

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ELEKTROMANYETİK RETARDERİN TASARIMI VE
PERFORMANS OPTİMİZASYONU**

RIZA EMRE ERGÜN

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ELEKTROMANYETİK RETARDERİN TASARIMI VE
PERFORMANS OPTİMİZASYONU

Rıza Emre ERGÜN


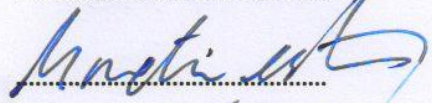
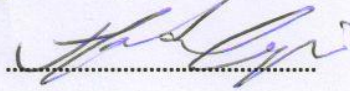
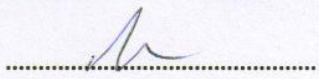
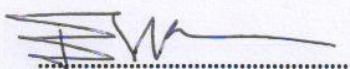
Prof.Dr. Mehmet UÇAR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. H. Metin ERTUNÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Abdulkadir CENGİZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Cemal BAYKARA
Jüri Üyesi, İ.T.Ü.

Doç.Dr.ERCÜMENT KARAKAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.03.2014

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Karayolu taşımacılığının en yoğun kullanılan ulaşım yöntemi olduğu günümüzde, seyir halindeki taşıtların aktif emniyet sistemlerinden en önemlisi, taşıtın frenleme kabiliyetidir. Özellikle, hareket halinde büyük kinetik enerjiye sahip ağır karayolu taşıtlarının emniyetli olarak yavaşlatılması bu noktada büyük önem kazanmaktadır. Ağır taşıtlarda birincil frenleme donanımları yanında yardımcı frenleme donanımları olarak kullanılan elektromanyetik retarderler, sürtünmesiz frenleme kabiliyetleri nedeniyle, uzun yokuş inişleri esnasında frenleme emniyetinin artırılması için servis frenlerine destek sağlamaları açısından büyük önem taşımaktadırlar.

Bu doktora tez çalışmasında elektromanyetik retarderlerin frenleme performanslarının iyileştirmesine yönelik bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, kutup başı geometrisinin frenleme performansına etkisi incelenmiş, rotor kalınlığının inceltmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş, darbe genişlik modülasyonu yöntemi ile kontrol işlemi gerçekleştirilerek, bu yöntemin frenleme performansına etkileri araştırılmış ve EMR' in kapalı çevrim kontrolü üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin ortaya çıkması sürecinde yardımlarını esirgemeyerek beni yönlendiren ve cesaretlendiren değerli tez danışmanı hocam Sayın, Prof. Dr. Mehmet UÇAR' a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu süreç içerisinde katkı ve desteklerini esirgemeyen tez izleme komitesi üyelerinden değerli hocalarım Sayın, Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir CENGİZ' e ve Sayın Doç. Dr. Hüseyin Metin ERTUNÇ' a şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarda kullanılan laboratuvar ortamı ve gerekli teçhizatı sağlayan Otomotiv Mühendisliği Bölümü yöneticilerine, katkılarından dolayı Elektrik Eğitimi Bölümü öğretim üyelerinden hocam Sayın, Yrd. Doç. Dr. Kadir YILMAZ' a ve araştırma görevlisi arkadaşım Murat AYAZ' a, Makina Eğitimi Bölümü öğretim üyeleri, öğretim görevlileri ve bölüm teknisyenimize teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, manevi desteklerini her an yanımda hissettiğim annem Beyhan KUŞOĞLU, teyzem Güner MUTLU' ya, eşimin aile büyüklerine, özellikle gösterdiği sabır ve verdiği güçten dolayı sevgili eşim Pelin ile canım oğlum Kağan' a sonsuz teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Mart - 2014

R. Emre ERGÜN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ.....	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ.....	1
1. GENEL BİLGİLER	5
1.1. Elektromanyetik Retarder	5
1.2. EMR Yapısı	5
1.3. Çalışma Prensibi	6
1.4. Frenleme Performansına Etki Eden Faktörler	7
1.4.1. Bobin uyarım akımı	7
1.4.2. Bobin sarım sayısı	8
1.4.3. Hava boşluğu	9
1.4.4. Rotor özellikleri	10
1.4.5. Kutupbaşı yapısı	13
1.5. Retarder Kontrol Sistemi	14
1.5.1. Darbe genişlik modülasyonu	14
1.5.2. Kapalı çevrim EMR kontrolü	16
2. MALZEME ve YÖNTEM	19
2.1. Analiz	19
2.1.1. Katı model tasarımı	19
2.1.2. Elektromanyetik sonlu elemanlar analizi	19
2.2. Deneysel Çalışma	20
2.2.1. Deney donanımı	20
2.2.1.1. Elektromanyetik retarder tasarımı	23
2.2.1.2. Kutupbaşı yapıları	24
2.2.1.3. AC motorlu deney düzeneği	25
2.2.1.4. İçten yanmalı motorlu deney düzeneği	26
2.2.1.5. EMR sürücü kartı	27
2.2.1.6. Mikrodenetleyiciler	28
2.2.1.7. Tork ölçümü	29
2.2.1.8. Devir ölçümü	30
2.2.1.9. Akım ölçümü	30
2.2.2. Mikrodenetleyici yazılımları	31
2.2.2.1. Devir ölçümü yazılımı	31
2.2.2.2. PWM sinyali üretim yazılımı	33
2.2.3. Bilgisayar tarafı veri toplama ve kontrol yazılımları	34
2.2.3.1. PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımı	34
2.2.3.2. Kapalı çevrim PID kontrol yazılımı	37
2.4. Deney Yöntemleri	39
2.4.1. EMR frenleme karakteristiği tayini	39
2.4.2. EMR' in kapalı çevrim PID yöntemi ile kontrolü	39
3. BULGULAR	41

3.1. PWM Yöntemi ile EMR Frenleme Kontrolü.....	41
3.2. Rotor Disk Kalınlığının Mekanik Analizi	44
3.2.1. Deri etkisinin incelenmesi.....	44
3.2.2. Rotorun mekanik analizi.....	46
3.3. Kutup Başı Profillerinin EMR Frenleme Performansına Etkisi.....	50
3.3.1. Kutupbaşı profilleri analiz sonuçları.....	50
3.3.2. Kutupbaşı profilleri deneysel sonuçları.....	52
3.4. PWM Tabanlı Kapalı Çevrim EMR Kontrolü Etkinliğinin İncelenmesi.....	54
3.4.1. Kontrolörün kapalı çevrim adım cevabı	54
3.4.2. Farklı yol eğimlerine göre kontrolör davranışının incelenmesi	58
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	66
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	EMR' in Yapısı	6
Şekil 1.2.	EMR' in taşıt üzerinde yerleşiminin şematik gösterimi; Şanzıman çıkışına (a), Şaftı 2 parçaya bölerek (b), Diferansiyel girişine (c)	6
Şekil 1.3.	Darbe genişlik modülasyonu	15
Şekil 1.4.	PID kontrol genel blok diyagramı	17
Şekil 2.1.	Maxwell yazılım ortamında EMR tasarımı	20
Şekil 2.2.	Deney düzeneği	21
Şekil 2.3.	Sinyal güçlendirme panosu	22
Şekil 2.4.	EMR tasarımı 3 boyutlu katı modeli	23
Şekil 2.5.	Kutup başı profilleri	24
Şekil 2.6.	Kutup başı profillerinin EMR modeli üzerinde yerleşimi	25
Şekil 2.7.	Kutup başı profillerinin deney seti üzerinde yerleşimi	25
Şekil 2.8.	Elektrik motorunun deney seti üzerinde yerleşimi	26
Şekil 2.9.	Benzinli motorunun deney seti üzerinde yerleşimi	26
Şekil 2.10.	EMR sürücü devre blok diyagramı	27
Şekil 2.11.	EMR sürücü devre baskı devresi	28
Şekil 2.12.	Frenleme torku ölçüm sistemi	30
Şekil 2.13.	Akım ölçümü sensör kiti	31
Şekil 2.14.	Devir ölçümü için mikrodenetleyici yazılımı akış diyagramı	32
Şekil 2.15.	PWM sinyal üretim yazılımı akış diyagramı	33
Şekil 2.16.	PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımı arayüzü	35
Şekil 2.17.	PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımı grafiksel kaynak kodları	36
Şekil 2.18.	PID tabanlı EMR kontrol yazılımı arayüzü	37
Şekil 2.19.	PID tabanlı EMR kontrol yazılımının grafiksel kaynak kodları	39
Şekil 3.1.	PWM % çevrim oranına göre bobin akımı ölçüm değerleri	41
Şekil 3.2.	EMR' in PWM % çevrim oranına göre frenleme torku değişimi	42
Şekil 3.3.	EMR frenleme performansı grafiği	43
Şekil 3.4.	PWM çevrim oranlarına göre EMR' in frenleme karakteristiği	43
Şekil 3.5.	Rotor üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu	45
Şekil 3.6.	8 mm rotor yüzeysel kuvvet dağılımı	47
Şekil 3.7.	8 mm rotor katı modeli üzerinde oluşturulan basınç yüzeyi	48
Şekil 3.8.	8 mm rotor maksimum deformasyonu	49
Şekil 3.9.	Farklı disk kalınlıkları için rotor sehim analizi sonuçları	50
Şekil 3.10.	Kutup başı yapısı etkisinin incelendiği elektromanyetik FEM analizi modelleri	51
Şekil 3.11.	Kutup başı tiplerine göre EMR frenleme performansı karakteristik eğrileri (Analiz)	52
Şekil 3.12.	Deneyler sonucunda farklı kutup başı profillerinin frenleme performansına etkisi	54
Şekil 3.13.	Ayar noktalarına göre motor devri değişimi grafiği	55
Şekil 3.14.	Kontrolörün PWM sinyal çıkışı	56
Şekil 3.15.	Kontrol esnasında EMR' in bobin akımı değişimi	57
Şekil 3.16.	Adım referansına göre frenleme torku değişimi	57
Şekil 3.17.	Gaz kolu pozisyonuna göre motor hızı değişim grafiği	58
Şekil 3.18.	PWM çıkışı değişim grafiği	59
Şekil 3.19.	Frenleme torku değişim grafiği	59

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Kumanda kolu pozisyonuna göre bobinlerin enerjilenme durumları	14
Tablo 3.1. Rotor devrine göre açısai frekans değerleri	44
Tablo 3.2. Rotor devrine göre girme derinliği	45
Tablo 3.3. Rotor kalınlığına göre maksimum sehım değerleri.....	50
Tablo 3.4. Kutup başı profilleri analizi FEM modeli ortak parametreleri	51
Tablo 3.5. Simetrik ve asimetrik kutup başına göre frenleme torku analiz sonuçları	52
Tablo 3.6. Simetrik ve asimetrik kutup başı tipine göre EMR frenleme torku deney sonuçları	54

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

A	: Akım Şiddeti (A)
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu (Tesla)
dev/dk	: Dakikadaki Devir Sayısı
F_{puls}	: Darbe Frekansı, (Hz)
H	: Manyetik alan şiddeti, (A/m)
kHz	: Kiloherertz, (kHz)
m	: Metre, (m)
mm	: Milimetre, (mm)
ms	: Milisaniye, (ms)
N	: Newton, (N)
Nm	: Newton-metre, (Nm)
T_{puls}	: Darbe Süresi, (s)
δ	: Girme Derinliği (Skin depth), (m)
ρ	: Özdirenç, (ohm-m)
ω	: Açısal Hız (rad/s)
μ	: Mutlak Manyetik Geçirgenlik, (H/m)
μ_0	: Vakumun Manyetik Geçirgenliği, (H/m)
μ_r	: Bağıl Manyetik Geçirgenlik, (birimsiz)

Kısaltmalar

3D	: 3 Dimentional (3 boyutlu)
CAN	: Controller Area Network (Denetleyici Alan Ağı)
CCP	: Capture Compare PWM (Yakalama Karşılaştırma PWM)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal İşaret İşleyici)
EMR	: Elektromanyetik Retarder
Enc.Res	: Encoder Resolution (Kodlayıcı Çözünürlüğü)
FEM	: Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
I2C	: Inter-Integrated Circuit (Tümleşik Devre Arabirimi)
MMF	: Magneto-Motive Force (Manyetomotor Kuvveti)
PID	: Proportional Derivative Integral (Oransal Türev İntegral)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RPM	: Rotate Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
SPI	: Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arabirim)
SY	: Saat İbreleri Dönüş Yönü
SYT	: Saat İbreleri Dönüş Yönü Ters
TTL	: Transistor-Transistor Logic (Transistör Transistör Lojik)
USART	: Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (Evrensel Senkron Asenkron Alıcı Verici)
USB	: Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)

ELEKTROMANYETİK RETARDERİN TASARIMI VE PERFORMANS OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, ağır taşıtların, özellikle uzun yokuş inişlerinde, emniyetli frenlenmesini sağlamak için servis frenlerine destek amacıyla kullanılan bir yardımcı frenleme donanımı olan elektromanyetik retarderlerin (EMR), frenleme performansının iyileştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, mevcut 3 - 4 kademeli EMR frenleme kontrol mekanizmalarının yerine darbe genişlik modülasyonu tekniğinin kullanılabilirliği ve frenleme performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, frenleme etkisinin gerçekleştiği rotor disklerinin kalınlığını azaltmaya yönelik, bilgisayar destekli üç boyutlu (3D) elektromanyetik ve mekanik sonlu elemanlar analizi (FEM) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan, rotor diskleri üzerinde elektromanyetik alanın yoğunlaşmasını sağlayan kutup başı profillerinin frenleme performansına etkisini incelenmek amacıyla elektromanyetik 3D FEM çalışmaları ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, EMR' in kapalı çevrim kontrolü ile uzun yokuş inişlerinde taşıt hızının sabitlenmesine yönelik deneysel çalışmalar da bu tez çalışmasının diğer bir bölümünü oluşturmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, EMR' in kademeli kontrolü yerine, PWM yöntemi ile frenlemenin etkin olarak uygulanabileceği, rotor diski kalınlığının mevcut tasarım için %30 oranında azaltılabileceği tespit edilmiş ve asimetric kutup başı yapısının kullanımıyla frenleme torkunda %7 oranında bir artış sağlanmıştır. Diğer yandan, azaltılmış kazanç katsayılı bir PID kapalı çevrim kontrol sisteminin uzun yokuş inişlerinde, konfor amaçlı taşıt hızı sabitleme uygulaması için, etkin bir şekilde uygulanabilirliği deneysel olarak ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Retarder, Performans İyileştirme, PID Kontrol, PWM.

DESIGN AND PERFORMANCE OPTIMIZATION OF AN ELECTROMAGNETIC RETARDER

ABSTRACT

This study aims to enhance the braking performance of electromagnetic retarder which is used as an auxiliary braking unit to support the service brakes of the heavy vehicles. So, the effect of braking by using the pulse width modulation (PWM) technique to the braking performance of EMR was investigated experimentally. By using 3D FEM analysis, the thickness of the rotor disc was investigated to make it thinner and lighter. On the other side, the effects of shape of the pole shoes to the braking performance were investigated by using 3D FEM analysis and experiments. Lastly, a closed loop control algorithm was developed to stabilize the vehicle speed at long downhill by using EMR. The efficiency of the control algorithm was investigated experimentally. As a result of experimental studies, it was seen that the braking control of EMR by using PWM technique is more efficient than the existing staged control strategy. The results of the 3D FEM analysis showed that the thickness of the rotor can be reduced to 30% of initial value. By using the asymmetrical pole shoe design, the braking torque can be increased to 7% of its maximum value. The experimental studies showed that, a PID closed loop control algorithm with the decreased gain coefficients can be efficiently applied for a comfort purposed speed stabilization application at long downhill.

Keywords: Electromagnetic Retarder, Performance Enhancement, PID Control, PWM.

GİRİŞ

Günümüz dünyasının vazgeçilmez ihtiyaçlarından biri karayolu taşımacılığıdır. Gelişen sanayi ve şehirleşmenin getirdiği ulaşım ihtiyacının büyük bir bölümü karayolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir. Sanayinin ihtiyaçları olan hammadde, yarı mamul ve nihayetinde elde edilmiş ürünlerin çoğunun sevkiyatı karayolu ulaşımı ile gerçekleştirilmektedir. Aynı şekilde, karayolu ulaşımı, bireysel ve toplu taşıma araçları ile sosyal hayatımızda önemli bir rol oynamaktadır.

Ulaşım yöntemleri arasında en büyük yeri kaplayan karayolu ulaşımın giderek artması güvenlik ihtiyaçlarının da büyük bir ivme ile artmasına neden olmaktadır. Karayolu taşıtlarının aktif güvenlik özelliklerinin en başında taşıtın frenleme kabiliyeti gelmektedir. Özellikle kamyon, tır ve otobüs gibi hareket halinde büyük kinetik enerjiye sahip taşıtların yavaşlatılması ve durdurulması, öncelikli olarak taşıtın servis frenleri ile gerçekleştirilmektedir. Servis frenlerinin kullanılarak yapılan frenleme işlemi, tekerlekler üzerinde bulunan disk ve kampanalara hidrolik veya pnömatik silindirler yardımıyla baskı yapan balataların oluşturduğu sürtünme kuvveti ile sağlanmaktadır. Bu aşırı sürtünme durumu, özellikle ağır yüklerin mevcut olduğu uzun yokuş inişleri esnasında servis frenlerinin etkinliğinin kaybolması, lastiklerin patlaması gibi sürüş güvenliğini yüksek derecede tehlikeye sokan durumların oluşmasına sebep olmaktadır.

Ağır taşıtlarda servis frenlerinin yükünü, yardımcı frenleme sistemleri olarak anılan ve servis frenlerine destek sağlayan sistemler paylaşmaktadır. Yardımcı frenleme sistemleri, taşıtın kısmi olarak yavaşlatılması ve servis frenleri üzerinde oluşan aşırı yüklerin azaltılarak frenleme güvenliğinin artırılmasıyla yükümlüdürler. Bunun yanında sürtünmeli olarak çalışan servis frenlerinin ömürlerini uzatarak bakım maliyetlerinin azaltılmasında da büyük katkıları bulunmaktadır.

Yardımcı frenleme sistemleri motor freni ve retarderler (yavaşlatıcı) olarak iki grupta incelenebilirler. Motor frenleri, silindirler içerisine emilen havanın valfler ya da egsoz kelebeği yardımıyla motordan dışarı atılmasının engellenmesi ve pistonlar yardımıyla sıkıştırılarak krank miline ters yönde kuvvet uygulaması prensibiyle

çalışan sistemlerdir [1]. Diğer yardımcı frenleme sistemleri olan retarderler, hidrolik, elektromanyetik ve manyetik olarak üç grupta toplanmaktadır.

Hidrolik retarderlerde, temel olarak biri hareketli ve diğerisi sabit olmak üzere iki türbin arasına gönderilen akışkanın, türbinlerin pervaneleri arasında hareketi esnasında akışkan tarafından hareketli türbinin yavaşlatılması ile frenleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Hidrolik retarderler çoğu ağır taşıtta yoğun olarak kullanılan sistemlerdir. Taşıtın imalatı esnasında belirli pozisyonlarda şasi üzerine yerleştirilmektedirler. Zaman içerisinde sistemde kullanılan akışkanın ısı etkisiyle akışkanlık özelliklerini kaybetmesi ve hareketli aksamlarda sızdırmazlığı sağlayan mekanik keçe, conta gibi elemanların sürtünme ve ısı etkisiyle özelliklerini kaybetmelerinden dolayı periyodik olarak bakımlarının diğer retarder tiplerine oranla daha sık aralıklarla gerçekleştirilmesi gerekmektedir [2,3].

Elektromanyetik retarderler ve hali hazırda gelişmekte olan manyetik retarderler sabit bir manyetik alan içerisinde, iletken bir malzemenin hareketi esnasında oluşan Eddy akımlarının etkisiyle meydana gelen, dönme yönüne ters yöndeki kuvvetin etkisi ile frenleme işlemini gerçekleştirmektedirler.

Manyetik ve elektromanyetik retarderler arasındaki temel fark, frenlemeyi sağlayan manyetik alanın oluşturulma yöntemidir. Elektromanyetik retarderlerde manyetik alan, elektromıknatıslar yardımıyla oluşturulmaktadır. Bu nedendir ki kapasiteleri 350 ila 4000 Nm aralığında geniş bir yelpazede olabilmektedir. Manyetik retarderlerde ise, bu alan sabit mıknatıslar yardımıyla oluşturulmaktadır. Günümüzde sabit mıknatıslar, birçok uygulama için yeterli olabilecek, yüksek manyetik alan şiddeti üretebilme kabiliyetine sahip olsalar da manyetik retarderler maksimum 650 Nm gibi bir frenleme torku seviyesinde sınırlı kalmışlardır.

Eddy akımlı retarderler taşıtın üretimi esnasında şasi üzerine monte edilebildikleri gibi retardersiz bir taşıt üzerine istenildiği durumda kolaylıkla monte edilebilmektedirler. Bu nedenle fabrika çıkışı retarderi olmayan kamyon, tır gibi taşıtlar için tercih nedeni olmaktadır. Bakım masrafları açısından, sızdırmazlığın sağlanması gibi problemleri olmadığı için, hidrolik retarderlere oranla çok daha düşük maliyetlere sahiptirler. Ayrıca sistem bileşenlerinin montaj ve demontajı hidroliklere oranla çok daha kolay olarak gerçekleştirilmektedir.

Ek frenleme donanımları, taşıtın sürüş güvenliğinin artırılması yanında aracın servis frenlerindeki yükü paylaşarak, ana fren sisteminin ömrünü uzatmaktadır. Bu

noktada diğ er yardımcı frenleme donanımları yanında çok düşük bakım maliyetine sahip olan ve kapasiteleri bakımından ö ne ge ç en elektromanyetik retarderlerin incelenmesi ve performanslarının artırılması ilgi ç ekici bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektromanyetik retarderler, karayolu taşıtlarının yanında, yüksek hızlı trenler, lunaparklardaki eğence araç ların ve motor performans test donanımları gibi çe şitli alanlarda da uygulama ö rneklerine sahiptirler.

Bu amaç la, bu ç alışmada, günümüzde oldukça yoğun olarak kullanılan ve karayolu taşıtlarının emniyetli frenlemede etkin bir rol oynayan elektromanyetik retarderlerin performanslarının ve kullanım kabiliyetlerinin iyileştirilmesine y önelik bir dizi ç alışma yapılmıştır. Günümüz taşıtlarında kademeli olarak gerç ekleştirilen retarder kontrolü ile frenleme miktarı ayarlama y öntemine alternatif olarak, elektromanyetik retarderlerin kapasitesi dahilinde, teoride sonsuz kademede frenleme miktarına imkan sağlayan darbe genişlik modü lasyonu y önteminin performansı üzerine deneysel ç alışmalar gerç ekleştirilmiştir. Bununla birlikte, literatü re, frenleme diskinin mekanik dayanımı üzerine yapılan ç alışmalar kazandırılmıştır. Ayrıca Elektromanyetik retarderlerin frenleme prensibinin temeli olan manyetik alanın, rotor üzerinde yoğunlaşmasını sağlayan kutup başlarının frenleme performansına etkisi incelenmiştir. Diğ er y andan, sürücünün frenleme kontrolü yükünü hafifleterek uzun yokuş inişleri esnasında taşıt hızının elektromanyetik retarder kullanılarak istenilen seviyede sabitlenmesini sağlayan bir kontrol sistemi üzerine ç alışmalar gerç ekleştirilmiştir.

Bu tez ç alışması beş ana b ö l ü m d e n o lu ř m a k t a d ır. Giriş b ö l ü m ü n d e g e n e l o l a r a k ağır yük taşıtlarında kullanılan yardımcı frenleme donanımları ve tezi oluşturan ana başlıklar bilgi verilmektedir. Genel bilgiler b ö l ü m ü n d e e l e k t r o m a n y e t i k r e t a r d e r i n ç alışma prensibi, kontrol mekanizmaları ve frenleme performansını etkileyen faktörler literatü rde yapılan ç alışmalara paralel olarak a ç ı k l a n m ı ř v e t e z ç alışmasının literatü rdeki yeri tanımlanmıştır. Malzeme ve y ö n t e m b ö l ü m ü n d e ç alışmada kullanılan analiz yazılımları, deneysel ç alışmada kullanılan donanım ve bu donanımın ç alıştırılması için tasarımı gerç ekleştirilen mikrodenetleyici tabanlı yazılımlar yanında deneyler esnasında veri toplama ve kontrol amacıyla tasarımı gerç ekleştirilen bilgisayar tabanlı yazılımlar hakkında bilgiler verilmiştir. Bulgular ve tartışma b ö l ü m ü n d e a n a l i z v e d e n e y s e l ç alışmalar neticesinde elde edilen, darbe genişlik y ö n t e m i i l e f r e n l e m e k o n t r o l ü n ü n p e r f o r m a n s ı , r o t o r d i s k k a l ı n l ı ğ ı n ı n

mekanik analizleri, kutup başı profillerinin frenleme performansına etkilerinin incelenmesi sonucunda elde edilen analiz ve deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuş ve elektromanyetik retarderin kapalı çevrim kontrolü ile ilgili yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler incelenmiştir. Son olarak sonuçlar bölümünde yapılan deneysel ve analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlara ait değerlendirmelere ve ileride yapılabilecek çalışmalara ait önerilere yer verilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

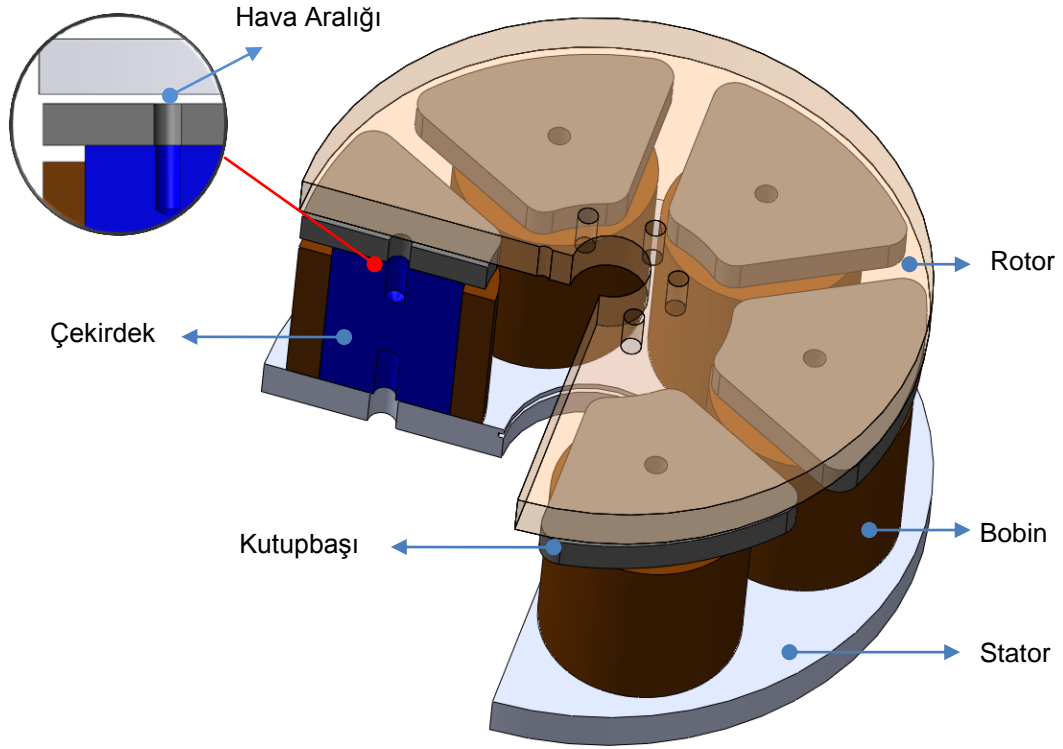
1.1. Elektromanyetik Retarder

Ağır yük taşıtları hareket halinde iken büyük bir kinetik enerjiye sahiptirler. Taşıtın yavaşlatılması esnasında bu enerjinin sönmülenererek taşıtın yavaşlatılması öncelikle servis frenleri olarak adlandırılan frenleme donanımları tarafından gerçekleştirilmektedir. Sürtünme ile enerjinin ısıya dönüştürülerek ortamdaki uzaklaştırılması prensibi ile çalışan servis frenleri işletim esnasında zamanla aşınmalarından ve etkinliklerini kaybetmelerinden dolayı periyodik olarak bakım gerektirmektedirler.

