

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK –ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTROMANYETİK FİRLATICILAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elk. Tek. Öğrt. Ömür AKYAZI**

**AĞUSTOS 2006**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK –ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTROMANYETİK FİRLATICILAR**

**Ömür AKYAZI**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Yüksek Lisans ( Elektrik Mühendisliği )**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.08.2006**

**Tezin Savunma Tarihi : 22.08.2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR**

**Jüri Üyesi : Yrd. Dç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT**

**Trabzon 2006**

## ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır. "Elektromanyetik Fırlatıcılar" konulu çalışmada, bir elektromanyetik fırlatıcı tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken hususlar incelenmiş, hem teorik hem de uygulamada izlenmesi gereken yollar belirtilmiştir. Diğer taraftan uygulamasını gerçekleştirdiğimiz fırlatıcının daha yüksek verimli nasıl çalışacağı bu çalışmada yine anlatılmıştır.

Yüksek lisans tezi danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçimi ve gerekse çalışmaların yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR'a, gösterdiği ilgi, güler yüz ve yardımlarından ötürü saygı, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca, bilgilerini esirgmeden benimle paylaşan Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ ve Doç. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR hocalarıma teşekkür ederim.

Başta Emre ÖZKOP, Mevlüt TOPALOĞLU, Gökçe HACIOĞLU, Yusuf SEVİM, Oğuzhan ÇAKIR olmak üzere Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında Lisansüstü çalışmalarını yürüten ya da tamamlamış arkadaşlara, bölümün değerli hocalarına, personeline ve tüm arkadaşlarıma gösterdikleri güler yüz ve hoş sohbetleri için teşekkür ederim.

Bu çalışmayı yapabilmek için kullandığımız "Akıllı Sistemler Laboratuvarını (ASOL)" üniversitemize kazandıran değerli hocam Doç. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ'a ayrıca teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, annem, babam ve kardeşlerime sonsuz minnettarım.

Ömür AKYAZI  
Trabzon, 2006

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Elektromanyetik (EM) Fırlatıcıların Tarihçesi .....	1
1.2. Elektromanyetik Alan ve Kuvvet Yasası.....	2
1.2.1. Amper Yasası.....	2
1.2.2. Biot-Savart Yasası.....	3
1.2.3. Faraday Yasası .....	4
1.2.4. Gauss Yasası .....	5
1.2.5. Maxwell Denklemleri.....	5
1.2.6. Coulomb Yasası .....	6
1.3. Elektrik Alan.....	6
1.4. Dipol .....	6
1.5. Manyetik Alan.....	7
1.6. Elektromanyetik Fırlatıcılarda Kullanılan Kütlenin Manyetik Özelliği.....	8
1.7. Elektromanyetik Kuvvet.....	9
1.7.1. Akım Tarafından Üretilen Manyetik Alan .....	10
1.7.2. Moment Üretme.....	10
1.8. Akımın Manyetik Etkisi .....	11
1.8.1. Düz Telden Geçen Akımın Manyetik Etkisi .....	12
1.9. İletken Bir Çemberdeki Manyetik Alan .....	13
1.9.1. Çember Eksenindeki Manyetik Alan.....	14
1.10. Elektromanyetik Fırlatıcılar Kuramı .....	15
1.11. Sargılı Fırlatıcının Temelleri .....	21

1.11.1.	İndüksiyon Sargılı Fırlatıcı .....	21
1.11.2.	Tekrar Bağlantılı Sargılı Fırlatıcı .....	22
1.11.3.	Thompson Sargılı Fırlatıcı.....	23
1.11.4.	Sarmal Sargılı Fırlatıcısı.....	24
1.11.5.	Zıpkın Sargılı Fırlatıcı .....	25
1.12.	Elektromanyetik Fırlatıcıların Çeşitleri.....	25
1.12.1.	Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	25
1.12.2.	Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılar .....	26
1.12.3.	Karma Elektromanyetik Fırlatıcılar .....	27
1.12.4.	Doğrusal Hareketli Fırlatıcılar.....	28
1.13.	Elektromanyetik Fırlatıcıların Kullanım Alanları.....	29
1.14.	Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılara Rondelâ ve Boru Ekleme.....	30
1.14.1.	Manyetik Alan Çizgileri .....	31
1.14.2.	Boru ve Rondelâda Relüktans Hesaplama.....	32
1.15.	Elektromanyetik Fırlatıcıların Temel İlkeleri.....	36
1.15.1.	Sargılı İvmelendirici .....	36
1.15.2.	Sonlu Eleman Kuvveti Benzetimi .....	38
1.15.3.	Çekirdek (Mermi) Doyması.....	40
1.16.	Elektromekanik Enerji Dönüşümü .....	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA.....	47
2.1.	Yapılan Çalışmanın Amacı .....	47
2.2.	Gerçekleştirilmiş Devre Modeli .....	47
2.2.1.	Anahtarlama Devresini Besleyen Güç Kaynağı.....	49
2.2.2.	Anahtarlama Devresi .....	50
2.2.3.	Güç Katı.....	54
2.2.4.	İvmelendirici Sargılar .....	56
3.	SONUÇLAR.....	62
4.	ÖNERİLER .....	63
5.	KAYNAKLAR.....	64
	ÖZGEÇMİŞ.....	66

## ÖZET

Bu tez çalışmasında Elektromanyetik Fırlatıcılar konusu ele alınmaktadır. Elektromanyetik fırlatıcıların günümüze gelene kadar geçirmiş olduğu evrelere kısaca göz atılmaktadır. Elektromanyetik alanlarla ilgili temel kanunlar hakkında genel bilgiler verilmektedir. Elektromanyetik fırlatıcıyı oluşturan parçalar, parçalar üzerinde meydana gelen çeşitli manyetik alanlar ve kuvvetler incelenmiştir.

Elektromanyetik fırlatıcıların temel çalışma ilkeleri, çeşitleri, kullanım alanları anlatılmaktadır. Sargılı fırlatıcıda kullanılacak sargıların belirlenmesi, sargıların oluşturduğu kuvvetin sistem üzerindeki etkisi, verimi artırma yöntemleri, elektromekanik enerji dönüşümü ve fırlatılan cismin (mermi, çekirdek) özellikleri ayrıntılı olarak bahsedilmektedir.

