

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROMANYETİK AÇICININ BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
ÖLÇÜMÜ, SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE
KARAKTERİSTİĞİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KESTİRİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahammadkhan GULİYEV

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

ARALIK 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROMANYETİK AÇICININ BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
ÖLÇÜMÜ, SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE
KARAKTERİSTİĞİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KESTİRİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahammadkhan GULİYEV

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

ARALIK 2022

Mahammadkhan GULIYEV tarafından hazırlanan “Elektromanyetik Açıcının Bazı Fiziksel Özelliklerinin Ölçümü, Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi Ve Karakteristiğinin Makine Öğrenmesi İle Kestirimi” adlı tez çalışması 02.12.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı’nda (varsa) Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç. Dr. Reşat MUTLU**
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Gökçen ÇETİNEL**
Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ELEKTROMANYETİK AÇICININ BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ, SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE KARAKTERİSTİĞİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KESTİRİMİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(02.12.2022)

Mahammadkhan GULIYEV



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, bana hep destek olan ve çalışmamın tamamlanmasında büyük emeği olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan, yardımını esirgemeyen Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi'nden değerli hocam Doç. Dr. Reşat MUTLU'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar için bana gerekli imkanları sağlamış olan SMS-TORK firmasına, AR-GE ekibinden Ahmet ÖZKAYA'ya ve diğer tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca her zaman bana desteklerini sunan, zor günlerimde maddi ve manevi yanımda olan, dedelerim Hacı Abdulxalıq QULİYEV'e, Prof. Dr. Ali QULİYEV'e, ve tüm aileme teşekkürü borç bilirim.

Mahammadkhan GULİYEV



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Elektromanyetik Açıcı.....	1
1.2. Solenoid Açıcı ile İlgili Çalışmaların Bir Özeti	2
1.3. Tezin Amacı ve Organizasyonu.....	4
2. ELEKTROMANYETİK AÇICININ YAPISI, DEVRE EŞDEĞERİ VE DURUM UZAY MODELİ	7
2.1. Elektromanyetik Açıcı.....	7
2.1.1. Direkt çekmeli açıcı.....	8
2.1.2. Pilot kontrollü açıcı	8
2.2. Solenoid Açıcıların Manyetik ve Elektriksel Devre Analizi	9
2.3. Elektromanyetik Açıcının Durum Uzay Modeli	20
3. SİMETRİK SİLİNDİRİK VALFİN YAPISI VE DENEYSEL OLARAK ELDE EDİLEN ÇALIŞMA KARAKTERİSTİĞİ	27
3.1. Elektromanyetik Açıcının Yapısı ve Sahip Olduğu Bileşenler.....	27
3.1.1. Nüve	28
3.1.2. Solenoid bobin.....	29
3.1.3. Piston.....	29
3.2. Deneysel Düzenekler ve Ölçümler.....	31
3.3. Elektromanyetik Açıcıların Yay Sabiti Ölçümleri.....	32
3.4. Elektromanyetik Açıcıların Akımının ve Çekme Süresinin Ölçümü	36
4. COMSOL PROGRAMI KULLANILARAK ELEKTROMANYETİK AÇICININ MODELLENMESİ	41
4.1. COMSOL Multiphysics Programında Çözüm ve Analiz Altyapısı.....	41
4.2. Simetrik Silindirik Valfin COMSOL Multiphysics ile Modelleme Aşamaları ...	42
4.2.1. Uygun fizik ve çalışma altyapısının hazırlanması.....	42
4.2.2. Materyal seçimi	43
4.2.3. Pistonun hareketi	43
4.2.4. Elektromanyetik alanın benzetimi.....	44
4.2.5. Lineer hareketin benzetimi	44

4.3. Benzetim Sonuçları	48
4.3.1. Farklı akım değerleri için EMA 1'in benzetim sonuçları.....	48
4.3.2. Farklı hareket mesafeleri için Cromecore-13XP malzemesinin benzetim sonuçları.....	51
4.3.3. Farklı akım değerleri için EMA 2'nin benzetim sonuçları.....	54
4.3.4. Farklı hareket mesafeleri için 430F malzemesinin benzetim sonuçları ..	57
4.4. COMSOL Multiphysics Benzetim Sonuçlarından Endüktans ve Manyetik Akının Hesaplanması	61
5. MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI KULLANILARAK SİMETRİK SİLİNDİRİK VALFİN ÇALIŞMA KARAKTERİSTİĞİNİN ELDE EDİLMESİ	63
5.1. Çalışma Karakteristiğinin Elde Edilmesine Yönelik Makine Öğrenmesi Yöntemleri	63
5.2. Akım ve Yer Değiştirme Karakteristiğinin Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi ..	65
5.2.1. Temel YSA yapısı ve bileşenleri	65
5.2.2. Yapay sinir ağının avantajları ve dezavantajları.....	66
5.2.3. Tezde kullanılan YSA modeli	66
5.2.4. Levenberg-Marquardt algoritması.....	67
5.2.5. Regresyon.....	68
5.3. Açıcının Ölçüm ve Benzetiminden Alınan Verilerin Yapay Sinir Ağı ile Eğitilmesi Başarım Analizi.....	69
5.3.1. Açıcı verilerinin yapay sinir ağı ile eğitilmesi.....	69
5.3.2. Verilerin analizi	70
5.3.3. Model eğitimi	71
5.3.4. Hataların karesinin ortalamasının karekökü.....	74
5.3.5. Yapay sinir ağı kullanılarak ölçüm ve benzetim sonuçları için akım ve pistonun aldığı yol karakteristiklerinin tahmini.....	74
5.4. Elektromanyetik Açıcının Çekme Karakteristiğinden Piston Tipinin Destek Vektör Makineleri ve Yapay Sinir Ağı Yöntemi ile Belirlenmesi	78
6. SONUÇ	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	91

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım (AC – Alternating Current)
DAE	: Diferansiyel Cebirsel Denklemler (Differential Algebraic Equations)
DA	: Doğru Akım (DC – Direct Current)
DVM	: Destek Vektör Makinesi (SVM – Support Vector Machine)
GBSA	: Geri Beslemeli Sinir Ağı
İBSA	: İleri Beslemeli Sinir Ağı
ODE	: Adi Diferansiyel Denklem (Ordinary Differential Equation)
PDE	: Kısmi Diferansiyel Denklemler (Partial Differential Equations)
RMSE	: Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü (Root Mean Squared Error)
RMSPE	: Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökünün Yüzdesi (Root Mean Squared Percentage Error)
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi (FEA – Finite Element Analysis)
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM – Finite Element Method)
SSV	: Simetrik Silindirik Valf
YSA	: Yapay Sinir Ağı (ANN – Artificial Neural Network)



SİMGELER

A	: Alan
a	: İvme
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
β_1	: Regresyon katsayısı
C	: Kapasitans
E	: Elektrik Alanı
ε	: Hata değeri
Φ	: Manyetik akı
F_m	: Toplam çekme kuvveti
F_{Hooke}	: Hooke kuvveti
F_D	: Sürtünme kuvveti
F_w	: Hareket doğrultusundaki ağırlık bileşeni
H	: Manyetik alan
I	: Akım
J	: Akım yoğunluğu
k	: Yay sabiti
λ	: Manyetik akı dolanımı
L	: Endüktans
l	: Uzunluk
l_i	: Patika uzunluğu
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik
m	: Kütle
N	: Sarım sayısı
p	: Pistonun hareket etme mesafesi
ζ	: Sistemin sönümleme sabiti
r	: Bobinin çapı
R	: Direnç

R_i	: Relüktans
S	: Alan
t	: Zaman
U	: Gerilim
v	: Hız
X	: Bağımsız değişken
Y	: Bağımlı değişken
W_m	: Toplam enerji
W_{ko}	: Koenerji



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Solenoid açıcının temel parçaları ve yapıldığı malzemeler.	28
Tablo 3.2. SSV pistonu için kullanılan yaylara etki eden kuvvet ve yayın konumu.	34
Tablo 3.3. Yaylar için hesaplanmış yay sabiti ve referans kuvvet değerleri.	34
Tablo 3.4. Yay 1 kullanılarak EMA 1'in farklı hareket etme mesafelerinde ve gerilimlerde açıcının çekme süreleri [ms].	38
Tablo 3.5. Yay 1 kullanılarak EMA 2'nin farklı hareket etme mesafelerinde ve gerilimler de açıcının çekme süreleri [ms].	39
Tablo 4.1. COMSOL simülasyonunda kullanılan parametreler.	47
Tablo 5.1. Veri setinde giriş ve çıkış için kullanılan parametreler.	70
Tablo 5.2. DVM eğitimi sonuçları.	79
Tablo 5.3. Doğruluk, Duyarlılık, Kesinlik Sonuçları.	81



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Temel bir solenoid açıcının parçaları[1].	8
Şekil 2.2. Direkt çekmeli solenoid vana [29].	8
Şekil 2.3. Pilot kontrollü solenoid açıcının yapısı [29].	9
Şekil 2.4. Hava aralıklı bir bobinin oluşturduğu manyetik alan dağılımı.	10
Şekil 2.5. Elektromanyetik açıcının manyetik devresi.	11
Şekil 2.6. Elektromanyetik açıcının eşdeğer elektrik devresi.	16
Şekil 2.7. λ -I eğrisi üzerindeki tipik bir akım değerindeki manyetik enerji ve koenerji [3].	18
Şekil 2.8. Solenoid açıcının çalışmasının blok diyagramı.	21
Şekil 2.9. Genel bir elektromanyetik açıcının çalışma durumları a) Açıcının açık pozisyonu; b) Açıcının hareket etme anındaki pozisyonu; c) Açıcının kapalı pozisyonu.	21
Şekil 2.10. Endüktanslı sırf konuma bağlı bir EMA'nın blok diyagramı.	24
Şekil 2.11. Endüktanslı hem konuma hem de akıma bağlı bir EMA'nın blok diyagramı.	25
Şekil 3.1. Simetrik silindirik valf.	28
Şekil 3.2. Simetrik silindirik valfin manyetik nüvesi.	29
Şekil 3.3. Simetrik silindirik valfta kullanılan C50 tipli solenoid bobin.	29
Şekil 3.4. EMA'nın Pistonu.	30
Şekil 3.5. Chromecore13-XP malzemesinin B-H eğrisi.	30
Şekil 3.6. Pistonun hareket etme mesafesini azaltmak için kullanılan teflon parçalar.	32
Şekil 3.7. Yay sabitinin ölçülmesinde kullanılan dinamometre.	33
Şekil 3.8. Kullanılan üç farklı SSV için yaya uygulanan kuvvetin okunan yay konumuna göre değişimi grafiği.	35
Şekil 3.9. EMA 1 ve EMA 2 için farklı yaylarda çekme sürelerinin karşılaştırılması: a)Yay 1; b) Yay 2; c) Yay 3.	36
Şekil 3.10. Genel bir EMA'nın çekme karakteristiği.	37
Şekil 3.11. Simetrik silindirik valfin çekme süresi.	38
Şekil 3.12. Yay 1 kullanılarak farklı gerilim değerlerinde EMA 1'in çekme süresinin pistonun hareket mesafesine göre değişimi.	39
Şekil 3.13. Yay 1 kullanılarak farklı gerilim değerlerinde EMA 2'nin çekme süresinin pistonun hareket mesafesine göre değişimi.	40
Şekil 4.1. Genel bir elektromanyetik açıcının kesilmiş 3D ve 2D eksenel simetrik görünümü.	42

Şekil 4.2. COMSOL Multiphysics programında modelleme ve simülasyon için kullanılan sekmeler.	43
Şekil 4.3. COMSOL Multiphysics programında <i>Materials</i> sekmesi.	43
Şekil 4.4. <i>Magnetic Fields</i> sekmesi.	44
Şekil 4.5. Açıcının hareketli ve hareketsiz kısımları a) Hareketli ve sabit kısmı ayıran sınır (kırmızı çizgi); b) Hareketli kısım; c) Sabit kısım.	45
Şekil 4.6. <i>Events</i> kutusu.	46
Şekil 4.7. Global ODEs and DAEs sekmesi ve açıcının hareket denklemlerinin eklenmesi.	47
Şekil 4.8. Elektromanyetik açıcının ağ yapısı oluşturulması: a) <i>Mesh</i> sekmesi; b) EMA'nın ağ yapısı.	47
Şekil 4.9. Benzetim kontrolleri a) <i>Study</i> ve <i>Results</i> sekmeleri; b) <i>Step1: Time Depent</i> sekmesi.	48
Şekil 4.10. EMA 1 için farklı akım değerlerinde gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.	49
Şekil 4.11. EMA 1 için farklı akım değerlerinde pistonun aldığı yol karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.	50
Şekil 4.12. EMA 1 için farklı akım değerlerinde çekme hızı karakteristiği.	51
Şekil 4.13. EMA 1 için pistonun farklı konumlarında gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.	52
Şekil 4.14. EMA 1 için pistonun farklı konumlarında manyetik kuvvet (F_m) karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.	53
Şekil 4.15. EMA 2 için pistonun farklı konumlarında çekme hızı karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.	54
Şekil 4.16. EMA 2 için farklı akım değerlerinde gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.	55
Şekil 4.17. EMA 2 için farklı akım değerlerinde pistonun aldığı yol karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.	56
Şekil 4.18. EMA 2 için farklı akım değerlerinde çekme hızı karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.	57
Şekil 4.19. EMA 2 için farklı konumlarda gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.	58
Şekil 4.20. EMA 2 için farklı konumların manyetik kuvvet (F_m) karakteristiğine etkisi.	59
Şekil 4.21. EMA 2 için farklı konumların çekme hızı karakteristiğine etkisi.	60
Şekil 4.22. COMSOL Multiphysics programında benzetim sonucunda elde edilmiş sonuç verileri.	61
Şekil 4.23. EMA 1 için: a) Manyetik akı dolanımı, b) Endüktans.	62
Şekil 4.24. EMA 2 için: a) Manyetik akı dolanımı, b) Endüktans.	62
Şekil 5.1. a) Biyolojik nöron; b) yapay nöron; c) biyolojik sinaps; d) YSA sinapsları [55].	65
Şekil 5.2. İBSA ağ yapısı modeli.	67
Şekil 5.3. Veri seti.	70
Şekil 5.4. Eğitim, test ve doğrulama verinin kullanımı.	71

Şekil 5.5. YSA eğitim aracı.....	71
Şekil 5.6. Levenberg-Marquardt algoritması sonucu.....	72
Şekil 5.7. Epoch sayısının karesel ortalama hata performansı.....	72
Şekil 5.8. Yapay sinir ağı performansı.	73
Şekil 5.9. Neural Fitting penceresi.....	75
Şekil 5.10. EMA 1 için ölçüm ve model karşılaştırması: a) 18V, b) 20V, c) 22V, d) 24V, e) 28V.	76
Şekil 5.11. Numune ve model için hata analizi: a) EMA1 b) EMA2.	77
Şekil 5.12. Pistonun aldığı yolun benzetim ve model karşılaştırması: a) EMA 1; b) EMA 2.	77
Şekil 5.13. Benzetim için hata analizi: a) EMA1 b) EMA2.	78
Şekil 5.14. MATLAB Classification Learner araç kutusunda veri setinin eklenmesi.	79
Şekil 5.15. EMA'nın çekme süresi karakteristiğinden yararlanarak piston tipinin DVM sınıflandırılması sonucu elde edilmiş konfüzyon matrisi.....	80



ELEKTROMANYETİK AÇICININ BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ, SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE KARAKTERİSTİĞİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE KESTİRİMİ

ÖZET

Elektromanyetik açıcılar, sanayide, günlük hayatta karşılaşılan ve sık kullanılan cihazlardan biridir. Bu cihazlar sıvı, gaz ve yağ gibi akışkanları kontrol etmek için kullanılmaktadır. Sıvı geçişlerini kontrol etmek için açıcıların basıncı, debisi, çekme süresi, elektromanyetik açıcının boyutu, bobin, ve kullanılan manyetik malzemeler önem teşkil etmektedir. Bu parametreler tasarımın fiziksel büyüklüklerine, kullanılan malzemenin tipine, çalışma akımına, kullanılan bobine göre farklı değerlere sahip olmaktadır. Bu çalışmada tasarım özellikleri bilinen bir elektromanyetik açıcı kullanılarak mekanik ve elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda cihazın yay sabiti ve çekme süresi ölçülmüştür. Yay sabitini ölçmek için dinamometre kullanılmıştır. Daha sonra ise elektriksel ölçüm için osiloskop kullanılmış ve açıcının çekme süresi belirlenmiştir. Elektromanyetik açıcının mekanik özellikleri (boyutu, yay sabiti) ve elektriksel akımın zamana göre değişimi açıcının çekme süresine etki etmektedir. Elektromanyetik açıcı farklı gerilimlerde ve pistonun farklı çekme mesafelerinde çalıştırılarak çekme süresi ölçülmüştür. Daha sonra Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) temelli çözümleyicilere sahip COMSOL Multiphysics programı ile açıcının benzetimi gerçekleştirilerek çalışma karakteristiği verileri alınmıştır. Yapılan benzetim ile açıcının çalışma karakteristiğinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Benzetimlerle pistonun yer değişmesi, hızı, endüktans ve manyetik akı değişkenleri zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Açıcıda ölçüm ile elde edilen gerilim ve pistonun farklı hareket etme mesafeleri kullanılarak Yapay Sinir Ağı (YSA) eğitimi gerçekleştirilmiş ve akım karakteristiğinin tahmini yapılmıştır. Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü yöntemi kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan eğitimler sonucunda %2 – %5 aralığında hata oranı bulunmuştur. Ölçüm sırasında pistonun hızı ve yer değişmesi doğrudan belirlenemediğinden COMSOL Multiphysics programındaki benzetimler ile bu karakteristikler belirlenmiştir. Model sonuçları temel alınarak yapılan YSA eğitimleri ile söz konusu büyüklükler %3 – %6 arasında hata oranı ile tahmin edilmiştir. İki farklı manyetik karakteristikli nüveye sahip elektromanyetik açıcının çekme süresi ölçümleri yapılmış ve bu nüvelerin karakteristiğinin açıcının çekme süresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ölçülen çekme süresi ve uygulanan gerilim kullanarak kullanılan piston malzemesinin tipinin tahmin edilebileceği görülmüştür. Piston malzemesinin tahmin edilmesi ve sınıflandırılması için destek vektör makineleri ve yapay sinir ağları eğitim yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan eğitimler sonucunda performans değeri %91 olarak elde edilmiştir.



MEASUREMENT OF SOME PHYSICAL PROPERTIES OF AN ELECTROMAGNETIC PLUNGER, ITS ANALYSIS WITH FINITE ELEMENT METHOD, AND ESTIMATING THE CHARACTERISTIC USING MACHINE LEARNING

SUMMARY

Electromagnetic plungers (EMP) are electromechanical structures that convert electrical energy into mechanical movement. They work by applying electrical energy to control the motion of a plunger through the use of solenoid coils. Because of this, EMPs are also known as solenoid valves or solenoids. The term "solenoid" comes from the Greek words "solen" meaning pipe, and "eidos" meaning shape. An EMP consists of a coil wound around a ferromagnetic core, a plunger, and a spring. When an electrical current is applied to the coil, it generates a magnetic field that pulls the plunger, creating a linear displacement movement. If an electromechanical system rotates as a result of energy conversion, it is referred to as an electric motor, whereas if it creates a linear displacement movement, it is called an electromagnet. When the electrical current is removed, the spring returns the plunger to its original position.

Valves are devices that offer several advantages in the automation applications, such as fast and safe switching, a long lifespan, and compatibility with the materials used in the environment. Valves are primarily used to control the flow of fluid, including liquids, air, and gas. They are frequently used in irrigation systems in gardens, appliances like washing machines or dishwashers, and in the pneumatic or hydraulic industrial fields, as well as in the automotive and space industries. Important parameters for controlling fluid flow include pressure, flow rate, and retraction time, which vary depending on factors such as the design's physical dimensions, the type of material used, the working flow, and the coil used.

In electromagnetic actuators, the moment when the plunger opens and allows the fluid to flow through the pipe is referred to as the open the orifice,. This opening coincides with the moment of retraction, hence it is also known as the retraction time. The pull-in time of a solenoid valve has been influenced by several factors such as the valve design, its size, the strength of the solenoid, and the amount of electrical current applied.

Solenoid valves can be categorized into two types based on their mode of operation: pilot-controlled and direct-acting solenoid valves. In direct-acting solenoid valves, a plunger is directly pulled by the solenoid. When electric current is applied, the plunger is pulled by the solenoid and the valve opens. The plunger has been used to allow fluid to pass through pipes. Pilot-controlled solenoid valves are controlled by a pilot valve. The pilot is the control element inside the valve. This control element has been used to control the function of the valve. Pilot-controlled solenoid valves are generally used to control parameters such as ambient temperature, pressure, or flow rate.

In this study, two electromagnetic plungers with defined design properties have been used to determine their mechanical and electrical properties. The actuator plungers have been fabricated from various materials with varying magnetic permeability. The spring constant was measured with a dynamometer and the pull-in time was determined with an oscilloscope. The pull time was affected by changes in the mechanical properties and electrical current over time, and was measured at different voltages and plunger pull distances. Measurements have been repeated at 6 different voltages and 5 different displacement distances.

Finite element method (FEM) - based programs have been widely used to avoid costly and unnecessary options when creating electromagnetic plunger models, to shorten the design process and conduct accurate analyses. Analyses performed using these programs have been known as finite element analysis (FEA) techniques. Simulations have been performed using the COMSOL Multiphysics program and a FEM-based solver to preserve actuator motion properties. The simulation was performed according to real measurement conditions in this program. The aim has been to obtain the working characteristic of the actuator through the simulation. In these simulations, the displacement, velocity, inductance, and magnetic flux density variables of the plunger were calculated. The Artificial Neural Network (ANN) has been trained using the voltage obtained during the measurement and various movement distances of the piston, and the estimated current characteristic has been calculated. All measurements and simulations have been performed out for 2 EMPs. The results were evaluated using the Root Mean Square Error method. In the estimations made for the measurement results, the error rate was found in the range of 2% – 5%. Since the velocity and displacement of the plunger could not be directly determined during the measurement, these variables were determined by simulation. The determined variables have been trained using an ANN and the displacement of the plunger was estimated. The error rate of 3% - 6% was calculated for the simulation results. The pull-in time of two electromagnetic actuators with different magnetic characteristics have been measured, and the effects of these characteristics on the pull-in time of the actuator have been investigated. It has been shown that the type of core material used can be estimated based on the measured pull-in time and applied voltage. Data for plunger material estimation has been trained on both support vector machines and artificial neural networks to classify material types. The input data for classification, including time, voltage, current, the spring used, and solenoid coil power used, has been entered into the system. Confusion matrices have been obtained to assess the accuracy of the classification results, and the accuracy, sensitivity, and specificity indices have been measured. As a result of the classification study, 91% success have been achieved.

It has been determined that EMP is more efficient with shorter pull-in-time. Research in this area has also been conducted in literature. In this study, electrical and mechanical measurements have been performed using two different magnetic-characteristic plungers, which is different from the literature. The simulation of the actuator has been carried out in the COMSOL Multiphysics program, and the training has been performed using machine learning algorithms, based on the reviewed literature.

In the second section of the thesis, general information about electromagnetic actuators has been provided, along with the electromagnetic model and state space equations of the plunger. In the third section, the structure of the electromagnetic actuator used in the study is analyzed, and the experimentally obtained inductance value of the actuator

and its current characteristics are presented. Measurements have been performed using two different magnetic plunger samples. In the fourth section of the thesis, modeling and simulation of the electromagnetic actuators used in the study have been carried out using the COMSOL Multiphysics program. In the fifth section, the results of the measurement and simulation have been trained using machine learning algorithms, and various estimations have been made. The measurement and simulation results have been trained with ANN, and the current characteristic of the opener and the distance traveled by the piston have been estimated. The mean square error method has been used to carry out the error analysis. Subsequently, the classification of two different magnetic piston samples was performed using support vector machine and artificial neural network methods. The thesis has been concluded with the results section.





1. GİRİŞ

1.1. Elektromanyetik Açıcı

Elektromanyetik açıcılar (EMA) elektromekanik yapılardır. Elektrik ve mekanik enerji dönüşümü yapmakta ve birbiriyle senkron şekilde çalışmaktadır. Bu cihaz elektrik enerjisini kullanarak mekanik hareketi kontrol etmektedir. EMA yapısında solenoid bobin kullanılmaktadır. Bu sebeple solenoid vana veya valf ismiyle de anılmaktadır. Solenoid sözü Yunan menşeli olup, “solen” (boru) ve “eidos” (şekil) sözlerinin birleşmesinden türetilmiştir [1]. Solenoid vana, bir ferromanyetik çekirdek etrafına sarılmış sarmal bir bobinden oluşmaktadır. Açıcı, bobin ekseninde bir elektromanyetik alan oluşturarak, pistonunu çekmektedir. Enerji dönüşümü sonucunda bir elektromekanik sistem dönme hareketi yapıyorsa elektrik motoru, öteleme hareketi yapıyorsa elektromıknatıs olarak isimlendirilmektedir [2].

Açıcılar, hızlı ve güvenli anahtarlama yapabilmesi, uzun ömürlü olması ve kullanılan malzemelerin ortama uyumluluğu gibi birçok avantajı olan otomasyon alanında kullanılabilen cihazlardır [3]. Açıcılar genellikle akışkan (sıvı, hava ve gaz) kontrolü için kullanılmaktadır. Bahçelerde sulama sistemlerinde, çamaşır veya bulaşık makinesi gibi cihazlarda, pnömotik veya hidrolik endüstri alanlarında, araba ve uzay endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

EMA’da açıcının borudan sıvı geçişine izin vermesi açma olarak tanımlanmaktadır. Bu açma anı pistonun çekilme anına karşılık geldiğinden bu süre çekme süresi olarak tanımlanmıştır. Solenoid valfların çekme süresi, valfin tasarımı, büyüklüğü, solenoidin gücü ve elektrik akımının miktarı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

Solenoid açıcı, çalışma modeline göre iki tipe ayrılabilir: pilot kumandalı ve direkt çekmeli solenoid açıcı [5]. Direkt çekmeli solenoid valflarda, solenoid tarafından doğrudan çekilen bir piston kullanılmaktadır. Elektrik akımı verildiğinde, piston solenoid tarafından çekilir ve valf açılır. Bu valflar, sadece açma veya kapama işlemleri için kullanılır. Pilot kumandalı solenoid valflar, bir pilot valf tarafından kontrol edilmektedir. Pilot, valf içindeki kontrol elemanıdır. Bu kontrol elemanı, valfin işlevini kontrol etmek için kullanılır. Pilot kumandalı solenoid valflar, genellikle ortam basıncı

veya debisi gibi parametreleri kontrol etmek için kullanılmaktadır. Yaygın kullanım alanı olan bu valflerin çalışma karakteristiğinin incelenmesi ve doğru biçimde modellenmesi bu alandaki uygulamalar için önemli olanaklar katabilir.

1.2. Solenoid Açıcı ile İlgili Çalışmaların Bir Özeti

EMA'nın tasarımını yapmak için öncelikle cihazın çalışma koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu alandaki pek çok araştırma, açıcıların spesifik yapıları ve çalışma karakteristiklerinin ve parametrelerinin belirlenmesi ile ilgilenmektedir. Solenoid valfların çalışma prensibini matematiksel olarak ifade etmek için cihazın elektromanyetik modelleri oluşturulmaktadır [6]–[8]. Açıcıların lineer hareketi ise genellikle akım (gerilim) ve pistonun hareket alanının veya manyetik devrenin değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. Elektromanyetik model kullanılarak, valfin çalışma ortamına ve kullanım amacına uygun olarak tasarlanması ve üretilmesi de mümkündür [9]–[12].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte açıcıların karakteristiğinin incelenmesi, elektromanyetik alanın analizi, yeni modellerin oluşturulması, yapının optimizasyonu için bilgisayar destekli programlar kullanılmaya başladı [13]–[15]. Model oluşturulması için ANSYS, COMSOL Multiphysics gibi sonlu elemanlar yöntemine (SEY) sahip programlar kullanılmaktadır [16]–[19]. Optimizasyon sonuçlarının iyileştirilmesi ve kestirim (tahmin) yapılması için yapay sinir ağı, makine öğrenmesi, genetik algoritma gibi yöntemler kullanılmaktadır [20]–[23].

Popa ve ark. solenoid valfların matematiksel modelini oluşturmuş ve elektromıknatısın kuvvet karakteristiğini belirlemek için yaklaşım önerilmiş ve matematiksel modeli deneysel olarak doğrulanmıştır [7]. EMA modelini oluşturmak için Demarchi ve ark. kapalı manyetik alan devresini kullanan bir solenoid açıcı modellemiş ve model, farklı giriş gerilimi değerleri için başarılı şekilde çalıştırılmıştır [10]. Y. Kawamura ve T. Kajima matematiksel bir model kullanarak, solenoidlerin boyutları ve bobin sarım sayısı gibi tasarım özelliklerinin anahtarlama süresi üzerindeki etkilerini nicel olarak incelediler. Farklı akım değerleri kullanılarak pistonun yer değişiminin manyetik kuvvet üzerindeki etkilerini test ederek teorik sonuçlarla karşılaştırdılar [8]. Masruki Kabib ise yay sabitinin pistonun yer değişimine olan etkilerini araştırdılar [11]. Lan Wang ve ark. solenoid açıcının yapı parametrelerini (akım, yay sabiti, demir çekirdeğin

kesit alanı) değiştirerek manyetik kuvvetin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yaptılar [12].

Elektromanyetik açıcı modelleri oluşturulurken maliyetli seçeneklerden kaçınmak, tasarım sürecinin kısaltmak ve sağlıklı analiz yapmak için SEY temelli programlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip programlarla yapılan analizler sonlu elemanlar analizi (SEA) tekniği olarak da isimlendirilmektedir. SEA tekniğinin geleneksel analitik tekniklerine göre avantajlarını A.J. Moses ve ark. incelediler ve SEA tekniğinin elektromanyetik tasarımın performansını optimize etmek için yararlı olacağını ileri sürdüler [15]. X. Feng ve arkadaşları EMA'nın manyetik devre özelliklerini analiz etmiş, çalışma hava aralığı, çıkış kuvveti ve tepki süresine göre solenoid valfin manyetik devresi için yeni bir yapı tasarlamışlar. Daha sonra yapı ANSYS programında modellenmiş ve prototip testi aracılığıyla önerilen gereksinimler doğrulanmıştır [19].

Elektromanyetik açıcıları modellerken histerezis kayıplarını da göze önüne almak gerekmektedir. Manzin ve ark. ferromanyetik bir çekirdekte manyetik alan ve histerezis etkisini araştırmak için iki boyutlu (2D) sonlu eleman modelini ileri sürmüştür [24]. Eduardo Moya-Lasheras ve meslektaşlarının sundukları modelde mekanik ve elektromanyetik dinamikler karakterize edilmiştir. Oluşturulan modelde histerezis ve doyma gibi elektromanyetik olaylar göz önünde bulundurularak manyetik akı ve girdap akımları gibi elektromanyetik büyüklükler hesaplanmıştır [25].

