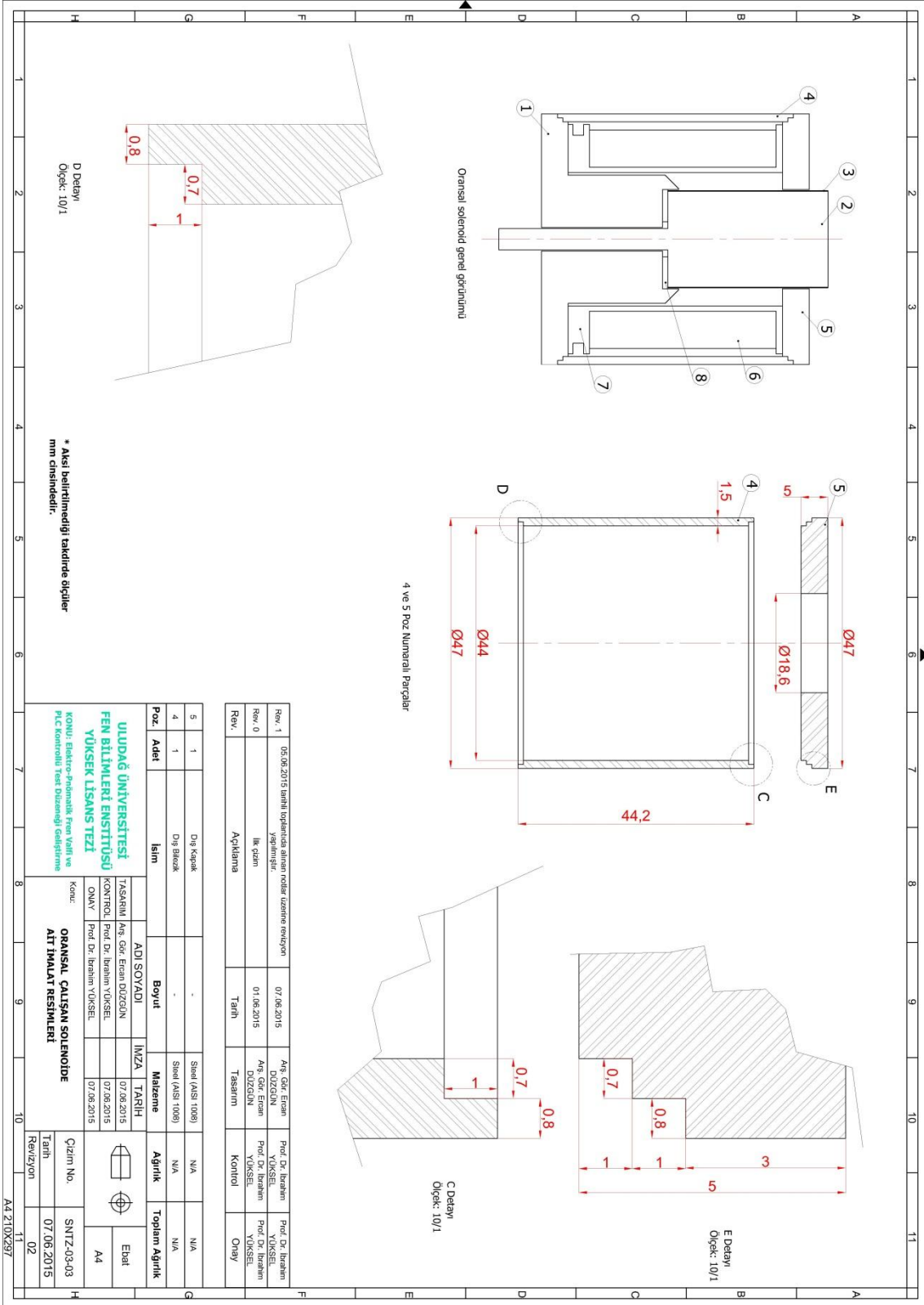
EK 5 Oransal Solenoid İmalat Resimleri-2