Çalışmamızda elektromanyetik fırlatıcı ile herhangi bir mekanik itici kullanmadan sargının oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle, cismin fırlatılması gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla tasarlanan uygun bir anahtarlama devresi, ivmelendirici sargılar ve bu sargıları besleyen güç katı ile cisminin yatay (doğrusal) olarak fırlatması sağlanmıştır.

Çalışmamızda bir elektromanyetik fırlatıcı tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken hususlar incelenmiş, hem kuramsal hem de uygulamada izlenmesi gereken yollar belirtilmiştir. Diğer taraftan uygulamasını gerçekleştirdiğimiz fırlatıcının daha yüksek verimli nasıl çalışacağı bu çalışmada yine anlatılmıştır.

Elektromanyetik fırlatıcı çeşitlerinden Karma (sargılı ve raylı) fırlatıcı ve Sargılı fırlatıcı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektromanyetik Fırlatıcı, Elektromanyetik Alan, İvmelendirici Sargı, Sargılı Fırlatıcı, Elektromanyetik, Karma Fırlatıcı, Raylı Fırlatıcı

## SUMMARY

### Electromagnetic Launchers

In this study, Electromagnetic Launchers have been investigated a matter in hand. Change phases in Electromagnetic launchers have been glanced up to now. General information about basic rules of electromagnetic fields has been given. Pieces constituting Electromagnetic Launchers, various magnetic fields occurring on pieces and forces were analyzed.

Electromagnetic launchers foundation working principles, types, usages have been explained. Defined of coil launcher, affects of coils forces on the system, methods of improving efficiency, conversion of electromechanical energy and properties of lunched matter (projectile, core) have been mentioned elaborately.

In this study, without using mechanic propeller electromagnetic launcher have been lunched by affect of the coils magnetic field. The matter has been launched horizontally by using designed control device, accelerator coils and power stage that supply these coils for this purpose.

In this study, when one electromagnetic launcher is designed, the cases which have to be taken into consideration have been surveyed; either theoretical or practical ways which have to be followed have been defined. On the other hand, in this work the launcher realized in practice how to work more efficiently is explained too.

Hybrid and coil launchers which are types of the electromagnetic launcher have been realized experimentally.

**Key Words:** Electromagnetic Launcher, Electromagnetic Field, Accelerator Coil, Coil Launcher, Electromagnetic, Hybrid Launcher, Rail Launcher

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Elektromanyetik kuvvet .....	9
Şekil 1.2. Sol el kuralı .....	9
Şekil 1.3. Sağ el kuralı.....	10
Şekil 1.4. Tork üretimi.....	11
Şekil 1.5. Akım taşıyan tellerin ve bazı manyetik maddelerin manyetik alan çizgileri ....	11
Şekil 1.6. Akım taşıyan düz telin etrafında oluşan manyetik alanın sağ el kuralıyla bulunması .....	12
Şekil 1.7. Tek bir sargı ve oluşturduğu manyetik alan .....	13
Şekil 1.8. Basit bir elektromanyetik fırlatıcının a)açık yapısı, b)kapalı yapısı .....	15
Şekil 1.9. Sargılı fırlatıcının ilkesel gösterimi.....	16
Şekil 1.10. Sargılı fırlatıcının elektriksel eşdeğer devresi .....	17
Şekil 1.11. Gecikmiş sönümlemedeki R-L-C devresi .....	17
Şekil 1.12. Gecikmiş sönümlemedeki devrede akımda ortaya çıkan salınım .....	18
Şekil 1.13. Aşırı sönümlemedeki R-L-C devresi.....	19
Şekil 1.14. Aşırı sönümlemedeki devrede akımda ortaya çıkan salınım.....	19
Şekil 1.15. Kritik sönümlemedeki R-L-C devresi .....	20
Şekil 1.16. Kritik sönümlemedeki akım karakteristiği .....	20
Şekil 1.17. Tüpsel indüksiyon fırlatıcısının yapısı .....	22
Şekil 1.18. Tekrar bağlantılı sargılı fırlatıcının açık şekli .....	22
Şekil 1.19. Tek kademeli Thompson sargılı fırlatıcısı .....	23
Şekil 1.20. Sarmal sargılı fırlatıcının yapısı .....	24
Şekil 1.21. Raylı elektromanyetik fırlatıcı a)Genel yapı,b)Fiziki yapı,c)Örnek prototip....	26
Şekil 1.22. Sargılı elektromanyetik fırlatıcı a)Genel yapı, b)Tapanca prototipi .....	27
Şekil 1.23. Üç fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı.....	28
Şekil 1.24. Elektrotermal-kimyasal fırlatıcıların yapısı.....	29



Şekil 1.25. Elektromanyetik fırlatıcıların kullanıldığı sistemler .....	30
Şekil 1.26. Sargıya boru ve rondela ekleme .....	31
Şekil 1.27. Manyetik akı.....	31
Şekil 1.28. Rondela ve sargı eklenmiş eşdeğer devre.....	32
Şekil 1.29. Bir hava silindiri.....	33
Şekil 1.30. Rondela.....	34
Şekil 1.31. Boru yan kesiti .....	35
Şekil 1.32. Birbirine yakın durumdaki bir sargı ile bir çubuk.....	37
Şekil 1.33. Sargının merkezinden olan uzaklığa bağlı olarak kuvvetin değişimi.....	38
Şekil 1.34. Bobine bir akı yolu eklenmesi durumunda akı çizgileri.....	39
Şekil 1.35. İlkel bir lineer motor .....	42
Şekil 1.36. Motor eşdeğer devresi .....	43
Şekil 1.37. Sürtünmesiz motor modelinin karakteristik eğrisi .....	45
Şekil 1.38. Sabit sürtünme durumunda karakteristik eğriler .....	45
Şekil 1.39. Armatür kuvvetinin hıza bağlı değişimi.....	46
Şekil 2.1. Gerçekleştirilen elektromanyetik fırlatıcı devresi .....	48
Şekil 2.2. Güç kaynağının devre şeması.....	49
Şekil 2.3. Güç kaynağının baskı devre şeması .....	49
Şekil 2.4. Anahtarlama devresini besleyen güç kaynağı .....	50
Şekil 2.5. Sargıların tetiklenmesini sağlayan anahtarlama devresi .....	50
Şekil 2.6. Şekil 2.6. Sargıların tetiklenmesini sağlayan anahtarlama devresinin baskı devre şeması.....	51
Şekil 2.7. LM555 entegre devre şeması .....	51
Şekil 2.8. CD4017 entegre devre şeması.....	52
Şekil 2.9. Anahtarlama devresi bağlantı şeması.....	52
Şekil 2.10. LM555 çıkış sinyali ( $VR1=96.5K\Omega$ , $f=74Hz$ ).....	53
Şekil 2.11. LM555 çıkış sinyali ( $VR1=76.5K\Omega$ , $f=91Hz$ ).....	53
Şekil 2.12. Fluke 199C osiloskobundan alınan CD4017 çıkış işareti.....	54
Şekil 2.13. Güç Katı baskı devre şeması .....	54
Şekil 2.14. Güç Katı genel görünüşü .....	55
Şekil 2.15. Güç Katı devre şeması.....	55

