

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**LABVIEW TABANLI YENİ BİR HELİSEL BOBİN
ELEKTROMANYETİK FIRLATICI TASARIMI VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT KABADAYI

BALIKESİR, 2018

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**LABVIEW TABANLI YENİ BİR HELİSEL BOBİN
ELEKTROMANYETİK FIRLATICI TASARIMI VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT KABADAYI

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yavuz EGE (Tez Danışmanı)

Doç. Dr. Tayfun UZUNOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Tarık KUNDURACI

BALIKESİR, 2018

KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat KABADAYI tarafından hazırlanan “**LABVIEW TABANLI YENİ BİR HELİSEL BOBİN ELEKTROMANYETİK FIRLATICI TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 18.06.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Yavuz EGE

Üye
Doç. Dr. Tayfun UZUNOĞLU

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Tark KUNDURACI



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**LABVIEW TABANLI YENİ BİR HELİSEL BOBİN ELEKTROMANYETİK
FIRLATICI TASARIMI VE KARAKTERİZASYONU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MURAT KABADAYI
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. YAVUZ EGE)

BALIKESİR, 2018

Bu çalışmada herhangi bir mekanik itici kullanmadan helisel bobin üzerine uygulanan anlık değişken akım ile bobin üzerinde oluşan manyetik alanın mıknatıs mermiye hız kazandırıp fırlatılmasını sağlayacak “Yeni Bir Helisel Bobin Elektromanyetik Fırlatıcı” tasarlanmıştır. Kademeli hız ölçümü için LabVIEW tabanlı bir yazılım geliştirmiş ve bobinlerin ateşleme zamanını değiştirerek çıkış hızını iyileştirmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma, kullanılan yazılım ve hızlandırıcı bobin tasarımı açısından literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır. Geliştirilen LabVIEW tabanlı yazılım sayesinde sürücü bobinlerin içine yerleştirilen optik sistemlerden verilerin alınması, işlenmesi ve tetikleme kontrollerinin yapılması sağlanmıştır. Sıralı 4 helisel bobinin her birinden çıkarken mermide hız artışının olması ve bu hız değerlerinin en yüksek olabilmesi için bobinlerin ateşleme zamanı optimize edilmiştir. Fırlatma işleminde veri iletişimi NI DAQ 6010 veri toplama kartı ile sağlanmıştır. Değişken akım genliğinin artmasının, tetikleme süresinin değiştirilmesinin, mermi boyunun ve çapının büyütülmesinin fırlatıcıyla elde edilebilecek maksimum hıza etkileri araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Elektromanyetik fırlatıcı, Helisel bobin, LabVIEW, Veri toplama, PCI DAQ kart.

ABSTRACT

A NEW HELICAL COIL ELECTROMAGNETIC LAUNCHER DESIGN AND CHARACTERISTICS BASED ON LABVIEW

MSC THESIS

MURAT KABADAYI

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

PHYSICS

(SUPERVISOR: PROF. DR. YAVUZ EGE)

BALIKESİR, 2018

In this study, “A New Helical Coil Electromagnetic Launcher” has been designed which provides magnet bullet to launch with acceleration of momentary alternate current applied on helical coil and also consisted magnetic field on coil without using any kind of mechanic booster. A LabVIEW based software has been developed for fractional velocity measurement and it has been aimed to improve of output speed by changing coils’ ignition time. Whereby LabVIEW based software, importing data, data processing and making triggering controls have been ensured from optical systems which is positioned in driver coils. Coils’ ignition times have been optimized in order to speed up the bullet and also in order that speed values would be at the maximum when the bullet on it’s way out of each 4 in-line helical coil. Data communications have been ensured on launch process with NI DAQ 6010 data acquisition card. Alternate current amplitude increases, changing ignition time and enlarging bullet size and caliber effects have been enquired on acquirable maximum speed with launcher.

KEYWORDS: Electromagnetic launcher, Helical coil, LabVIEW, Data acquisition, PCI DAQ card.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Elektromanyetik Fırlatıcı Kuramı.....	1
1.2 Elektromanyetik Fırlatıcı Çeşitleri.....	2
1.2.1 Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	2
1.2.2 Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	3
1.2.3 Karma Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	5
1.2.4 Doğrusal Hareketli Fırlatıcılar	6
1.3 Grafikselleştirme Dili LabVIEW.....	7
1.3.1 Front Panel	9
1.3.2 Block Diagram.....	11
1.4 Literatürde Elektromanyetik Fırlatıcılar İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	13
2. GELİŞTİRİLEN ELEKTROMANYETİK FIRLATICI SİSTEMİ	21
2.1 Mekanik Sistem.....	21
2.2 Elektronik Sistem.....	29
2.2.1 Optik Sensörlerin Kontrol Devresi	30

2.2.2 Stator Bobinlerini Sürme Devresi	36
2.2.3 Güç Devresi	43
2.3 Geliştirilen LabVIEW Programı.....	45
2.3.1 Programın Veri Toplama Bölümü	45
2.3.2 Programın Stator Bobinleri Tetikleme ve Veri Kayıt Bölümü.....	49
3. GELİŞTİRLEN ELEKTROMANYETİK FIRLATICI SİSTEMİNİN ÇALIŞMASI	53
4. BULGULAR.....	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
6. KAYNAKLAR	69
7. EKLER	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Basit bir elektromanyetik fırlatıcı.....	2
Şekil 1.2: Raylı elektromanyetik fırlatıcı.	3
Şekil 1.3: Raylı fırlatıcının eşdeğer devresi.....	3
Şekil 1.4: Bobin silahı temel yapısı.	5
Şekil 1.5: Karma elektromanyetik fırlatıcı modeli.	6
Şekil 1.6: Üç fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı.....	7
Şekil 1.7: Örnek bir LabVIEW programı için front panel.....	10
Şekil 1.8: Front Panel’de bulunan kontrol paneli.	11
Şekil 1.9: Örnek bir LabVIEW programı için block diagram.	12
Şekil 1.10: Front Panel’de bulunan kontrol paneli.	13
Şekil 2.1: Stator bobin.	21
Şekil 2.2: Akı yoğunlaştırıcı ve klasik bobin ortak endüktans değişim eğrileri.....	22
Şekil 2.3: Stator bobininin dış çapı/iç çapının stator akısına etkisi.	22
Şekil 2.4: Stator bobine ait kesit görünüm.	23
Şekil 2.5: Stator bobin görünümü.....	24
Şekil 2.6: Üzerinden i akımı geçen halkanın merkez ekseninden x kadar uzaktaki manyetik alan.	25
Şekil 2.7: Stator bobini üzerindeki manyetik alan dağılımı.	26
Şekil 2.8: Bobinin merkezinden geçen eksen boyunca manyetik alan değişimi (BT).27	
Şekil 2.9: 5 A akım için sabit mıknatısa etki eden kuvvetin değişimi.....	28
Şekil 2.10: IR optik sensörlerin ve sabit mıknatısın enerjilenilme konumunun genel görünümü.....	29
Şekil 2.11: Mıknatısın alt kısmı stator bobinin a) 1. sarımda, b) 7. sarımda, c) 12. sarımda iken manyetik akı dağılımı.	29

Şekil 2.12: Optik sensörlerin kontrol devresi.	31
Şekil 2.13: Optik sensörden alınan sinyal.	32
Şekil 2.14: CD4093BCN Schmitt Trigger devresinin bağlantı şeması.	33
Şekil 2.15: Schmitt Trigger çıkış sinyali.	33
Şekil 2.16: 4049 Entegresinin bağlantı şeması.	34
Şekil 2.17: 4081 Entegresinin bağlantı şeması.	34
Şekil 2.18: BC237 bağlantı şeması.	35
Şekil 2.19: PC 817 bağlantı şeması.	35
Şekil 2.20: NI 6010 PCI DAQ bağlantı şeması.	36
Şekil 2.21: Stator Bobinlerini Sürme Devresi.	37
Şekil 2.22: İdeal pals transformatörü darbesi (akım veya gerilim).	38
Şekil 2.23: Pals transformatörünün ürettiği sinyal.	39
Şekil 2.24: Tristöre uygulanan gate sinyali.	40
Şekil 2.25: Tristörün gate ucuna uygulanan darbe dizisi.	40
Şekil 2.26: Stator bobini üzerinde oluşan gerilim.	41
Şekil 2.27: Stator bobinleri tetikleme devresi.	42
Şekil 2.28: Elektromanyetik fırlatıcı güç devresi.	43
Şekil 2.29: DSEI-60-12 diyot.	44
Şekil 2.30: 1µF/1000VDC R-C turn-off snubber ve 1.1MΩ' luk direnç.	45
Şekil 2.31: Veri toplama programı akış diyagramı.	47
Şekil 2.32: Veri toplama programı block diagramı.	48
Şekil 2.33: Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programı akış diyagramı.	50
Şekil 2.34: Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programı block diyagramı.	51
Şekil 2.34(devam): Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programı block diyagramı.	52
Şekil 3.1: Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin blok diyagramı.	53

Şekil 3.2: Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin önden görünüşü.	54
Şekil 3.3: Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin arkadan görünüşü.....	54
Şekil 3.4: LabVIEW tabanlı yazılımın ara yüzü.....	55
Şekil 4.1: Çıkış hızınının a) Stator bobin gerilimine göre değişimi, b) Sabit mıknatısın boyuna göre değişimi, c) Sabit mıknatısın çapına göre değişimi.	59
Şekil 4.2: Merminin gerilim değişimine göre stator bobinlerdeki hız değişimi.....	61
Şekil 4.3: Merminin mıknatıs boyuna göre stator bobinlerdeki hız değişimi.....	63
Şekil 4.4: Mıknatısın çapına göre stator bobinlerdeki hız değişimi.	64
Şekil 5.1: 20 V'luk gerilimde stator bobinlerdeki hız değişimi.	65
Şekil 5.2: Stator bobinler arasındaki mesafenin artış şekli.....	66
Şekil 5.3: 21 mm mıknatıs boyu için stator bobindeki hız değişimi.	67

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: LabVIEW terimleri ve geleneksel karşılıkları	9
Tablo 1.2: Elektromanyetik Fırlatıcılar ile yapılan çalışmalara ait parametreler ve sonuçlar.....	19
Tablo 2.1: Stator bobinin teknik özellikleri	23
Tablo 2.2: Çalışmamızdaki değişkenler ve değerleri	27
Tablo 4.1: Geliştirilen manyetik fırlatıcı sistemi ile elde edilen sonuçlar.....	58



SEMBOL LİSTESİ

μ_0	:	Boşluğun manyetik geçirgenliği
r_x (ya da x)	:	Stator bobin ile mıknatıs kutbu arasındaki uzaklık
i	:	Stator bobinden geçen akım
R	:	Stator bobinin iç yarıçapı
B	:	Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu



ÖNSÖZ

Eğitim hayatım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, engin bilgileriyle bana yol gösteren, her konuda yanımda olan değerli danışmanım Prof. Dr. Yavuz EGE'ye teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa ORAMIK ve Öğr. Gör. Dr. Hakan ÇITAK'a gönülden teşekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen, bana sabır gösteren ve daima yanımda olan sevgili eşim Merve KABADAYI'ya, bu günlere gelmemi sağlayan, her güçlükte yanımda olan ve güvenini hiçbir zaman esirgemeyen annem Nevriste KABADAYI ve babam Recep KABADAYI'ya , doğduğumdan bu yana her konuda yanımda hissetiğim ablalarım Nilgün KABADAYI ve Hatice SERTKAYA'ya minnettarım.

Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Bu bölümde sırasıyla elektromanyetik fırlatıcıların çalışma prensibi ve fırlatıcı çeşitleri, elektromanyetik fırlatıcıların kontrolünde kullanılan grafiksel programlama dili olan LabVIEW ve literatürde elektromanyetik fırlatıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

1.1 Elektromanyetik Fırlatıcı Kuramı

Amper, Biot-Savart, Faraday, Gauss Yasaları ve Maxwell Denklemleri elektromanyetizmanın temellerini oluşturmaktadır. Elektromanyetik fırlatıcılar da bu elektromanyetizma yasalarının bir uygulaması olarak düşünülebilir. Elektromanyetik fırlatıcılarda fırlatma işlemi oluşturulan manyetik alanın kullanılarak fırlatılacak olan nesneye bir manyetik kuvvet etki etmesi prensibine dayanır. Yarıçapı R olan ve üzerinden i akımı geçen bir halkanın merkezinden x kadar uzaklıktaki manyetik alanın büyüklüğü Biot-Savart yasası ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

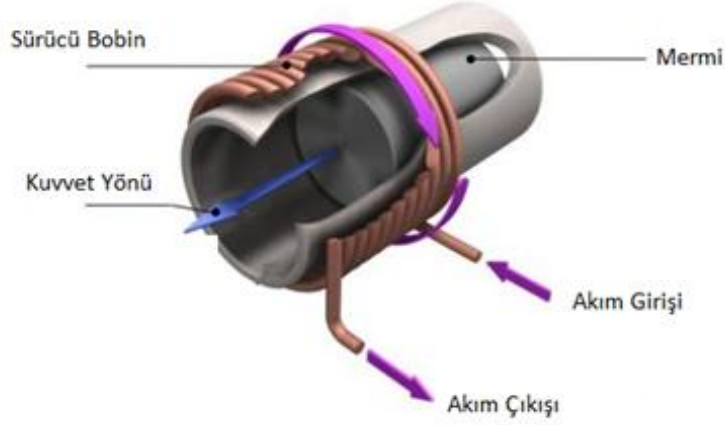
$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1.1)$$

Üzerinden akım geçen bir iletken bir manyetik alan içine konulursa bu iletkene bir kuvvet etki eder. Bu kuvvet

$$\vec{F} = i \cdot \vec{L} \times \vec{B} \quad (1.2)$$

ile ifade edilebilir.

Elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinde ise bu kuvvete bağlı olarak merminin fırlatılması gerçekleştirilmektedir. Teorik olarak elektromanyetik kuvvetin herhangi bir limiti bulunmadığı için fırlatılan nesne için bir hız sınırından bahsedilemez. Bu tip uygulamalardaki hız sınırı sadece teknolojik bir sınırdır. Şekil 1.1' de basit bir elektromanyetik fırlatıcının yapısı verilmiştir.



Şekil 1.1: Basit bir elektromanyetik fırlatıcı.

Bir elektromanyetik fırlatma sistemi güç kaynağı, lineer hızlandırıcı ve sürüş kontrol sisteminden oluşmaktadır [1]. Özellikle, sabit mıknatıslı lineer senkron motorları (PMSM) küçük kapasiteli, yüksek güç faktörü ve yüksek verimli olmaları sebebiyle daha avantajlıdır [2,3]. Elektromanyetik fırlatıcılar yapısına göre 4'e ayrılır.

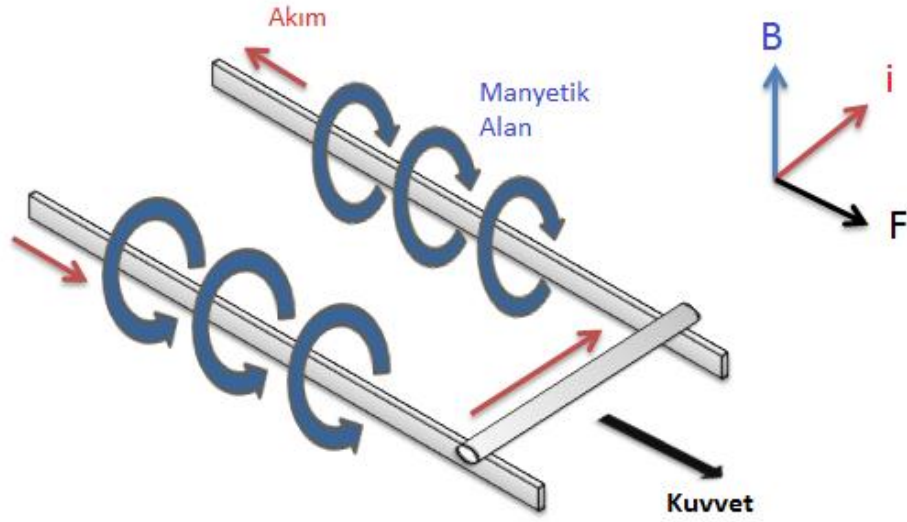
- Raylı elektromanyetik fırlatıcılar
- Sargılı elektromanyetik fırlatıcılar
- Karma elektromanyetik fırlatıcılar
- Doğrusal elektromanyetik fırlatıcılar

1.2 Elektromanyetik Fırlatıcı Çeşitleri

1.2.1 Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar

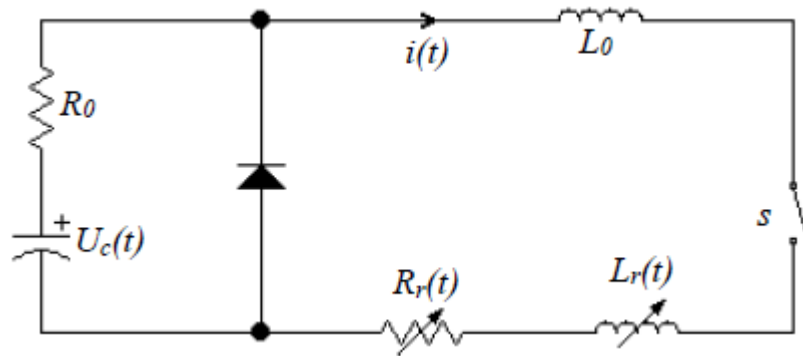
Raylı elektromanyetik fırlatıcılar küçük kütleli bir iletken merminin, bir doğru akım (DC) güç kaynağına bağlı bir çift iletken ray arasında üzerinden akım geçirilmesiyle oluşturulan Lorentz kuvvetine dayalı hareketi söz konusudur [4-6], [7-13]. Raylı elektromanyetik fırlatıcılarda genellikle ray malzemesi olarak bakır kullanılır. Mermiyi yüksek hızlara çıkarabilecek fırlatıcılarda ise fiziksel etkilere karşı daha dayanıklı, iletkenliği yüksek, mega amper düzeyindeki akımları taşıyabilecek özel raylar kullanılmaktadır. Raylı elektromanyetik fırlatıcılarda ray ömrü önemli bir faktördür. Yüksek akım sebebi ile oluşan ısınma, fırlatılan cismin

rayda oluşturduğu tahribat, ray oyuk geometrisi gibi birçok faktör üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Şekil 1.2’de raylı fırlatıcıların genel yapısı gösterilmektedir [14].



Şekil 1.2: Raylı elektromanyetik fırlatıcı.

Kondansatörle beslenen raylı bir fırlatıcının basit devresi Şekil 1.3’de verilmiştir. Mermiyi sembolize eden S anahtarı kapatıldığında, kondansatör raylar ve mermi üzerinden akım geçmesini sağlar. Akımda oluşabilecek dalgalanmayı önlemek için ise yüksek güçlü doğrultucu diyot kullanılmıştır [15].



Şekil 1.3: Raylı fırlatıcının eşdeğer devresi.

1.2.2 Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılar

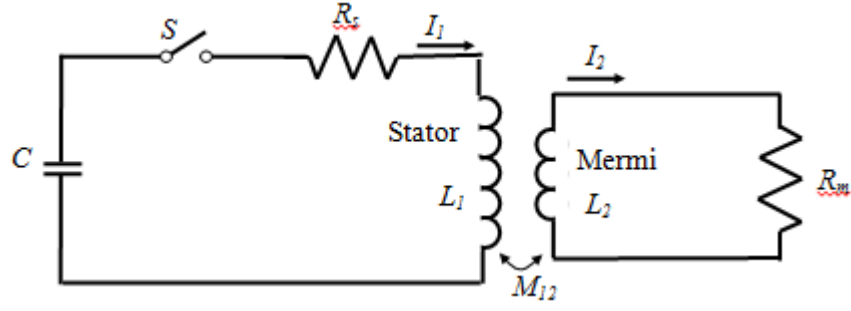
Sargılı elektromanyetik fırlatma sisteminde, elektrik akımının aynı ekseni stator ve mermi bobinlerinde uygun bir sistemle zıt yönde geçmesi sağlanmakta ve

Fleming'in sağ el kuralından kaynaklanan elektromanyetik kuvvet ile mermi bobini itilmektedir [16-17].

Bazı bobin silahı sistemlerinde ise, mermi (projectile) bobini ile sürücü bobin arasında mekanik veya elektriksel bir bağlantı bulunmamaktadır. Zamanla değişen sürücü bobini akımı, mermi bobininde bir akım indüklemektedir. Böylece iki bobin arasında Lenz kanununa göre bir itme kuvveti oluşmaktadır. Çok kademeli (çok stator bobinli) bobin silahlarında bu itme işlemi her kademedede tekrarlanmaktadır. Bu tür sistemlerde mermi ve sürücü bobin arasında sadece manyetik kuplaj vardır. Bu nedenle mermi bobini ile stator bobini arasındaki eşzamanlılık, özellikle çok kademeli indüksiyon bobin silahlarında son derece önemlidir. Sistemdeki sürücü bobinin enerjilendirilmesi için, mermi bobininin uygun kuplaj bölgesinde olması ve bu bölgeyi terk etmeden de sürücü bobine aktarılacak enerjinin tamamının aktarılması gerekmektedir. Mermi bobini hızı arttıkça bu bobinin uygun kuplaj bölgesinde kalma süresi azaltmakta ve bu da sinyal yayılma ve anahtarlama zamanını kısaltmaktadır.

Mermi hareketinin kontrolü büyük bir öneme sahip olup, merminin uygun bölgeye yaklaşımı, fırçalarla [18] veya optik olarak algılanmış [19-21] ve algılanan bu sinyal sürücü bobini enerjilendirecek kontrol sinyali olarak kullanılmaktadır. Uygun kuplaj bölgesini tespit etmek için mermi hızına bağlı olarak önceden bir EPROM a kaydedilen bir look-up tablo ile bir sonraki kademe için ateşleme zamanı tespit edilmektedir [22]. Laserli düzeneklerle mermi hızı ölçülen ve buna göre bir sonraki kademedeki sürücü bobinin enerjilendirilmesi için gereken gecikmeyi sağlayan başka çalışmalar da mevcuttur [23-24].

Temel yapısı Şekil 1.4'de verilen coil gun sisteminde besleme gerilimi C kondansatörü tarafından sağlanmaktadır. S anahtarı kapatıldığında stator akımı (I_1), stator devresi direncinin (R_S) ve stator endüktansının (L_1) üzerinden akması sağlanır. I_2 mermi akımını, L_2 mermi indüktansını ve R_m ise mermi direncini göstermektedir.

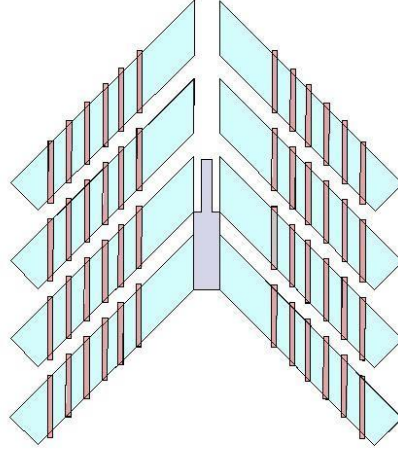


Şekil 1.4: Bobin silahı temel yapısı.

Yapılan çalışmalarda yoğun bir şekilde bobinli ve raylı fırlatma sistemleri yer almaktadır [25]. Bu çalışmalarda genel olarak bobin silahlarının ray silahlarına kıyasla daha etkili oldukları teorik olarak kabul bulur [26-28]. Ateşleme süresinde namlunun tamamında mekanik darbeler üretmek, merminin ray silahına kıyasla daha etkili bir şekilde namluyu terk etmesini sağlayacaktır. Ayrıca bobin silahının güç kaynağı ihtiyacı ray silahına nazaran daha esnektir. Bobin silahının yük empedansı tasarımı sırasında belirlenebilmekte ve daha yüksek gerilimde daha düşük akımlarda kullanılabilir. Bobin silahları bu avantajlara sahip olmasına karşın her kademedede ayrı bir anahtarlama elemanının kullanılma zorunluluğu anahtarlama ve zamanlamayı daha karmaşık hale getirmektedir.

1.2.3 Karma Elektromanyetik Fırlatıcılar

Karma elektromanyetik fırlatıcıların yapısında, hem raylı hem de sargılı fırlatıcılar bulunmaktadır. Karma Fırlatıcılar, yüksek akımlara ihtiyaç duyan raylı fırlatıcılar ve yüksek maliyetlere sahip sargılı fırlatıcılara göre en büyük avantajı aynı sonuçların alınabilmesi için daha az akıma gereksinim duymalarıdır. Ayrıca karma fırlatıcıların tasarımları ve oluşturulmaları raylı ve sargılı fırlatıcılara kıyasla daha basittir [29]. Karma fırlatıcılara ait model Şekil 1.5'de görülmektedir.



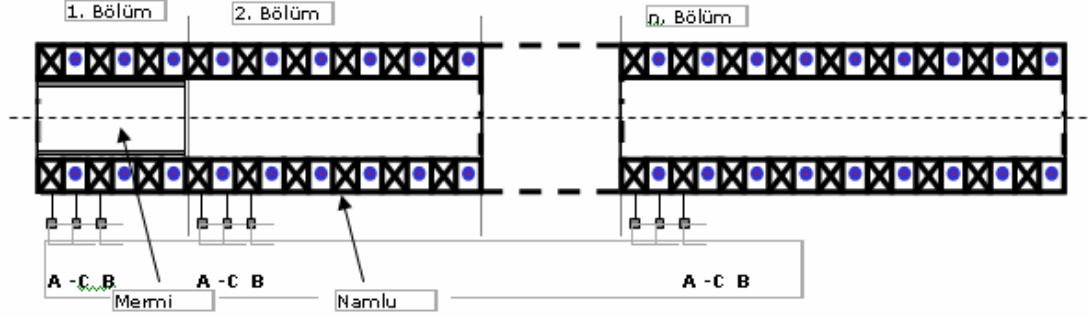
Şekil 1.5: Karma elektromanyetik fırlatıcı modeli.

1.2.4 Doğrusal Hareketli Fırlatıcılar

Doğrusal Hareketli Fırlatıcılar, asenkron motorların çalışma prensibine göre çalışan hava nüvesine sahip sargılı fırlatıcılardır. Namluda bulunan sargılar, çok fazlı alternatif akım kaynağı tarafından beslenerek yürüyen dalganın oluşmasını sağlamaktadır. Mermi kapsülü içi boş alüminyum tüpten meydana gelmektedir. Enerji kaynağı olarak kapasitörler veya jeneratör sistemi kullanılmaktadır. Enerji verimliliğini arttırabilmek adına namlu birden daha fazla bölmeden oluşabilir ve her bölüm farklı frekansa sahip enerji kaynakları ile beslenmelidir. Bir bölümün sahip olduğu enerji kaynağının frekansı ondan önce gelen bölümünkinden daha fazladır [30,31].

Yüksek itme yoğunluklu doğrusal motorlar, elektromanyetik fırlatma sistemleri için bir tahrik kaynağı olarak etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Çünkü bu motorlar, hızlı hızlanma özelliği, yüksek kontrol edilebilirlik ve kolay bakım gibi belirli özelliklere sahiptir [32-34].

Şekil 1.6'da üç fazlı, çok bölmeli bir doğrusal hareketli fırlatıcının basit yapısı verilmiştir.



Şekil 1.6: Üç fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı.

1.3 Grafikselle Programlama Dili LabVIEW

LabVIEW, “Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench” kelimelerinin kısaltılmasından elde edilen bir isimdir ve bir programlama ortamını tanımlar. LabVIEW; C, C++ veya Java gibi geleneksel dillerden farklıdır. Bu dillerde program metin yazarak yapılırken, LabVIEW grafiksel olarak kullanılan bir programlama dilidir. Bu programda, içinden veri akan hatlar yardımıyla fonksiyonel noktaları birbirine bağlayarak bir grafik gösterim üzerinden program yapılır. Bu özellikleri sayesinde programlama dillerinin bilinmesine ihtiyaç duymaz.

National Instruments (NI) firması tarafından geliştirilen LabVIEW, verileri analiz etmek, ölçümlerini almak ve sonuçlarını kullanıcıya sunmak için özel olarak geliştirilmiştir. LabVIEW ayrıca ikon haline getirilmiş hazır fonksiyonları içeren gelişmiş bir grafiksel kullanıcı ara yüzüne sahiptir. Böylece klasik programlama dillerinde karşılaşılan birçok güçlük ortadan kalkmıştır.

LabVIEW tabanlı olarak geliştirilen laboratuvar cihazları standart yazılım temelli laboratuvar cihazlarından daha fazla esneklik sağlar. İhtiyaç doğrultusunda geliştirilen LabVIEW tabanlı laboratuvar cihazlarının istenilen parametrelerinde değişiklik yapılması, anlık olarak alınan bilgilerin izlenmesi ve işlenmesi mümkündür. Bu da kullanıcıya hem iş kolaylığı hemde maddi yönden kolaylık sağlamaktadır.

LabVIEW programları görünüş ve çalışma şekli ile laboratuvarlarda kullanılan osiloskop, sinyal jeneratörü gibi fiziksel enstrümanlara benzediği için Sanal Enstrüman veya VI (Virtual Instrument) olarak adlandırılır. Her VI, kullanıcı

arabiriminden veya başka kaynaklar tarafından girilen bilgileri kullanabilir, bu bilgileri görüntüleyebilir ve başka dosyalara veya bilgisayarlara taşıyabilir.