O. Vogel ve J. Ulm SEY temelli bir program olan COMSOL Multiphysics'te manyetik kuvvet hesaplamasının üç farklı yöntemini (Maxwell Stres Tensörü, Maxwell Gerilme Kuvveti ve Sanal Yer Değiştirme yöntemi) araştırıp, bu yöntemlerin olumlu ve olumsuz taraflarını ele aldılar [26].

Harald Biller elektromıknatıslar için 3 hesaplama yöntemi sunmuştur: Sabit yerleşim düzeni, ağ (mesh) deformasyonu ile açıcının hareketini kapsayan sonlu eleman yöntemi hesaplaması ve modeli basitleştirme tekniği (model reduction technique) [27]. Bu çalışmada pistonun hareketi ağ deformasyonu yöntemi ile modellenmiştir.

Başarılı şekilde oluşturulmuş modellerin performanslarını artırmak için değişkenler veya parametreler için optimizasyon yapılmaktadır. Bu alanda Plavec ve ark. EMA'nın çalışma boşluğunun boyutlarının çekme süresi ve manyetik kuvvet karakteristiklerine olan etkilerini araştırdılar. Daha sonra genetik algoritma kullanarak yapının

optimizasyonunu gerçekleştirdiler [20]. Wu ve ark. yaptıkları çalışmada açıcının manyetik devre modelini vermiş ve modelin optimizasyonu ve doğrulamasını yaptılar [21].

EMA'lar daha düşük çekme sürelerinde daha verimli çalışmaktadır. Tez çalışmasında yapılan araştırmadan farklı olarak 2 farklı manyetik özellikli piston kullanılarak elektriksel ve mekanik ölçümler yapılmıştır. İncelemesi yapılan literatür çalışmasına bakıldığında bu çalışmada açıcının COMSOL Multiphysics programında simülasyonu gerçekleştirilmiş ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak eğitimi yapılmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Organizasyonu

Bu tez çalışmasının amacı elektromanyetik açıcının yay sabitinin, çalışma geriliminin, pistonun aldığı yolun ve farklı manyetik özellikli pistonların açıcının çekme süresine olan etkisini araştırmaktır. Aynı zamanda SEY temelli COMSOL programında açıcının benzetimi gerçekleştirilmiş ve çalışma karakteristiği verilerinin elde edilmesi ve elde edilmiş sonuçların makine öğrenmesi algoritmaları ile eğitilmesi ve çekme karakteristiğinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra YSA ve Destek Vektör Makinesi (DVM) yöntemleri kullanılarak piston tipinin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

Bu giriş bölümünün ardından tez çalışmasının ikinci bölümünde elektromanyetik açıcılar hakkında genel bilgiler, açıcının elektromanyetik modeli ve durum uzay denklemleri verilmiştir. Üçüncü bölümde ise tez çalışmasında kullanılan elektromanyetik açıcının yapısı incelenmiş ve açıcının deneysel olarak elde edilen yay sabiti değeri çekme akım karakteristiği verilmiştir. 2 farklı manyetik özellikli piston numunesi kullanılarak ölçümler tamamlanmıştır. Dördüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan elektromanyetik açıcının modellenmesi ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Beşinci bölümde ölçüm ve benzetim sonuçları makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak eğitilmiş ve farklı kestirimler yapılmıştır. İlk olarak ölçüm ve benzetim sonuçları YSA ile eğitilerek açıcının akım karakteristiği ve pistonun aldığı yol tahmin edilmiştir. Elde edilmiş sonuçlar için hataların karesinin ortalaması metodu kullanılarak hata analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise 2 farklı manyetik özellikli piston numunesi için

destek vektör makineleri ve yapay sinir ağı yöntemleri kullanılarak sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Tez sonuç bölümü ile bitirilmiştir.



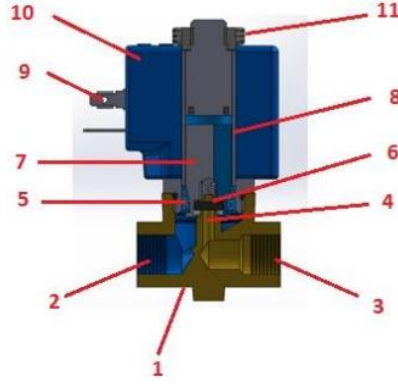


2. ELEKTROMANYETİK AÇICININ YAPISI, DEVRE EŞDEĞERİ VE DURUM UZAY MODELİ

2.1. Elektromanyetik Açıcı

Elektromanyetik açıcı, manyetik olarak geçirgen bir silindirik çekirdek etrafına sarılan iletken bir telden (bobinden), piston ve yaydan oluşmaktadır. Bobine elektrik akımı verildiğinde, bobinin etrafında manyetik alan oluşmakta ve oluşan manyetik kuvvet pistonu hareket ettirmektedir [28]. Bobine verilen elektrik akımı kesildiğinde ise bu yay pistonu eski konumuna döndürmektedir. Elektromanyetik açıcılar genel olarak 4 temel kısımdan oluşmaktadır. Bu parçalar bobin – soket, kovan – piston, gövde – kapak ve diyafram – sızdırmazlık gruplarıdır. Bobin – soket bölümünden EMA'ya elektrik enerjisi verilmektedir. EMA'nın çektiği akım ile oluşan manyetik alan ve manyetik kuvvet kovan içindeki pistonu hareket ettirerek cihazı açık veya kapalı duruma getirmektedir. Bobin kısmı kovan – piston ile uyumlu bir şekilde çalışmalıdır. Gövde – kapak ve diyafram – sızdırmazlık grubu: bu grup solenoidin ana gövde bölümüdür ve akışkanlar bu bölümden geçmektedir [29]. Solenoid açıcıları oluşturan temel parçalar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu parçalar sırasıyla şunlardır: 1) Gövde; 2) Giriş; 3) Çıkış; 4) Yuva; 5) Yay; 6) Piston contası; 7) Piston; 8) Kovan; 9) Enerji bağlantı noktaları; 10) Bobin; 11) Bobin tutma somunu.

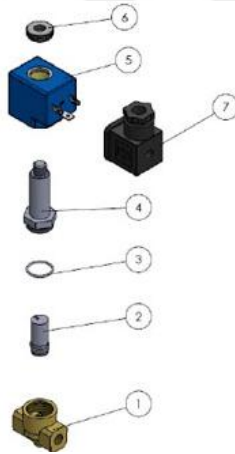
Solenoid vanalar genellikle boru hatta kapalı durumda bağlanmaktadır. Böylece elektrik enerjisi uygulanmadıkça borudan akışkan geçmemektedir. Vanadan akışkan geçmesi için pistonun konumunun kapalı durumdan açık duruma geçmesi (getirilmesi) gerekmektedir. Enerji verildikten sonra kovan içindeki çekirdek, manyetik kuvvetin etkisi ile çekilecektir ve borudan akışkan geçmeye başlayacaktır. Bobine verilen elektrik enerjisi kesilene kadar akışkanın geçmesi devam edecektir. Elektrik enerjisi kesildiğinde geri çekilen piston kendi ağırlığı ve bağlı olduğu yay tarafından itilerek yeniden açıcının akışkan geçecek noktasına baskı yapacaktır ve akışkanın borudan geçmesi durdurulacaktır. Solenoid açıcılar çalışma prensibine göre direkt çekmeli ve pilot kontrollü olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır.



Şekil 2.1. Temel bir solenoid açıcının parçaları[1].

2.1.1. Direkt çekmeli açıcı

Direkt çekmeli açıcılar gövde, kovan, piston, bobin ve soket kısımlarından oluşmaktadır. Açıcının sızdırmazlığı kovan kısmında yerleşen o-halka ve çekirdeğin alt tarafında çekirdeğe bağlı olan sızdırmazlık elemanı ile sağlanmaktadır. Genel bir solenoid açıcının yapısı ve oluşturduğu parçalar Şekil 2.2’de gösterilmiştir [29]. 1) Gövde; 2) Piston; 3) O-Halka; 4) Kovan; 5) Bobin; 6) Somun; 7) Soket.

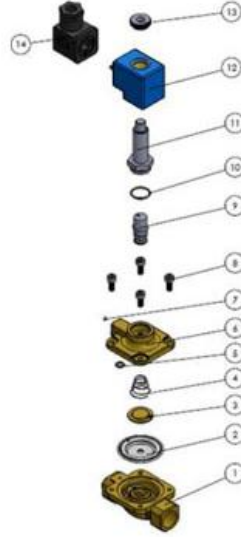


Şekil 2.2. Direkt çekmeli solenoid vana [29].

2.1.2. Pilot kontrollü açıcı

Pilot kontrollü elektromanyetik açıcıların diğer bir ismi de diyaframlı solenoid açıcılardır. Kontrol elemanı olarak pilot kullanılmaktadır. Pilot (diyafram) basınçta bir düşüş yaşandığında veya toplam basınç kaybı olduğunda borudaki basıncı tutmak için kullanılan bir elemandır. Direkt çekmeli açıcılara göre basıncı azaltabildiğinden daha kullanışlıdır. Pilot ile açıcının sızdırmazlığının sağlanması için diyafram üzerinde olan

eşit basıncı değiştirilmektedir. Değişen basıncın etkisi ile diyafram yukarı kalkmaktadır [30]. Şekil 2.3'te genel bir pilot kontrollü açıcının yapısı verilmiştir. Bu açıcının parçaları sırasıyla şunlardır: 1) Gövde; 2) Diyafram; 3) Diyafram sarısı; 4) Yay; 5) O-halka; 6) Kapak; 7) Bilya; 8) Cıvata; 9) Piston; 10) Gölge kutup; 11) Kovan; 12) Bobin; 13) Tirilli somun; 14) Soket.



Şekil 2.3. Pilot kontrollü solenoid açıcının yapısı [29].

2.2. Solenoid Açıcıların Manyetik ve Elektriksel Devre Analizi

Fitzgerald elektromanyetik bir devreyi çözmek için, aşağıdaki hipotezin, eşdeğer bir elektrik devresi ile bir manyetik devrenin hesaplanmasına izin verdiğini öne sürmektedir [31].

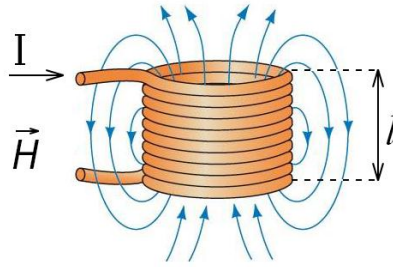
- Dışarıdaki yani çekiciye seri bağlı endüktans, elektromanyetik çekicinin manyetik alanının nihai büyüklüğünü etkilemez
- Bütün manyetik alan kapalı manyetik devre ile sınırlıdır (Çekicinin manyetik alanı dışarıda sıfırdır).
- Havanın manyetik geçirgenliği, pratik olarak boşluğun geçirgenliğine eşittir.
- Elektromanyetik çekicinin içinde Maxwell denklemlerinin yer değiştirme akım yoğunluğu terimi önemsizdir.

Yukarıdaki varsayımlardan yola çıkılarak, Elektromanyetik açıcının manyetik devresi her adımda sistem geometrisi dikkate alarak çözülebilmektedir. Newton yasaları ve manyetik alan hesaplamaları kullanılarak cihazın dinamik karakteristiği elde

edilebilmektedir. Manyetik devreyi, temel devre teorisi kullanarak analiz etmek için, analog bir elektrik devresi de kullanılabilmektedir.

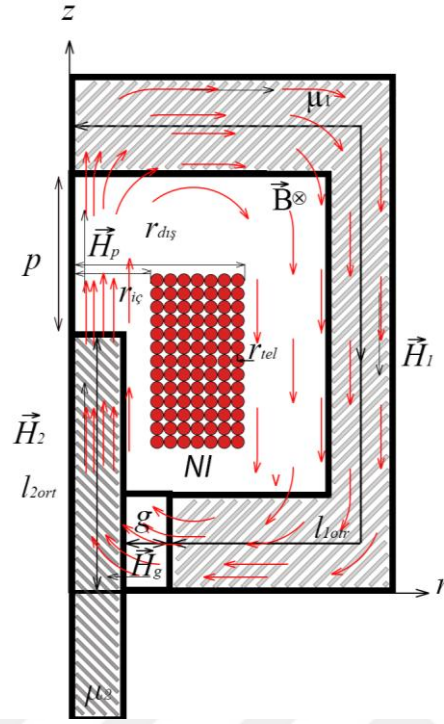
Solenoid açıcılar uygulanan elektrik enerjisini hem manyetik enerjiye hem de mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Bu mekanik enerji çekme eksenine doğrultusunda lineer hareket olarak ortaya çıkmaktadır. Solenoid açıcının bobinine gerilim uygulandığında bobinin tellerinden geçen akım bobinin etrafında manyetik alan oluşturmaktadır.

Şekil 2.4'te hava aralıklı bir bobinin oluşturduğu manyetik akı gözükmektedir. Bu bobinin uçlarına gerilim verildiğinde bobinden I akımı akmaktadır ve sarım sayısı N 'ye eşittir. İletkenden geçen akım bobin etrafında manyetik alan oluşturur. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere bu manyetik alanın dağılımı sistemde manyetik bir malzeme olmadığı için düzgün değildir. Bobinin oluşturduğu manyetik alan şiddeti ($\vec{H}$) akımın (I) değerinden, bobinin uzunluğundan (l) ve sarım sayısından (N) etkilenmektedir [31].



Şekil 2.4. Hava aralıklı bir bobinin oluşturduğu manyetik alan dağılımı.

Bir elektromanyetik açıcının manyetik devresi ise içinde manyetik alanı yönlendirmek ve değerini arttırmak için manyetik malzeme yani nüve kullanıldığından daha karışıktır ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Elektromanyetik açıcı silindirik koordinat sisteminde çizilmiştir. Manyetik açıcının aksisimetriye sahip olduğu yani z eksenine göre simetrik olduğu kabul edilmiştir. Şekildeki elektromanyetik açıcıda μ_1 nüvenin ve μ_2 pistonun yapıldığı malzemenin manyetik geçirgenliğidir. Elektromanyetik açıcının sarım sayısı N ve akımı I ile gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Elektromanyetik açıcının manyetik devresi.

Bir elektromanyetik açıcıda kullanılan sarmal bobine solenoid adı verilir. Manyetik alanın durgun ya da çok düşük frekanslı olduğu kabulü ile Ampere yasası

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \sum_k I_k \quad (2.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $d\vec{l}$, manyetik alanın üzerinde dolandığı diferansiyel yol uzunluğu vektörüdür ve bu integralin üzerindeki daire yolun kapalı olduğunu yani çevresel integral olduğunu göstermektedir. $\vec{H}$, manyetik alan vektörünü; $\vec{J}$, akım yoğunluğu vektörünü; $d\vec{A}$, akımın üzerinden aktığı diferansiyel alanı; k , iletken sayısını temsil etmektedir.

Kapalı yol, her biri alan kuvvetine yönelik olan i bölümlerinden oluşuyorsa ve H_i manyetik alanı, l_i patika uzunluğu boyunca sabit ise denklem (2.1):

$$\sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i = N \cdot I \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Böylece manyetik alanın ve manyetik akının yönünün bilindiği varsayılır. Manyetik akı yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerden akmayı tercih ettiğinden, çelik gibi yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerden geçtiği

varsayılır. İçinde çelik ya da ferromanyetik malzeme olan manyetik devrede bir hava boşluğu varsa, manyetik hava boşluğunun en kısa olduğu yer boyunca ilerleme ve yüksek değer alma eğiliminde olacaktır.

Artık Şekil 2.5'teki elektromanyetik açıcı analiz edilebilir. Nüvenin içinden dolanan manyetik alanın değeri H_1 ve ortalama uzunluğu l_{1ort} olsun. Açıcının içinden dolanan manyetik alanın değeri H_2 ve ortalama dolanan uzunluğu l_{2ort} olsun. z eksenine yönündeki hava aralığından dolanan manyetik alanın değeri H_p ve ortalama dolanım uzunluğu p olsun. Yarıçap doğrultusunda hava aralığından dolanan manyetik alanın değeri H_g ve ortalama dolanım uzunluğu g olsun. Bu dolanım uzunlukları Şekil 2.5'te görülebilir. Şekil 2.5'te görülen manyetik alan dolandığı patikaya paralel yönde kabul edilmiştir. Bu kabuller altında ve tanımlanan büyüklükler kullanılarak denklem (2.1) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$H_1 \cdot l_{1ort} + H_2 \cdot l_{2ort} + H_g \cdot g + H_p \cdot p = N \cdot I \quad (2.3)$$

Elektrik makinalarında elektromanyetik analizleri gerçekleştirmek için elektromanyetik yapının histerezisi ve geçirgenliğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler, ilgili materyalin literatürde bulunan B-H eğrisinden elde edilebilmektedir [3]. Manyetik malzemelerde manyetik akı yoğunluğu (B) manyetik alanın (H) nonlinear bir fonksiyonudur. Malzeme izotropik ise

$$B = f(H) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Her manyetik malzemenin davranışı veya karakteristiği de farklıdır. Bu farklılık manyetik malzemenin kalitesini belirlemektedir. Bir noktada manyetik akı yoğunluğunun manyetik alan şiddetine bölümü manyetik geçirgenlik olarak isimlendirilmektedir ve aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\mu = B / H \quad (2.5)$$

Herhangi bir malzemenin manyetik geçirgenliği

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.6)$$

olarak verilir. Burada μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliği ve μ_r , Bağıl manyetik geçirgenliktir. Boşluğun ya da ideal vakumun manyetik geçirgenliği $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} (H/m)$ ve boşluğun bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_r = 1$ olarak verilir [32]. Ferromanyetik

malzemelerin bağıl manyetik geçirgenliği birden daha büyüktür. Bir malzemenin manyetik akı yoğunluğu

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu \cdot H \quad (2.7)$$

olarak yazılabilmektedir. Lineer bir malzemede ya da bir malzemenin Lineer çalışma bölgesinde manyetik geçirgenliği (μ) sabittir.

Manyetik akı (Φ), yüzeyden dik şekilde geçen manyetik alan çizgilerinin sayısıdır ve birimi Weber'dir. Bir A yüzeyinden akan manyetik akı

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.8)$$

olarak verilir. Bu formülde B , manyetik akı yoğunluğunun herhangi bir $d\vec{A}$ diferansiyel alanı üzerindeki izdüşümünün integrali manyetik akı olarak isimlendirilmektedir.

Şekil 2.5'teki her yol parçasının B_i 'yi taşıyan doğrultu yönüne dik kesit yüzey alanı A_i 'ye sahip olduğunu varsayarsak, her parça aşağıdaki akıyı taşır:

$$\phi_i = B_i \cdot A_i \quad (2.9)$$

Elektromanyetik açıcının kaçak ve saçak alanları ihmal edilirse, aynı manyetik akı Şekil 2.5'te gözüken tüm patikalardan aktığından, nüveden akan manyetik akı, hava aralıklarından ve açıcıdan akan manyetik akıya eşittir:

$$\phi = B_g \cdot A_{gort} = B_1 \cdot A_{1ort} = B_2 \cdot A_{2ort} = B_p \cdot A_{port} \quad (2.10)$$

Burada B_g , g uzunluklu hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu; A_{gort} , g uzunluklu hava aralığının alanı; B_1 , l_{1ort} uzunluğu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu; A_{1ort} , l_{1ort} uzunluklu kısmın alanı; B_2 , l_{2ort} uzunluğu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu; A_{2ort} , l_{2ort} uzunluklu kısmın alanı; B_p , p uzunluğu yani çekme mesafesi üzerindeki manyetik akı yoğunluğu; A_{port} , p uzunluklu kısmın alanıdır.

Denklem (2.2), denklem (2.7) ve denklem (2.10) kapalı yolunun geçirgenliğini hesaba katmak için birleştirilirse:

$$\phi \left[\frac{p}{A_p \mu_p} + \frac{g}{A_g \mu_g} + \frac{l_{1ort}}{\mu_1 A_{1ort}} + \frac{l_{2ort}}{\mu_2 A_{2ort}} \right] = N \cdot I \quad (2.11)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i}{\mu_i} \right) \cdot l_i = N \cdot I \quad (2.12)$$

$$\phi \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\mu_i \cdot A_i} \right) = N \cdot I \quad (2.13)$$

elde edilir. Burada toplam işaretinin içinde yer alan kısım relüktans olarak isimlendirilmektedir ve denklem (2.13) aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$\phi = \frac{N \cdot I}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (2.14)$$

Burada R_i , herhangi bir i patikasının relüktansıdır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_i \cdot A_i} \quad (2.15)$$

Elektromanyetik açıcının ya da kaçığı ihmal edilmiş solenoid bobinin manyetik devresinden geçen akı toplam relüktansı R_t kullanılarak [33]:

$$\phi = \frac{N \cdot I}{R_t} \quad (2.16)$$

olarak verilir.

Denklem (2.7) ve denklem (2.16) birlikte çözülerek elektromanyetik açıcının analizi yapılabilir. Kaçak ve saçak akılardan dolayı bunu analitik olarak hassas bir şekilde yapmak mümkün olmamakta ve bundan dolayı elektromanyetik açıcı analizinde nümerik yöntemler kullanılmaktadır.

Sabit manyetik geçirgenliğe sahip manyetik malzemeden oluşan manyetik devre için manyetik akı ve akım arasında olan bağlantı lineerdir. Bu bağlantı endüktans olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} \quad (2.17)$$

Bir endüktör lineer bölgede çalışıyorsa yani nonlineer bölgede çalışmıyorsa ya da doymada değilse ve geometrisi değişmiyorsa, endüktansının değeri sabittir. p değeri değiştikçe elektromanyetik açıcının geometrisi dolayısıyla endüktansının değeri de

değişecektir. Yani endüktans p pozisyonunun veya çekme mesafesinin bir fonksiyonudur.

Demir çekirdekli bobinler elektrik makinalarının geliştirilmesinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu tip bobin ve sargılarda manyetik geçirgenlik manyetik alan şiddetinin fonksiyonu olarak değişmektedir. Elde edilmiş karakteristik lineer değildir. Bu durumda endüktans geçen akıma göre değişmekte ve lineer olmayan endüktans olarak isimlendirilmektedir.

Ferromanyetik malzemelerde manyetik domenlerin yani bölgelerin büyük bir kısmının yönlenmesi sonucu manyetik malzeme doymaya girmekte yani manyetik malzeme işlevini yerine getirememektedir. Bu durumda sargının içinde manyetik malzeme yokmuş gibi yani havaymış gibi davranmaktadır. Havanın manyetik geçirgenliği boşluğun manyetik geçirgenliğine pratikte eşit kabul edilmektedir. Bu durum endüktansın doyması olarak tanımlanmaktadır ve sargının endüktansının değeri çok düştüğü için akım sınırlama yeteneği ortadan kalkmaktadır [34].

Elektromanyetik açıcının sargısında geri elektromotor kuvveti (emk) oluşmaktadır. Faraday Kanunu kullanılarak N sarımlı kaçak akısı ihmal edilmiş içinden geçen akı Φ olan sargının geri emk'sı aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$e(t) = \frac{d\lambda}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.18)$$

Burada λ , sargının manyetik akı dolanımıdır (flux-linkage) ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\lambda = N \cdot \phi \quad (2.19)$$

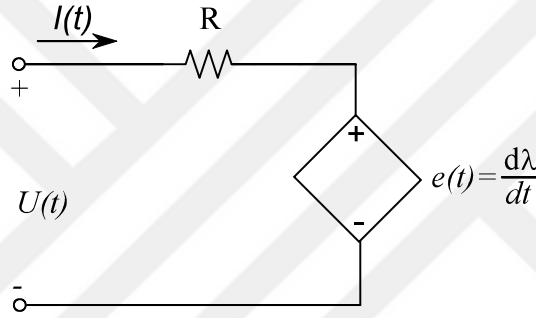
Elektromanyetik açıcının eşdeğer elektrik devresi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Yapıda elektromanyetik açıcıya uygulanan zamana bağlı gerilim $U(t)$, zamana bağlı açıcı akımı $I(t)$ ve açıcı sargı direnci R olsun. Zamana göre açıcı sargı direnci R değeri değişmiyorsa yani sabitse, elektromanyetik açıcıya uygulanan gerilim:

$$U(t) = I(t) \cdot R + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.20)$$

olarak hesaplanır. Bobinin direnci, sıcaklık değişimini göz ardı edilerek, Şekil 2.5 göz önünde bulundurularak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [35].

$$R = \frac{\rho N (r_{dış} + r_{iç})}{r_{tel}^2} \quad (2.21)$$

Burada ρ bakır bobinin direnci, N bobin sargılarının sayısı, $r_{dış}$ ve $r_{iç}$ sırasıyla bobinin dış ve iç yarıçapı, r_{tel} bakır telin yarıçapıdır. Direnç ne kadar düşükse, bobine o kadar fazla akım uygulanmaktadır. Yüksek akım hareketin hızlanmasına neden olmaktadır. Doğru akım (DA) ile çalışan bir açıcıda, kararlı halde ya da açıcı çektiğinde bobinden akan DA değerini sadece sargı direncinin değeri belirlemektedir. Ama alternatif akım (AA) çalışan bir açıcıda, kararlı halde ya da açıcı çektiğinde bobinden akan AA değerini hem sargı direnci hem de sargı endüktansı değeri (yani sargı empedansı) birlikte belirlemektedir.



Şekil 2.6. Elektromanyetik açıcının eşdeğer elektrik devresi.

Açıcı geriliminin hesaplanmasında Ohm ve Lenz yasalarından faydalanılmıştır [20]. Bir solenoidin eşdeğer devresinde direnç ve çekme konumuna bağlı endüktans bulunmaktadır. Manyetik akı dolanımı λ , bobin $I(t)$ akımına ve hava boşluğu uzunluğuna (p) bağlıdır. Bu nedenle voltaj denklemi şu şekilde yeniden yazılabilmektedir:

$$U = R \cdot I + \frac{\partial \lambda}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (2.22)$$

Burada akı dolanımı $\lambda = L(p) \cdot I$ gibi tanımlanırsa yani endüktans akıma göre değil sadece konuma göre değişiyor kabul edilirse:

$$U = I \cdot R + L(p) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(p)}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'te ikinci ifade öz endüktans $L(p)$, üçüncü ifade ise içinde dp/dt çarpanını taşımaktadır. dp/dt mekanik sistemin yani açıcının pistonunun çekme hızı olarak tanımlanmaktadır.

Elektromanyetik açıcının manyetik malzemeden yapılmış çekirdeğine etki eden kuvvet Maxwell stres tensörü yöntemi ile de hesaplanabilir [36]. Maxwell stres tensörü kullanılarak normal ve yanal (teğet) yöndeki kuvvet bileşenleri için:

$$F_n = \frac{1}{2\mu_0} \oint_A (B_n^2 - B_t^2) \cdot dA \quad (2.24)$$

ve

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \oint_A B_n \cdot B_t \cdot dA \quad (2.25)$$

denklemleri yazılabilir. Böylece manyetik akı yoğunluğunun birleşenleri kullanılarak denklem (2.24) ve denklem (2.25)'de verilen yüzey integralleri ile açıcının pistonunun üzerindeki normal ve yanal kuvvetler hesaplanabilir. Çekirdeğin üzerindeki toplam çekme kuvveti:

$$\vec{F}_m = \left[\oint_A \frac{1}{2\mu_0} \cdot (B_n^2 - B_t^2) \cdot dA \right] \cdot \vec{e}_n + \left[\oint_A \frac{1}{\mu_0} \cdot B_n \cdot B_t \cdot dA \right] \cdot \vec{e}_t \quad (2.26)$$

olarak yazılabilir. Eksenel simetriden dolayı bu kuvvetin yanal bileşeni sıfır olmaktadır:

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \oint_A B_n \cdot B_t \cdot dA = 0 \quad (2.27)$$

ve

$$\vec{F}_m = \left[\oint_A \frac{1}{2\mu_0} \cdot (B_n^2 - B_t^2) \cdot dA \right] \cdot \vec{e}_n \quad (2.28)$$

Denklem (2.26)'da B_i manyetik akı yoğunluğunun çekirdeğin A_i alanından dik ve homojen bir şekilde geçtiğini kabul edersek, çekirdeğe etki eden manyetik kuvvet:

$$F_m = \frac{B_i^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot A_i \quad (2.29)$$

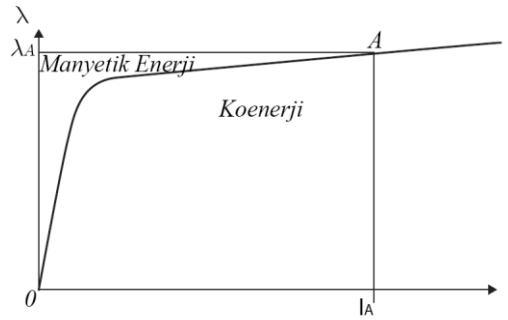
olur. Çekirdekten geçen manyetik akı kullanılarak EMA'nın çekirdeğinin üzerinde oluşan elektromanyetik kuvvet aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

$$F_m = \frac{\phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2.30)$$

Burada Φ çekirdekten geçen manyetik akı, F_m elektromanyetik kuvvet, μ_0 havanın manyetik geçirgenliği ve r çekirdek yarıçapıdır. Bu yöntem ise Maxwell çekme kuvveti yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem manyetik kutuplar düzlem ve paralel yüzeylere sahip olduğunda çok iyi sonuçlar vermektedir [26].

Elektromanyetik açıcıda kuvveti analiz etmek için sanal yer değiştirme metodu da kullanılmaktadır. Bu yöntemde kuvvet hesabı için manyetik devrede depolanan enerji kullanılmaktadır. Manyetik devrede depolanan enerji EMA'da azalan hava boşluğu ile artmaya başlayacaktır. Açıcının yer değiştirmesi için gerekli olan kuvveti hesaplamak için depolanan enerjiyi de hesaplayıp kullanmak gerekmektedir.

EMA'ya giren elektriksel enerji EMA'nın içinde depolanan manyetik enerji ile mekanik enerjinin toplamına eşittir. Enerji ve koenerji arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. λ -I eğrisi üzerindeki tipik bir akım değerindeki manyetik enerji ve koenerji [3].