Şekil 2.16. İvmelendirici sargılar .....	57
Şekil 2.17. İvmelendirici sargıların açık şekli .....	58
Şekil 2.18. Karma fırlatıcı genel görünüşü.....	59

## SEMBOLLER DİZİNİ

$B$	Manyetik indüksiyon (Akı yoğunluğu)
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$N$	Sarım sayısı
$E$	İndüksiyon EMK'sı
$\Phi$	Mağnetik akı
$k$	Coulomb sabiti
$M$	Moment
$i$	Ani akım
$L$	Endüktans
$R$	Direnç
$C$	Kapasiter
$A$	Kesit alanı
$V$	Hız
$\lambda$	Yük yoğunluğu
$l$	İletken boyu
$F_u$	Üretilen kuvvet

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Elektromanyetik (EM) Fırlatıcıların Tarihçesi

Elektromanyetik fırlatıcılar ile ilgili çalışmalar, 1980'lerin öncesinden beri ABD'de takip edilmektedir. İlk çalışma bir kaç gramdan daha ağır kütlelerin yüksek hızlarla fırlatılabileceğini göstermek için yapılmıştı [1]. ABD Ordusu ve İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) tarafından gerçekleştirilen ilk başarılı fizibilite gösterilimi ardından, ABD'nin çalışmaları manyetik olarak kaldırılan trenleri içeren manyetik tahrik, elektromanyetik mancınıklar (katapult) kullanılarak uçakların fırlatılması, metallerin uzaya fırlatılması, küçük mermilerin aşırı yüksek hızlarda fırlatılması, füzyon reaktörleri için yakıt elde etmek amacı ile eritilerek elde edilen ufak topların hızlandırılması v.b. birçok konuda yaygınlaşmıştır.

Bu dönemde öncelikle ABD'nin bilim ve teknolojide uyguladığı yeni politikalar gereği, bir ilk adım olarak ABD Stratejik Savunma Girişimi Organizasyonu (SDIO), nükleer güç kaynakları ile beslenen çok yüksek hızlı (15km/s fırlatma hızını aşabilen) elektromanyetik fırlatma teknolojileri üzerindeki araştırmalara odaklanmış olmakla beraber, ABD'nin uzayda silah bulundurmama kararı ile birlikte, çok yüksek hızlı elektromanyetik fırlatıcılarla ilgili çalışmalar yavaşlatılmıştır.

Daha sonra 1985'lerde DARPA, ABD Denizcilik İşletmeleri ve ABD Ordusunun gelişmiş zırhlı savaş araçlarını yenilgiye uğratabilecek kapasiteye sahip arazi savaş araçları için elektromanyetik fırlatıcı teknolojilerini değerlendirmeye yönelmesiyle [2], ABD Savunma Bilimi Biriminin (DSB) desteği ile ABD'nin araştırmaları tekrar elektromanyetik fırlatıcılar konusuna yönelmiştir. Fakat bu yönelmede hâlihazırda kullanılabilen teknolojiler, SDIO'nun belirlediği ihtiyaçları karşılamaktan uzak kalmıştır. Çünkü zırhlı araçları tahrip etmek amacı ile fırlatılacak mermilerin tüm uçuşları atmosferin yoğun olduğu yerlerde gerçekleşecek olması nedeni ile fırlatma hızları, 3km/s ve aşağısına limitlenmiş durumda kalmıştır. Bu ise elektromanyetik fırlatıcıların ağır savaş araçlarının önündeki zırhlarını delme (tahrip etme) kabiliyetini zorlaştıran bir etkidir. Bu nedenle sonraki elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinde yüksek verim amaçlı, raylı silahlardan fırlatmalar için plazma armatürleri yerine katı armatürler seçilmiştir. Potansiyel güç kaynakları olarak da kondansatörler ve darbeleri alternatörler kullanılmıştır.

Günümüzün gelişen teknolojisi askeri alanda da inanılmaz boyutlara ulaşabilmekte, var olan silahların geliştirilmesi ve etkilerinin artırılmasının yanında, yeni tiplerde silahlar da araştırılmakta ve geliştirilmektedir.

Birçok başarılı uygulamasını iletişim alanında gördüğümüz ve uygulamaları sadece yüz yıllık bir geçmişe sahip olan elektromanyetik (EM) dalgalar, yeni bir boyutta daha karşımıza çıkıyor. Varlıkları milattan önceki çağlarda fark edilen elektrik ve manyetik alanlar, ancak teknolojinin de yeterli olgunluğa ulaşması ile birlikte çağımızda gün geçtikçe artan uygulama alanları bulmaktadır.

Elektromanyetik fırlatıcıların çalışmasının temel ilkeleri elektromanyetik teoriye dayanır. Sargılı fırlatıcının özel durumlarına bakmadan önce elektromanyetik alan ve oluşturduğu kuvvetlerin genel bir incelemesi aşağıda verilmiştir.

## 1.2. Elektromanyetik Alan ve Kuvvet Yasaları

Bilindiği gibi hareketli bir yük bir manyetik alan meydana getirir. Bu hareket akım taşıyan bir iletkende, bir molekülün yörüngesindeki elektronda ya da bir plazmanın akışında meydana gelebilir.