Ayrıca LABVIEW normal program yazımının yanında kullanıcıya interaktif bir program oluşturma fırsatı da vermektedir. Yazılım çalıştığı esnada parametre değişimleri yapılabilir. Herhangi bir bağlantı hattından geçen verinin niteliğine kolaylıkla ulaşılabilir. Windows, Mac OSX ve Linux platformlarında çalışabildiği gibi Microsoft Cep Bilgisayarı, Palm OS, Field Programmable Gate Arrays (FPGA), Digital Signal Processors (DSP) ve Arduino gibi gömülü platformlar içeren çeşitli mikroşlemcilerle birlikte de kullanılabilir. LABVIEW Grafiksel Arayüz Programı tüm işletim sistemlerinde çalışabilmektedir. Ayrıca diğer programlama dillerine de yazılım dönüşümleri yapılabilir [35].

LabVIEW programının dış dünya ile bilgisayar arasındaki köprü kurması amacı ile National Instruments firması tarafından geliştirilen veri toplama kartları olarak isimlendirilen (Data Acquisition Card - DAQ) ara birimler kullanılmaktadır. Bu kartlar sayesinde ölçüm sonuçları program tarafından interaktif bir şekilde kullanıcıya sunulabilir, kolaylıkla işlenebilir, verinin analizi yapılabilir, depolama ve veri dönüşümü gerçekleştirilebilir. Ayrıca veri toplama kartları bir çok farklı ölçüm imkanları sağlamaktadır. Bu kartlar basınç, nem, sıcaklık, hız, zaman, ışık şiddeti gibi fiziksel niceliklerin elektrik sinyaline çevrilmesiyle bilgisayar ortamına alınmasını sağlamaktadır. Kartların bilgisayar ile bağlantısı USB üzerinden yapılabileceği gibi anakart üzerinden de yapılabilir. ELVIS, MyDAQ, USRP ve MyRIO olarak adlandırılan dört farklı eğitim kartı da bulunan NI firmasının, birbirinden farklı sayıda analog ve dijital giriş-çıkış terminallerine sahip kartların yanı sıra FPGA tabanlı kartları da bulunmaktadır. Kullanıcının terminal ve hassasiyet ihtiyacına göre seçim yapmasına olanak sağlaması ve programlama dilinin metin tabanlı (text-based) dillere göre oldukça görsel olması bu yazılım dilini ve veri toplama kartlarını öne çıkarmaktadır.

LabVIEW, programlama esnasında kullanıcılara yardımcı olabilecek ve hafıza işgal etmeyen çok geniş bir fonksiyon ve alt program kütüphanelerine sahiptir. LabVIEW, Data Acquisition (DAQ) ve General Purpose Interface Bus (GPIB) için kod kütüphaneleri gibi spesifik kütüphane uygulamalarını ve seri aygıt kontrolü, veri analizi, veri sunumu, veri depolama ve internet üzerinden haberleşme gibi farklı

uygulamaları da içerir. Analiz kütüphanesi; sinyal üretme, sinyal işleme filtreleri, Windows istatistikleri ve regresyonları, lineer cebir ve array aritmetiği gibi çok yönlü ve kullanılışlı fonksiyonları bünyesinde barındırmaktadır.

LabVIEW programı veri alışverişi ve ölçüm yapılabilecek her alanda kullanılmaktadır. Endüstri, enerji, otomotiv, uzay araştırmaları, su altı çalışmaları, gömülü madde kontrol ve analizi, elektrik ve elektronik gibi birçok sektörde ön plana çıkmaktadır.

LabVIEW’de yer alan terimler ve onların geleneksel programlama dillerindeki eşdeğerleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1: LabVIEW terimleri ve geleneksel karşılıkları

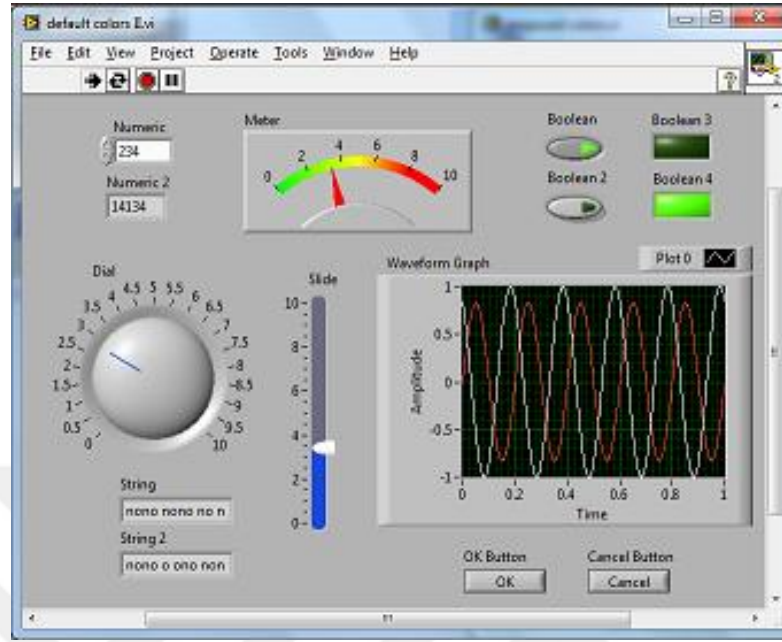
Labview	Programlama Dilleri
VI	Program
Fonksiyon	Fonksiyon veya metot
SubVI	Alt yordam, alt program, nesne
Front Panel	Kullanıcı ara yüzü
Block Diyagram	Program kodu
G	C, C++, Java, Pascal, BASIC vb.

Tablo 1.1’de verildiği gibi LabVIEW programı “Front Panel” ve “Block Diyagram” olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Front panel kullanıcı ara yüzünün hazırlandığı formlara karşılık gelen, kullanıcı ara yüzü olarak görev yapan bölüm, Block Diyagram ise ön paneli oluşturan görsel nesnelerin fonksiyonlarının kontrol edildiği bölümdür [36].

1.3.1 Front Panel

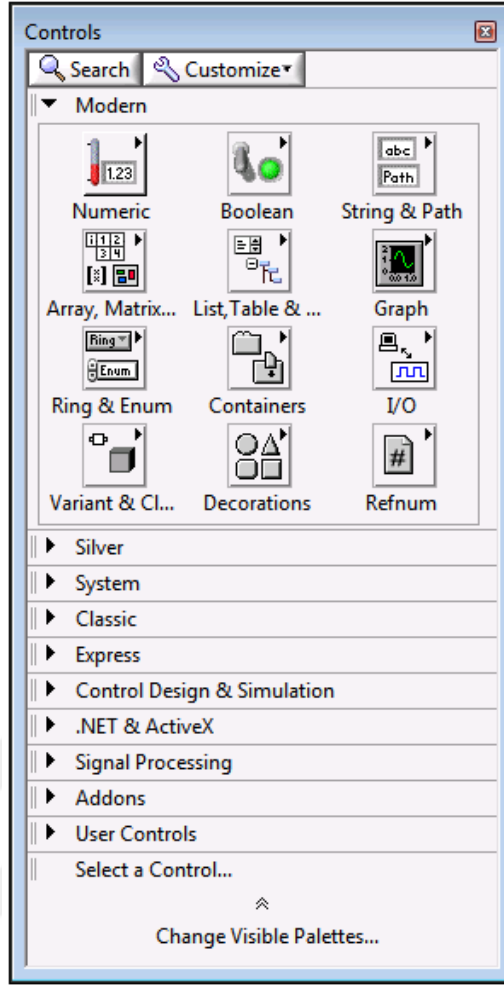
Front panel, bir VI’ın interaktif kullanıcı ara yüzüdür. Fiziksel bir aletin ön görünüşüne benzediği için Front Panel ismini almıştır. Front Panel’de basılabilir düğmeler, grafikler, kullanıcı girişleri gibi diğer birçok kontrol yer alabilir. Ayrıca bu panelde fare veya klavye kullanılarak veri girilebilir ve daha sonra da program tarafından üretilen sonuçlar görülebilmektedir. Programa ait veri çıktıları LabVIEW kullanıcılarına yine bu panel üzerinden verilmektedir. Veri çıktıları anlık grafikler,

tablolar ve göstergeler (indikatör) içerebilmektedir. LabVIEW programına ait örnek Front Panel görüntüsü Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7: Örnek bir LabVIEW programı için front panel.

Şekil 1.7’de ön panel de yer alan tüm gösterge ve kontrollerin bir arada bulunduğu araç kutusu kontrol paleti olarak isimlendirilmiştir. Bu palet Window=>Show Controls Palette menüsü aracılığıyla ya da farenin sağ tıklanması sonrasında görüntülenebilmektedir. Konumu ve boyutu istenildiği gibi ayarlanabilir bir pencere görünümündedir (304). Front Panel üzerinde yer alan kontrol paleti Şekil 1.8’de gösterilmiştir.

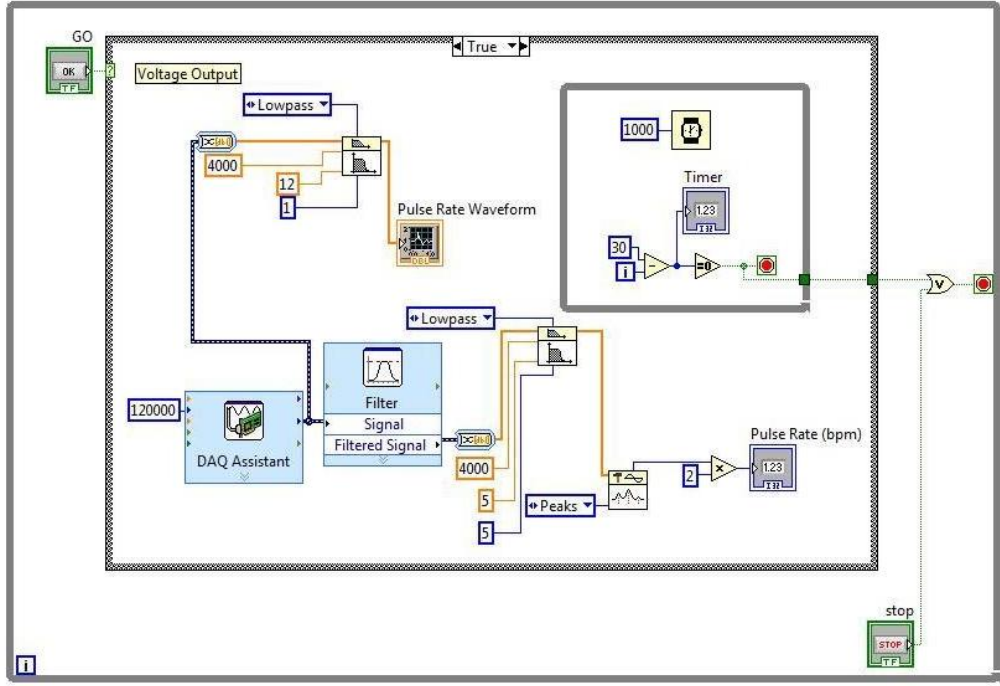


Şekil 1.8: Front Panel’de bulunan kontrol paneli.

1.3.2 Block Diagram

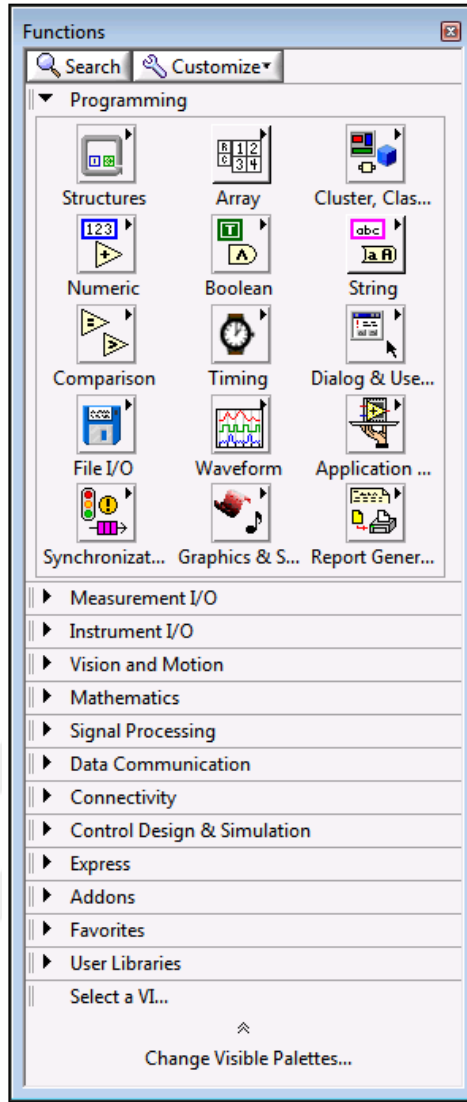
Block diagram içinde fonksiyonların (subVI) tanımlandığı grafiksel kaynak kodları içeren bölümdür. Klasik programlama dillerindeki kod penceresinin görevini yerine getiren “Blok Diyagram”, programın grafiksel olarak düzenlendiği paneldir. Front panelde bulunan nesnelerin fonksiyonları bu bölüm aracılığıyla kontrol edilmektedir. Front panelde bulunan her bir nesne blok diyagramda terminal olarak yer almaktadır. Bu terminaller Front Panel ile blok diyagram arasındaki bilgi alış verişini sağlayan giriş-çıkış portlarıdır. Veri ön paneldeki kontrol elemanlarına girildiğinde blok diyagrama kontrol terminallerinden geçer. Derleme boyunca veri blok diyagramın çıkışı olan gösterge terminallerine doğru akar, blok diyagramın sonunda tekrar ön panele geçer ve ön panel göstergelerinde görüntülenir. Block Diyagram ayrıca alt-programlar, fonksiyonlar, sabit değerler ve çeşitli yapılar

(döngüler) içermektedir. Block Diyagramda yer alan terminaller arasındaki veri akışını sağlamak için uygun bağlantı hatları çizilerek program oluşturulmuş olur. Bu panel aracılığıyla veri, kullanıcıdan programa veya programdan kullanıcıya gidebilmektedir. LabVIEW programına ait örnek Block Diyagram görüntüsü Şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.9: Örnek bir LabVIEW programı için block diagram.

Şekil 1.9’da block diagramı tasarlamak için kullanılan tüm fonksiyon (VI) ve alt VI’ların bir arada bulunduğu araç kutusu fonksiyon paleti olarak adlandırılmıştır. Window=>Show Functions Palette menüsü aracılığıyla ya da farenin sağ tıklanması sonrasında görüntülenebilmektedir. Konumu ve boyutu istenildiği gibi ayarlanabilir bir pencere görünümündedir. Block diagram üzerinde yer alan fonksiyon paleti Şekil 1.10’da gösterilmiştir.



Şekil 1.10: Front Panel’de bulunan kontrol paneli.

Çalışmamızda geliştirilen manyetik fırlatıcı sisteminin kontrolü de LabVIEW programıyla tasarlanan yazılımla gerçekleştirilmiştir.

1.4 Literatürde Elektromanyetik Fırlatıcılar İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Günümüzde ülkelerin kendilerini güçlü bir şekilde savunması, güçlü silahlarla sağlanmaktadır. Bir silahı güçlü kılan ise menzili, tahrip etkisi ve kullanım kolaylığıdır. Hedefe isabet eden merminin tahribatı için vazgeçilmez parametre ise hızdır [37].

Klasik silah ve uydu fırlatma sistemleri, kimyasal patlama enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesi ile gerçekleşmektedir. Bu sistemde patlayıcı olarak barut kullanılmaktadır. Barutun patlaması sırasında ses, alev ve zararlı gazlar meydana gelmektedir ve merminin hedef hızı da düşüktür. Merminin namludan çıkış hızının değiştirilmesi ancak üretim esnasında sağlanabilmektedir. Ayrıca mühimmatın depolanması, zamanla bozulması, kütesinin fazla olması ve maliyetinin yüksek olması da klasik silahların olumsuz yönlerindedir. Elektromanyetik fırlatıcı (EML) sistemleri ise, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesiyle gerçekleşmektedir [38]. Bu fırlatıcılarda stator bobinlere verilecek elektrik akımı kontrol edilerek mermi bobinin hızı değiştirilebilmektedir [39]. Ayrıca akımın büyüklüğünde bir sınır olmadığı için hızlandırılan nesnenin de bir hız limiti yoktur. Elektromanyetik fırlatıcıları bu denli önemli kılan özellik ise gelişmeye açık olmasıdır.

Elektromanyetik fırlatıcılar teknolojik gelişmelere açık ve geliştirilebilir bir yapıya sahip olduğu için birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalarda örneğin elektromanyetik silah sistemleri, uçak gemilerinden uçakların fırlatılması, insansız hava araçları [40], tuzağa karşı önlem [41,42], güdümlü silah sistemlerine karşı koruma, havan [43], deniz altı ve gemilerden torpido fırlatılması, zırh delme, düşük-orta hız uygulamaları (füze fırlatma [44]), yüksek hız uygulamaları (uzun menzilli silahlar [45]), yüksek hız uygulamaları [46-50], ve şok ve titreşim testi [51,52] için EML sistemleri geliştirilmiştir.

Bilimsel ve Teknolojik araştırmalar büyük bir hızla gelişmekte ve kendini yenilemektedir. Bu gelişim özellikle askeri alanda kullanıma uygun silahların güçlendirilmesine ve özelliklerinin artırılmasına imkân sağlamıştır. Gelişim aşamasında bulunan askeri silahlardan biri de elektromanyetik fırlatıcılardır (EMF) [37].

Yalnızca bir yüzyıllık geçmişe sahip olan elektromanyetik dalgalar, yaşadığımız hayatın içerisine hızlı bir şekilde giriş yapmış ve pek çok alanda ya kullanım aşamasında bulunmakta ya da geliştirilme aşamasındadır. Elektrik ve manyetik alanlar yüzyıllar öncesinde insanoğlu tarafından fark edilmesine karşın elektromanyetik fırlatıcılar birçok ülkede son 30 yılda önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır [53].

Elektromanyetik fırlatıcı ile ilgili çalışmalar 1844 yılına dayanmaktadır [54,55]. İlk çalışma birkaç gramdan daha ağır kütlelerin yüksek hızlarla fırlatılabileceğini göstermek için yapılmıştır [56]. Bilimsel olarak yapılan ilk çalışma ise 1845 yılında Wheastoen tarafından Colombia üniversitesi bünyesinde yapılmıştır. Yapılan çalışmada 1360 g kadar kütleye sahip olan pek çok demir ve çeliği manyetik enerji ile fırlatmayı başarmıştır [57]. Fırlatıcılarla ilgili bir başka çalışma ise 1905 yılında Birkeland tarafından yapılmıştır [58]. Birkeland gerçekleştirmiş olduğu deneylerde bobin içerisinde bulunan demir parçacıklarının itilerek bir mermi gibi davrandığını gözlemlemiştir. Böylelikle sürücü bobin dizileri tarafından manyetik olarak hızlandırılan demir mermilerden yararlanarak ilk elektromanyetik silahını üretmiştir. Birkeland yapmış olduğu bu elektromanyetik silahın patentini almıştır. Daha sonrasında gerçekleştirdiği deneyde mermi olarak demir yerine bobin denemiştir. Yapılan bu çalışmalarda Birkeland'ın fırlatıcı bobinlerin enerjilendirme zamanları konusundaki bulguları önem arz etmektedir. Mermi geçişi esnasında mermi üzerine uygulanmakta olan gerilimin, sürücü bobinleri ile sağlanan ters elektromanyetik kuvvete denk olabilmesi için sürücü bobinlerinin enerjilendirilmesinin sıfır geçişi sırasında yapılması gerekmektedir. Birkeland yaptığı çalışmalarda mermi hızını en fazla 100 m/s olarak tespit etmiştir. Merminin daha yüksek hızlara ulaşabilmesi için gerekli olan enerjiyi bir saniyelik bir süre içerisinde mermiye ulaştırabilmek için besleme kaynağına ihtiyaç duyulduğu ortaya çıkarılmıştır. Birkeland'ın çalışmaları Egeland tarafından 1989 yılında "Birkeland's Electromagnetic Gun: A Historical Review" adı altında yayınlanmıştır [59].

1916 yılında Fauchon Villeplee tarafından elektromanyetik silah çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda 30-50 mm'lik mermiler geliştirilmiş ve 1916-1919 yılları arasında çeşitli patentler alınmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalar kitap haline getirilip yayınlanmıştır. Bu kitapta Villeplee'nin çalışmaları açık bir şekilde anlatılmıştır. Villeplee 270 mm uzunluğa ve 50 g ağırlığa sahip mermiler yapıp, 2 metre namlu uzunluğuna sahip bir silah geliştirmiştir. Bu silah ile 40-50 voltluk gerilim altında 5 kA'lık akım geçirilerek mermilerin 200 m/s'lik hıza ulaşabileceğini hesaplamıştır. Korol'kov 1923 yılında Villeplee'nin çalışmalarını inceleyerek bir rapor yayınlamıştır [54].

1942-1944 yılları arasında Japonya'da yapılan çalışmalar ile 2 kg kütledeki cisimleri 335 m/s hıza çıkarabilen fırlatıcılar yapılmıştır [54].

1961 yılında ise Thom ve Norwood kayan kontaklı fırlatıcıları üretmişlerdir. Fırlatıcının yapısında dört kayan kontak mevcuttur. Birinci kontak, kaynak rayından sürülen bobine akım taşımaktadır. İkinci kontak, sürülen bobinden sürücü bobini beslemektedir. Üçüncü kontak, sürücü bobinden alınan akımı son kontak ile besleme rayına tekrardan geri vermektedir [60].

1978 yılında Amerika Savunma Bakanlığı birçok bilim adamı ve mühendis ile elektromanyetik fırlatıcılar hakkında paneller ve toplantılar düzenlemiştir. Yapılan toplantılarla EML sistemleri üzerine ilgi artmış ve var olan teknoloji ile neler yapılabileceği düşünülmüştür. Ayrıca gelecek zamanlarda yapılması gerekenler de planlanmıştır [61]. Elektromanyetik fırlatıcılara olan önemin artmasıyla önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. 1980 yılında yapılan elektrikli silahlar ve fırlatıcılar sempozyumunda teknolojinin o anki durumu konuşulmuştur [62]. Richard Marshall plastik bir mermiyi 6 km/s hızla fırlatmayı gerçekleştirmiştir. Henry Kolm ise senkron bobin silahı kullanarak daha büyük kütleli mermileri daha küçük hızlarla fırlatmışlardır [63].

1989 yılında Fransa ve Almanya'nın başlattığı elektromanyetik fırlatıcı araştırma programı, 1993 yılında Hollanda'nın katılımıyla devam ettirilmiştir. Bu çalışmadaki amaç metal kütleleri daha önce ulaşılamamış hızlara çıkarmaktır. Yapılan deneylerde 1 kg'lık mermi 2600 m/s hıza çıkarılmıştır [55].

1990 döneminde Sandia Ulusal Laboratuvarlarında selenoidal bobinler ile Bobinli Elektromanyetik Fırlatıcılar üzerine çalışılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan düz tabanlı mermi, sürücü bobinlere ulaştığı anda anahtarlama devresinden bobinlere akımın verilmesi, mermi üzerinde manyetik alanın tersi yönünde akımın indüklenmesine ve mermiyi iten bir kuvvetin oluşmasına neden olmuştur. Gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda 150 kg ağırlığa sahip düz tabakalı merminin hızının 1 km/s, 10 g ve 5 g ağırlıklı silindirik mermilerin hızının ise 335 m/s hıza ulaştığı gözlenmiştir [58].

Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte elektromanyetik fırlatıcıların önemi artmış ve yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. 2003 yılında yapılan bir çalışmada 16,3 mm uzunluğunda ve 19,4 mm çapında statora sahip olan helisel bir fırlatıcı kullanılmıştır. Ortalama 16 g'lık mermiler ile gerçekleştirilen deneylerde 6 kJ'lük kapasitif enerji kaynağı ile mermiler 170 m/s hıza ivmelendirilmiştir. Tüm deneylerde elde edilen en yüksek verim (elektrik enerjisinden merminin kinetik enerjisine dönüşen) % 5.4 olarak bulunmuştur [64].

2010 yılında yapılan bir çalışmada 2,05 m uzunluğunda 20x25 mm² namluya sahip bir raylı elektromanyetik fırlatıcı tasarlanmıştır. 22 mm uzunluğunda ve alüminyumdan yapılan bir mermi kullanılmıştır. Raylar ise saf bakırdan üretilmiştir. Fırlatıcı 1,6 MJ maksimum enerji depolama kapasitesine sahip bir kapasitif güç kaynağı ile beslenmiştir. Güç kaynağı 24 modülden oluşmaktadır ve her biri 600 µF ve 15 kV'dur. Çalışma sonucunda elektromanyetik silahtaki enerji kayıplarının sebepleri araştırılmıştır. Gerçekleştirilen 3 atış sonucunda enerjinin büyük bir kısmının omik kayıp (%43.9, %51.8, %52.5) olarak raylarda meydana geldiği bulunmuştur. Mermiye aktarılan kinetik enerji deneylerde sırasıyla % 17.0, % 13.1 ve % 12.6 olarak hesaplanmıştır. Mermi ve raylar arasındaki sürtünme sonucu kaybolan enerji de ortalama % 4.8 ve kapasitör ile indüktörlerde kalan artık enerjinin toplam ortalama % 2.8 olduğu görülmüştür [53].

2010 yılında yapılan bir başka çalışmada ise "Multipole field electromagnetic launcher" olarak adlandırılan yeni bir fırlatıcı dizaynı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Merminin alüminyum olarak tasarlandığı çalışmada fırlatıcı 400 µF ve 50 kV'luk kondansatör ile sürülmüştür. Sonuçta böyle bir tasarımın geleneksel fırlatıcılara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Gelecekte böyle bir tasarımın roket fırlatılmasında kullanılabileceği belirtilmiştir. Böyle bir tasarımın geliştirilebilmesi için enerji kayıplarının azaltılması adına süper iletken kablolar kullanılabileceği belirtilmiştir [65].

2011 yılında yapılan bir çalışmada farklı kol uzunluklarına sahip (15, 20, 25, 30, 35 mm) C-şeklindeki mermilerin 20 mm çaplı bir raylı fırlatıcıdan fırlatılması ile ilgili deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde mermiler üzerinden ark oluşturmadan geçirilebilecek maksimum akımlar ölçülmüştür. Bunun yanı sıra deneylerde kol uzunluğunun artması (15 mm'den 25 mm'ye kadar) geçen akımı artırırken kol

uzunluğu 25 mm'ye ulaştığında artış durmaktadır. Bunun sebebi çalışmada fırlatma esnasında mermi geometrisinde meydana gelen bozulmalar olarak açıklanmıştır. Deneyde mermiler üzerinden geçirilen akımlar 200 kA, 275 kA, 300 kA ve 325 kA'dir [66].

“Multipole field electromagnetic launcher” ilgili yapılan bir diğer çalışmada (2013) 100 μ F'lık bir kondansatör 3000 V yüklenerek 50,4 g'lık bir mermiyi 13,3 m/s hıza ulaştırmıştır. 6 farklı sürücü bobinden oluşan altıgen sistemde A-B-C-D olarak adlandırılan 4 farklı bobin beslemesi test edilmiştir. Bu test sonucunda fırlatıcının en verimli çalıştığı tasarımın bir bobinin içeri yanındakinin dışarı yönde manyetik alan oluşturduğu dizilim olduğu grlmştir. Bu alışma aynı zamanda simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir [67].

2013 yılında yapılan farklı bir çalışmada ise insansız hava araçları için mekanik fırlatma sistemlerine alternatif bir elektromanyetik fırlatıcı sistemde kullanılmak üzere tek taraflı lineer indüksiyon motoru tasarlanarak tasarım yazılımı geliştirilmiştir [68].

Özellikle son yıllarda elektromanyetik fırlatıcılar ile yapılan çalışmalara ait parametreler ve sonuçlar Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1.2: Elektromanyetik Fırlatıcılar ile yapılan çalışmalara ait parametreler ve sonuçlar

Ref. Nu.	Fırlatıcı tipi	Nam lu ebatları genişlik (mm)/uz unluk (m)	Mermi kütlesi (g)	Merminin yapıldığı malzeme	Akım (kA)	Çıkış hızı	Kullanılan enerji	Deney / simülasyon
69	railgun	30x60/1,04	534,3	Paslanmaz çelik	299	290 m/s	1,5 MJ	D/S
55	railgun	10-40-90 (çap)/12 m	16 kg		5 MA	2000 m/s	42 MJ	D
41	Helisel fırlatıcı	40/750 mm	450-525		15 kA	77-137 m/s	62,5 kJ	D
70	railgun	-/4 m	200		7×10^5 A	1600 m/s	5 MJ	D
71	Augmented railgun	4,5 cm ² /80 cm	350	Delrin - alüminyum	242 kA	140 m/s		D/S
48	Augmented railgun	17x17 mm ² /3,1-7,0m	5,4 kg		850 kA	3.71-5.2 km/s		D
72	Helisel fırlatıcı	120 mm/0,5 m	1 kg					S
52	Helisel fırlatıcı	40 mm/750 mm	0,698 kg			10-30 m/s	1 MJ	D

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak, dikdörtgen kesitli dört stator bobini olan ve bobinin enerjilendirmesi ile hız kontrolünün LabVIEW tabanlı bir programla yürütüldüğü ve mermi olarak silindirik kesitli Neodium mıknatısların kullanıldığı yeni bir elektromanyetik fırlatıcı sistemi geliştirilmiştir. NI firmasının PCI 6010 DAQ kartıyla her kademe girişinde mermi bobini hızı ölçülmüş ve ölçülen hız ile mermi bobininin uygun kuplaj bölgesine girme süresi hesaplanarak bu sürenin

sonunda diğer sürücü bobine enerji verilmiştir. Sistemde merminin çıkış hızı oluşan manyetik kuvvetin büyüklüğü ile değerlendirme işlem hızına bağlıdır. Bu yüzden bu doğrultuda çalışmamızda, stator bobin kesitinin, yüksek işlemci hızına sahip DAQ kartının, programlama dilinin merminin maksimum çıkış hızına olan etkisi araştırılmıştır. Bu sistem stator bobin geometrisi, kullanılan mermi, hız ve enerji kontrol ünitesi ve programlama dili açısından diğerlerinden ayrılmaktadır.