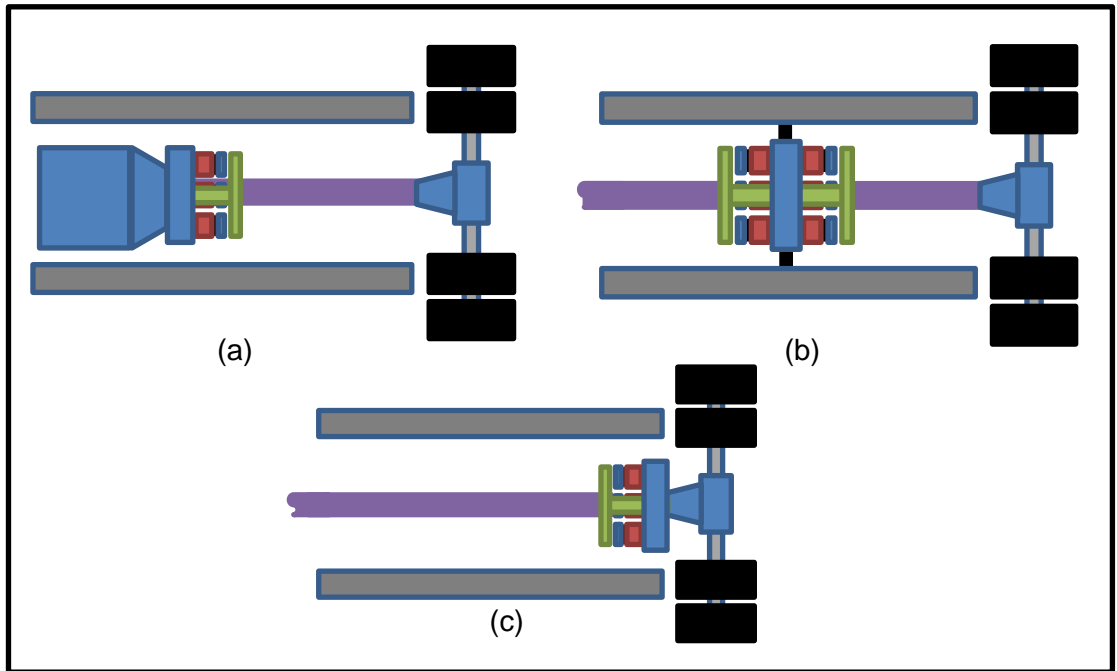
Elektromanyetik retarder (EMR) özellikle ağır yük taşıtlarında servis frenlerine destek amacıyla kullanılan yardımcı bir frenleme donanımdır. Frenleme işlemini tamamen sürtünmesiz olarak gerçekleştirilen EMR' ler, işletim anında herhangi bir aşınmaya maruz kalmadıkları için diğer frenleme donanımlarına göre oldukça düşük bakım maliyetlerine sahiptirler.

1.2. EMR Yapısı

EMR temel olarak rotor ve statordan meydana gelen bir elektrik makinasıdır. Taşıt gövdesi üzerine sabitlenmiş stator, frenleme işlemi için gerekli manyetik alanın oluşturulmasında kullanılan bobin, çekirdek ve kutup başı gruplarını üzerinde barındırmaktadır. Rotor, taşıtın güç aktarma organlarındaki hareketi tekerleklerle aktarmak için bir şaft ve bu şaft üzerine sabitlenmiş olarak aktarma organlarının hareketiyle birlikte dönen disklerden meydana gelmektedir. Stator, aynı zamanda rotor için bir yataklama elemanı görevi de üstlenmektedir. Şekil 1.2' de EMR' in taşıt üzerinde yerleşiminin şematik gösterimi görülmektedir. EMR' lerin taşıt üzerinde yerleşimine göre 3 farklı tipi bulunmaktadır. Tiplerine göre taşıt üzerinde şanzıman çıkışına (Şekil 1.2.(a)), şaftı 2 parçaya bölerek şasi üzerine (Şekil 1.2.(b)) veya diferansiyel girişine (Şekil 1.2.(c)) monte edilebilirler.



Şekil 1.1. EMR' in Yapısı



Şekil 1.2. EMR' in taşıt üzerinde yerleşiminin şematik gösterimi; Şanzıman çıkışına (a), Şaftı 2 parçaya bölerek (b), Diferansiyel girişine (c)

1.3. Çalışma Prensibi

EMR' ler temel olarak manyetik alan içerisinde hareket eden bir metal üzerinde oluşan Eddy akımları yardımıyla frenleme yaparlar. Çekirdek üzerine sarımsı bakır

veya alüminyum tellerden oluşan bobinler üzerinden akan elektrik akımı, çekirdekler üzerinde bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan kutup başları yardımıyla belirli bölgelere yoğunlaştırılır. Rotor diskleri, kutup başlarından hava boşluğu olarak adlandırılan sabit bir uzaklıkta dönecek şekilde imal edilmişlerdir. Manyetik alan içerisinde, güç aktarma organlarından aldığı hareketle dönen rotor diskleri üzerinde Eddy akımları meydana gelir. Eddy akımları rotor üzerinde ikinci bir manyetik alanın oluşmasına neden olur. Mevcut manyetik alan ve Eddy akımlarının oluşturduğu manyetik alan arasında rotor dönüş yönünün tersi yönde bir kuvvet meydana gelir. Meydana gelen bu kuvvet şaft üzerinde, dönüş yönünün tersi yönde bir tork oluşmasını sağlar ve böylece frenleme işlemi gerçekleşir.

1.4. Frenleme Performansına Etki Eden Faktörler

1.4.1. Bobin uyarım akımı

Bobin uyarım akımı EMR' in frenleme performansına etki eden önemli parametrelerden biridir. Bobin, dışı yalıtkan kaplı iletken bir telin sürekliliği bozulmadan yan yana ve üst üste halkalar halinde sarılmasıyla oluşturulmuş bir yapıdır. Bobin üzerine sarılmış olan telin kesit özellikleri ve bobini oluşturan sarım sayısı telin toplam uzunluğunu tayin eder. İletken telin malzeme özellikleri ve tel boyuna göre her bir bobin için sabit bir direnç değeri söz konusudur. Böylece, EMR üzerindeki bobinlerin seri ve paralel bağlanmaları ile retarderi oluşturan bobinlerin toplam direnç değeri ortaya çıkmaktadır.

Mevcut EMR' li taşıt frenleme sistemlerinde, EMR' in çalışması için gerekli elektrik enerjisi taşıt üzerindeki akü ve şarj donanımı yardımıyla sağlanmaktadır. Günümüz taşıtlarındaki akülerin standart 12 veya 24 V dc gerilim üretebildikleri göz önünde bulundurulursa, Ohm kanununa göre EMR bobinleri üzerine düşen gerilim miktarı ve bobin dirençleri sabit olması nedeniyle EMR üzerinden geçecek akım miktarı da sabit olarak düşünülebilir.

Rotor diskinin frenlemesi için gerekli manyetik akı yoğunluğu, bobin uyarım akımıyla bağlantılıdır. Bobinin içindeki manyetik alan şiddeti belirli bir boydaki sarım sayısının uyarım akımı ile çarpımıyla orantılıdır. Dolayısıyla uyarım akımının yükselmesi rotor üzerinden geçen manyetik akıyı artıracaktır. Böylece frenleme torkunun da yükseleceğinden bahsedilebilir.

Literatürde bobin uyarım akımının frenleme torkuna etkisini inceleyen çeşitli çalışmalara rastlamak mümkündür. Çeşitli parametrelerin EMR' in frenleme performansına etkisi üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada sabit hava boşluğu, bobin sarım sayısı ve sabit devirde bobin uyarım akımını değiştirerek EMR' in frenleme torkundaki değişimler incelenmiştir. Çalışma neticesinde bobin uyarım akımının artmasıyla EMR' in oluşturduğu frenleme torkunun da arttığı görülmektedir [4].

Diğer bir çalışmada, 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi yöntemi ve deneysel yöntem ile bir kondisyon bisikletinde kullanılan EMR' in frenleme performansı incelenmiştir. Çalışmaların neticesinde, frenleme torkunun, uyarım akımının artışıyla yükseldiği görülebilmektedir [5].

1.4.2. Bobin sarım sayısı

Bir iletken tel içerisinde akım geçirildiği durumda telin çevresinde manyetik alan meydana gelmektedir. Tel, bir halka haline dönüştürüldüğünde manyetik alan çizgileri halkanın içinde yoğunlaşmakta ve akımın yönüne göre belirli bir yönde oluşmaktadır. Bu halkaların sayısının artması, diğer bir deyişle bobini oluşturan sarım sayısının artması manyetik alanın kuvvetlenmesine sebep olacaktır [6].

Üzerinden akım geçen bir bobinin oluşturduğu manyetik alan şiddeti (H), manyeto motor kuvvetinin (mmf) bobin boyuna oranından elde edilmektedir. mmf, bobini oluşturan sarım sayısı ile bobin üzerinden geçen akımın çarpımı olarak tanımlanmaktadır. Bobinin, üzerine sarıldığı malzemenin manyetik özelliklerini tanımlayan B-H diyagramı kullanılarak manyetik akı yoğunluğu (B) elde edilebilir [7]. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan içerisinde hareket eden rotor üzerinde oluşan frenleme kuvvetiyle doğrudan ilişkilidir [8]. Dolayısıyla sarım sayısının artması ile EMR' in frenleme torkunun artacağı söylenebilir.

Literatürde, bobin sarım sayısının EMR' in frenleme torkuna etkisini inceleyen bir çalışmada, hava aralığı, devir sayısı değerleri ile rotor, çekirdek ve kutup başı malzemeleri sabit tutularak, farklı uyarım akımları için bobin sarım sayısı değiştirilmiş ve buna karşılık bobin sarım sayısının frenleme torkuna etkisini incelenmiştir. Bilgisayar destekli üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yazılımı kullanarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda frenleme torkunun sarım sayısının artması ile yükseldiğini belirtilmiştir [4].

1.4.3. Hava boşluğu

Motor veya generatör olarak çalışan, elektromekanik enerji dönüşümü yapan elektrik makinaları çalışmaları esnasında manyetik alan etkilerinden faydalanırlar. Sabit veya hareketli manyetik alan içerisinde enerji dönüşümü yapılırken rölatif hareket yapan mekanik elemanlar arasında elektromanyetik etkileşimin sağlanabilmesi ve mekanik sürtünmenin ortadan kaldırılması için bir hava boşluğunun bulunması gereklidir.

Elektromanyetik devrelerde mmf nedeniyle oluşan manyetik akı, kapalı bir yol izlemektedir. Diğer bir deyişle manyetik alan çizgileri kaynağın bir ucundan çıkarak diğer ucundan girmektedir. Bu bağlamda manyetik akı çizgilerinin izlediği yolun tamamı manyetik devre olarak düşünülmektedir. Manyetik akının geçtiği ortamlarda malzeme özellikleri, akının aktığı kesit alanı ve akının ilerlediği yol özelliklerine göre mmf düşümleri oluşmaktadır. Elektrik devreleri ile benzetimi yapıldığında mmf elektrik devrelerinde gerilim kaynağına, bu akımın aktığı ortalama yoldaki malzeme ise dirence benzetilmektedir. Elektrik devrelerinde direnç, manyetik devrelerde relüktans olarak adlandırılmaktadır. Relüktans değeri, Denklem (1.1)' de görüldüğü üzere, manyetik akının geçtiği yolun ortalama uzunluğunun (L), bu yol boyunca uzanan malzemenin kesit alanı (A) ile akının aktığı ortamın (hava veya malzeme) manyetik geçirgenliğinin çarpımının (μ), oranına eşittir.

$$R = \frac{L}{\mu \times A} \quad (1.1)$$

Manyetik devrede, mmf, akının aktığı yolların uzunluğu ile kesit ölçüleri sabit tutulduğunda, akı yolunu oluşturan ortamın manyetik geçirgenliği relüktans değerini ters orantılı olarak etkilemektedir [9].

Manyetik geçirgenlik (μ), Denklem (1.2)' de görüldüğü üzere, vakumun manyetik geçirgenliği olarak tanımlanan sabit (μ_0) ile ortamın manyetik özelliklerine bağlı olarak değişen bağıl manyetik geçirgenliğin (μ_r) çarpımı olarak tanımlanmaktadır.

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r \quad (1.2)$$

Dolayısı ile manyetik geçirgenlik ortamın manyetik özelliklerine göre değişim göstermektedir. Burada ortam tanımı manyetik devreyi oluşturan hava, manyetik element ya da element kompozisyonudur [10]. Havanın bağıl manyetik geçirgenliği,

içinde barındırdığı partiküllere göre değişiklik gösterse de, manyetik elementlere göre çok daha küçük olduğundan dolayı 1 olarak kabul edilmektedir [11]. Dolayısı ile havanın manyetik geçirgenliği, vakumdaki manyetik geçirgenliğe eşit olarak kabul edildiğinden, mutlak manyetik geçirgenlik vakumun manyetik geçirgenliğine eşit olmaktadır.

Manyetik devrelerde, hava aralığının relüktans değeri, mutlak manyetik geçirgenliğin vakumdaki manyetik geçirgenliğe eşit olarak kabulü nedeniyle manyetik malzemelere oranla yüksek çıkmaktadır. Böylece manyetik akı yoğunluğu sınırlandırılmaktadır. Bu durum EMR' ler için düşünüldüğünde, rotor ile kutup başları arasındaki hava boşluğu mesafesinin artması, rotor üzerinde eddy akımlarının oluşumunu sağlayan manyetik akı yoğunluğunun sınırlandırılması ve frenleme torkunun negatif yönde etkilenmesi anlamına gelmektedir. Literatürde bu durumu inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Literatürde, yüksek hızlı trenlerde kullanılan bir EMR' in, bilgisayar destekli iki boyutlu sonlu elemanlar analizi üzerine yapılan çalışmayla frenleme kuvvetini tanımlayan bir model oluşturulmuştur. Model üzerinde gerçekleştirilen analizlerde hava boşluğunun farklı hızlarda frenleme kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmaların neticesinde hava boşluğunun artmasıyla frenleme kuvvetinin azaldığı ve bununla birlikte frenleme karakteristik eğrisinin de düzleştiği tespit etmişlerdir [12].

Diğer bir çalışmada, EMR analizi için matematiksel bir model oluşturulmuş ve oluşturulan model üzerinde hava boşluğunun etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda hava boşluğundaki artışın frenleme torkunu azaltan yönde bir etki gösterdiği belirtilmiştir [13].

Hava boşluğunun artışının frenleme torkunu azaltıcı etkisi, benzer şekilde, literatürdeki diğer çalışmalarda da görülebilmektedir [4,14].

1.4.4. Rotor özellikleri

Rotor, EMR' de frenleme etkisini oluşturan temel parçadır. Rotor, manyetik alana duyarlı, ısıya karşı dayanıklı, elektriksel ve ısı olarak iletken olmalıdır [15]. Rotorun, sabit manyetik alan içerisinde hareketi esnasında üzerinde oluşan eddy akımlarının frenleme etkisini yaratabilmesi için imalatında kullanılan malzeme, frenleme karakteristiklerinin oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Malzemeler, manyetik alan içerisindeki davranışlarına göre genel olarak manyetik malzemeler ve manyetik olmayan malzemeler olarak gruplandırılabilirler.

Manyetik olmayan malzemeler diamanyetik ve paramanyetik olarak iki grupta toplanırlar. Her ne kadar manyetik olmayan olarak anılsa da, malzemeler, manyetik alan içerisinde belirgin bir karakteristik sergilemektedir. Diamanyetik malzemeler, manyetik alan içerisinde çok zayıf bir itme kuvveti oluşturan malzemelerdir. Paramanyetik malzemeler ise manyetik alan içerisinde çok zayıf bir kuvvet ile çekilen malzemelerdir. Bakır alüminyum gibi malzemeler bu gruba dahildirler.

Diğer yandan manyetik alan içerisinde büyük bir kuvvet ile çekilen malzemeler manyetik malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler bu kategoriyi oluşturmaktadırlar. Ferrimanyetik malzemeler manyetik alan içerisinde paramanyetik malzemelere oranla çok daha büyük bir kuvvet ile çekilirler ancak bu kuvvet ferromanyetik malzemelerden daha düşüktür. Ferromanyetik malzemeler manyetik alan etkisinden çıkartıldıklarında manyetiklik etkisini üzerlerinde koruyabilirler [11].

Malzemelerin manyetik özelliklerinin yanında iletkenliklerinin de eddy akımlarının oluşmasında etkisi büyüktür. Literatürde bakır ve alüminyum gibi paramanyetik malzemelerin kullanıldığı uygulamalara rastlamak mümkündür [14, 16, 17]. Ancak etkinliklerinin ferromanyetik malzemelere oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, manyetik alanı yoğunlaştırabilme özelliklerinden dolayı ferromanyetik malzemeler ve alaşımları rotor diskinin temel malzemelerini oluşturmaktadır.

Malzeme özelliklerinin yanında rotor diskinin yapısı da frenlemede etkili bir faktördür. Literatürdeki bir çalışmada, disk frenlerdeki yapıya benzeyen kanallı disk yapısının frenleme torkuna etkisini incelenmiştir. Çalışma neticesinde, rotor üzerinde çeşitli şekillerde oluşturulan boşluklu kanalların malzemenin elektriksel direncini artırdığı ve dolayısı ile frenleme torkunun azaldığı tespit edilmiştir [18].

Rotorun diğer bir görevi frenleme enerjisi nedeniyle oluşan ısının EMR üzerinden uzaklaştırılmasıdır. Frenleme esnasında oluşan enerji rotor üzerinde yoğunlaşmakta ve rotor disklerinin aşırı ısınmasına sebebiyet vermektedir. 700 °C dolaylarına varabilen sıcaklık değeri rotor üzerinde oluşturulan kanatçıklar yardımı ile dış ortama atılarak harcanmaktadır. Ancak, uzun yokuş inişleri esnasında frenleme süresinin artması ile aşırı yüklerle maruz kalan EMR' in ısı etkisiyle etkinliğini yitirmesine sebep olmaktadır.

EMR üzerindeki ısının frenleme performansına etkisini inceleyen bir çalışma frenleme esnasında ısının zaman içerisinde yükselme süreci incelenmiş ve bu ısı artışıyla frenlemenin nasıl etkilendiği ortaya koyulmuştur. Çeşitli yokuş eğim durumlarını göz önünde bulundurarak yapılan çalışmada, farklı yokuş eğim değerleri için frenleme süresi sabit tutarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, yokuş eğim miktarındaki artışla birlikte retarder ısınma süresinin kısaldığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlara göre 10 dk'lık bir frenleme sonunda EMR' in sıcaklığının %3' lük bir eğimde 200 °C seviyelerine ulaşırken, eğimin %7 olması durumunda sıcaklığın 700 °C dolaylarına ulaşabildiğini tespit edilmiştir. Diğer yandan, retarder devrinin düşmesiyle, yeterli ısı transferi sağlanamamasından ötürü ısınma hızının arttığı ve frenleme torkunda, önemli ölçüde azalma olduğu da ortaya koyulmuştur. Buna çözüm olarak da rotor yüzey alanının ve ısı transfer katsayısının artırılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir [19]. Buna paralel olarak, yapılan diğer bir çalışmada, ısı ile oluşan frenleme torku kaybının zaman içerisinde artarak, termal denge sağlandığında belirli bir değerde sabit kaldığı belirtilmiştir [20].

Bu noktada ısınma miktarının rotor yüzey alanının artırılması ile sağlanabileceği ortadadır. Yüzey alanı rotor üzerinde bulunan ısı transfer kanatçıklarının sayı ve boyutlarının artırılması ile sağlanabilir. Ancak bu uygulama, 150 kg değerlerini bulan retarder ağırlığının daha da artması ile sonuçlanacaktır.

Malzeme ve sıcaklığın yanında bahsedilmesi gereken diğer bir konu da deri etkisidir. Temelde, dairesel kesitli bir iletken içerisinde doğru akım geçerse, akım yoğunluğu dairesel kesitin tamamına düzenli bir şekilde yayılır. İletkenin kesitinin dairesel olmadığı durumda, akım yoğunluğu dağılımı düzenli değildir ancak kesitin her bölümüne yayılmış durumdadır. Diğer yandan, kesit içerisinde zaman içerisinde değişen bir akım geçerse akım yoğunluğu dağılımı iletkenin dış yüzeyine doğru yayılma eğilimi gösterir [9]. Buna bağlı olarak rotor içerisinde de oluşan eddy akımları, manyetik alanın değişimleri nedeniyle rotor yüzeyine doğru yoğunlaşacak ve disk yüzeyinden içeriye doğru gittikçe azalacaktır. Tüp şeklinde silindirik bir EMR ile yapılan bir çalışma da bunu desteklemektedir [21].

Deri etkisi olarak tanımlanan bu olay nedeniyle, eddy akımları, rotor yüzeyinden ancak belirli bir mesafe kadar içeride oluşabilirler. Frekansa bağlı olarak değişen bu mesafe girme derinliği (depth of penetration) olarak adlandırılmakta ve;

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \times \rho}{\omega \times \mu}} \quad (1.3)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada δ , ρ , ω ve μ , sırasıyla, m olarak girme derinliğini, Ω -m olarak iletkenin öz direncini, rad/s olarak açısal frekansı ve mutlak manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

Bu bağlamda, bobinlerin maksimum çekim kuvveti uyguladıkları durum sistemin statik halde olduğu durum olarak kabul edilip, yüksek devirlerde eddy akımlarının rotor yüzeyine yaklaşacağı göz önünde bulundurulursa, rotor diski kalınlığının azaltılıp bu kazancın soğumaya yönelik kanatçık yüzeyini artırmak gibi konstrüktif değişikliklerde kullanılabilirdiği düşünülebilir. Dolayısıyla ile bu tez çalışmasının bir bölümünde deri etkisinden faydalanılarak rotor diskinin kalınlığının azaltılması ile ilgili çalışmalar da gerçekleştirilecektir.

1.4.5. Kutupbaşı yapısı

Literatürde, bobinin çekirdeğine bağlı bir kutup başının varlığı ve yokluğu durumlarında, manyetik alanın rotor üzerine dağılımını incelemek amacıyla yapılan bir 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi çalışmasında, kutup başı olmayan bir bobin çekirdeğinin rotor üzerinde, çekirdek çevresi boyunca yoğunlaşan, dairesel bir manyetik alan oluşturduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, kutup başı kullanıldığı durumda, manyetik alan yoğunluğunun bölgesel olarak daha geniş bir alana dağıldığı ve bu dağılımın hava boşluğundaki manyetik alan yoğunluğunu azaltsa da rotor üzerinde daha düzenli bir manyetik alan oluştuğu belirlenmiştir [22]. Bu sonuç kutup başı kullanılmasının gerekliliğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

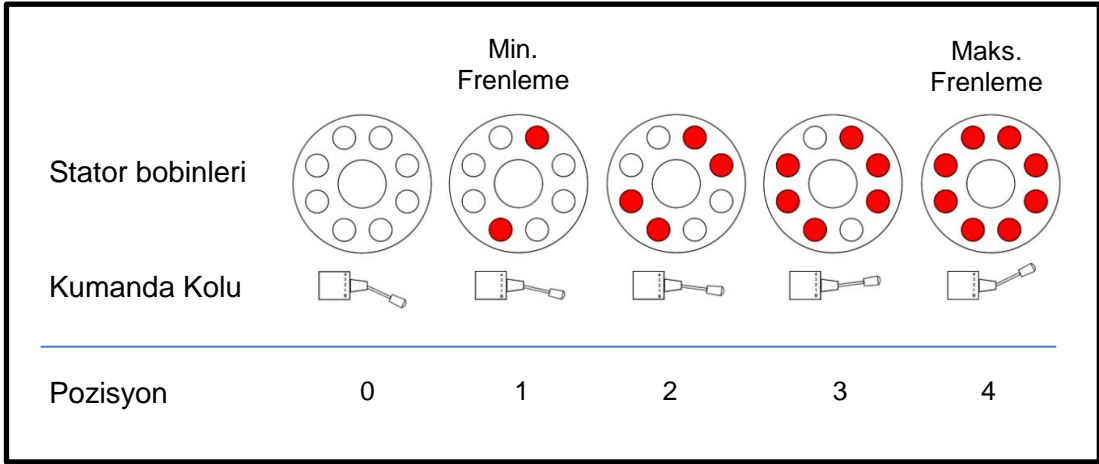
Diğer yandan, frenleme torkunun, kutup başı yüzey alanı ve kutup başı merkezi olarak kabul edilen efektif yarıçap ile orantılı olduğunu belirten çeşitli yayınlar da mevcuttur [8, 16, 17]. Buna göre kutup başlarının EMR merkezinden uzaklaşmasıyla, ya da diğer bir deyişle EMR çapının büyümesiyle frenleme torkunun artacağından bahsedilebilir.