### 1.2.1. Amper Yasası

Üzerinden akım geçen bir iletkenin çevresinde bir manyetik alan oluşur. Bu durumda manyetik dolanım, iletkenden geçen akımla doğru orantılıdır. Buna *Amper kanunu* denir ve

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (1.1)$$

formülü ile gösterilir [3]. Burada B manyetik alan, dl sonsuz küçük yol vektörü,  $\mu_0$  manyetik geçirgenlik sabiti, i ise akımdır. Boşluk için  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [Wb / A.m]$  dir.

Üzerinden i akımı gecen düz bir telin r kadar uzağındaki manyetik alan;

$$B = \mu_0 i / 2\pi r \quad (1.2)$$

olur. Genişliği  $a$  olan ince bir iletken levhadan bir  $i$  akımı geçiyorsa, akımın levhadan  $R$  kadar uzaklıkta oluşturduğu manyetik alan

$$B = \frac{\mu_0 i}{\pi a} \tan^{-1} \frac{a}{2R} \quad (1.3)$$

şeklindedir.  $N$  sarımlı bir solenoidin merkezindeki manyetik alan

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi r} \quad (1.4)$$

dir. Manyetik alanın yönü *sağ el kuralıyla* bulunur. zerinden akım geçen ve birbirine paralel iki düz tel için manyetik kuvvet

$$F = \frac{\mu_0 L i_1 i_2}{2\pi d} \quad (1.5)$$

şeklindedir. Akımlar aynı yönlü ise teller birbirini eker, zıt yönlü ise iterler. Burada  $i$  akımları,  $L$  telin alanının uzunluğunu,  $d$  ise teller arasındaki uzaklığı belirtmektedir.

### 1.2.2. Biot-Savart Yasası

zerinden akım geçen eğri ya da düz tellerin herhangi bir kesiminin ( $dL$ )  $r$  kadar uzaklıktaki bir  $P$  noktasında meydana getirdiği manyetik alan ( $dB$ ); akım ve  $dL$  uzunluğu ile doğru,  $P$ 'ye olan uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. Elektrostatikteki coulomb kanununa benzeyen bu kanun *Biot-Savart kanunu* olarak ifade edilir [3]. Bunun formülü

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{L} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1.6)$$

şeklindedir. zerinden  $i$  akımı geçen düz bir telden  $R$  kadar uzaklıkta oluşan toplam manyetik alan

$$B = \mu_0 i / 2\pi R \quad (1.7)$$

kadardır. Yarıçapı R olan ve üzerinden i akımı geçen bir halkanın merkezinden x kadar uzaktaki manyetik alanı ise

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1.8)$$

kadardır. Bir dış alan içerisinde bulunan bir elektrik dipolünün enerjisi  $U = -\vec{P} \cdot \vec{E}$  şeklinde idi. Buna benzer olarak manyetik dipolün enerjisi de  $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$  şeklindedir.

### 1.2.3. Faraday Yasası

Üzerinden akım geçen iletken bir telin, çevresinde manyetik bir alan meydana getirdiği 1819 yılında H.C.Oersted tarafından bulunmuştur. 1831 yılında Henry ve Faraday bir devrede manyetik alanın değiştirilmesiyle de elektrik akımının meydana gelebileceğini gösterdiler [3]. Bu sonuç elektrik ve manyetizmayı birleştiren temel ilkelerden biridir. Buna göre Faraday yasası, bir devrede indüklenen elektromotor kuvvetinin büyüklüğü, devreden geçen manyetik akının zamanla değişim hızına eşittir. Bu yasa, Faraday'ın indüksiyon yasası olarak bilinir.  $\Phi$  magnetik akı olmak üzere endüklenen gerilim

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.9)$$

İndüksiyon akımının yönü *Lenz kanunu* ile belirlenir. Lenz kanununa göre indüksiyon akımının yönü, kendisini meydana getiren etkene zıt yöndedir. Faraday yasasındaki eksi işareti bunu anlatmaktadır. Sabit manyetik alan içerisinde bulunan bir telden akım geçirilirse bu tele bir kuvvet etki eder. Tele etkiyen bu kuvvet

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (1.10)$$

şeklindedir. İndüksiyon emk'sı ise

$$E = -B.L.v.\sin \theta \quad (1.11)$$

dir. Burada L, telin (halka) hareket doğrultusuna dik uzunluk, v hız,  $\theta$  ise B ile v arasındaki açıdır.

Manyetik alan değişimi bir elektrik alan ürettiğinden dolayı, manyetik alan içerisindeki elektriksel dolanım  $\oint \vec{E}d\vec{l} = -d\Phi_B / dt$  şeklinde induksiyon Emk'sına eşittir. Manyetik alan ve içerisinde bağlı hareketle oluşan elektrik alan, birbirine ve hıza  $\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$  şeklinde bağlıdır.

#### 1.2.4. Gauss Yasası

Bir yüzeyden geçen elektrik akısı elektrik alan şiddeti ile yüzey alanının çarpımına eşittir. Bu akı eğri yüzeyler (küresel, silindiriksel,..vb) için akı

$$\Phi_E = \oint E.ds = \frac{q}{\epsilon} \quad (1.12)$$

şeklinde Gauss kanununu oluşturur. Yük yoğunluğu  $\lambda$  olan sonsuz uzunluktaki ince bir telin r kadar uzaklıkta oluşturduğu elektrik alan  $E = \lambda / 2\pi\epsilon r$  şeklindedir [3].

#### 1.2.5. Maxwell Denklemleri

Elektrik yüklerinin ivmelenmesi manyetik alan, bu manyetik alanlar da elektromanyetik dalgalar üretirler. Elektromanyetik dalgaların varlığını ve bunların özelliklerini açıklayan denklemler Maxwell denklemleridir. Maxwell denklemleri, Gauss, Amper ve Faraday yasalarına göre yazılmıştır. Buna göre Maxwell denklemleri

$$\epsilon_0 \oint E.dS = q, \quad \oint Bds = 0, \quad \oint Bdl = \mu_0 \left( i + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \right), \quad \oint Edl = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (1.13)$$

Şeklinde verilir. Bu denklemler

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho, \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad (1.14)$$



şeklinde de yazılabilmektedir. Burada  $\nabla$  ile skaler çarpıma diverjans, vektörel çarpıma ise rotasyon denmektedir.