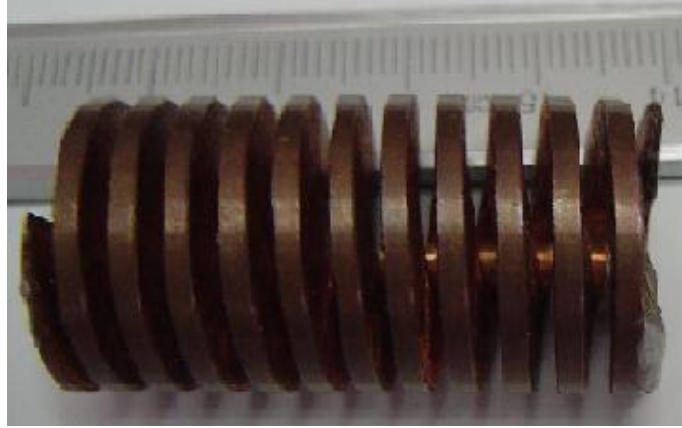


2. GELİŞTİRİLEN ELEKTROMANYETİK FIRLATICI SİSTEMİ

Geliştirilen elektromanyetik fırlatıcı sistemi, mekanik sistem, elektronik sistem ve bilgisayar programı olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Mekanik düzen manyetik özelliğe sahip merminin fırlatılabilmesi için 4 bobinden oluşmaktadır. Elektronik sistem yükseltme devresi, anahtarlama devresi, DAQ kartı ve optik sensörlerden oluşmaktadır. Bilgisayar programı ise LabVIEW tabanlı program ile yazılmıştır. Geliştirilen elektromanyetik fırlatıcı sistemi, ayrıntılı olarak aşağıda anlatılmaktadır.

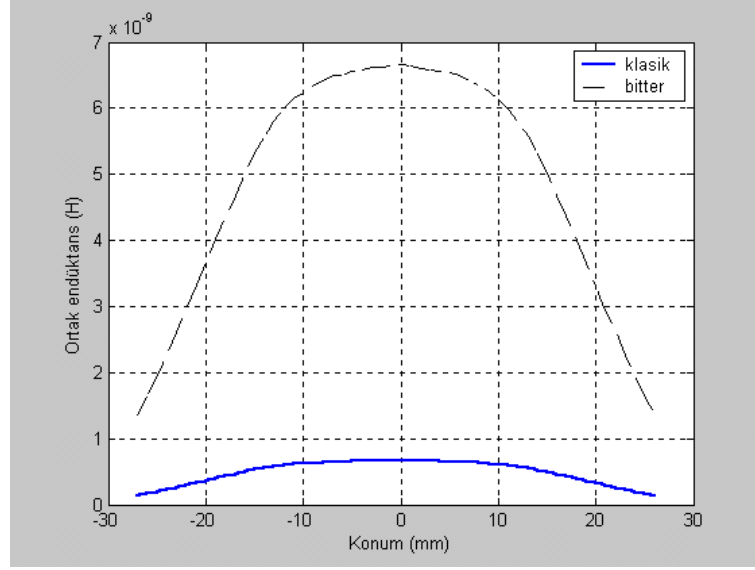
2.1 Mekanik Sistem

Tasarlanan mekanik sistem 4 stator bobinden oluşmaktadır. Her bir bobin dikdörtgenler prizması şeklindeki bakırdan üretilmiştir. Üretilen bobin 13 sipirlik olup her bir sipir dikdörtgen kesite sahiptir. Üretilen helisel bobinin fotoğrafı Şekil 2.1’de verilmiştir.



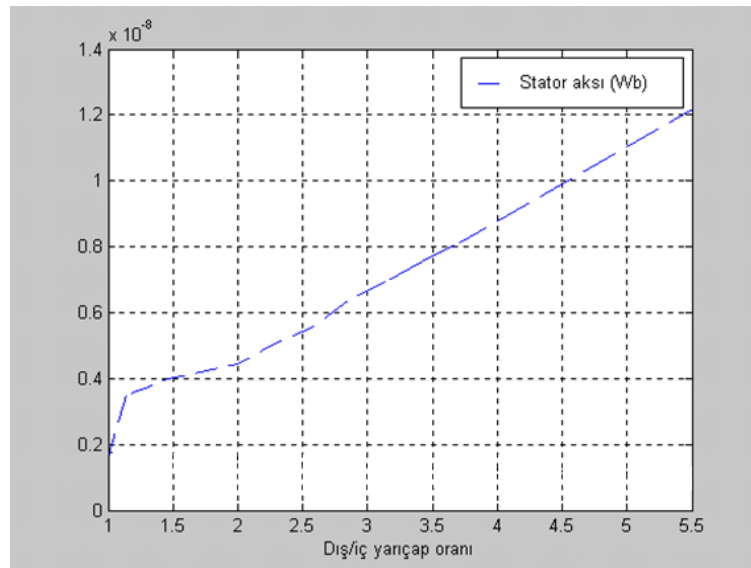
Şekil 2.1: Stator bobin.

Şekil 2.1’de verilen bobin tipinin, yapılan manyeto statik analiz sonuçlarına bakıldığında, aynı akım ve gerilim değerlerinde, endüktans değerinin klasik bobinlere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 2.2). Endüktansın yüksek olması sebebiyle bobinde oluşacak itme kuvvetinin de fazla olması kaçınılmazdır.



Şekil 2.2: Akı yoğunlaştırıcı ve klasik bobin ortak endüktans değişim eğrileri.

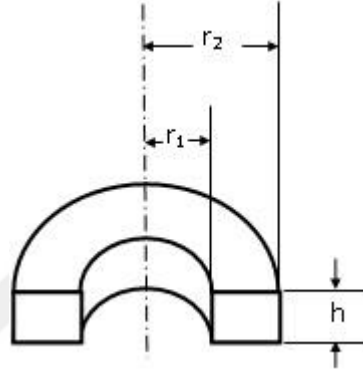
Aynı güç şartları altında klasik ve akı yoğunlaştırıcı bobinlerin sargı tiplerinin farklılığının dışında bir fark olmamasına rağmen endüktans değerlerinde yaklaşık 10 kat fark oluşmaktadır. Bu farklılık bobinin sipirlerinin fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Stator bobininin sipirlerinin iç çapı sabit kalmak koşulu ile dış çapı arttırıldığında bobinin endüktans değerinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.3). Bu olayı ters yönlü düşünmekte mümkündür. Stator bobininin dış yarıçapı sabit tutularak iç yarıçapı küçültüldüğünde $r_{dış}/r_{iç}$ oranı aynı şekilde artacağından Şekil 2.3'deki grafiğin benzer durumda çıkması düşünülmektedir.



Şekil 2.3: Stator bobininin dış çapı/iç çapının stator akısına etkisi.

Şekil 2.3’de stator bobinin dış yarıçapının iç yarıçapına oranının ($r_{dış}/r_{iç}$) bobin içinde oluşan manyetik akıya etkisi verilmiştir. Bu veriler ışığında çalışmamızda hızlandırıcı bobin olarak akı yoğunlaştırıcı bobin kullanılmıştır.

Tasarlanan stator bobini 13 sipirli ve uzunluğu 38 mm’dir. Stator bobinin kesit görünümü şekil 2.4’de verilmiştir. Stator bobine ait diğer teknik özellikler de Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.4: Stator bobine ait kesit görünümü.

Tablo 2.1: Stator bobinin teknik özellikleri

Sarım genişliği	Sarımlar arası mesafe	Bobin boyu	İç yarı çap	Dış yarı çap	Sarım sayısı
(h)			(r_1)	(r_2)	
2 mm	1 mm	38 mm	3.5 mm	11 mm	13

Mekanik kısım merminin gideceği yol boyunca yerleştirilmiş birbirinden bağımsız enerjilendirilebilen stator bobinlerinin aralarında 4 cm olacak şekilde sıralı biçimde dizilmesiyle ve bobinlerin arasına, namlu girişine ve çıkışına yerleştirilmiş optik sensörlerden oluşturulmuştur (Şekil 2.5).

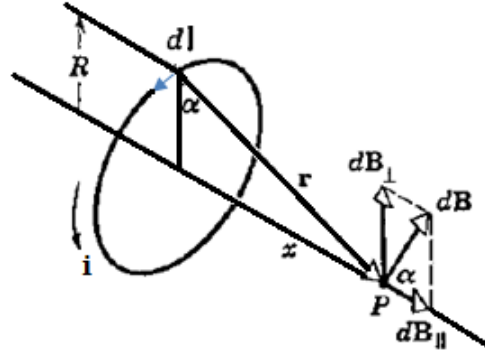


Şekil 2.5: Stator bobin görünümü.

Elektromanyetik Fırlatıcının mekanik kısmının imalatı yapılırken fırlatma sırasında namluda oluşacak mekanik zorlamalar, bobinlerin enerjilendirilmesi sırasında oluşacak elektriksel ve manyetik yalıtım, optik sensörlerin çalışmasını etkileyecek ışık miktarı dikkate alınarak yapılmıştır. Fırlatıcı bobinlerin aralarına elektriksel ve manyetik iletkenliği olmayan levhalar yerleştirilmiştir. Optik sensörler ışığı geçirmeyen bu levhaların içine gömülerek dışarıdan gelen ışıktan etkilenmemektedir. Sistemin bağlantıları için pirinç mil ve kestamit kullanılmıştır. Ayrıca stator bobinin iç kısmı sürtünme katsayısı düşük, sıcaklığa dayanıklı 0,01mm kalınlığında presbant ile yalıtımı sağlanmıştır. Bobin spirleri arasındaki boşluklar ark olmaması için epoksi ile kaplanmıştır.

Mekanik kısmın üretimi gerçekleştirildikten sonra stator bobinine verilecek akıma bağlı olarak bobinin merkez eksenini boyunca manyetik alan değişimi hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak mermiye etki eden kuvvet denklemi yine bobinin merkez eksenini boyunca belirlenmiştir.

Çalışmamızda ilk olarak tek bir halkanın merkezinden geçen eksen üzerinde, merkezden x kadar uzaklıktaki manyetik alan büyüklüğünü veren denklem Biot Savart yasası ile belirlenmiş ve bu oluşan manyetik alanın yönü tayin edilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Üzerinden i akımı geçen halkanın merkez ekseninden x kadar uzaktaki manyetik alan.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi merkez eksenindeki bir noktada oluşan manyetik alanın dik bileşenleri birbirini yok eder. Böylece manyetik alan yönü sadece eksen boyunca olur. Tek sarımdan oluşan bir bobinin merkez eksen üzerindeki bir P noktasının manyetik alan büyüklüğü Denklem (2.1) ile hesaplanabilir.

$$B_p = \int_0^{2\pi R} dB_{11} = \frac{\mu_0 i R}{2\pi(R^2 + x^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2.1)$$

Buradan yola çıkarak 13 sarımlı bir stator bobinde her bir sarımın merkezindeki manyetik alan büyüklüğü denklem (2.2) ile hesaplanabilir.

$$B_1 = B_{13} = \sum_{k=0}^{12} \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}}$$

$$B_2 = \sum_{k=0}^{11} \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^1 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}}$$

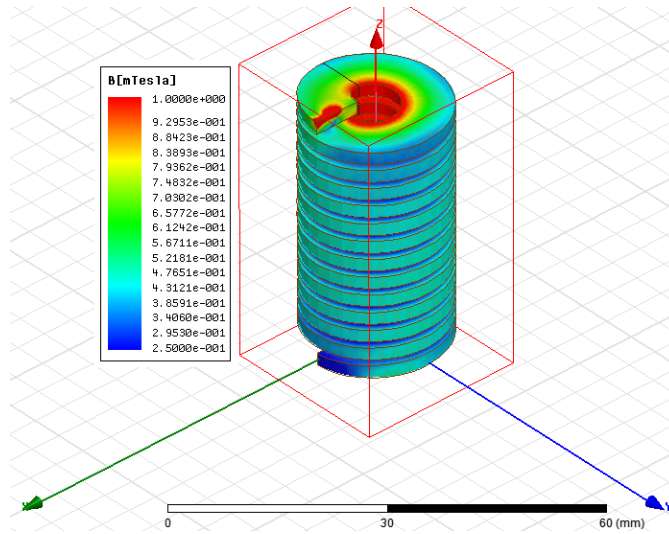
$$B_3 = \sum_{k=0}^{10} \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^2 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}}$$

$$B_4 = \sum_{k=0}^9 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}}$$

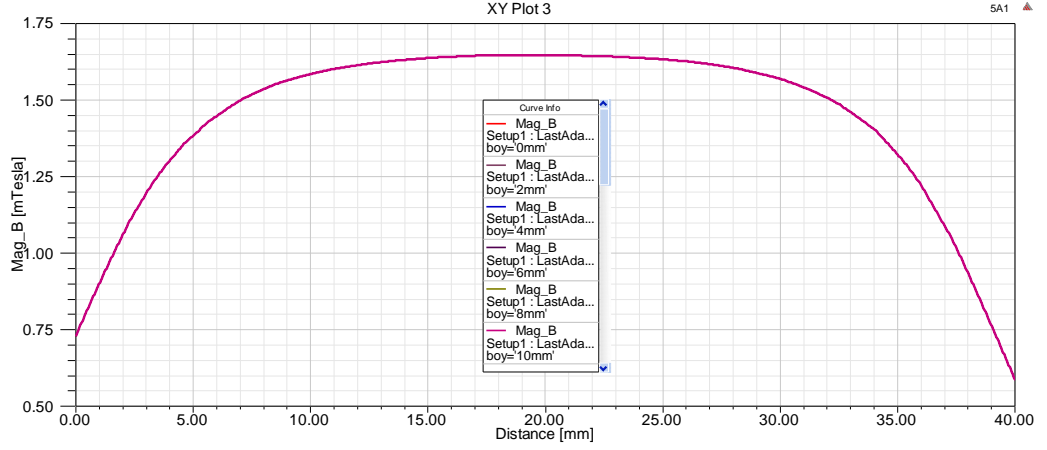
$$B_5 = \sum_{k=0}^8 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^4 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}}$$

$$\begin{aligned}
B_6 &= \sum_{k=0}^7 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^5 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} \\
B_7 &= \sum_{k=0}^6 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^6 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} \\
B_8 &= \sum_{k=0}^5 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^7 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} \\
B_9 &= \sum_{k=0}^4 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^8 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} \\
B_{10} &= \sum_{k=0}^3 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^9 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} \\
B_{11} &= \sum_{k=0}^2 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^{10} \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} \\
B_{12} &= \sum_{k=0}^1 \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}} - \sum_{k=1}^{11} \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + (kx)^2)^{3/2}}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Çalışmamızda Ansys Maxwell programı kullanılarak stator bobin üzerindeki manyetik alan dağılımı belirlenmiştir (Şekil 2.7). Ayrıca bobin merkezinden geçen eksen doğrultusunda manyetik alan değişimi (B_T değeri) belirlenmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.7: Stator bobini üzerindeki manyetik alan dağılımı.



Şekil 2.8: Bobinin merkezinden geçen eksen boyunca manyetik alan değişimi (BT).

Stator bobin boyunca manyetik alan değişimi şekil 2.8'deki gibi olan manyetik fırlatıcıda mermi olarak akı yoğunluğu B olan bir sabit mıknatıs kullanılmış ve bobinden geçen akımın büyüklüğüne göre sabit mıknatısa etkiyecek kuvvetin büyüklüğü belirlenmiştir. Sabit mıknatısa uygulanan kuvvet büyüklüğü belirlenirken Tablo 2.2'de verilmiş değerler kullanılmıştır.

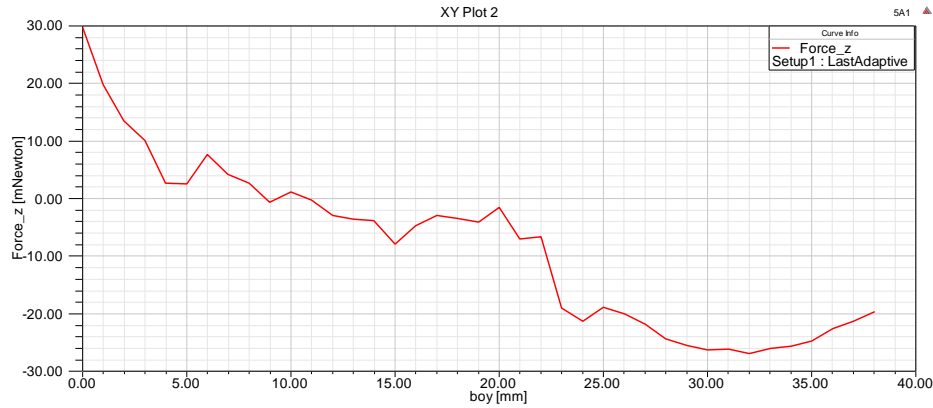
Tablo 2.2: Çalışmamızdaki değişkenler ve değerleri

Değişken	Değişken Adı	Değeri
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği	$4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A
r_x (ya da x)	Stator bobin ile mıknatıs kutbu arasındaki uzaklık	$2-24 \times 10^{-3}$ m
i	Stator bobinden geçen akım	1-5 A
R	Stator bobinin iç yarıçapı	3.5×10^{-3} m
B	Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu	0.0035 T

Sabit mıknatıs kutbunun stator bobinin herhangi bir halkasına olan uzaklığı r_x ise; içinden i akımı geçen stator bobinin mıknatısa uyguladığı kuvvet Denklem (2.3) ile bulunur.

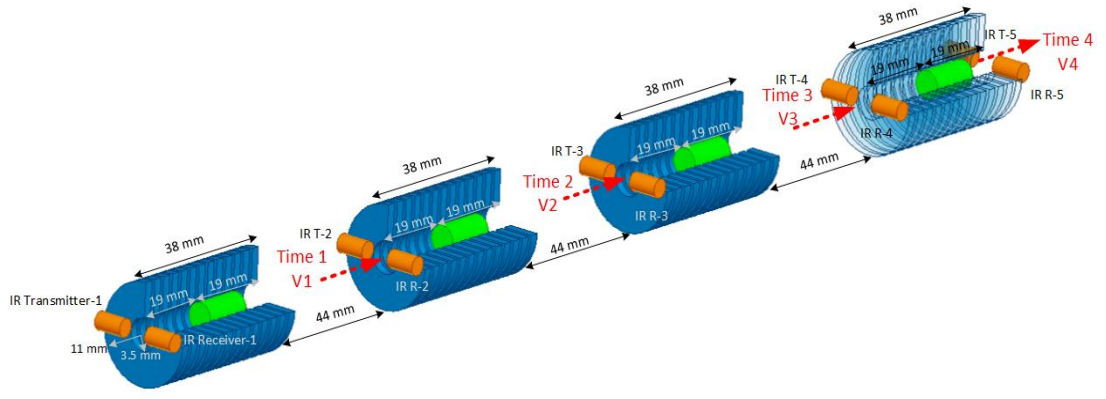
$$F_i = \frac{B r_x^2 B_T}{4\pi \mu_0} \quad (2.3)$$

Stator bobinin başlangıcından sonuna kadar olan uzunluk boyunca sabit mıknatıs şeklindeki mermiye etki eden kuvvet Şekil 2.9’da verilmiştir.



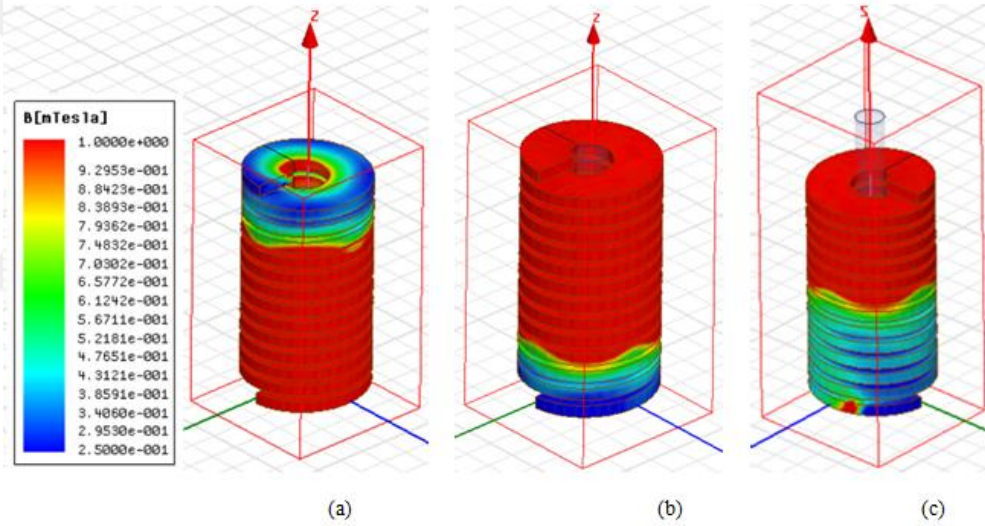
Şekil 2.9: 5 A akım için sabit mıknatısa etki eden kuvvetin değişimi.

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi içinden 5 A geçen stator bobinin sabit mıknatısa etki ettirdiği kuvvet, bobinin merkezinde sıfır olmakta ve yön değiştirmektedir. Bobin içinde 0-19 mm aralığına konulan sabit mıknatısa etki eden kuvvet durdurma yönünde, 20-38 mm aralığında ise sabit mıknatısı hızlandırma yönündedir. Bu sebeple sabit mıknatısın başlangıç pozisyonunu manyetik fırlatıcı sistemindeki birinci bobinin 20’inci milimetresi seçilmiştir. Mıknatısın her stator bobinde kademeli olarak hızlanabilmesi için diğer stator bobinlerin enerjilendirilmesi, sabit mıknatısın stator bobinlerin orta noktalarına geldiğinde sağlanmıştır. Bobin içerisindeki sabit mıknatısların konumu Stator bobinlerinin başlarında yer alan IR optik alıcı verici sensörler ile belirlenmektedir. Bobinlerin enerjilendirilmesi kondansatör ile sağlanmaktadır. Stator bobinlere kondansatörün durulma zamanı kadar akım verilmektedir. Bu sebeple kondansatörler arasında kuvvet sıfıra düşmekte ve mıknatıs sabit hızlı hareket yapmaktadır. Stator bobinlerin başlangıcındaki sensörler sabit mıknatısın önünden geçme süresini ölçerek ve boy bilgisini kullanarak mıknatısın hız bilgisine ulaşılmıştır. Mıknatısların sabit hızla stator bobinlerin orta noktasına ne kadar sürede geleceği belirlenerek stator bobinlerin bu süre sonunda enerjilendirilmesi sağlanmaktadır. 4’üncü Bobinin sonunda yer alan 5’inci sensör ile de sabit mıknatısın son çıkış hızı belirlenmektedir. Geliştirilen EML sistemindeki sabit mıknatısın enerjilendirilme konumu, IR optik alıcı ve vericilerin konumu ve mesafeler Şekil 2.10’ da verilmiştir.



Şekil 2.10: IR optik sensörlerin ve sabit mıknatısın enerjilenirme konumunun genel görünümü.

Çalışmamızda mıknatısın konumu, bir stator bobininin 1'inci, 7'inci ve 12'inci sarımda iken manyetik akı dağılımı Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11: Mıknatısın alt kısmı stator bobininin a) 1. sarımda, b) 7. sarımda, c) 12. sarımda iken manyetik akı dağılımı.

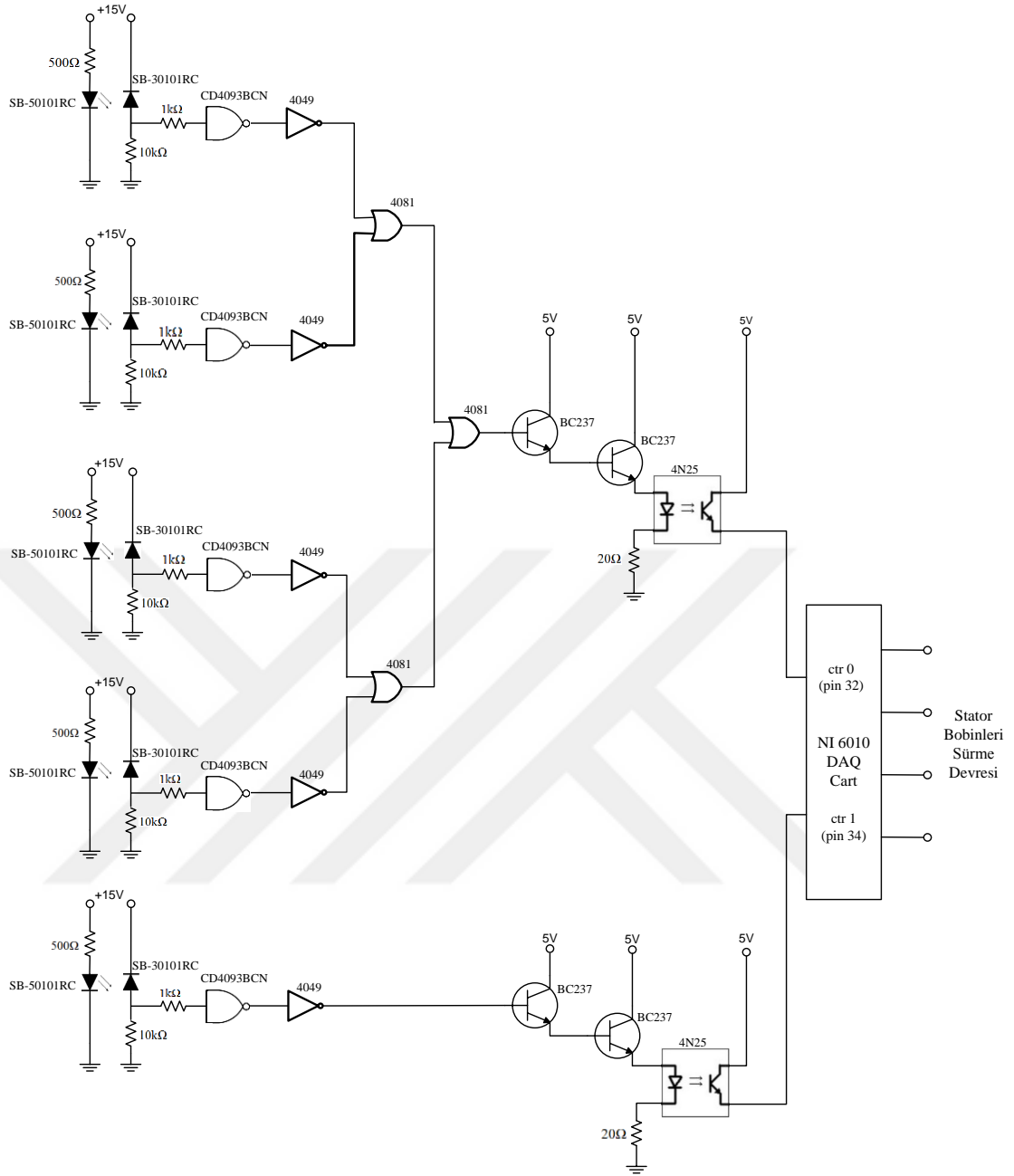
2.2 Elektronik Sistem

Geliştirilen elektromanyetik fırlatıcının elektronik sistemi 3 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar optik sensörlerin kontrol devresi, stator bobinleri sürme devresi ve güç devresidir.

2.2.1 Optik Sensörlerin Kontrol Devresi

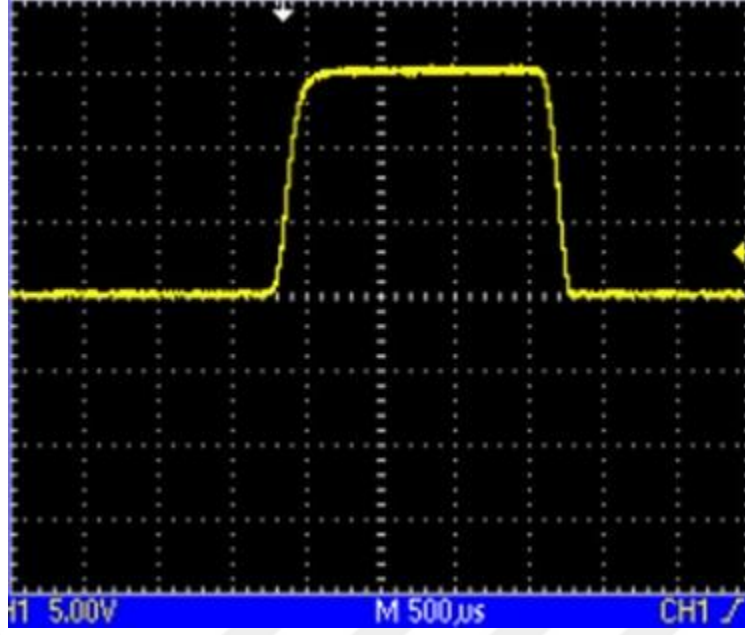
Geliştirilen elektromanyetik fırlatıcıda 940 nm dalga boyunda çalışabilen (SB-50101RC ve SB-30101) alıcı ve verici optik sensörler kullanılmıştır. Bu iki tip sensör için karanlık akımları 100 nA'dır. Ayrıca -40 °C ile +85°C çalışma aralığına sahiptir. Bu sensörlerin çalışma durumundaki %10'dan %90'a ve %90'dan %10'a düşme süreleri 3 µs'de gerçekleşmektedir. Bu süre elektromanyetik fırlatıcının çalışma hızı için uygun bir süredir. Şekil 2.12'de optik sensör devresi verilmiştir.