Bu noktada, kutup başının yüzey alanının ve merkeze olan uzaklığının frenleme performansına etkisi daha önceden ifade edilmiş olsa da aynı yüzey alanına sahip farklı yapıda iki kutup başının veya bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bahsedilecek olan asimetrik yapıda bir kutup başı profilinin frenleme performansına etkisinin incelenmesi çalışmanın diğer bir hedefini oluşturmaktadır.

1.5. Retarder Kontrol Sistemi

Piyasada yoğun olarak kullanılan EMR' ler genel olarak dört kademeli frenleme sistemine sahiptirler. Sürücü yakınına yerleştirilmiş bir mekanik anahtar kol veya pedalin bağlı olduğu elektrik kontrol kutusu yardımıyla EMR üzerinde bulunan bobinler ikişerli gruplar halinde enerjilenmektedir. Her kademe artışında mevcut enerjilenmiş bobin grubuyla iki bobin grubu daha enerjilenerek frenleme torkunda artış sağlanmaktadır. Tablo 1.1' de kumanda kolu pozisyonuna göre bobinlerin enerjilenme durumları görülmektedir. Sürücü, gerekli olduğu durumda bu kademeler arasında geçişler yaparak ihtiyacı olan frenleme miktarını sağlamaktadır.

Tablo 1.1. Kumanda kolu pozisyonuna göre bobinlerin enerjilenme durumları



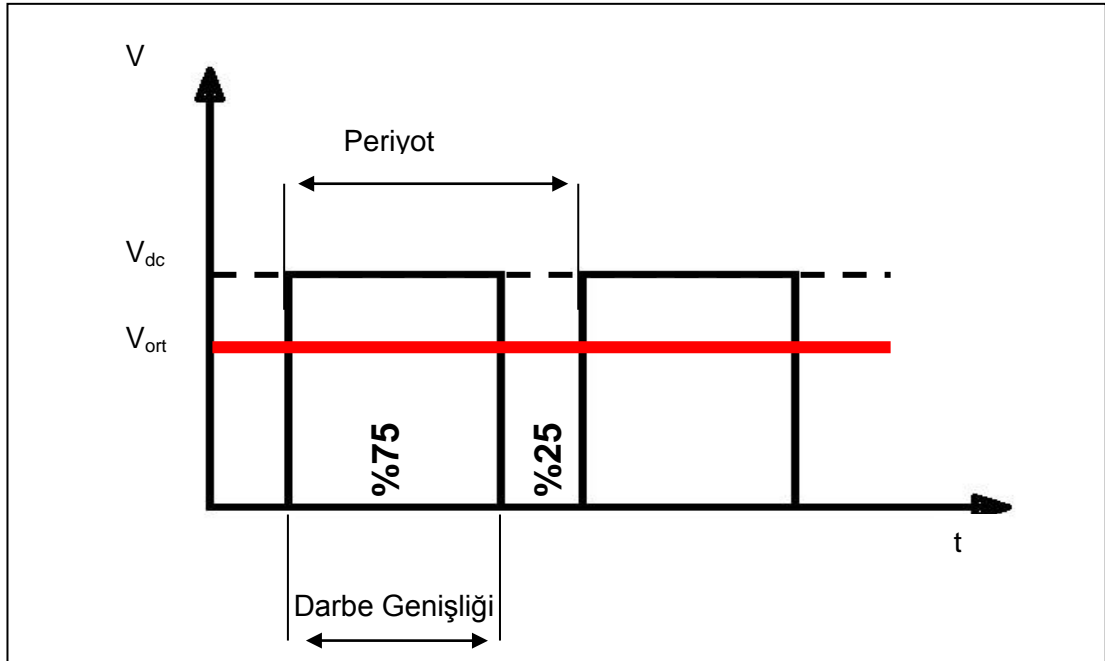
Bu kontrol mekanizması, frenleme kontrolünün tamamını sürücü üzerinde yoğunlaştırmaktadır. Sürücü, taşıtın ihtiyaca göre yavaşlatılması işlemini sürekli olarak kontrol etmek durumundadır. Özellikle yokuş inişleri, esnasında yol, şerit, yokuş eğimi, emniyetli seyir mesafesi takibi ve taşıtın yüküne göre hızlanma, yavaşlama durumlarının takibi gibi işlerin oryantasyonunu sağlayan sürücü, retarder ile frenleme gerçekleştirdiği durumda, bahsedilen parametrelerin yanında, retarder frenleme miktarının ayarlanması iş yükünü de üzerine almaktadır. Yol koşullarına göre taşıtın emniyetli olarak yavaşlatılması durumu, tamamen sürücünün EMR' i kullanım yetenekleri ile bağlantılı olmaktadır. Bu durum sürüş emniyeti ve özellikle, uzun mesafeler kat eden ağır yük taşıtlarının, sürüş konforunu olumsuz olarak etkileyen bir durum olarak düşünülebilir.

1.5.1. Darbe genişlik modülasyonu

Prencip olarak bakıldığında elektromanyetik retarder bir doğru akım elektrik makinesi olarak incelenebilir. Bu bağlamda günümüzdeki doğru akım motorlarının

hız kontrolü amacıyla uygulanan darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) yöntemi retarderlerin kontrolü amacıyla da kullanılabilir.

Günümüzde doğru akım motorlarının hız kontrolünde PWM yöntemi oldukça efektif bir şekilde kullanılmaktadır [23-25]. Şekil 1.3' de görülebileceği üzere, darbe genişlik modülasyonu, temelde, sabit bir gerilimin darbelere bölünerek ortalama gerilimin kontrol edilmesi yöntemidir. Darbelerin, bir periyot içerisinde, aktif veya pasif olma süreleri yüzdesel olarak değiştirildiğinde elde edilen ortalama gerilim de bu yüzdeye oranla değişmektedir [26].



Şekil 1.3. Darbe genişlik modülasyonu

EMR üzerinde manyetik alanı oluşturan bobin grupları seri, paralel veya seri-paralel gruplar halinde gruplandırılmışlardır. Böylece bağlantı şekline göre retarder bobinlerinde sabit bir direnç değeri oluşmaktadır. Elektrik'in temel prensiplerinden "Ohm kanunu" göz önünde bulundurulursa, bobinlere uygulanan gerilim miktarı değiştirildiğinde üzerlerinden akan akım miktarının da toplam direncin sabit olması nedeniyle değişeceği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda darbe genişlik modülasyonu yöntemi ile bobinler üzerinden akan akım miktarı ve dolayısı ile retarder üzerinde oluşan manyetik alan şiddeti değiştirilerek frenleme torku değerinin değiştirilebileceği ortaya çıkmaktadır.

Diğer yandan, PWM sinyali, işlemsel kuvvetlendirici ve komparatörlerin kullanımıyla, analog elektronik yapılarıyla [27] oluşturulabileceği gibi günümüz

mikrodenetleyicileriyle 32 bit çözünürlüğe kadar [28] dijital olarak kolaylıkla üretilebilmektedir. Mevcut yazılım geliştirme paket programları ve donanımları ile mikrodenetleyiciler için yazılım geliştirme ve hata analizi süreci oldukça kısalmaktadır.

PWM yönteminin, EMR' e kontrolünde uygulanması ile kademeli kontrole oranla sınırsız sayılabilecek derecede geniş bir ayar aralığına sahip frenleme kontrolü sağlanabilir. Bu noktada, EMR' in PWM yöntemi ile kontrolünün, frenleme performansına etkisinin, çeşitli çevrim oranlarında frenleme karakteristiğinin nasıl oluştuğunun incelenmesi ilgi çekici bir konudur. Bu tez çalışmasının bir bölümü EMR' in PWM yöntemi ile kontrolüne yönelik çalışmaları kapsamaktadır.

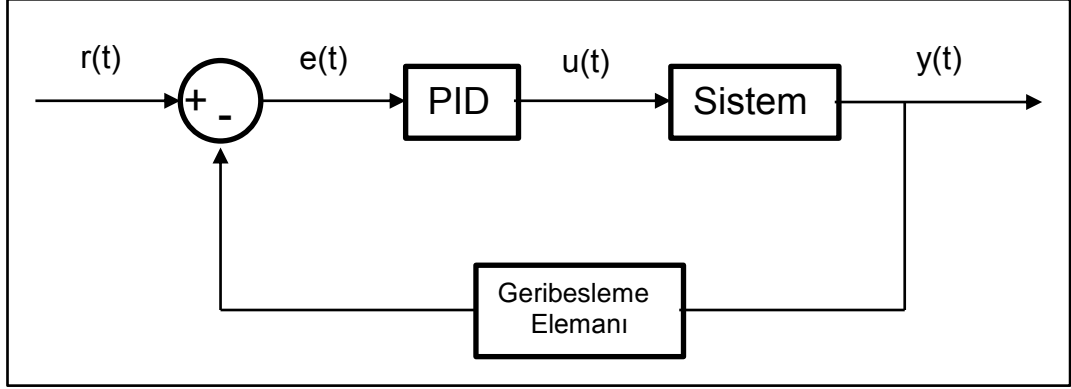
1.5.2. Kapalı çevrim EMR kontrolü

Uzun yokuş inişleri esnasında, sürücü EMR' in frenleme kademelerini devreye alarak taşıt yavaşlamakta, ancak, frenleme miktarı yüksek veya düşük geldiği durumda frenleme kademeleri arasında geçiş sağlayarak taşıt hızını dengelemeye çalışmaktadır. Bu bağlamda, retarderin PWM yöntemi ile frenleme miktarının ayarlanabilmesi kabiliyeti kapalı çevrim bir kontrol yöntemi kullanılarak kontrol edilebilir ve uzun yokuş inişleri esnasında taşıt hızı belirlenecek bir değerde sabit tutularak sürüş konforu artırılabilir.

PWM yöntemi çeşitli kapalı çevrim kontrol algoritmalarıyla birlikte kullanılabilir. Literatürde, DC motorların hız ve pozisyon kontrolü gibi bu temele dayanan çeşitli uygulamalara rastlamak mümkündür. Örnek olarak, PWM - PID (Oransal Integral Türev - Proportional Integral Derivative) uygulaması ile fırçasız DC motorların hız kontrolünü sağlanması konusunda gerçekleştirilen bir çalışma [29] ve mobil robotlar üzerinde DSP (Digital Signal Processor) yardımıyla PID kontrol ile DC servo motorların hız ve konum kontrolü üzerine gerçekleştirilen diier bir çalışma gösterilebilir [30]. Genel olarak bakıldığında, endüstriyel motor kontrol donanımlarının çoğu, PWM ve artımsal kodlayıcı geri beslemeli kapalı çevrim kontrol algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda EMR taşıt hızının sabitlenmesi için kullanılabilir.

PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrol tekniği, dinamik sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dinamik kontrollerin % 85' i PID kontrol tabanlıdır [31]. PID kontrol tekniği, uygulamadaki basitliğinden dolayı çeşitli endüstriyel işlemlerde kullanılmaktadır. İlk uygulamaları pnömatik sistemlerde,

vakumlama aletlerinde ve katı durum analog elektroniğinde görülmektedir. Sonrasında, mikrodenetleyici tabanlı dijital uygulanmalarda kullanılmaya başlanmıştır [32]. PID kontrol yönteminin genel blok diyagramı Şekil 1.4' te görülmektedir.



Şekil 1.4. PID kontrol genel blok diyagramı

Oransal, integral ve türev terimlerinin bir araya gelmesiyle oluşan PID kontrol yönteminde, çıkış sinyalinin referans sinyali takip edebilmesi için K_p , K_i ve K_d , PID parametrelerinin, üzerinde çalışılan sisteme uygun olacak biçimde belirlenmesi gerekmektedir. PID kontrol yönteminde $e(t)$ hata sinyali Denklem (1.4)' te görüldüğü üzere;

$$e(t)=r(t)-y(t) \quad (1.4)$$

$r(t)$ referans sinyali ile $b(t)$ procesten elde edilen geri besleme bilgisi arasındaki fark olarak tanımlanır. Belirlenen parametrelerden K_p oransal teriminin $e(t)$ hata sinyaliyle, K_i integral teriminin hata sinyalinin integraliyle, K_d türev teriminin hata sinyalinin türeviyle çarpılmasıyla ve hepsinin toplanmasıyla Denklem (1.5)' te gösterilen $u(t)$ PID çıkış değeri elde edilir [33, 34].

$$u(t)=K_p e(t)+K_i \int e(t)dt+K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1.5)$$

Literatürde, EMR' in frenleme torkunun çeşitli kapalı çevrim kontrol algoritmaları ile kontrolüne yönelik uygulamalara da rastlamak mümkündür. Yapılan bir çalışmada, EMR'in frenleme torkunun tayin edilmesi için rotor hızı ve bobin uyarım akımı geri besleme bilgisi olarak kullanılmıştır. Öngörülen sistem, frenleme için gereken ve sistem üzerinden alınan geri besleme bilgisine bağlı olarak hesaplanan tork değerlerine göre EMR' in frenleme miktarı tayini için gereken uyarım akımını

hesaplamaktadır [35]. Diğer kapalı çevrim kontrol sistemlerinde olduğu gibi bu çalışmada da, kontrol algoritmasının istikrarlı davranması koşuluyla, cevap süresinin kısaltılması hedeflenmektedir.

Mevcut PID kapalı çevrim kontrol uygulamalarında, oransal, integral ve türev katsayıları sistemin mümkün olan en kısa sürede cevap vermesini sağlayacak şekilde ayarlanmaktadır. Bazı durumlarda, kısaltılmış cevap süresi, kontrol algoritmasının kararsız çalışmasına sebep olabilir. Acil frenleme durumlarında, taşıtın mümkün olan en kısa sürede yavaşlatılması veya durdurulması öncelikli bir konudur. Ancak, hız sabitleme gibi konfor amaçlı uygulamalarda, sistemin hızlı cevap verme karakteristiği ödün verilebilecek bir konudur.

Bu noktada, motor freni veya vites değişim durumlarını algılayan sensörler gibi ek donanımlara ihtiyaç duyan kontrol mekanizmalarını sadeleştirerek, cevap süresinin uzatılması ile kararsız durumların oluşmasını engelleyen ve PID kontrolörün EMR' in kapalı çevrim kontrolünde uygulanabilirliğinin artırılmasını sağlayan bir kontrol yapısının literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

2. MALZEME ve YÖNTEM

2.1. Analiz

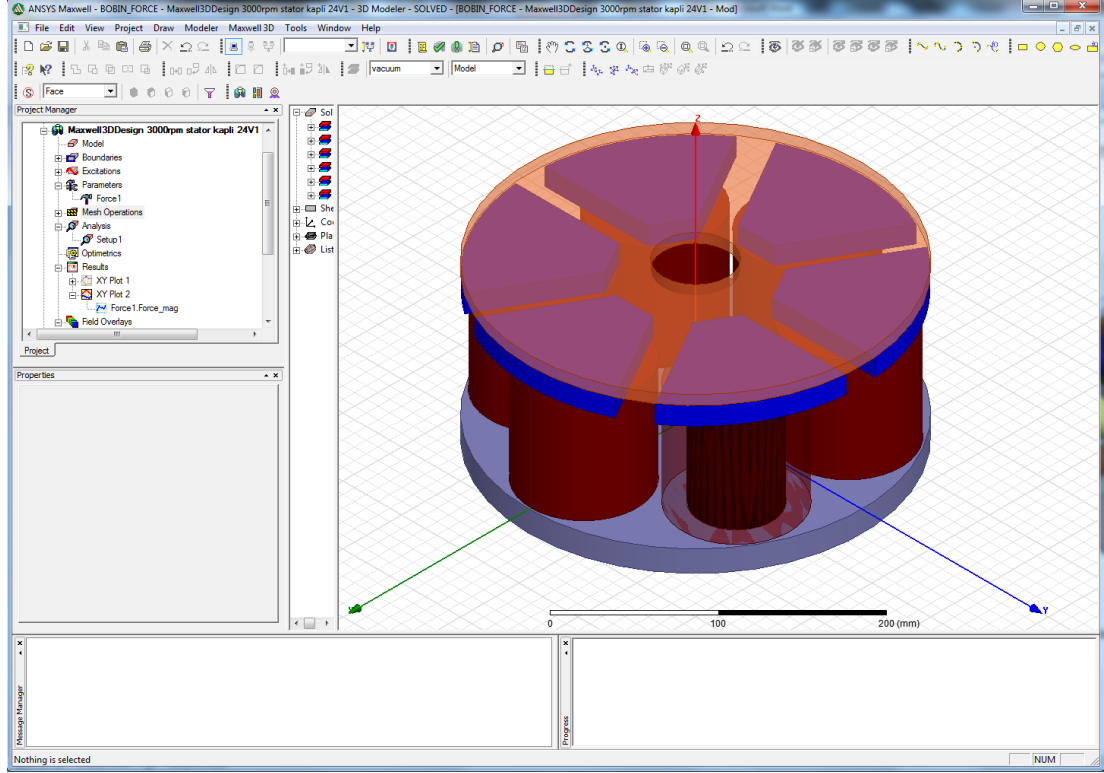
2.1.1. Katı model tasarımı

EMR' in mekanik tasarımı 3 boyutlu bir tasarım yazılımı olan Solidworks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarım doğrultusunda EMR' in imalatı yerli bir firmaya yaptırılmıştır.

EMR modeli üzerinde gerçekleştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar metodu (3D FEM) analiz çalışmaları, Solidworks yazılımı altında çalışan Solidworks Simulation modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modül yardımıyla, rotor diski üzerinde manyetik çekim kuvveti etkisiyle oluşan deformasyonlar incelenmiştir.

2.1.2. Elektromanyetik sonlu elemanlar analizi

EMR' e ait 3 boyutlu elektromanyetik sonlu elemanlar metodu analiz çalışmaları Maxwell elektromanyetik analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan EMR' in katı modeli Maxwell altında oluşturulmuş ve model üzerinde frenleme torku değerlerinin tespiti, kutup başı profillerinin frenleme torkuna etkisi ve rotor üzerine gelen elektromanyetik kuvvetlerin tespiti için çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1' de Maxwell yazılım ara yüzü ve EMR' in modeli görülmektedir.



Şekil 2.1. Maxwell yazılım ortamında EMR tasarımı

Yapılan simülasyonlarda bobin malzemesi alüminyum olarak seçilmiştir. Bunun dışında modeli oluşturan diğer elemanların için malzeme steel-1020 olarak tanımlanmıştır. Bobinler "strandend conductor" olarak oluşturulmuş, sarım sayısı 331 ve uyarım akımı 16 A olarak belirlenmiştir. Bobinler ile çekirdekler arasında yalıtım sınır şartı tanımlanmıştır.

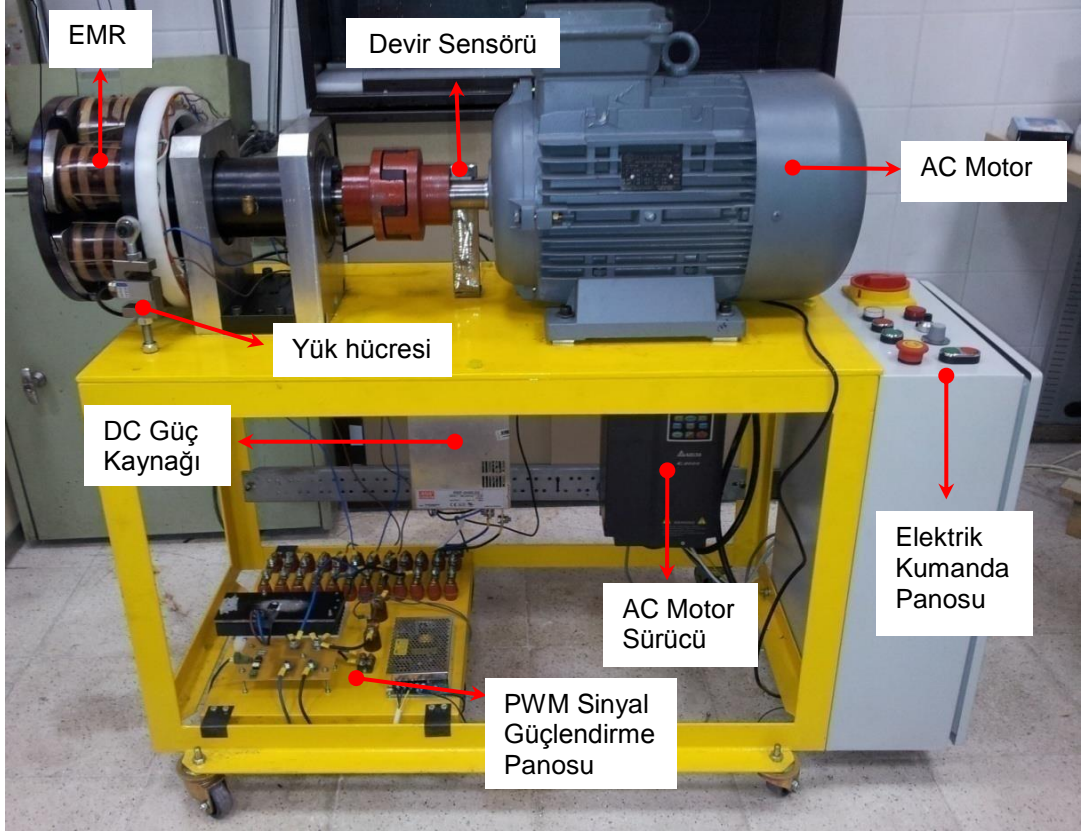
EMR modelinde bölgesel olarak farklı ağ yapısı yoğunlukları kullanılmıştır. Frenleme etkisini oluşturan eddy akımları özellikle rotor bölgesinde oluşmaktadır ve bunların tespit edilebilmesi için hassas bir ağ yapısının oluşturulması gereklidir. Bu nedenle, ağ yapısının yoğunluğu rotor bölgesinde yoğunlaştırılmıştır. Modelin ağ yapısı toplam 389336 elemandan oluşmaktadır. Bu ağ yapısının 316998 elemanı rotor üzerinde bulunmaktadır.

2.2. Deneysel Çalışma

2.2.1. Deney donanımı

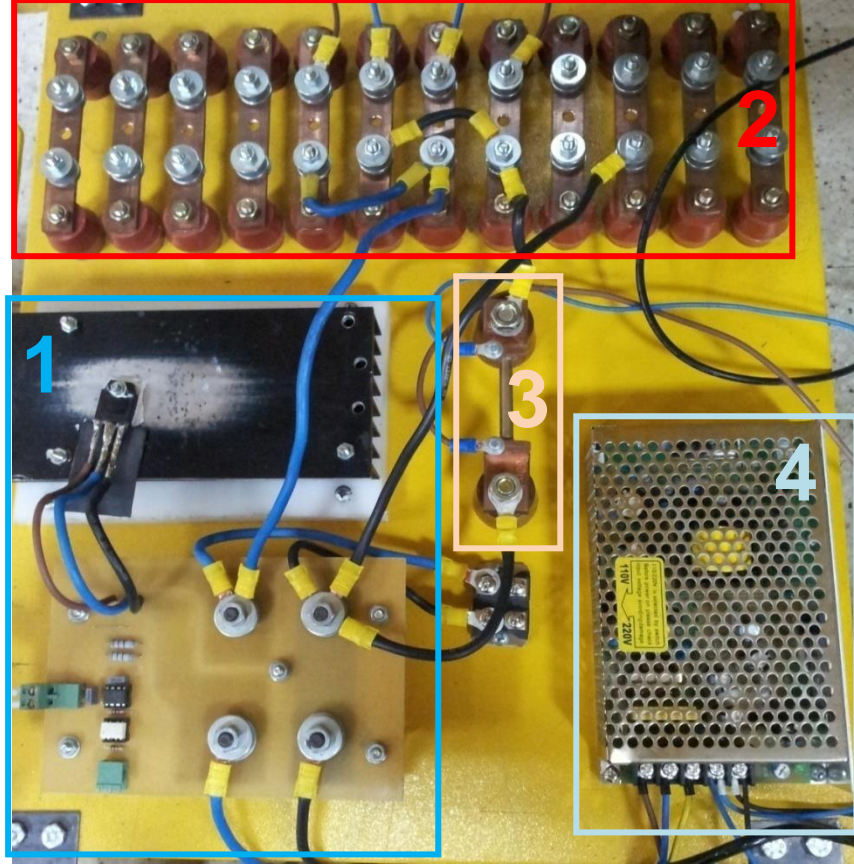
EMR üzerinde çeşitli deneylerin gerçekleştirilmesi için Şekil 2.2' de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Deney seti, genel olarak bir karkas üzerine oturtulmuş EMR, tahrik motoru, tork ölçümlerinde kullanılan bir yük hücresi, EMR' in frenlemesi için

gerekli akımı sağlayan güç kaynağı, elektronik sinyal güçlendirme panosu ve elektrik kumanda panosundan oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Deney düzeneği

Elektrik kumanda ve hız kontrol panosu üzerinden sistemin ana enerjisinin sağlanması, motorun devreye alınması ve durdurulması yanında AC motor devrinin hassas olarak ayarlanması gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Bunlarla beraber yük hücresinden alınan sinyallerin güçlendirilmesi için kullanılan sinyal kuvvetlendirici ve verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için kullanılan NI-USB 6008 model veri toplama kartı yine bu pano içerisinde yer almaktadır.