### 1.2.6. Coulomb Yasası

İki yük arasındaki itme ya da çekme kuvveti yüklerin çarpımı ile doğru yükler arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. Bu kanun

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (1.15)$$

şeklinde verilir. Burada k Coulomb sabitidir.  $k = 1/4\pi\epsilon$  şeklinde ortamın dielektrik sabitine bağlıdır. k'nın boşluk için değeri  $9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$  dir.

### 1.3. Elektrik Alan

Birim yüke etki eden kuvvete elektrik alan denir. Elektrik alanla kuvvet arasında  $F = q.E$  bağıntısı vardır. Buna göre

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{d^2} \quad (1.16)$$

şeklinindedir. Pozitif yüklü cisimlerde elektrik alan çizgileri dışa, negatif yüklü cisimlerde ise içe doğrudur. Bir cismin yükü; çizgisel ( $dq = \lambda dx$ ), yüzeysel ( $dq = \sigma ds$ ) ve hacimsel ( $dq = \rho dv$ ) yük yoğunluklarına bağlı olarak tanımlanabilmektedir.

### 1.4. Dipol

Aynı değerlikli fakat zıt işaretli iki yük çiftinin oluşturduğu sisteme dipol denir. Aralarındaki uzaklık  $2a$  olan  $q$  ve  $-q$  yükünün oluşturduğu dipolün “elektrik dipol momenti”  $p=2aq$  şeklindedir. Böyle bir dipolün merkezinden geçen dik bir eksen üzerinde her hangi bir noktada oluşturduğu elektrik alan

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{p}{(a^2 + r^2)^{3/2}} \quad (1.17)$$

şeklindedir. Burada r merkezden, elektrik alanı bulunan noktaya olan uzaklıktır. Bir dipol, elektrik alan içerisinde ise ona alan çizgileri tarafından bir dönme momenti (tork) uygulanır. Bu tork  $\vec{\tau} = -\vec{P} \times \vec{E}$  vektörel çarpımı şeklindedir. Bu durumda elektrik alanının yaptığı iş

$$U = \int_{\theta_0}^{\theta} \tau d\theta = -\vec{P} \cdot \vec{E} \quad (1.18)$$

### 1.5. Manyetik Alan

Elektrik yükleri hareket ettikleri zaman çevrelerinde manyetik alan oluştururlar. Bazı materyaller doğal manyetik özellik gösterir, örneğin mıknatıslar. Demir, kobalt..vb gibi bazı materyaller manyetik alan içerisine konduklarında, manyetik alanla aynı yönlü etkileşerek aynı yönlü manyetik özellik gösterirler. Bu özelliklere sahip materyallere ferromanyetik materyaller denir. Manyetik alan B ile gösterilir. Bir yüzeyden geçen manyetik akı

$$\Phi_B = \oint B \cdot dS \quad (1.19)$$

şeklindedir. Bir q yükü B manyetik alanına V hızıyla girdiğinde, yüke Lorentz kuvveti etkir Bu kuvvet  $\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}$  şeklindedir. Üzerinden akım geçen bir telin dL kadar kısmının manyetik kuvveti  $dF = i \cdot dL \times B$  vektörel çarpımı şeklindedir. Manyetik alan içerisinde dönme momenti (tork) ise  $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$  şeklindedir.

Manyetik enerji bir manyetik alan içerisinde enerji yoğunluğu, yani birin hacme düşen enerji miktarı

$$u_B = \frac{U_B}{Al} = \frac{\frac{1}{2} Li^2}{Al} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (1.20)$$

şeklindedir. Burada B manyetik alanı  $B = \mu_0 \times H$  şeklindedir.

Bir iletken elektrik ve manyetik alana maruz kaldığında iletkendeki iletim elektronları bu alanlarla etkileşerek sapsmalar gösterir. Bu durumda iletken içerisinde oluşan potansiyele *Hall potansiyeli*, dirence ise *Hall direnci* denir. Böyle bir materyalde hall alanı  $\vec{E}_H = -\vec{V}_d \times \vec{B}$  denkleminde  $E_H = JB / ne$  şeklinde bulunur. Burada J akım yoğunluğu, B manyetik alan n elektron yoğunluğu ve e elektron yüküdür. Elektrik ve manyetik alan iletkene dik olduğunda hall direnci  $R_H = 1 / ne$  dir [3].

### 1.6. Elektromanyetik Fırlatıcılarda Kullanılan Kütlenin Manyetik Özelliği

Maddelerin manyetik alanla etkileşim derecelerini belirleyen bağıl manyetik geçirgenliği  $\mu_b$  değeridir.

$$\mu_b = B / B_0 \quad (1.21)$$

şeklindedir. Bağıl manyetik geçirgenliği 1'den biraz küçük olan maddeler *diyamanyetik*, 1'den biraz büyük olan maddeler *paramanyetik*, 1'den çok büyük olan maddeler *ferromanyetik* maddeler olarak adlandırılır. Maddelerin manyetik özellikleri, onu oluşturan elektronların hareketlerine bağımlıdır. Elektronların yörüngesel ve spin hareketleri atomda bir akım, dolayısıyla bir dipol moment oluşturur. Maddedeki net dipol momentin büyüklüğü onun manyetikliğini belirler.

Diyamanyetik maddeler bir mıknatısa yaklaştırılınca mıknatıs tarafından itilir, yani bunlar manyetik alanı zayıflatırlar. Bakır, kurşun, bizmut, karbon, gümüş, cıva diyamanyetik maddelere örnektir.

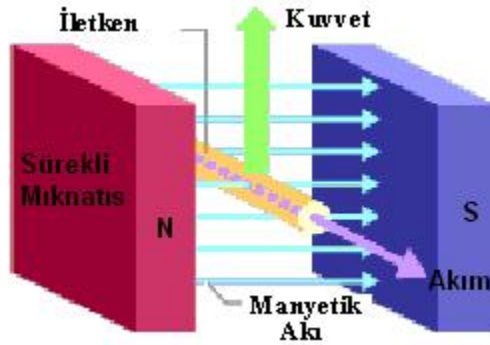
Paramanyetik maddeler mıknatısa yaklaştırıldığında ondan çok az etkilenir, yani içine konduğu manyetik alanı biraz sıkılaştırmış olur. Platin, hava, uranyum, manganez, alüminyum, sodyum ve oksijen paramanyetik maddelere örnektir. Paramanyetik maddenin manyetizasyonu uygulanan manyetik alanla doğru, sıcaklıkla ters orantılıdır. Buna göre manyetizasyon  $M = CB / T$  dir. Burada C curie sabiti olup, bu kanun *Curie kanunu* olarak da bilinir.