EMA'nın manyetik enerjisi

$$W_m(\lambda, p) = \int_0^\lambda I \cdot d\lambda \quad (2.31)$$

olarak verilir. Bu EMA'nın koenerjisi

$$W_{ko} = \int_0^I \lambda(p, I) \cdot dI \quad (2.32)$$

olarak verilir. Koenerji kullanılarak, elektromanyetik açıcının çekme kuvveti ya da manyetik kuvveti denklem (2.33) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir [3].

$$F_m = \left. \frac{\partial W_{ko}}{\partial p} \right|_I \quad (2.33)$$

$$F_m = \frac{\partial}{\partial p} \int_0^I \lambda(p, I) \cdot dI \quad (2.34)$$

EMA'nın nüvesinde ve çekirdeğinde nonlinear bölgede çalışıldığı kabul edildiğinden manyetik akısı hem akıma hem de konuma bağlı iki değişkenli bir fonksiyon olan $\lambda(p, I)$ olarak yazılmıştır. Bu durumda EMA endüktansı da hem çekici konumuna (p) hem de EMA akımına (I) bağlıdır:

$$L(p, I) = \frac{\lambda(p, I)}{I} \quad (2.35)$$

Nonliner bölgede çalışılıyorsa endüktansın açık bir fonksiyon olarak ifadesi zordur ve bu yüzden sonlu elemanlar yöntemi kullanan COMSOL gibi programlar kullanarak endüktans hesaplanmaktadır. EMA endüktansı $L(p, I)$ yerine konur ve EMA'nın çekme kuvveti F_m 'i bulmak için denklem (2.32)'ün türevini almak gerekmektedir:

$$F_m(p, I) = \frac{\partial}{\partial p} \int_0^I \lambda(p, I) \cdot dI = \frac{\partial}{\partial p} \int_0^I L(p, I) \cdot I \cdot dI \quad (2.36)$$

olur. Nonlinear bölgede çalışan bir EMA'nın manyetik kuvveti için açık bir ifade bulmak zordur ama iki değişkenli bir fonksiyon olduğunu göstermek için $F_m(p, I)$ olarak yazılmıştır.

Eğer EMA lineer bölgede çalışıyorsa, lineer manyetik sistemlerde manyetik akı $\lambda = L(p)I$ olduğundan denklem (2.31), denklem (2.32) ve denklem (2.33) daha basit olarak yazılabilir. Lineer manyetik sistemlerde manyetik akı $\lambda = L(p)I$ olduğundan denklem (2.31) kullanılarak, manyetik enerji

$$W_m(\lambda, p) = \int_0^\lambda I \cdot d\lambda = \int_0^\lambda \frac{\lambda}{L(p)} \cdot d\lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{L(p)} \quad (2.37)$$

ya da

$$W_m(\lambda, p) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{L(p)} = \frac{1}{2} \cdot L(p) \cdot I^2 \quad (2.38)$$

olarak bulunur. Eğer EMA lineer bölgede çalışıyorsa, denklem (2.32) kullanılarak koenerji için nihai olarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$W_{ko} = \int_0^I \lambda \cdot dI = \int_0^I L(p) \cdot I \cdot dI = \frac{1}{2} \cdot L(p) \cdot I^2 \quad (2.39)$$

Denklem (2.38) ve denklem (2.39)'dan görüldüğü üzere, sabit (doğrusal) bir indüktörde depolanan manyetik alan enerjisi, indüktörün manyetik koenerjisine eşittir. Endüktans akıma göre sabit olduğunda, fakat konuma göre değiştiğinde, takip eden formül manyetik kuvveti elde etmek için kullanılabilir. Akıma göre doğrusal manyetik sistemler için $\lambda=L(p)I$ yazılarak ve türev alınarak denklem (2.40) aşağıdaki denkleme dönüşmektedir:

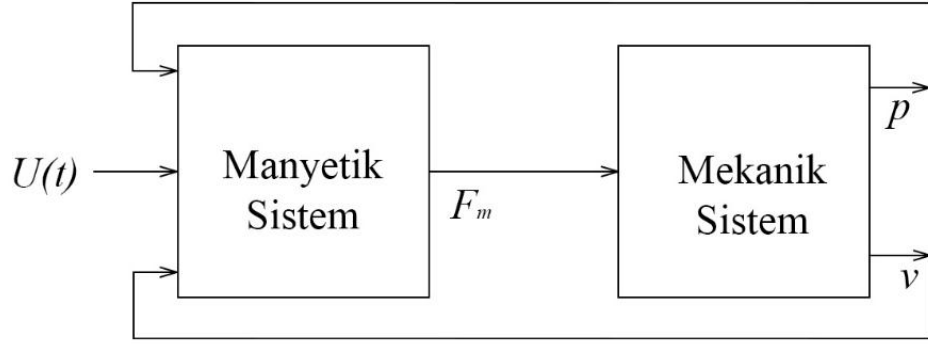
$$F_m = \frac{\partial W_{ko}}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{1}{2} L(p) \cdot I^2 \right] \quad (2.40)$$

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL(p)}{dp} \quad (2.41)$$

Lineer çalışma bölgesinde çalışan bir EMA'nın manyetik kuvveti akımın karesine bağlıdır.

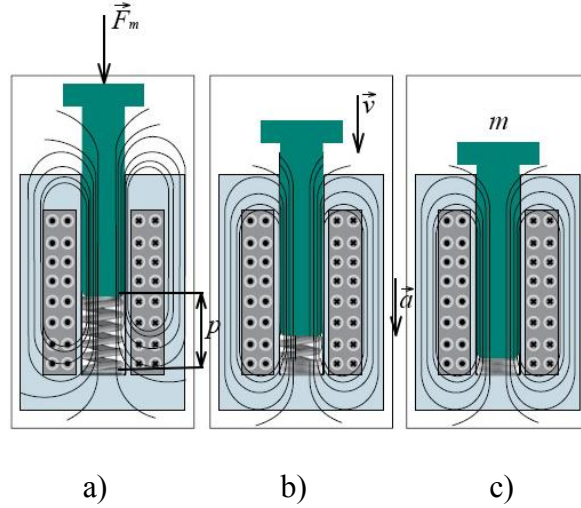
2.3. Elektromanyetik Açıcının Durum Uzay Modeli

Elektromanyetik açıcılar elektromekanik cihazlardır ve iç içe geçmiş manyetik ve mekanik kısımlardan oluşmaktadır. Şekil 2.8'de bir EMA'nın blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.8. Solenoid açıcının çalışmasının blok diyagramı.

Elektromanyetik açıcının çalışmasının mekanik tarafının yapı taşı aktüatörde bulunan yaydan kaynaklanmaktadır. Elektromanyetik açıcının mekanik hareketi, kütle-yay-sönüm sistemi olarak modellenebilen piston ve yaydan oluşmaktadır. Şekil 2.9’da genel bir EMA’nın açık, kapalı ve çekerken ki durumları gösterilmiştir. Durum uzay modelinin oluşturulması için açıcının kütlesi, yay sabiti, sürtünme katsayısı, çekme doğrultusundaki yerçekimi bileşeni, çekirdeğe etki eden dış kuvvetler, açıcının hareket etme hızı ve ivmesi de dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.9. Genel bir elektromanyetik açıcının çalışma durumları a) Açıcının açık pozisyonu; b) Açıcının hareket etme anındaki pozisyonu; c) Açıcının kapalı pozisyonu.

Elektromanyetik açıcıya etki eden kuvvetler için:

$$\vec{F}_{net} + \vec{F}_{Hooke} + \vec{F}_w + \vec{F}_D - \vec{F}_m - \vec{F}_0 = 0 \quad (2.42)$$

yazılabilir. Burada, $\vec{F}_{net}$ ivmelenme kuvveti ya da net kuvvet, $\vec{F}_m$, manyetik kuvvet ya da çekme kuvveti; $\vec{F}_{hooke}$, Hooke yani yay kuvveti; $\vec{F}_w$, hareket doğrultusundaki ağırlık bileşeni; $\vec{F}_D$, sönüm ya da sürtünme kuvveti; $\vec{F}_0$, çekirdeğe etki eden dış kuvvetlerin toplamıdır. Ayrıca, manyetik geçirgenlik, verilen herhangi bir manyetik akıya göre sabit kabul edilmiştir. Yani manyetik malzemeler lineer çalışma bölgesinde çalışmaktadır. Dış kuvvetlerin ve yerçekiminin etkisini göz ardı ederek elektromanyetik açıcının hareket denklemi [35]:

$$m \cdot a + \zeta \cdot v + k \cdot p = F_m \quad (2.43)$$

şeklinde verilebilir. Burada m , pistonun kütlesi, a pistonun ivmesi, ζ sistemin sönümleme sabiti, v pistonun hızı, k yay sabiti ve p pistonun yer değiştirmesidir. a , v , p ve F_m zamana göre değişmektedir. Sistem yatay olarak modellendiği için yerçekimi etkisi göz ardı edilmiştir. Yine de yerçekiminin sürtünmeye bir miktar etkisi olduğu unutulmamalıdır ama sistemin sürtünme teriminin içinde gizlidir.

Pistonun hareket etme hızı ve ivmesi

$$v = \frac{dp}{dt} \quad (2.44)$$

ve

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2.45)$$

şeklinde tanımlıdır. Denklem (2.43) ve denklem (2.44) dikkate alınarak EMA için mekanik harekete etki eden toplam kuvvet F_{net} yani ivmelenme kuvveti aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [31]:

$$F_{net} = m \cdot a = m \frac{d^2 p}{dt^2} = F_m - k \cdot p - \zeta \left(\frac{dp}{dt} \right) \quad (2.46)$$

Bu durumda açıcının mekanik kısmının durum uzay denklemleri:

$$\frac{dp}{dt} = v \quad (2.47)$$

ve

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_m - k \cdot p - \zeta \cdot v}{m} \quad (2.48)$$

olarak verilir. Bu denklemler ile birlikte denklem (2.48) ve devre akımının durum değişkeni kullanılarak, endüktansı sırf konuma bağlı bir EMA'nın durum uzay denklemleri

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U(t) - R \cdot I(t) - \frac{\partial L(p)}{\partial p} \cdot v(t)}{L(p)} \quad (2.49)$$

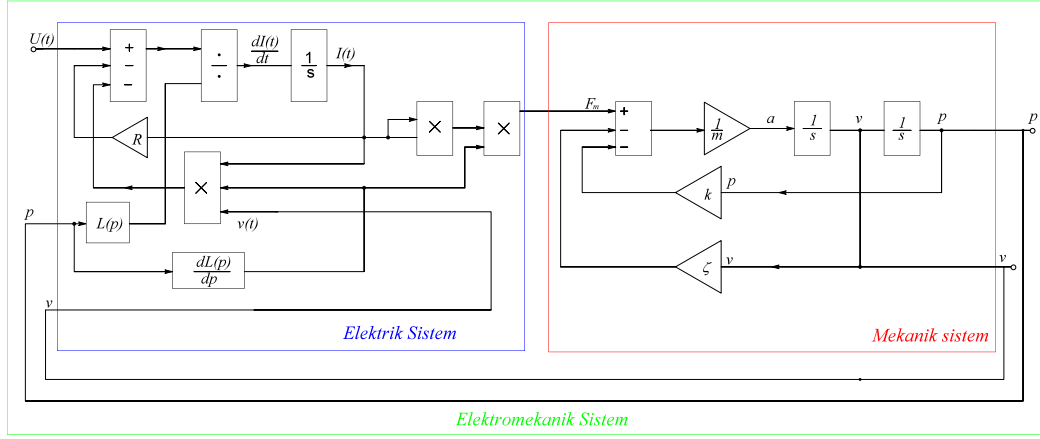
$$\frac{dp}{dt} = v \quad (2.50)$$

ve

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\partial L(p)}{\partial p} \cdot I^2 - k \cdot p - \zeta \cdot v}{m} \quad (2.51)$$

olarak bulunur.

Şekil 2.8'de verilen elektromekanik enerji dönüşümü yapan bir EMA'nın blok diyagramı endüktansı sırf konuma bağlı olduğunda Şekil 2.10'da verilen blok diyagramına dönüşür. Bu diyagramı çizmek için sistemin dinamik modeli yani durum uzay denklemleri kullanılmıştır. Blok diyagramı elektrik sistem ve mekanik sistem diye iki alt sistemden oluşmaktadır. Tüm diyagram elektromekanik sisteme tekabül etmektedir. Sistemin girişi $U(t)$ gerilimi çıkışı ise p çekme mesafesidir. Elektrik sistemin alt diyagramının üç girişi vardır: $U(t)$, v , ve p . Elektrik alt sistemin çıkışı F_m 'dir. Mekanik alt sistemin diyagramının tek girişi vardır: F_m . Mekanik alt sistemin çıkışı v ve p 'dir. Bu blok diyagramı hazırlanırken endüktans ve endüktansın konuma göre türevi sadece konuma bağlı fonksiyonlar olarak yazılmıştır.



Şekil 2.10. Endüktansı sırf konuma bağlı bir EMA'nın blok diyagramı.

Eğer endüktans hem akıma hem de konuma bağlı ise bu durumda endüktans $L(p,i)$ olarak yazılabilir. Bu durumda manyetik akı

$$\phi = L(p, I) \cdot I \quad (2.52)$$

olur. Bu durumda manyetik kuvvet için ise denklem (2.41) yerine denklem (2.34) kullanılmalıdır. Bu durumda EMA'nın durum uzay denklemleri

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U(t) - R \cdot I(t) - \frac{\partial L(p, I)}{\partial p} \cdot I(t) \cdot v(t)}{L(p, I)} \quad (2.53)$$

$$\frac{dp}{dt} = v \quad (2.54)$$

ve

$$F_m = \frac{\partial}{\partial p} \int_0^I \lambda(p, I) \cdot dI \quad (2.55)$$

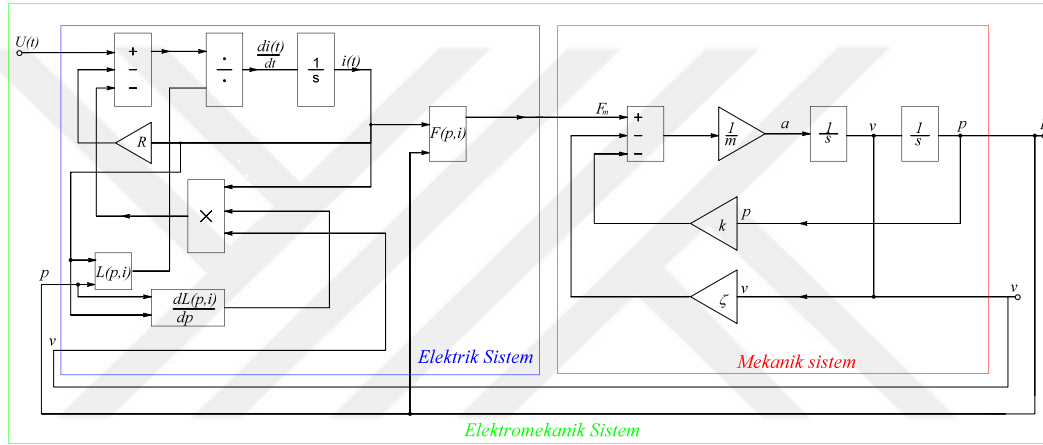
Denklem (2.55)'ten yola çıkarak açıcının durum uzay modeli için, çekirdeğin ivmesi:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_m - k \cdot p - \zeta \cdot \frac{dp}{dt}}{m} \quad (2.56)$$

olarak bulunur.

Şekil 2.8'de verilen elektromekanik enerji dönüşümü yapan bir EMA'nın blok diyagramı akı dolanımı ya da endüktansı hem konuma hem de akıma bağlı olduğunda

Şekil 2.11’de verilen blok diyagramına dönüşür. Bu diyagramı çizmek için denklem (2.53), denklem (2.54) ve denklem (2.56)’da verilmiş olan sistemin durum uzay denklemleri kullanılmıştır. Şekil 2.11’de verilen elektromekanik sistem elektrik ve mekanik alt sistemden oluşmaktadır. Sistemin girişi $U(t)$ gerilimi, çıkışı ise p çekme mesafesidir. Elektrik alt sistemin diyagramının üç girişi vardır: $U(t)$, v , ve p . Elektrik alt sistemin çıkışı F_m ’dir. Mekanik alt sistemin diyagramının tek girişi vardır: F_m . Mekanik alt sistemin çıkışı v ve p ’dir. Bu blok diyagramı hazırlanırken endüktans, endüktansın konuma göre türevi ve manyetik kuvvet hem konuma hem de akıma bağlı iki değişkenli fonksiyonlar olarak yazılmıştır.



Şekil 2.11. Endüktansı hem konuma hem de akıma bağlı bir EMA’nın blok diyagramı.



3. SİMETRİK SİLİNDİRİK VALFİN YAPISI VE DENEYSEL OLARAK ELDE EDİLEN ÇALIŞMA KARAKTERİSTİĞİ

Tez çalışmasında kullanılan elektromanyetik açıcı silindirik şekilli ve simetrik yapılı olduğundan simetrik silindirik valf (SSV) olarak tanımlanmıştır. Simetrik silindirik valfin fiziksel yapısı ve geometrik özellikleri bu bölümde anlatılmıştır. Ayrıca bu valfin mekanik ve elektrik ölçümleri de bu bölümde verilmiştir.

3.1. Elektromanyetik Açıcının Yapısı ve Sahip Olduğu Bileşenler

Simetrik silindirik valf, elektromıknatıs ilkesine göre çalışmakta olan cihazdır. Açıcının yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yapı manyetik olmayan şaft, nüve, hava boşluğu, yay, piston, manyetik olmayan plaka ve bobinden oluşmaktadır (Tablo 3.1). Solenoid bobin, manyetik piston ve yay yapının ana elemanlarıdır. Solenoidin uçlarına gerilim uygulandığında solenoid bobin, açıcının pistonunu çekmek için (pistonu yuvasından kaldırmak için) elektromanyetik kuvvet üretmektedir. Uygulanan gerilim kesildiğinde, elektromanyetik kuvvet ortadan kaybolur. Yay, cihazı kapalı duruma çevirmek için açıcı yuvasındaki pistona bastırarak pistonu ilk pozisyonuna geri döndürür.



Şekil 3.1. Simetrik silindirik valf.

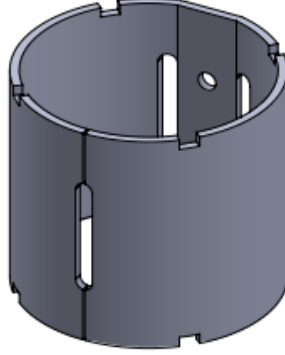
Tablo 3.1. Solenoid açıcının temel parçaları ve yapıldığı malzemeler.

Parçanın Adı	Yapıldığı Malzeme
Manyetik olmayan mil	Paslanmaz çelik
Manyetik nüve	Saf demir
Bobin	Bakır
Hava boşluğu	-
Piston	Çelik
Manyetik olmayan plaka	Paslanmaz çelik

3.1.1. Nüve

Nüve ferromanyetik malzemeden yapılmıştır. Bu materyalin ferromanyetik malzeme olarak seçilmesinin sebebi, manyetik akının dağılmasını engellemesi ve akıyı toplayarak çekme kuvvetini arttırmasıdır. Tez çalışmasında kullanılan valfin nüvesi DKP malzemesinden yapılmıştır. DKP, sıvı hale getirilen çeliğin, sürekli döküm

yöntemi izlenerek soğutma işlemi ile katılaştırılması sonucu meydana gelen çelik tipidir. Şekil 3.2’de kullanılan valfin nüvesinin çizimi görülebilir.



Şekil 3.2. Simetrik silindirik valfin manyetik nüvesi.

3.1.2. Solenoid bobin

Solenoid, açıcının en önemli parçalarından birisidir. Elektromanyetik olarak modellenmesi gereken bir parçadır [37]. Solenoide elektrik enerjisi verildiğinde sarmal bobin etrafında manyetik alan oluşmaktadır. Bu manyetik alandan dolayı oluşan manyetik kuvvet açıcının pistonunu hareket ettirmektedir. Bu tez çalışmasında Şekil 3.3’te görülen C50 tipli solenoid bobin kullanılmıştır. Bu SSV 24 V gerilim ile çalışmaktadır. Bobinin teli 0,8 mm çapa sahiptir ve bobinin sarım sayısı 4500’dür.

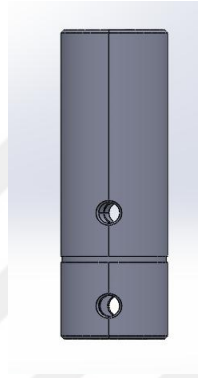


Şekil 3.3. Simetrik silindirik valfta kullanılan C50 tipli solenoid bobin.

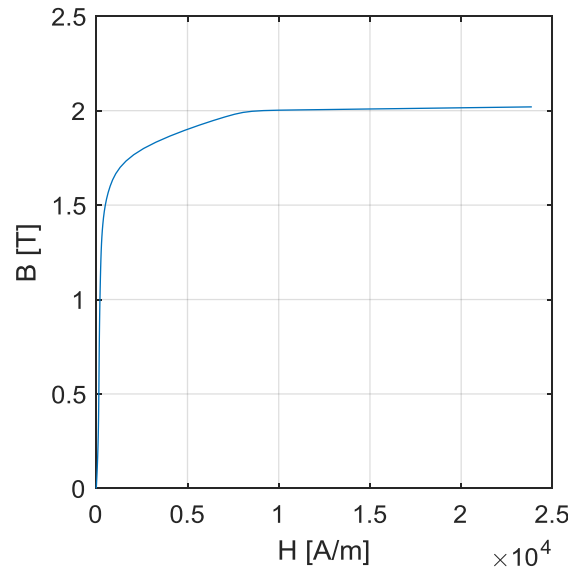
3.1.3. Piston

Piston, ferromanyetik özelliklere sahip malzemeden yapılmıştır. Pistonun dış yüzeyinde oluşan manyetik alan pistonun hareket etmesine sebep olmaktadır. Piston hareket ederek sıvının veya havanın geçeceği borunun alanını yani çıkışını kontrol

etmektedir (Bu çıkışı açar veya kapatır). Solenoide verilen elektrik enerjisi kesildiğinde pistonun üstüne yerleştirilmiş yay pistonun eski durumuna dönmesini sağlamaktadır. Bobinin sarım sayısı, bobinin boyutu, çekme kuvvetinin büyüklüğü, solenoidin akımı ve sistemin içindeki manyetik alan yoğunluğu, pistonun malzemesi gibi parametreler cihazın çekme süresini etkilemektedir. Pistonun konumuna göre hareket 3 kısımdan oluşmaktadır: Bunlar başlangıç, hareket ve hedef konumudur [35]. Şekil 3.4'te bu tez çalışmasında kullanılan açıcının pistonunun çizimi verilmiştir. Piston için Chromecore13-XP ve 430F isimli malzemeler kullanılmıştır. Malzemenin B-H eğrisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. EMA'nın Pistonu.



Şekil 3.5. Chromecore13-XP malzemesinin B-H eğrisi.

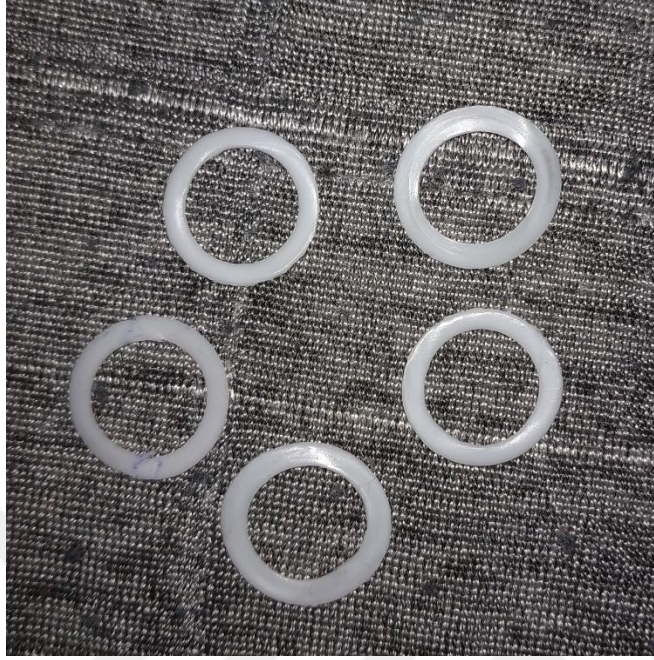
Tez çalışmasında kullanılan SSV 24 V gerilim, 1,5 A akım ile, -50 °C ve +90 °C sıcaklığı aralığında verimli şekilde çalışmaktadır. Açıcının pistonunun hareket etme mesafesi 4,25 mm'dir. Bu çalışmada ölçümler zamanı 2 farklı pistonu sahip EMA kullanılmıştır. Piston malzemesi Cromecore-13XP olan açıcı EMA 1, 430F malzemesi olan açıcı ise EMA 2 olarak tanımlanmıştır. EMA'lar için kullanılan Cromecore-13XP ve 430F malzemelerinin veri sayfalarından manyetik geçirgenlikleri belirlenmiştir [38] [39].

3.2. Deneysel Düzenekler ve Ölçümler

Tez çalışmasında ölçümler ve hesaplamalar için gerekli olan iki tane deneysel düzenek hazırlanmıştır. İlk olarak kullanılan elektromanyetik açıcılar temin edilmiştir. Daha sonra açıcının pistonunda yer alan mekanik yay üzerinde mekanik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yay sabiti ölçümü zamanı 3 farklı yay kullanılmıştır. Tez çalışmasında bu yaylar yay 1, yay 2 ve yay 3 olarak tanımlanmıştır. Ölçüm esnasında yaya belirli bir kuvvet uygulanarak yayın konumu yani dolaylı olarak sıkışma mesafesi ölçülmüştür. Daha sonra elde edilmiş sonuçlar kullanılarak Hooke yasasından faydalanarak yay sabiti hesaplanmıştır. Farklı yay sabitine sahip olan yayların açıcının çekme süresine olan etkilerine bakılmıştır.

Mekanik ölçümler ve hesaplamalar tamamlandıktan sonra açıcılar için elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elektriksel ölçümler esnasında bir DC güç kaynağı, EMA 1, EMA 2, Tektronix markalı osiloskop, akım-gerilim probu ve bağlantı kabloları kullanılmıştır. Açıcıların nominal yani çalışma gerilimi 24 V değerindedir. Ölçüm zamanı cihaza sırasıyla 18, 20, 22, 24, 26 ve 28 V gerilim uygulanmıştır. Burada verilen gerilimler üretici firma tarafından kabul edilebilir çalışma aralığındadır. Uygulanan farklı gerilim değerlerinde cihazın çektiği akımlar kaydedilmiş ve cihazın çekme süresi ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, hem EMA 1 hem de EMA 2 için gerçekleştirilmiştir. Son olarak cihazların pistonu ve tepe noktası arasına 0,5 mm kalınlığında teflon malzemeden yapılmış parçalar yerleştirilerek farklı gerilim değerleri için cihazların akım ve çekme süresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Cihazların manyetik karakteristiğinin etkilenmemesi için teflon malzemesi seçilmiştir. Her bir cihaz için, farklı kalınlıkta kullanılan teflon parçalar ile pistonun

4,25 mm olan hareket etme mesafesi kademe kademe azaltılarak 5 farklı pozisyon için ölçümler tamamlanmıştır.



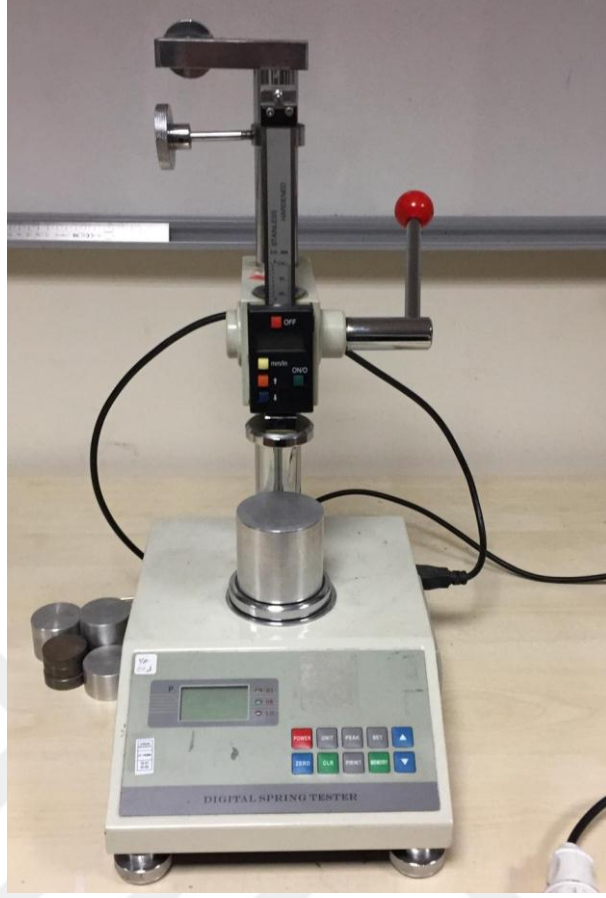
Şekil 3.6. Pistonun hareket etme mesafesini azaltmak için kullanılan teflon parçalar.

3.3. Elektromanyetik Açıcıların Yay Sabiti Ölçümleri

Hooke Yasasına göre, bir yayı normal uzunluğundan yani boyundan p kadar uzun olacak (uzatacak) şekilde germek için denklem (3.1)'de tanımlanan bir kuvvete ihtiyaç vardır. Buradaki k yay sabitidir ve her bir yay için farklıdır. Dolayısıyla da, Hooke yasası, yaya uygulanan kuvvetin (F) esneme miktarı (p) ile orantılı olduğunu söylemektedir:

$$F = -k \cdot p \quad (3.1)$$

Bu tez çalışmasında kullanılan elektromanyetik açıcıların pistonunun üzerinde kullanılan yayın sabitini bulmak için dijital göstergeli Sundoo markalı SD500 model dinamometre kullanılmıştır (Şekil 3.7). Ölçüm sırasında kullanılan açıcıların yaylarına kuvvet uygulanarak yayın sıkışma mesafesi ölçülmüştür. Elektromanyetik açıcılarda kullanılmış yay için ölçülen kuvvet ve yayın sıkışma mesafeleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Yay sabitinin ölçülmesinde kullanılan dinamometre.

Üzerinde ölçüm yapılan yayın konumu z olsun. z denklem (3.1)'deki esneme değeri (yani uzama mesafesi) yani p z 'nin sıfır kuvvet konumundan olan değişmesine karşılık gelmektedir. z 'ye bağlı olarak yay kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$F = -k \cdot z + a \quad (3.2)$$

Burada $z=z_0$ ise $p=0$ ve yayın çekme kuvveti $F=0$ 'dır. Herhangi bir yay konumu için yaydaki uzama:

$$p = z - z_0 \quad (3.3)$$

olarak verilir.

Yay sabiti hesabı için üç yay üzerinde gerçekleştirilmiş ölçümler Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Farklı parametrelere sahip yayların çekme süresine olan etkisine bakılmıştır. Denklem (3.2) ve Tablo 3.2'de verilen değerler, en küçük kareler yöntemi kullanılarak yay sabitleri belirlenmiştir. Takip eden şekilde görülen sürekli doğru en küçük kareler yöntemi kullanılarak çizilen doğrudur ve eğimi yay sabitini verir.