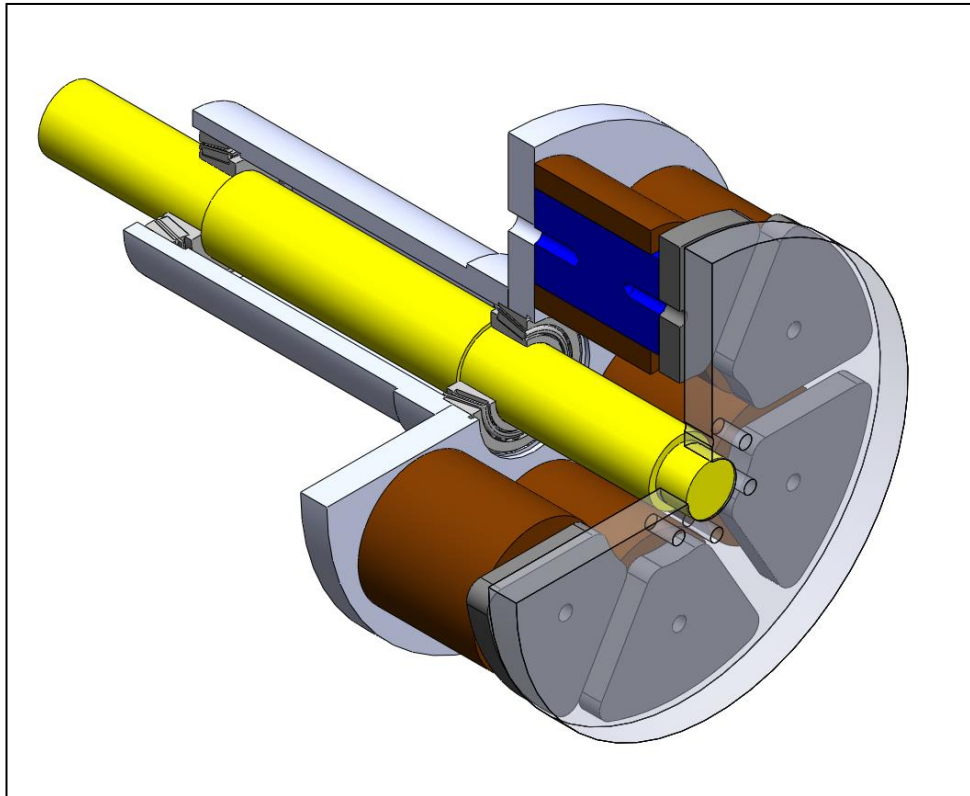
Şekil 2.3. Sinyal güçlendirme panosu

Şekil 2.3' de retarderin frenleme torkunu ayarlamak için Mikrodenetleyici tarafından üretilen sinyalin güçlendirildiği pano görülmektedir. Şekil üzerinde "1" numaralı bölgede tasarlanan sinyal güçlendirme kartı görülmektedir. Bu elektronik devre yardımıyla TTL seviyeli PWM sinyalini güçlendirilerek sinyalin 0-24 Vdc seviyesine yükseltilmektedir. Ayrıca elektronik kart üzerinden; retarderin çalışma esnasında ihtiyaç duyabileceği; 75 A' e kadar doğru akım tedarik edilebilmektedir. Pano üzerinde "2" numaralı bölgede retarder üzerindeki bobinlerin seri, paralel ya da seri - paralel gruplar halinde bağlanmasına olanak sağlayan bağlantı terminalleri görülmektedir. "3" numaralı bölgede deney esnasında retarderin çektiği anlık akım değerlerini ölçmek için kullanılan akım sensörü görülmektedir. "4" numaralı bölge ise sinyal güçlendirici elektronik karta ait güç kaynağıdır.

2.2.1.1. Elektromanyetik retarder tasarımı

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 6 bobinli bir EMR tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan EMR' in rotor diski, rotor mili, kutup başları ve çekirdek malzemesi olarak St42 kullanılmıştır. Bobinlerde kullanılan telin malzemesi olarak alüminyum seçilmiştir. Katı modelin oluşturulması Solidworks 3 boyutlu tasarım programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

EMR, rotor ve kutup başlarının montajında kolaylık sağlanması için tek taraftan yataklı ve tek rotorlu bir yapıda oluşturulmuştur. Stator, çekirdekler ve bobinlerden oluşan grup, statorun arka yüzeyinden boru profilli bir mile sabitlenmiştir. Bu milin iç tarafından, iki uçta rulmanlar yardımıyla yataklanmış rotor mili geçmektedir. Rotor milinin bobinler tarafındaki ucuna bir flanş yardımıyla rotor bağlanmaktadır. Diğer ucu ise kaplin yardımıyla motora bağlanmaktadır. Şekil 2.4' te tasarlanan EMR' in üç boyutlu katı modeli görülmektedir.

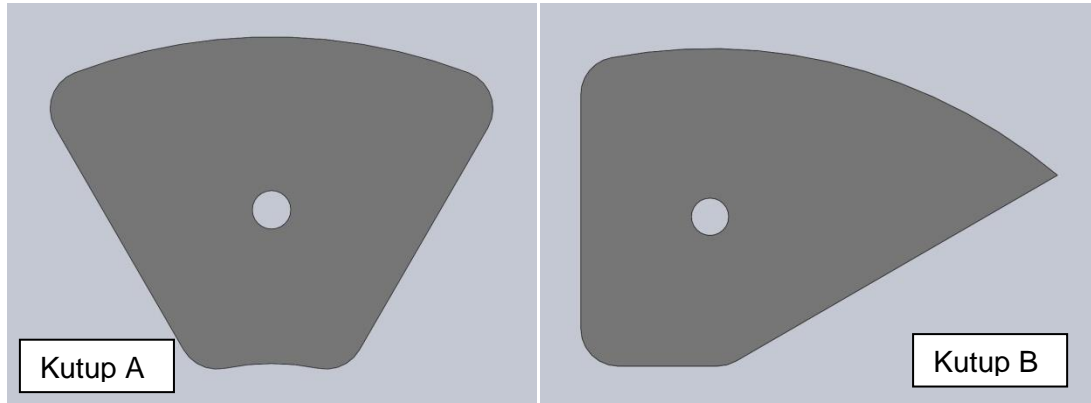


Şekil 2.4. EMR tasarımı 3 boyutlu katı modeli

2.2.1.2. Kutupbaşı yapıları

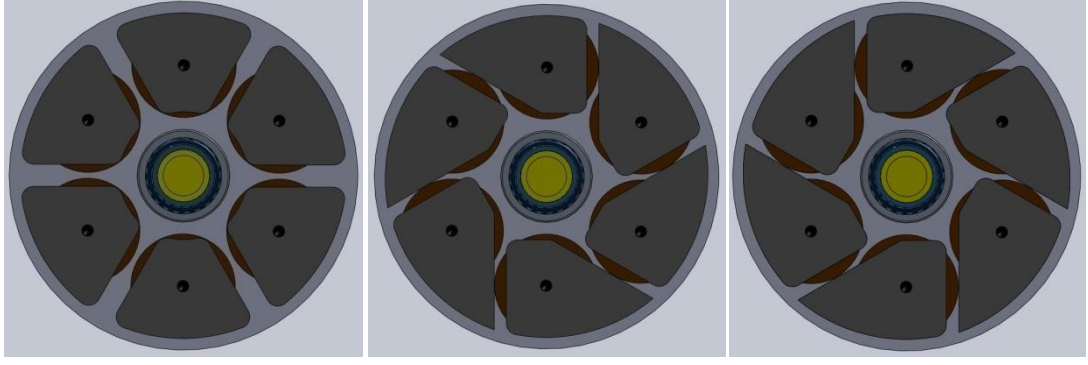
Kutup başı profillerinin frenleme performansına etkisinin incelenmesi amacıyla iki farklı tipte kutup başı profilinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kutup başı profillerinin etkinliklerini incelemek için Maxwell ortamında elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiş ve frenleme performansları incelenmiştir. İmal edilen kutup başları deney düzeneği üzerinde denenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Simülasyonlarda ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, biri simetrik yapıda diğeri asimetrik yapıda iki farklı tip kutup başı profili tasarlanmıştır. Şekil 2.5' de tasarlanan kutup başı profilleri görülmektedir. Her bir kutup başı tipi için 0 - 3000 dev/dk hız aralığında 500 dev/dk'lık kademelerle simülasyon ve deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Kutup başı profilleri

Yapılan çalışmalarda, simetrik kutup başı profili ile asimetrik kutup başı profili kullanılan EMR' in ürettiği frenleme torku değerlerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte asimetrik kutup başı rotorun dönüş yönüne göre iki ayrı şekilde yerleştirilmiş ve iki farklı yerleşimin frenleme torkuna etkileri incelenmiştir. Simetrik ve asimetrik kutup başı profillerinin yüzey alanları sırasıyla 6998,08 mm² ve 7520,15 mm² olarak ölçülmüştür. Şekil 2.6' da kutup başı profillerinin EMR üzerindeki yerleşimi ve Şekil 2.7' de deney seti üzerinde yerleşimleri görülmektedir.



Şekil 2.6. Kutup başı profillerinin EMR modeli üzerinde yerleşimi



Şekil 2.7. Kutup başı profillerinin deney seti üzerinde yerleşimi

2.2.1.3. AC motorlu deney düzeneği

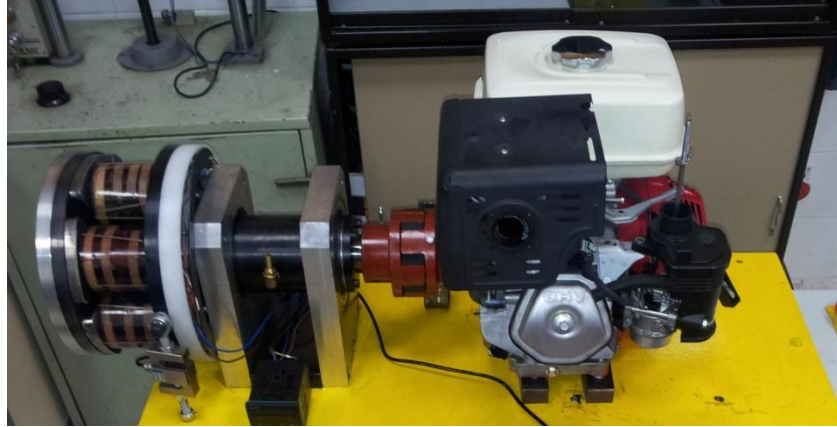
Retarderin frenleme torku değerlerinin ölçümü, frenleme karakteristiğinin belirlenmesi, kutup başı profillerinin frenleme torkuna etkilerinin incelenmesi ve disk kalınlığının indirgenmesi çalışmalarında kontrollü tahrik uygulanması sağlamak amacıyla 11kW gücünde AC elektrik motoru kullanılmıştır. Elektrik motoru, deney seti üzerinde bulunan, AC motor hız kontrol cihazı yardımıyla kontrol edilmiştir. Böylece AC motorun devir sayısının hassas olarak ayarlanması sağlanmış ve çeşitli devir aralıklarında EMR' in ürettiği frenleme torku değerleri ölçümü gerçekleştirilebilmiştir. Şekil 2.8' de elektrik motorunun deney seti üzerinde yerleşimi görülmektedir.



Şekil 2.8. Elektrik motorunun deney seti üzerinde yerleşimi

2.2.1.4. İçten yanmalı motorlu deney düzeneği

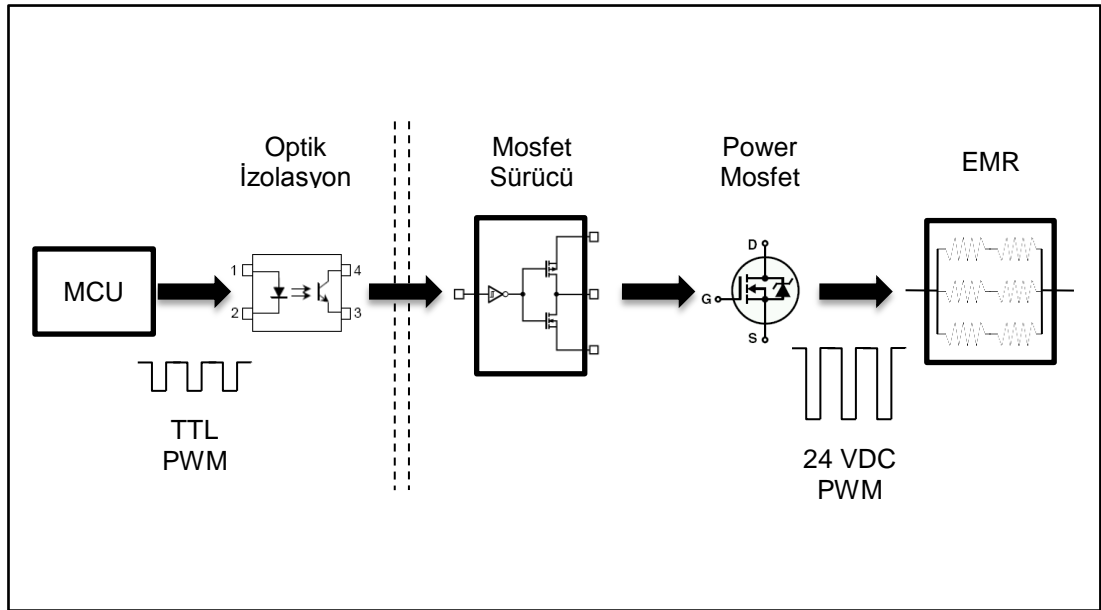
AC motor ve sürücü takımı kendi içerisinde bir kontrol mekanizmasına sahiptir. Sürücü, üzerinde ayarlanan devir değerine göre motor akımını artırarak motorun istenilen devirde dönmesini sağlamaktadır. EMR ile frenleme yapıldığı takdirde, sürücü motor devrinin düşmesiyle motor akımını artırarak devir sayısını ayar değerinde sabit tutmaya çalışmakta ve motor devri EMR kullanılarak ayarlanamamaktadır. Bu nedenle EMR yardımıyla taşıtı hızı kontrol uygulamasında Honda marka, GX390 model, benzinli bir içten yanmalı motor kullanılmıştır. Motorun üretebildiği maksimum tork 26.4 Nm ve maksimum güç 8.7 kW' tır. Şekil 2.9' da benzinli motorun deney seti üzerindeki yerleşimi görülmektedir.



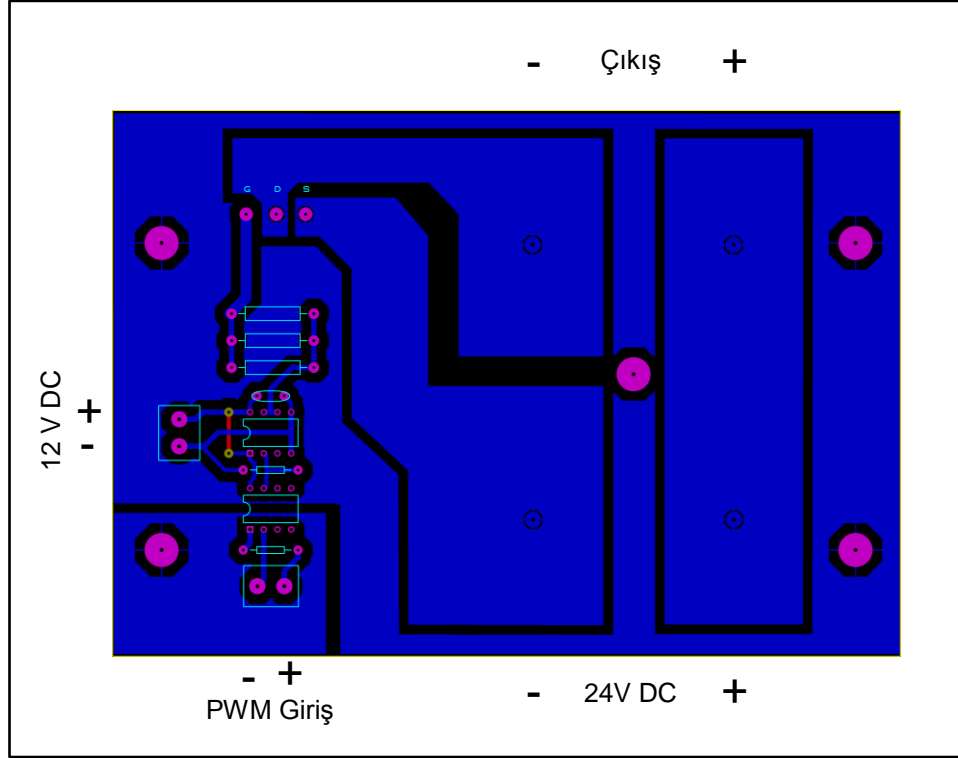
Şekil 2.9. Benzinli motorunun deney seti üzerinde yerleşimi

2.2.1.5. EMR sürücü kartı

EMR yapısı itibari ile bir doğru akım elektrik makinasıdır. Frenleme miktarı bobinlerinden geçen akım miktarı ile doğrudan bağlantılıdır. Bobinlerden akan akımın ayarlanması ile frenleme miktarı kontrol edilebilir. Bunun sağlanması için iki yöntem düşünülebilir. Temel Ohm kanununa göre, akımın değerinin değişmesi için, sabit gerilimde altında direnç değerinin değiştirilmesi ya da sabit direnç koşulunda gerilimin değiştirilmesi gereklidir. Bu çalışmada, bobinlerin toplam direnci sabit olduğu için gerilimin değiştirilmesi yöntemi kullanılmıştır. Gerilimin değiştirilmesi PWM metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, PWM sinyali mikrodenetleyici yardımıyla oluşturulmuştur. Ancak, mikrodenetleyici tarafından oluşturulan PWM sinyali TTL seviyesinde ve çok küçük akım değerlerinde olduğu için EMR' i çalıştıracak yeterlilikte değildir. Bu nedenle, TTL seviyeli PWM sinyalini yükselterek 24 VDC seviyesinde yüksek akımlı bir sinyal oluşturacak EMR sürücü devresi oluşturulmuştur.



Şekil 2.10. EMR sürücü devre blok diyagramı



Şekil 2.11. EMR sürücü devre baskı devresi

Şekil 2.10' da EMR sürücü devresinin blok diyagramı ve Şekil 2.11' de baskı devre tasarımı gösterilmektedir. Mikrodenetleyici tarafından oluşturulan PWM sinyali optik olarak izole edilerek bir mosfet sürücü entegresine aktarılmaktadır. Mosfet sürücü entegre yüksek güçlü bir mosfeti tetikleyerek 24V dc seviyesinde yüksek akım sağlayabilen PWM sinyaline dönüştürmekte ve EMR' in bobinlerini enerjilemektedir.

2.2.1.6. Mikrodenetleyiciler

Deneyler esnasında frenleme miktarının ayarlanması ve devir ölçüm işlemlerinin gerçekleştirilmesi için Microchip firmasına ait iki farklı tip mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyiciler, çeşitli donanımlarına ulaşmak, yazılım geliştirme aşamasını hızlandırmak ve hata analizleri kolaylaştırmak için Mikroelektronika firmasına ait iki farklı anakart üzerinde kullanılarak yazılım geliştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyler esnasında devir ölçümü ve bilgisayar ortamına aktarılması için PIC18F4431 serisi mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Özellikle motor kontrol uygulamalarına yönelik olarak tasarlanmış olan mikrodenetleyici, hareket geri besleme birimi (artımsal kodlayıcı arayüzü), PWM çıkış birimi ve seri haberleşme birimi gibi temel donanımları bulunmaktadır. Temelde 8 bitlik bir mimariye sahip olan

denetleyici hız ve pozisyon ölçümü uygulamaları için 16 bitlik sayıcılara sahiptir [36]. Bununla beraber PWM donanımı 8 bitlik bir çözünürlükte sinyal üretimine olanak sağladığı için PWM sinyali üretiminde farklı bir mikrodenetleyici kullanılmıştır.

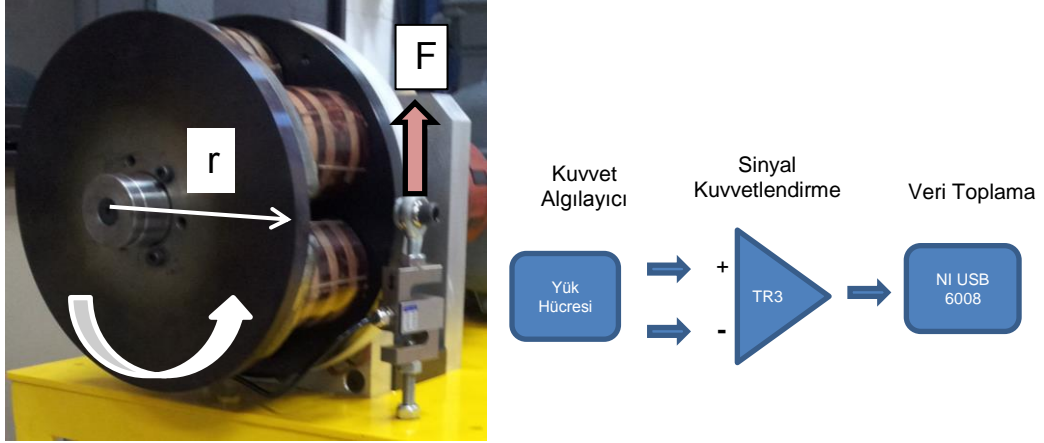
PIC18f4431 mikrodenetleyicisi üzerinden devir ölçümünde, denetleyici donanımlarına ulaşmak için EasyPIC 6 yazılım geliştirme ana kartı kullanılmıştır. EasyPIC 6 ana kartı Microchip firmasının PIC16 ve PIC18 serisi mikrodenetleyicilerine yönelik olarak tasarlanmış bir yazılım geliştirme platformudur [37]. Üzerinde bulundurduğu, seri haberleşme, grafik gösterge ve denetleyicinin giriş/çıkış pin durumlarının izlenebildiği ve yönetilebildiği ışıklı gösterge donanımları ile PIC tabanlı mikrodenetleyiciler için yazılım geliştirmeyi hızlandıran bir donanımdır.

PWM sinyal üretimi dsPIC30F6014A model numaralı bir mikrodenetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. dsPIC30F6014A, sayısal sinyal işleme ve kontrol kabiliyetlerinin yanında 16 bit PWM donanımı ve çok sayıda seri - paralel haberleşme (SPI, I2C, USART, CAN) birimlerini içinde barındıran genel amaçlı bir mikrodenetleyicidir [38]. Bu bağlamda yüksek çözünürlüklü PWM sinyali üretiminde ve bilgisayar tarafından gönderilen komutların hızlı bir şekilde işlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabilir.

dsPIC33F6014A mikrodenetleyicisi, UNI-DS6 model yazılım geliştirme ana kartı [39] üzerinde programlanmış ve deneyler esnasında PWM sinyal üretimi yine bu ana kart yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

2.2.1.7. Tork ölçümü

EMR üzerinden frenleme torku ölçümü stator ile deney seti gövdesi arasına yerleştirilmiş, SBA200 model, "S tipi" bir yük hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük hücresinin ürettiği elektriksel sinyaller TR3 model bir sinyal kuvvetlendirici kullanılarak yükseltilmiş ve veri toplama kartı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 2.12' de Frenleme torku ölçüm sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Frenleme torku ölçüm sistemi

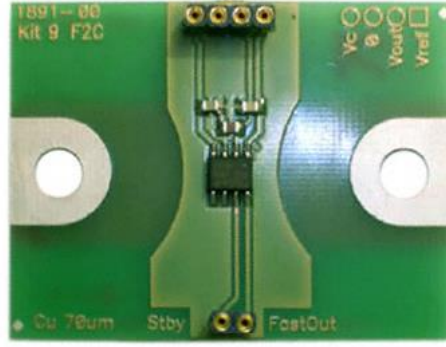
Yük hücresinin bir ucu, EMR' in merkezinden belirli bir mesafede, deney seti gövdesi üzerine dik olarak sabitlenmiştir. Diğer ucu EMR' in yatay eksenine hizasında olacak şekilde stator üzerine sabitlenmiştir. Rotor grubundan ayrı olarak yataklanmış stator, EMR' in frenlemesi esnasında dönmeye zorlanmaktadır. Böylece, frenleme torku nedeniyle oluşan ve statoru döndürmeye çalışan dik kuvvet sabit uzaklıktaki yük hücresinin üzerine aktarılmaktadır. Bu kuvvet, sinyal kuvvetlendirici ve veri toplama kartı üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmakta ve frenleme torkunun ölçümü için gerekli hesaplamalar yapılmaktadır.

2.2.1.8. Devir ölçümü

Deney seti üzerinde devir ölçümü IME12-04BPSZW2S model endüktif yaklaşım sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sensör, motor shaftı üzerindeki kapline yakın bir bölgeye yerleştirilmiştir. Motorun her bir dönüşü için sensör 12V dc seviyesinde bir darbe sinyali oluşturmaktadır. Darbe sinyali, mikrodenetleyicinin TTL seviyeli girişi için yüksek olması nedeniyle, tasarımı gerçekleştirilen optik izolasyonlu bir sinyal dönüştürücü devre üzerinden geçirilerek TTL seviyesine indirilmektedir.

2.2.1.9. Akım ölçümü

Deneyler esnasında EMR bobinleri üzerinden geçen toplam akım miktarının ölçümü için, "Hall etkisi" ile ölçüm yapan, FSH40-P/600S model numaralı bir akım sensörü kullanılmıştır. Sensör, Şekil 2.13' de gösterilen FHS 40-P Kit9 model numaralı akım ölçüm kiti kullanılarak deney seti üzerine yerleştirilmiştir. Sensör kiti ile ± 78 A dc aralığında akım ölçüm yapılabilmektedir.



Şekil 2.13. Akım ölçümü sensör kiti

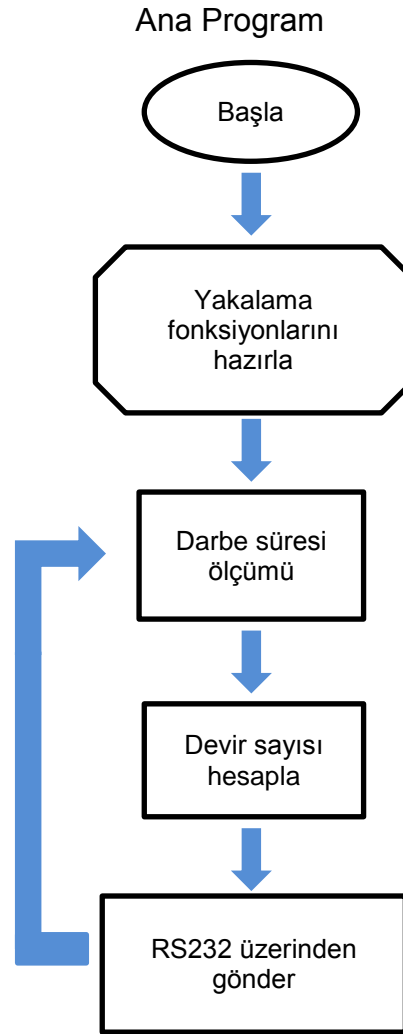
Sensör kiti, retarder bobinlerini besleyen ana kabloya seri olarak bağlanmıştır. Bobinler üzerinden geçen akım aynı anda sensörün bağlandığı baskı devre üzerinden de geçmektedir. Baskı devrenin bakır yolları üzerinde, akım şiddetine oranla oluşan manyetik alan şiddeti sensör tarafından algılanmakta ve bu manyetik alan şiddetine oranla, sensör tarafından, 0 - 5 Vdc aralığında ölçeklenmiş bir sinyal çıkışı oluşturulmaktadır.