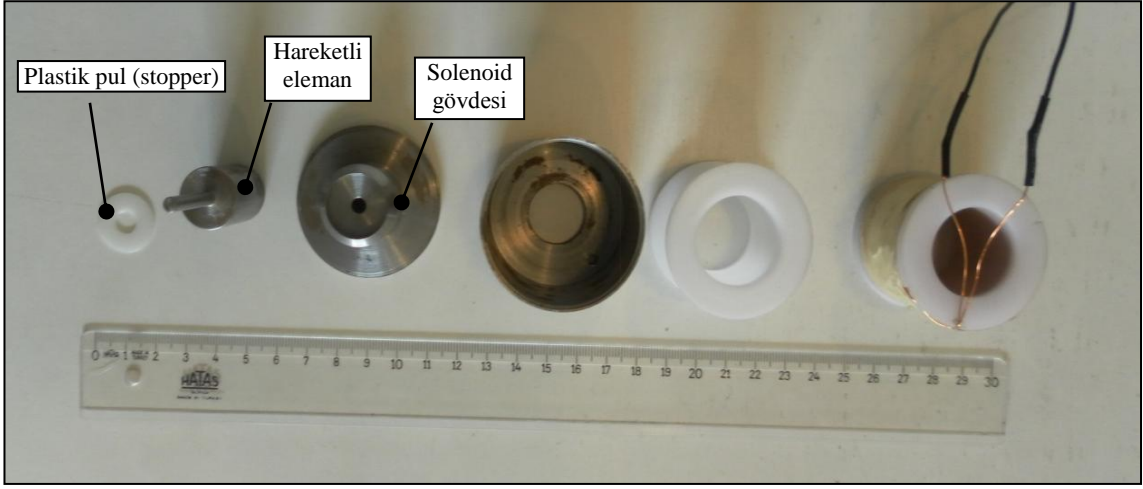
EK 6 Oransal Solenoid İmalat Resimleri-3



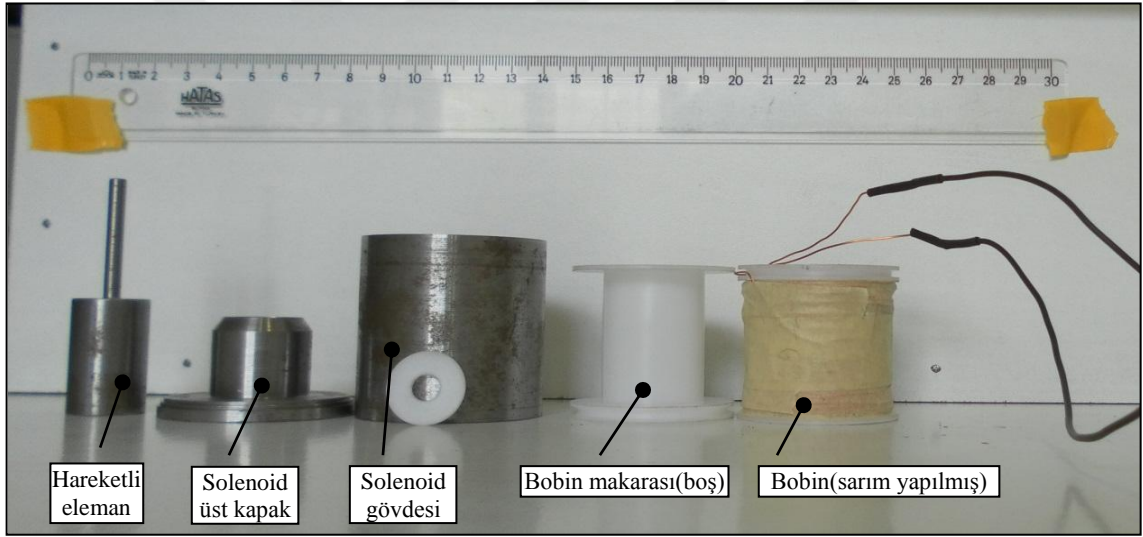
EK 7 Oransal Solenoid İmalat Resimleri-4



EK 10 İmalatı Yapılan Oransal Solenoide Ait Fotoğraflar



Oransal Solenoide Ait Parçalar (Yukarıdan Bakış)




Oransal Solenoide Ait Parçalar (Yandan Bakış)