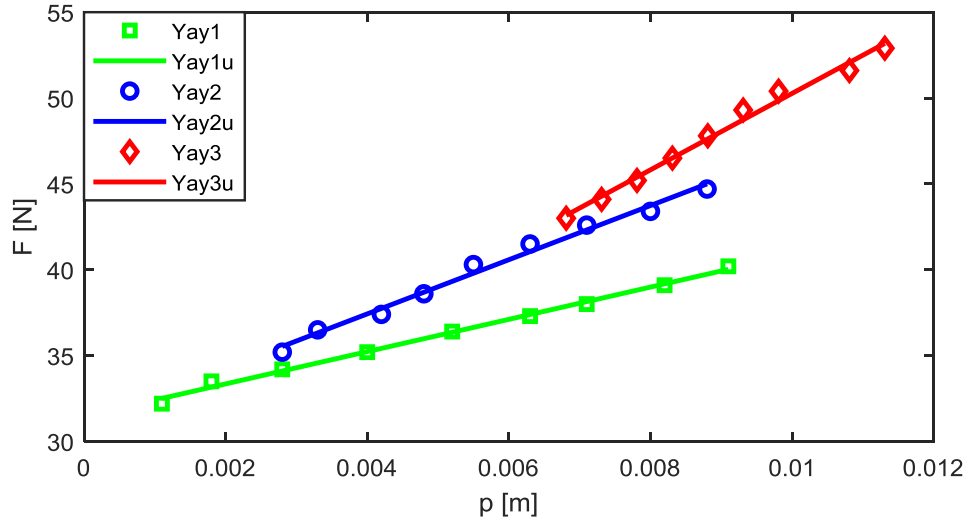
Tablo 3.2. SSV pistonu için kullanılan yaylara etki eden kuvvet ve yayın konumu.

Yay 1		Yay2		Yay 3	
F [N]	z [m]	F [N]	z [m]	F [N]	z [m]
32,2	0,0011	35.2	0.0028	43	0.00681
33,5	0,0018	36.5	0.0033	44.1	0.00731
34,2	0,0028	37.4	0.0042	45.2	0.00781
35,2	0,004	38.6	0.0048	46.5	0.00831
36,4	0,0052	40.3	0.0055	47.8	0.00881
37,3	0,0063	41.5	0.0063	49.3	0.00931
38	0,0071	42.6	0.0071	50.4	0.00981
39,1	0,0082	43.4	0.008	51.6	0.01081
40,2	0,0091	44.7	0.0088	52.9	0.01131

Bu verilerden yay 1 için yay sabiti yaklaşık 939,6 N/m, yay 2 için yay sabiti 1577 N/m ve yay 3 için yay sabiti 2225 N/m olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Yaylar için hesaplanmış yay sabiti ve referans kuvvet değerleri.

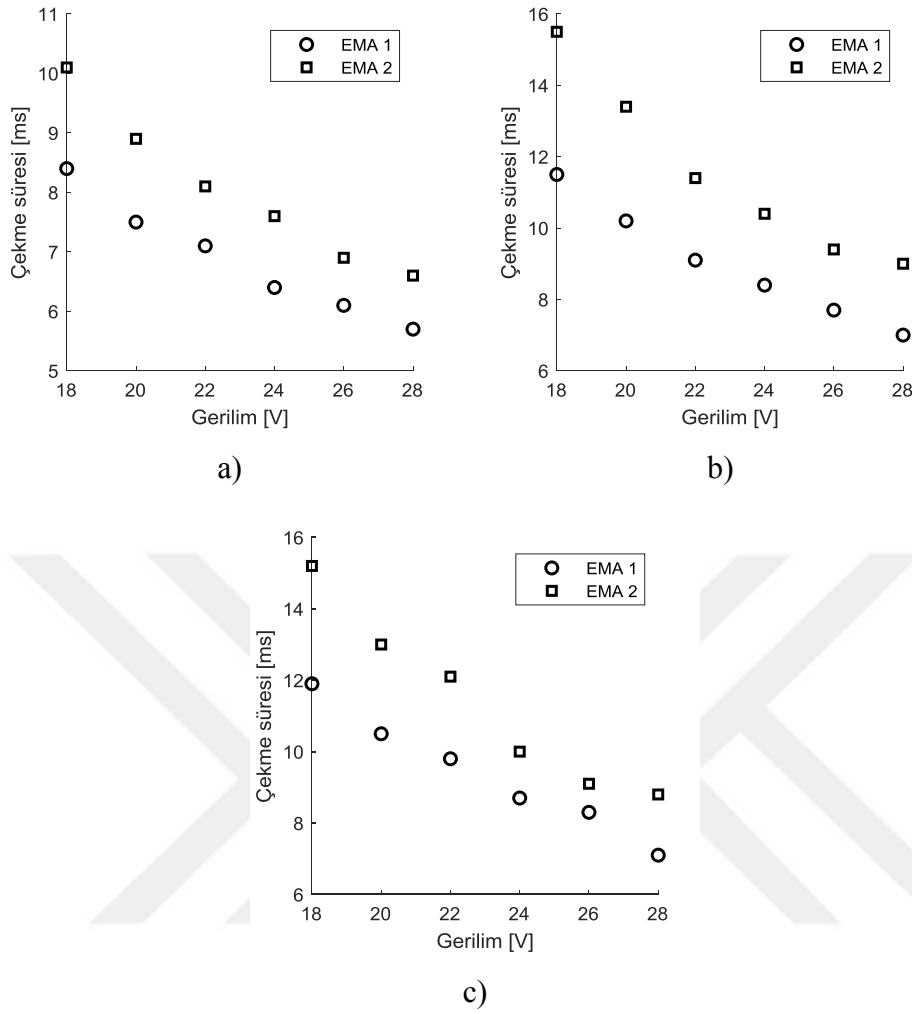
	k	z
Yay 1	939,6	31,5
Yay 2	1577	31,2
Yay 3	2225	28



Şekil 3.8. Kullanılan üç farklı SSV için yaya uygulanan kuvvetin okunan yay konumuna göre değişimi grafiği.

Şekil 3.9’da farklı yaylar için farklı gerilimlerde ölçülmüş çekme süreleri gösterilmiştir. Ölçümler 6 farklı gerilim değerinde (18 V, 20 V, 22 V, 24 V, 26 V, 28 V) ve 3 farklı sertliğe sahip yay kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ölçümlerde EMA 1 ve EMA 2 için ölçülen çekme sürelerinin gerilim değerine göre sistematik olarak azaldığı görülmektedir. EMA 2’nin çekme süresinin EMA 1’e göre her noktada daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yay sabiti arttığında çekme süresinin de arttığı görülmektedir.

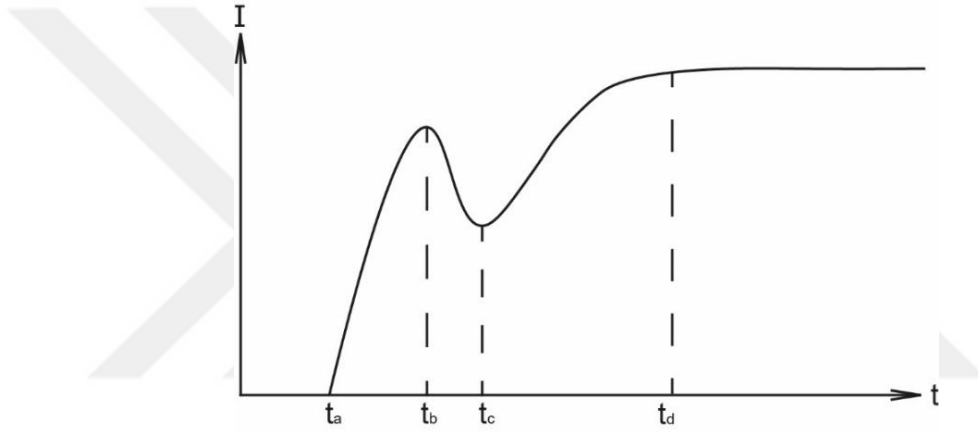


Şekil 3.9. EMA 1 ve EMA 2 için farklı yaylarda çekme sürelerinin karşılaştırılması: a)Yay 1; b) Yay 2; c) Yay 3.

3.4. Elektromanyetik Açıcıların Akımının ve Çekme Süresinin Ölçümü

Bir EMA'nın çekme karakteristiği Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Açıcıya sinyal verildiğinde piston hareket etmeye başlar. Cihaz açık duruma geldiğinde açıcının çıkışında olan akışkanın (sıvı, hava) basıncı artar. Burada t_a zamanında açıcıya başlangıç gerilimi verilmektedir. t_b zamanı ise açıcının pistonunun harekete başladığı zamandır. Başlangıçta çekme yönündeki hava aralığı maksimum olduğu için cihazın endüktansı minimumdur ve akım çok hızlı bir şekilde yükselmeye başlar. Çekilen akım manyetik çekme kuvveti oluşturarak, cihazın pistonu çekmesine neden olur. Daha sonra pistonun çektiği yöndeki hava aralığı azaldığı için endüktansın değeri artacaktır ve hıza bağlı bir geri emk oluşacaktır. Hıza bağlı olarak oluşan gerilim ve sargının

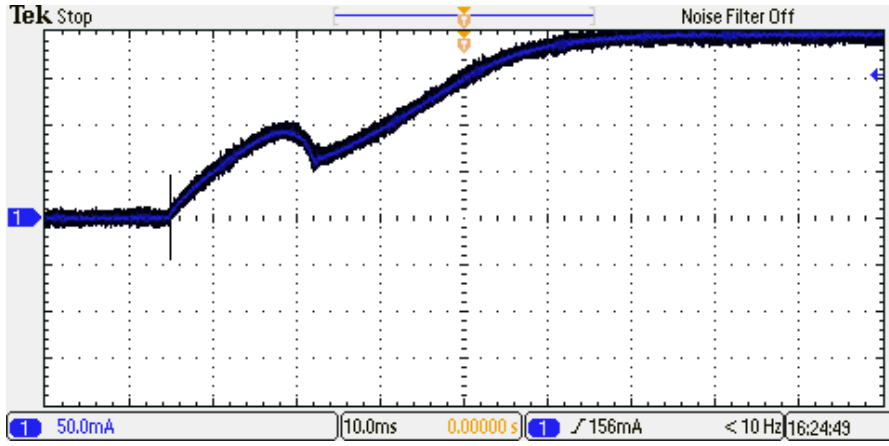
endüktansının artması pistonunun akımının önce artış hızını sınırlayarak daha sonra $t=t_b$ olduğunda akımın değerinin azalmasına neden olmaktadır. Akımın azalması $p=0$ olana kadar devam etmektedir. $p=0$ olduğu an t_c zamanına karşılık gelmektedir ve bu anda pistonunun hızı ve geri emk sıfırlanmakta ve sargının endüktansı sabitlenmekte (manyetik doyma olmakta) ve maksimum değerini almaktadır. $p=0$ 'da çekicinin eşdeğer devresi endüktör-direnç seri devresi kabul edilebilir ve $t=t_c$ anından sonra akım eksponansiyel olarak değişir. Akım t_d zamanına kadar artmaya devam edip daha sonra sabitlenmektedir. Buna sebep ise devrenin en azından zaman sabitinin beş katı süre geçmesidir.



Şekil 3.10. Genel bir EMA'nın çekme karakteristiği.

Kullanılan EMA'ların akımı ve çekme süresi, Tektronix MSO2024B markalı osiloskop kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm zamanı osiloskopun trigger fonksiyonu kullanılmıştır. Trigger işlemi ile osiloskop, sinyal verildiğinde istenen sinyal seviyesine ulaştıktan sonra ölçümlerine başlar. Çekme süresi ölçümleri için yay 1 kullanılmıştır. Burada yatay eksen zamanı, düşey eksen ise açıcıya elektrik enerjisi verildiğinde akımın değişmesini göstermektedir (Şekil 3.10).

Tez çalışması için açıcının hareket etme mesafeleri (4,25 mm; 3,75 mm; 3,25 mm; 2,72 mm ve 1,75 mm) ve çalışma gerilimleri (18 V, 20 V, 22 V, 24 V, 26 V ve 28 V) değiştirilerek ölçümler yapılmıştır. Hareket etme mesafesini değiştirmek için pistonun hareket alanına 0,5 mm kalınlıklı teflon parça eklenmiştir. Osiloskopta elde edilmiş akım karakteristiklerinden biri Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

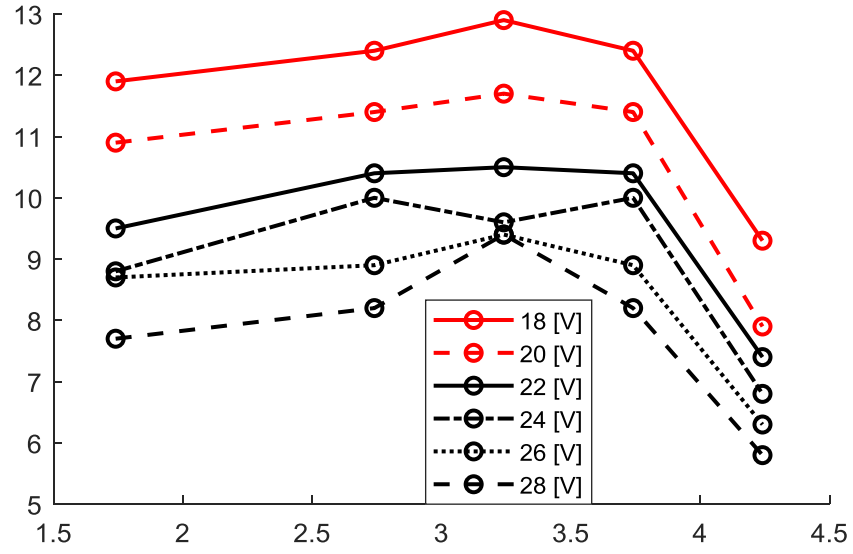


Şekil 3.11. Simetrik silindirik valfin çekme süresi.

Ayrıca Tablo 3.4'ten yararlanarak Şekil 3.12'de farklı gerilim değerlerinde pistonun hareket etme mesafeleri için çekme süreleri gösterilmiştir. Gerilim değerleri arttığında pistonun çekme süresinin azaldığı görülmektedir. Tablo 3.5'de ve Şekil 3.13'te ise EMA 2 için çekme süreleri gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Yay 1 kullanılarak EMA 1'in farklı hareket etme mesafelerinde ve gerilimlerde açıcının çekme süreleri [ms].

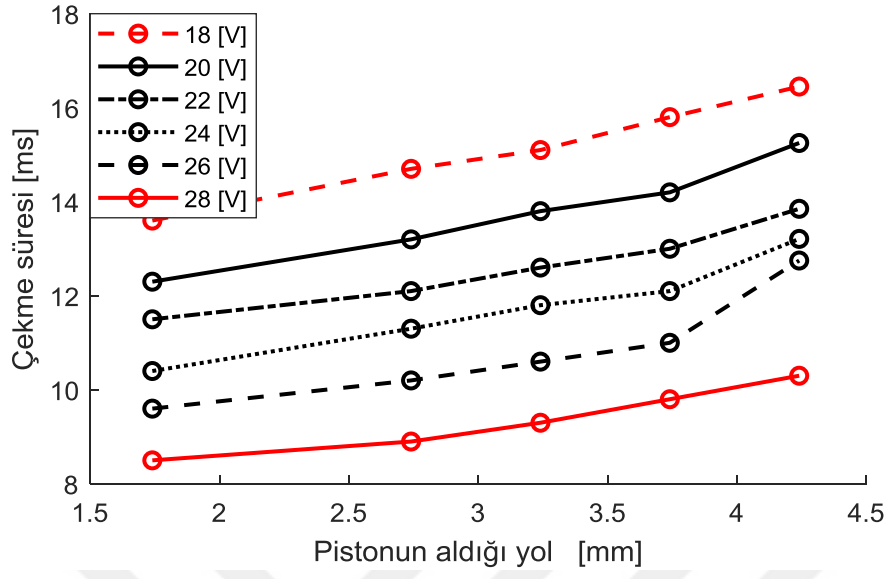
Pistonun aldığı yol / Gerilim	1,74 mm	2,74 mm	3,24 mm	3,74 mm	4,24 mm
18 V	11,9	12,4	12,9	12,4	9,3
20 V	10,9	11,4	11,7	11,4	7,9
22 V	9,5	10,4	10,5	10,4	7,4
24 V	8,8	10	9,6	10	6,8
26 V	8,7	8,9	9,4	8,9	6,3
28 V	7,7	8,2	9,4	8,2	5,8



Şekil 3.12. Yay 1 kullanılarak farklı gerilim değerlerinde EMA 1'in çekme süresinin pistonun hareket mesafesine göre değişimi.

Tablo 3.5. Yay 1 kullanılarak EMA 2'nin farklı hareket etme mesafelerinde ve gerilimler de açıcının çekme süreleri [ms].

Pistonun aldığı yol / Gerilim	1,74 mm	2,74 mm	3,24 mm	3,74 mm	4,24 mm
18 V	13,6	14,7	15,1	15,8	16,4
20 V	12,3	13,2	13,8	14,2	15,2
22 V	11,5	12,1	12,6	13	13,8
24 V	10,4	11,3	11,8	12,1	13,2
26 V	9,6	10,2	10,6	11	12,7
28 V	8,5	8,9	9,3	9,8	10,3



Şekil 3.13. Yay 1 kullanılarak farklı gerilim değerlerinde EMA 2'nin çekme süresinin pistonun hareket mesafesine göre değişimi.

4. COMSOL PROGRAMI KULLANILARAK ELEKTROMANYETİK AÇICININ MODELLENMESİ

4.1. COMSOL Multiphysics Programında Çözüm ve Analiz Altyapısı

COMSOL Multiphysics, bilimsel ve mühendislik problemlerini modellemek ve çözmek için kullanılan simülasyon programıdır. Bu programda farklı fizik türü veya birleşik fizik olayları modellenenbilmekte ve çözülebilmektedir. [40]. Farklı fizik modellerini kullanarak, aşağıdaki analizler yapılabilir:

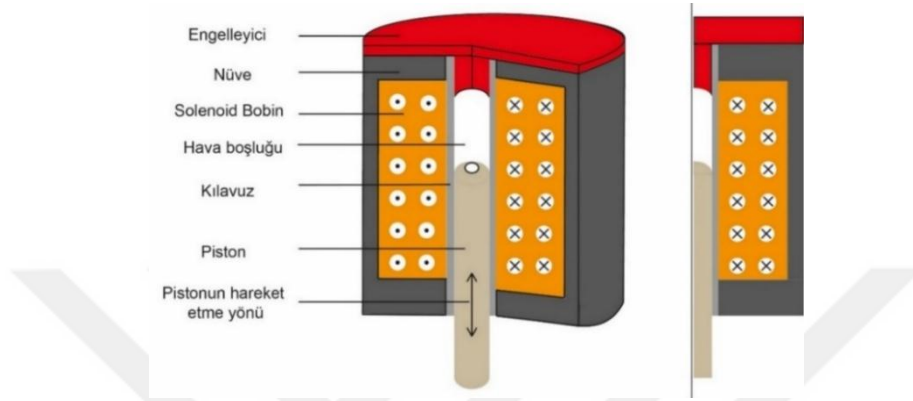
- a. Durağan ve zamana bağlı (geçici) analiz ve çözümler.
- b. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz ve çözümler.
- c. Mod ve frekans yanıtı analiz ve çözümleri.

Bu tezde bu programın kullanılmasının ana nedeni içinde çoklu fizik modellerinin olması (yapı mekaniği, ısı transferi, akışkanlar mekaniği vb.) ve hata oranının az olmasıdır. COMSOL Multiphysics programında fiziksel modellerin çözümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi mühendislikte, matematiksel modellerde kullanılan ve karmaşık problemlerin çözülmesini sağlayan bir sayısal analiz yöntemidir. Bu yöntem yapı statik, akışkanlar mekaniği, elektrostatik, magnetostatik, kütle aktarımı gibi problemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, elimizdeki nesneyi sonlu sayıda elemanlara ayırarak problemin daha rahat bir şekilde çözülmesine imkân sağlamaktadır [41]. Sonlu elemanlar yöntemi ile bir sistemin incelenmesine sonlu elemanlar analizi de denilmektedir.

SEY tipli programlarda modelleme ve simülasyon için diferansiyel denklemler sıklıkla kullanılmaktadır. COMSOL Multiphysics'te isteğe bağlı eklenti modülleri de vardır. Bu özel modüller analiz etme ve model oluşturma gibi kısımları basitleştiren ve belirli bir disipline özgü çözüm yöntemleri kullanmaktadır [42].

SEY veya SEA tipi yazılımlarda yapılar iki veya üç boyutlu şekilde tasarlanabilmektedir (Şekil 4.1). J. Łagodziński ve E. Tkacz solenoid açıcının eksenel

simetrik modelini (2D) ve 3 boyutlu (3D) modelini SEY yöntemiyle modellemiştir [43]. İki modelin SEY ile yapılmış analiz sonuçları geniş bir girdi parametreleri aralığında deneysel olarak doğrulanmıştır. Verilen akım değerleri için bobin çekme kuvveti ile valf pistonu arasındaki deneysel statik karakteristikler simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Genel bir elektromanyetik açıcının kesilmiş 3D ve 2D eksenel simetrik görünümü.

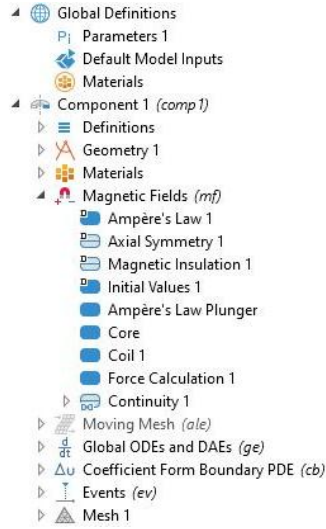
Qianfeng Liu ve ark. solenoid yapılarda yaptığı çalışmada açıcının manyetik kuvvetinin hava boşluğunda artan akım değerine göre değiştiğini gösterdiler [44]. Akım belirli bir değere (eşik değerine) ulaştığında manyetik kuvvet satürasyon noktasına ulaşmaktadır. Temas yüzeyi silindirik olan açıcının manyetik kuvveti koni şekilliye göre daha büyüktür. Tezin bu bölümünde simetrik silindirik valfin akımı ve pistonun konumu değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır.

4.2. Simetrik Silindirik Valfin COMSOL Multiphysics ile Modelleme Aşamaları

Modelleme ve simülasyon işlemi birkaç farklı adımdan oluşmaktadır. Parametrelerin belirlenmesi, yapının geometrisinin oluşturulması, mesh yapısının belirlenmesi, fiziksel veya matematiksel hesaplamalar gibi adımları kapsamaktadır.

4.2.1. Uygun fizik ve çalışma altyapısının hazırlanması

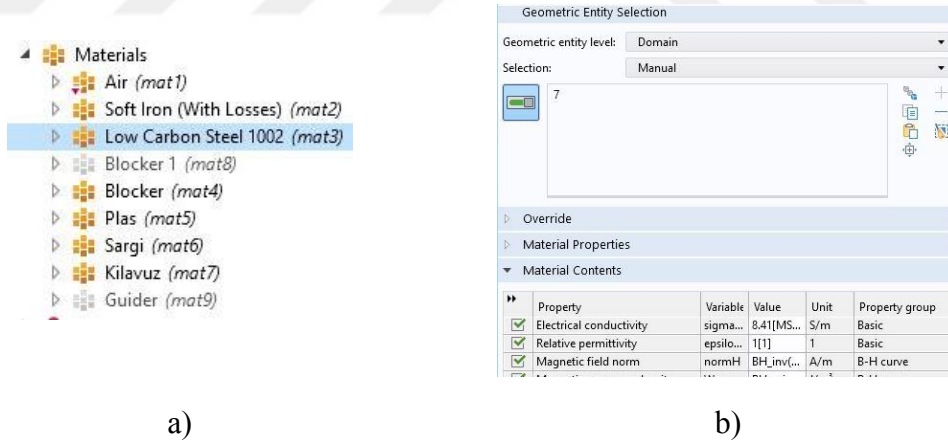
Tez çalışmasında kullanılmış açıcının yapısı programın *Geometry* sekmesinde modellenmiştir (Şekil 4.2). Elektromanyetik açıcının geometrik modeli, simetrik yapısı nedeniyle 2D aksisimetri (eksenel simetrik) uzay modeli seçilerek oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. COMSOL Multiphysics programında modelleme ve simülasyon için kullanılan sekmeler.

4.2.2. Materyal seçimi

COMSOL Multiphysics programında *Materials* (Şekil 4.3.a) sekmesinde kullanılmış parçalara uygun olan materyaller seçilmiştir. Daha sonra *Material Contents* (Şekil 4.3.b) kutusu kullanılarak materyale ait olan parametreler girilmiştir.



Şekil 4.3. COMSOL Multiphysics programında *Materials* sekmesi.

4.2.3. Pistonun hareketi

Simetrik silindirik valfa akım uygulandığında yapıdaki solenoid bobin, piston ve manyetik nüve bir manyetik alan ve dolayısıyla piston üzerinde bir manyetik kuvvet oluşturmaktadır. Manyetik kuvvet, pistonu çekerek hızlandırmakta ve açıcının tepe noktasında yerleşmiş yaya karşı hareket etmektedir. Manyetik kuvvet ona karşı koyan yay kuvvetinden büyük ise kalıcı halde tepe noktası ile temas haline gelip bu

pozisyonda kalacaktır. Cihaza verilen akım kesildiğinde manyetik kuvvet ortadan kalkacak ve yayın çekme kuvvetinden dolayı piston eski konumuna dönecektir. Pistonun tepe noktasına temas etmesi ve serbest kalma mekanizmasının modellenmesi COMSOL yazılımında *Events* sekmesinde gerçekleştirilmiştir.

4.2.4. Elektromanyetik alanın benzetimi

Açıcı elektromanyetik yapıya sahip olduğundan *Magnetic Fields* sekmesinde manyetik alan parametreleri tanımlanmıştır (Şekil 4.4). Pistonun ve nüvenin elektromanyetik alanlarını simüle etmek için *Magnetic Fields* sekmesine bulunan aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [41].

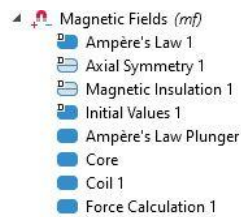
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (4.1)$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (4.2)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \times \vec{B} + \vec{J}_e \quad (4.4)$$

Burada $\vec{H}$, manyetik alan; $\vec{J}$, akım yoğunluğu; $\vec{B}$, manyetik akı yoğunluğu; $\vec{A}$, manyetik vektör potansiyeli; $\vec{E}$, elektrik alanı; $\vec{J}_e$, dış akım yoğunluğudur. *Magnetic Fields* sekmesinin *Ampère's Law* kutusu kullanılarak piston ve nüve B – H eğrilerine göre modellenmiştir. Çalışmada kuvvet hesabı için Maxwell stres tensörü yöntemi kullanılmış ve *Force Calculation* kutusu eklenerek manyetik kuvvet hesaplanmıştır.

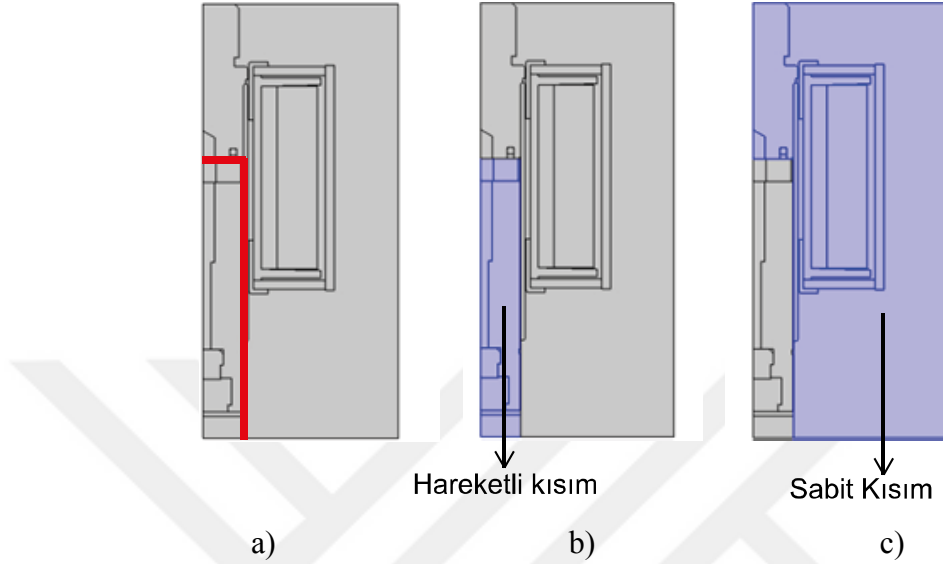


Şekil 4.4. *Magnetic Fields* sekmesi.

4.2.5. Lineer hareketin benzetimi

Tez çalışmasında simetrik silindirik valfin pistonunun doğrusal hareketinin modellenmesi için geometri oluşturulurken sabit ve hareketli kısımlar tanımlanmış ve hareket *moving mesh* (kayan ağ) sekmesinde modellenmiştir. Sabit ve hareketli kısmı

ayırır sınır Şekil 4.5.a’da gösterilmiştir. Burada kırmızı çerçevenin içinde kalan kısım kullandığımız elektromanyetik açıcının hareketli (Şekil 4.5.b), dışında kalan diğer kısım ise sabit olan parçalarıdır (Şekil 4.5.c).



Şekil 4.5. Açıcının hareketli ve hareketsiz kısımları a) Hareketli ve sabit kısmı ayırır sınır (kırmızı çizgi); b) Hareketli kısım; c) Sabit kısım.

Moving mesh ayarlarında öncelikle hareketli kısımlar seçilerek piston ve hava boşluğunun yer değiştirmesi için *Z_YD* isimli değişken tanımlanmıştır. *Z_YD* değişkeni *Coefficient Form Boundary PDE* penceresi kullanılarak çözülmüştür.

Events sekmesi kullanarak pistonun tepe noktasına dokunması ve serbest bırakılması modellenmiştir. Modelleme için *PistonDurumu* isimli değişken tanımlanmıştır. Bu değişkende, başlangıç durumunda piston temas halinde olmadığından 0 değeri atanmıştır (Şekil 4.6.a). *Discrete States* penceresi, başlangıçta temas halinde olmayan pistonun durumunu tanımlamak için kullanılmaktadır (Şekil 4.6.a). *Events* sekmesinde *Indicator States* kutusu eklenerek *Global ODEs and DAEs* sekmesinin yardımıyla pistonun tepe noktasına temas etmesi modellenmiştir. Bu modellemenin gerçekleşmesi için kapalı ve açık gösterge durumları eklenmiştir. Kapalı pozisyon $z_{max}-p_z=0$, açık pozisyon ise $k*p_z-F_z>0$ şartlarında çalışmaktadır. Burada z_{max} , pistonun tepe noktasında olduğu konumu; p_z , başlangıç konumu; k , yay sabiti; F_z , ise manyetik kuvvettir (Şekil 4.6.b).