2.2.2. Mikrodenetleyici yazılımları

Mikrodenetleyici yazılımları CCS-PIC-C derleyicisi kullanılarak C programlama dilinde geliştirilmiştir [40]. Donanımda kullanılan her iki mikrodenetleyici de bilgisayar yazılımları ile bilgi ve komut alışverişini RS232 haberleşme protokolünü kullanarak gerçekleştirmektedir. Haberleşme hızı olarak 115200 kbaud seçilmiştir.

2.2.2.1. Devir ölçümü yazılımı

Devir ölçümünde PIC18F4431 mikrodenetleyicisinin CCP (Capture - Compare) birimi kullanılmıştır. Şekil 2.14' te devir ölçümü yazılımının akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.14. Devir ölçümü için mikrodnetleyici yazılımı akış diyagramı

Devir ölçümü, darbe frekansı ölçüm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, algılayıcı tarafında oluşan sinyalin frekansı ölçülmekte ve bu frekans üzerinden sistemin devir sayısı hesaplanmaktadır. Mikrodnetleyici, sinyalin iki yükselen veya düşen kenarı arasında geçen süreyi ölçmek suretiyle devir sayısı hesaplama işlemini gerçekleştirir. İki darbe arasında geçen süreden Denklem (2.1) kullanılarak darbe frekansı elde edilmektedir. Darbe frekans değeri Denklem (2.2)' de yerine koyularak devir sayısı hesaplanmaktadır.

$$F_{\text{puls}} = \frac{1}{T_{\text{puls}}} \quad (2.1)$$

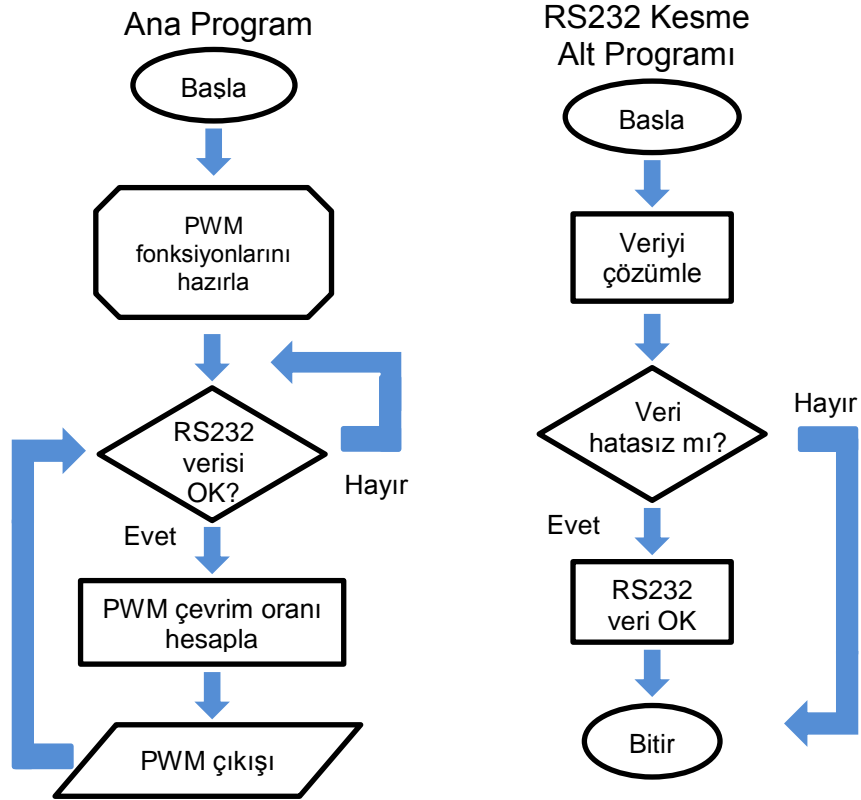
$$\text{RPM} = F_{\text{puls}} \times \frac{60}{\text{Enc.Res.}} \quad (2.2)$$

Denklem (2.1)' de T_{puls} saniye olarak iki darbe arasındaki süreyi ve Denklem (2.2)'de F_{puls} darbe frekansını, RPM, devir/dakika olarak devir sayısını ve Enc.Res. de darbe/devir olarak, algılayıcı tipine göre kodlayıcı çözünürlüğü veya bölüntülü diskteki bölüntü sayısını ifade etmektedir.

Yazılım, denetleyicinin CCP donanımının hazırlanmasından sonra sensörden gelen ilk sinyalin yükselen kenarı ile zamanlayıcı değerini sıfırlar. İkinci sinyalin yükselen kenarı zamanlayıcı değeri bir değişken içerisine atılarak T_{puls} hesaplanır. Ardından, Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) kullanılarak devir sayısı hesaplanma işlemi gerçekleştirilir. Hesaplanan RPM değeri RS232 veri yolu üzerinden bilgisayar yazılımına gönderilir.

2.2.2.2. PWM sinyali üretim yazılımı

PWM sinyali üretimi dsPIC30F6014A mikrodenetleyicisinin PWM birimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan PWM sinyalinin frekansı 1,5 kHz' dir ve sinyal darbe genişliği %0 - %100 çevrim oranı aralığında 8000 kademede ayarlanabilmektedir. Şekil 2.15' de PWM sinyal üretimi yazılımının akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.15. PWM sinyal üretim yazılımı akış diyagramı

2.2.3. Bilgisayar tarafı veri toplama ve kontrol yazılımları

Bilgisayar tarafında, deney seti üzerinden frenleme torku, devir, akım gibi bilgilerin toplanması ve kaydedilmesi, EMR frenleme miktarının ayarlanarak elde edilen veriler ile EMR' in frenleme karakteristiğinin tayin edilmesi ile birlikte EMR' in kapalı çevrim kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesi için iki farklı yazılım tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan yazılımlar LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) grafiksel programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. LabVIEW, veri toplama, sinyal işleme, otomasyon ve kontrol gibi endüstriyel ve akademik çalışmalarda yoğun olarak kullanılan bir programlama dilidir. Grafiksel bir programlama dili olması nedeniyle tasarlanan yazılım algoritmalarının kolaylıkla gerçek yazılımlara dönüştürülebilmesine olanak sağlamaktadır. Yazılım kodları grafiksel ikonların birbirine bağlanması ile oluşturulmaktadır. İçinde barındırdığı standart araçlar yardımı ile yazılımların görsel ara yüz tasarımlarının metin tabanlı programlama dillerine oranla çok daha hızlı bir şekilde tasarlanmasına olanak sağlamaktadır.

2.2.3.1. PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımı

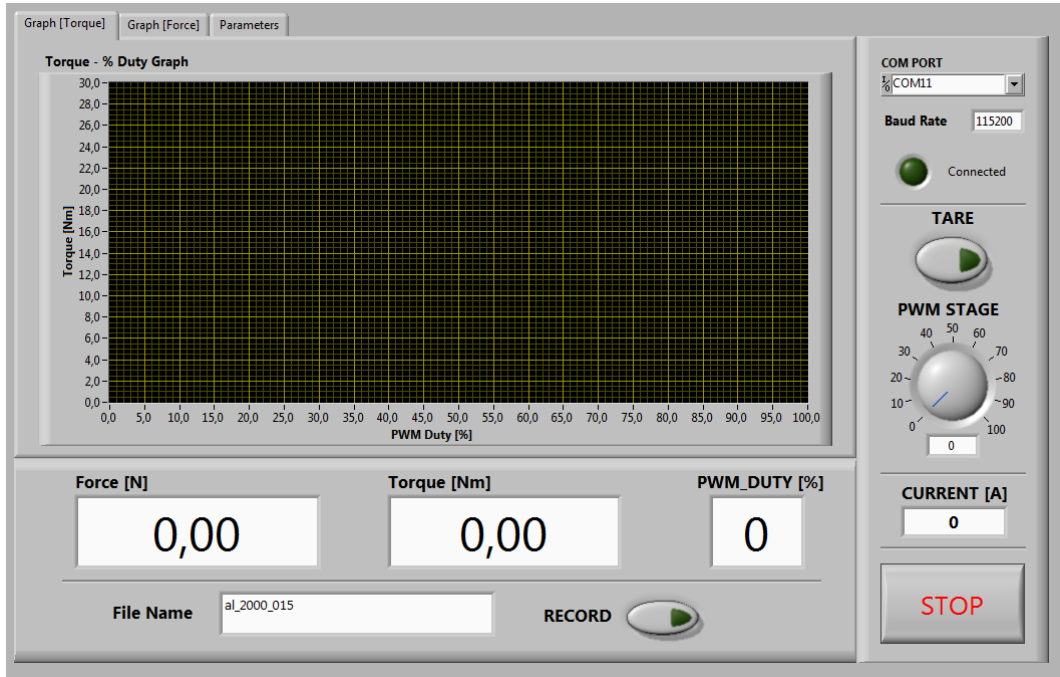
EMR' in PWM yöntemi ile kontrolü ve EMR' in frenleme karakteristiğinin tayini amacıyla, Şekil 2.16' da arayüzü gösterilen, PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yazılım, RS232 veriyolu üzerinden ilgili mikrodenetleyiciye komutlar göndererek PWM sinyalinin % darbe genişliğinin ayarlanmasını sağlamaktadır.

Yazılım, PWM sinyalinin darbe genişliğinin ayarlanması yanında frenleme esnasında retarder üzerinden frenleme torku, yük hücresi üzerinde oluşan kuvvet ve bobinler üzerinden geçen toplam akım miktarı verilerinin de gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak sağlamaktadır. Deneyler esnasında %0 - %100 PWM çevrim oranı aralığında EMR' in oluşturduğu frenleme torku ve frenleme kuvveti grafiklerini gerçek zamanlı olarak gösterebilme kabiliyetindedir. Bununla birlikte, deneylerden elde edilen veriler bir metin dosyasına anlık olarak kaydedilebilmektedir.

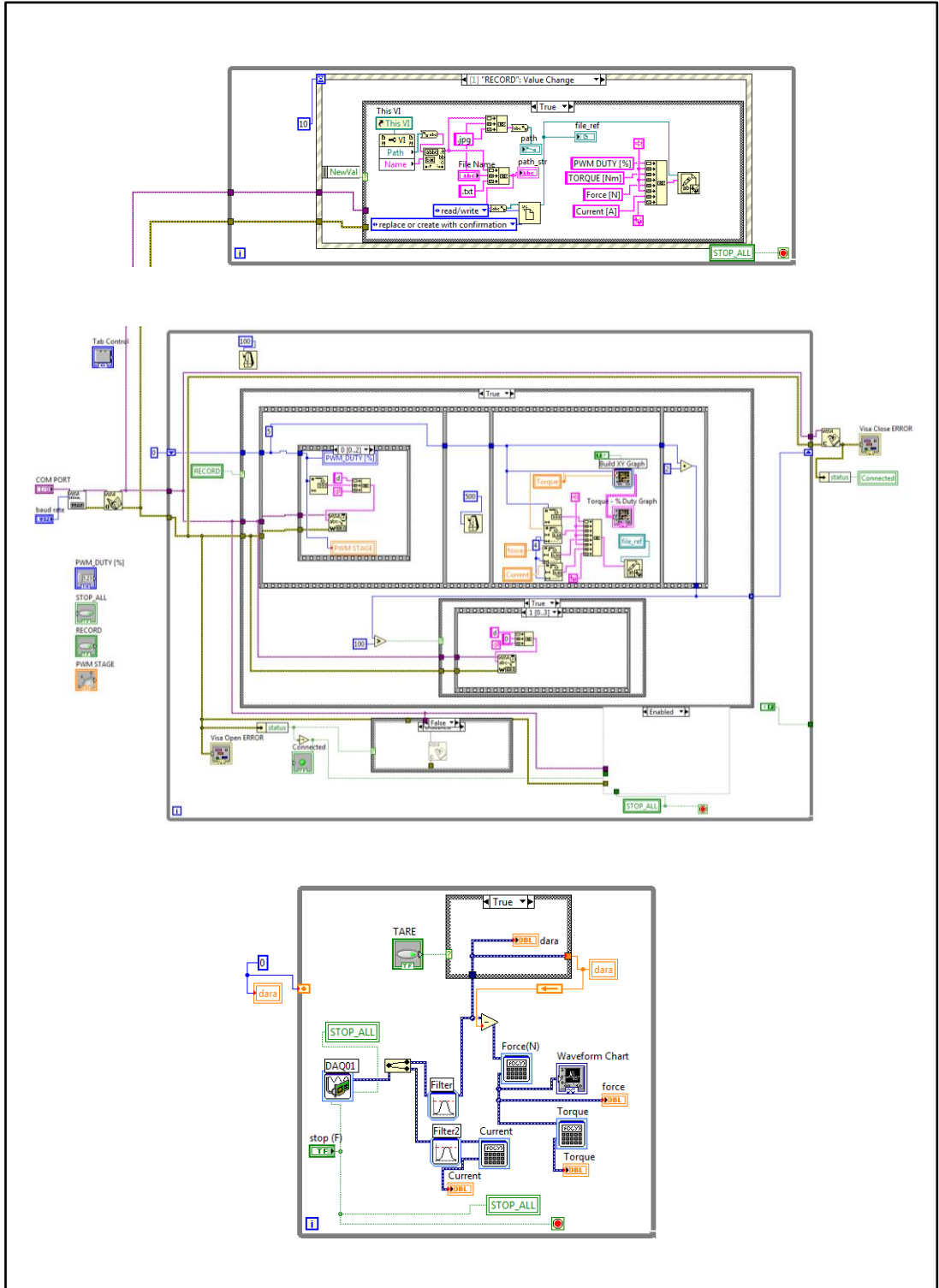
EMR' in frenleme miktarı, yazılım üzerindeki PWM ayar potansiyometresi ile manüel olarak ayarlanabilmektedir. Diğer taraftan, deneyler esnasında yüzdesel PWM çevrim oranı, %0 ile %100 arasında, %2' lik kademe artışlarıyla otomatik olarak

artırılmaktadır. Her bir kademe için tork, kuvvet ve akım değerleri kaydedilmekte ve grafikler üzerinde gösterilmektedir.

Şekil 2.17' de PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımının grafiksel kaynak kodları görülmektedir. Yazılım ana döngü, veri toplama döngüsü ve veri kayıt döngüsü olmak üzere eş zamanlı çalışan üç ayrı döngüden meydana gelmektedir. Ana döngü yüzdesel PWM çevrim oranının manüel veya otomatik olarak kontrol edilmesi, gerekli komutların RS232 veriyolu üzerinden mikrodenetleyiciye gönderilmesi işlemlerinin gerçekleştirildiği bölümdür. Veri toplama döngüsü, deney seti üzerinde oluşan frenleme torku, frenleme kuvveti ve bobin akımı değerlerinin USB veri toplama kartı aracılığı ile yazılım içerisine gerçek zamanlı olarak alındığı ve grafiksel arayüzde gösterildiği döngüdür. Veri kayıt döngüsü, deney esnasında veri kayıt döngüsü ile toplanan verilerin düzenlenerek belirtilen dosya ismi ile metin dosyası içerisine kaydedildiği döngüdür.



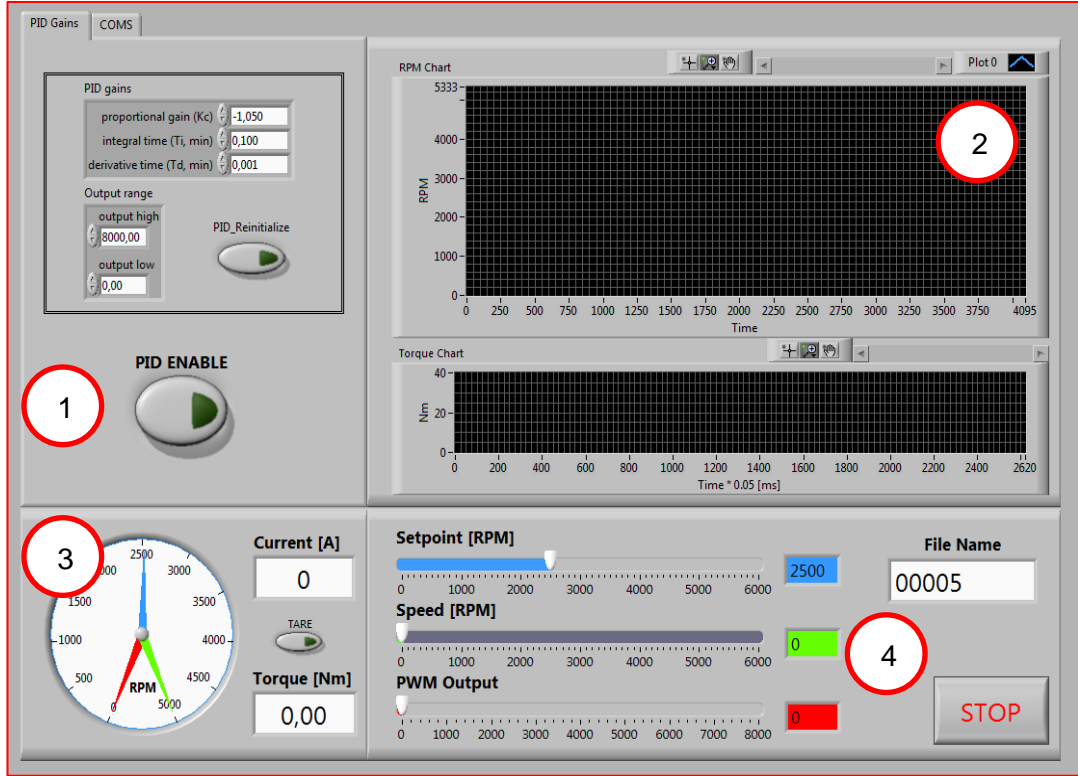
Şekil 2.16. PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımı arayüzü



Şekil 2.17. PWM yöntemi ile EMR kontrol yazılımı grafiksel kaynak kodları

2.2.3.2. Kapalı çevrim PID kontrol yazılımı

EMR' in frenleme torkunun PWM sinyali ile kontrol edilebilme kabiliyetini kullanarak, taşıt hızını belirlenen ayar değerinde tutmaya yönelik bir kapalı çevrim kontrol yazılımının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.18' de PID tabanlı EMR kontrol yazılımının arayüzü görülmektedir.



Şekil 2.18. PID tabanlı EMR kontrol yazılımı arayüzü

Şekil 2.18' de 1 numaralı bölgede PID katsayılarının ayarlanması, değişkenlerin başlangıç koşullarına döndürülmesi, PID çıkış aralığının sınırlandırılması ve kontrol algoritmasının devreye alınması işlemleri gerçekleştirilmektedir. 2 numaralı bölge, deneyler esnasında elde edilen verilerin grafiksel olarak çizdirildiği bölgedir. RPM grafiği üzerinde devir ayar noktası ve ayar noktasına göre PID kontrol sonucunda motorun devir sayısı gösterilmektedir. Tork grafiğinde ise kontrol esnasında EMR' in frenleme torkunda oluşan değişiklikler gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. 3 numaralı bölgede EMR toplam bobin akımı, frenleme torku değerleri sayısal olarak gösterilmekte ve ibrelili gösterge üzerinde devir ayar noktası değeri ile motor üzerinden okunan devir bilgisi ve PID kontrolör çıkış değeri gösterilmektedir. 4 numaralı bölge, devir ayar noktası değeri girişinin yapıldığı ve veri kayıt dosyasının isminin belirlendiği bölümdür.

Deney aşamaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Deneye başlamadan önce yazılım çalıştırılarak mikrodenetleyiciler ile bağlantı kurulur.
- Motor devri, motor üzerindeki gaz kolu yardımıyla maksimum devre çıkartılır ve yazılım üzerinden motor devri izlenir.
- 4 numaralı bölgede veri kayıt dosyası ismi ve devir ayar noktası değerinin girişi yapılır.
- 1 numaralı bölgede kontrol yazılımının oransal, türev ve integral kazanç değerleri ayarlandıktan sonra kontrolör çıkışı sınır değerleri belirlenir. "PID enable" butonu aracılığı ile kontrolör devreye alınır.
- Deney esnasında 2 ve 3 numaralı bölgeler üzerinden kapalı çevrim PID kontrolörün performansı grafiksel ve sayısal olarak gözlemlenir.
- Kontrolör devrede iken 4 numaralı bölgedeki devir ayar noktası değişkeninin değeri değiştirilerek kontrolörün farklı ayar noktasındaki performansı ve cevap karakteristiği gerçek zamanlı olarak izlenir ve kayıt edilir.

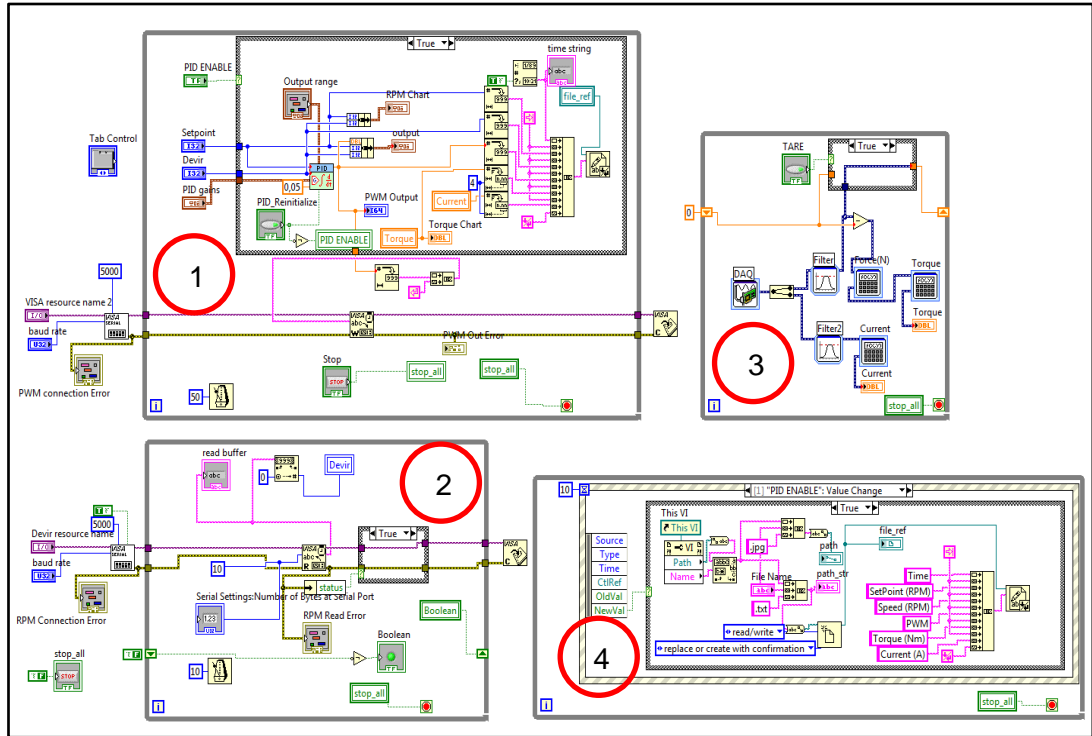
Şekil 2.19' da PID tabanlı EMR Kontrol yazılımının grafiksel kaynak kodları görülmektedir. Yazılım, bağımsız olarak çalışan 4 ayrı döngüden meydana gelmektedir.

1 numaralı döngü içerisinde devir ayar noktası değeri ve deney setinden okunan devir değerine göre PID kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte deney seti üzerinden okunan devir, frenleme torku, toplam bobin akımı, kontrolör çıkışı değeri, ayar noktası değeri ve zaman bilgileri veri kayıt dosyasına kaydedilmektedir. Döngü 50 ms' lik bir çevrim süresinde çalışmakta ve her çevrim sonunda hesaplanan PID kontrol fonksiyonu çıkış değeri RS232 veriyolu üzerinden PWM sinyali üreten mikrodenetleyiciye gönderilmektedir.

2 numaralı döngü içerisinde devir ölçümü işlemlerini gerçekleştiren mikrodenetleyici RS232 veriyolu ile bağlantı kurularak, motorun anlık devir bilgisi okunmaktadır. Döngü 10 ms' lik periyotlarla işletilmekte ve böylece devir bilgisi saniyede 100 kez yazılım içerisinde aktarılmaktadır. Devir bilgisi ölçüm periyodu, kontrol çevrimi periyodundan 5 kat daha hızlı olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece kontrol sinyali doğrultusunda sistemin cevabı hızlı bir şekilde okunmakta ve iki kontrol döngüsü arasında oluşan değişiklikler hassas bir şekilde ölçülebilmektedir.

3 numaralı döngü içerisinde deney seti üzerinden okunan frenleme torku ve toplam bobin akımı verileri yazılım içerisine aktarılmaktadır.

4 numaralı döngü PID kontrolörün devreye alınması, ayar noktası değerinin değiştirilmesi ve veri kaydı işlemlerinin başlatılması işlemlerinin gerçekleştirilmesi ile ilgili işlemlerin gerçekleştirildiği döngüdür.



Şekil 2.19. PID tabanlı EMR kontrol yazılımının grafiksel kaynak kodları

2.4. Deney Yöntemleri

2.4.1. EMR frenleme karakteristiği tayini

EMR' in frenleme karakteristiğinin tespiti için, öncelikle 500 dev/dk' dan başlayıp 500 dev/dk' lık artırımlarla 3000 dev/dk' ya kadar, her nokta için EMR' in maksimum frenleme torku değerleri ölçülmüş ve bu değerler ile frenleme karakteristik eğrisi türetilmiştir.