Ferromanyetik maddeler mıknatıs tarafından çekilirler. Bu maddelere örnek olarak demir, yumuşak çelik, nikel, kobalt verilebilir. Bu maddeler ısıtıldıklarında belli bir sıcaklıkta (curie sıcaklığı) mıknatıslık özelliğini kaybederler ve aniden paramanyetik olurlar.

Elektromanyetik fırlatıcılarda kullanılacak mermi (çekirdek) sargının oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle ivmelendiği için merminin diyamanyetik özellik göstermemesi, yani paramanyetik veya ferromanyetik özellik göstermesi gerekir.

### 1.7. Elektromanyetik Kuvvet

Sürekli mıknatıs tarafından üretilen manyetik akının yönü, daima N-kutbundan S-kutbuna doğrudur. Manyetik alan içerisine, içinden akım geçen bir iletken yerleştirilirse, manyetik alan ve akım “elektromanyetik kuvvet” oluşturacak şekilde birbirleriyle etkileşirler.



Şekil 1.1. Elektromanyetik kuvvet

Fleming'in *sol el kuralı*, akım, manyetik alan ve akının yönünü belirler. Orta parmak akımı, işaret parmağı manyetik akının yönünü gösterdiği zaman, başparmağın yönü kuvvetin yönünü belirler.



Şekil 1.2. Sol el kuralı

### 1.7.1. Akım Tarafından Üretilen Manyetik Alan

Akım ve sürekli mıknatıslar tarafından üretilen manyetik alanlar, elektromanyetik kuvvet oluştururlar. İletkendeki akım yönü, sayfa düzleminden okuyucuya doğru olduğu zaman, saatin dönüş yönünün tersinde bir manyetik alan ortaya çıkar. Bu durum *sağ el kuralı* olarak ifade edilir. Başparmak akım yönünü gösterirken, diğer parmakların dönüş yönü elektromanyetik alanın yönünü gösterir.



Şekil 1.3. Sağ el kuralı

### 1.7.2. Moment Üretme

Elektromanyetik kuvvet aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$F = B \times I \times l \quad (1.22)$$

Burada

$F$  : Kuvvet

$B$  : Manyetik Akı Yoğunluğu

$I$  : Akım

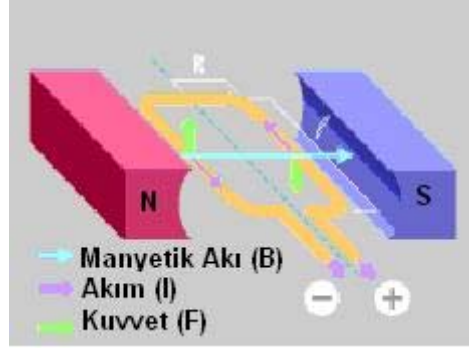
$l$  : İletkenin Boyu

Tek bir iletkenden elde edilen moment  $M' = F \times R$  denklemlerle ifade edilir. Burada

$M$  : Moment

$F$  : Kuvvet

$R$  : İletken Merkezine Uzaklık



Şekil 1.4. Moment üretimi

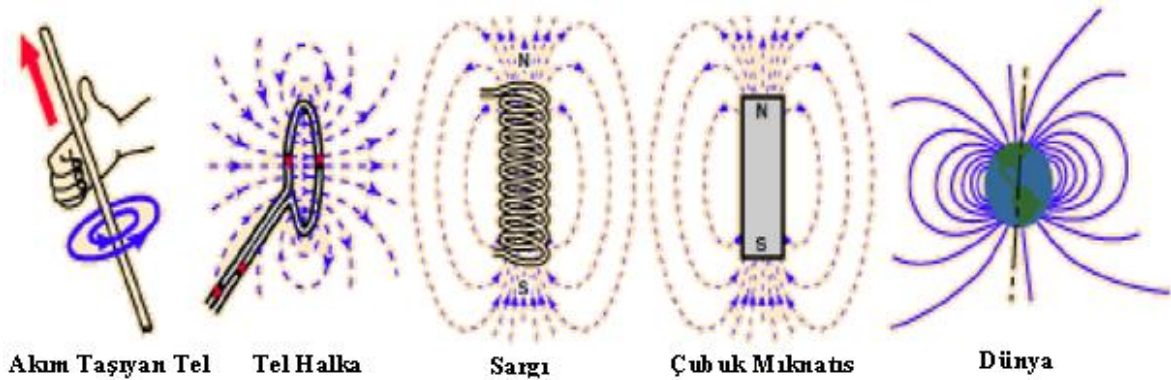
Şekil 1.4.'de iki iletken olduğu için toplam moment

$$M = 2 \times M' = 2 \times F \times R \quad (1.23)$$

olarak elde edilir.

### 1.8. Akımın Manyetik Etkisi

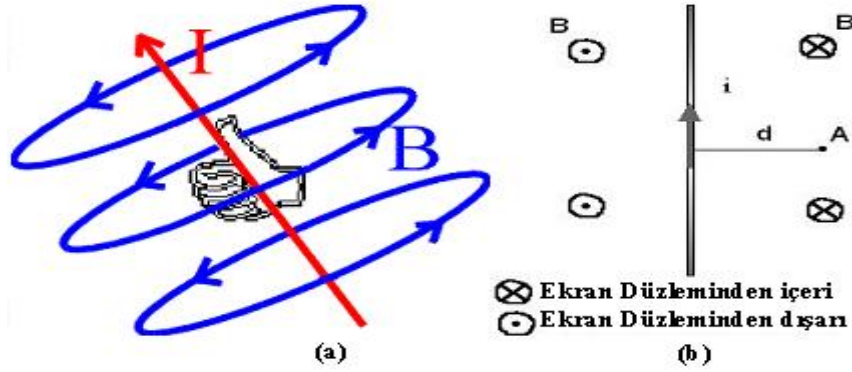
Manyetizmanın temelinde hareket eden yüklü parçacıklar vardır. Mıknatısın manyetik alanının kaynağı atomlarında aynı yönde dönen elektronlardır. O halde yüklü parçacıkların hareket etmesi manyetik alan, yani mıknatıslık etkisi yaratır diyebiliriz. Elektrik akımı da yüklerin hareketinden kaynaklandığından içinden akım geçen tel mıknatıs gibi davranır, yani manyetik alan yaratır. Şekil 1.5.'de akım taşıyan tellerin ve bazı manyetik maddelerin manyetik alan çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Akım taşıyan tellerin ve bazı manyetik maddelerin manyetik alan çizgileri