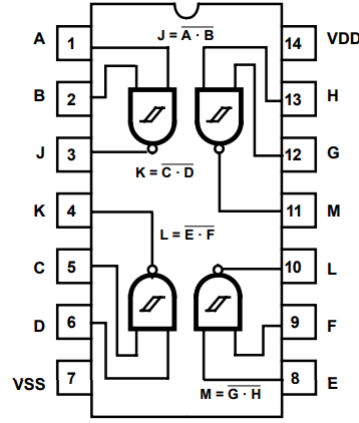
Şekil 2.12: Optik sensörlerin kontrol devresi.

Elektromanyetik fırlatıcının kontrol ünitesi optik sensör çiftinden üretilen mermi algılama sinyali tarafından yürütülür. Alıcı ve verici optik sensör çiftinin arasından mermi geçişi sırasında bir elektrik sinyali üretilir. Bu sensör çifti tarafından algılanan ham sinyal Şekil 2.13’de verilmiştir.

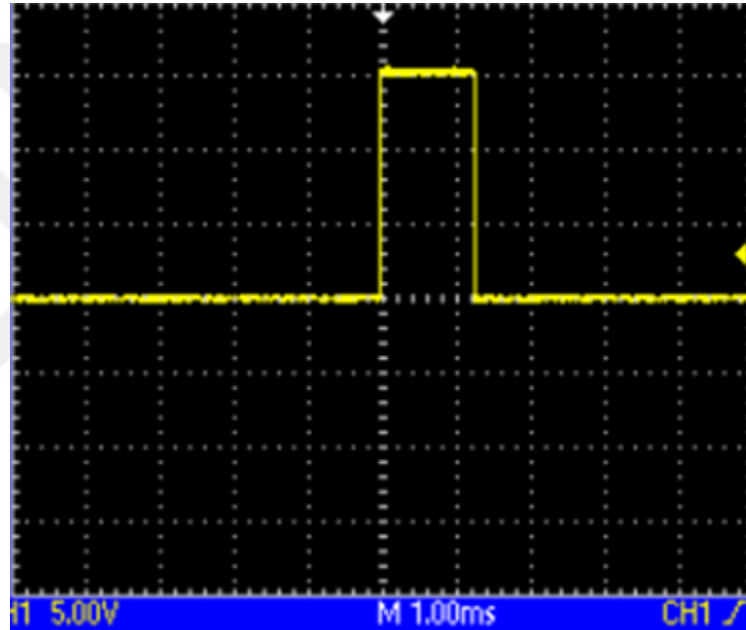


Şekil 2.13: Optik sensörden alınan sinyal.

Şekil 2.13’de sinyale ait bilgiler sinyalin sağ tarafındaki ölçüm sütununda verilmektedir. Optik sensörden alınan sinyalin maksimum değeri 15,6 V, genişliğinin 1,816 ms olduğu görülmüştür. Algılanan sinyalin sıfırdan belirli gerilim değerine yükselme süresi 156,7 μ s ve bu değerden sıfıra düşme süresi 128 μ s’dir. Bu yükselme ve düşme sürelerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüksek değerler sinyalin lojik olarak algılanmasında bir problem oluşturacağı için bu haliyle kullanılması uygun değildir. Bu sebeple sinyal CD4093BCN Schmitt Trigger devresinden geçirilmiştir. CD4093BCN Schmitt Trigger devresinin bağlantı şeması Şekil 2.14’de verilmiştir. Böylece sinyal çok kısa sürede 0’dan 1’e yükselen veya 1’den 0’a inen hızlı bir kare dalga formuna sokulmaya çalışılmıştır. Schmitt Trigger çıkış sinyali Şekil 2.15’de verilmiştir.



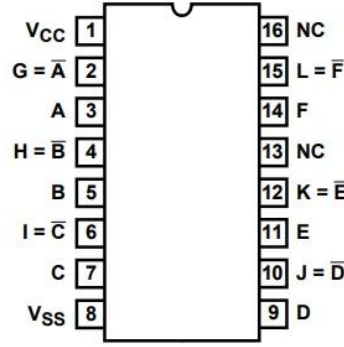
Şekil 2.14: CD4093BCN Schmitt Trigger devresinin bağlantı şeması.



Şekil 2.15: Schmitt Trigger çıkış sinyali.

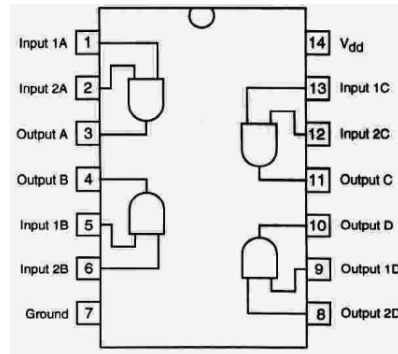
Şekil 2.15’de verilen Schmitt Trigger devresinin çıkış sinyalinin genişliği 1,280 ms, maksimum değeri 15,8 V’dur. Sinyalin sıfırdan bu gerilim değerine ulaşma süresi 9,138 μ s, bu değerden sıfıra düşme süresi ise 6,421 μ s’dir. Bu yükselme ve alçalma süreleri optik sensörün çıkışındaki ham sinyaller ile kıyaslandığında daha düzgün bir kare dalga olduğu gözlenmektedir.

Schmitt Trigger devresinin çıkış sinyali, verileri bilgisayara aktarmada kullanılan NI 6010 PCI DAQ Kart için uygun olmadığından dolayı sinyal 4049 entegresi ile ilk olarak terslenmiştir. 4049 entegresinin bağlantı şeması Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16: 4049 Entegresinin bağlantı şeması.

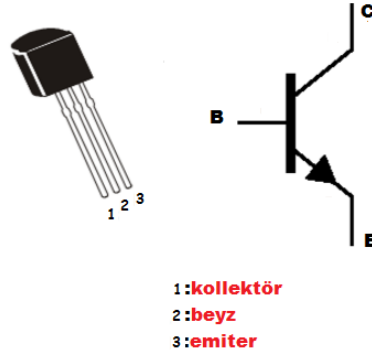
Beş farklı alıcı optik sensörlerden gelen beş farklı sinyal NI 6010 PCI DAQ Kart aracılığı ile bilgisayara aktarılmak istenmektedir. Bu aktarma işlemi, sensörlerden gelen hatlar birleştirilerek, DAQ Kartın iki farklı input pinine bağlanarak sağlanmıştır. Sensörlerden gelen hatların birleştirilmesinde 4081 entegresi (or gate) kullanılmıştır. 4081 entegresinin bağlantı şeması şekil 2.17’de verilmiştir. 1’inci ve 2’inci sensör çıkış hatları bir veya kapısı ile 3’üncü ve 4’üncü sensör çıkış hatları da bir veya kapısı ile birleştirilmiştir. Daha sonra bu iki hat kendi aralarında tekrar birleştirilip ilk 4 sensörün çıkışı tek hata düşürülmüştür. Böylece ilk 4 optik sensör için 1 hat ve 5’inci optik sensör için de 1 hat olmak üzere toplamda 2 hat elde edilmiştir. Burada ilk 4 optik sensörün verilerinin tek hat üzerinden gelmesi karışıklık meydana getirecek bir problem teşkil etmemektedir. Çünkü mermi namlu içerisinde optik alıcı ve vericilerin arasından sırayla geçmektedir. Buda verileri sırayla gitmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 2.17: 4081 Entegresinin bağlantı şeması.

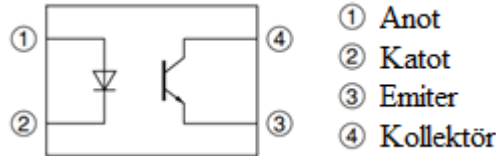
4081 Entegresinden alınan çıkış sinyalleri her hat için çift kademeli olarak yükseltilmiştir. Bu yükseltme işlemi BC 237 entegresi ile yapılmıştır. BC 237

entegresi anahtarlama ve yükseltme için kullanılan NPN tipi bir transistördür. BC 237 Entegresinin bağlantı şeması Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18: BC237 bağlantı şeması.

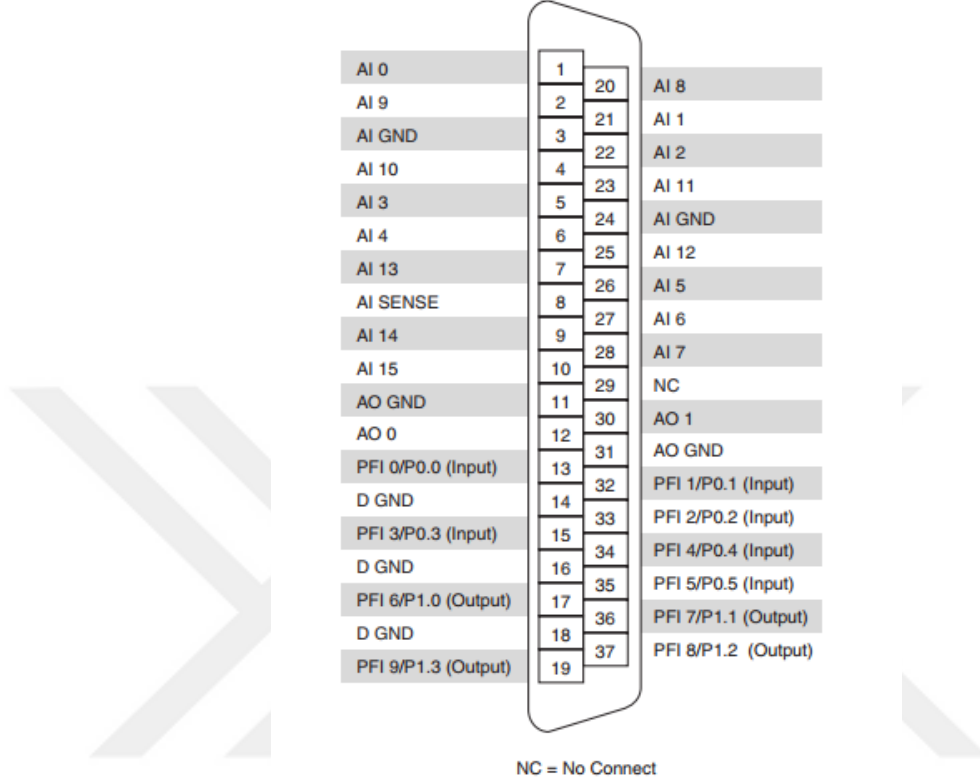
BC 237 Entegresinden alınan ardışık olarak iki kere yükseltilmiş sinyalin, herhangi bir problem durumunda oluşabilecek aksiliklerden dolayı doğrudan NI 6010 PCI DAQ Kart ile bağlantısı kurulmamıştır. Elde edilen sinyal optik izolatör aracılığıyla DAQ Kart’a bağlanmıştır. Devrede optik izolatör olarak PC 817 entegresi kullanılmıştır. PC 817 entegresinin bağlantı şeması Şekil 2.19’ da verilmiştir.



Şekil 2.19: PC 817 bağlantı şeması.

Optik sensör çıkışlarını bilgisayara aktarmak için kullanılan National Instruments firmasının ürettiği 6010 PCI DAQ kart 16 Bit çözünürlükte 200 kS/s hızında veri alabilmektedir. Kart üzerinde 2 analog output, 6 dijital input, 4 dijital output bulunmaktadır. Ayrıca kartta 32 bit çözünürlüklü 80 MHz counter yer almaktadır. 6010 PCI DAQ kart elektromanyetik fırlatıcı için yeterli hıza sahiptir. Çalışmamızda optik sensörlerden gelen verileri değerlendirmek için 2 dijital input kullanılmıştır. Kart üzerinde 34 numaralı pin olan PFI 4/P0.4 ve 35 numaralı pin olan PFI 5/P0.5 üzerinden bilgisayara veri aktarımı sağlanmıştır. Veriler değerlendirilip stator bobinleri tetiklemek amacıyla ise 4 dijital output kullanılmıştır. Dijital output

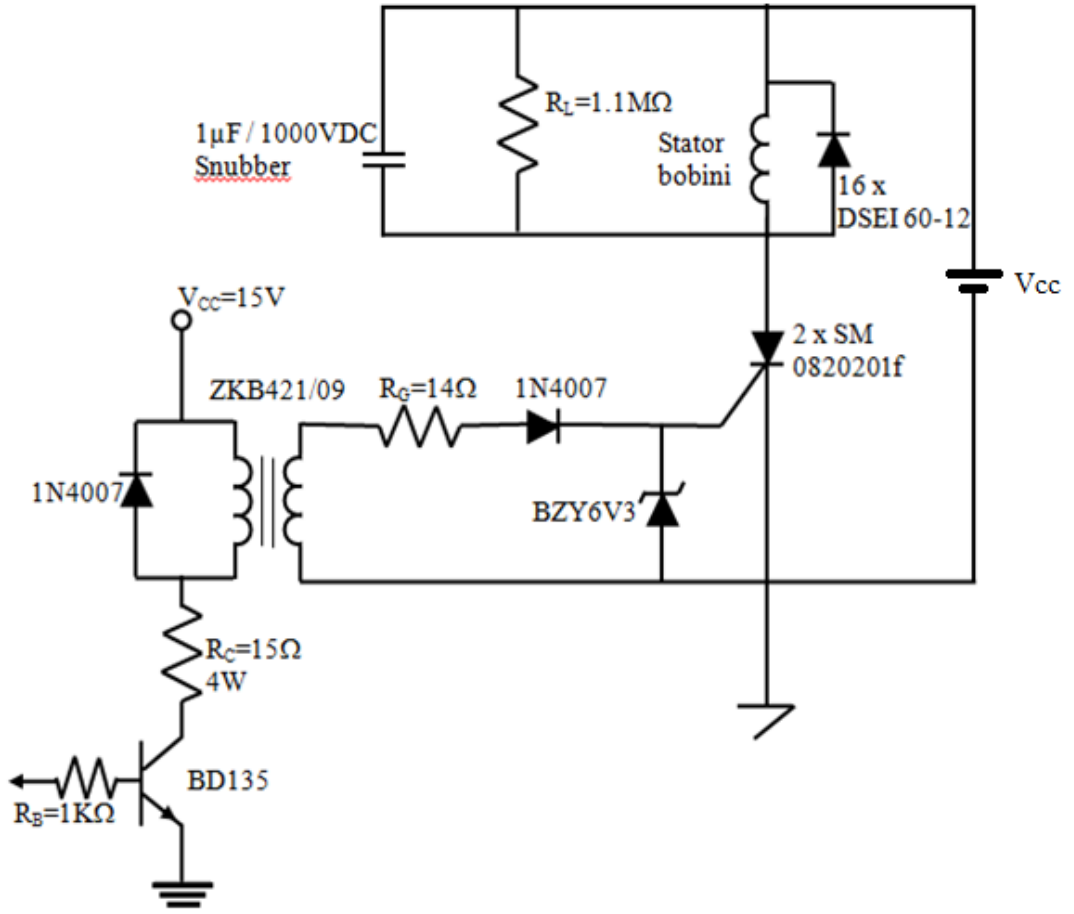
olarak 17 numaralı PFI 6/P1.0, 19 numaralı PFI 9/P1.3, 36 numaralı PFI 7/P1.1 ve 37 numaralı PFI 8/P1.2 pinleri kullanılmıştır. 6010 PCI DAQ kartın bağlantı şekli Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20: NI 6010 PCI DAQ bağlantı şeması.

2.2.2 Stator Bobinlerini Sürme Devresi

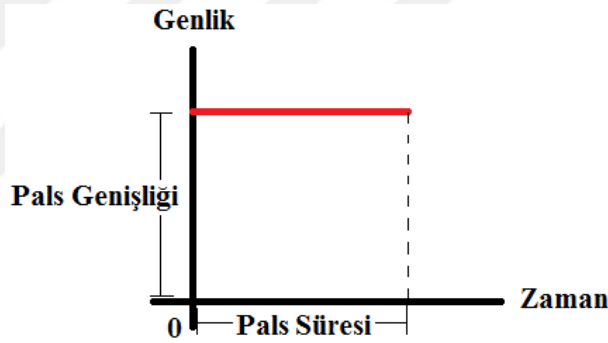
Stator bobinlerini sürme devresi optik sensörlerden gelen verilerin NI 6010 PCI DAQ kart aracılığı ile bilgisayara atılıp değerlendirilmesiyle kontrol edilmektedir (Şekil 2.12). Stator bobinleri sürme devresinde anahtarlama elemanı olarak tristör kullanılmıştır. Tristörler, uygun gate sinyali ile sürülmeleri halinde yüksek güç kazancı sağlayabilen anahtarlama elemanlarıdır. Tristörün tetiklenmesinin ardında kritik birkaç mikro saniyelik süre içinde tüm devrenin iletme geçmesi gerekmektedir. Bu da tristörün uygun bir biçimde sürülmesini zorunlu kılmaktadır. Tristörün tetikleme ve stator bobinlerini sürme devresi Şekil 2.21’de verilmiştir. Bu devre 4 stator bobin için tekrarlanmıştır.



Şekil 2.21: Stator Bobinlerini Sürme Devresi.

Stator bobinleri sürme devresinde ilk olarak DAQ karttan bir darbe dizisi gönderilmektedir. Bu darbe dizisinde darbeler en az 2 μ s'dir. İki darbe arasındaki boşluk en az 16 μ s olarak ayarlanmıştır. Darbe dizisinin kaç adet darbeden oluşacağı ve her bir darbenin maksimum süresi isteğe bağlı olarak ayarlanabilir. DAQ karttan gönderilen bu darbeler ilk olarak Stator bobinleri sürme devresindeki BD135 transistörün base ucuna gelmektedir. Transistörün base ucuna gönderilen darbe ile pals transformatörünün primer sargısı 15 V'luk güç kaynağı ile beslenmektedir. Böylece transformatörün sekonder tarafında indüklenen akıma bağlı olarak tristörün gate ucu tetiklenmektedir.

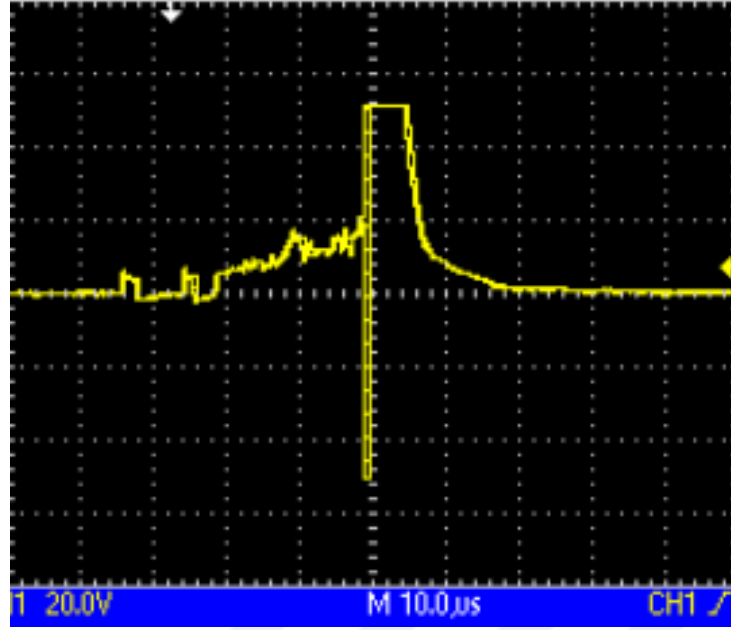
Burada kullanılan pals transformatörü transistörler, tristörler ve triyaklar gibi farklı gerilim seviyesine bağlanan anahtarlama elemanlarının kontrolünde kullanılmaktadır. Gerilim dalgalanmaları ve güvenlik nedeniyle anahtarlama elemanlarını doğrudan sürmek mümkün değildir. Bu sebeple devrede oluşabilecek aksilikleri önlemek için pals transformatörleri kullanılmaktadır. Pals transformatörleri genellikle yüksek geçirgenlikli çekirdek, düşük sızıntı indüktansı ve düşük sarım kapasitansına sahiptir. Ayrıca bu transformatörler sarımlar ile toprak arasında yüksek gerilim izolasyonuna sahiptir. Darbe transformatörleri tarafından işlenen sinyaller genellikle bir darbe veya darbe dizisidir. Bu darbeler geleneksel transformatörlerde olduğu gibi sinüzoidal sinyal şeklinde değildir. Şekil 2.22’de pals transformatörüne girilen darbeye örnek verilmiştir. Ayrıca bu transformatörlerde frekans bant genişliği yeterince yüksek olmalıdır, böylece sinyal iletimindeki gecikme kabul edilebilir derecede küçük olur ve sinyalde ciddi bozulma olmaz.



Şekil 2.22: İdeal pals transformatörü darbesi (akım veya gerilim).

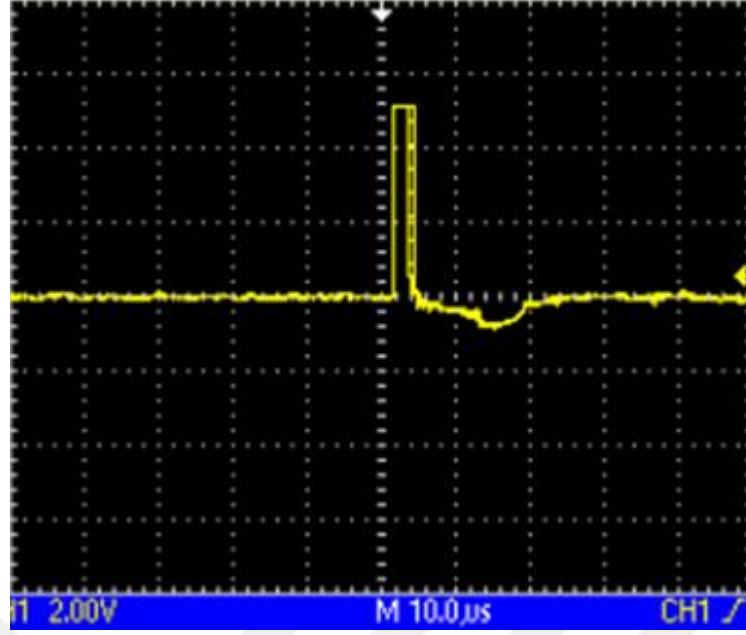
Yaptığımız çalışmada pals transformatörü olarak ZKB421/09 kullanılmıştır. Pals transformatörünün primer sargısına ters olarak bağlanan 1N4007 diyodu, primer akımı kesildikten sonra primer sargıdaki enerjinin boşalmasını sağlamaktadır.

BD135 transistörünün tetiklemeyle transformatörün primer sargısından geçen akım, dönüştürme oranına bağlı olarak sekonder tarafta bir gerilim düşümüne neden olmaktadır. 15 voltluk primer gerilimi için sekonder gerilimi 125 V’ta kadar ulaşabilmektedir. Pals transformatörüne 15 V’luk kare dalga şeklinde verilen gerilimin, transformatörün sekonder tarafında üretilen sinyale dönüşümü Şekil 2.23’de verilmiştir.



Şekil 2.23: Pals transformatörünün ürettiği sinyal.

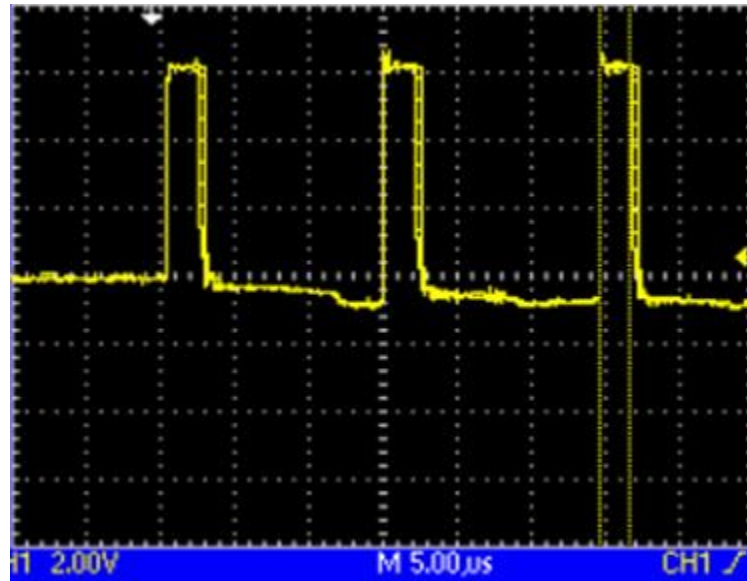
Şekil 2.23'deki pals transformatörünün ürettiği sinyal incelendiğinde, sinyalin pozitif taraftaki genliği 50,8 V olduğu görülmektedir. Ayrıca sinyalin tepeden tepeye olan gerilimi ise 102 V ölçülmüştür. Bu sinyalin doğrudan tristörün gate ucuna verilmesi durumunda, tristörün zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu sebeple Şekil 2.21'deki gate sürme devresi ile sinyalin negatif kısmı kırılmıştır. Negatif kısmın kırılma işlemi tristörün gate devresine seri bağlanan 1N4007 diyot ile yapılmıştır. Bu 1N4007 diyodunun iki görevi bulunmaktadır. Bu görevler gate ve katot ekleminden ters yönlü akım geçişini engellemek ve gate eklemi ortalama güç tüketimini minimize etmektir. Ayrıca Transformatörün sekonder tarafındaki 14 Ω 'luk direnç ise tristörün gate akımını sınırlamak için bağlanmıştır. Tristörün gate kısmını süren devre elemanlarını kısa süreli de olsa yüksek gerilim uygulanmasından zarar görmemesi için ise BZY6V3 diyodu kullanılmıştır. Devrede kullanılan bu zener diyot tristörün gate gerilimini sınırlamaktadır. Tristöre uygulanan gate sinyali Şekil 2.24'de verilmiştir.



Şekil 2.24: Tristöre uygulanan gate sinyali.

Şekil 2.24’de tristöre uygulanan gate sinyalinin negatif bölümü kırılmış ve maksimum gerilimi 5,08 volt ile sınırlandırılmıştır.

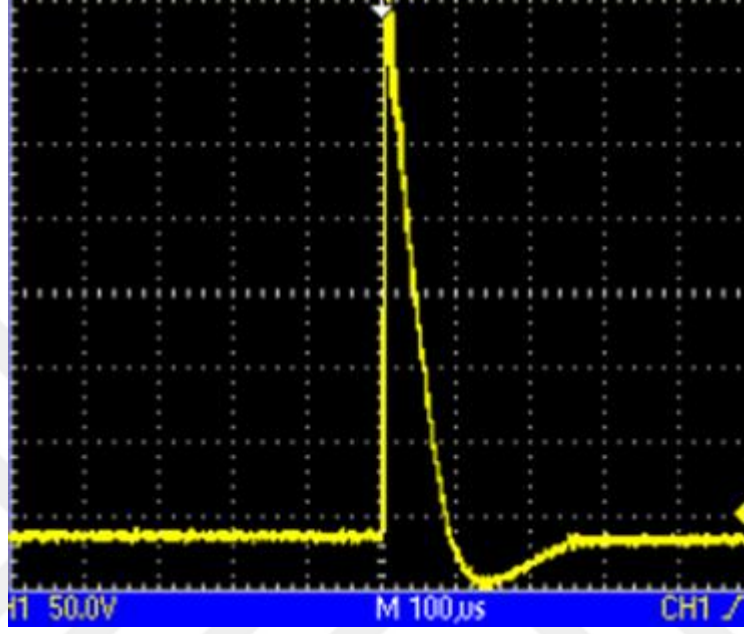
Tristörün gate ucuna uygulanacak darbe sayısı ve her bir darbenin genişliği isteğe bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Şekil 2.25’de tristörün gate ucuna uygulanan darbe dizisi verilmektedir.



Şekil 2.25: Tristörün gate ucuna uygulanan darbe dizisi.