2.4.2. EMR' in kapalı çevrim PID yöntemi ile kontrolü

Taşıtın, uzun yokuş inişi esnasında, elektromanyetik retarder kullanılarak hızının sabitlenmesi ve bu amaçla geliştirilen sistemin etkinliğinin incelenmesi için çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Elektromanyetik retarderin kapalı çevrim frenlemedeki etkinliğini araştırmak için öncelikle sistemin adım cevabı incelenmiştir. Bu amaçla, sistem üzerindeki içten yamalı motorun gaz kolu belirli bir pozisyonda sabitlenerek, motorun 3750 dev/dk hızda çalışması sağlanmıştır. Motor 3750 devirde çalışırken, yazılım üzerinde kontrolör devreye alınmış ve ayar değeri, sırasıyla, 3000, 2500, 2000, 3000 ve 2000 dev/dk olarak değiştirilmiştir. Her devir sabitleme değeri için, retarderin, frenleme yaparak motor hızını belirlenen devirde sabitlemesi beklenmiş ve bir sonraki ayar değerine geçilmiştir. Deneyler esnasında, zaman, retarder frenleme torku, bobin akımı, PWM sinyal çıkışı ve motor devri bilgileri 50 ms aralıklarla kayıt edilmiştir. Bu veriler ışığında elektromanyetik retarderin kapalı çevrim PID kontrol ile frenleme performansı değerlendirilmiştir.

Diğer yandan, uzun yokuş inişleri esnasında yol eğiminin sürekli olarak sabit kalmayacağı göz önünde bulundurulmuş ve değişken yol eğimi karşısında retarderin kapalı çevrim frenleme esnasındaki davranışları incelenmiştir.

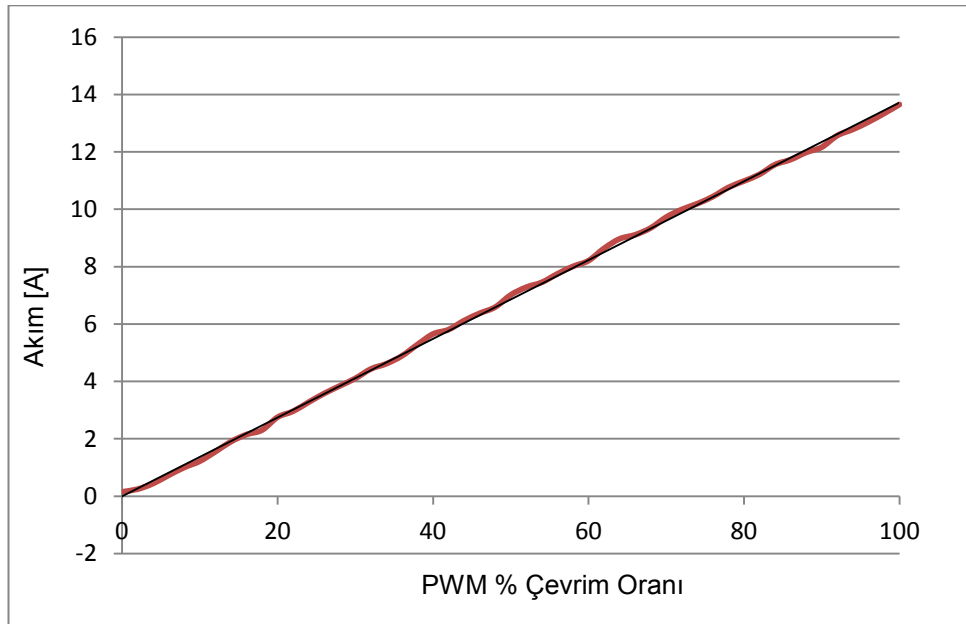
Deneyler esnasında yokuş eğim değişiminin simülasyonu için, öncelikle motor hızı, gaz kolu yardımıyla, 3400 dev/dk' ya sabitlenmiştir. Kontrol yazılımı üzerinden hız ayar değeri 3000 dev/dk olarak ayarlanmış ve kontrolör devreye alınmıştır. Motor hızı 3000 dev/dk' ya sabitlendiğinde gaz kolu pozisyonu yükseltip düşürölerek, farklı yol eğimleri için, yol eğiminin artması ve azalması durumlarının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu esnada motor devri, PWM sinyali çıkış değişimi, retarder frenleme torku ve bobin akımı bilgileri kaydedilmiştir. Bu bilgiler yardımıyla farklı yol eğimlerinde elektromanyetik retarderli hız sabitleme sisteminin etkinliği incelenmiştir.

3. BULGULAR

3.1. PWM Yöntemi ile EMR Frenleme Kontrolü

Deneysel çalışmalarda PWM yöntemi ile EMR' in frenleme kabiliyetini incelemek için öncelikle deney seti üzerinde PWM ile frenleme torku kontrolü yazılımı kullanılarak EMR' in PWM sinyaline göre frenleme torku değişimleri incelenmiştir.

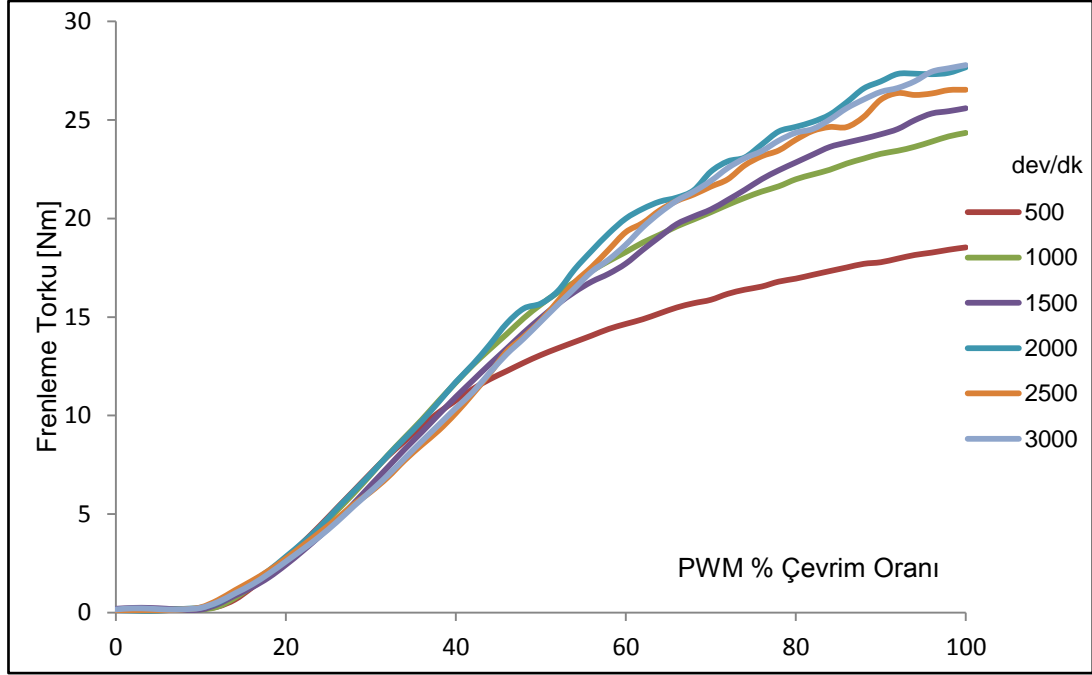
%0 PWM çevrim oranı bobin üzerinde herhangi bir gerilim olmadığını ifade etmektedir. Dolayısı ile bobin akımı 0 A' dir. %100 PWM çevrim oranı, kaynak gerilimi olan 24 Vdc anlamına gelmektedir. Dolayısı ile bobin akımı maksimum değerdedir. Şekil 3.1' de PWM % çevrim oranına göre bobin akımı ölçüm değerleri görülmektedir. Bobin akımı PWM çevrim oranına göre lineer olarak artmıştır.



Şekil 3.1. PWM % çevrim oranına göre bobin akımı ölçüm değerleri

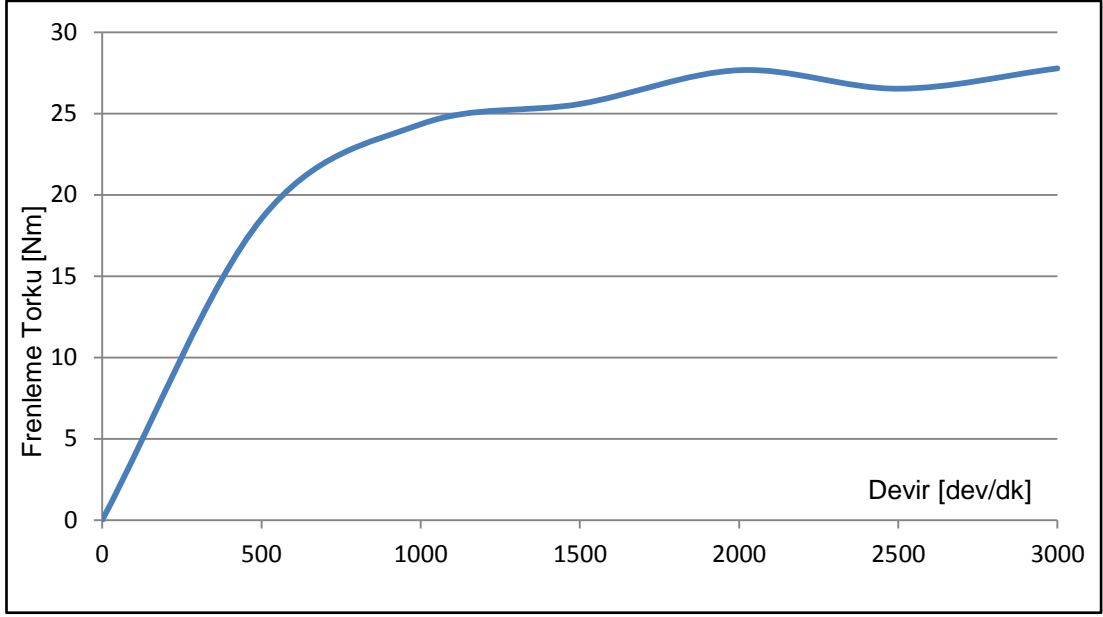
Yapılan deneylerde 500, 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 dev/dk değerleri için PWM % çevrim oranı %2' lik kademelerle artırılmış ve her artış durumunda frenleme torku değerleri kaydedilmiştir. Her devir kademesi için 15 ayrı deney gerçekleştirilmiş ve frenleme torku değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Şekil 3.2' de EMR' in PWM % çevrim oranına göre frenleme torku değişimi görülmektedir. Frenleme torku, PWM çevrim oranı %10' a yükselene kadar çok düşük bir

seviyededir. %10 - %40 PWM çevrim oranı aralığında lineer sayılabilecek bir artış göstermiştir. %40 - %100 aralığında ise üstel olarak artmıştır. Genel olarak, frenleme torku, her bir devir değeri için, %10 - %100 PWM çevrim oranı aralığında artış göstermiştir. PWM çevrim oranının %10 altında olması durumunda EMR' in etkin bir frenleme gerçekleştiremediği söylenebilir.



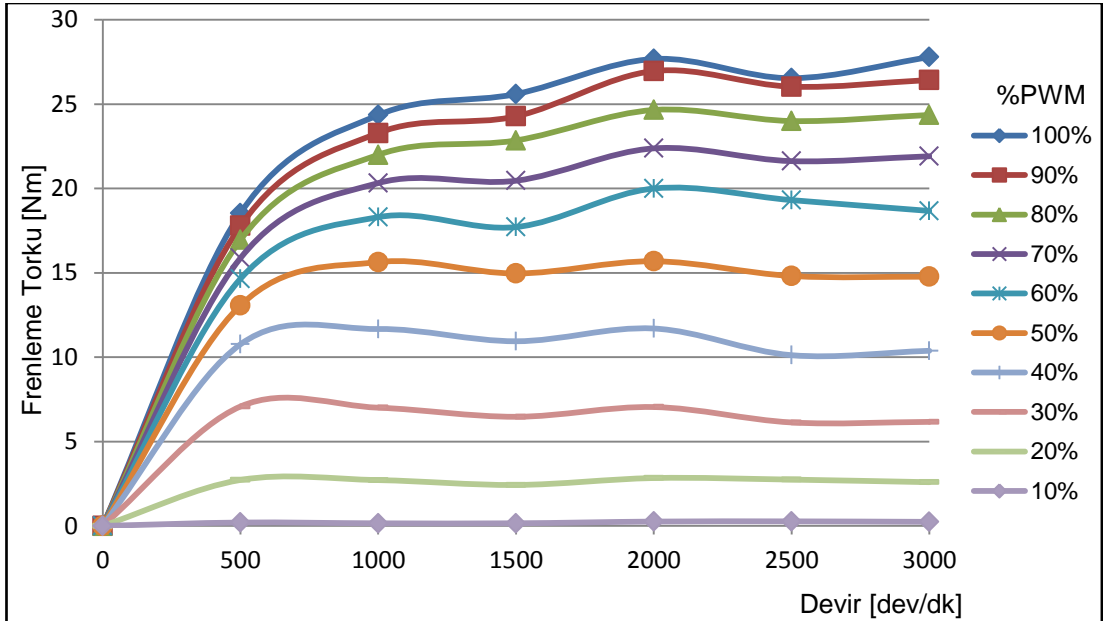
Şekil 3.2. EMR' in PWM % çevrim oranına göre frenleme torku değişimi

Her bir devir noktası için EMR' in %100 PWM çevrim oranında ürettiği frenleme torku değerlerin alınarak oluşturulan frenleme torku karakteristiği Şekil 3.3' de gösterilmiştir. Frenleme torku değeri 1000 dev/dk' lık hız altında etkinliğini hızlıca kaybetmektedir. 1000 dev/dk üzerinde karakteristik eğri yatay eksenle paralellliğini artırmış ve frenleme torku değeri 1000 dev/dk' lık hız öncesine oranla 25 - 30 Nm arasında sabitleşmiştir.



Şekil 3.3. EMR frenleme performansı grafiği

Şekil 3.4' te %10' dan %100 çevrim oranına kadar çeşitli PWM % çevrim oranlarında EMR frenleme performans grafiği görülmektedir. EMR, %10' luk PWM çevrim oranından sonraki her çevrim oranı için benzer davranış sergilemiş ve frenleme karakteristiğini değiştirmemiştir. Çevrim oranı artışı ile birlikte frenleme torkundaki artışlar giderek azalmıştır.



Şekil 3.4. PWM çevrim oranlarına göre EMR' in frenleme karakteristiği

3.2. Rotor Disk Kalınlığının Mekanik Analizi

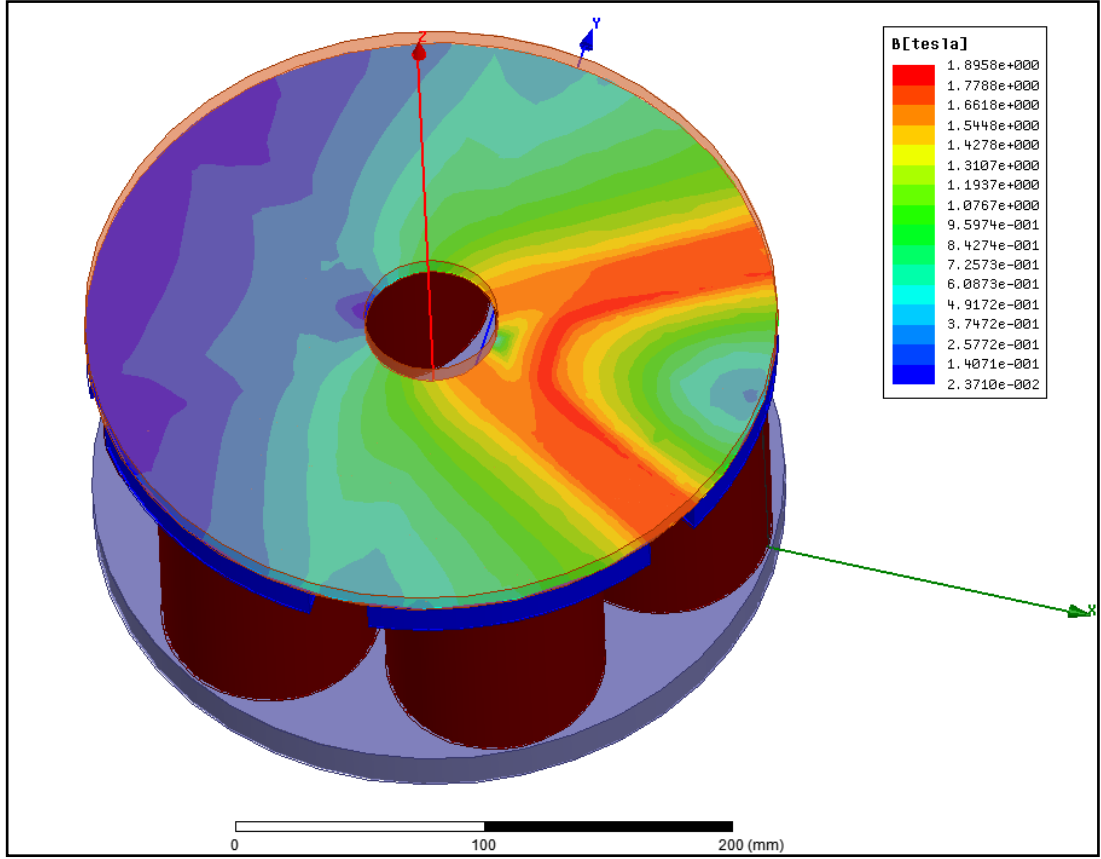
3.2.1. Deri etkisinin incelenmesi

Manyetik alan içerisinde dönen rotor üzerinde meydana gelen eddy - akımları frekansla bağlantılı olarak rotor yüzeyinden belirli bir mesafeye kadar ilerleyebilirler. Girme derinliği olarak ifade edilen bu mesafe rotor malzemesinin elektriksel ve manyetik özellikleri yanında rotorun açısal frekansı ile bağlantılıdır. Rotor devir sayısına göre hesaplanan açısal frekans değerleri Tablo 3.1' de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Rotor devrine göre açısal frekans değerleri

Rotor Devri dev/dk	Açısal Frekans ω (rad/sn)
500	52,35988
1000	104,71976
1500	157,07963
2000	209,43951
2500	261,79939
3000	314,15927

Girme derinliği aynı zamanda rotor malzemesinin mutlak manyetik geçirgenliği ile bağlantılıdır. Rotor malzemesinin elektromanyetik davranışı lineer olmadığından dolayı, SAE 1020 çeliğine ait B-H eğrisi kullanılarak mutlak manyetik geçirgenliğin elde edilmesi gereklidir. Bu noktada, malzemenin B-H eğrisini kullanılarak mutlak manyetik geçirgenliğin tespiti için, manyetik akı yoğunluğu veya akı şiddeti değerlerinden birisinin tespit edilmesi gereklidir. Bu durum, EMR' in bir bobini enerjilendiğinde rotor üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun Maxwell yazılımında yapılan analizden B değerinin elde edilmesi ile çözülmüştür. Şekil 3.5' te bobin tarafından rotor üzerinde oluşturulan manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Rotor üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu

Mutlak manyetik geçirgenlik değeri, malzemenin B-H eğrisi üzerinden, analiz sonucunda elde edilen B değerine karşılık gelen H değerinin elde edilmesi ve bu değerlerin Denklem (3.1)' de yerlerine koyulması ile elde edilmiştir.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.1)$$

Rotor malzemesinin özdirenci $1.59 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ve μ değeri $6,9115 \times 10^{-5} H/m$ olarak alındığında, rotor devrine göre girme derinliği mesafeleri Tablo 3.2' de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Rotor devrine göre girme derinliği

Rotor Devri dev/dk	Girme Derinliği δ [mm]
500	9,374065
1000	6,628465
1500	5,412119
2000	4,687033
2500	4,192209
3000	3,826946

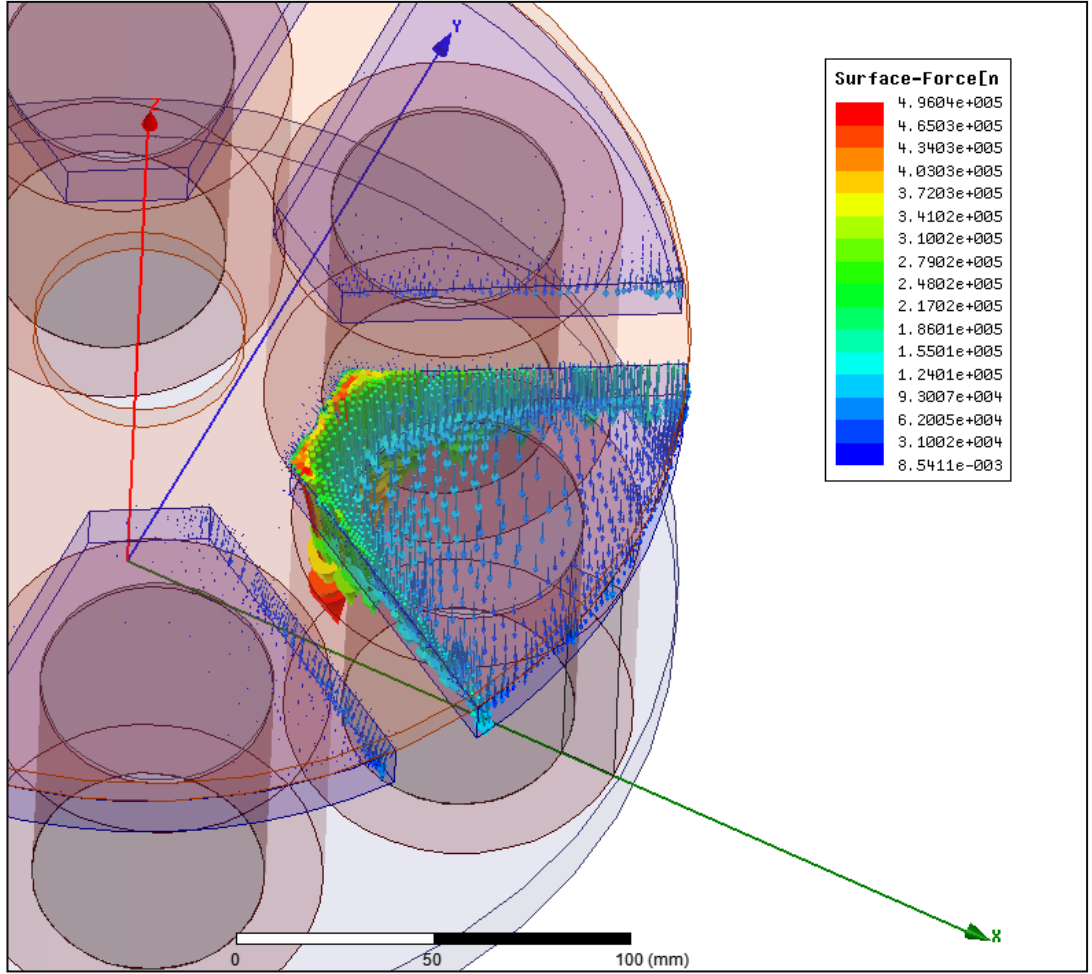
Tablo 3.2' deki değerler incelendiğinde rotor devrinin artmasıyla girme derinliğinin azaldığı görölmektedir. Rotor devrine göre girme derinliği 3,8 ila 9,4 mm arasında oluşmaktadır. Bu değerler doğrultusunda 20 mm olan rotor kalınlığı azaltılabileceği belirlenmiştir.

3.2.2. Rotorun mekanik analizi

EMR' in, çoğunlukla, 500 dev/dk üzerindeki devirlerde kullanıldığı göz önünde bulundurularak Tablo 3.2' deki değerlere göre rotor kalınlığı 8 mm olarak belirlenmiş ve çalışmanın bu aşamasında rotorun bilgisayar destekli mekanik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Rotor, EMR' in bobinleri enerjilendiğinde manyetik alan etkisi ile bir çekim kuvvetine de maruz kalmaktadır. Bunun nedeni, bobinlerin, üzerinde sarılı oldukları çekirdekler ve kutup başlarının etkisiyle kuvvetli birer elektromıknatısa dönüşmeleridir. Bu elektromıknatıs, merkezine yakın bölgeden aksenal doğrultuda sabitlenmiş olan rotor yüzeyine bir çekim kuvveti uygulamakta ve rotoru eğilmeye zorlamaktadır.

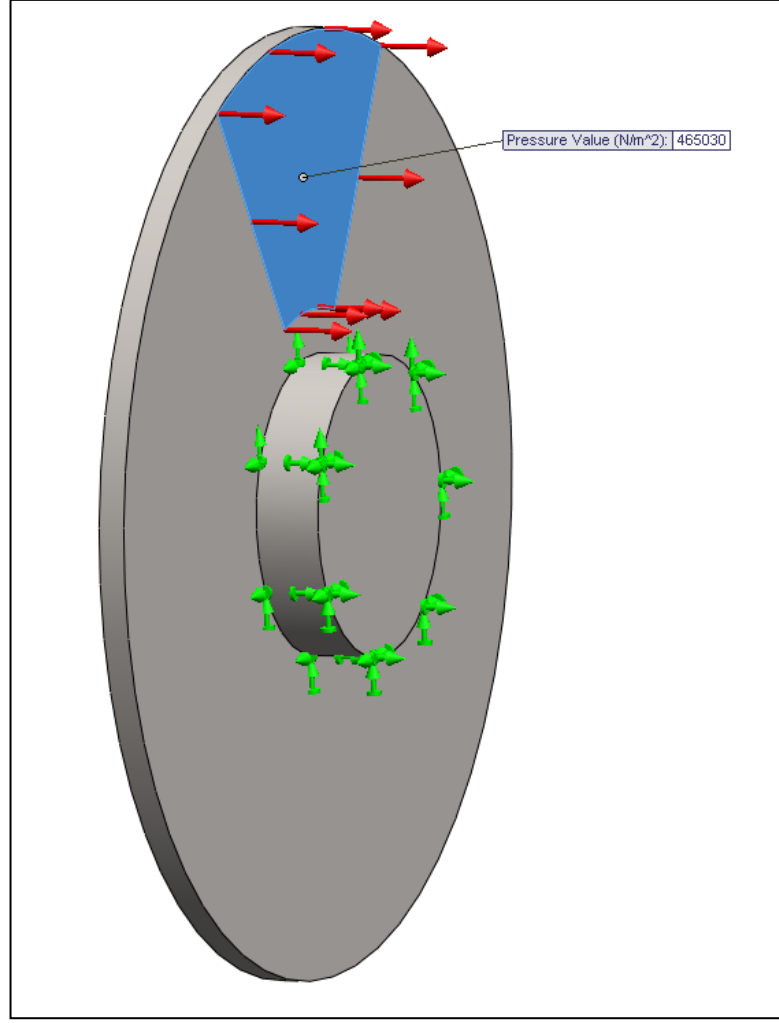
Maxwell programı ile yapılan sabit durum elektromanyetik analizde tek bir bobinin enerjilendiği durumda rotor yüzeyinde oluşan çekme kuvveti yoğunluğu incelenmiştir.