### 1.8.1. Düz Telden Geçen Akımın Manyetik Etkisi

Akım taşıyan düz tel etrafında dairesel manyetik alan çizgileri oluşturur. Şekil 1.6.'da dairesel manyetik alan çizgilerinin yönünün bulunması sağ el kuralı ile gösterilmiştir. Başparmak akım yönünü gösterdiğinde kıvrılan dört parmak manyetik alan çizgilerinin yönünü gösterir. Şekil 2.6.b'de akım taşıyan telin sağında ve solundaki manyetik alan vektörlerinin yönleri sağ el kuralına göre verilmiştir.



Şekil 1.6. Akım taşıyan düz telin etrafında oluşan manyetik alanın sağ el kuralıyla bulunması

Telden  $d$  kadar uzaktaki  $a$  noktasının manyetik alınının büyüklüğü;

$$B = \frac{2K.i}{d} \quad (1.24)$$

ifadesiyle bulunur. Burada

$B$  : Manyetik Alan [ Weber/ metrekare ( $Wb/m^2$ ) ]

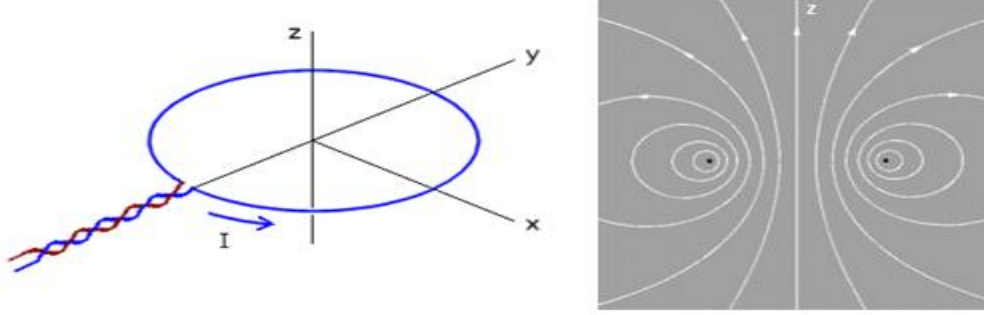
$K$  : Ortam Sabiti [ Newton/ Amperkare ( $N/A^2$ ) ]

$i$  : Telden Geçen Akım [ Amper ( $A$ ) ]

$d$  : Tel İle Nokta Arasındaki Uzaklık [ metre ( $m$ ) ]

### 1.9. İletken Bir Çemberdeki Manyetik Alan

Bir bobin sargılardan oluştuğundan çember biçimindeki (selonoid) sargıdaki tek bir manyetik alanı basit olarak inceleyelim. Yapılan incelemede sargı içine yerleştirilmiş herhangi bir nüvenin (çekirdek) olmadığı varsayımından hareket edilmektedir.



Şekil 1.7. Tek bir sargı ve oluşturduğu manyetik alan

Şekil 1.7.'deki tek sargının manyetik alanı sağ tarafta şekle benzer olacaktır. Bu alan çizgileri y-z boyunca çizilmiş taslak çizgiler olup gerçekte birçok manyetik kuvvet çizgisinin var olduğu bilinmektedir. Bu çizgiler aynı zamanda x-y düzleminde de simetriktirler. Yine dikkat edilecek başka bir husus da alan çizgilerinin iletkenle uzaklaştıkça zayıfladığıdır.

Şimdi manyetik alan kuvvetini hesaplayalım. Bunun için kullanılacak en basit yöntem merkeze doğru olan “z” ekseninde çalışmaktır. Çünkü bu eksen boyunca her nokta çemberi oluşturan iletkene eşit mesafededir. Biot Savart Kanununa göre herhangi bir iletken parçasındaki alan

$$dB = \frac{Idl \times \hat{r}}{cr^2} \quad (1.25)$$

Burada

$\hat{r}$  : çember üzerindeki herhangi bir noktaya ait birim vektör,

$c$  : ışık hızı,

$dl$  : tel boyunca rasgele seçilmiş küçük unsur,

$dB$  :  $dl$  den dolayı B-alanına olan katkısı,



$r$  :  $dl$  den ilgilenilen noktaya olan uzaklıktır.

Bu diferansiyel eşitlikle telin rasgele seçilmiş küçük kısımlarındaki alan tanımlanarak ve sayısal olarak toplanarak toplam etki bulunabilir.

### 1.9.1. Çember Eksenindeki Manyetik Alan

$Z$  eksenindeki alanı Biot-Savart kurallarını kullanarak elde edelim. Bunun için sadece  $dB$  nin  $z$  bileşenini bulmak bizim için yeterli olacaktır. Çünkü bu eksendeki toplam alan “ $z$ ” yönünde bir noktada olmalıdır.

$$dB = \frac{Idl}{cr^2} \cos \Phi = \frac{Idl}{cr^2} \times \frac{b}{r} \quad (1.26)$$

dir. Burada  $b$ , sargı yarıçapıdır. Yarıçap boyunca  $dB$ 'nin integrali alınarak toplam alan  $B$  bulunur.

$$B = \int_0^{2\pi} dB = \int_0^{2\pi} \frac{I}{cr^2} \times \frac{b}{r} = \frac{I}{cr^3} \int_0^{2\pi} dl \quad (1.27)$$

İntegral bölümü çemberdeki telin halka uzunluğunu göstermektedir. Herhangi bir noktada eksen üzerindeki alan ise; burada (“ $r$ ” nin  $b$  ve  $Z$  ‘nin fonksiyonudur)

$$B = \frac{2\pi b^2 I}{cr^3} \quad (1.28)$$

dir. Burada: “ $r$ ”,  $Z$  den çembere olan uzaklıktır.