Label: Discrete States 1			Indicator States		
▼ Discrete States			Label: Indicator States 1		
$u(t_0) = u_0$			▼ Indicator Variables		
			$nojac(g(v, v_t, v_{tt}, t)) - u = 0, u(t_0) = u_0$		
» Name	Initial value (u0)	Description	» Name	$g(v, v_t, v_{tt}, t)$	Initial value (u0)
PlungerState	0		Close	$z_max - p_z$	0
	0		Open	$k * p_z - F_z$	0
				0	0

a)

b)

Şekil 4.6. Events kutusu.

Hareket olaylarının tam başlama zamanı bilinmediğinden *Implicit Events* kutusu kullanılarak piston durumunu değiştirmek için mantıksal koşullar kullanılmıştır. Açık ve kapalı gösterge durumlarının sıfırdan büyük veya küçük olmasına bağlı olarak, pistonun durumunu sıfır veya bir olacak şekilde yeniden başlatmak için iki *Implicit Event* kutusu eklenmiştir. Benzetim sırasında, mantıksal koşul oluştuğunda bu olaylar tetiklenir. Piston *PistonDurumu* değişkeni ve *Global ODEs and DAEs* sekmesinde hız ve kuvvet gibi denklemleri kullanarak duracak veya yeniden harekete başlayacaktır.

Global ODEs and DAEs sekmesinde yay sabiti k olan yaya ve sönümleme katsayısı D olan sönümleyiciye bağlı elektromanyetik pistonun hareketi denklem (2.43), denklem (2.44) ve denklem (2.47)'den yararlanarak denklem (4.5) ve denklem (4.6)'daki şekilde düzenlemiş ve pistonun hareketi bu denklemler kullanılarak simüle edilmiştir.

$$M \frac{dv}{dt} + Dv + kp_z - F_z(p_z, v, t) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{dp_z}{dt} - v = 0 \quad (4.6)$$

Burada v pistonun hızı, M pistonun kütlesi ve $F_z(p_z, v, t)$ yaya karşı etki eden pistonun manyetik kuvvetidir.

Simülasyon zamanı kullanılan pistonun ağırlığı, yay sabiti ve sürtünme değeri Tablo 4.1'de verilmiştir. Bütün simülasyonlar da modelleme için yay 1 seçilmiştir.

Tablo 4.1. COMSOL simülasyonunda kullanılan parametreler.

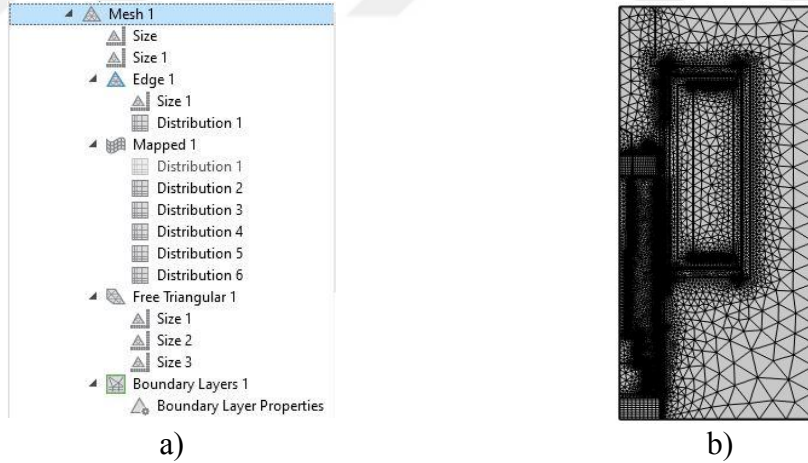
M	0,085	kg
D	9,15	Kg/s
k	939,6	N/m

Global Equations			
Label: Global Equations 1			
Global Equations			
$f(u, u_t, u_{tt}, t) = 0, u(t_0) = u_0, u_t(t_0) = u_{t0}$			
"	Name	f(u, u_t, u_{tt}, t) (N)	Initial value
v		if(PistonDurumu, v*1[kg/s], (d(v, t)*M-Fz+...	0
			0
			0

Global Equations			
Label: Global Equations 2			
Global Equations			
$f(u, u_t, u_{tt}, t) = 0, u(t_0) = u_0, u_t(t_0) = u_{t0}$			
"	Name	f(u, u_t, u_{tt}, t) (m/s)	Initial value
p		if(PistonDurumu, (p-z_max)/1[s], (d(p, t)-v))	0
			0
			0

Şekil 4.7. Global ODEs and DAEs sekmesi ve açıcının hareket denklemlerinin eklenmesi.

Oluşturulmuş simetrik silindirik valfin ağ yapısı Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Açıcının ağ yapısı SEY kullanılmasıyla kaynaklanmaktadır. Yapının hareketli ve hareketsiz kısımları sonlu sayıda küçük parçalara ayrılarak açıcının ağ yapısı oluşturulmuştur.

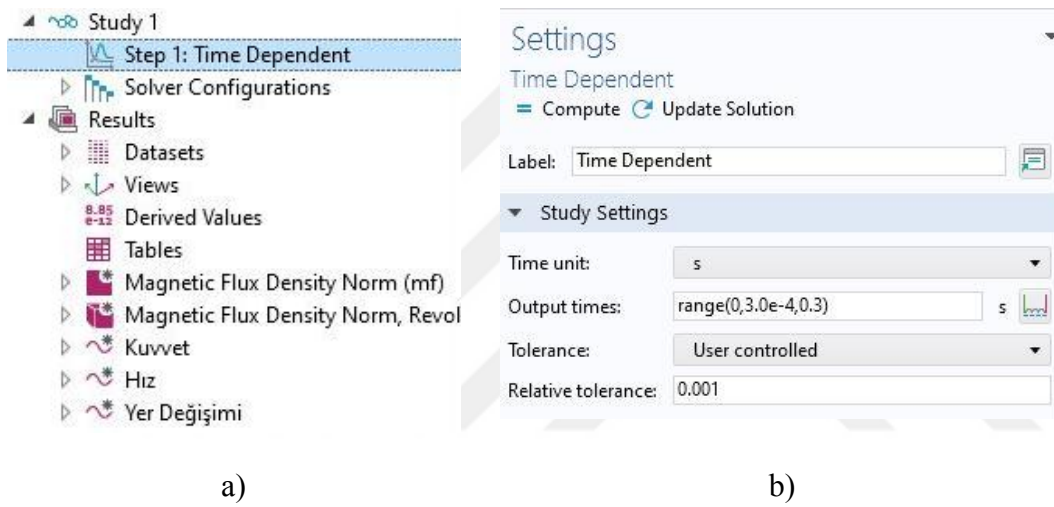


Şekil 4.8. Elektromanyetik açıcının ağ yapısı oluşturulması: a) *Mesh* sekmesi; b) EMA’nın ağ yapısı.

EMA’nın ağ yapısı oluşturulurken yapı üçgen parçalara ayrılmıştır. Hareketli ve hareketsiz kısmı ayıran sınır ise *Edge* kutusu kullanılarak modellenmiştir. *Free Triangular 1* kutusu kullanılarak yapıdaki piston ve nüvenin ağ yapısı oluşturulmuştur. *Mapped* kutusu kullanılarak ise pistonun hareket ettiği kısmın ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 4.8).

4.3. Benzetim Sonuçları

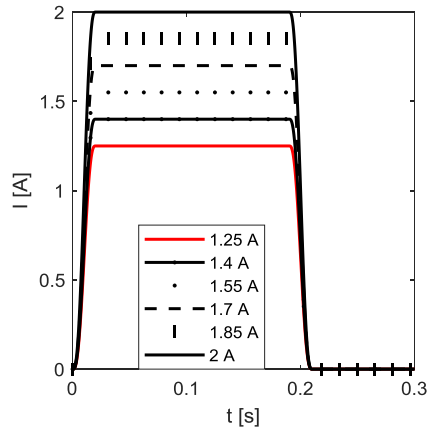
COMSOL programında yapının çalışma akımı ve pistonunun hareket etme mesafesi değiştirilerek benzetimler gerçekleştirilmiştir. Pistonun hareket etme mesafesi, açıcının pistonunun hareket ettiği alana 0,5 mm manyetik olamayan malzeme eklenerek azaltılmıştır. Benzetimi gerçekleştirmek için *Study* sekmesi seçilmiştir. *Step 1: Time Depent* kutusu kullanılarak benzetimin süreceği zaman ve adım aralığı seçilmiştir (Şekil 4.9). Daha sonra ise *Results* sekmesi kullanılarak benzetim sonuçlarına bakılmıştır.



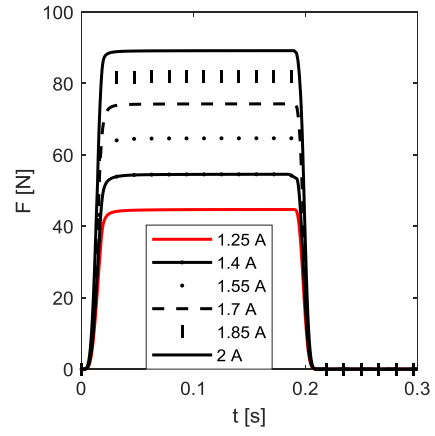
Şekil 4.9. Benzetim kontrolleri a) *Study* ve *Results* sekmeleri; b) *Step1: Time Depent* sekmesi.

4.3.1. Farklı akım değerleri için EMA 1'in benzetim sonuçları

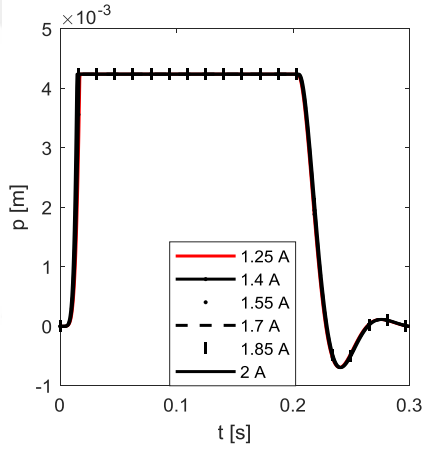
Simülasyon çalışmasında ilk olarak EMA'nın pistonu Cromecore-13XP malzemesi seçilmiştir. Çalışmada EMA sargısına sırasıyla 1,25 A; 1,4 A; 1,55 A; 1,7 A; 1,85 A ve 2 A tepe değerli trapez şeklinde bir akım uygulayarak, benzetimler yapılmıştır. Bunun sonucunda trapez şeklindeki akımın manyetik kuvvet, hız ve pistonun aldığı yol üzerindeki etkileri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



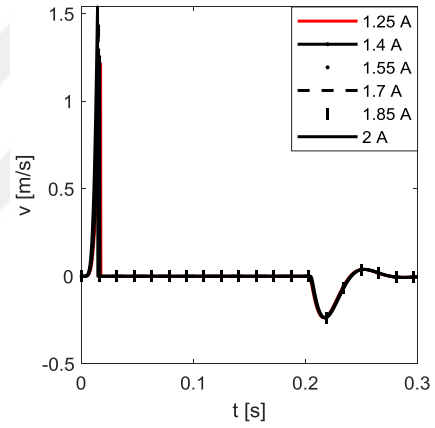
a)



b)



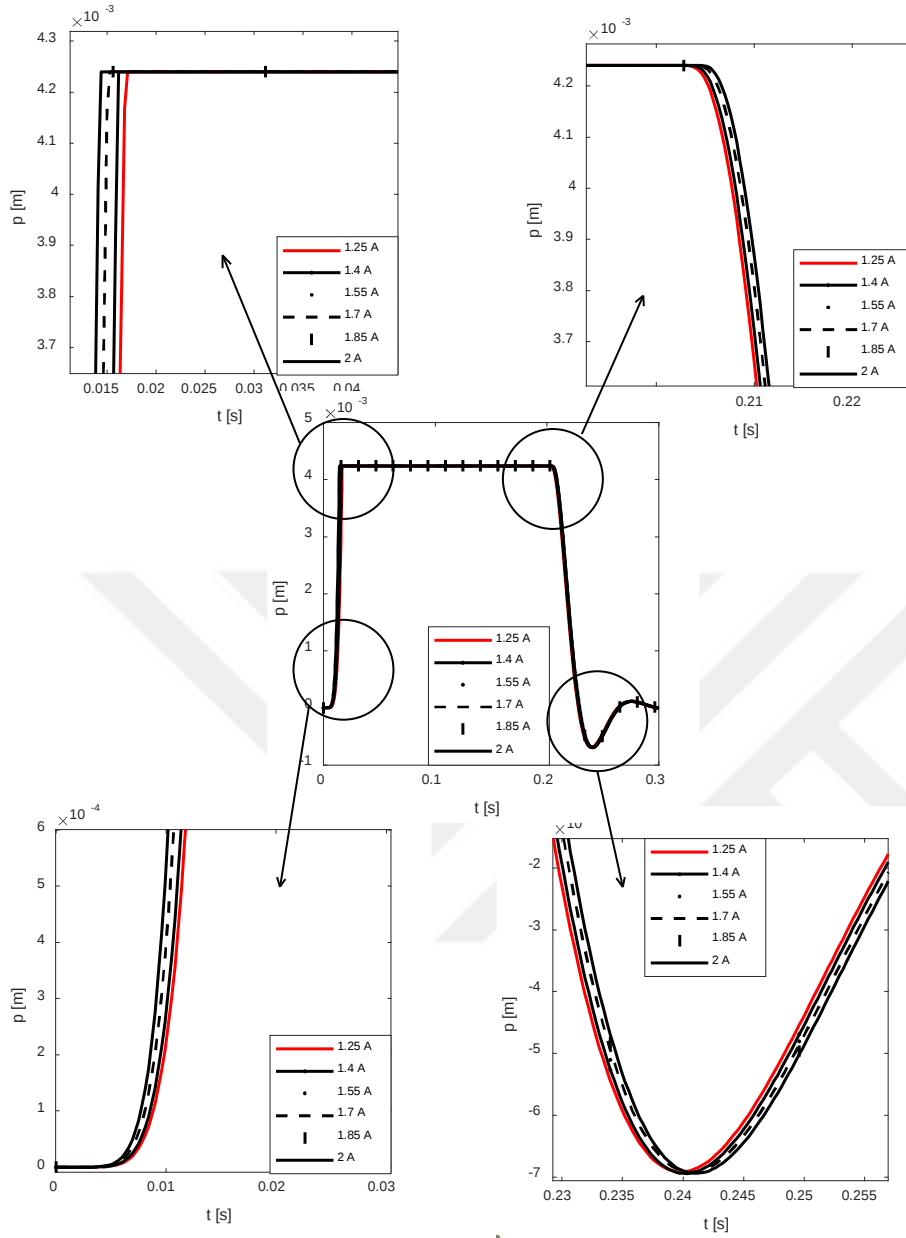
c)



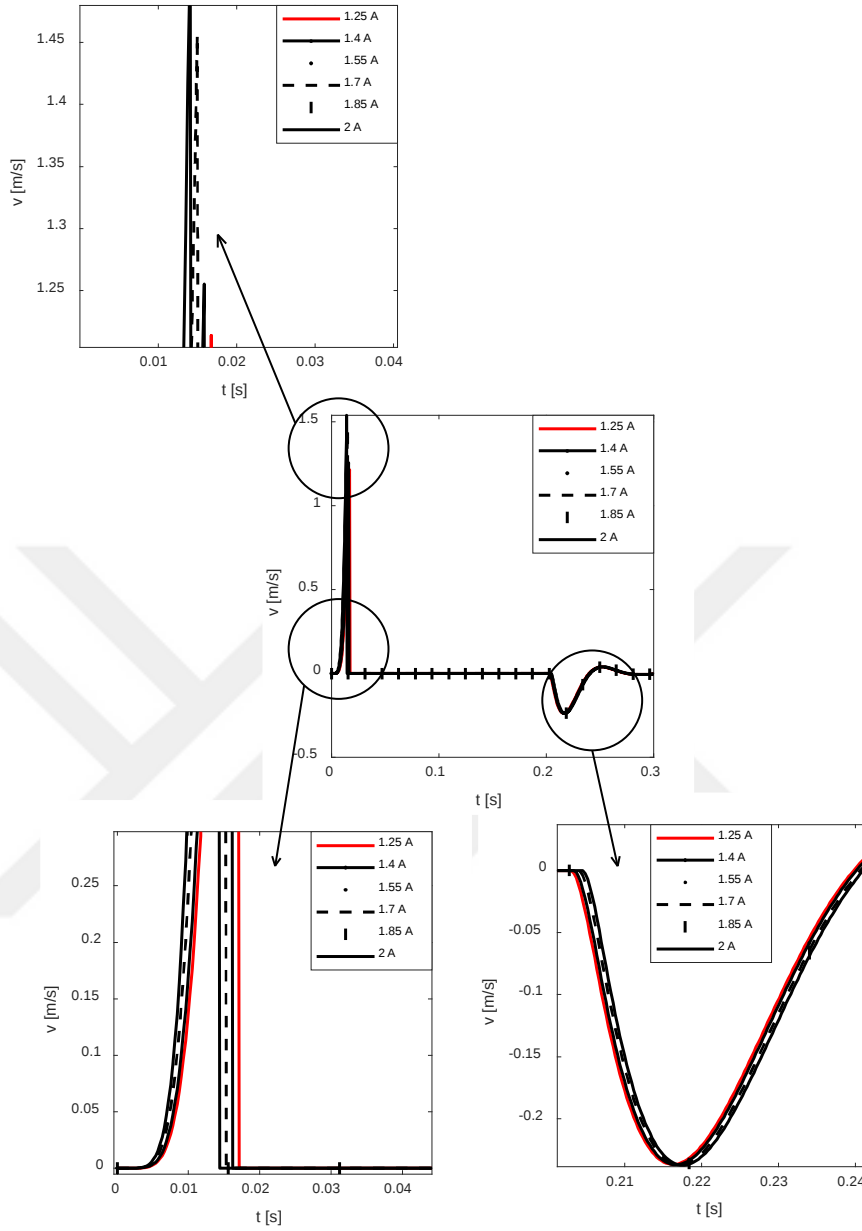
d)

Şekil 4.10. EMA 1 için farklı akım değerlerinde gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de sırayla konum-zaman ve hız-zaman karakteristikleri gösterilmiştir. Bu şekillerde benzetim sonucunda elde edilen kuvvet karakteristiğinin akıma bağlı olduğu görülmektedir. İlk başta piston çekilmemişse sistem doymada olmadığından kuvvet akımın karesine bağlıdır. Pistonun tam çekildiği zaman ise manyetik malzeme doymada olduğundan kuvvet akım ile doğru orantılıdır. Bu benzetimlerde açıcının çalışma akımı arttığında pistonun çekme hızının da arttığı görülmektedir.



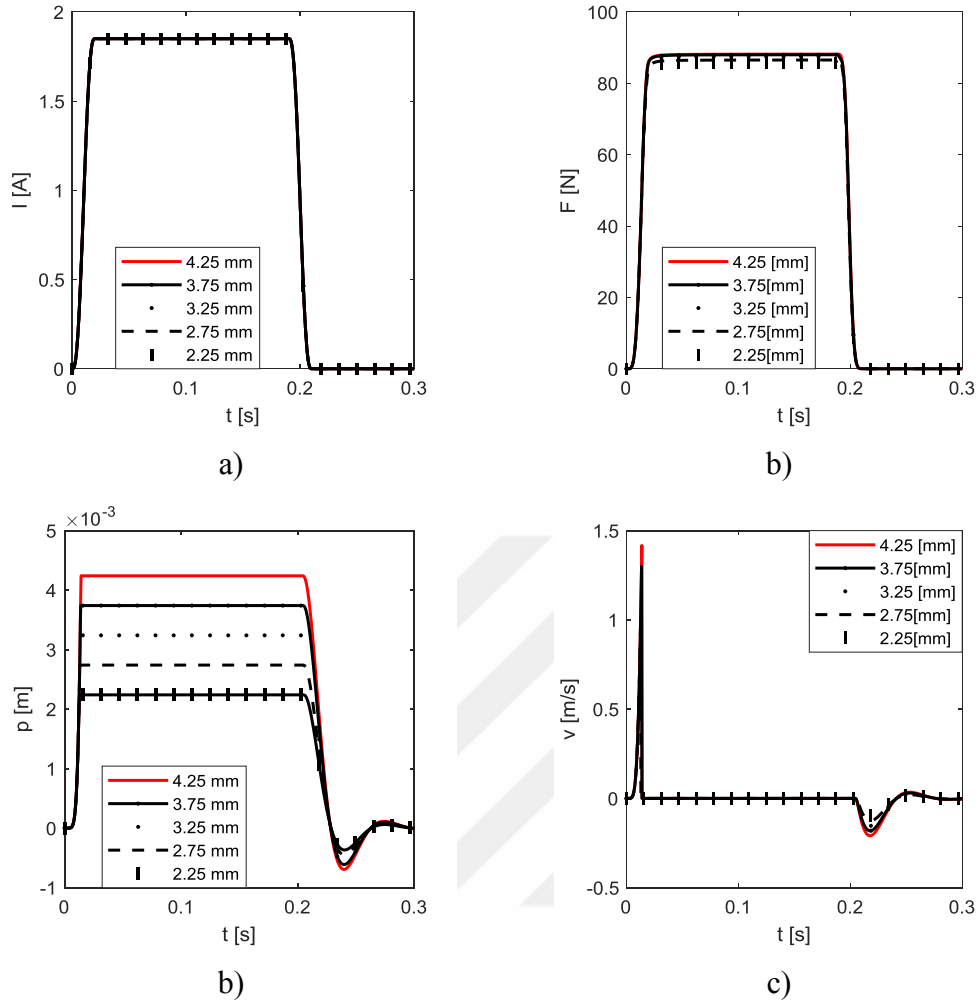
Şekil 4.11. EMA 1 için farklı akım değerlerinde pistonun aldığı yol karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.



Şekil 4.12. EMA 1 için farklı akım değerlerinde çekme hızı karakteristiği.

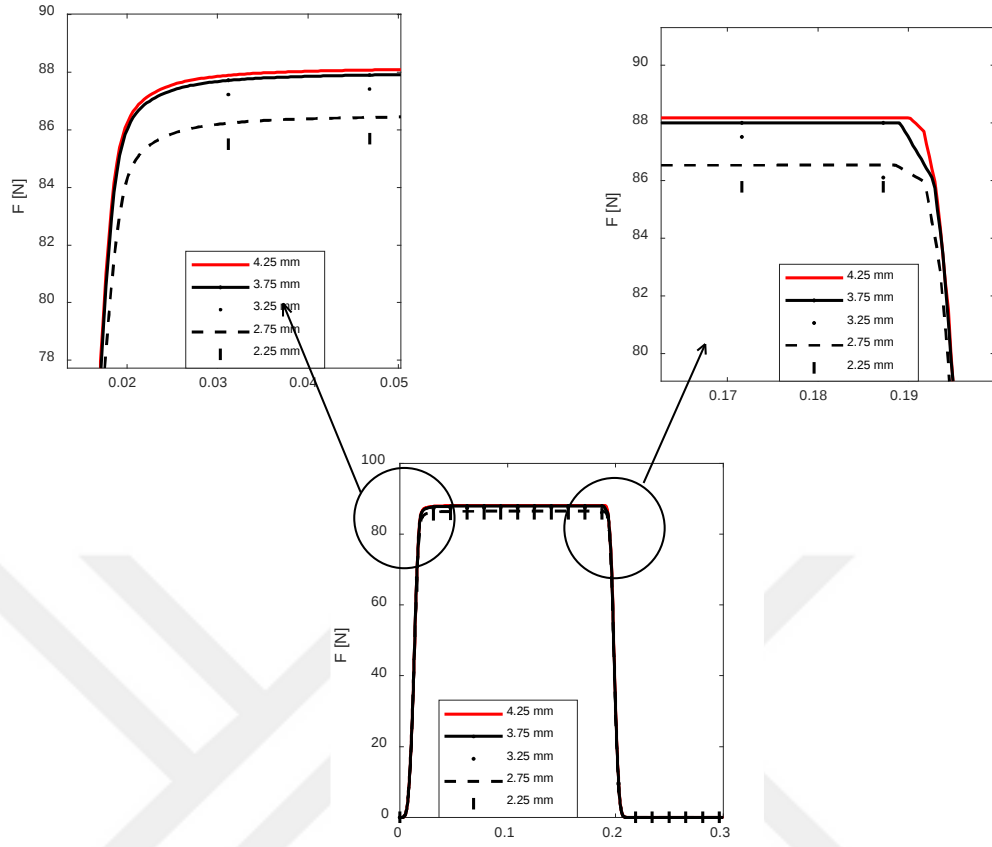
4.3.2. Farklı hareket mesafeleri için Cromecore-13XP malzemesinin benzetim sonuçları

Açıcının pistonunun maksimum hareket mesafesi 4,25 mm; 3,75 mm; 3,25 mm; 2,75 mm ve 2,25 mm yapılarak benzetimler yapılmıştır (Şekil 4.13).

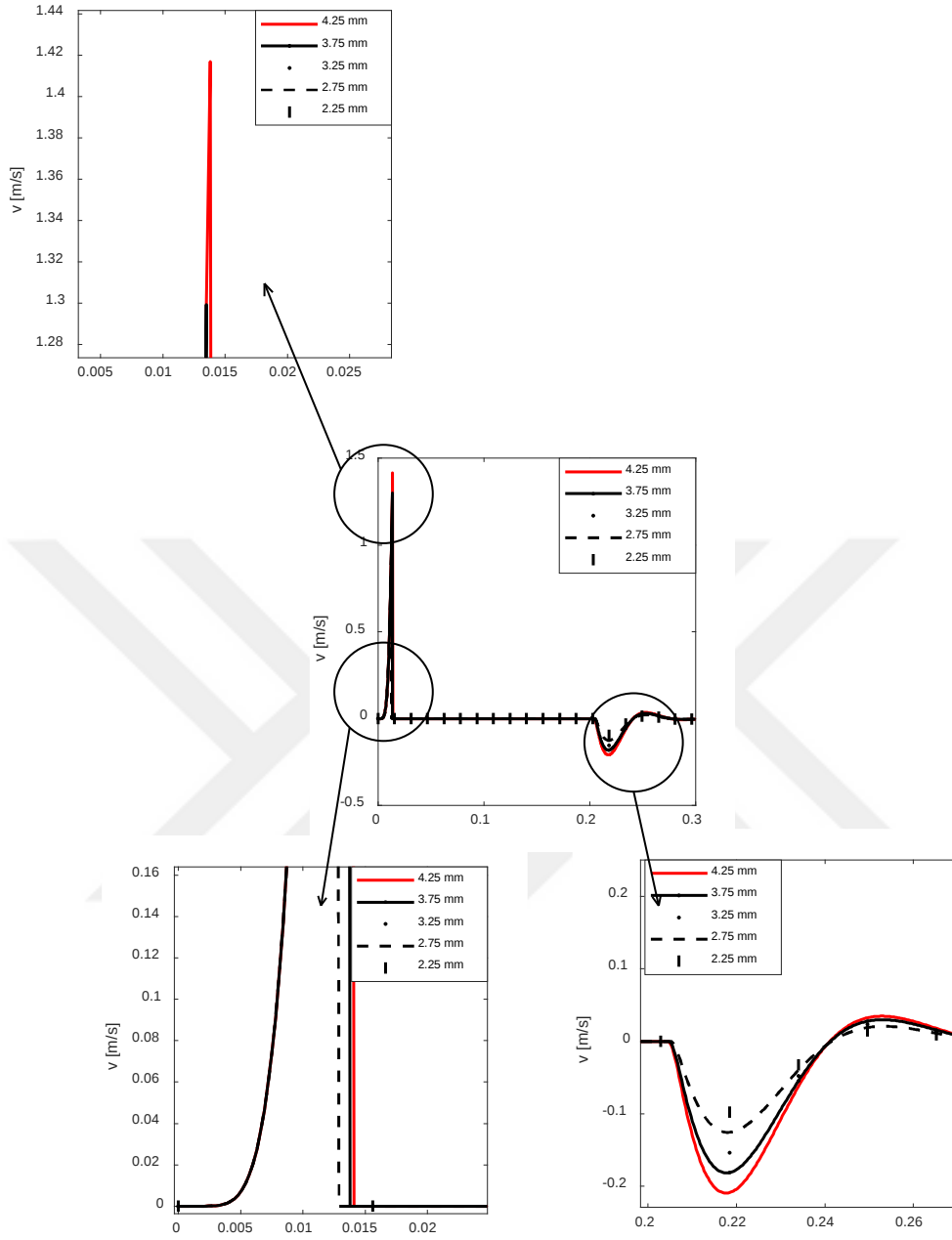


Şekil 4.13. EMA 1 için pistonun farklı konumlarında gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.

Simülasyon sonucunda elde edilmiş kuvvet-zaman ve hız-zaman karakteristikleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de yakınlştırılarak verilmiştir. Bu simülasyonlarda akım değeri sabit tutulup pistonun aldığı yol değıştirilmiştir. Burada piston tam çektiğı pozisyona yaklaştıkça yani açıcı kapalı pozisyona geldikçe manyetik kuvvet de artmaktadır.



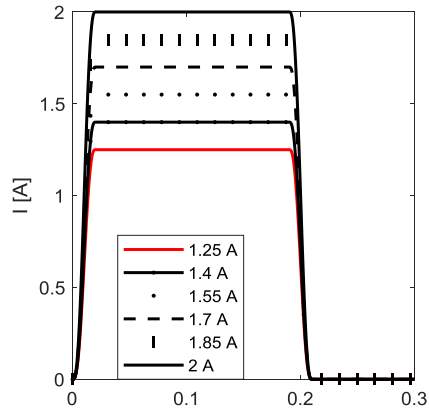
Şekil 4.14. EMA 1 için pistonun farklı konumlarında manyetik kuvvet (F_m) karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.



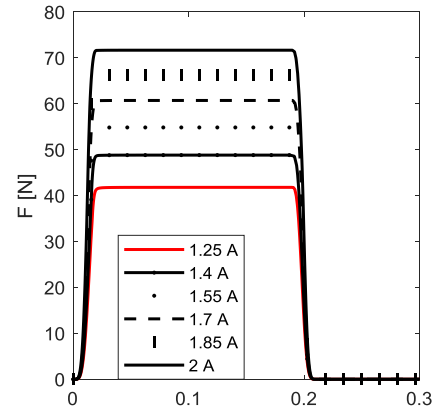
Şekil 4.15. EMA 2 için pistonun farklı konumlarında çekme hızı karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.

4.3.3. Farklı akım değerleri için EMA 2'nin benzetim sonuçları

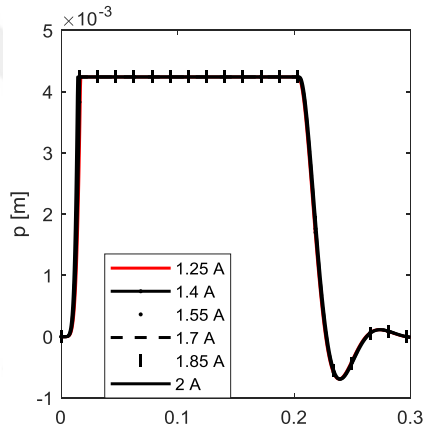
Elektromanyetik açıcının benzetimi piston materyali 430F yapılarak tekrarlanmıştır. Farklı akım değeri için elde edilmiş akım-zaman, kuvvet-zaman, konum-zaman ve hız-zaman karakteristikleri Şekil 4.16'te gösterilmiştir.