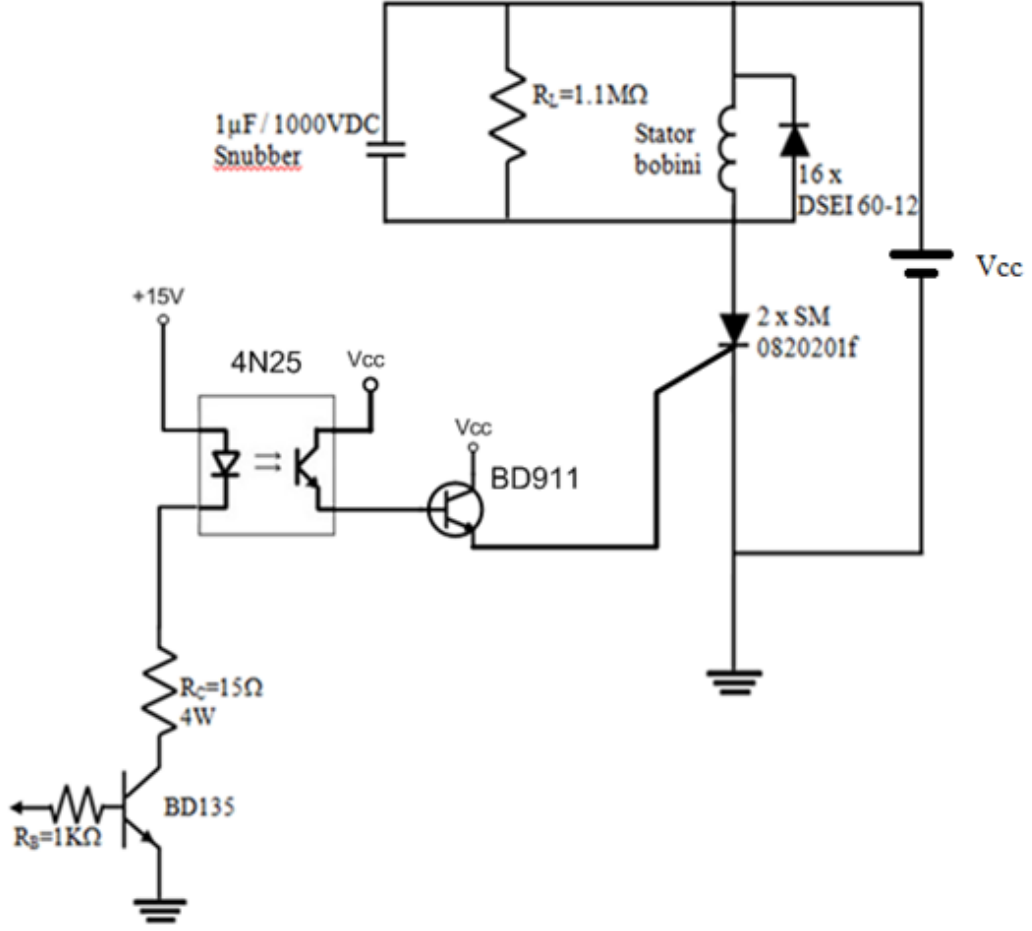
Şekil 2.25’de tristöre her birinin genişliği 2 μ s olan arka arkaya 3 darbe gönderilmiştir. Darbeler arasında 12 μ s bulunmaktadır.

Tristöre uygulanan tetikleme ile stator bobini üzerinde oluşan gelimin dalga biçimi Şekil 2.26’da verilmiştir.



Şekil 2.26: Stator bobini üzerinde oluşan gerilim.

Çalışmamızda stator bobinini sürmek için alternatif yollar da vardır. NI 6010 PCI DAQ Karttan gelen sinyal pals transformatör yerine 4N25 optik izolatörden geçirilerek tristör tetikleme yapılabilir. Alternatif stator bobinleri tetikleme devresi çizimi Şekil 2.27’de verilmiştir. Bu devre 4 kademe için tekrarlanmıştır.



Şekil 2.27: Stator bobinleri tetikleme devresi.

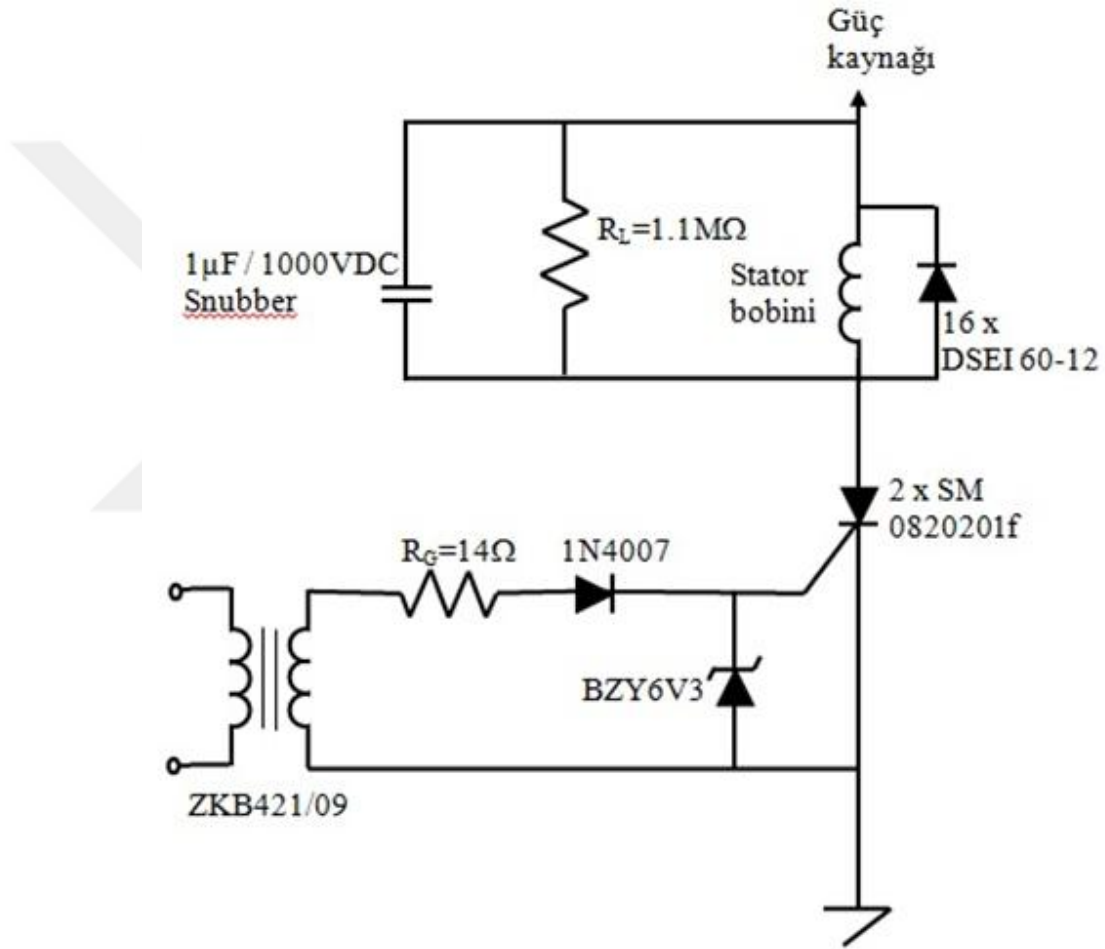
Şekil 2.27’de görüldüğü gibi BD135 transistörün tetiklenmesiyle 4N25 optik izolatörün led kısmından bir akım geçer. Optik izolatörün alıcı kısmı bobinleri enerjilendirmekte kullanılan güç kaynağı ile beslenerek (VCC) BD911 transistörün tetiklemesi sağlanır. Tetiklenen transistör tristörün gate ucunun tetiklemesini gerçekleştirir. Böylece tristörün tetiklenmesiyle stator bobinlerin üzerinden bir akım geçmesi sağlanır.

Buradaki fark pals transformatör ile optik izolatörün çıkış sinyalleridir. Pals transformatörüne 15 V’luk kare dalga şeklinde verilen gerilimin, transformatörün sekonder tarafında üretilen sinyale dönüşümü Şekil 2.23’de verilmiştir. Bu sinyal kare dalga formunda değildir. Fakat optik izolatör kullanılan devrede optik izolatöre

giren ve çıkan dalga kare formdadır. Dalganın kare formda olması tristörü tetikleme sinyalinin süre olarak daha uzun olması anlamına gelmektedir. Buda stator bobinlerde oluşacak itme kuvvetinin daha az olmasını sağlamaktadır.

2.2.3 Güç Devresi

Çalışmamızda tasarlanan sistemin güç devresi Şekil 2.28’de verilmiştir. Bu devre 4 stator bobinini ayrı ayrı tetiklemek için 4 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 2.28: Elektromanyetik fırlatıcı güç devresi.

Şekil 2.28’de verilen güç devresinde maksimum 10 A akım veren doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak kullanılan tristörün tetiklenmesi ile güç devresinin önü açılmakta ve stator bobinleri üzerinden akım geçmeye başlamaktadır. Mermi, stator bobini terk ettikten sonra tristörün ateşleme sinyali kesilir. Ateşleme sinyalinin kesilmesi ile stator bobini akımı bir anda sıfır

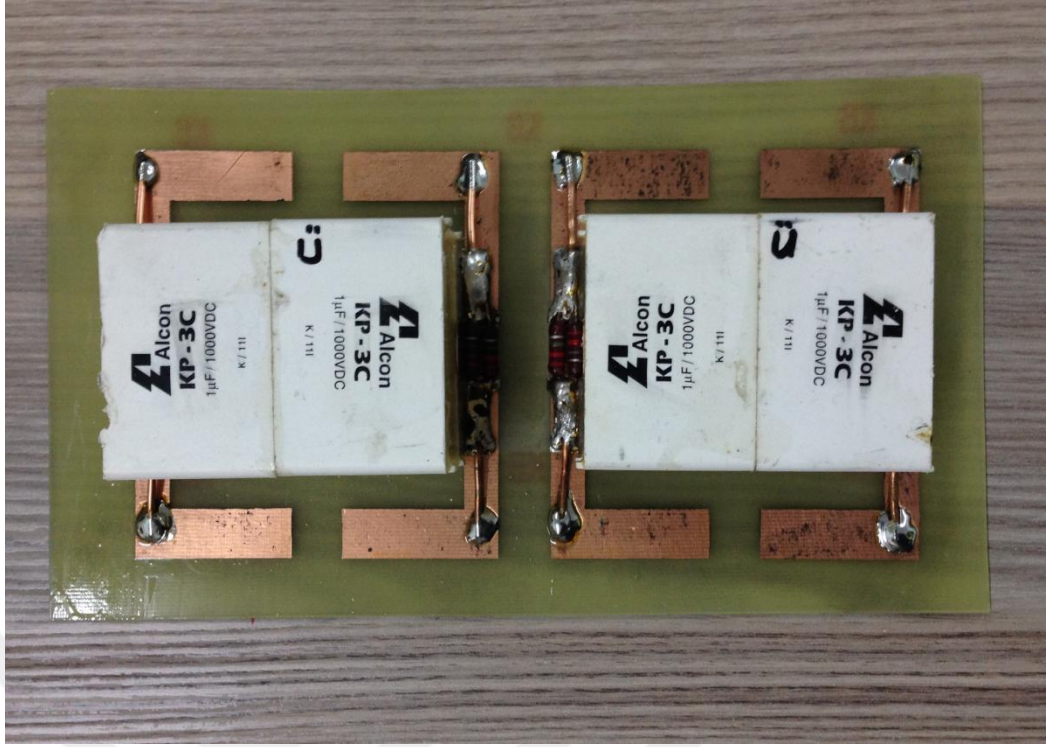
olmaz. Bu sebeple akım, stator bobinine ters yönde bağlı diyot ile hızla sıfırlanmaya çalışılmaktadır. Çalışmamızda bu amaç ile birbirine paralel bağlanmış 16 adet DSEI-60-12 hızlı diyot kullanılmıştır. Diyotların görüntüsü Şekil 2.29'da verilmiştir.



Şekil 2.29: DSEI-60-12 diyot.

Güç devresinde DSEI-60-12 diyot ve stator bobine paralel olarak $1,1 \text{ M}\Omega$ 'luk direnç ve $1 \mu\text{F}/1000\text{VDC}$ kondansatör bağlanmıştır. Devrede yer alan $1 \mu\text{F}$ 'lık R-C turn-off snubber, kesim esnasında stator bobin ve DSEI-60-12 hızlı diyot uçlarındaki gerilim osilasyonlarını ve gerilim sıçramalarını önlemek için kullanılmıştır.

$1 \mu\text{F}/1000\text{VDC}$ kondansatör ve $1,1 \text{ M}\Omega$ 'luk direnç Şekil 2.30'da verilmiştir.



Şekil 2.30: 1µF/1000VDC R-C turn-off snubber ve 1,1MΩ' luk direnç.

2.3 Geliştirilen LabVIEW Programı

Çalışmamız kapsamında geliştirilen elektromanyetik fırlatıcı sisteminin kontrol yazılımı LabVIEW tabanlıdır. Bu grafiksel programlama dili ile tasarlanan yazılım aynı program içerisinde iki bölüm olarak ayrılmıştır. Bu bölümlerden ilki sensörlerden gelen verilerin bilgisayar ortamına alınması amacı ile yapılmıştır. Merminin sensör önünden geçiş süresi ve hızı gibi bilgiler bu bölüm ile kullanıcıya sunulmaktadır. Diğer bölüm ise yine sensörlerden gelen bilgiler doğrultusunda stator bobinlerin tetiklenmesi ve veri kayıt dosyası oluşturulması amacı ile yapılmıştır. Bahsi geçen her iki bölüme dair detaylar bu bölüm altında yer alan alt başlıklarda incelenmiştir.

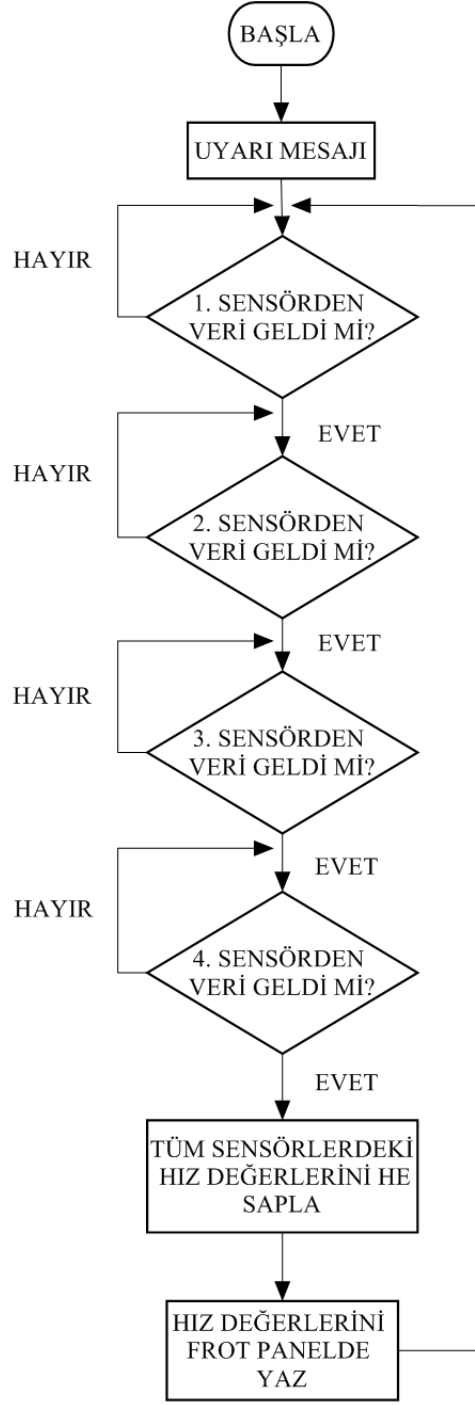
2.3.1 Programın Veri Toplama Bölümü

Veri toplama bölümü NI 6010 PCI DAQ Kart aracılığı ile sensörlerden gelen verilerin bilgisayar ortamına alınmasını sağlamaktadır. Geliştirilen manyetik fırlatıcıda mermi geçişini gözlemlemek ve süre ölçmek için toplam 5 adet sensör bulunmaktadır. Bu sensörlerden ilk dördü “veya” (or gate) kapılarıyla birleştirilmiş

ve 6010 PCI DAQ Kart'ın tek input pinine bağlanmıştır. Beşinci sensör ise DAQ Kart'ın farklı bir input pini ile bağlanmış ve bilgisayara veri alımı sağlanmıştır.

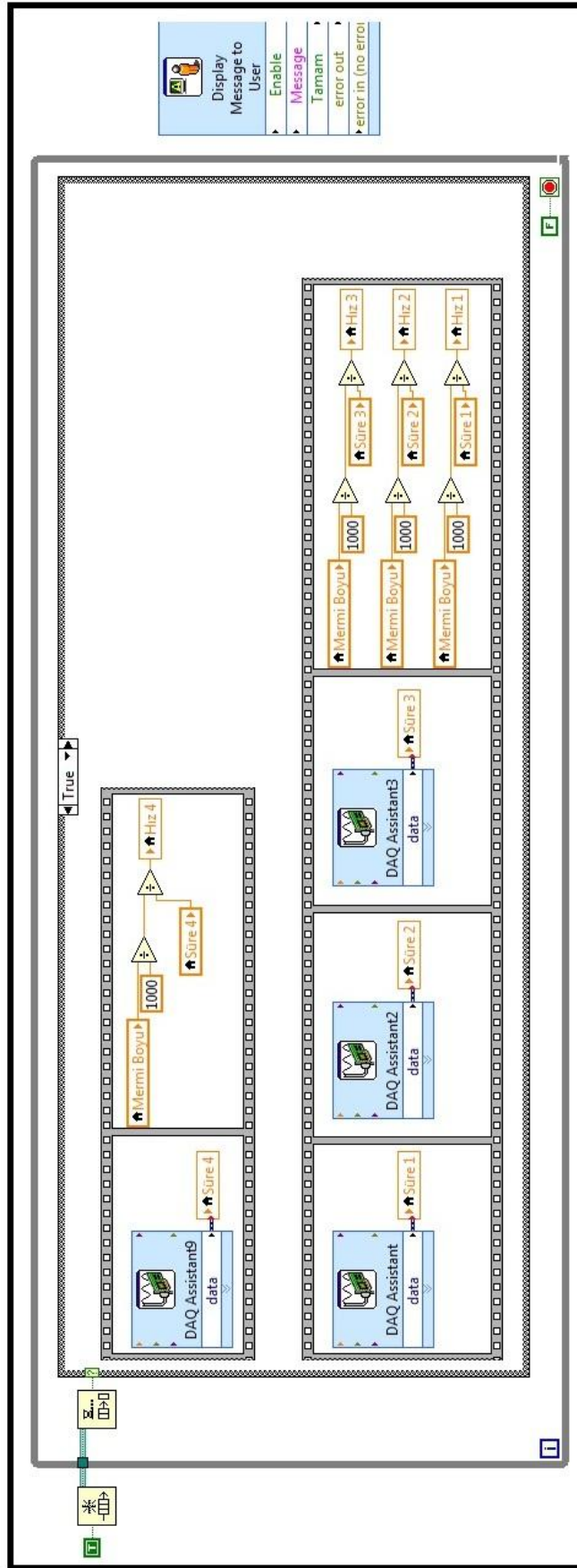
Veri alımı sırasında mermi, sensörlerin önünden sırası ile geçmektedir. Bu durumda gelen veriler de aynı kanal üzerinden sırası ile gelmektedir. Gelen verilerin hangi sensörden geldiğini ayırt etmek için programın block diyagramında “flat sequence structure” kullanılmıştır. Böylece işlemler sırası ile yapıp son olarak merminin sensörler önünden geçme süresi ve boyunun mukayese edilmesiyle hız bilgisine ulaşılmıştır. Programa ait akış diyagramı Şekil 2.31’de verilmiştir.





Şekil 2.31: Veri toplama programı akış diyagramı.

Program ilk çalıştırıldığında uyarı mesajı gelmektedir. Herhangi bir tetikleme sinyali alınmadığı durumda ise program bekleme konumunda kalmaktadır. Tetikleme sinyali geldiği anda sistem üzerinde yer alan tüm sensörlerden gelen gerilim değerleri sırası ile kaydedilmekte ve merminin son olarak hangi sensörden geçtiğini belirten led ikonlar front panel üzerinde yanmaktadır. Programa ait block diyagram Şekil 2.32’de verilmektedir.

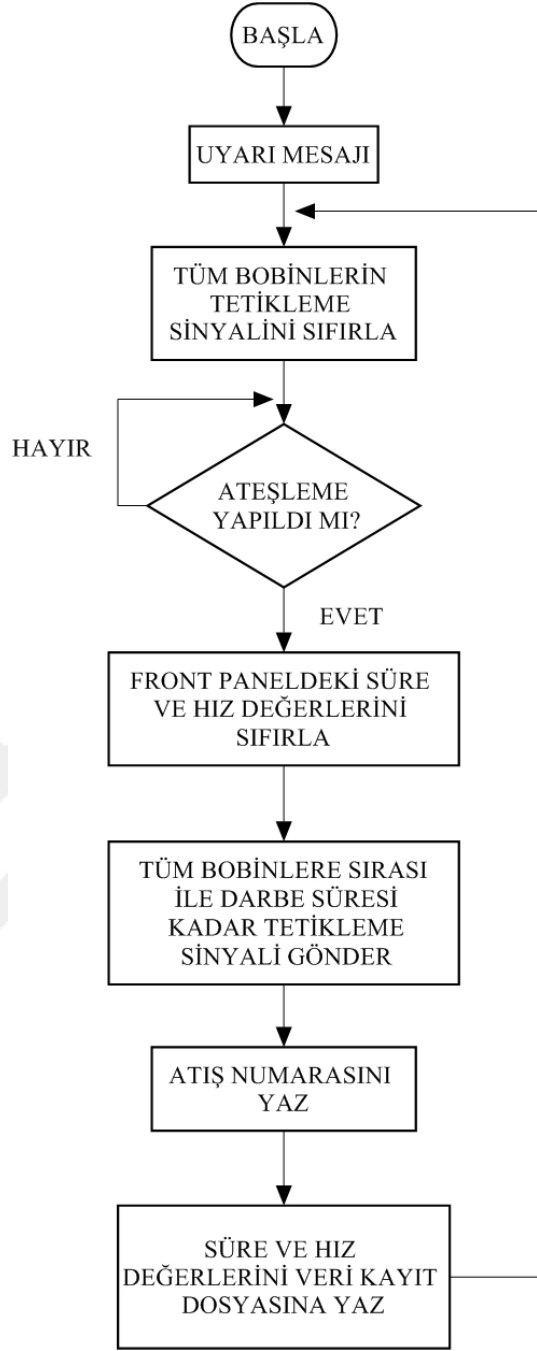


Şekil 2.32: Veri toplama programı block diagramı.

2.3.2 Programın Stator Bobinleri Tetikleme ve Veri Kayıt Bölümü

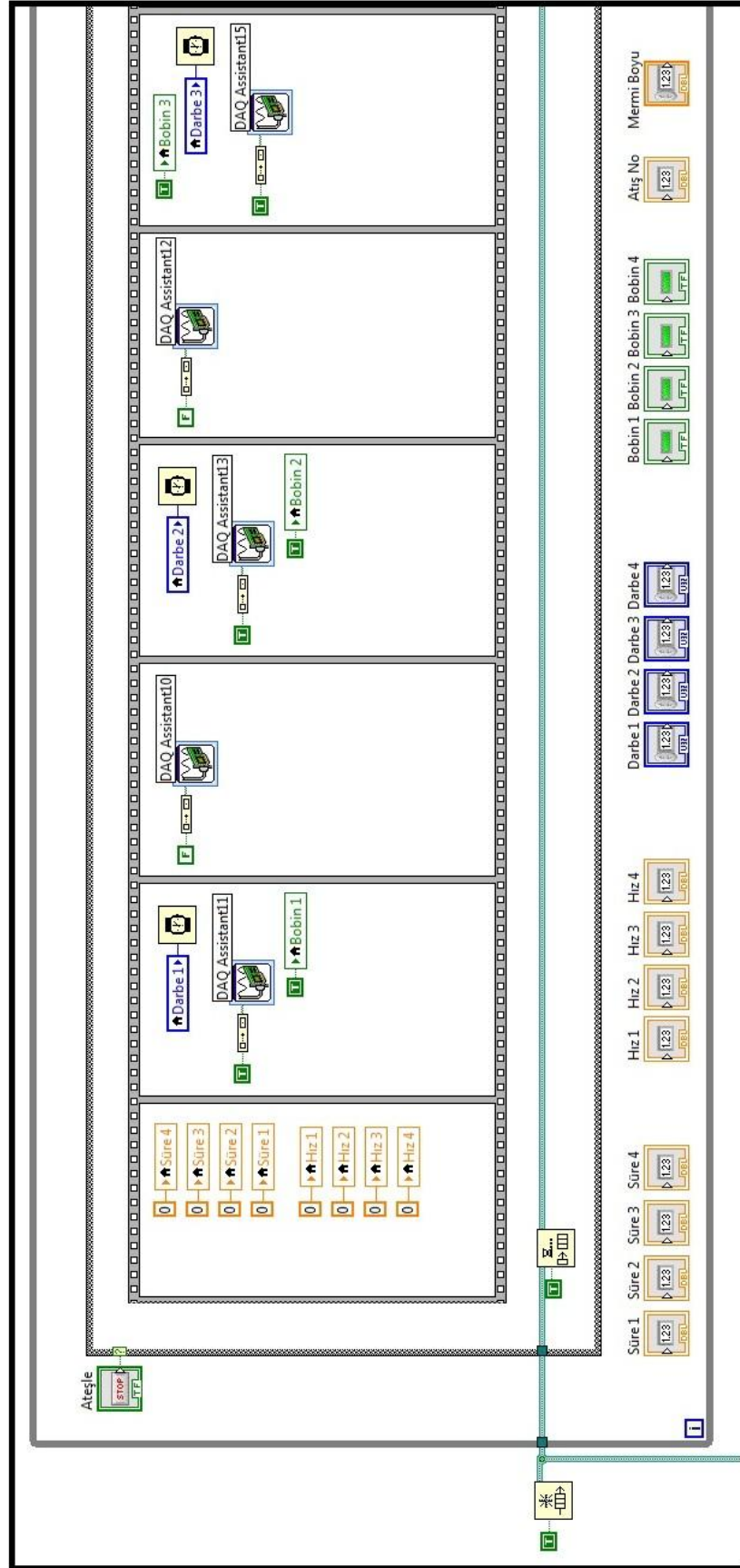
LabVIEW programı ilk çalıştırıldığında veri kaydı için dosya seçimi, darbe süresi girişleri ve mermi boyu girişinin yapılması istenmektedir. Bu işlemler yapıldığında program üzerinde ilk olarak DAQ Kart'ın stator bobinleri tetiklemek için kullanılan digital output pinleri sıfırlanmaktadır. Bu sıfırlama işleminin ardından optik sensörler ve manyetik fırlatıcı atış için hazır durumda beklemektedir. Mermi uygun konuma yerleştirilip ateşle butonuna basıldığında Flat Sequence Structure ile birkaç işlem sırası ile yapılmaya başlanmaktadır.

Bu yapıda ilk olarak Front Panel üzerinde yer alan süre ve hız değerleri sıfırlanmaktadır. İkinci adımda birinci stator bobinine Front Panel üzerinde girilen birinci darbe süresi kadar tetikleme yapılarak bobin üzerinden akım geçişi sağlanmaktadır. Diğer adımlarda da aynı şekilde sırası ile darbe süreleri kadar bütün stator bobinleri tetiklenmektedir. Bu işlemlerin ardından son olarak süre ve hız değerleri Front Panel üzerinde yazılmakta ve bilgisayar üzerinde veri kayıt dosyasına işlenmektedir. Programa ait akış diyagramı Şekil 2.33'de verilmiştir.

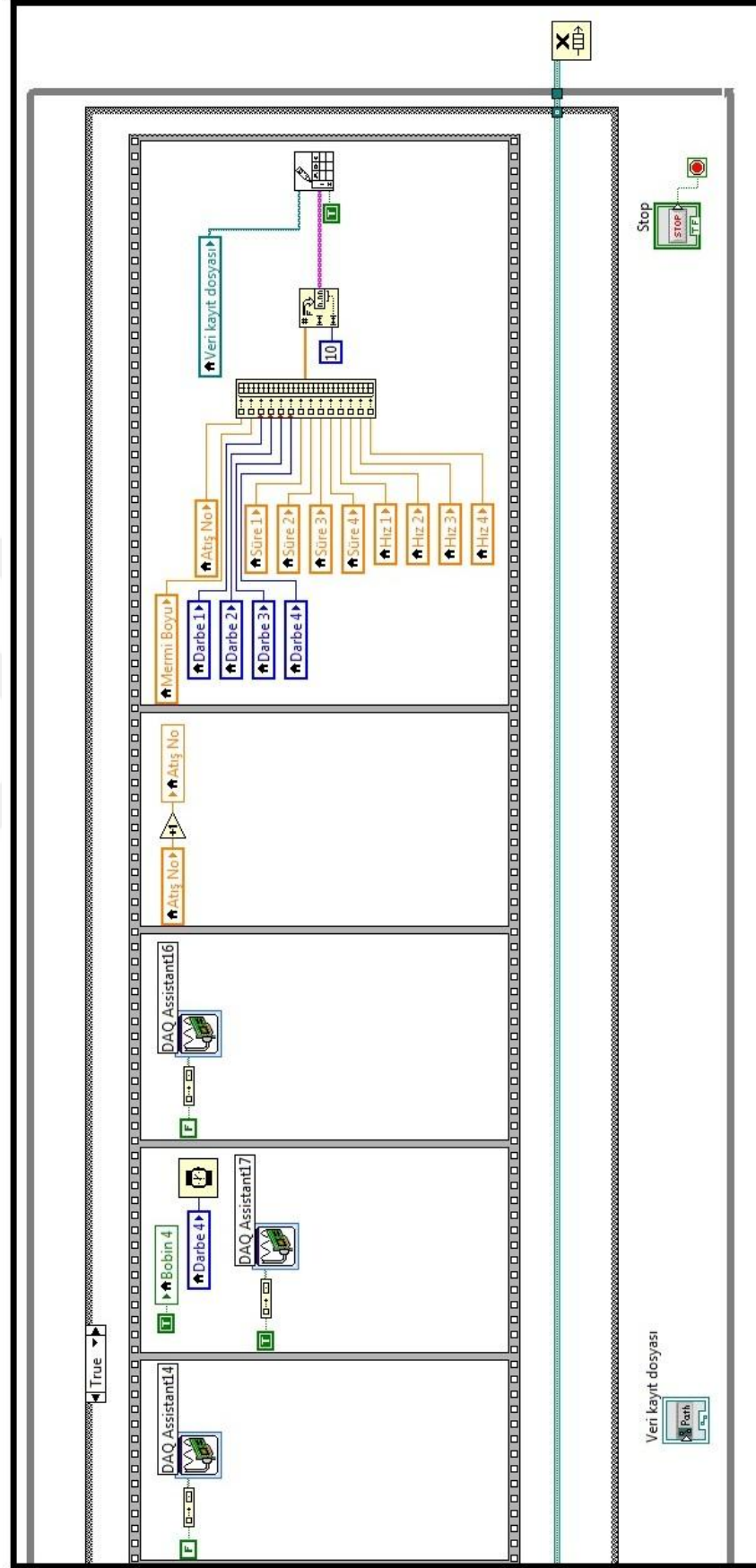


Şekil 2.33: Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programı akış diyagramı.

Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programında daha öncede söz edildiği gibi işlemlerin sırası ile gerçekleşmesi için “flat sequence structure” kullanılmıştır. Bununla birlikte işlemlerin bir döngü halinde tekrarlanması için “while loop” ve şartlı yapıların gerçekleşmesi için ise “case structure” kullanılmıştır. Ayrıca front panel üzerinde yer alan “DUR” butonu da sistemi durdurması amacı ile kodlanmıştır ve bu butona basıldığı takdirde program durmaktadır. Programa ait block diyagram Şekil 2.34’de verilmiştir.



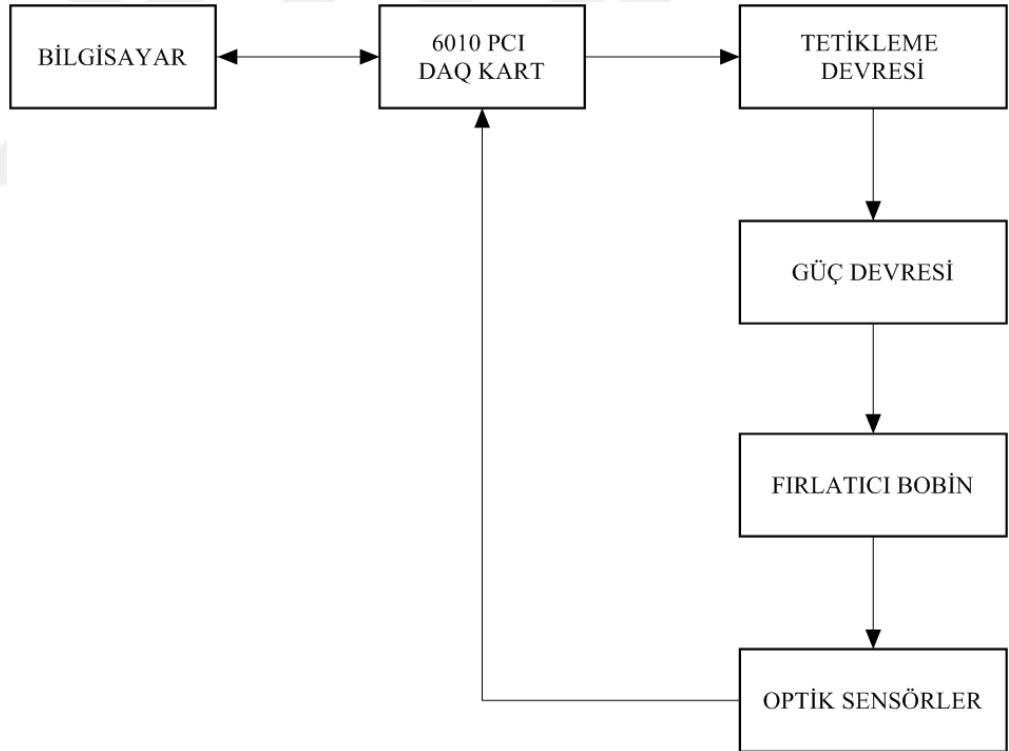
Şekil 2.34: Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programı block diyagramı.



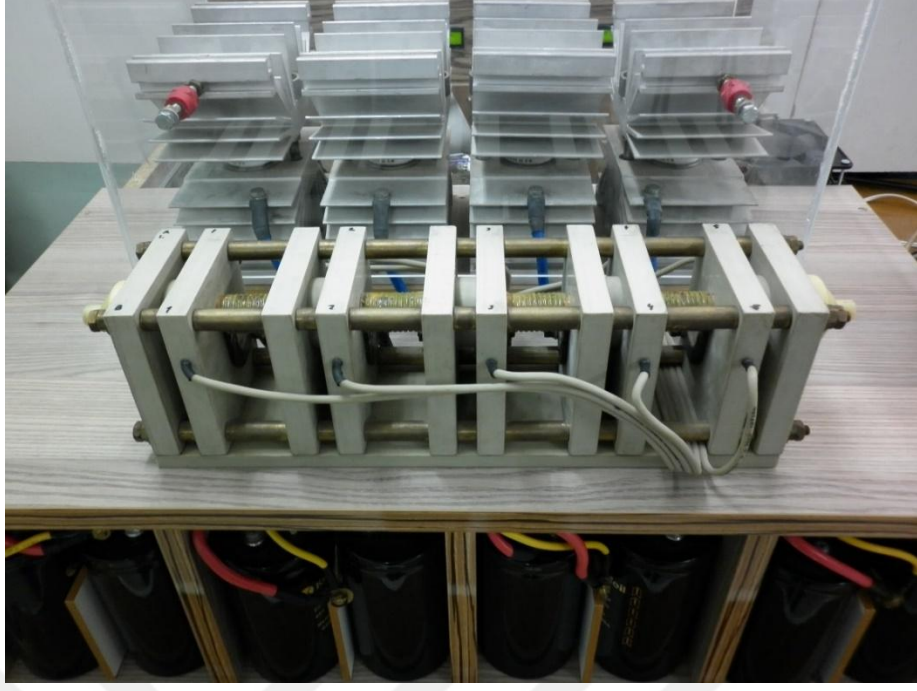
Şekil 2.34(devam): Stator bobinleri tetikleme ve veri kayıt programı block diyagramı

3. GELİŞTİRİLEN ELEKTROMANYETİK FIRLATICI SİSTEMİNİN ÇALIŞMASI

Geliştirilen elektromanyetik fırlatıcı sistemi bilgisayar programı, arabirim kartı, tetikleme devresi, güç devresi, fırlatıcı bobin ve optik sensörlerden oluşmaktadır. Bilgisayardan gelen veriler doğrultusunda 6010 PCI DAQ Kart tetikleme devresini çalıştırmaktadır. Tetikleme devresi güç devresi ile fırlatıcı bobinler arasında anahtarlama görevi yapmaktadır. Anahtar kapanıp devre tamamlandığında fırlatıcı bobinler enerjilenmekte ve fırlatma işlemi gerçekleşmektedir. Fırlatma sırasında optik sensörler gerekli ölçümleri yaparak DAQ karta bildirir ve bilgiler bilgisayara iletilir. Şekil 3.1’de elektromanyetik fırlatıcı sisteminin blok diyagramı, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de de elektromanyetik fırlatıcının genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.1: Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin blok diyagramı.

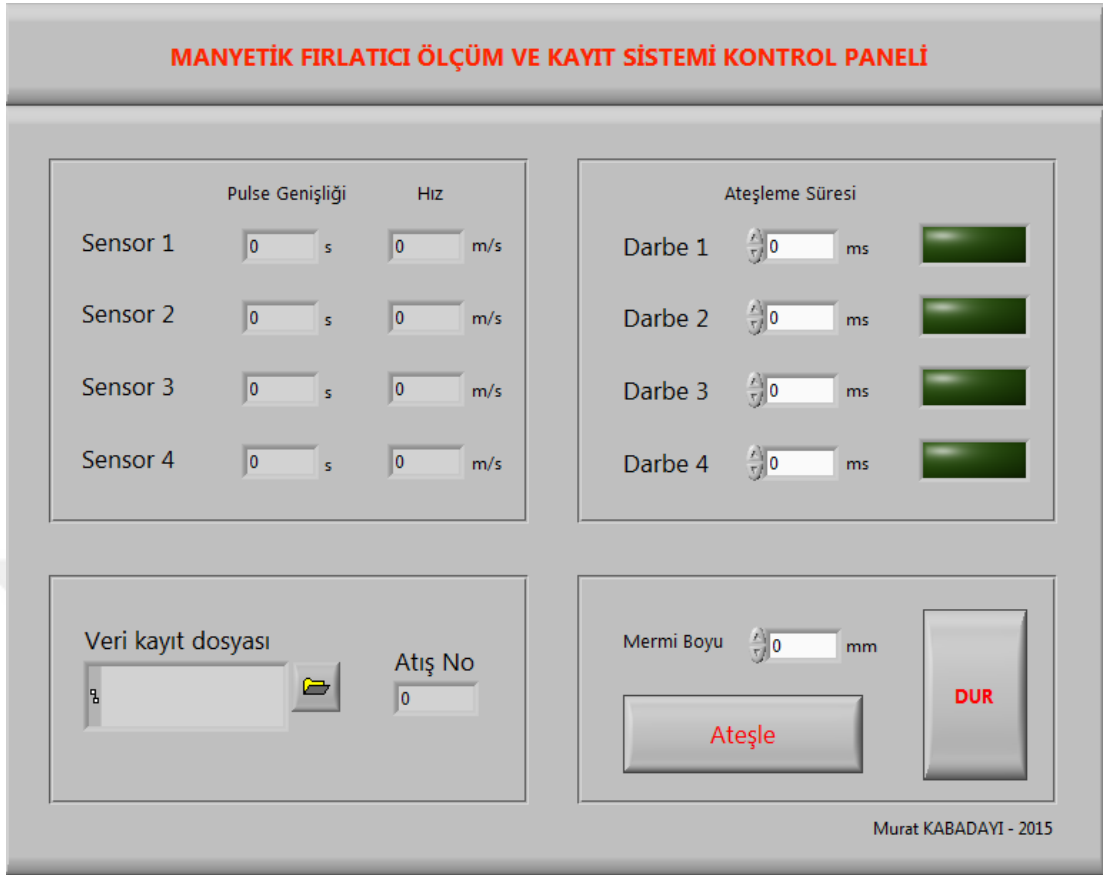


Şekil 3.2: Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin önden görünüşü.



Şekil 3.3: Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin arkadan görünüşü.

Geliştirilen elektromanyetik fırlatıcı sisteminin LabVIEW programına ait arayüzü Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4: LabVIEW tabanlı yazılımın ara yüzü.

Elektromanyetik fırlatıcı sistemi ilk olarak bilgisayar programının çalıştırılmasıyla başlamaktadır. Yazılım çalıştırıldığında veri kaydı için dosya seçiminin yapılması istenmektedir. Daha sonra program üzerinde sabit mıknatıs boyunun girişi yapılmalıdır. Fırlatma işlemi yapılacak sabit mıknatısın boyu ve çapı dikkate alınarak her bir bobin için farklı ateşleme süresi (darbe süresi) yazılmaktadır. Ateşleme süresi düzgün seçilmez ise mıknatıs bir sonraki stator bobinin ortasına gelemeden uygulanan yavaşlatıcı kuvvet ile durdurulmaktadır. Bu yüzden manyetik fırlatıcı sisteminde maksimum hızın sağlanması için ateşleme süresinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Elektromanyetik fırlatıcı sisteminde merminin başlangıç konumu fırlatma işlemi açısından büyük önem taşımaktadır. Fırlatma işlemi yapılmadan önce merminin ilk stator bobininin orta noktasından ileri konulması gerekmektedir. Eğer ilk bobinin orta noktasından ileri konulmaz ise mermiye, gitmesi istenilen yönün zıttı yönünde bir kuvvet uygulanmaktadır. Yapılan denemelerde mermi başlangıç

pozisyonu için en uygun nokta saptanmış ve her atış denemesinde merminin aynı noktadan atılması sağlanmıştır.

Program ara yüzü üzerinde veri kayıt dosyası, mermi boyu ve her bir bobinin darbe süresi girildikten sonra merminin uygun konuma yerleştirilmesiyle fırlatma işlemi başlatılmaktadır. “Ateşle” butonuna basıldığında 6010 PCI DAQ Kart aracılığı ile tetikleme devresi çalıştırılmaktadır. Tetikleme devresi ise güç devresini çalıştırmakta ve birinci stator bobinine “darbe 1” bölümünde girilen ateşleme süresi kadar akım verilmesini sağlamaktadır. Birinci stator bobinine akım verilmesiyle birlikte ateşleme sistemi çalışmakta ve mermi hareketini gerçekleştirmektedir. Merminin stator bobinlerin giriş ve çıkışında hız ölçümü yapılmaktadır. Hız ölçümünde fırlatma sistemi içindeki sensör, merminin sensör önünden geçiş süresini (pals genişliğini) ölçmektedir. Program ara yüzünde girilen mermi boyu ve pals genişliği dikkate alınarak merminin sensör önünden geçiş hızı hesaplanmaktadır. Bu işlemler her bir stator bobin için ayrı ayrı yapılmaktadır. Merminin son stator bobininden çıkmasıyla beş sensöre ait pals genişlikleri ve mermi hızları sensör bilgileri kısmında görüntülenmektedir. Ayrıca merminin hangi stator bobin içinde olduğu yazılım ara yüzündeki led ikonlarının yanmasıyla takip edilebilmektedir.

Manyetik fırlatıcı sisteminde kaçınıcı atışın yapıldığı yazılım ara yüzünde atış no kısmında gösterilmektedir. Atış gerçekleştiğinde atışa ait tüm bilgiler ara yüzde yazdırıldığı gibi veri dosyası olarak bilgisayara kayıt edilmektedir.

4. BULGULAR

Çalışmamız kapsamında geliştirilen manyetik fırlatıcının fırlatma performansını test ederken kullanılan merminin boyu, çapı ve stator bobinlere uygulanan gerilim değişken tutulmuştur. İlk olarak deneyde kullanılan merminin çapı ve boyu sabit tutulurken gerilim değiştirilmiş, daha sonra uygulanan gerilim ve mermi çapı sabit tutulurken merminin boyu değiştirilmiş ve son olarak da uygulanan gerilim ve mermi boyu sabit tutulurken merminin çapı değişken tutulmuştur.

Çalışmamızda stator bobinlerin tetikleme (ateşleme) süresi, merminin her bir stator bobinden çıkış hızı maksimum değere ulaşana kadar değiştirilmiştir. Bu işlem mermi boyu, çapı ve stator bobinlere uygulanan gerilim değerlerinden herhangi biri değişken iken tekrarlanmıştır. Her bir değişkende elde edilen optimum ateşleme süreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Geliştirilen manyetik fırlatıcı sistemi ile elde edilen sonuçlar

Değişken: Gerilim **Sabitler:** Boy(15mm), Çap(6mm)

Deneysel NO	Gerilim V	Tetikleme Süresi 1	Tetikleme Süresi 2	Tetikleme Süresi 3	Tetikleme Süresi 4	Süre 1 ms	Süre 2 ms	Süre 3 ms	Süre 4 ms	Hız 1 m/s	Hız 2 m/s	Hız 3 m/s	Hız 4 m/s
64	14	80ms	75ms	75ms	150ms	0,01319	0,01239	0,01177	0,01101	1,13714	1,20975	1,27349	1,34066
52	16	70ms	65ms	55ms	150ms	0,01156	0,01057	0,00978	0,00933	1,29754	1,41813	1,53293	1,60701
50	18	68ms	63ms	57ms	150ms	0,01128	0,01032	0,00954	0,00891	1,32868	1,45259	1,57172	1,66375
64	20	65ms	65ms	50ms	150ms	0,01102	0,01025	0,00944	0,00873	1,36027	1,46262	1,58887	1,67692

Değişken: Boy **Sabitler:** Gerilim(20V), Çap(6mm)

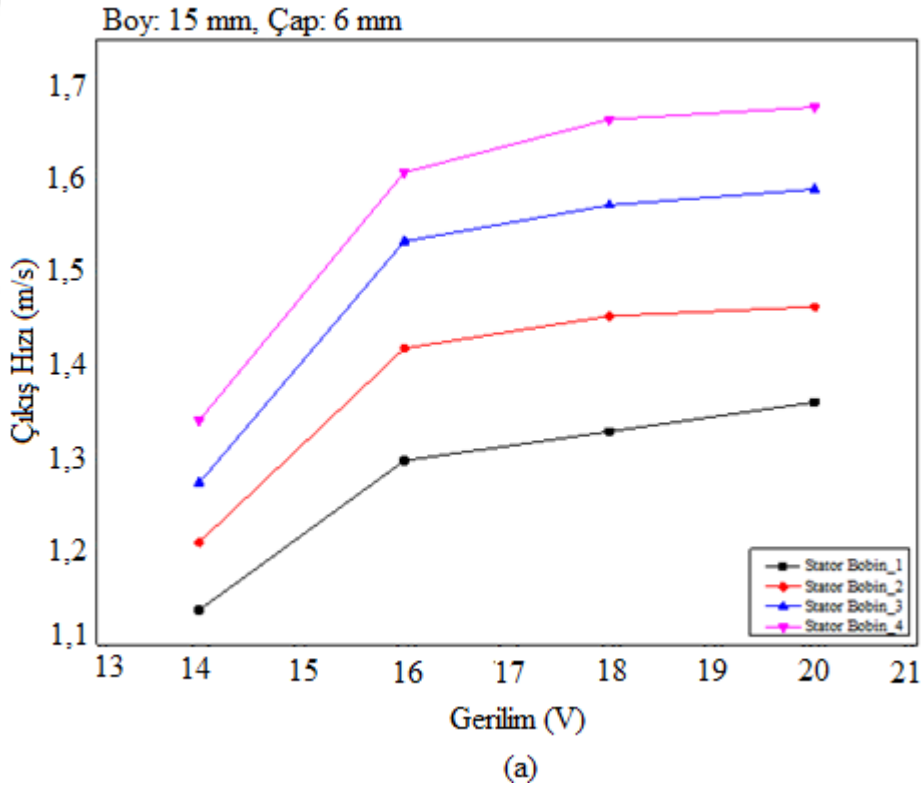
Deneysel NO	Boy mm	Tetikleme Süresi 1	Tetikleme Süresi 2	Tetikleme Süresi 3	Tetikleme Süresi 4	Süre 1 ms	Süre 2 ms	Süre 3 ms	Süre 4 ms	Hız 1 m/s	Hız 2 m/s	Hız 3 m/s	Hız 4 m/s
96	12	70ms	65ms	65ms	150ms	0,00836	0,00829	0,00793	0,00780	1,43385	1,44144	1,51234	1,53699
64	15	65ms	65ms	50ms	150ms	0,01102	0,01050	0,00907	0,00873	1,36027	1,49262	1,65243	1,67692
68	18	65ms	55ms	50ms	150ms	0,01410	0,01172	0,01023	0,00905	1,27625	1,53534	1,75916	1,79143
58	21	65ms	60ms	60ms	150ms	0,01823	0,01390	0,01187	0,01011	1,15162	1,51040	1,76859	1,79939

Değişken: Çap **Sabitler:** Gerilim(20V), Boy(10mm)

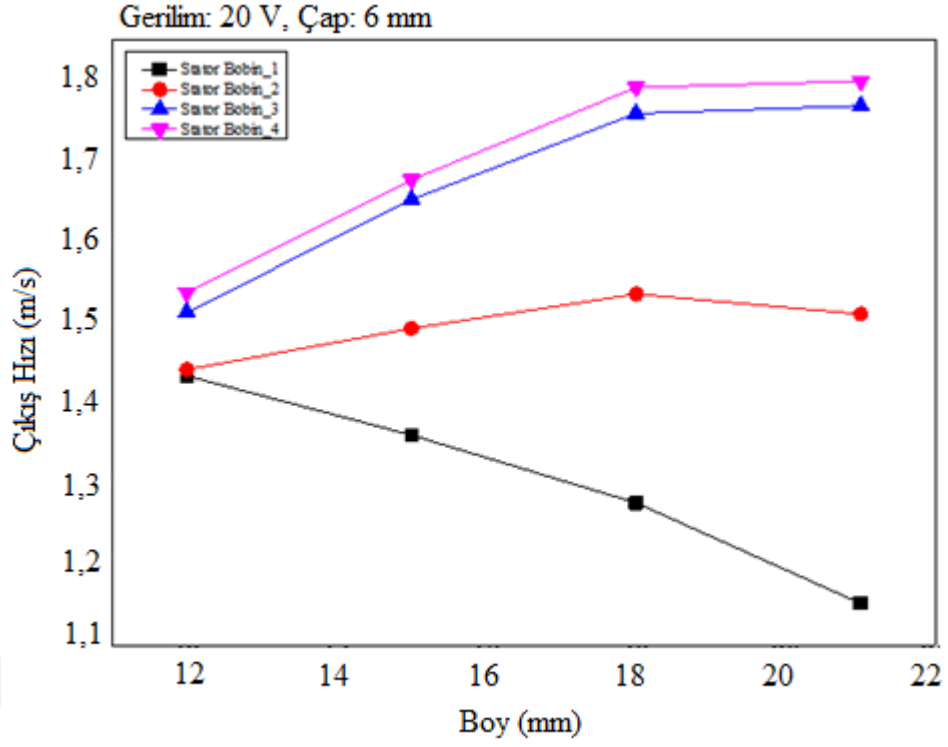
Deneysel NO	Çap mm	Tetikleme Süresi 1	Tetikleme Süresi 2	Tetikleme Süresi 3	Tetikleme Süresi 4	Süre 1 ms	Süre 2 ms	Süre 3 ms	Süre 4 ms	Hız 1 m/s	Hız 2 m/s	Hız 3 m/s	Hız 4 m/s
130	4,5	75ms	60ms	60ms	100ms	0,00618	0,00605	0,00583	0,00573	1,61745	1,65218	1,71324	1,74648
170	5	75ms	65ms	60ms	100ms	0,00667	0,00648	0,00621	0,00613	1,49758	1,54309	1,60876	1,63920
121	6	80ms	80ms	100ms	200ms	0,00706	0,00685	0,00658	0,00653	1,41724	1,45948	1,51919	1,53230

Tablo 4.1'e bakıldığında stator bobinlerinin ateşleme süreleri ilk üç bobinde genel olarak azalma eğilimindedir. Bunun sebebi bobinler tarafından hızlandırılan merminin bir sonraki stator bobininden daha hızlı geçmesiyle bobin içinde kalma süresinin kısılmasıdır. Zaman olarak kısılmasına rağmen merminin her bir bobin içinde hızlandırılması aynı mesafe boyunca gerçekleşmektedir. Son stator bobinin ateşleme süresinin fazla olması merminin çıkış hızını etkilememektedir. Bu sebeple son stator bobinin tetikleme süresi ortalama 150 ms olarak girilmiştir.

En uygun ateşleme süreleri girilerek fırlatma işlemi birçok defa tekrarlanmış ve maksimum hız elde edilmiştir. Elde edilen maksimum namlu çıkış hızının stator bobin gerilimine göre değişim grafiği, mermi boyuna göre değişim grafiği ve mermi çapına göre değişim grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.

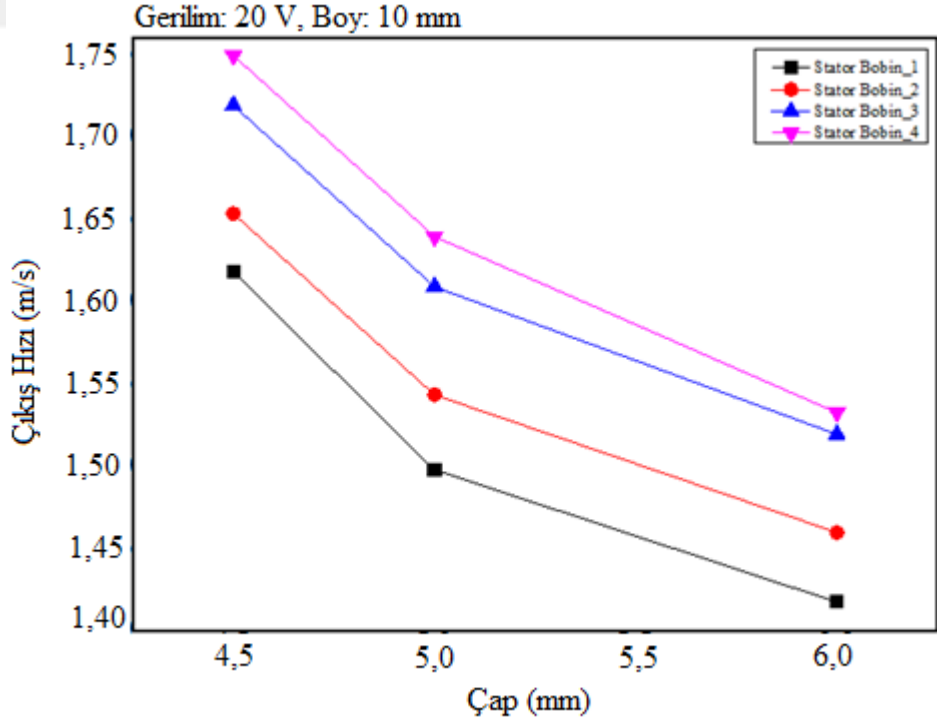


Şekil 4.1: Çıkış hızının a) Stator bobin gerilimine göre değişimi, b) Sabit mıknatısın boyuna göre değişimi, c) Sabit mıknatısın çapına göre değişimi.



(b)

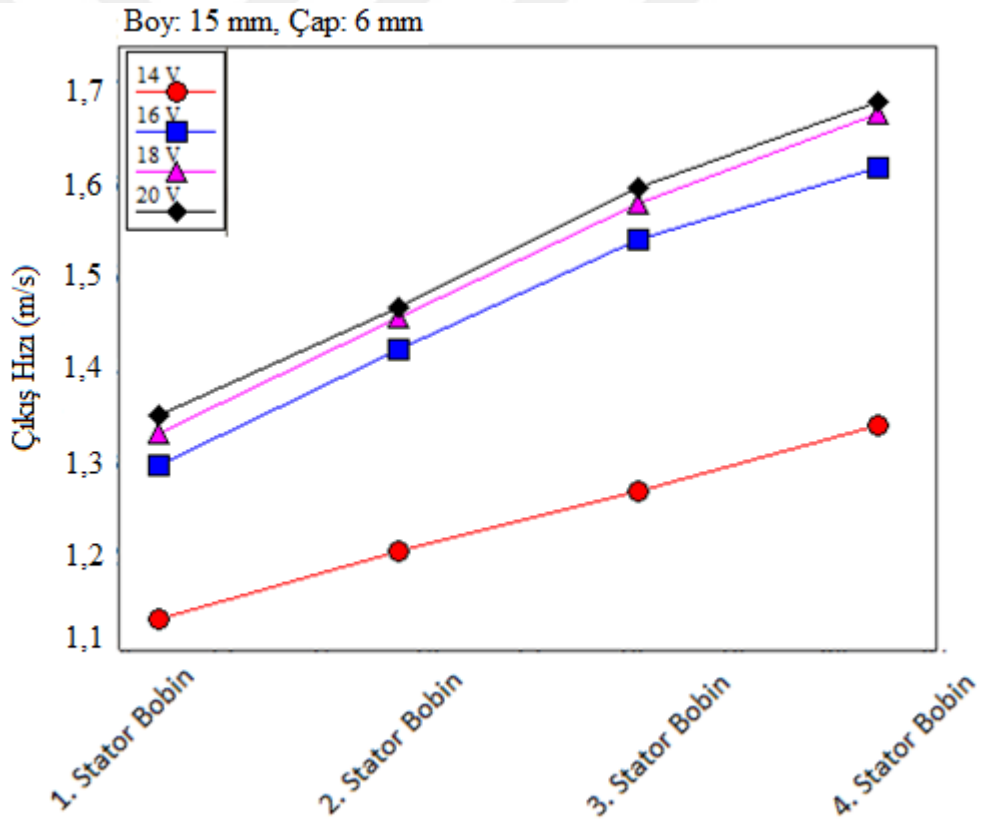
Şekil 4.1(devam): Çıkış hızının a) Stator bobin gerilimine göre değişimi, b) Sabit mıknatısın boyuna göre değişimi, c) Sabit mıknatısın çapına göre değişimi.



(c)

Şekil 4.1(devam): Çıkış hızının a) Stator bobin gerilimine göre değişimi, b) Sabit mıknatısın boyuna göre değişimi, c) Sabit mıknatısın çapına göre değişimi.