EK 11 Deneyleerde Kullanılan Konum Algılayıcısına Ait Teknik Özellikler

SPECIFICATIONS		For more information about I/O circuit diagrams and communication specifications of the high-function type, refer to the HL-G1 catalog or our website.							
Item	Type	Diffuse reflection type					Specular reflection type		
	Model No.	Standard type	HL-G103-A-C5	HL-G105-A-C5	HL-G108-A-C5	HL-G112-A-C5	HL-G125-A-C5	HL-G103A-RA-C5	HL-G105A-RA-C5
	High function type	HL-G103-S-J	HL-G105-S-J	HL-G108-S-J	HL-G112-S-J	HL-G125-S-J	HL-G103A-RS-J	HL-G105A-RS-J	HL-G108A-RS-J
Measurement center distance		30 mm 1.181 in	50 mm 1.969 in	85 mm 3.346 in	120 mm 4.724 in	250 mm 9.843 in	26.3 mm 1.035 in	47.3 mm 1.862 in	82.9 mm 3.264 in
Measuring range		±4 mm ±0.157 in	±10 mm ±0.394 in	±20 mm ±0.787 in	±60 mm ±2.362 in	±150 mm ±5.906 in	±2 mm ±0.079 in	±5 mm ±0.197 in	±10 mm ±0.394 in
Resolution		0.5 μm 0.020 mil	1.5 μm 0.059 mil	2.5 μm 0.098 mil	8 μm 0.315 mil	20 μm 0.787 mil	0.5 μm 0.020 mil	1.5 μm 0.059 mil	2.5 μm 0.098 mil
Linearity		±0.1 % F.S.				±0.3 % F.S.		±0.2 % F.S.	
Temperature characteristics		±0.08 % F.S. / °C							
Light source		Red semiconductor laser, Class 2 (Class 1 for specular reflection type) (IEC / JIS / FDA, Laser Notice No. 50) Max. output: 1 mW (0.39mW for specular reflection type) Peak emission wavelength: 655 nm 0.026 mil							
Beam diameter (Note 2)		0.1 × 0.1 mm 0.004 × 0.004 in	0.5 × 1.0 mm 0.020 × 0.039 in	0.75 × 1.25 mm 0.030 × 0.049 in	1.0 × 1.5 mm 0.039 × 0.059 in	1.75 × 3.5 mm 0.069 × 0.138 in	0.1 × 0.1 mm 0.004 × 0.004 in		0.2 × 0.2 mm 0.008 × 0.008 in
Receiving element		CMOS image sensor							
Supply voltage		24 V DC ±10 % including ripple 0.5 V (P-P)							
Current consumption		100 mA max.							
Sampling rate		200 μs, 500 μs, 1 ms, 2 ms							
Analog output	Voltage	Output range: 0 to 10.5 V (normal) / 11 V (at alarm), Output impedance: 100 Ω							
	Current	Output range: 3.2 to 20.8 mA (normal) / 21.6 mA (at alarm), Load impedance: 300 Ω max.							
Output (OUT 1, OUT 2, OUT 3)		Judgment output or alarm output (setting selectable) NPN transistor, open-collector / PNP transistor, open-collector (selectable)							
		<In case of using NPN output> • Maximum sink current : 50 mA • Applied voltage : 3 to 24 V DC (between output and 0 V) • Residual voltage : 2 V or less (at 50 mA of sink current)				<In case of using PNP output> • Maximum source current : 50 mA • Residual voltage : 2.8 V or less (at 50 mA of source current)			
Output operation		Open when the output is ON.							
Short circuit protection		Incorporated (automatic restoration)							
Output polarity setting input		NPN open collector output operates when 0 V is connected. PNP open collector output operates when 24 V DC is connected.							
Timing input		NPN output operates when 0 V is connected and NPN is set (depending on settings). PNP output operates when external power + is connected and PNP is set (depending on settings).							
Multi input		Zero set, zero set off, reset, memory switching, teaching, saving, and laser control according to the input time. In case NPN output is selected, function varies according to the time 0 V is connected NPN. In case PNP output is selected, function varies according to the time external power + is connected.							
Communications interface (high-function type only)		RS-422 or RS-485 (selectable) Baud rate: 9,600 / 19,200 / 38,400 / 115,200 / 230,400 / 460,800 / 921,600 bps Data length 8 bit, stop bit length 1 bit, without parity check, BCC check, termination code: CR							
Indicator	Laser emission	Green LED (lights up during laser emission)							
	Alarm	Orange LED (lights up when this product cannot measure because of insufficient or excessive light intensity)							
	Output	Yellow LED x 3							
Digital display		Red LED 5.5 digit display							
Protection		IP67 (IEC)							
Ambient temperature		-10 to +45 °C +14 to +113 °F (No dew condensation), Storage: -20 to +60 °C -4 to +140 °F (No dew condensation)							
Material		Enclosure: PBT, front cover: acrylic, cable: PVC							
Cable		Standard type: 0.1 mm ² 10-core cabtyre cable, 5 m 16.404 ft long, high functionality type: 14-core cabtyre cable with connector, 0.5 m 1.640 ft long							
Cable extension		Extension up to total 20 m 65.617 ft is possible with optional cable (Cable for standard type cannot be extended).							
Weight	Standard type	Net weight: 70 g approx. (not including cable), 320 g approx. (including cable), gross weight: 380 g approx.							
	High functionality type	Net weight: 70 g approx. (not including cable), 110 g approx. (including cable), gross weight: 160 g approx.							
Accessory		Warning label: 1 set							