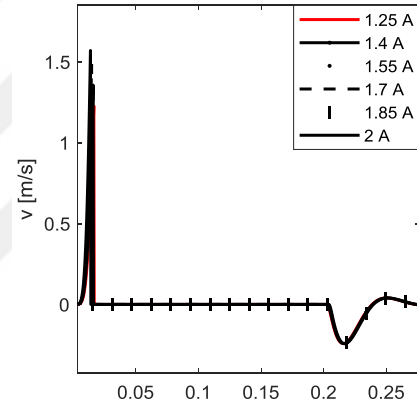
a)



b)



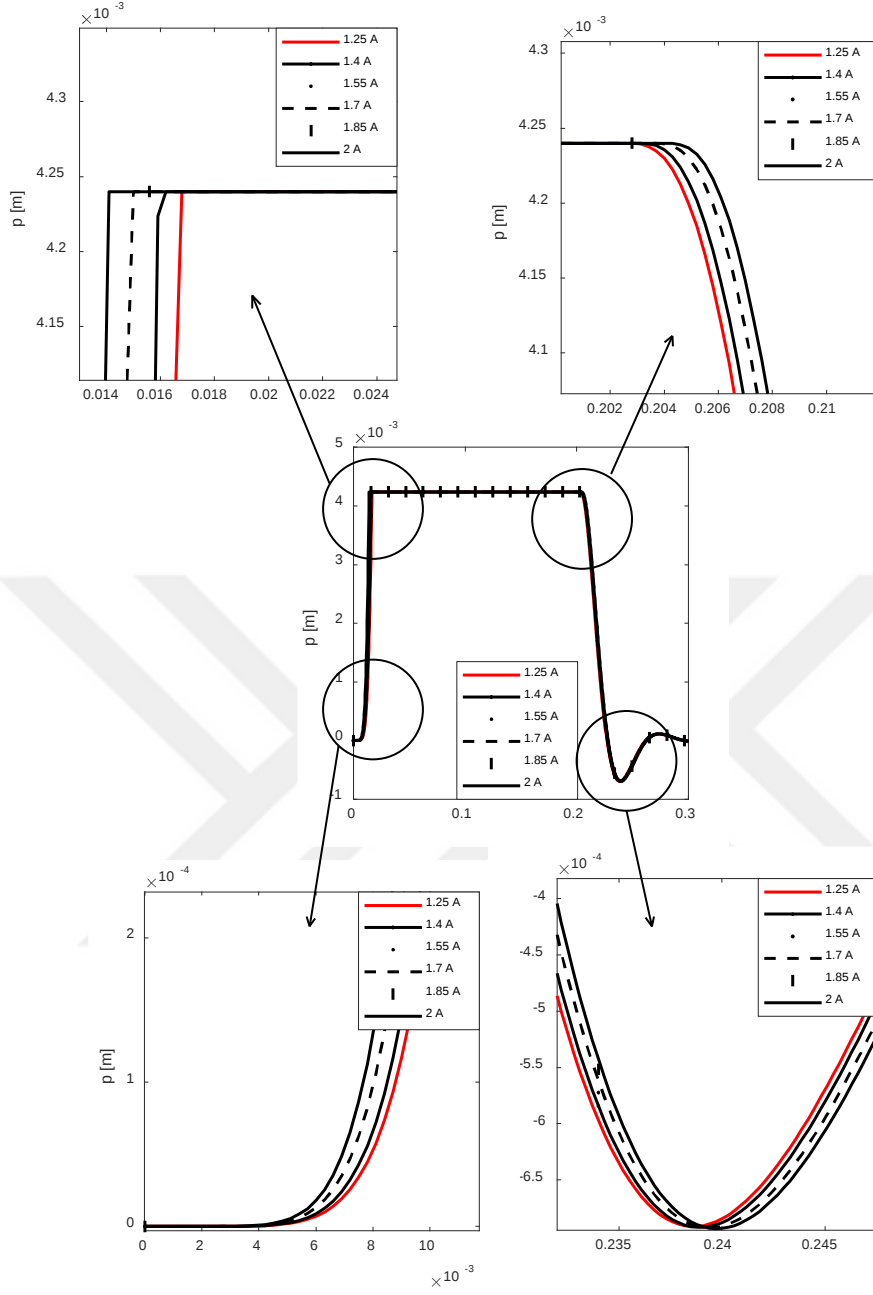
c)



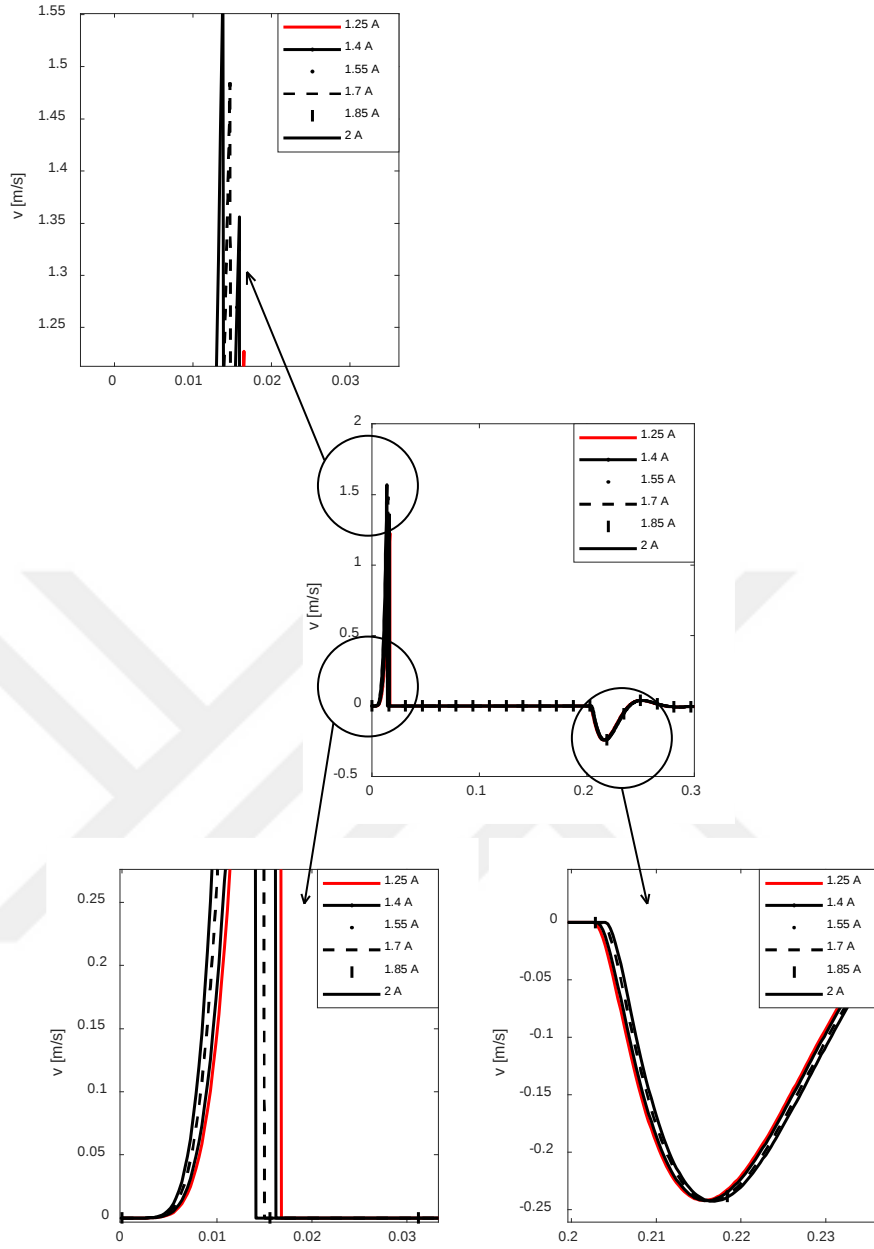
d)

Şekil 4.16. EMA 2 için farklı akım değerlerinde gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de açıcının benzetimi zamanı elde edilmiş konum-zaman ve hız-zaman karakteristikleri yakınlaştırılarak verilmiştir. Bu şekillerde benzetim sonucunda elde edilen kuvvet karakteristiğinin akıma bağlı olduğu görülmektedir. İlk başta piston çekilmemişse sistem doymada olmadığından kuvvet akımın karesine bağlıdır. Pistonun tam çekildiği zaman ise manyetik malzeme doymada olduğundan kuvvet akım ile doğru orantılıdır. Bu benzetimlerde açıcının çalışma akımı arttığında pistonun çekme hızının da arttığı görülmektedir.



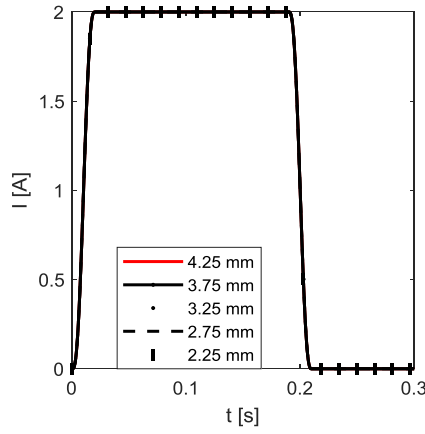
Şekil 4.17. EMA 2 için farklı akım değerlerinde pistonun aldığı yol karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.



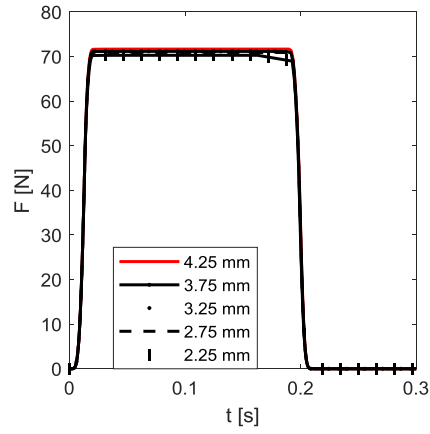
Şekil 4.18. EMA 2 için farklı akım değerlerinde çekme hızı karakteristiğinin büyütülmüş grafikleri.

4.3.4. Farklı hareket mesafeleri için 430F malzemesinin benzetim sonuçları

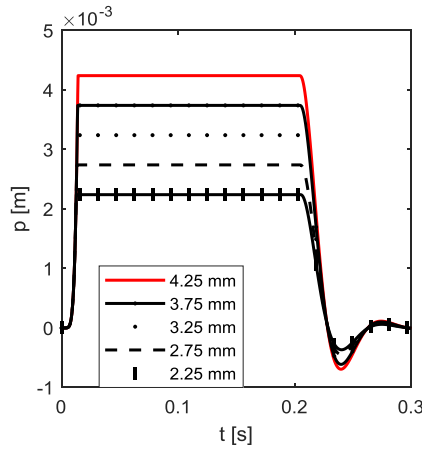
Şekil 4.19’da EMA 2’nin farklı konumlarında gerçekleştirilmiş benzetim sonucunda elde edilmiş akım, kuvvet, konum ve hız karakteristikleri verilmiştir.



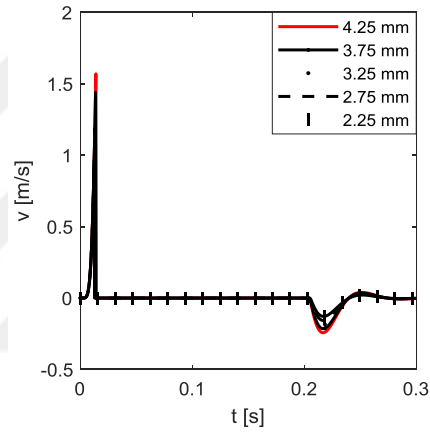
a)



b)



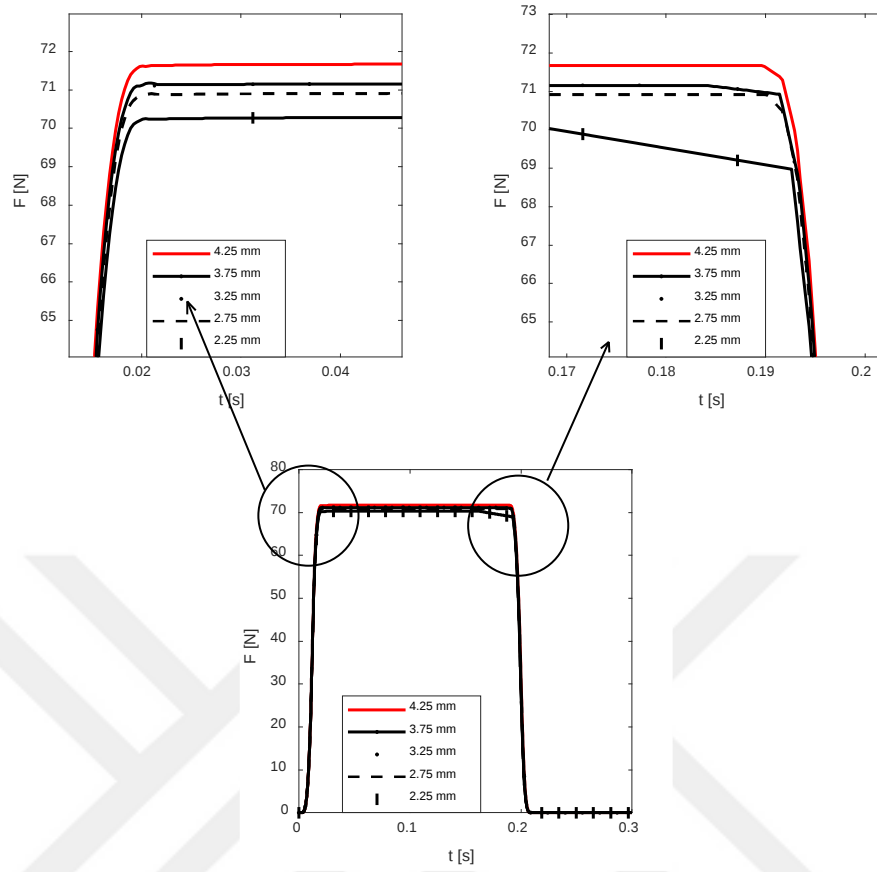
c)



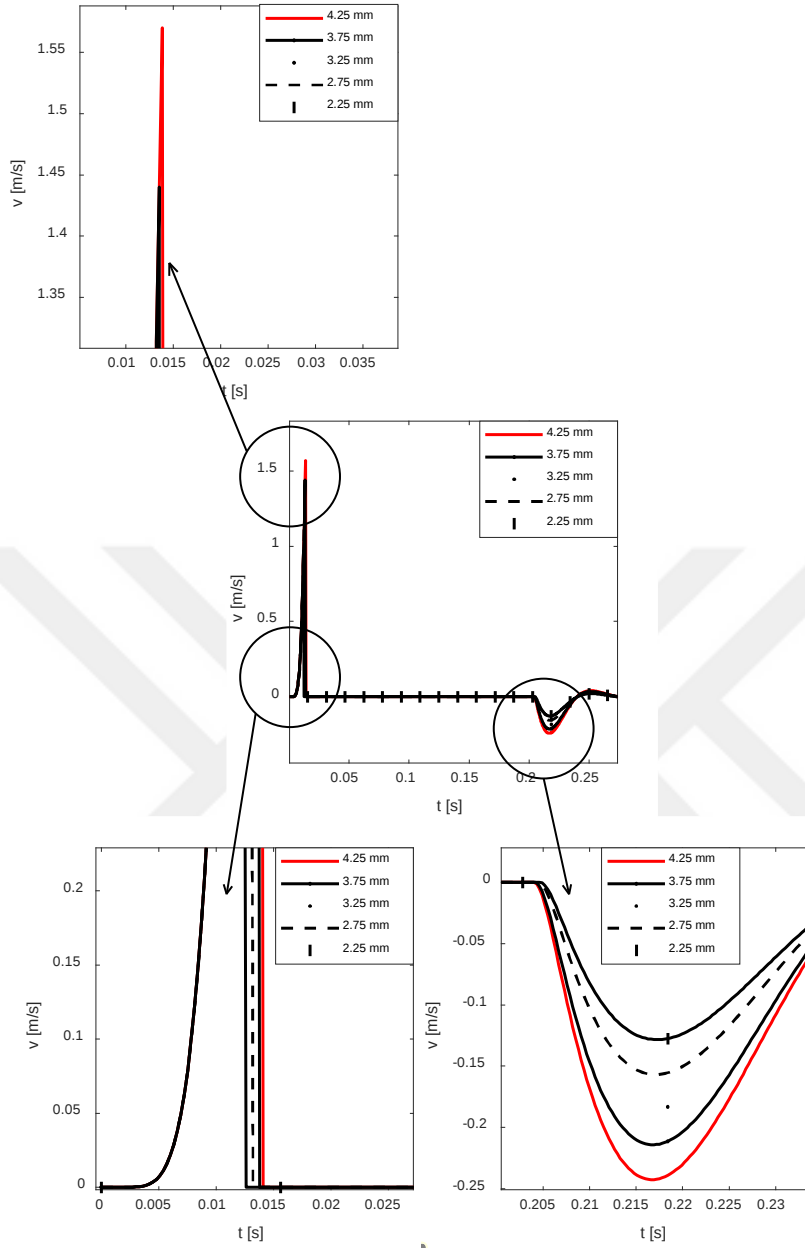
d)

Şekil 4.19. EMA 2 için farklı konumlarda gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar sonucunda elde edilen karakteristikler: a) Akım; b) Manyetik kuvvet (F_m); c) Pistonun aldığı yol; d) Çekme hızı.

Şekil 4.19'da gösterilen kuvvet-zaman ve hız-zaman karakteristikleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de yakınlaştırılmış şekilde verilmiştir. Bu simülasyonlarda akım değeri sabit tutulup pistonun aldığı yol değiştirilmiştir. Burada piston tam çekeceği pozisyona yaklaştıkça yani açıcı kapalı pozisyona geldikçe manyetik kuvvet de artmaktadır.



Şekil 4.20. EMA 2 için farklı konumların manyetik kuvvet (F_m) karakteristiğine etkisi.



Şekil 4.21. EMA 2 için farklı konumların çekme hızı karakteristiğine etkisi.

EMA 1 ve EMA 2 için yapılmış benzetimlerin sonuçları karşılaştırıldığında EMA 1'in manyetik çekme kuvvetinin EMA 2'nin çekme kuvvetinden daha fazla olduğu görülmektedir.

4.4. COMSOL Multiphysics Benzetim Sonuçlarından Endüktans ve Manyetik Akının Hesaplanması

Tez çalışmasında önce elektromanyetik açıcının modeli COMSOL Multiphysics programında oluşturulmuş ve benzetim başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonucunda elde edilmiş manyetik kuvvet, konum, akım değerleri denklem (4.7) ve denklem (4.8)'de kullanılarak manyetik akı dolanımı ve endüktans hesabı yapılmıştır (Şekil 4.22).

Eğer EMA doymada değil ise:

$$\phi = \frac{\int_0^p F_m \cdot dp}{2 \cdot I} \quad (4.7)$$

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (4.8)$$

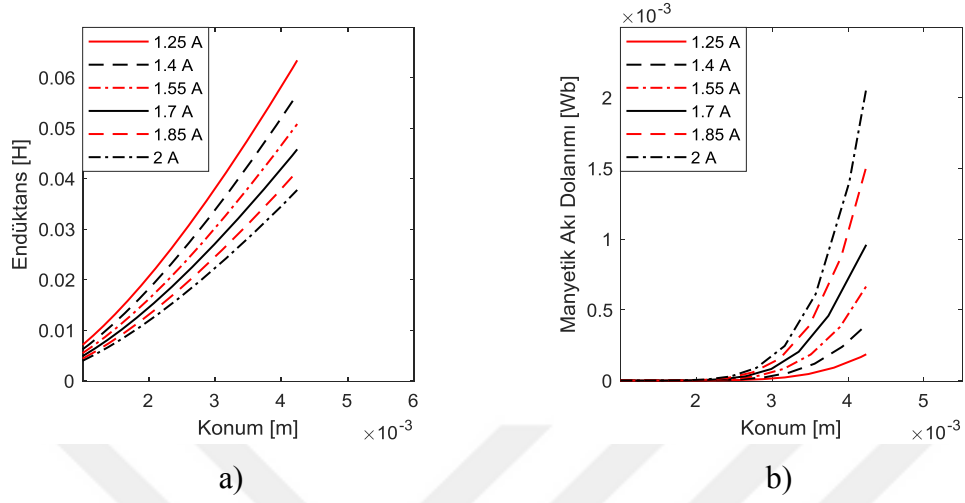
Verilebilir.

	A	B	C	D	E
1	% Model	Benzetim01.mph			
2	% Version	COMSOL 5.5.0.292			
3	% Dimens	1			
4	% Nodes	1001			
5	% Express	6			
6	% Descrip	Global			
7	Zaman	Akım	Kuvvet	Hız	Yer Değişme
8	0	0	0	0	0
9	3.0E-4	4,12E+09	4,50E-01	1,76E+07	9,94E+03
10	6.0E-4	3,22E+11	1,11E+02	1,30E+10	1,36E+07
11	9.0E-4	0.0010635597421874976	2,69E+04	1,55E+11	2,33E+08
12	0.0012	0.0024628320000000953	2,67E+05	8,84E+10	1,76E+09
13	0.0014999	0.004697973632812463	1,59E+04	3,36E+12	8,38E+08
14	0.0018	0.007926599250000083	6,76E+05	9,92E+11	2,97E+09
15	0.0021	0.012286959398437533	2,29E+06	0.0024579283920523427	8,59E+09
16	0.0024	0.017898623999999946	6,58E+06	0.005359865379546234	2,15E+11

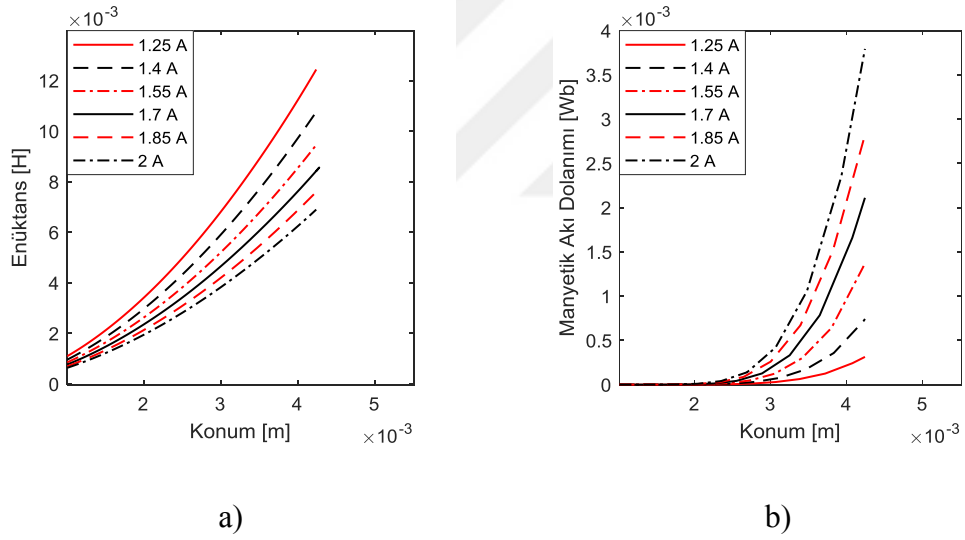
Şekil 4.22. COMSOL Multiphysics programında benzetim sonucunda elde edilmiş sonuç verileri.

Simülasyondan alınan veriler kullanılarak manyetik akı dolanımı ve endüktans karakteristikleri çizdirilmiştir. Şekil 4.23'te EMA 1 için, Şekil 4.24'te ise EMA 2 için

manyetik akı dolanımı ve endüktans karakteristikleri gösterilmiştir. Şekillerden EMA'nın doyumda olmadığı görülebilir.



Şekil 4.23. EMA 1 için: a) Manyetik akı dolanımı, b) Endüktans.



Şekil 4.24. EMA 2 için: a) Manyetik akı dolanımı, b) Endüktans.

5. MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI KULLANILARAK SİMETRİK SİLİNDİRİK VALFİN ÇALIŞMA KARAKTERİSTİĞİNİN ELDE EDİLMESİ

5.1. Çalışma Karakteristiğinin Elde Edilmesine Yönelik Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Bu bölümde makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak ölçüm ve simülasyon sonuçları eğitilmiştir. Osiloskop ile elde edilmiş ölçüm sonuçlarından zaman ve gerilim verileri yapay sinir ağına giriş ve akım verileri ise ağa çıkış verilmiştir. YSA eğitimi için Levenberg-Marquardt algoritması seçilmiştir. Eğitim tamamlandıktan sonra açıcının akım karakteristiği (akımının zamana göre değişimi) tahmin edilmiştir. Daha sonra benzetim sonucunda elde edilmiş veriler ile YSA eğitilmiştir. Eğitim zamanı yapay sinir ağına zaman ve akım giriş ve pistonun aldığı yol ise çıkış olarak verilmiştir. Benzetim sonucunda elde edilmiş veriler kullanılarak YSA eğitilmiş ve pistonun aldığı yol tahmin edilmiştir. Daha sonra destek vektör makinesi yöntemi ve YSA kullanarak piston tipinin belirlenmesi için sınıflandırma yapılmıştır. Sınıflandırma zamanı EMA için yapılmış olan ölçüm sonuçları verileri kullanılmıştır. Eğitim zamanı zaman, akım, gerilim, kullanılan yay ve solenoid bobinin çalışma gücü verileri sisteme girdi olarak verilmiştir ve çıkış olarak pistonun materyali verileri seçilmiştir.

Makine öğrenmesi, belirli bir düzende olan verilerden belirli tip probleme doğru veya doğruya yakın değerler üretebilen algoritmalara denmektedir [45]. Doğru tahminler üreterek performansı iyileştirmek için kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi tarihinin başlangıcı Alan Turing'in Turing testi olarak isimlendirilen çalışmasına dayanmaktadır [46]. Bu çalışma yapay zekâ çalışmalarının başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Yapay zekâ terimi ise ilk defa Darmounth Kolejinde düzenlenen bir etkinlikte Stanford Üniversitesi temsilcisi McCarthy tarafından 1956 yılında kullanılmıştır. Makine öğrenmesi terimini ise ABD'li öğretmen Arthur Samuel tarafından kullanılmıştır. Makine öğrenmesinde öğrenme yöntemlerinden biri denetimli öğrenmedir [47].

Denetimli öğrenme yönteminde veriler ve o verilerden alınan sonuçlar yeniden makineye verilmektedir. Verilen giriş ve sonuçlar arasında bir fonksiyon oluşturarak, veriler arasındaki ilişki öğrenilmektedir [48]. Denetimli öğrenme ile sınıflandırma ve regresyon teknikleri kullanılarak tahmin modelleri geliştirilmektedir. Sınıflandırma tekniğinde geçmiş gözlemlere dayanarak yeni örneklerin kategorik sınıf etiketleri tahmin edilmektedir. Regresyon tekniği veya analizi ise sürekli sonuçların tahminidir. Analizde, bir dizi tahmin edici değişken ve bir sürekli yanıt değişkeni verilmektedir. Bu değişkenler arasında sonucu tahmin etmemize izin verebilen bir ilişki bulunmaya çalışılmaktadır [49].

Destek Vektör Makineleri (DVM) denetimli makine öğrenmesi algoritmalarından biridir ve istatistiksel öğrenme teorisine dayanmaktadır.

DVM, 1992 yılında Boser ve ark. Tarafından 1992 yılında ileri sürülmüş istatistiksel öğrenme teorisine göre çalışan sınıflandırma metodudur [50]. DVM sınıflandırması büyük boyutlu veriler karşısında yüksek başarılı sonuçlar verebilmektedir [51].

DVM, bir veri kümesinin öğelerini iki veya daha fazla sınıfa ayırmak için kullanılmaktadır. Bu, veri öğelerinin sınıflar arasında nasıl ayrıştırılacağını belirleyen bir "doğrusal hattı" oluşturmak için kullanılmaktadır[50]. DVM modeli, veri öğelerinin sınıflar arasındaki ayrılma hatlarını mümkün olan en büyük mesafede tutmayı amaçlar. Bu, veri öğelerinin en iyi şekilde sınıflandırılmasını ve en yüksek doğruluk oranını sağlar. DVM modeli ayrıca veri öğelerinin sınıflar arasındaki ayrılma hatlarını (yani "destek vektörlerini") belirler.

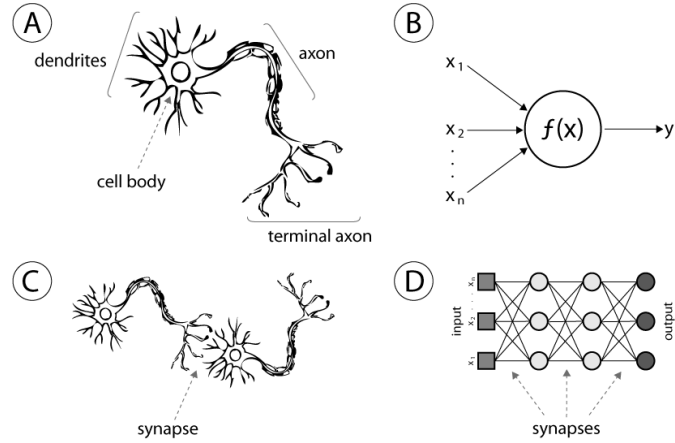
DVM modeli, çok sayıda özellikleri olan veri kümeleri için oldukça etkilidir. Bu özellikler, bir veri öğesinin sınıflandırılmasına yardımcı olan niteliklerdir. DVM modeli, bu nitelikleri kullanarak veri öğelerinin sınıflar arasındaki ayrılma hatlarını belirler ve veri öğelerinin sınıflandırılması için kullanılır.