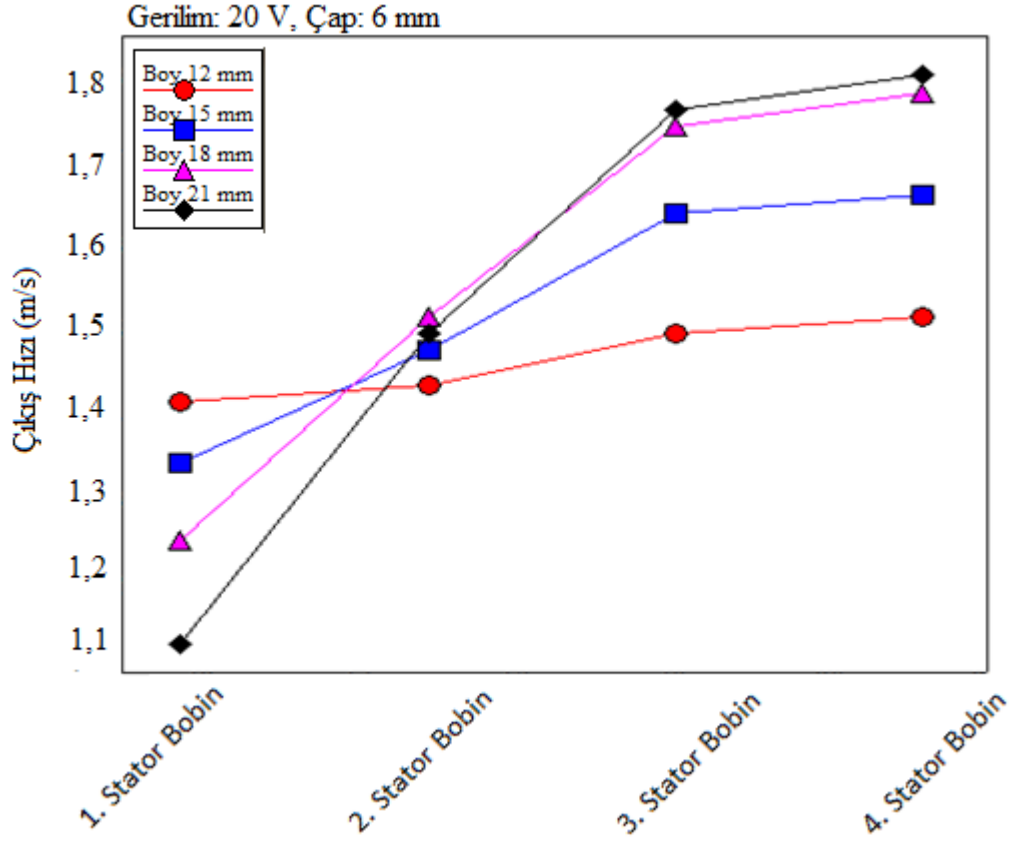
Şekil 4.1.a'da değişken tutulan gerilimin artması ile 1'inci ve 2'inci Stator bobindeki hız artışının diğer bobinlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Gerilim artmasına bağlı olarak akımın ve BT manyetik alanının artacağı, bununla birlikte sabit mıknatısın her stator bobin içinde eşit ve daha büyük kuvvete maruz kalarak hız artışlarının eşit olacağı düşünülebilir. Fakat sabit mıknatısın bir sonraki stator bobin içinde kalma sürelerinin hız artışıyla birlikte azalması, uygulanan kuvvet artışı eşit olsa da stator bobinlerin içindeki hız artışlarının eşit olmamasına sebep olmaktadır. Stator bobinin boyunun uzun tutulması ile birlikte gerilimin artırılması her bir bobindeki hız artış aralığını büyütebilir. Ayrıca stator bobinlere uygulanan gerilimin artması mıknatısın hızını arttırmasına rağmen ivmesinde büyük bir değişiklik meydana getirmemiştir (Şekil 4.2). Bu durum stator bobinlerin enerjilendirme zamanlarının doğru seçildiğini göstermektedir.



Şekil 4.2: Merminin gerilim değişimine göre stator bobinlerdeki hız değişimi.

Şekil 4.1.b'de ise, değişken tutulan sabit mıknatıs boyunun artması ile stator bobinlerin her birindeki hız artış miktarları görülmektedir. Burada 1'inci Stator bobinin dışındaki tüm bobinlerde boyun artmasının hız artışına pozitif etki yaptığı

anlaşılmaktadır. Bunun sebebi olarak sabit mıknatısın boyunun artmasıyla B manyetik alanın ve ona bağlı kuvvetin artması gösterilebilir. 1'inci Stator bobinde mıknatıs boyunun artmasının hız artışına negatif bir etki yaptığı görülmektedir. Bu durumun iki sebebi olabilir. İlk sebebi başta da ifade edildiği gibi sabit mıknatısın arka kısmı 1'inci Stator bobinin tam ortasına getirilerek enerji uygulaması yapılmıştır. Mıknatısın boyunun büyümesi, mıknatısın bobinin ikinci yarısında daha kısa süre kuvvete maruz kalması anlamına gelmektedir. Bu durum 1'inci Stator bobindeki çıkış hızının mıknatısın boyunun büyümesiyle azalmasına sebep olmaktadır. Mıknatıs boyunun artmasıyla 1'inci bobindeki hızın azalmasının ikinci sebebi ise, mıknatıs ile bobin arasındaki sürtünme kuvvetidir. Mıknatısın boyunun büyümesiyle ağırlığı da artmaktadır. Bu sebeple mıknatısa etki eden sürtünme kuvveti de artacaktır. Sürtünme kuvvetinin artması ile mıknatıs daha zor harekete geçecek ve ilk bobinde kazandığı hız miktarı azalacaktır. Burada sürtünme kuvvetinin artmasıyla 1'inci stator bobinde olduğu gibi diğer stator bobinlerde de hızın azalacağı düşünülebilir. Fakat 1'inci Stator bobine göre diğer bobinlerde hız daha fazla olduğundan, mıknatıs bobin içinde yer ile sürekli temas sağlamadan sekerek gitmektedir. Bu da ilk bobine göre sürtünme kuvvetinin azalmasına sebep olacaktır.



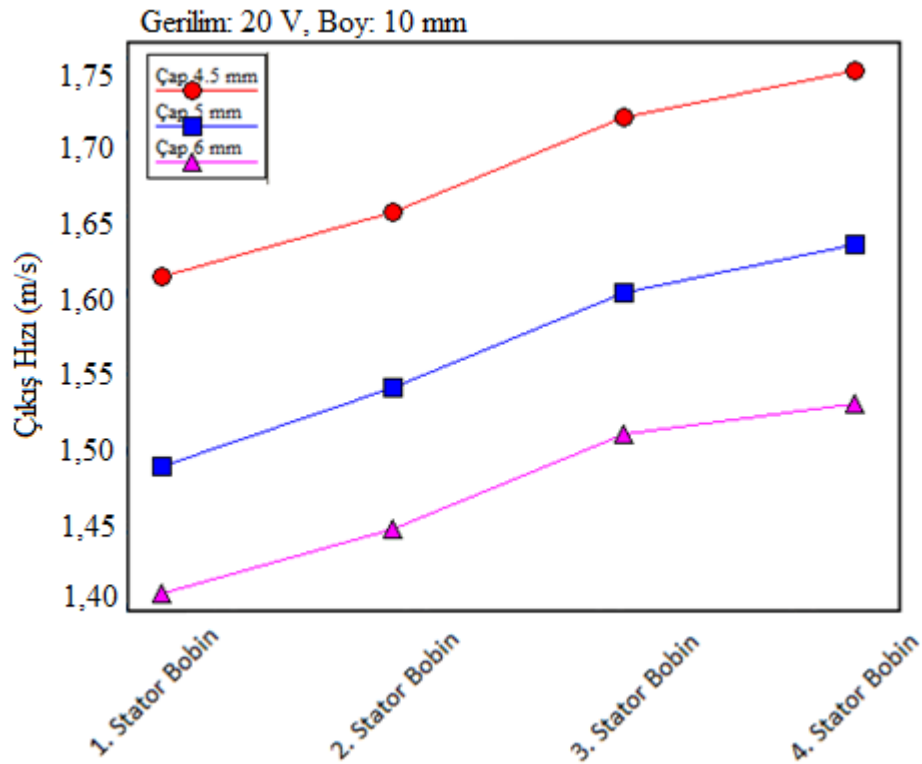
Şekil 4.3: Merminin mıknatıs boyuna göre stator bobinlerdeki hız değişimi.

Şekil 4.3’de mıknatısın boyuna bağlı olarak stator bobinlerdeki hızın değişim grafiği verilmiştir. Buradan mıknatısın boyunun artmasıyla grafikteki eğimin yani ivmenin de arttığı görülmüştür. İvmesinin artmasının sebebi olarak, mıknatıs boyunun artmasıyla manyetik akı yoğunluğunun büyümesi ve dolayısıyla itme kuvvetinin büyümesi gösterilebilir.

Şekil 4.1.c’de ise tüm stator bobinlerde değişken tutulan mıknatıs çapının artmasıyla her bobinden çıkış hızının azaldığı görülmektedir. Bu durumun iki sebebi olabilir. Birinci sebep, iç yarıçapı 7 mm olan stator bobin içinde mıknatısın çapının büyümesiyle iç bölgede manyetik akı çizgilerinin daha çok ve daha homojen dağılımıdır. Bu dağılım, stator bobin içindeki frenleyici ve hızlandırıcı kuvveti arttıracaktır (Şekil 2.11). Hızdaki bu azalışın sebebi, 2’inci ve sonraki stator bobinlerde ateşleme yapıldığında mıknatısın bir bölümü stator bobinin ilk yarısında kalması ve mıknatısın frenlemesi olarak düşünülebilir. Bu çalışmada ateşleme zamanı, stator bobinler arasında mıknatısın sabit hızlı hareket ettiği düşünülerek hesaplanmaktadır. Hâlbuki Şekil 2.9’da görüleceği gibi kuvvet, stator bobinler

arasında bir anda sıfır olmayıp RC devresinin durulma zamanı kadar daha azalarak uygulanmaktadır. Bu da mıknatısın stator bobinler içindeki konumunda belirsizliklere neden olmaktadır. Hızdaki azalışın ikinci sebebi ise mıknatısın çapının büyümesi nedeniyle mıknatıs ile stator bobinin iç yanal yüzü arasındaki sürtünmenin artmasıdır.

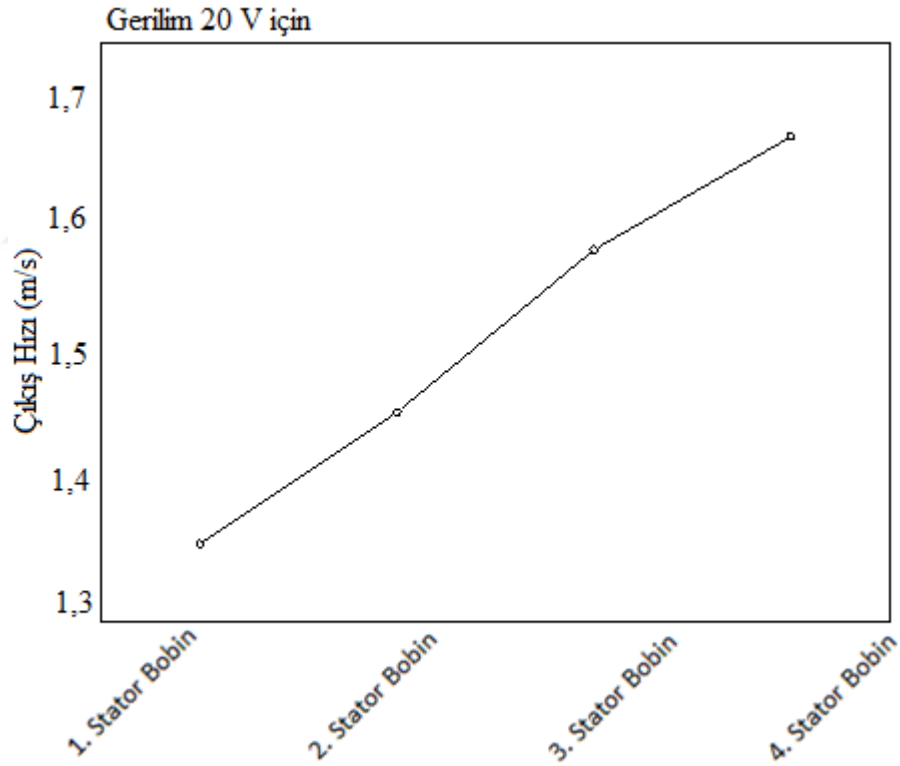
Sürtünme kuvvetinin artmasıyla mıknatısın her stator bobinden çıkış hızının azalması genel olarak birinci bobinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.4’de mıknatısın çapına bağlı olarak stator bobinlerdeki hız değişim grafiği verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı gibi mıknatıs çapının artmasıyla hız azalmış fakat ivmelerinde büyük ölçüde bir değişim olmamıştır. Bunun sebebi daha önce de ifade edildiği gibi mıknatısın birinci bobin içindeki hareketinden kaynaklanmaktadır. Mıknatısın ilk bobin içinde duruyor pozisyondan harekete başlaması sürtünme kuvvetini arttıracak dolayısıyla başlangıç hızını da düşürecektir.



Şekil 4.4: Mıknatısın çapına göre stator bobinlerdeki hız değişimi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sıralı bir şekilde dört helisel (stator) bobin üzerine uygulanan anlık değişken akım sayesinde, mknatis merminin hız kazanmasını sağlayacak LabVIEW tabanlı “Yeni Bir Helisel Bobin Elektromanyetik Fırlatıcı” geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre çizilen Şekil 5.1’e bakıldığında sabit gerilim altında her bir stator bobin çıkışında hız değişimi lineer olduğu görülecektir. Fakat Şekil 4.1 a’da görüleceği gibi 4’üncü Stator bobinden mknatisın çıkış hızı gerilimin belirli değerinden sonra sabitlenmektedir. Bu durumu mknatisın bobin içinde kalma süresinin kısalmasına bağlayabiliriz. O halde gerilim artışına bağlı olarak böyle bir sistemde merminin en son çıkış hızını arttırmak için stator bobinin boyunu büyütmek ve sayısını arttırmak gerekmektedir.



Şekil 5.1: 20 V’luk gerilimde stator bobinlerdeki hız değişimi.

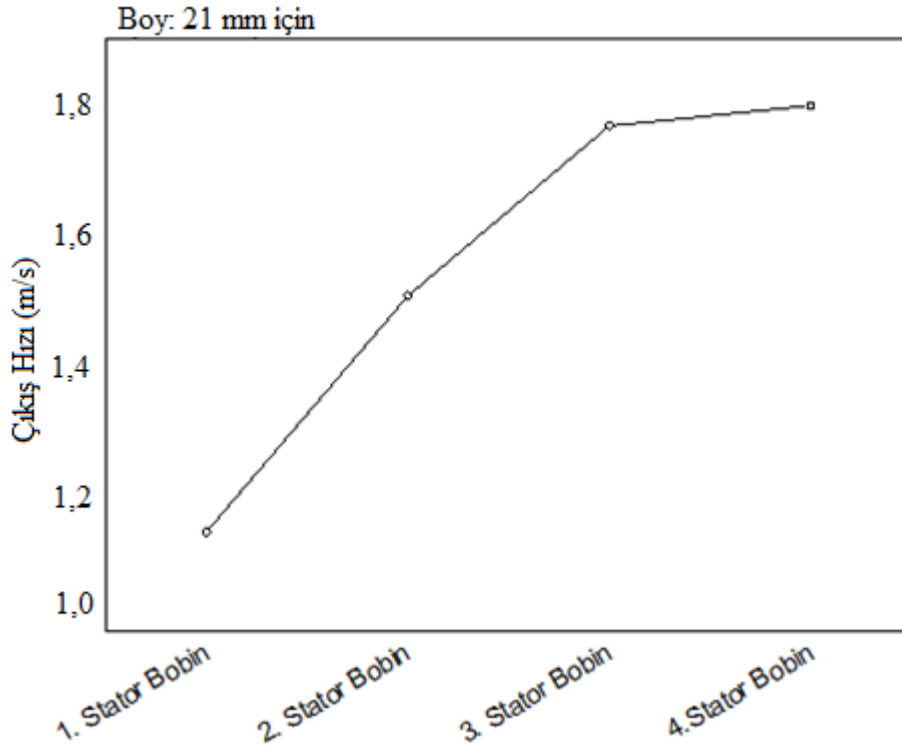
Çalışmamızda 38 mm uzunluğa sahip stator bobinler aralarında 40 mm olacak şekilde sıralı olarak yerleştirilmiştir. Daha iyi bir fırlatma işlemi bobin boyunun ve sayısının arttırılmasının yanında bobinler arası boşluğun arttırılmasıyla da sağlanabilir. Herhangi bir bobin tarafından hızlandırılan mermi diğer bobinin orta

noktasını geçene kadar bobinin enerjilendirilmesi kesilmemektedir. Böylece mermiye bobinlerin içinde ve arasında sürekli bir kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvetin etkisinde hızlanan mermi yukarıda da belirtildiği gibi son bobinlerin arasındaki mesafeyi daha kısa sürede geçecek ve kuvvet daha kısa süre etki edecektir. Bobinlerin arasındaki mesafenin giderek artmasıyla mermiye daha uzun süre kuvvet etki ettirilebilir. Şekil 5.2’de stator bobinler arasındaki mesafenin artış şekli örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Stator bobinler arasındaki mesafenin artış şekli.

Şekil 5.3’de boy sabitken ($L=21$ mm için) stator bobinlerin çıkış hızındaki değişim verilmektedir. Hızdaki bu artış karakteri diğer mıknatıs boyları için de geçerlidir. Mıknatıs boyunun büyümesi stator bobinlerdeki hız artış aralığını arttırıyor gibi gözükse de Şekil 4.1.b’de ve Şekil 4.3’de mıknatıs boyunun 18 mm’yi geçmesi durumunda 3’üncü ve 4’üncü Stator bobinlerdeki hız artışı çok büyük değerde olmamaktadır. Bu durum Şekil 5.3’de de görülmektedir. Stator bobinlerin 38 mm olduğu düşünülürse bu durum, stator bobinin iç kısmında mıknatısa etkileyen kuvvetin iki farklı yönde olmasıyla açıklanabilir. Çünkü stator bobinlerin 2’inci yarısında etkileyen kuvvetin maksimum değerinin mıknatısa etkimesi için mıknatıs boyunun maksimum 19 mm olması gerekmektedir. Eğer bu değer üzerine çıkılırsa bu durumda ateşleme sırasında mıknatısın stator bobin içinde kalan miktarı azaldığı için 4’üncü Stator bobinden çıkış hızı azalacaktır. O halde böyle bir fırlatıcıda mermi olarak kullanılacak mıknatısın boyu stator bobin boyunun yarısını geçmemelidir. Mıknatısın hızı daha fazla arttırılmak isteniyorsa stator bobin boyu daha uzun tutulmalıdır.



Şekil 5.3: 21 mm mıknatis boyu için stator bobindeki hız değişimi.

Deneysel sonuçlar, sabit mıknatis çapının büyütülmesinin hıza yavaşlatıcı etki yaptığını göstermiştir. Bunun en büyük nedeni stator bobin ile mıknatis arasındaki sürtünme kuvvetidir. Yapılacak çalışmalarda mıknatis çapı seçilirken stator bobinlerin çapına çok yakın olmamasına dikkat edilmelidir.

Sargılı elektromanyetik fırlatıcılarda bir diğer önemli husus stator bobinlerin ateşleme zamanıdır. Stator bobinlerin erken ateşlenmesi mermi üzerinde ters bir kuvvet oluşturmakta ve merminin geri sekmesine sebep olmaktadır. Geç ateşleme yapılması ise merminin daha kısa süre hızlandırıcı kuvvete maruz kalması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada merminin her bir bobinde lineer şekilde hızlanmamasının bir diğer sebebi ise stator bobinler arasında merminin düzgün doğrusal hareket ettiğini kabul etmemizden ve programda yer alan hesaplamaları buna göre yapmamızdan kaynaklanmaktadır.

Elektromanyetik fırlatıcılarda hesap hataları ve kişiden kaynaklı hataları en aza indirmek için stator bobin içine konulan sensör ağı genişletilebilir. Mermi pozisyonu stator bobinlerin ateşlenmesinde önemli bir faktör olmasına karşın, atış sırasında mermi tam olarak nerede olduğu belirlenememektedir. Bu da yanlış

zamanda ateşleme yapılmasına sebep olmaktadır. Stator bobin içinde daha fazla sensör kullanılmasıyla mermi konumu daha hassas görülebilir. Stator bobinlerin ateşleme zamanları ve süreleri sensörlerden gelen veriler doğrultusunda eş zamanlı olarak yapılması, atışları daha verimli ve stabil hale getirecektir.

Hataların bir diğer sebebi olarak da entegrelerin iletişim hızı gösterilebilir. Bu çalışmada, çalışma akımı mikroamper düzeyde olan ve giriş empedansı yüksek CMOS entegreleri kullanılmıştır. Bu seçimde güç tüketimi ve sistemin elektronik yapısının statik elektrikten etkilenmemesi rol oynamıştır. Fakat CMOS entegrelerin anahtarlama hızının düşük olması ateşleme zamanının belirlenmesinde ufak belirsizliklere sebep olmuştur. Belirsizliği azaltmak için anahtarlama hızı CMOS entegrelerine göre daha hızlı olan TTL entegreleri kullanılabilir. Fakat bu çalışmada kullanılan NI PCI 6010 kartının, çıkış kapasitesi yüksek entegrelere ihtiyaç duyması sebebiyle CMOS entegreleri tercih edilmiştir.

Sonuç olarak böyle bir fırlatıcı ile yüksek hızlı bir fırlatma gerçekleştirmek için, stator bobin sayısı ile boyunu arttırmak, bobinler arasındaki mesafeyi hızla doğru orantılı bir şekilde ayarlamak ve mıknatıs çapını stator bobinin iç çapına yakın tutmamak gerekmektedir.[73]

6. KAYNAKLAR

- [1] Chunyan, L. and Baoquan, K., “Research on Electromagnetic Force of Large Thrust Force PMLSM Used in Space Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (5), 1209-1213, (2013).
- [2] Mirzaer, M., Abdollahi, S. E. and Vahedi, A., “Design optimization of reluctance synchronous linear machines for electromagnetic aircraft launch system”, *IEEE Trans. Magn.*, 45 (1), 1–6, (2008).
- [3] Lu, J. And Ma, W., “Research on end effect of linear induction machine for high-speed industrial transportation”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (1), 116–120, (2011).
- [4] Engel, T. G., Neri, J. M. And Nunnally, W. C., “Efficiency and scaling of constant inductance gradient DC electromagnetic launchers”, *IEEE Trans. Magn.*, 42 (8), 2043–2051, (2006).
- [5] Engel, T. G. and Veracka, M. J., “The Voltage–Current Scaling Relationship and Impedance of DC Electromagnetic Launchers”, *IEEE Transactions On Plasma Science*, 43 (5), (2015).
- [6] Engel, T. G., Neri, J. M. and Veracka, M. J., “Characterization of the velocity skin effect in the surface layer of a railgun sliding contact”, *IEEE Trans. Magn.*, 44 (7), 1837–1844, (2008).
- [7] Tomas, S., Markus, S. and Saulius, B., “Magnetic Diffusion Inside the Rails of an Electromagnetic Launcher: Experimental and Numerical Studies”, *IEEE Transactions On Plasma Science*, 41 (10), 2790-2795, (2013).
- [8] Schneider, M. and Schneider, R., “Measurement of the current distribution between multiple brush armatures during launch”, *IEEE Trans. Magnetics*, 45 (1), 436-441, (2009).

- [9] Liebfried, O., Schneider, M. And Balevicius, S., “Current distribution and contact mechanisms in static railgun experiments with brush armatures”, *IEEE Trans. Plasma Science*, 39 (1), 431-436, (2011).
- [10] Kondratenko, A. K., Bykov, M.A., Schastnykh, B. S., Glinov, A. P. And Poltanov, A. E., “The study of sliding contact in railgun with metal armature”, *IEEE Trans. Magnetics*, 33 (1), 576-581, (1997).
- [11] Ferrero, R., Marracci, M. and Tellini, B., “Characterization of inductance gradient and current distribution in electromagnetic launchers”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60 (5), 1795-1801, (2011).
- [12] Ferrero, R., Marracci, M. and Tellini, B., “Uncertainty analysis of local and integral methods for current distribution measurements”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (1), 177-184, (2013).
- [13] Ferrero, R., Marracci, M. and Tellini, B., “Current distribution measurements in rail launcher multibrush armatures during launch”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 62 (5), 1138-1144, (2013).
- [14] Akyazı, Ö., “Elektromanyetik Fırlatıcılar”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*”, Trabzon, (2006).
- [15] Zhang, Y., Ruan, J., Wang, Y., “Scaling study in a capacitor-driven railgun”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (1), 215-219, (2011).
- [16] Engel, T. G. and Veracka, M. J., “Solid-projectile helical electromagnetic launcher with variable gradient stator and magnetically levitated armature”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 39 (12), 3371–3377, (2011).
- [17] Zou, B., Cao, Y., Wu, J., Wang, H. and Chen, X., “Magnetic-structural coupling analysis of armature in induction coilgun”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 39 (1), 65–70, (2011).
- [18] Eugene.C., Melvin M., Billy W. D., “A 10-Stage Reconnection Demonstration Launcher,” *IEEE Trans. on Mag.*, 1, 644-646 (1991).

- [19] Kenelm Mc K., Mongeau P., “Multiple Stage Pulsed Induction Acceleration,” *IEEE Trans. on Mag.*, 2, 239-242, (1984).
- [20] He J., Levi E., Zabar Z., Birenbaum L., “Concerning the Design of Capacitively Driven Induction Coil Guns”, *IEEE Trans. on Mag.*, 3, 429-438, (1989).
- [21] Kaye R. J., Brawley E. L., Duggin B. W., “Design and Performance of A Multi-Stage Cylindrical Reconnection Launcher, ”, *IEEE Trans. on Mag.*, 1, 596-600, (1991).
- [22] Hartke, J. P., “Characterization and Magnetic Augmentation Of a Low Voltage Electromagnetic Railgun”, Master Of Science In Physics, *Naval Postgraduate School*, (1997).
- [23] Ingram M. V., Andrevs J. A., Bresie D.A., “An Actively Switched Pulsed Induction Accelerator”, *IEEE Trans. on Mag.*, 1, 591-595, (1991).
- [24] Kaye, R. J., Cnare, E. C., Cowan, M., Duggin B. W., Lipinski R. J., Marder B. M., Douglas G. M. and Shimp K. J., “Design and Performance of Sandia’s Contactless Coilgun for 50 mm Projectiles”, *IEEE Trans. on Mag.*, 29(1), 680-685, (1993).
- [25] İnger, E., “Elektromanyetik Fırlatıcı Sisteminin İrdelenmesi ve Simülasyonu”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2013).
- [26] Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S., “Elektromanyetik Fırlatıcılar”, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 20 (1), (2008).
- [27] Coşkun, İ. ve Kalender, O., “İndüksiyon Bobin Silahında Mermi Gözlem ve Kontrolü”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22, (4), 893-899, (2007).
- [28] Başaydın, M., “Elektromanyetik Fırlatıcılar İçin Hız ve İvme Ölçümü”, Yüksek Lisans Tezi, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, (2009).
- [29] Shirong, Y., Ying, W., Shanbao, C., Guohua, P., Xuquiong, L. ve Wei, W., “A Novel Type Rail-Coil Hybrid Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transaction on Magnetism*, 41 (1), 266–267, (2005).

- [30] Balikci, A., “Flywheel Motor/Generator Set as an Energy Source for Coil Launchers”, Ph. D. Dissertation, *Polytechnic University*, (2003).
- [31] Bicak, E., “Elektromagnetik Fırlatıcı“, Lisansbitirme tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Gebze, (2005).
- [32] Patterson, D., Monti, A., Brice, C. W., Dougal, R. A., Pettus, R. O., Dhulipala, S., Kovuri, D. C. and Bertonecelli, T., “Design and simulation of a permanent-magnet electromagnetic aircraft launcher”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41 (2), 566–574, (2005).
- [33] Mirzaei, M., Abdollahi, S. E. and Lesani, H., “A large linear interior permanent magnet motor for electromagnetic launcher”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 39 (6), 1566–1570, (2011).
- [34] Mingna, M., Liyi, L., Zhu, H., “Influence of Longitudinal End-Effects on Electromagnetic Performance of a Permanent Magnet Slotless Linear Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (5), 1161-1166, (2013).
- [35] Travis, J. and Kring, J., “LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun”, Prentice Hall, (2006).
- [36] Güner, Y., “LabVIEW programı ile veri toplama, veri işleme ve veri izlemenin e-öğrenme olarak hazırlanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi*, İstanbul, 15-35 (2005).
- [37] Kalender, O., Coşkun, İ. ve Ege, Y., “İndüksiyon Bobin Silahı İçin Uygun Stator Bobini Geometrisinin Araştırılması”, *BAÜ Fen Bil. Ens. Dergisi*, 8 (2), (2006).
- [38] Wenbo, L., Yu, W. and Zhixing, G., “Connection Pattern Research and Experimental Realization of Single Stage Multipole Field Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (11), 3173-3179, (2013).
- [39] Weiqun, Y., Ping, Y. and Yaohong, S., “Design and Testing of a Two-Turn Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (1), 198-202, (2011).

- [40] Mongeau, P. and Williams, F., “Helical rail glider launcher”, *IEEE Trans. Magn.*, 18 (1), 190–193, (1982).
- [41] Engel, T. G., Nunnally, W. C. and Neri, J., “High-efficiency medium-caliber helical coil electromagnetic launcher”, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (11), 4299–4303, (2005).
- [42] Skurdal, B. D. and Gaigler, R. L., “Multi-mission electromagnetic launcher,”, *IEEE Trans. Magn.*, 45 (1), 458–461, (2009).
- [43] Slade, G. W., “A simple unified physical model for a reluctance accelerator”, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (11), 4270–4276, (2005).
- [44] Fair, H. D., “Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications”, *IEEE Trans. Magn.*, 45, 225–230, (2009).
- [45] Fair, H. D., “Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era”, *IEEE Trans. Magn.*, 41 (2-1), 158–164, (2005).
- [46] Schaaf, J. C. and Audeh, N. F., “Electromagnetic coaxial railgun”, *IEEE Trans. Magn.*, 25 (5), 3263–3265, (1989).
- [47] Schoeder, J. M., Gully, J. H. and Driga, M.D., “Electromagnetic launchers for space applications,” *IEEE Trans. Magn.*, 25 (1), 504–507, (1989).
- [48] McNab, I. R., “Progress on hypervelocity railgun research for launch to space”, *IEEE Trans. Magn.*, 45 (1), 381–388, (2009).
- [49] Upshaw, J. L. and Kajs, J. P., “Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator”, *IEEE Trans. Magn.*, 27 (1), 607–610, (1991).
- [50] Yamori, A., Yanagisawa, M., Sato, K., Kawashima, N., Furukawa, T. and Teii, S., “Rail gun experiment (HYPAC) at ISAS (meteorite impact simulation)”, *IEEE Trans. Magn.*, 27 (1), 126–129, (1991).