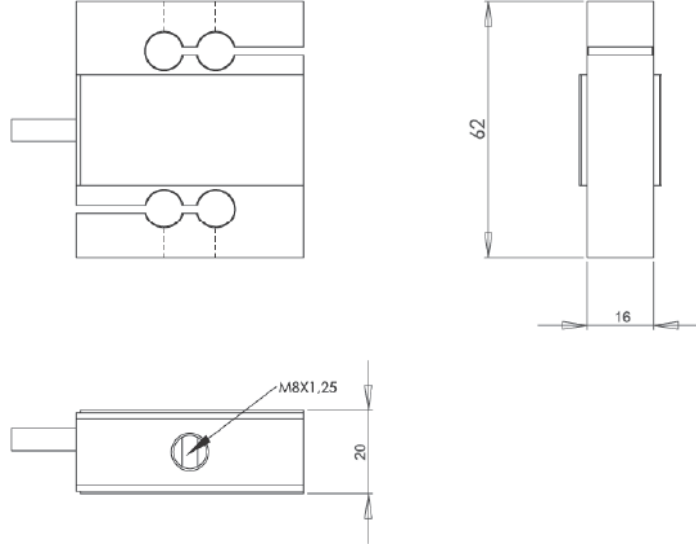
Notes: 1) Where measurement conditions have not been specified precisely, the conditions used were as follows: supply voltage 24 V DC, ambient temperature +20 °C +68 °F, sampling rate 500 μs, average number of samples: 1024, measurement center distance, object measured is made of white ceramic and analog measurement values.
2) This beam diameter is the size at the measurement center distance. These values were defined by using 1/e² (13.5 %) of the center light intensity. The results may be affected if there is a slight leakage of light outside the normal spot diameter and if the periphery surrounding the sensing point has a higher reflectivity than the sensing point itself.

OPTIONS

Type	Appearance	Model No.	Description
Extension cable (for High function type)		HL-G1CCJ2	Length: 2 m 6.562 ft, Weight: 130 g approx.
		HL-G1CCJ5	Length: 5 m 16.404 ft, Weight: 320 g approx.
		HL-G1CCJ10	Length: 10 m 32.808 ft, Weight: 630 g approx.
		HL-G1CCJ20	Length: 20 m 65.617 ft, Weight: 1300 g approx.

EK 12 Deneyleerde Kullanılan Yük Hücreesine Ait Teknik Özellikler

STA SERIES LOADCELL
CAPACITY 20-50-100-200 KG



TEKNİK ÖZELLİKLER • TECHNICAL SPECIFICATIONS

STA SERIES

Model	Type	STA	
Doğruluk Sınıfı	Accuracy class	C1	C3
Kapasite (kg)	Capacity / Emax (kg)	20-50-100-200	
En Düşük Yük (% R.O)	Minimum dead load (% R.O)	0	
Çıkış Sinyali (mV/V)	Rated output (mV/V)	2,0	
En Yüksek Bölüntü Sayısı	Maximum number of load cell interval Nmax	1000	3000
En Küçük Ölçüm Sayısı	Vmin	Emax/4000	Emax/10000
Y Değeri	Emax / Vmin	4000	10000
Sıfır Değerine Dönüş Hatası (%R.O)	Minimum dead load output return (%R.O)	<±0,0500	<±0,0167
Sıfır Değeri (%R.O)	Zero balance (%R.O)	±1	
Sıfır Değerine Sıcaklığın Etkisi (%R.O/5°C)	Temperature effect on zero (%R.O/5°C)	<±0,0070	
Yükte Çıkış Değerine Sıcaklığın Etkisi (%R.O/5°C)	Temperature effect on output (%R.O/5°C)	<±0,0055	
Düzeltilmiş Sıcaklık Aralığı (°C)	Compensated temperature range (°C)	-10 /+40	
Çalışma Sıcaklık Aralığı (°C)	Temperature range safe (°C)	-30 /+70	
En Yüksek Güvenli Yük Miktarı (%R.O)	Maximum safe central overload (%R.O)	150	
Kırılma Yükü Miktarı (%R.O)	Ultimate central overload (%R.O)	300	
Besleme Gerilimi (V)	Excitation (V)	5	
Giriş Direnci (Ω)	Input impedance (Ω)	380±20	
Çıkış Direnci (Ω)	Output impedance (Ω)	350±3	
İzolasyon Direnci (MΩ)	Insulation resistance (MΩ)	>1000	
Yük Hücresi Malzemesi	Construction	eloksallı alüminyum alaşım anodized aluminium alloy	
Koruma Sınıfı	Environmental protection	IP65	
Kablo Tipi	Cable type	4x0,22 mm.	
Kablo Boyu	Cable length	5 m.	