Tez çalışmasında yapılan ölçümler destek vektör makinaları yöntemi kullanılarak eğitilmiş ve piston tipine göre sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

5.2. Akım ve Yer Değiştirme Karakteristiğinin Yapay Sinir Ağı ile modellenmesi

5.2.1. Temel YSA yapısı ve bileşenleri

Makine öğrenme teknikleri bazen bazı verileri analiz etmekte yetersiz kalmaktadır [52]. Bu yüzden farklı yöntemler geliştirilmiştir. makine öğrenmesi yöntemlerinden biri de yapay sinir ağlarıdır. YSA matematiksel modeller oluştururken istatistik teorisini kullanmaktadır. Çünkü temel görev bir örnekten çıkarım yapmaktır. Bu yöntemin geliştirilmesi insan beyninden esinlenerek yapılmıştır. İnsan beyni görüntüleri, sesleri tanıma ve öğrenebilme gibi özelliklere sahiptir. Bu özellik beyinde olan nöronlar sayesinde gerçekleşmektedir. Şekil 5.1’de insan beyninin sinir hücresi ve YSA’nın benzetimi gösterilmiştir. Yapay sinir ağları, insan beyninin öğrenmesini taklit ederek beynin öğrenme, hatırlama, genelleme yapma yolu ile topladığı verilerden yeni veri üretebilme gibi temel işlevlerin gerçekleştirildiği bilgisayar yazılımlarıdır [53]. Daha basit şekilde ifade etmek gerekirse sistem belirli girdi ve hedeflenen çıktılar şeklinde hazırlanmaktadır. Daha sonra bir eğitim modeli ile sistemi eğitilerek yapay sinir ağı hazırlanmaktadır [54]. YSA’da hücreler bağlantılar (sinirler) ile ağı oluşturmaktadır. Yapıda olan ağlar parametrelerin öğrenilmesine, ağırlıkların güncellenme durumuna, aktivasyon fonksiyonuna göre farklı ağ yapılarına sahiptir.



Şekil 5.1. a) Biyolojik nöron; b) yapay nöron; c) biyolojik sinaps; d) YSA sinapsları [55].

Yapay sinir ağı hücreleri 5 temel kısımdan oluşmaktadır: girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar. YSA girdi olarak dıştan gelen bilgiyi aldığı gibi kendinden önce gelen hücreden de bilgiyi alabilmektedir. Sinapslar ağırlıklar olarak adlandırılan ayarlanabilir parametreler ile karakterize edilirler [56].

Ağ öğrendikçe de ağırlık değerleri güncellenmektedir. Ağa verilen girdi ağırlıkları ile çarpılıp bu çarpımların toplamaları ile net girdi hesaplanmaktadır [57]. YSA'nın yapısı Şekil 5.1'de görülmektedir. YSA girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Girdi katmanı dış çevreden aldığı girdileri gizli katmana iletir. Gizli katmana iletilen girdiler bu katmanda işlenerek bir sonraki katman olan çıktı katmana iletilir ve çıktı katmanına gelen bilgiler işlenerek dış dünya için yeni çıktılar üretir [58].

5.2.2. Yapay sinir ağının avantajları ve dezavantajları

Doğrusal modellerden farklı olarak doğrusal olmayan YSA sistemi karmaşık problemler için çözüm verebilmektedir. YSA kullanılarak problemlere yönelik herhangi bir cebirsel modele gerek kalmaz. Ağın eğitimi zamanı varsayımlara ihtiyaç yoktur. Eğitim için verilen bilgiler genelleme özelliği ile yeni bilgiler üretebilmektedir [57]. Ağırlık katsayılarında gerçekleşen değişimler, ağın kendini tekrardan güncelleyebilmesi yapay sinir ağlarının avantajlı özelliklerindendir.

Yapay sinir ağlarının olumsuz tarafları ise YSA, büyük miktarlarda eğitim verisi gerektirmektedir. Bu, eğitim verilerinin elde edilmesi ve işlenmesi için zaman ve maliyet gerektirebilir. Problem için uygun ağ yapısı bulunmaz ise çözüm istenilen seviyede olmayabilir veya çözüm bulunamayabilir [59].

5.2.3. Tezde kullanılan YSA modeli

İleri beslemeli sinir ağı (İBSA), en yaygın kullanılan sinir ağlarından biridir. İBSA ağa girdi görevi gören bağımsız değişkenler ile ağın çıktıları olarak belirlenen bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi öğrenmek için kullanılmaktadır [60].

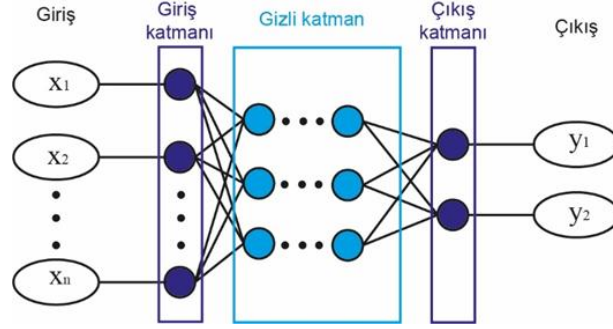
Böyle bir ağ giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır (Şekil 5.2). Giriş katmanında herhangi bir işlem yapılmaz. Veriler işlenmek için bu katmana dahil edilerek gizli katmana bağlanır. Bu katmanlar şimdi sırasıyla açıklanacaktır.

Giriş Katmanı: Verilerin giriş yaptığı bölümdür. Bu bölümde giriş miktarı kadar hücre sayısı olup herhangi bir işlem yapılmaz. Giriş verileri buradan, işlenmek üzere gizli katmana ağırlıkların eşlik edilmesiyle hücreye bağlanırlar.

Gizli Katman: Bu bölüme ara katman da denir. Ara katman sayısı ağdan ağa değişebilir. Bir tane ara katman olabileceği gibi birden fazla ara katman da olabilir. Bu bölümde giriş katmanından gelen, giriş ve ağırlık verileri toplama fonksiyonunda

toplanarak net girdi sonucu oluşturulur ve aktivasyon işlemiyle sonuç bulunup çıkış katmanına aktarılır.

Çıkış Katmanı: Gizli katmanda, girişte yollanan parametre değerleri işlenip ulaşmak istenen sonuç elde edilerek çıktı olarak dışarı aktarılan katmandır.



Şekil 5.2. İBSA ağ yapısı modeli.

Tez çalışmasında İBSA'nın seçilmesinin sebebi sınıflandırma ve regresyon analizlerinde iyi performans göstermeleri, nonlinear fonksiyonları modelleyebilmeleri ve verilerdeki önemli özellikleri otomatik olarak öğrenmesi ve bu özellikleri kullanarak tahminler edebilmesidir [45].

5.2.4. Levenberg-Marquardt algoritması

YSA'da Levenberg-Marquardt (LM) Algoritması sıklıkla kullanılan algoritmalardan birisidir. Ağın eğitilmesi için giriş katmanında ağa girilen giriş verileri gizli katmandan geçerek çıkış katmanına verilir. Hedeflenen çıkış değeri ile yapay sinir ağının çıkış değeri arasında olan fark hata değeri olarak isimlendirilir. Çıkışta hata değerinin türevi alınarak tekrar gizli katmana verilir. Hata değerinin türevine göre, hata değerinin en aza indirilmesi amacıyla her bir nöron bu hata değerine göre başlangıçta kullanılan ağırlık değerlerini günceller. Güncelleme zamanı gerekli olan ağırlık değiştirme denklemleri ise hatayı minimuma indirmeye yönelik seçilmektedir [56].

LM algoritmasında, performans fonksiyonunun ağırlıklara göre ikinci türevinin alınması ile oluşturulan Hessian matrisinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Hessian matrisi:

$$H(n) = J^T(n) \cdot J(n) + \mu_{Lm} \cdot B_r \quad (5.1)$$

Şeklinde verilebilir. Burada $H(n)$, Hessian matrisi; μ_{Lm} , LM parametresi; B_r , birim matrisi; $J(n)$ ise, Jakobian matrisidir. Jakobian matrisi, ağ hatalarının ağırlıklara göre birinci türevini belirtmektedir.

$$J(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial w(n-1)} \quad (5.2)$$

ve

$$g(n) = J^T(n) \cdot e(n) \quad (5.3)$$

e , ağ hataları vektörü ve denklem (5.3) ağın gradiyentidir. Sonuç olarak

$$w(n+1) = w(n) - \frac{g(n)}{H(n)} \quad (5.4)$$

Denklemini elde edilir. Hata değerinin hesaplanmasında, her başarılı adımdan sonra μ_{Lm} değeri azaltılır. Buradaki hedef ise, performans fonksiyonunu en küçük yapacak ağırlık değerini bulmaktır [61].

5.2.5. Regresyon

Regresyon analizi ile iki veya ikiden fazla değişken arasındaki ilişki modellenebilmekte ve analiz edilebilmektedir.

Bir değişken üzerinde meydana gelen değişimin, başka bir değişken ile açıklanıp açıklanamayacağı konusunda tahminler yapılmasına imkân verir. Regresyon modelinde tahmin edilen (sonuç) veya açıklanan değişkene bağımlı değişken denir [62]. Analiz sırasında değişkenler arasında bir ilişki olduğu varsayılır. Değişkenler bağımlı değişken ve bağımsız değişken olarak isimlendirilebilir. Bağımsız değişken bağımlı değişkenin değerini tahmin etmektedir. Birden fazla değişken olduğunda analiz, çoklu regresyon analizi olarak isimlendirilmektedir. Bir değişkenli regresyon modeli için:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \varepsilon \quad (5.5)$$

Yazılabilir. Burada X , bağımsız değişken; Y , bağımlı değişken β_0 , $X=0$ zamanı için bağımlı değişkenin değeri; β_1 , Regresyon katsayısı; ε , hata değeridir. c , sayılı bağımsız değişkeni olan çoklu regresyon analizi için denklem (5.6) verilebilir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_c \cdot X_c + \varepsilon \quad (5.6)$$

5.3. Açıcının Ölçüm ve Benzetiminden Alınan Verilerin Yapay Sinir Ağı ile Eğitilmesi Başarım Analizi

YSA modelinin oluşturulması için verilerin toplanması, işlenmesi, modelin seçimi, modelin kurulması, eğitimi, test edilmesi ve gerçek dünya verileri kullanılarak tahminler yapılmasıdır [45]. Veri setinin oluşturulması için geliştirilen uygulamanın iyi bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. YSA'nın giriş ve çıkış katmanına verilecek verilerin tanımlanması ve bu eğitimin başarılı olması için yeterli sayıda verinin olması gerekmektedir. Ağın eğitilmesi ve öğrenilmesi adımı, YSA'da olan bağlantıların en iyi değerinin bulunabilmesi için giriş ve çıkış kümeleri kullanılarak doğru çıktı değerlerinin üretilmesidir. YSA'nın testinde daha önce eğitim için kullanılmamış ve YSA'nın bilmediği veriler ile ağın eğitilmesi kontrol edilebilmektedir. Test verileri verilerek eğitilmiş YSA test edilir ve ağın eğitilme durumunun öğrenilmesi için hata hesaplanarak karşılaştırma yapılır.

5.3.1. Açıcı verilerinin yapay sinir ağı ile eğitilmesi

Bu tezde yapılan çalışma için, MATLAB programında *Neural Network Fitting* isimli araç kutusu seçilmiştir. Sistem aşağıdaki özellikleri içermektedir:

Gizli katmandaki toplam nöron sayısı 10 seçilmiştir. Giriş katmanı, giriş değişkenlerinin sayısına bağlıdır ve çıkış katmanı yalnızca bir düğümden oluşmaktadır. Her analiz için model aynı veri seti ile 3 kez eğitilmiş ve 3 eğitimden elde edilen en iyi sonuçlar dikkate alınmıştır. MATLAB tarafından desteklenen tüm eğitim algoritmaları arasından Levenberg-Marquardt algoritması eğitim için seçilmiştir. Levenberg-Marquardt algoritması YSA eğitiminde hızlı olması ve kararlı davranması nedeni ile tercih edilmiştir [63]. Eğitme, doğrulama ve test etme için MATLAB girdi verilerini otomatik şekilde 3 kümeye ayırmaktadır. Eğitim seti, eğimi hesaplamakta ve ağ ağırlıklarını güncellemek için kullanılmaktadır. Doğrulama seti, eğitim sırasında hatayı hesaplamaktadır. Hem eğitim hatası hem de doğrulama hatası az olmalıdır. Test veri seti kullanılarak eğitimden sonra test yapılmakta ve model karşılaştırması için test seti hatası kullanılmaktadır. MATLAB, eğitim ve test tamamlandığında her üç durum için de regresyon ve RMSE istatistiklerini vermektedir.

Ölçüm sonucu elde edilmiş verilerin eğitilmesi için veri setinin girişine zaman ve gerilim çıkışına ise akım değerleri verilmiştir. YSA eğitimi zamanı yay 1 için elde edilmiş ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Simülasyon sonucu elde edilmiş verilerin eğitilmesi için veri setinin girişine zaman ve akım çıkışına ise pistonun aldığı yol değerleri verilmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Veri setinde giriş ve çıkış için kullanılan parametreler.

	Ölçüm	Benzetim
Giriş	Zaman	Zaman
	Gerilim	Akım
Çıkış	Akım	Pistonun aldığı yol

Tez çalışmasında ilk olarak EMA 1 için gerçekleştirilmiş ölçüm verileri eğitilerek açıcının çekme süresinin kestirimi yapılmıştır (Şekil 5.3). Daha sonra ise gerçek ölçüm koşullarına bağlı simülasyon gerçekleştirilerek oradan alınan veriler ile YSA eğitimi gerçekleştirilmiştir.

	Zaman	Gerilim	Akım	Pistonun aldığı yol
1	0.0001000		14,868	0.0054960
2	0.0002000		14,9816	0.0054960
3	0.0003000		15,1928	0.0055280
4	0.0004000		15,2904	0.0056080
5	0.0005000		15,4584	0.0053360
6	0.0006000		15,4072	0.0050800
7	0.0007000		15,444	0.0059760
8	0.0008000		15,4888	0.0052560
9	0.0009000		15,54	0.0054320
10	0.0010000		15,604	0.0055760
11	0.0011000		15,3768	0.0051920
12	0.0012000		15,5352	0.0053040
13	0.0013000		15,3272	0.0055280
14				

Şekil 5.3. Veri seti.

5.3.2. Verilerin analizi

Veri analizi için kullanılan yapay sinir ağı verilerinin %70'i eğitim, %15'i doğrulama kalan %15'lik kısım ise test için kullanılmıştır (Şekil 5.4). YSA eğitimi yapmak için MATLAB yazılımında *Neural Network Fitting* eğitim aracından yararlanılmıştır (Şekil

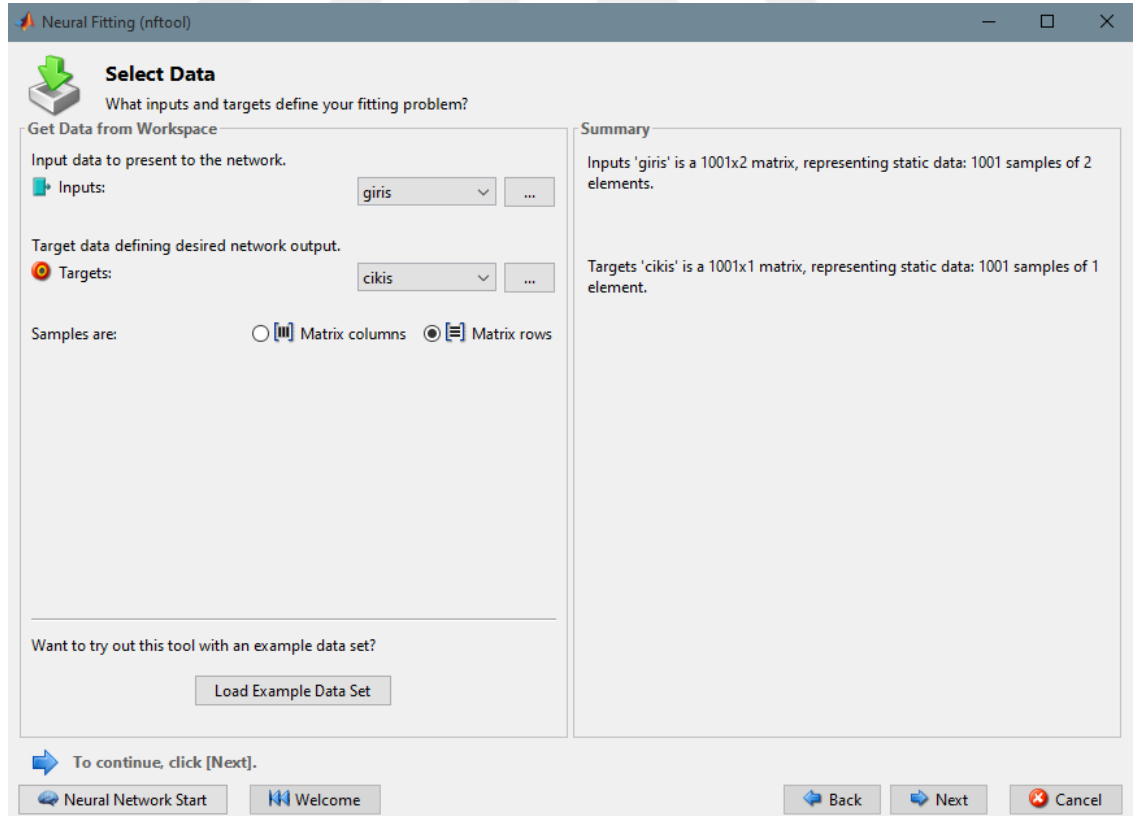
5.5). Bu ara yüzde giriş ve çıkış vektörleri belirlenmektedir. Daha sonra nöron ve algoritma seçimi belirlenerek eğitim yapılmıştır.

Randomly divide up the 1001 samples:		
Training:	70%	701 samples
Validation:	15% ▾	150 samples
Testing:	15% ▾	150 samples

Şekil 5.4. Eğitim, test ve doğrulama verinin kullanımı.

5.3.3. Model eğitimi

YSA eğitimi için ilk olarak Şekil 5.2’de gösterilmiş model kullanılmıştır. YSA 2 giriş katmanı ve 10 gizli katmandan oluşturulmaktadır [64]. YSA modelinde veri setinden giriş parametreleri için zaman ve akım seçilmiştir. Eğitim için çıkış parametresi olarak açıcı pistonunun aldığı yol verilmiştir (Şekil 5.5).



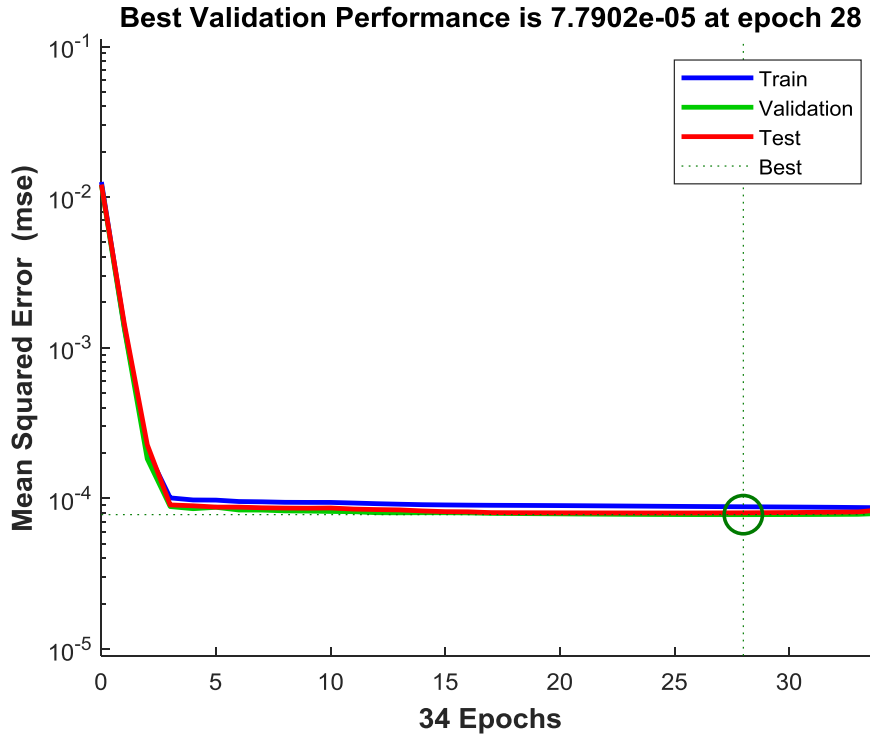
Şekil 5.5. YSA eğitim aracı.

Eğitim için kullanılmış Levenberg-Marquardt algoritması sonucunda elde edilmiş başarı sonucu Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

Results			
	Samples	MSE	R
Training:	700	8.78810e-5	9.91908e-1
Validation:	150	7.79024e-5	9.93429e-1
Testing:	150	8.01040e-5	9.93425e-1

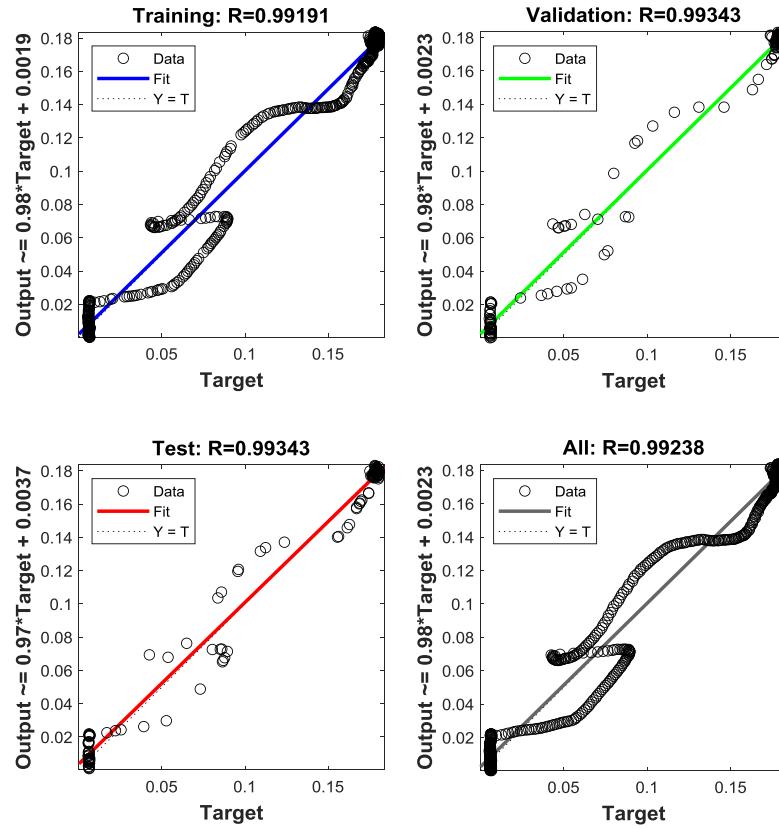
Şekil 5.6. Levenberg-Marquardt algoritması sonucu.

Modelin oluşturulmasında epoch sayısından yola çıkarak başarı gücü grafiği Şekil 5.7’de gösterilmiştir. YSA modeli eğitildiği zaman giriş verilerinin tümü aynı anda eğitilmemektedir. Veriler belli sayıda parçalara ayrılarak eğitilmektedir. İlk parça eğitilerek modelin başarı gücü test edilmekte ve başarılı olmaya göre geri yayılım ile ağırlıklar güncellenmektedir. Sonra ise yeni eğitim kümeleri sıra ile YSA modelinde tekrar eğitilmekte ve ağırlıklar güncellenmektedir. Burada yapılan her eğitim adımı epoch olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.7. Epoch sayısının karesel ortalama hata performansı.

MATLAB programının YSA araç kutusunda giriş verileri çağrıldığında, bu veriler eğitim, onaylama ve test verileri için rastgele olarak ayrılmakta ve yapay sinir ağı eğitilmektedir. Şekil 5.7’de verilen Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error) grafiğinde, MSE onaylama için en iyi performans değeri ile sınırlandırılmıştır. Yapılan epoch aşamalarında onaylama işleminin gösterdiği en iyi performansın 28. epoch seviyesindedir. Burada gerçek değer ile tahmin edilen değerlerin farklarının ortalama karesi alınarak MSE değerleri bulunmaktadır. Eğitim sonucunda gerçek değerler ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi belirlemek için regresyon analizine bakılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilmiş regresyon sonuçları Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Bu çalışmada eğitim sonucunda elde edilmiş değerlerin yaklaşık olarak 0,99 olduğu görülmektedir. YSA çalışmalarında regresyon sonuçlarının 1’e yakın olması modelin başarılı olması anlamına gelmektedir [65]. Regresyon grafiklerinde yatay eksen gerçek değerleri, dikey eksen ise eğitim için verilen giriş değerleri ile yapılmış tahminleri göstermektedir. Şekil 5.8’de gösterilmiş olan regresyon değerleri eğitim, onaylama ve test için yaklaşık olarak 0,99 değerini almıştır.



Şekil 5.8. Yapay sinir ağı performansı.

5.3.4. Hataların karesinin ortalamasının karekökü

Çalışmada hata analizini daha başarılı şekilde incelemek ve net sonuçlar elde etmek için Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü (Root Mean Squared Error – RMSE) yöntemi kullanılmıştır. RMSE YSA ile tahmin etme uygulamalarında hata analizi için sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir. Tahmin edicinin tahmin ettiği değerler ve gerçek değerler arasında olan farklılıktan yararlanarak hatanın büyüklüğünü ölçen yöntemdir [66]. Denklem (5.7)’de T , tahmin; R , reel ölçüm kümesini ifade etmektedir. Bu kümeleri kullanarak RMSE denklem (5.8)’deki şekilde hesaplanabilmektedir [67].

$$T = (t_1, t_2, \dots, t_n) \quad (5.7)$$

$$R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$$

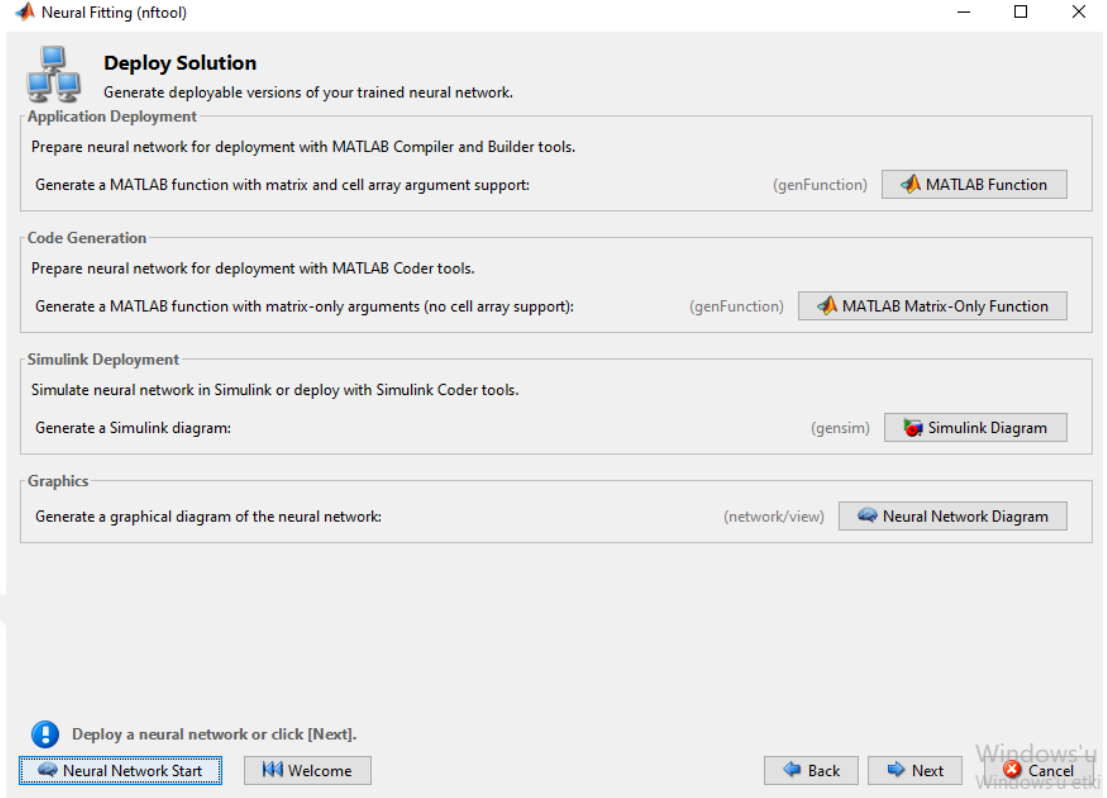
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - m_i)^2} \quad (5.8)$$

RMSE, yüzde hata (Root Mean Squared Percentage Error – RMSPE) şeklinde de ifade edilebilmektedir. RMSPE denklemi aşağıdaki şekildedir:

$$\%RMSPE = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - m_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i)^2}} \quad (5.9)$$

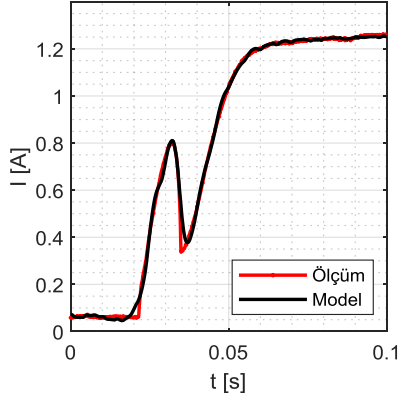
5.3.5. Yapay sinir ağı kullanılarak ölçüm ve benzetim sonuçları için akım ve pistonun aldığı yol karakteristiklerinin tahmini

EMA 1’in ölçümünde pistonun hareket etme mesafesini değiştirerek simetrik silindirik valfin çekme süresi ölçülmüştür. Tablo 3.4 ve Şekil 3.12’de ölçüm zamanı elde edilmiş çekme süreleri gösterilmiştir. Pistonun 5 farklı hareket mesafesi ve 6 farklı gerilim değeri için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Eğitim sonucunda açıcının akım karakteristiği tahmin edilmiştir. Tahmin etme için MATLAB’da *Nerual Fitting* penceresinde *MATLAB Function* sekmesi seçilmiştir (Şekil 5.9). Eğitim zamanı kullanılmamış veriler sisteme girdi olarak verilerek tahmin etme işlemi yapılmıştır.

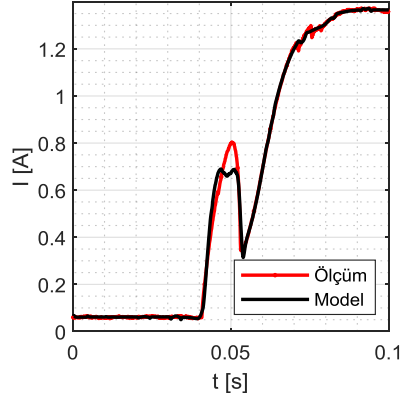


Şekil 5.9. Nerual Fitting penceresi.

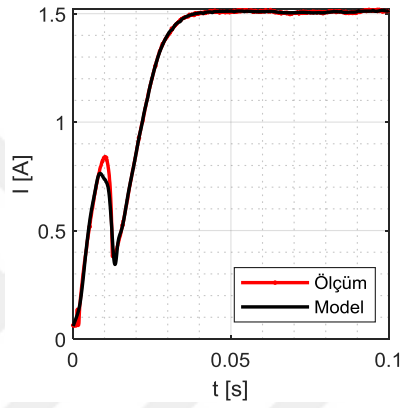
Ölçümlerden alınmış veriler kullanılarak MATLAB programında YSA eğitimi yapılmış ve açıcının çekme sürelerinin bulunması için akım karakteristiği tahmin edilmiştir (Şekil 5.10). EMA için akım karakteristiği kullanılarak çekme süresi hesaplanabilmektedir.