Şekil 3.6. 8 mm rotor yüzeysel kuvvet dağılımı

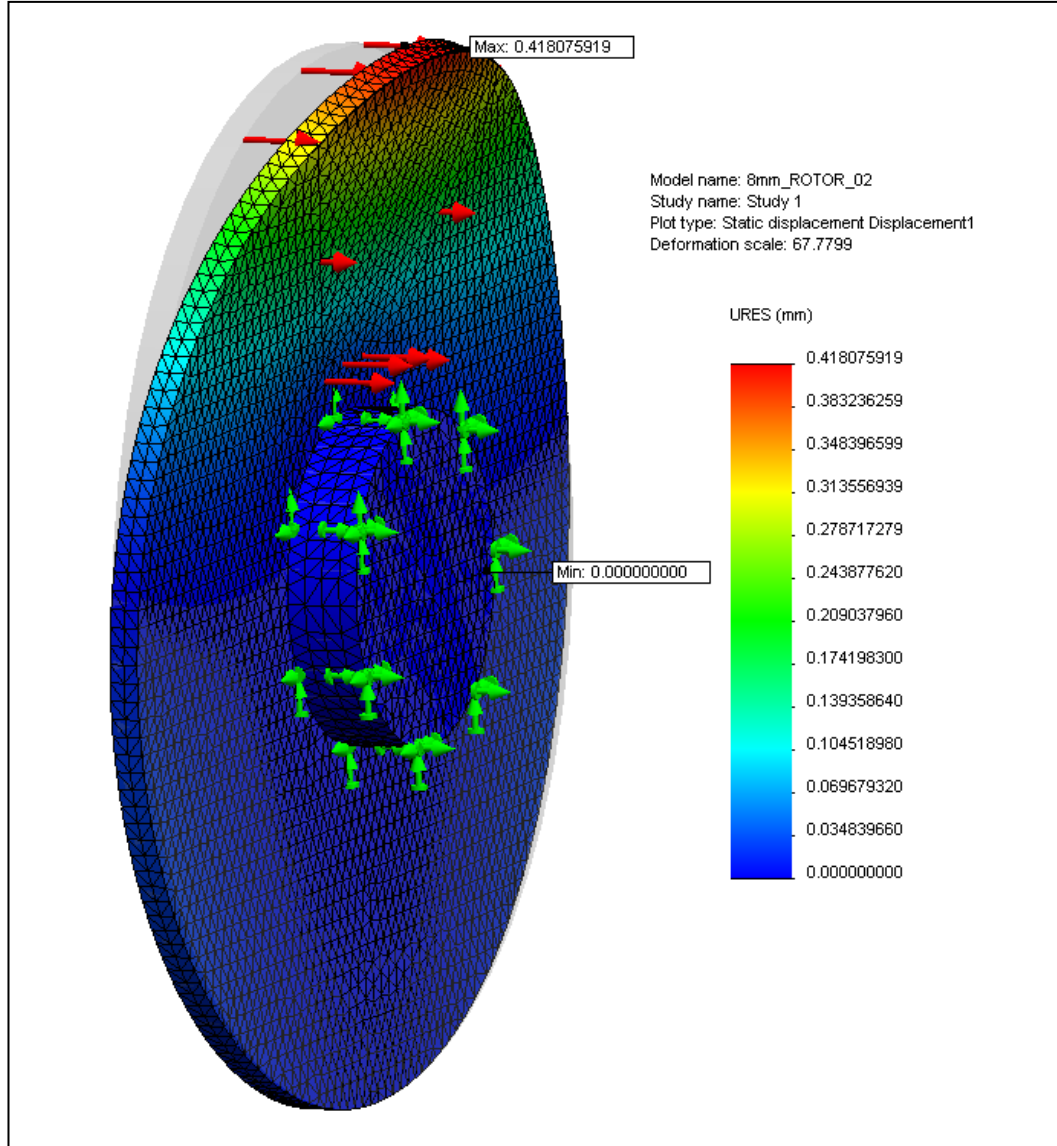
Şekil 3.6' da manyetik akı yoğunluğu nedeniyle 8mm kalınlığındaki rotor üzerinde oluşan çekim kuvvetinin, rotor yüzeyinde dağılımı görülmektedir. Çekim kuvveti, rotor üzerinde, enerjilenmiş bobine ait kutup başı çevresinde yoğunlaşmıştır. Rotor üzerinde maksimum yüzeysel kuvvet dağılımı $4,9604 \times 10^5$ N/m² değerlerine ulaşmaktadır. Yüzeysel kuvvet yoğunluğu, rotor diski üzerinde, kutup başı yüzeyi şeklinde bir basınç yüzeyi meydana getirmektedir.

Yüzey basıncının rotor üzerinde yaptığı eğilme etkisini incelemek amacıyla Solidworks çizim programında 8 mm kalınlığındaki rotorun katı modeli oluşturulmuş ve bu katı model üzerinde Solidworks Simulation modülü kullanılarak eğilme analizi gerçekleştirilmiştir.



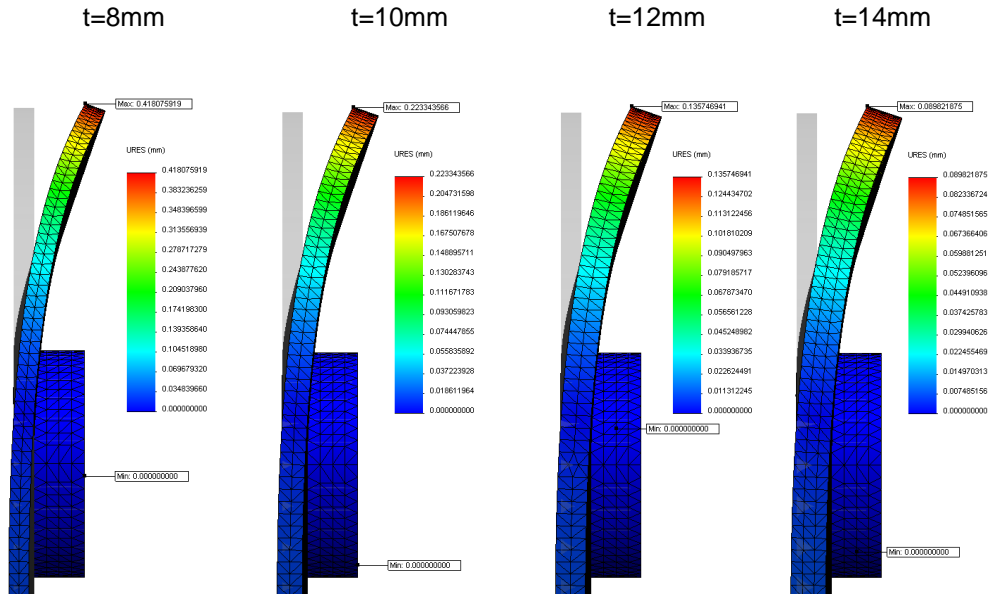
Şekil 3.7. 8 mm rotor katı modeli üzerinde oluşturulan basınç yüzeyi

Şekil 3.7' de kutup başı şeklinde basınç uygulama yüzeyi görülmektedir. Katı model üzerinde, kutup başı yüzeyinin yansıması olacak şekilde bir yüzey oluşturulmuş ve bu bölge basınç yüzeyi olarak tayin edilmiştir. Basınç yüzeyinin alanı, kutup başı yüzey alanı olan, $6631,96 \text{ mm}^2$ olarak belirlenmiştir. Rotor, şafta bağlandığı bölgede 3 ekseninde de sabitlenerek rijit bir yapı oluşturulmuştur. Böylece disk yüzeyine uygulanan kuvvet doğrultusunda disk merkezinde oluşacak deformasyonlardan kaçınılmıştır.



Şekil 3.8. 8 mm rotor maksimum deformasyonu

Şekil 3.8’ de 8 mm kalınlığındaki rotorun deformasyon analizi sonucu verilmektedir. Maksimum deformasyon rotorun merkezinden 141,5 mm uzaklığında meydana gelmiştir. Maksimum deformasyon noktasında 0,41 mm sehim olduğu görülmüştür. Bu değerin doğrulaması için deney seti üzerinden yapılan ölçümlerde, 8 mm’ lik rotorun, dış çap noktasındaki hava aralığının 0,40 mm’ ye düştüğü ölçülmüştür. Bu değer simülasyon verileri ile örtüşmektedir. Sehim analizi çalışmaları 8, 10, 12 ve 14 mm rotor kalınlıkları için de gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9’ da farklı disk kalınlıkları için yapılan rotor sehim analizi sonuçları ve Tablo 3.3’ de rotor kalınlığına göre maksimum sehim değerleri görülmektedir.



Şekil 3.9. Farklı disk kalınlıkları için rotor sehimi analizi sonuçları.

Tablo 3.3. Rotor kalınlığına göre maksimum sehimi değerleri

Rotor Kalınlığı [mm]	Maksimum Sehimi [mm]
8	0,41808
10	0,22334
12	0,13575
14	0,0892

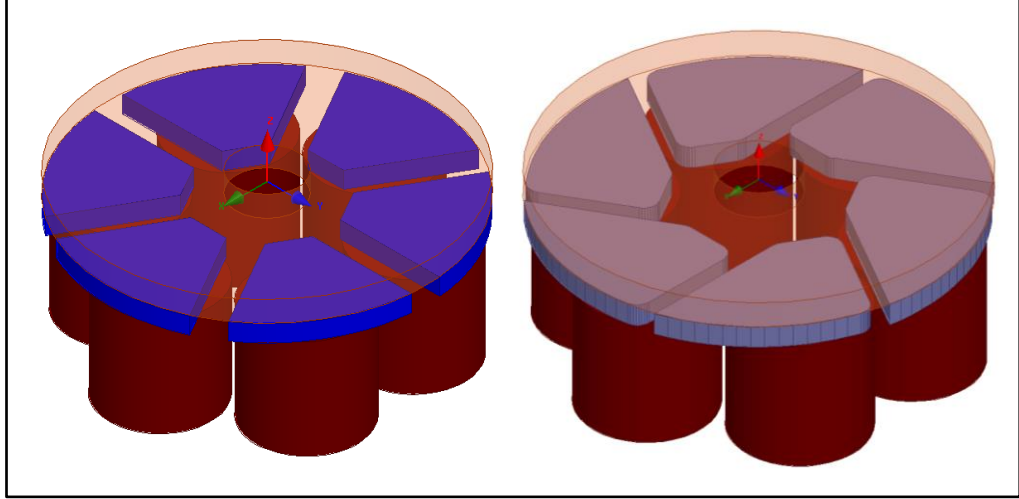
3.3. Kutup Başı Profillerinin EMR Frenleme Performansına Etkisi

Kutup başı profillerinin EMR frenleme performansına etkilerinin incelenmesi için simetrik ve asimetric olarak adlandırılan 2 farklı tipte kutup başının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, Simetrik ve asimetric kutup başı profillerinin Maxwell yazılımı ortamında modellenmesi yapılarak iki farklı kutup başı yapısının EMR' in frenleme performansına etkileri incelenmiştir. Daha sonra kutup başı profillerinin imalatı yapılmış ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Kutupbaşı profilleri analiz sonuçları

Maxwell yazılımı ortamında yapılan analiz çalışmalarında, rotor dönüş yönü sabit tutularak iki farklı tip kutup başı için 500, 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 dev/dk'lık hızlarda analizler gerçekleştirilmiş ve EMR' in bu iki tip kutup başı için frenleme

performans karakteristikleri elde edilmiştir. Şekil 3.10' da farklı tipte kutup başı yapısının kullanıldığı EMR' in 3D FEM analizi modelleri ve Tablo 3.4' te Model parametreleri görülmektedir.



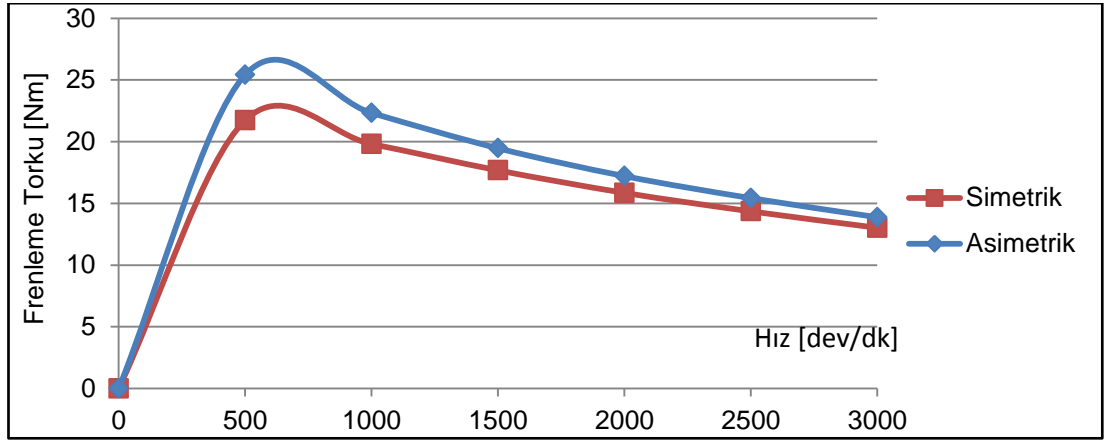
Şekil 3.10. Kutup başı yapısı etkisinin incelendiği elektromanyetik FEM analizi modelleri

Tablo 3.4. Kutup başı profilleri analizi FEM modeli ortak parametreleri

Bobin uyarım akımı	16 A
Bobin Sarım Sayısı	331
Hava Aralığı	0.8 mm
Rotor Dönüş Yönü	Saat yönü tersi
Rotor Çapı	283 mm
Rotor Kalınlığı	20 mm
Malzeme	
Bobin teli	Alüminyum
Rotor	Steel 1020
Çekirdek	Steel 1020
Kutup Başı	Steel 1020
Stator	Steel 1020

Yapılan analizler sonucunda her iki kutup başı için EMR frenleme performansı karakteristik eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğrilerin karşılaştırması Şekil 3.11' de gösterilmektedir. Frenleme torkları, her iki kutup başı için de 500 dev/dk dolayında

maksimum değerlerine ulaşmış ve 3000 dev/dk' ya doğru azalmışlardır. EMR, iki kutup başı tipi içinde de benzer frenleme karakteristiği göstermiştir. Analizler sonucunda, asimetric kutup başı yapısının tork değerinde, 500 dev/dk' da, yaklaşık %17' lik bir artış olduğu görülmektedir. Tork değeri 3000 dev/dk' da da simetrik yapıli tipin kullanıldığı analize göre yüksek değerde çıkmış, ancak, artış değerinin %6,5 oranına düştüğü görülmüştür. Her bir devir için karşılaştırmalı tork değerleri Tablo 3.5' de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kutup başı tiplerine göre EMR frenleme performansı karakteristik eğrileri (Analiz)

Tablo 3.5. Simetrik ve asimetric kutup başına göre frenleme torku analiz sonuçları

Hız [dev/dk]	Frenleme Torku [Nm]		% Artış
	Simetrik Kutup	Asimetrik Kutup	
500	21,7299	25,4131	16,9
1000	19,8082	22,3237	12,6
1500	17,6753	19,465	10,1
2000	15,8529	17,2096	8,5
2500	14,3528	15,4244	7,4
3000	13,0236	13,878	6,5

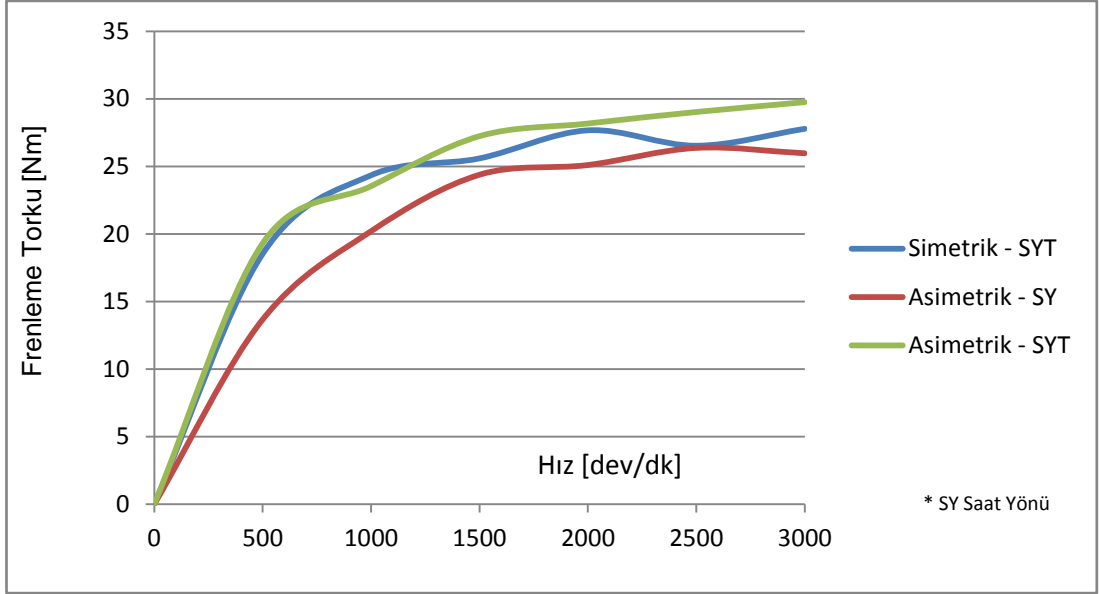
3.3.2. Kutupbaşı profilleri deneysel sonuçları

Kutup başı profillerinin EMR' in frenleme performansına etkisinin incelenmesi deneylerinde, üretimi yapılan kutup başı tipleri deney seti üzerindeki EMR' e montajı

gerçekleştirilmiş ve frenleme karakteristiği eğrilerini oluşturmak için 500 - 3000 dev/dk aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Asimetrik kutup başı tipi rotorun dönüş yönü sabit tutulduğunda deney setine iki farklı yönde monte edilebilecek yapıdadır. Bu iki farklı montaj şeklinin frenleme performansına etkisini incelemek için asimetrik tipin montajı tek yönde yapılmıştır. Rotor, saat ibreleri yönü (SY) ve de saat ibreleri yönünün tersi (SYT) yönde olmak üzere iki farklı yönde döndürülmüştür. Her hız kademesi için oluşan maksimum frenleme torku değerleri temel alınarak frenleme karakteristik eğrileri oluşturulmuştur.

Şekil 3.12' de, deneyler sonucunda farklı kutup başı profillerinin frenleme performansına etkisini gösteren frenleme karakteristiği eğrileri verilmiştir. Karakteristik eğriler, deneyde kullanılan kutup başı tip ve rotorun dönüş yönüne göre isimlendirilmiştir. Bu bağlamda Simetrik - SY tanımı rotorun karşısından bakıldığında dönüş yönünün saat ibrelerinin dönüş yönünde ve EMR üzerindeki kutup başının simetrik tipte olduğunu ifade etmektedir. 500 dev/dk'lık hıza kadar Simetrik - SYT ve Asimetrik - SYT eğrileri paralel olarak hızlıca yükselmiştir. Her iki eğri için frenleme torku değeri 500 dev/dk' dan sonra yükselmeye devam etmiş ancak yatay düzlem ile yaptıkları açı azalmıştır. Diğer bir deyişle, 500 dev/dk hızından sonra frenleme torkundaki artış miktarı azalmıştır. Buna karşılık Asimetrik - SY eğrisi benzer frenleme karakteristiğini 1000 dev/dk üzerinde yakalamıştır. Deneyler sonucunda, kutup başı tipinin asimetrik ve rotor dönüş yönünün SYT olduğu durumda, EMR' in frenleme performansının en yüksek değerde olduğu görülmüştür. Deneyler sonucunda elde edilen tork değerleri Tablo 3.6' da gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Deneyler sonucunda farklı kutup başı profillerinin frenleme performansına etkisi

Tablo 3.6. Simetrik ve asimetrik kutup başı tipine göre EMR frenleme torku deney sonuçları

Hız [dev/dk]	Frenleme Torku [Nm]		
	Simetrik SYT	Asimetrik SY	Asimetrik SYT
0	0	0	0
500	18,53601	13,67296	19,3128
1000	24,34865	20,2059	23,54338
1500	25,59809	24,3883	27,2444
2000	27,6759	25,10764	28,1792
2500	26,53621	26,374	29,0338
3000	27,78677	25,9757	29,75958

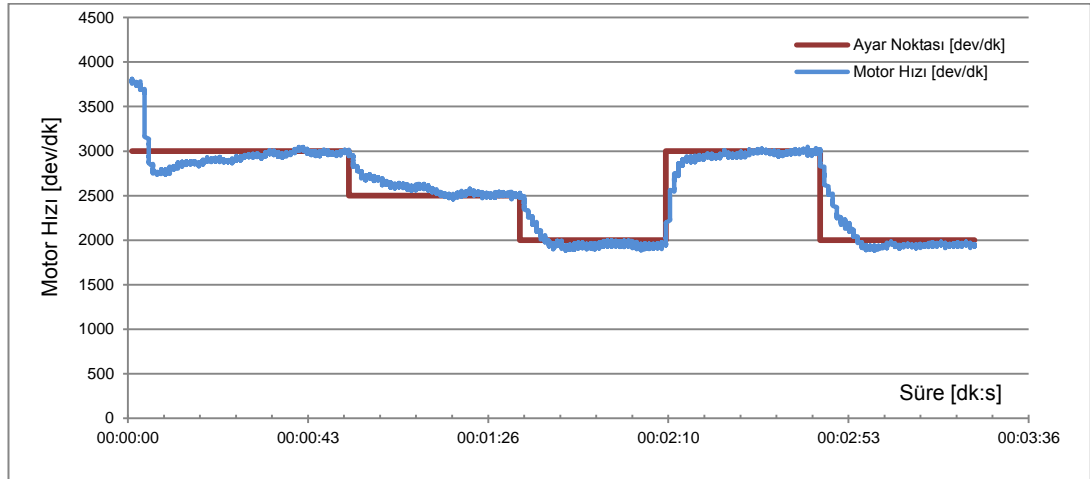
3.4. PWM Tabanlı Kapalı Çevrim EMR Kontrolü Etkinliğinin İncelenmesi

3.4.1. Kontrolörün kapalı çevrim adım cevabı

Elektromanyetik retarderin kapalı çevrim PID kontrol ile frenlemesi sağlanarak yapılan hız sabitleme uygulaması için gerçekleştirilen deneylerde öncelikle sistemin adım cevabı incelenmiştir. Bu bağlamda, öncelikle içten yanmalı motorun hızı 3750

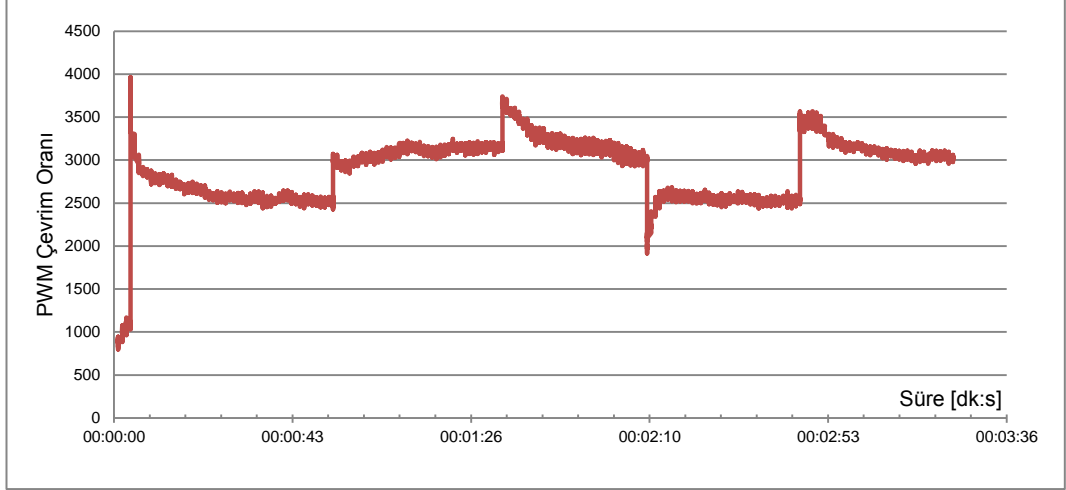
dev/dk' ya sabitlenmiş ve kontrolör devreye alınarak sırasıyla 3000, 2500, 2000, 3000 ve 2000 dev/dk ayar noktaları için sistemin davranışı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.13' te çeşitli ayar noktalarına göre motor hızı değişiminin grafiği görülmektedir. Elde edilen verilerden, düşük aşma miktarı ve 10 saniyelik oturma zamanı bulunmaktadır. Taşıtın büyük bir negatif ivme ile kısa bir zaman içerisinde yavaşlatılmasının sürüş konforunu olumsuz olarak etkileyeceği göz önünde bulundurulduğunda, sistemin ani hız değişimi gerektirmeyen konfor amaçlı olarak yapılan hız sabitleme amaçlı uygulamalar için uygun oturma zamanına sahip olduğu görülmektedir. Oturma zamanı sonunda, %4' lük bir kalıcı durum hatası ile ayar noktası değerlerine ulaşılmıştır. Bu hata değeri, mevcut olan manüel elektromanyetik retarder kontrol sistemlerine oranla oldukça düşüktür.