EK 13 Deneylerde Kullanılan Veri Toplama Kartına Ait Teknik Özellikler

Analog Girişler	
Kanal sayısı	8 farklı veya 16 tek çıkışlı
ADC çözünürlüğü	16 bits
Örnekleme zamanı	
	Tek kanal maksimum 250kS/s Çok kanallı maksimum 250kS/s Minimum minimum yok
Zamanlama hassasiyeti	Örnekleme zamanının 50ppm'si
Zamanlama çözünürlüğü	50ns
Giriş	DC
Giriş aralığı	0.2V, 1V,5V, 10V
Analog girişler için maksimum çalışma voltajı	+11V
Analog Çıkışlar	
Kanal sayısı	2
DAC çözünürlüğü	16 bits
Maksimum yenileme oranı	Tek kanal 833 kS/s İki kanal 740 kS/s (her kanalda)
Çıkış aralığı	10V
Çıkış	DC
Çıkış impedansı	0,2 ohm
Çıkış akımı	5mA

EK 14 Look-up Table Değerlerini Oluşturan MATLAB Programı Kodları

```
%Look-up table için akım değerlerini oluşturan MATLAB programı
```

```
R=5; %ohm
```

```
e=8; %voltage
```

```
m=0.063; %kg
```

```
xb=3; %başlangıç değeri
```

```
x1=[0:0.1:6];
```

```
%x=[3.5:-0.1:0];
```

```
i1=[0:0.1:4];
```

```
flx=[... ..];  
.....  
.....];
```

```
lmd=flx';
```

```
for l=1:120;
```

```
    lx(l)=l*.05;
```

```
    for h=1:44;
```

```
        hLg(h)=h*0.01-0.01;
```

```
        for k=1:length(x1)-1
```

```
            if lx(l)>=x1(k) & lx(l)<x1(k+1)
```

```
                lmdh=[lmd(:,k) lmd(:,k+1)];
```

```
%                lmde=interp2([x(k) x(k+1)],i',[lmd(:,k) lmd(:,k+1)],lx,i');
```

```
                lmde=interp2([x1(k) x1(k+1)],i1,lmdh,lx(l),i1);
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    for t=1:length(i1)-1
```

```
        if hLg(h)>=lmde(t) & hLg(h)<=lmde(t+1)
```

```
            ie(l,h)=interp1(lmde,i1,hLg(h));
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
lx_yeni=4-lx+0.05;
```

```
%-----
```

```
%kuvvet
```

```
% Force - Current - airgap 3D MATLAB
```

```
xf=[0:0.1:6]; %hava aralığı
```

```
yf=[0:0.1:4.5]; %akım
```

```
Fm=[... ..];  
.....  
.....];
```

```
Fm(:,1)=[];
```

```
Fm=Fm';
```

```
surf(xf,yf,Fm);
```

```
xlabel({'s Hava aralığı [mm]'},'FontSize',14,'FontWeight','bold','Color','black');
```

```
ylabel({'I Akım [Amper]'},'FontSize',14,'FontWeight','bold','Color','black');
```

```
zlabel({'F miknatıs kuvveti[N]'},'FontSize',14,'FontWeight','bold','Color','black');
```

```
%axis([0 3.5 0 1.5 0 350])
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Ercan DÜZGÜN

Doğum Yeri ve Tarihi :Fatih / 1988

Yabancı Dili :İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise :Öğretmen Eyüp Topçu Anadolu Lisesi / 2006

Lisans :Eskişehir Osmangazi Üniversitesi – Makine
Mühendisliği / 2011

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl :Karbonsan Basınçlı Kaplar San. ve Tic. A.Ş./2012-2014

:Orakçı Makine San. Ve Tic. A.Ş. / 2014-2015

:Uludağ Üniversitesi /2015-Devam

İletişim(e-posta) :eduzgun@uludag.edu.tr

Yayımları :