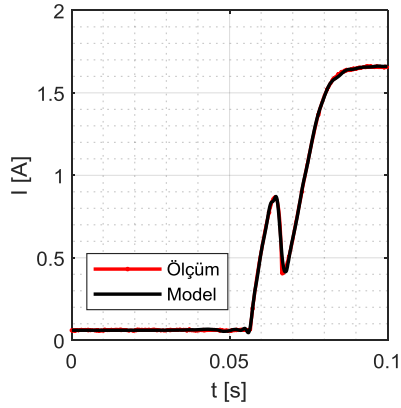
a)



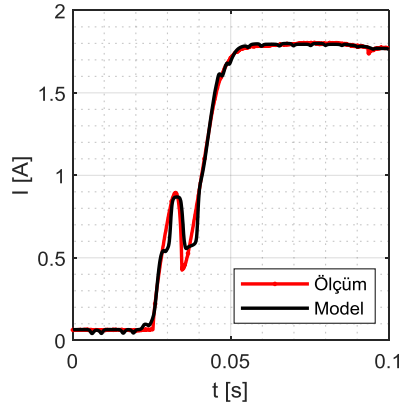
b)



c)



d)

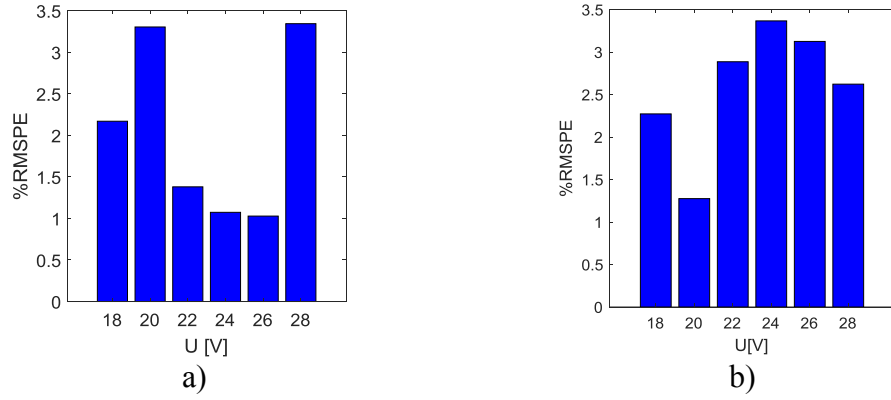


e)

Şekil 5.10. EMA 1 için ölçüm ve model karşılaştırması: a) 18V, b) 20V, c) 22V, d) 24V, e) 28V.

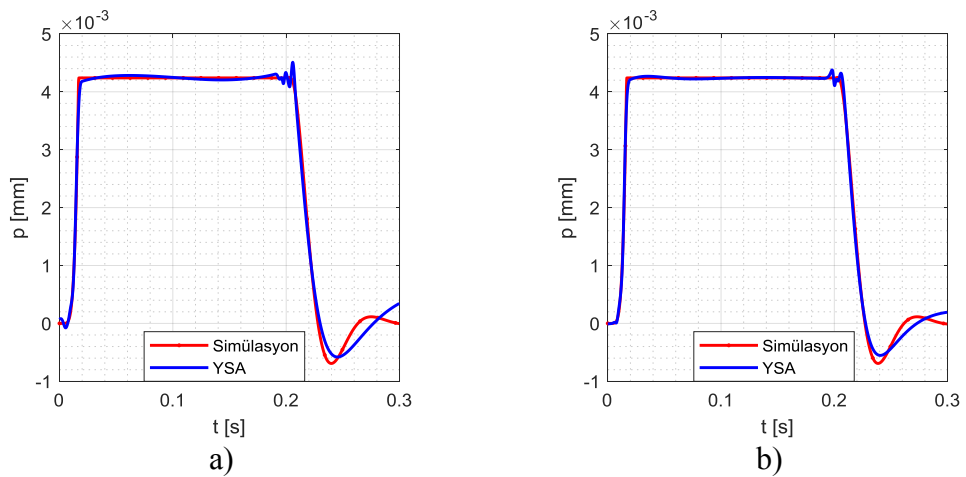
Daha sonra 430F malzemesi kullanarak da YSA eğitimi tamamlanmıştır. Hem EMA 1 hem de EMA 2'nin ölçüm sonuçlarını YSA modeli ile karşılaştırmak için hata

analizine bakılmıştır. Elde edilmiş hata analizi için RMSPE metodu kullanılmış ve sonuçlar Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



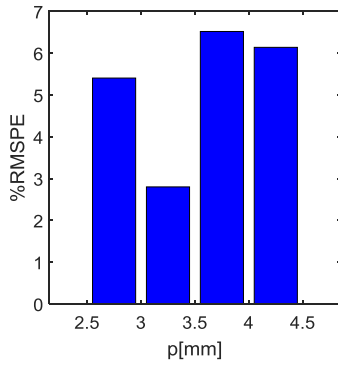
Şekil 5.11. Numune ve model için hata analizi: a) EMA1 b) EMA2.

Daha sonra COMSOL Multiphysics programı ile EMA 1 ve EMA 2 için gerilim ve pistonun aldığı yol değerleri değiştirilerek benzetimler yapılmıştır. Benzetim gerçek ölçüm koşullarına göre düzenlenerek gerçekleştirilmiştir. COMSOL programında yer değişme ve hız doğrudan tespit edilebildiği için YSA eğitiminde bu veriler kullanılmış ve benzetim sonuçları normalize edilerek gösterilmiştir. Daha sonra benzetim sonucunda elde edilmiş veriler ile YSA eğitimi yapılarak pistonun yer değişmesi tahmin edilmiştir. YSA eğitimi için giriş zaman ve akım, çıkışa ise pistonun aldığı yol değerleri verilmiştir. Tahmin edilmiş yer değişme mesafeleri birbiriyle uyumludur ve Şekil 5.12’de gösterilmiştir.

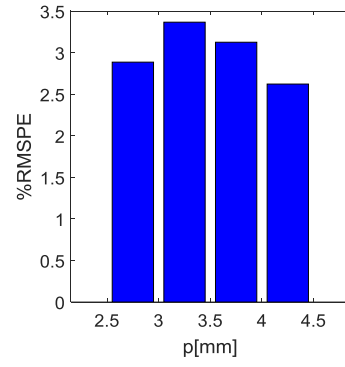


Şekil 5.12. Pistonun aldığı yolun benzetim ve model karşılaştırması: a) EMA 1; b) EMA 2.

Şekil 5.13 benzetim ve model sonuçlarının hata analizini göstermektedir. Burada analiz pistonun farklı yer değişme mesafeleri için gerçekleştirilmiştir.



a)



b)

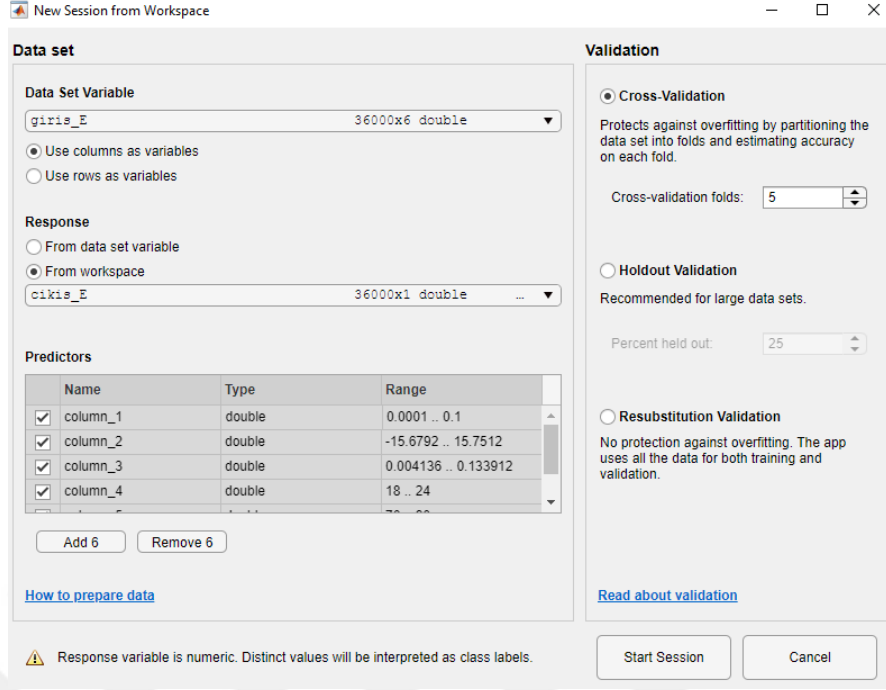
Şekil 5.13. Benzetim için hata analizi: a) EMA1 b) EMA2.

5.4. Elektromanyetik Açıcının Çekme Karakteristiğinden Piston Tipinin Destek Vektör Makineleri ve Yapay Sinir Ağı Yöntemi ile Belirlenmesi

Tez çalışmasında son olarak MATLAB programında *Classification Learner* araç kutusu kullanılarak piston tipinin sınıflandırılması yapılmıştır. Sınıflandırma algoritması için destek vektör makineleri (support vector machine) öğrenme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmada DVM ve YSA eğitimi için veri setine aşağıda verilmiş parametreler dahil edilmiştir:

- Zaman
- Gerilim
- Akım
- Yay tipi
- Bobinin çalışma gücü

Sistemin çıkışı için piston malzemesinin tipi 0 ve 1 seçilmiş ve DVM yöntemi ile veriler eğitilmiştir (Şekil 5.14). MATLAB’da yer alan 6 farklı DVM yöntemi ile eğitimler tamamlanmıştır. En başarılı sonuca Quadratic DVM yöntemi ile ulaşılmıştır. Daha sonra YSA kullanılarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. DVM YSA sınıflandırması sonucunda Tablo 5.2’de eğitimin başarı oranı gösterilmiştir.

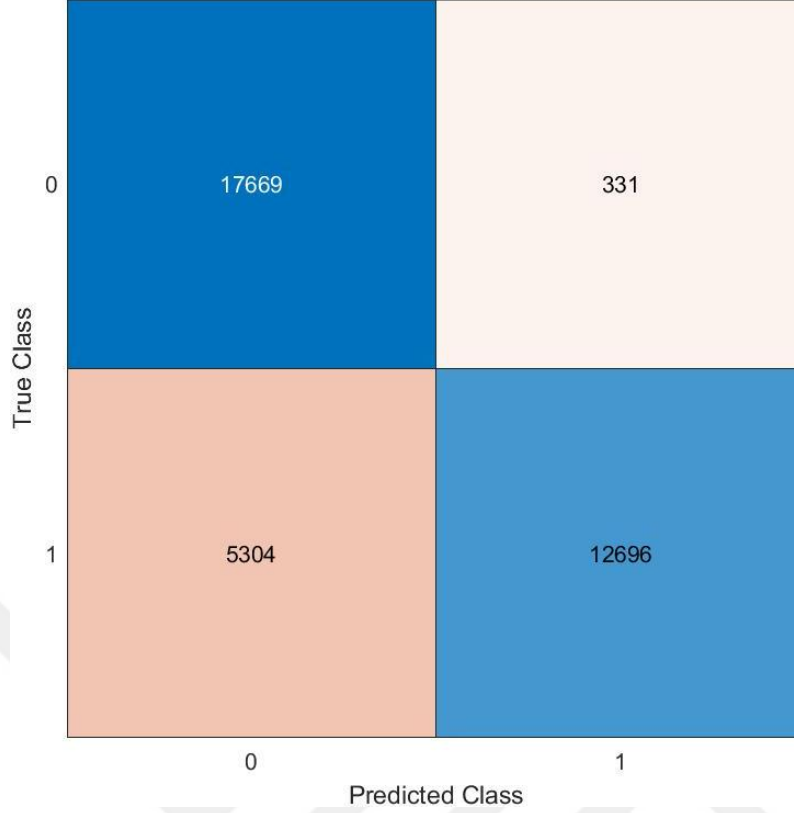


Şekil 5.14. MATLAB Classification Learner araç kutusunda veri setinin eklenmesi.

Tablo 5.2. DVM eğitimi sonuçları.

	Eğitim	Test
Quadratic DVM	%86	%84
YSA	%89	%87

DVM sonucunu performansını değerlendirmek için konfüzyon matrisine bakılmıştır (Şekil 5.15). Matriste mavi renk doğrulanan veri sayısını göstermektedir.



Şekil 5.15. EMA'nın çekme süresi karakteristiğinden yararlanarak piston tipinin DVM sınıflandırılması sonucu elde edilmiş konfüzyon matrisi.

Tez çalışmasında gerçekleştirilmiş olan YSA ve DVM eğitimlerinin sonuçlarını karşılaştırmak için makine öğrenme yöntemlerinde kullanılan doğruluk (accuracy), duyarlılık (sensitivity) ve kesinlik (specificity) değerleri hesaplanmıştır.

Doğruluk, tahminlerin doğru olma oranını ölçen bir metriktir. Doğruluk değeri 1'e ne kadar yakınsarsa, modelin yaptığı tahminlerin doğruluk oranı o kadar yüksek demektir. Aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\text{Doğruluk} = (DP + DN) / (DP + DN + YP + YN) \quad (5.10)$$

Burada DP , Doğru Pozitif; DN , Doğru Negatif; YP , Yanlış Pozitif; YN , Yanlış Negatif değerlerdir. Bu değerler tahmin etme sonucunda oluşturulmuş olan konfüzyon matrisinden alınmıştır.

Duyarlılık, bir makine öğrenme modelinin, veri setinde yer alan bir örnek etiketinin doğru bir şekilde sınıflandırılıp sınıflandırılmadığını ölçen bir metriktir. Duyarlılık, bir modelin pozitif örneklerinin doğru bir şekilde tespit etme oranını gösterir. Duyarlılık değeri 1'e ne kadar yakınsarsa, modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin

doğruluk oranı o kadar yüksek demektir. Matematiksel olarak, sensitivity şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Duyarlılık} = DP / (DP + YN) \quad (5.11)$$

Kesinlik, modelin negatif olarak sınıflandırdığı örneklerin gerçekten negatif olma olasılığını gösterir. Kesinlik değeri 1'e ne kadar yakınsarsa, modelin negatif olarak tahmin ettiği örneklerin doğruluk oranı o kadar yüksek demektir. Kesinlik aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$\text{Kesinlik} = DN / (DN + YP) \quad (5.12)$$

Tez çalışmasında kullanılan Makine öğrenmesi yöntemlerinde hesaplanmış olan doğruluk, duyarlılık, kesinlik sonuçları Tablo 5.3'da verilmiştir.

Tablo 5.3. Doğruluk, Duyarlılık, Kesinlik Sonuçları.

	Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik
Quadratic DVM	0,84	0,71	0,98
YSA	0,91	0,90	0,92

YSA için ortalama olarak %91, DVM için %84 başarı oranı sağlanmıştır. Sınıflandırmada duyarlılık değerlerinde bakarak doğru tahmin etmesi gereken yerlerde YSA ve SVM için %71 ve %90 oranında başarı sağladığı görülmektedir. Duyarlılık değerinin düşük çıkması doğruluk değerinin de görece düşük çıkmasına neden olmuştur. Teknik sınırlama nedeniyle çalışmada eğitim için belli sayıda veri kullanılmıştır. Eğitim için kullanılan veri sayısının artması model başarımını arttıracaktır.



6. SONUÇ

Bu çalışmada önce elektromanyetik açıcının model oluşturulmasına yönelik elektriksel ve mekaniksel karakteristik ölçümleri yapılmıştır. Cihazın çekme karakteristiği ve yay sabiti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Açıcıların çalışma büyüklükleri (gerilim, akım, yay sabiti) ve kullanılan materyaller çekme süresi üzerinde farklı sonuçlar göstermektedir. Bu çalışmada farklı manyetik çekirdeklerin ve farklı parametrelerin (yay sabiti, gerilim) açıcının çekme süresine olan etkileri araştırılmıştır.

Tasarım özellikleri bilinen 2 elektromanyetik açıcı temin edilmiş ve yapısı gereği simetrik silindirik valf olarak tanımlanmıştır. Bu açıcıların pistonu Cromecore-13XP ve 430F malzemesinden hazırlanmıştır. SSV kullanılarak cihazın akım karakteristiği ölçülmüş ve cihazın çekme süresi hesaplanmıştır. Ölçümlerde kullanılan SSV COMSOL Multiphysics programında oluşturularak (modellenerek) simülasyon ortamında çalıştırılmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen zaman, gerilim ve akım değerleri kullanılarak YSA eğitimi yapılmış ve akım karakteristiği tahmin edilmiştir. Eğitim zamanı girişe zaman ve gerilim, çıkışa ise akım değerleri verilmiştir. Ölçüm sonuçları ve YSA ile tahmin sonuçları RMSPE hata analizi metodu kullanılarak karşılaştırılmıştır. %2 – %5 aralığında bir hata payı hesaplanmıştır. Daha sonra benzetim sonuçları kullanılarak YSA girişine zaman ve akım çıkışına ise pistonun aldığı yol verilerek eğitim yapılmıştır. Benzetim sonuçları ile YSA kestirimi arasında %3 – %6 aralığında hata elde edilmiştir.

Son olarak MATLAB Classification Learner araç kutusu seçilerek ve açıcının çekme süresi karakteristiği kullanılarak DVM yöntemi ile piston tipi belirlenmiştir. YSA ile de piston tipi sınıflandırması gerçekleştirilerek doğruluk, duyarlılık, kesinlik metriklerine bakılmıştır. Eğitim ve sınıflandırma sonucunda ortalama olarak %85 başarı sağlanmıştır. Yöntem temelde başarıya ulaşmış olup yeterli doğruluk sağlamaktadır. Daha fazla veri kullanılarak eğitim performansı sonucu daha yüksek biçimde elde edilebilecektir.



KAYNAKLAR

- [1] Mutlu, Y. (2018) *Turbo Solenoid Vana* [Doktora tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi
- [2] Düzgün, E. (2015) *Ağır Taşıt, Elektro - Pnömatik Fren Valfi İçin Oransal Solenoid Tasarımı Ve Analizi* [Yüksek lisans tezi], Uludağ Üniversitesi
- [3] Brauer, J.R. (2014) *Magnetic Actuators And Sensors* (2nd ed.). IEEE Press.
- [4] Lavanya, D. L., Kanwar, S. J., Nanda, A. K., Ravikiran, M., Bora, P. L., (2018) Operation during Static Test of Rocket Motors. *International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*. 275–280. <https://doi.org/9781538638170>
- [5] Ato Control, (2021). Direct Acting vs. Pilot Operated Solenoid Valve. <https://www.ato.com/direct-acting-vs-pilot-operated-solenoid-valve> adresinden Mart 2022 tarihinde alınmıştır.
- [6] Radu, B., Dragos, A., Mihai, A., Eugen, H., (2016) The dynamic behavior of electromagnetic plunger drivers for electrical apparatuses with contacts. *Proc. 2016 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.* 139–142, <https://doi.org/doi:10.1109/ICEPE.2016.7781320>.
- [7] Popa, I., C., Dolan, A., I., (2017) Numerical model for a plunger-type AC electromagnet. *2017 11th Int. Conf. Electromechanical Power Syst. SIELMEN 2017-Proc.*, 78–81, <https://doi.org/doi:10.1109/SIELMEN.2017.8123309>.
- [8] Kajima, T., Kawamura, Y., (1994) Development of a high-speed solenoid valve. Investigation of the solenoids. *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, 769–777, <https://doi.org/10.1541/ieejias.114.769>.
- [9] Yoon, S., B., Hur, J., Chun, Y., D., Hyun, D., S., (1997) Shape optimization of solenoid actuator using the finite element method and numerical optimization technique, *IEEE Transactions On Magnetics*. 33(5), 4140–4142, <https://doi.org/10.1109/20.619689>.
- [10] Demarchi, A., Farçoni, L., Pinto, A., Lang, R., Romero, R., Silva, I., (2018). Modelling a Solenoid's Valve Movement. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00308-1_24
- [11] Kabib, M., Made, I., Batan, L., Pramujati, B., Sigit, (2016) Modelling And Simulation Analysis Of Solenoid Valve For Spring Constant Influence To Dynamic Response. *Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- [12] Wang, L., Li, G. X., Xu, C. L., Xi, X., Wu, X. J., Sun, S.P., (2016) Effect of characteristic parameters on the magnetic properties of solenoid valve for high-pressure common rail diesel engine. *Energy Convers. Manag.*, 127, 656–666, <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.09.057>.

- [13] Narayanswamy, R., Mahajan, D., P., Bavisetti, S., (2012) Unified coil solenoid actuator for aerospace application. *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion, ESARS*, <https://doi.org/doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387392>.
- [14] Chen, Z., Vai, M., I., Pun, S., H., Mak, P., U., (2018) Electromagnetic Field Analysis of Low-Magnitude High-Frequency Vibrator with Multiple Plungers. *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 1–4, 2018, <https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8513089>.
- [15] Moses, A. J., Al-Naemi, F., Hall, J., (2003) Designing and prototyping for production. Practical applications of electromagnetic modelling. *J. Magn. Magn. Mater.*, 254–255, 228–233, [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00963-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00963-0).
- [16] Wang, L., Li, G. X., Xu, C. L., Xi, X., Wu, X. J., Sun, S.P., (2016) Effect of characteristic parameters on the magnetic properties of solenoid valve for high-pressure common rail diesel engine. *Energy Convers. Manag.*, 127, 656–666, <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.09.057>.
- [17] Yatchev, I., Gueorgiev, V., Hinov, K., Ivanov, R., Dimitrov, D., (2010) Dynamic characteristics of a permanent magnet electromagnetic valve actuator. *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, 147–152, <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2010.5510483>.
- [18] Jiajian, J., Chen, S., Xie, X., Wang, X., Kan, J., Zhang, Z., Li, J., (2019) Design and Experimental Verification on Characteristics of Valve-Less Piezoelectric Pump Effected by Valve Hole Spacing. *IEEE Access*, 7, 36259–36265, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903680>.
- [19] Feng, X., You, J., Liang, H., Zhou, C., Jiang, s., (2021). A Working Air-gap and Magnetic Circuit Topology Analysis based Method for Straightly-Acting Solenoid Valve Design,” *2021 13th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl.*, 1–5, <https://doi.org/10.1109/ldia49489.2021.9505918>.
- [20] Plavec, E. Vidović, M., (2016) Optimization of DC Solenoid Electromagnetic Actuator. 5–8. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2016.7818839>
- [21] Wu, S., Zhao, X., Li, C., Jiao, Z., Qu, F., (2018) Multiobjective Optimization of a Hollow Plunger Type Solenoid for High Speed On/Off Valve. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65(4), 3115–3124, <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2756578>.
- [22] Lee, S., H., Yi, H., C., Han, K., Kim, J., H., (2015) Genetic algorithm-based design optimization of electromagnetic valve actuators in combustion engines. *Energies*, 89110, 13222–13230, <https://doi.org/10.3390/en8112352>.
- [23] Maridor, J., Markovic, M., Perriard, Y., Ladas, D., (2009) Optimization design of a linear actuator using a genetic algorithm. *IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC*, 1776–1781. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075443>.
- [24] Bottauscio, O., Chiampì, M., Manzin, A., (2002) Electromagnetic field diffusion in axisymmetric hysteretic cores. *INTERMAG Eur. IEEE Int. Magn. Conf.*, 38(5), 2361–2363, <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2002.1000740>.
- [25] Moya-Lasheras, E., Sagues, C., Llorente, S., (2021) An efficient dynamical model of reluctance actuators with flux fringing and magnetic hysteresis. *Mechatronics*, 74, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102500>.

- [26] Vogel, O., Ulm, J., (2011) Theory of Proportional Solenoids and Magnetic Force Calculation Using COMSOL Multiphysics. *Proc. 2011 COMSOL Conf. Stuttgart*, <http://www.comsol.com/papers/11391>.
- [27] Biller, H., Systems, C. A., (2008) Dynamic Simulation of Electromagnets. *Main, 2008. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover*.
- [28] Ebrahimi, N., Schimpf, P., Jafari, A., (2018) Design optimization of a solenoid-based electromagnetic soft actuator with permanent magnet core. *Sensors Actuators A Phys.*, 284, 276–285, <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2018.10.026>.
- [29] SMS TORK Solenoid Vana, Aktüatörlü Vanalar Üreticisi, Otomasyon - Debi, Basınç, Seviye, Sıcaklık, pH,.
- [30] Ye, Q., Chen, J., (2009) Dynamic analysis of a pilot-operated two-stage solenoid valve used in pneumatic system. *Simul. Model. Pract. Theory*, 17(5), 794–816, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.01.005>.
- [31] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., and Umans, S. D., (2003) *Electric Machinery* (6th ed.). McGraw-Hill,.
- [32] Weise, H., (1977) The international system of units (SI), *Surv. News, Jena*, 35, 2–6, <https://doi.org/10.2322/jjsass1969.24.463>.
- [33] Plavec, E., Filipović-Grčić, B., and Vidović, M., (2019) The impact of plunger angle and radius on the force and time response of DC solenoid electromagnetic actuator used in high-voltage circuit breaker. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105767>.
- [34] Balcı, G., Endüktansın doyması. <https://www.giraybalci.com/2018/02/04/enduktansin-doymasi-nedir/> adresinden Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- [35] Yağcı, A., Küntüz, M. P., ve Bebek, Ö., (2017). Electromagnetic And Dynamic Analysis Of Solenoid Actuator To Reduce The Closing Time. *9 th Ankara International Aerospace Conference-Metu*.
- [36] Moallem, M., (1989). Performance Characteristics Of Switched Reluctance Motor Drive [Doktora tezi] Purdue University.
- [37] Yağcı, A., (2019). Mechatronic Design And Analysis Of A Solenoid Based Injector [Yüksek lisans tezi] Özyeğin University.
- [38] R. On, (2000). Data Shee T. 1–7.
- [39] AISI 430_430F STAINLESS STEEL BALLS
- [40] Zhuang, S., (2017). Modeling and Simulation of Control Valves via COMSOL Multiphysics., *Proc. 2017 COMSOL Conf. Bost.*, 1–5, <https://www.comsol.com/paper/modeling-and-simulation-of-control-valves-via-comsol-multiphysics-50592>
- [41] The COMSOL Multiphysics 5.5. (2019). *COMSOL Multiphysics Reference Manual*.
- [42] (2018). COMSOL Multiphysics, *The COMSOL Multiphysics Physics Builder manual*.

- [43] Lagodzinski, J., and Tkacz, E., (2020). Experimental verification of solenoid valve numerical model. *15th Int. Conf. Mechatron. Syst. Mater. MSM 2020*, 1–5, <https://doi.org/10.1109/MSM49833.2020.9202160>.
- [44] Liu, Q., Bo, H., and Qin, B., (2010). Experimental study and numerical analysis on electromagnetic force of direct action solenoid valve. *Nucl. Eng. Des.*, 240(12), 4031–4036. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.028>.
- [45] Murphy, K., P., (2012) *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. The MIT Press
- [46] Turing, A., (1950) Computing Machinery and Intelligence,” 433–460.
- [47] Samuel, A., L., (1959) Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checker. *IBM J. Res. Dev.*, 3(3), 210–229, <https://doi.org/10.1147/rd.33.0210>.
- [48] Aydın, S., Özküül, A. E., (2015). Veri Madenciliği Ve Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Sisteminde Bir Uygulama, *Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi*. 2146–9199.
- [49] Raschka, S., (2015). *Python Machine Learning: Unlock deeper insights into machine learning with this vital guide to cutting-edge predictive analytics*.
- [50] Canbay, Y., (2013). *Diyabet Verilerinin Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Sınıflandırılması* [Yüksek lisans tezi]. Erciyes Üniversitesi.
- [51] Ben-Hur, A. and Weston, J., (2010). A user’s guide to support vector machines. *Methods Mol. Biol.*, 609, 223–239, https://doi.org/10.1007/978-1-60327-241-4_13.
- [52] Lecun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G., (2015) Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444, <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- [53] Öztürk, K. ve Şahin, M. E., (2018). Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ’ya Genel Bir Bakış. *Tak. Vekayi*, 6(2), 25–36.
- [54] Demuth, H., Beale, M. and Hagan, M., (2000) *Neural Network Toolbox™ 6 User’s Guide*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s005210070003>.
- [55] Goncalves, V., Maria, K., and da Silva, A. B., F., (2013). Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Problems. *Artif. Neural Networks - Archit. Appl.*, <https://doi.org/10.5772/51275>.
- [56] Ataş, İ., (2011), *Açıklık Kuplajlı Mikroşerit Yama Antenin Rezonans Frekansının Yapay Sinir Ağları İle Belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi] Dicle Üniversitesi.
- [57] Kotan, B., (2022). *Hava Kirliliği Parametrelerinin Yapay Sinir Ağı (Ysa) Ve Çoklu Regresyon Algoritması İle Modellenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kocaeli Üniversitesi.
- [58] Öztemel, E., (2006). Yapay zeka ve makine öğrenmesine genel bakış, Yapay sinir ağlarının yapısı ve temel elemanları. *Yapay sinir ağları*. 13–15.
- [59] Genç, H., (2019). *Türkiye Enerji Sektörünün Stratejik Konumu Ve Yapay Sinir Ağı Modelleriyle Enerji Tüketiminin Tahmini* [Doktora tezi]. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.

- [60] Lavine, B. K., and Blank, T. R., (2009). Feed-Forward Neural Networks. *Compr. Chemom.*, 3, 571–586, <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00026-0>.
- [61] Bilgin, S., (2008). *The analysis of heart rate variability using wavelet transform and artificial neural networks* [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [62] Aksoğan, B., (2022). *Hastaneye yeniden yatişin regresyon yöntemleri ile incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- [63] Çavuşlu, M., A., Becerikli, Y., ve Karakuzu, C., (2012). Levenberg- Marquardt Algoritması ile YSA Eğitiminin Donanımsal Gerçeklenmesi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgi. Bilim. ve Mühendisliği Derg.*, 5(5), 1–7.
- [64] Shin-Ike, K., (2010). A two phase method for determining the number of neurons in the hidden layer of a 3-layer neural network. *Proc. SICE Annu. Conf.*, <https://doi.org/238–242>, 2010.
- [65] Copeland, K., A., F., (1997) *Applied Linear Statistical Models*, (5th ed.) 29(2), <https://doi.org/10.1080/00224065.1997.11979760>.
- [66] (2021). MSE, RMSE, MAE, MAPE ve Diğer Metrikler. <https://veribilimcisi.com/2017/07/14/mse-rmse-mae-mape-metrikleri-nedir/>
- [67] Yener, Ş. Ç., (2007). *BSIM MOSFET Model Parametrelerinin Belirlenmesine Yönelik Algoritmalar*. İstanbul Teknik Üniversitesi.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mahammadkhan Guliyev

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Milli Aviasiya Akademiyası (Azerbaycan), Hava Taşımacılığı Fakültesi / Elektrik – Elektronik Mühendisliği