Şekil 3.13. Ayar noktalarına göre motor devri değişimi grafiği

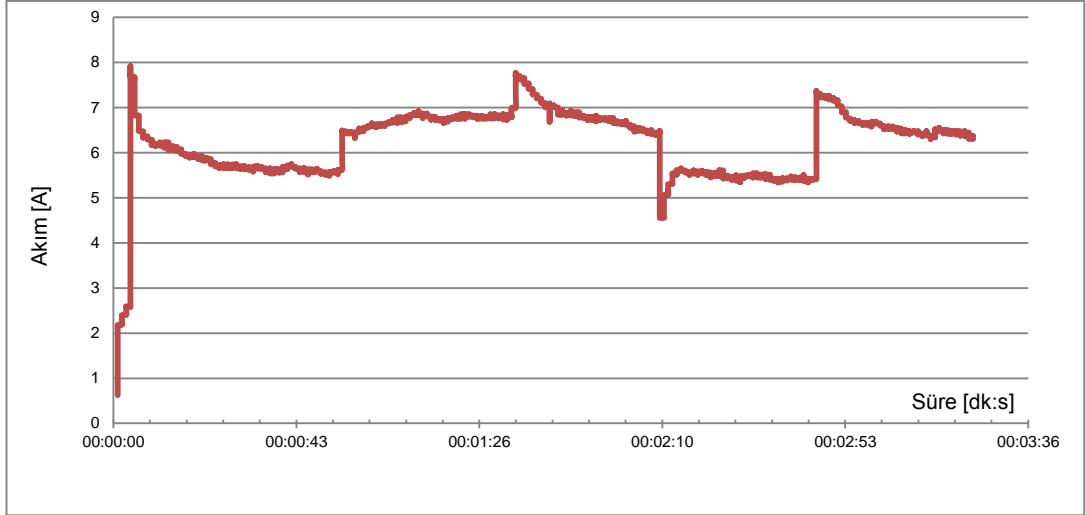
Şekil 3.14' te ayar noktası değişimlerine göre PWM sinyal çıkışındaki değişimin grafiği görülmektedir. Yöntem bölümünde, kontrolörün PWM çıkışının 0 - 8000 değerleri arasında ölçeklendirildiğinden bahsedilmiştir. Kontrolör devreye alındığında çıkış değeri anlık olarak 4000' e ulaşmakta ve sonrasında yavaş bir şekilde azalarak motor hızını ayar değerinde sabitlemektedir. Ayar noktası değişimlerinde PWM çıkışı ani değişimler göstermekte ancak maksimum değerine ulaşmamaktadır.



Şekil 3.14. Kontrolörün PWM sinyal çıkışı.

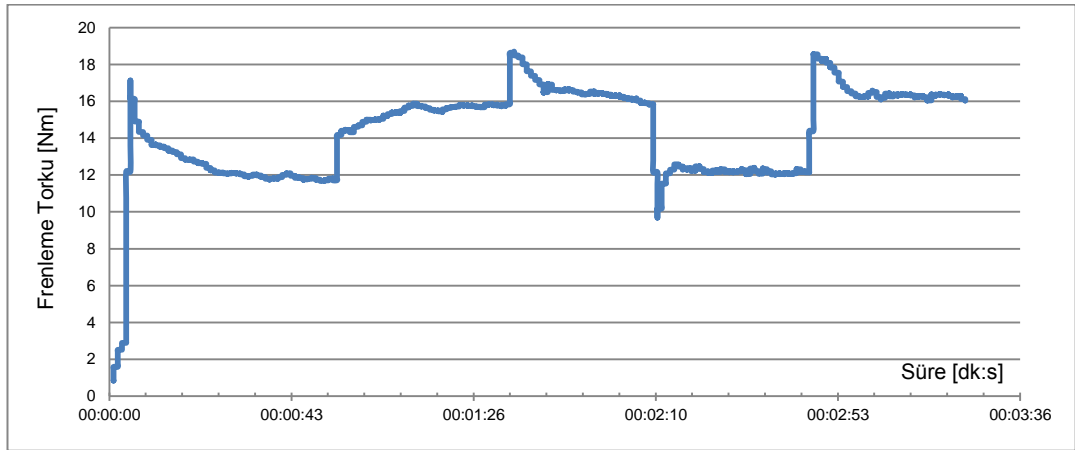
Elektromanyetik retarderin güç kaynağı 24 Vdc sabit gerilim sağlamaktadır. PWM sinyalinin %100 çevrim oranında olması durumunda, bu, retarder bobinlerinin 24 Vdc gerilim ile uyarılmış olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısı ile deneyler esnasında bobinler üzerindeki gerilimin, PWM çıkışının 4000 değerini geçmemesi nedeniyle 12V dc altında kaldığı görülmüştür.

Elektromanyetik retarderin bobin dirençleri sabit olduğu için 24 Vdc gerilimde bobinler üzerinden toplamda 16 A akım akmaktadır. Şekil 3.15' te deney esnasında bobinler üzerinden akan akımın değişimi grafiği görülmektedir. Kontrolörün devreye alınması ile bobinlerin akım değeri 8 A' lik bir maksimum değere yükselmektedir. Ayar noktasındaki değişimler ile akım değeri anlık olarak yükselme ve düşmeler göstermektedir. Sonrasında, motor devrinin ayar değerine ulaşması için zaman içerisinde azalmakta veya yükselmektedir. Harcanan akımın 8 A altında kaldığı yine Şekil 3.15 üzerinden görülebilmektedir. Dolayısı ile retarderin, kontrollü frenleme esnasında, maksimum yükte çalışmadığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.15. Kontrol esnasında EMR' in bobin akımı değişimi

Bobin akımları değişimi ile elektromanyetik retarderin frenleme torku da değişmektedir. Şekil 3.16' da deneyler esnasında frenleme torkundaki değişimin grafiği görülmektedir. Ayar noktası değerinin değişimi ile frenleme torku anlık olarak yükselme ve düşüşler göstermekte ve motor hızının ayar noktası değerine ulaşması ile sabitlenmektedir. Böylece motorun belirlenen değerlerde sabit hızda dönmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.16. Adım referansına göre frenleme torku değişimi

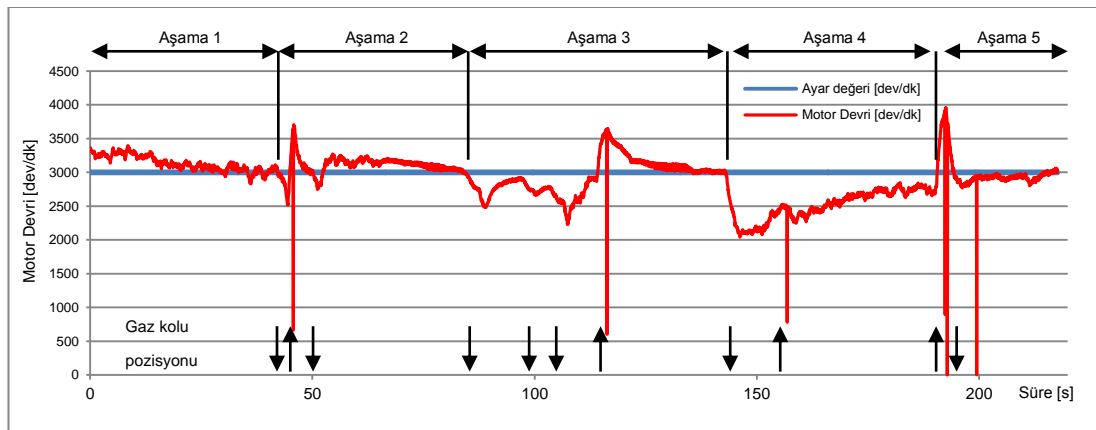
Yukarıda bahsedilen deneylerde, elektromanyetik retarderin kapalı çevrim PID kontrolü ile taşıt hızı sabitlemeye yönelik yapılan çalışmanın adım referansına göre verdiği cevaplar incelenmiştir. Ancak, gerçek uygulamalarda yokuş eğiminin sürekli olarak sabit olmayacağı göz önünde bulundurulması gereklidir. Yokuş eğimindeki değişimlere göre taşıt hızlanma veya yavaşlama eğilimi gösterecektir. Bu nedenle,

yol eğiminde oluşan değişimlerin benzetiminin yapıldığı çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler neticesinde sistemin cevabı incelenmiştir.

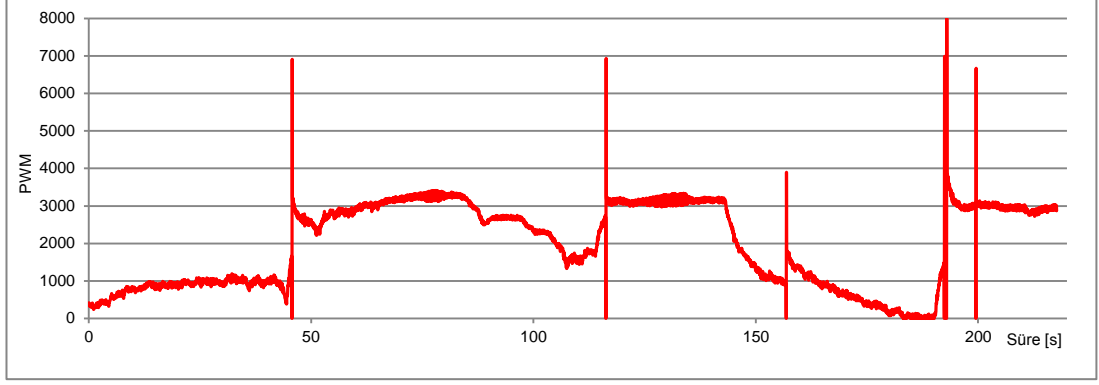
3.4.2. Farklı yol eğimlerine göre kontrolör davranışının incelenmesi

Yukarıda bahsedilen deneylerde, elektromanyetik retarderin kapalı çevrim PID kontrolü ile taşıt hızı sabitlemeye yönelik yapılan çalışmanın adım referansına göre verdiği cevaplar incelenmiştir. Ancak, gerçek uygulamalarda yokuş eğiminin sürekli olarak sabit olmayacağı göz önünde bulundurulması gereklidir. Yokuş eğimindeki değişimlere göre taşıt hızlanma veya yavaşlama eğilimi gösterecektir. Bu nedenle, yol eğiminde oluşan değişimlerin benzetiminin yapıldığı çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler neticesinde sistemin cevabı incelenmiştir.

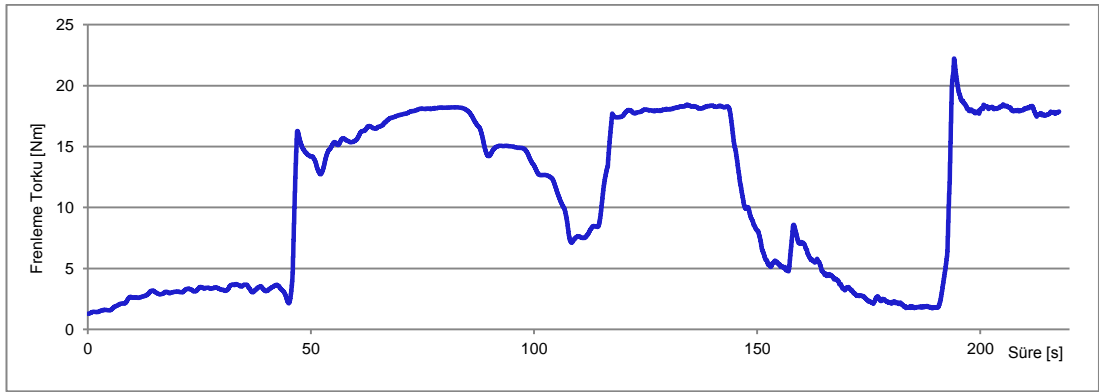
Yapılan deneylerde, kontrol sisteminin devrede olduğu ve motor hızının sabitlendiği durumda, gaz kolu pozisyonunun yükseltilmesi ya da düşürülmesi ile yol eğimindeki değişimlerin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17' de gaz kolu pozisyonu değişiminde motor hızı değişimini gösteren 5 aşamalı grafik görülmektedir. Grafik üzerindeki yukarı ve aşağı yönlü oklar, sırasıyla, gaz kolu pozisyonunun yükseltildiğini ve düşürüldüğünü göstermektedir. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 sırasıyla, motor hızı grafiğine bağlı olarak kontrolörün PWM çıkışı ve retarderin frenleme torku değişimi grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.17. Gaz kolu pozisyonuna göre motor hızı değişim grafiği



Şekil 3.18. PWM çıkışı değişim grafiği



Şekil 3.19. Frenleme torku değişim grafiği

Yokuş eğimindeki değişimlerde taşıtın hızlanma ve yavaşlama durumlarının benzetimi için öncelikle motor hızı gaz kolu yardımıyla 3400 dev/dk' da sabitlenmiştir. Sonrasında ayar noktası değeri 3000 dev/dk olarak seçilmiş ve kontrolör devreye alınmıştır. Şekil 3.17' de 1. aşama sonunda motor hızının 3000 dev/dk' da sabitlendiği görülmektedir.

2. aşamada, yokuş üzerindeki bir tümseğin benzetimi için gaz kolu pozisyonu ilk olarak düşürülmüş ve sonrasında yükseltilmiştir. Sonrasında yokuş eğiminin azaltılması için tekrar düşürülmüştür. İkinci aşamanın sonunda kontrolörün, motor hızını ayar noktası değerine tekrar sabitlediği görülmüştür.

3. aşamada, yol eğimindeki kademeli eğim azalması ve ani bir eğim artışı durumlarında sistemin cevabı incelenmiştir. Kontrolör, her bir eğim azalması durumunda motor hızını ayar noktası değerinde sabitlemek için, PWM çıkış değerini düşürmüştür. Eğimdeki ani artış ile elektromanyetik retarderin frenleme miktarı da artırılmıştır. 3. aşama sonunda motor hızı ayar noktası değerine ulaşmıştır.

4. aşamada, yoldaki büyük bir eğim azalması ve ardından küçük bir eğim artışından oluşan senaryo incelenmiştir. Buna bağlı olarak motor hızı ayar noktasının altına düşürülmüş ve tekrar ayar noktası değerinin altında kalacak şekilde yükseltilmiştir. Kontrolör, motor hızını ayar noktası değerine yükseltmek için, PWM çıkış değerini %0 çevrim oranına düşürmüştür. Ancak gaz kolu pozisyonun deneyin başlangıcındaki seviyeden düşük olması nedeniyle motor hızı 2750 dev/dk' ya kadar yükselmiş ve bu değerde sabitlenmiştir.

Deneyin 5. aşamasında, büyük bir eğim artışı ardından küçük bir eğim azalmasının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla gaz kolu maksimum değere yükseltilmiş ve sonrasında bir miktar düşürülmüştür. Motor hızındaki artış ile birlikte kontrolör frenleme miktarını artırarak hızın 3000 dev/dk' da sabitlenmesini sağlamıştır.

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18' de görülen anlık pikler, deney esnasında oluşan parazitler nedeniyle oluşan ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır. Kontrolör, bu anlık parazitlerin etkisini ortadan kaldırmak için, PWM çıkışını anlık olarak yüksek değerlere veya 0' a çekmektedir. Ancak, elektromanyetik retarderin frenleme torku Şekil 3.19' dan da görülebileceği gibi bu parazitlerden kaynaklı anlık değişimlerden etkilenmemiştir. Motor hızı, efektif bir şekilde ayar noktası değerinde sabitlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektromanyetik retarderlerin frenleme performansının iyileştirilmesine yönelik bu çalışmada öncelikle, deneysel çalışmalarda kullanmaya yönelik bir EMR tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan EMR' in efektif olarak kontrolü için elektronik kontrol donanımları ve kontrol sonucunda oluşan tepkilerin ölçümü için yazılımlar geliştirilmiştir.

Deney seti üzerinde PWM yöntemi ile frenleme kontrolünün etkinliğinin incelenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. EMR bobin akımının PWM çevrim oranıyla lineer olarak arttığı tespit edilmiş ve her devir noktası için maksimum tork değerleri tespit edilerek EMR' in frenleme karakteristiği ortaya koyulmuştur. Ortaya çıkan karakteristik eğrinin ticari ürünlerin karakteristiği ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Elektromekanik anahtar yardımıyla yapılan dört kademeli frenleme kontrolünün PWM yöntemi kullanılarak %0 - %100 çevrim oranları arasında istenilen frenleme torkunu elde edilebilecek şekilde geniş bir aralıkta ayarlanabileceği ortaya koyulmuştur. Bununla beraber, %0 - %100 PWM çevrim oranları arasında her kademedede elde edilen EMR frenleme karakteristiğinin, tam kapasitede kullanımı ile elde edilen frenleme karakteristiği ile örtüştüğü belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda EMR' in PWM yöntemi etkin bir şekilde kontrol edilebileceği ortaya koyulmuştur.

Diğer yandan konstrüktif yapının iyileştirmesine yönelik elektromanyetik ve mekanik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, başlangıçta 20 mm olarak belirlenen rotor kalınlığının deri etkisi olayından faydalanılarak, elektromanyetik kuvvetler altında oluşan mekanik deformasyon miktarı önemsenmeyecek kadar küçük olacak şekilde (~90 µm), %30 oranında azaltılabileceği ortaya koyulmuştur.

Bunun ışığında, rotor kalınlığında elde edilen bu kazancın, ataletin ve kütlenin indirgenmesinden dolayı, üretici açısından imalat maliyetlerinin azaltılmasına ve kullanıcı açısından yakıt ekonomisine katkıda bulunacağı öngörülebilir. Diğer yandan, bu kazanç, çalışma esnasında yüksek sıcaklıklara ulaşan EMR' in soğutulmasında etkin bir rol oynayan kanatçık yüzeylerinin artırılması yönünde kullanılarak, soğuma

miktarını artırmada ve dolayısı ile etkin frenleme süresinin uzatılmasında kullanılabileceği öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasının bir diğer bölümünde, kutup başı profillerinin frenleme performansına etkisi üzerine analiz ve deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kutup başı yapısının asimetrik yapıda oluşturulması ile frenleme torku değerinde artış sağlanabileceği ortaya koyulmuştur. Bu durum yapılan analiz ve deney çalışmaları ile doğruluğu sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda asimetrik kutup başı yapısının retarder üzerinde belirli bir yönde kullanımı ile maksimum frenleme torku değerinde yaklaşık % 7 oranında kazanç sağlanmıştır. Diğer yandan asimetrik kutup başının tersi yönde montajının frenleme torkunu azaltıcı yönde etki ettiği tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında son olarak, EMR' in frenleme miktarının sürücüden bağımsız olarak ayarlanmasını sağlamaya yönelik kapalı çevrim kontrol yöntemi geliştirilmiş ve etkinliği, bir içten yanmalı motor yardımı ile gerçekleştirilen yol simülasyonlarında denenmiştir.

Deneysel çalışmalar, kontrol sisteminin çok düşük bir aşma miktarının ve 10 saniyelik bir oturma zamanının olduğunu göstermektedir. Oturma zamanı sonunda, ayar noktasına oranla yaklaşık %4 oranında bir kalıcı durum hatası oluşmuştur. Kazanç katsayılarının düşürülerek, sistemin cevap süresinin uzatılması ile PID kontrol sisteminin güvenilirliği artırılmış ve mevcut sistemde oluşabilecek kalıcı durum hatalarının önüne geçilmiştir.

Yapılan çalışmada, yokuş inişleri esnasında sürücü yükünü azaltarak sürüş konforunu artıran bir hız sabitleme sistemi geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrol yazılımı bilgisayar ortamında çalışacak şekilde dizayn edilmiş ancak kolaylıkla bir mikrodenetleyici ile gerçekleştirilebilecek yapıdadır. Sistem, üzerinde EMR' i bulunan ağır taşıtlara, mekanik yapısında değişikliğe ihtiyaç duyulmadan, kolaylıkla uygulanabilecek bir yapıdadır.

KAYNAKLAR

- [1] Heisler H., *Advanced vehicle technology*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2002.
- [2] Gökten A. G., Güney A., Ereke M., *Taşıt frenleri*, 1. baskı, Panel Matbaacılık, İstanbul, 1995.
- [3] Wei W., Bo Z., Qingdong Y., Huiyuan L., Study on accurate strength analysis of blade wheel in vehicular hydraulic retarder based on sequential coupling method, *Advanced Materials Research*, 2011, **346**, 103-108.
- [4] Long Z., LI C., Huang B., Wen W., Simulation research on braking torque of eddy current retarder, *Proceedings of the First International Workshop on Education Technology and Computer Science*, Hubei, China, 7-8 March 2009.
- [5] Stoica C., Melcescu L., Lefter E., Constantinescu L. M., computation of the characteristics eddy current electromagnetic brake for a bicycle, by finite element method 3D, *Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, 20-22 May 2010.
- [6] Saçkan A. H., *Elektroteknik - 1 ve problem çözümleri*, 4. baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [7] Edminister J. A., *Elektromanyetik*, 2. baskı, Çeviri: Timur Aydemir, Nobel Yayınevi, Ankara, 2000.
- [8] Barnes L., Hardin J., Gross C. A., An eddy current braking system, *Proceedings of the Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory*, Alabama, USA, 7-9 March 1993.
- [9] Bansal R., *Handbook of engineering electromagnetics*, 1st ed., CRC Press, New York, 2004.
- [10] Çanakoğlu A. i., Ünsal A., Tunaboşlu N. S., *Elektrik makinaları*, 1. baskı, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2012.
- [11] Cullity B. D., Graham C. D., *Introduction to magnetic materials*, 2nd ed., Wiley, USA, 2009.
- [12] Ying Z., Xu X., Zhu J., Analysis of simulation design of the disc eddy current braking device, *Proceedings of the International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, Jilin, China, 24-26 August 2010.
- [13] Srivastava R. K., Kumar S., An alternative approach for calculation of braking force of an eddy-current brake, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, **45**, 150-154.

- [14] Kim C. J., Lee K. Y., Han K. H., Baek S. H., A study on the constant braking performance of eddy current braker with speed variation, *Proceedings of the Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 9-11 November 2003.
- [15] Kuwahara T., Coated rotor for eddy current type retarder, Patent No: US5045739.
- [16] Lee K., Park K., Analysis of an eddy-current brake considering finite radius and induced magnetic flux, *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**, 5532-5538.
- [17] Gosline A. H. C., Hayward V., Eddy current brakes for haptic interfaces: design, identification, and control, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, **13**, 669-677.
- [18] Ihm H., Lee S. G., Ham S. H., Lee J., The influence of slit construction on the eddy current braking torque considered by 3D FEM analysis, *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems*, Hubei, China, 17-20 October 2008.
- [19] Chengye L., Kejun J., Yan Z., Study on temperature rise performance of eddy current retarder in automobile, *Proceedings of the International Conference on Future Information Technology and Management Engineering*, Changzhou, China, 9-10 October 2010.
- [20] Zhijun L., Yanze L., Zhiyong Y., Changyou L., Experiment and research on performance characteristic of eddy-current retarder, *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Sanya, China, 23-24 October 2010.
- [21] Sharif S., Sharif K., Influence of skin effect on torque of cylindrical eddy current brake, *Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Lisbon, Portugal, 18-20 March 2009.
- [22] Long Z., LI C., Numerical simulation of air gap magnetic field of eddy-current retarder, *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Shanghai, China, 7-8 November 2009.
- [23] Liu Z., Jiang L., PWM speed control system of DC motor based on AT89S51, *Proceedings of the International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology*, Heilongjiang, China, 12-14 August 2011.
- [24] Kim M., Choi J., Lee J., Yoon H., Kim Y., Cha I., A study on the DC motor speed control for electric bicycle with the load induction unit, *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Puebla, Mexico, 04-08 December 2000.
- [25] Olden P., Robinson K., Tanner K., Wilson R., Basher A. M. H., Open-loop motor speed control with labview, *Proceedings of the IEEE SoutheastCon. 2001*, Clemson, USA, 30 March – 1 April 2001.

- [26] Bolton W., *Mekatronik: makine ve elektrik mühendisliğinde elektronik kontrol sistemleri*, 3. baskı, Çeviri : B. Koray Tunçalp, Ege Basım, İstanbul, 2004.
- [27] Caldwell J., Analog pulse width modulation, Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/ug/slau508/slau508.pdf> (Ziyaret Tarihi: 13.08.2013).
- [28] High performance ARM968-based microcontroller LPC291x with CAN and LIN, NXP B.V., <http://www.nxp.com/documents/leaflet/75016101.pdf> (Ziyaret tarihi: 26.02.2013).
- [29] Yang H., Yu X., Gua H., Zhang Q., Design of brushless DC motor control system based on DSP, *Proceedings of the 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, Yichang, China, 21-23 April 2012.
- [30] Zhou H., DC servo motor PID control in mobile robots with embedded DSP, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Hunan, China, 20-22 October 2008.
- [31] Paz R. A., The design of the PID controller, Klipsch School of Electrical and Computer Engineering, 2001.
- [32] Malhotra R., Kaur T., Deol G. S., DC motor control using fuzzy logic controller, *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, 2011, **8**, 291-296.
- [33] Yüksel İ., *Otomatik kontrol sistem dinamiği ve denetim sistemleri*, 3. Baskı, Ceylan Matbaacılık, İstanbul, 1997.
- [34] Kuo B. C., *Otomatik kontrol sistemleri*, 7. baskı, Çeviri: Atilla Bir, Nobel Matbaacılık, İstanbul, 2009.
- [35] Anwar S., Closed-loop control algorithm for an eddy current braking system, Patent No: US6619760, 2003.
- [36] PIC18f4431 datasheet, Microchip Technology Inc., <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39616d.pdf>, (Ziyaret tarihi: 16.07.2012).
- [37] EasyPIC6 kullanım klavuzu, Mikroelektronika, http://www.mikroe.com/downloads/get/311/easypic6_manual_v100.pdf, (Ziyaret tarihi: 29.06.2012).
- [38] dsPIC30F6014A datasheet, Microchip Technology Inc. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70143E.pdf>, (Ziyaret tarihi: 20.04.2012).
- [39] UNI-DS6 kullanım klavuzu, Mikroelektronika, http://www.mikroe.com/eng/downloads/get/1631/unids6_manual_v100.pdf (Ziyaret tarihi: 20.04.2012).
- [40] CCS C reference manual, CCS Inc., https://www.ccsinfo.com/downloads/ccs_c_manual.pdf (Ziyaret tarihi: 19.10.2012).

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Ergün R. E.**, Uçar M., Ertunç H. M., Cengiz A., A development of electromagnetic retarder controller to stabilise vehicle speed by using PWM technique, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, (Article in Press).

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Ankara' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa' da tamamladı. Ön lisans öğrenimini Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Kontrol Sistemleri Teknolojisi Bölümü' nde tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği Bölümü' nden 2005 yılında Teknik Öğretmen olarak mezun oldu. 2006 - 2009 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' nde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Halen özel bir şirkette Ar-Ge bölüm şefi olarak çalışmakta olup evli ve bir çocuk babasıdır.