- [51] Dutta, I., Delaney, L., Cleveland, B., Persad, C. and Tang, F., “Electric current-induced liquid Al deposition, reaction, and flow on Cu rails at rail-armature contacts in railguns”, *IEEE Trans. Magn.*, 45, 272–277, (2009).
- [52] Engel, T.G., Timpson, E. J. and Veracka, M. J., “Demonstration of a Reversible Helical Electromagnetic Launcher and Its Use as an Electronically Programmable Mechanical Shock Tester”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol., 43 (5), (2015).
- [53] K ksoy, A., “Lineer İndüksiyon Fırlatıcı Analizi ve Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze İleri teknoloji Enstitüsü*, Gebze, (2010).
- [54] McNab, I. R., “Early electric gun research”, *IEEE Trans. Magn.*, 35 (1), 250–261, (1999).
- [55] McNab, I. R., Stefani, F., Crawford, M., Erençil, M., Persad, C., Satapathy, S., Vanicek, H., Watt, T. and Dampier, C., “Development of a naval railgun”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 206-210, (2005).
- [56] Hartke, J. P., “Characterization and Magnetic Augmentation of a Low Voltage Electromagnetic Railgun”, Yüksek Lisans Tezi, *Naval Postgraduate School*, California, (1997).
- [57] Chas, G. P., “New electromagnetic engine”, *American Journal of Science and Arts*, 49, 131-135, (1945).
- [58] Putman, P., “Milestones in cannon launch to space”, *EM Launch Competitors' Guide*, *Lifeboat Foundation*, (2006).
- [59] Egeland, A., “Birkeland’s electromagnetic gun: A historical review”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 17 (2), 73-82, (1989).
- [60] Yavuz, M. F., “Tek B lmeli Eksenel Simetrik Bobinli Elektromanyetik Fırlatıcının Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi İle Silindirik Koordinatlarda Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze İleri teknoloji Enstitüsü*, Gebze, (2010).

- [61] Fair, H. D., “Electromagnetic propulsion: A new initiative”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 18 (1), 4-6, (1982).
- [62] Waindok, A. and Mazur, G., “Mutual inductances in a mathematical model of the threestage reluctance accelerator”, *3rd International Students Conference on Electrodynamics and Mechatronics*, 115-118, (2011).
- [63] Sarı, V., “Elektromanyetik Fırlatıcıların Farklı Manyetik Özellikteki Çekirdeklerle Performans Analizi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2015).
- [64] Engel, T. G., Surl, D. and Nunnally, W. C., “Prediction and Verification of Electromagnetic Forces in Helical Coil Launchers”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 39 (1), (2003).
- [65] Zhu, Y., Wang, Y., Yan, Z., Dolg, L., Xie, X. and Li, H., “Multipole Field Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (7), (2010).
- [66] Chen, L., He, J., Xiao, Z. And Pan, Y., “Study on the Length of Trailing Arm of Monolithic C-Armature in a 20-mm Caliber Railgun”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (1), (2011).
- [67] Lou, W., Wang, Y., Gui, Z., Yan, Z. and Chen, W., “Connection Pattern Research and Experimental Realization of Single Stage Multipole Field Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (11), (2013).
- [68] Topaloğlu, İ. ve Gürdal, O., “Lineer Elektromanyetik Fırlatıcı Sistem Tasarımı ve Eşdeğer Devre Modeli Kullanarak Geliştirilmiş Fırlatma Performansı İçin Boyut Optimizasyonu”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (1), (2013).
- [69] Yuan, W. and Yan, P., “Design and Testing of a Two-Turn Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (1), (2011).

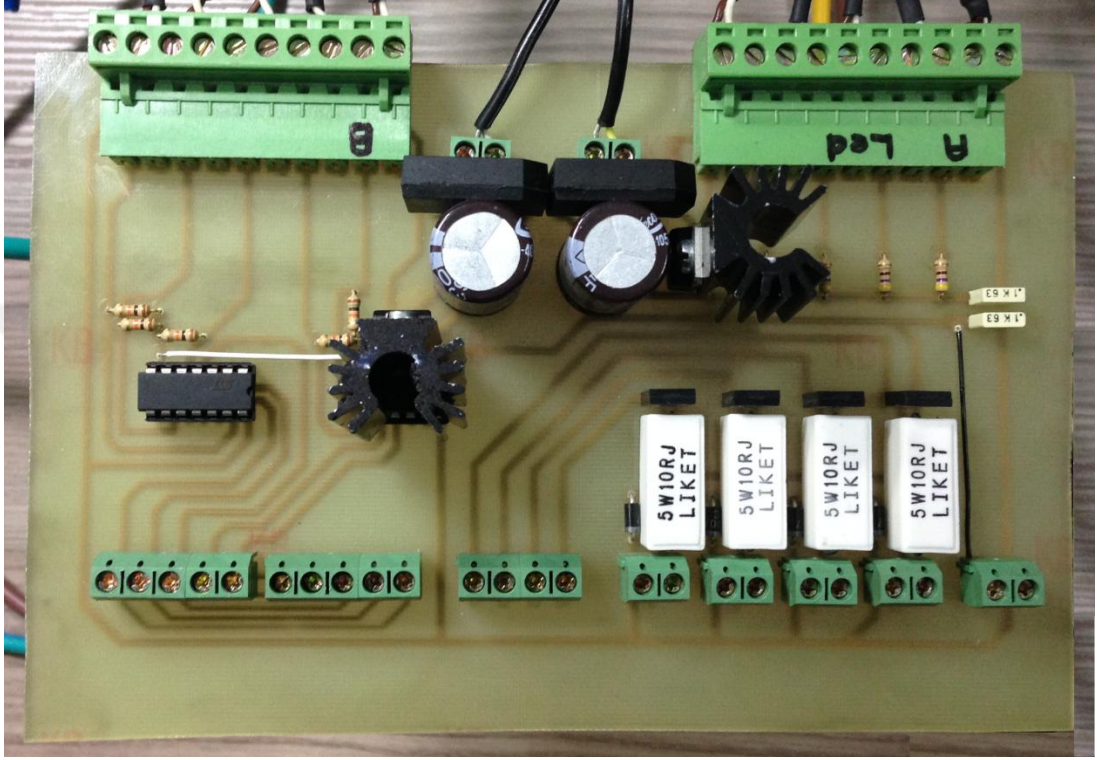
- [70] Neri, J. M. and Human, B. M., “Operation of a 5-MJ Capacitor Bank For EML Materials Testing”, *Plasma Physics Division Naval Research Laboratory, Washington*, (2007).
- [71] Neri, J. M. and Kim, J. S., “Initial Operation, Modeling and Optimization of a Low Velocity Augmented Railgun”, *Plasma Physics Division Naval Research Laboratory, Washington*, (2003).
- [72] Yang, D., Liu, Z., Li-Jia, Y., Zhi, S., Jian-Ming, O. and Ya-Qin, J., “Design and Realization of a Novel Helical Coil Electromagnetic Launcher”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41 (5), (2013).
- [73] Ege, Y., Kabadayı, M., Kalender, O., Çoramık, M., Çıtak, H., Yürüklü, E. ve Dalcalı, A., “A New Electromagnetic Helical Coilgun Launcher Design Based on LabVIEW”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44 (7), 1208-1218, (2016).



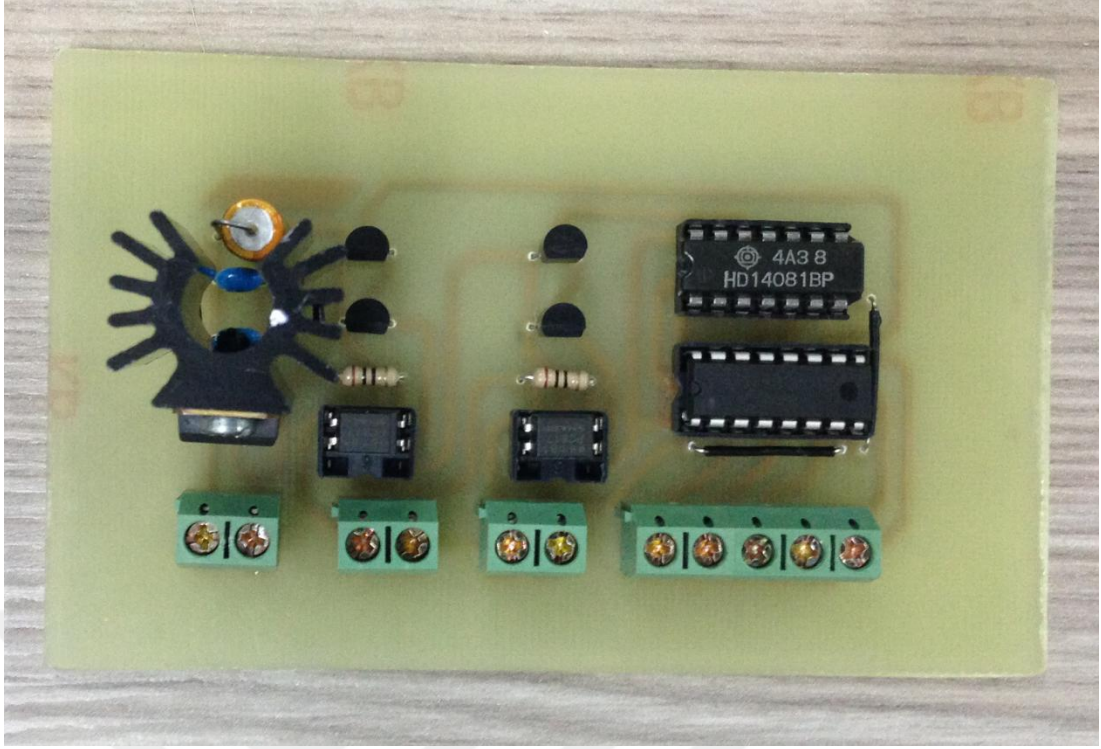
EKLER

7. EKLER

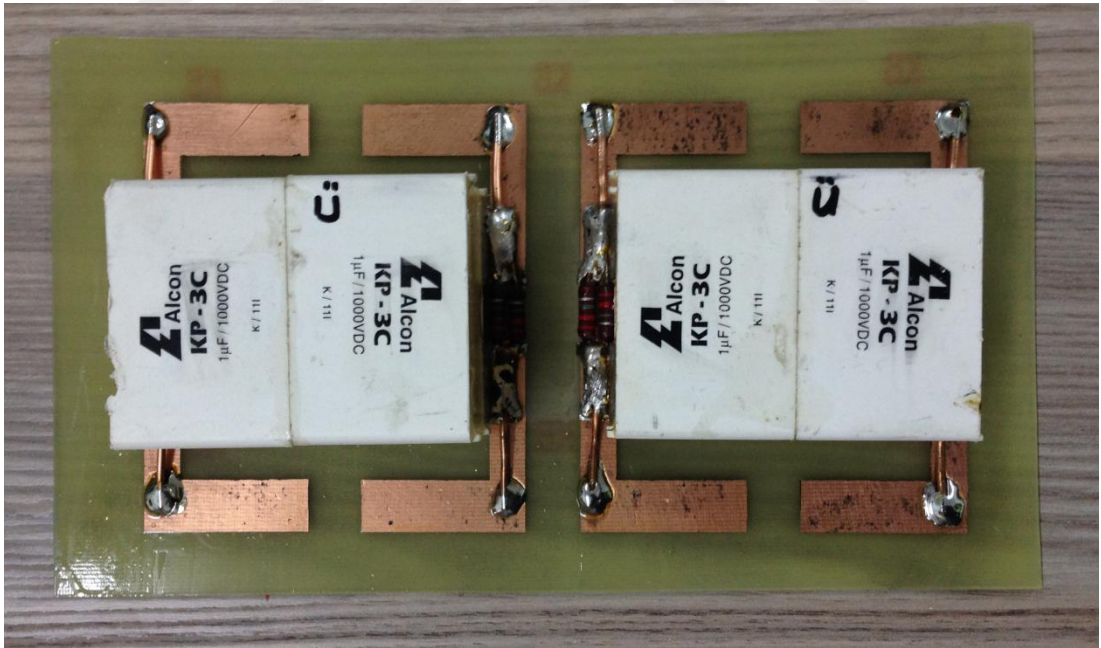
EK A-Manyetik Fırlatıcı Yapısında Kullanılan Elektronik Kartlar



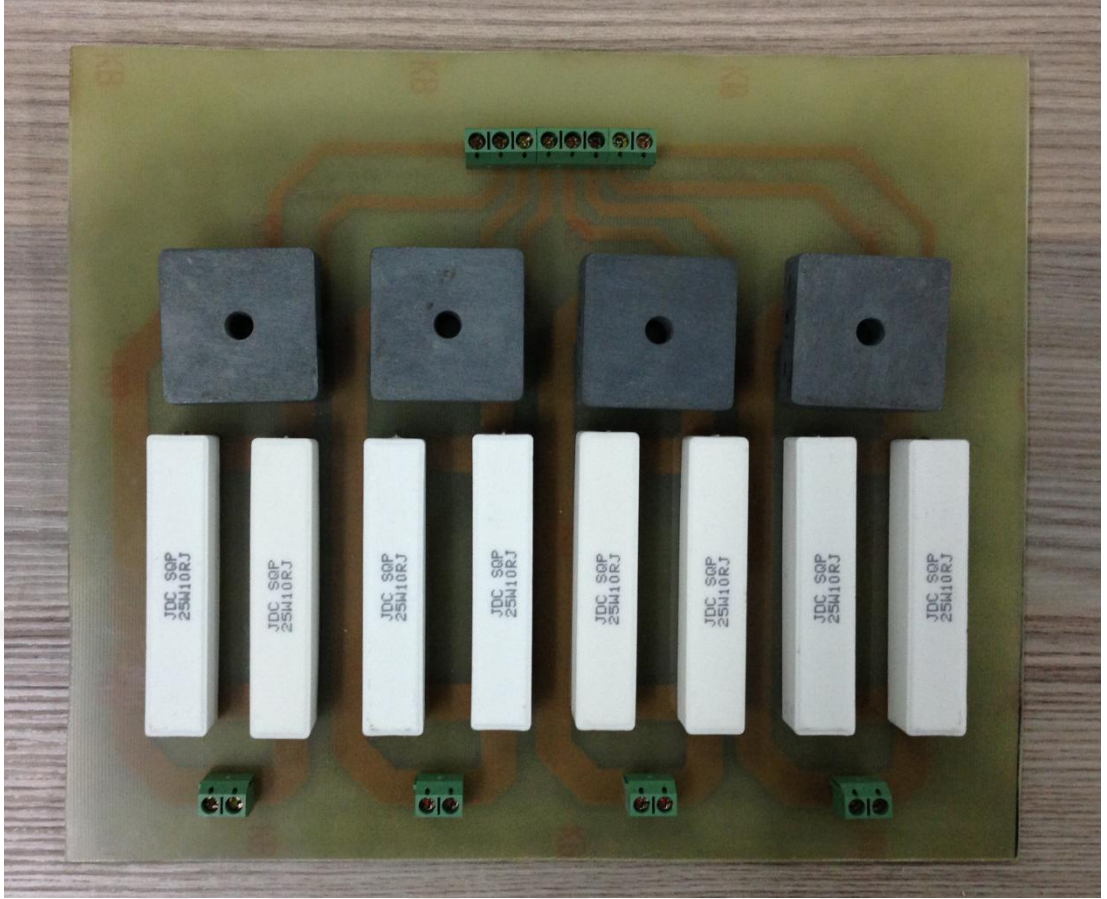
Şekil A.1: Optik sensörlerin kontrol devre kartı



Şekil A.2: Sensör verilerinin birleştirme devre kartı



Şekil A.3: Salınım devre kartı

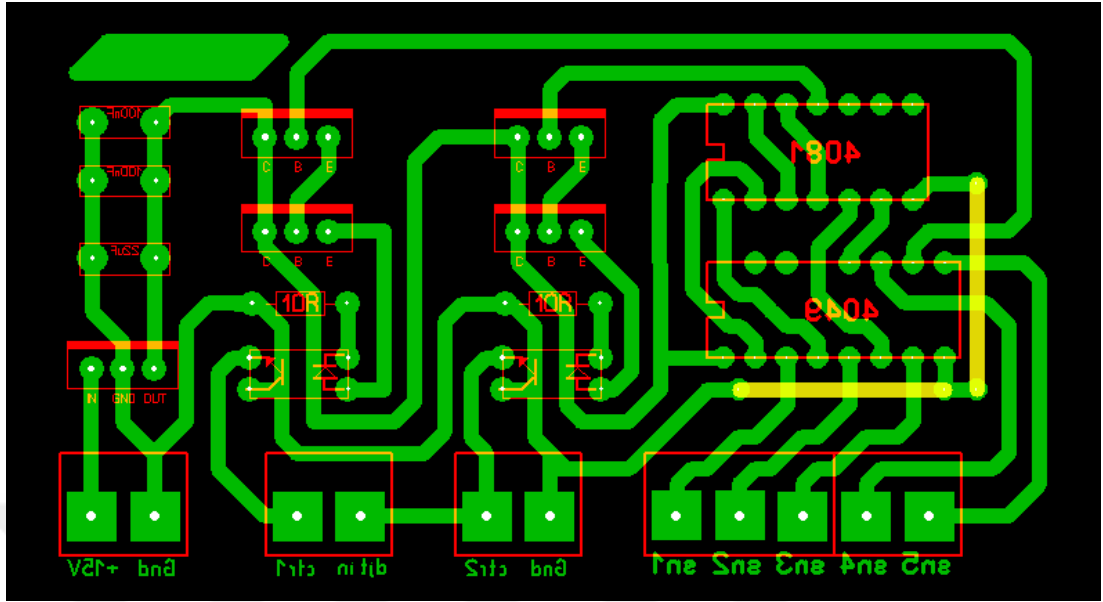


Şekil A.4: Güç kartı

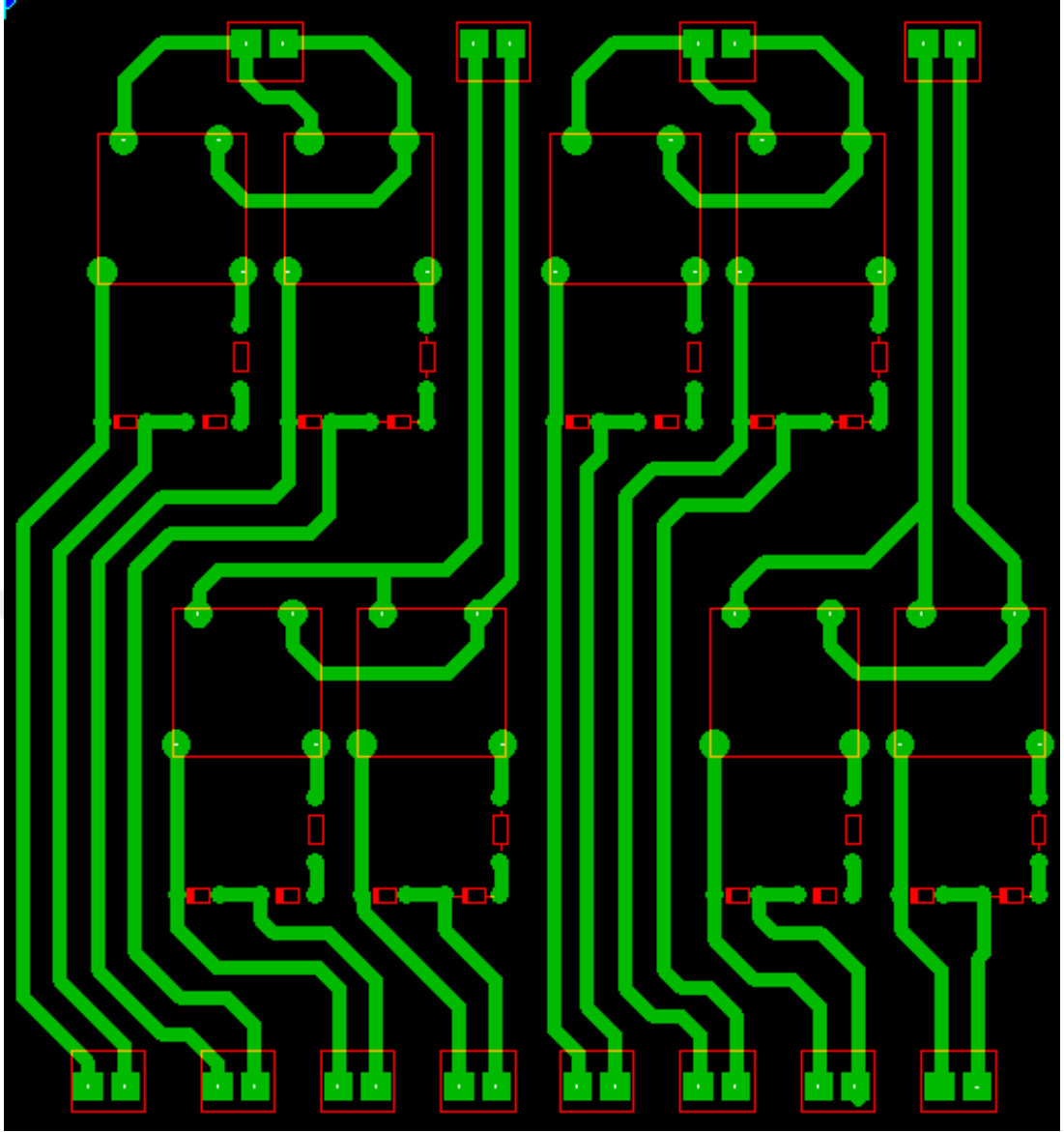


Şekil A.5: Hızlı diyot kartları

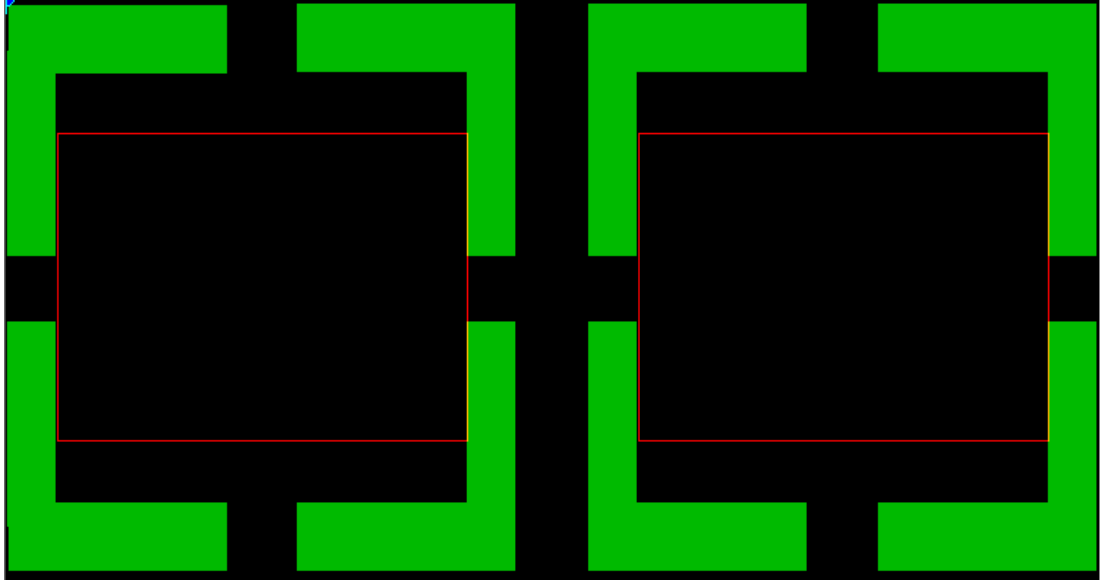
EK B-Elektronik Kartların Baskı Şeması



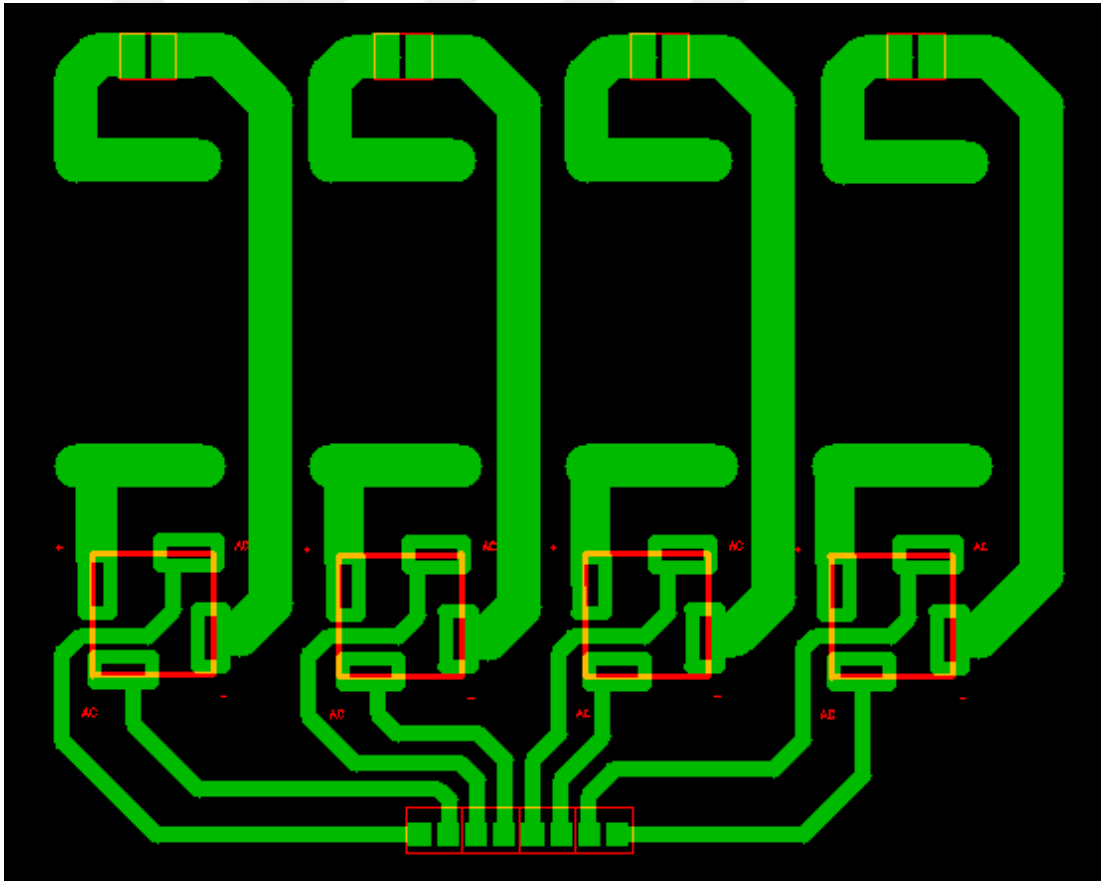
Şekil B.1: Sensör verilerinin birleştirme devresinin baskı şeması



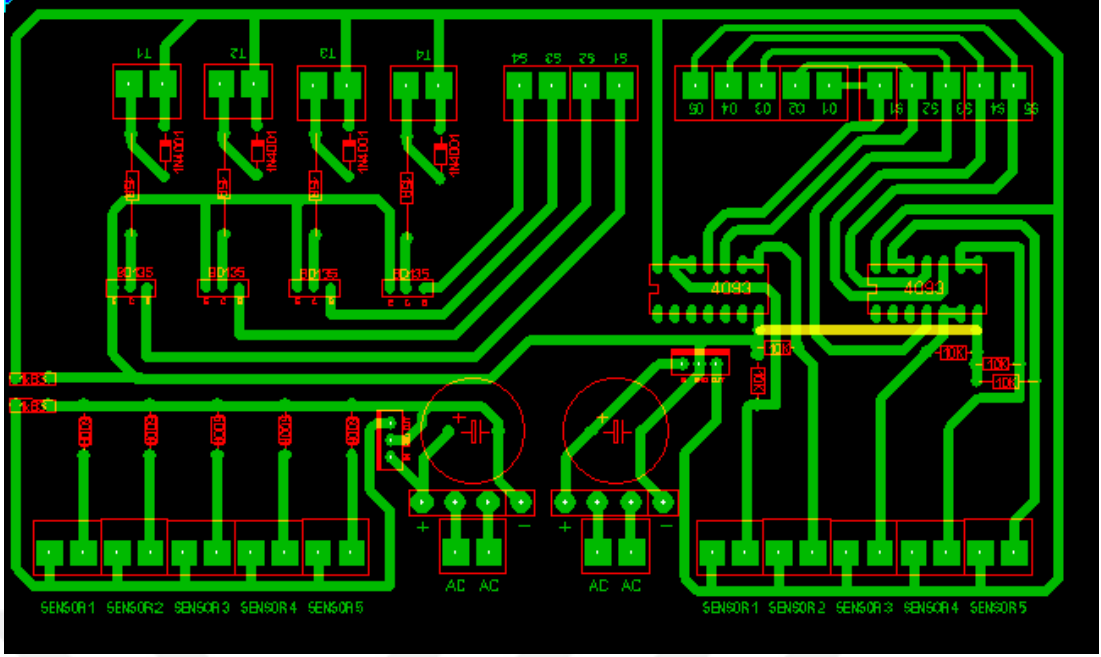
Şekil B.2: Pals transformatörleri baskı şeması



Şekil B.3: Salinim devresi baskı şeması



Şekil B.4: Güç kartı baskı şeması



Şekil B.5: Optik sensörlerin kontrol devresinin baskı şeması