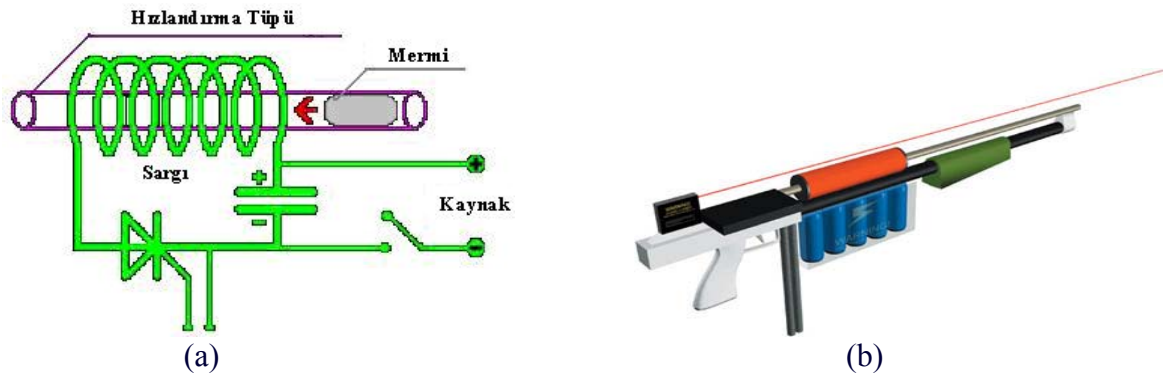
Pisagor teoremini hatırlarsak.  $r^2 = z^2 + b^2$  sonuç olarak  $B$  alanı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir

$$B = \frac{2\pi b^2 I}{c(z^2 + b^2)^{3/2}} \quad (1.29)$$

Bu eşitlik z eksenindeki herhangi bir noktadan b yarıçapındaki çembere doğru olan manyetik alanı verir. Eğer çember içine demir gibi herhangi bir cisim sokulacak olursa bu alanın değişeceği de unutulmamalıdır.

### 1.10. Elektromanyetik Fırlatıcılar Kuramı

Elektromanyetik fırlatıcıların çalışmasının temel ilkeleri elektromanyetik kurama dayanır. Gerçekleştirilmek istenen durum, değişen ya da hareket eden güçlü bir elektromanyetik alan yaratarak, hareket ettirilecek ya da fırlatılacak nesnenin bu elektromanyetik alanı takip etmesini sağlamaktır. Kuramsal olarak elektromanyetik alanın hareket etme hızında bir sınır olmadığı için, itici kuvvetin hızına ulaşması beklenen durumda, hızlandırılan nesne için de bir hız limiti yoktur. Bu tip uygulamaları bu denli ilginç kılan özellik de gelişmeye açık olmasıdır. Şekil 1.8.'de basit bir elektromanyetik fırlatıcının açık ve kapalı yapısı gösterilmiştir.

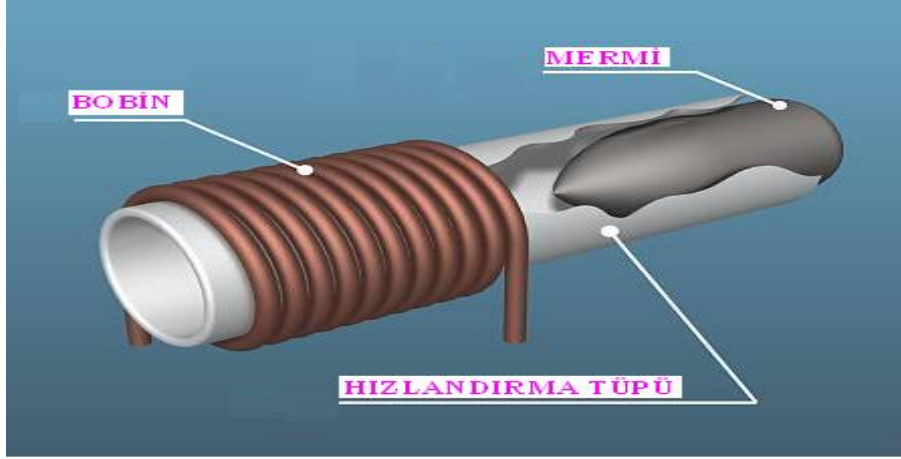
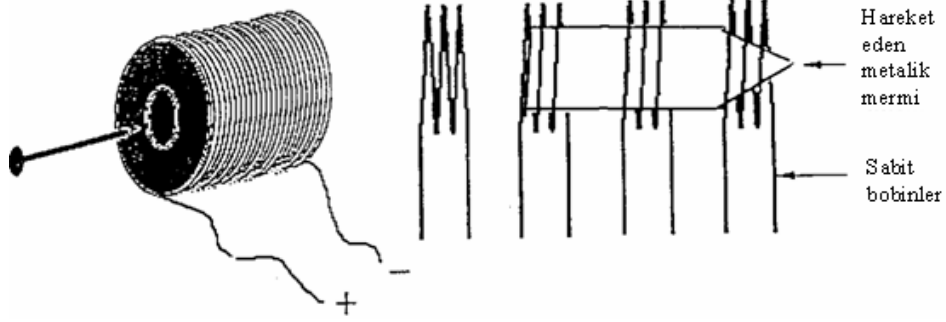


Şekil 1.8. Basit bir elektromanyetik fırlatıcının a) Açık yapısı, b) Kapalı yapısı

Hareket eden elektromanyetik alan ile nesnelere hareket ettirmek ilkesinden yararlanarak, farklı tipte uygulamalar yapmak mümkündür. Aslında bu yeni değildir; günlük hayatta sık sık kullandığımız elektrik motorları bunun çok genel uygulamalarıdır.

Bu fırlatıcı türünde asenkron motorlarda olduğu gibi, elektromıknatlara benzer bir yapı kullanılmaktadır. Bir sargıdan akım aktığında sargının çevresinde manyetik alan oluşturacaktır. Sargının iç hacminde bu manyetik akı yoğunlaşacaktır. Metalik bir cisim (mermi) sargının yakınına yerleştirilecek olursa manyetik akı, düşük relüktanslı olması

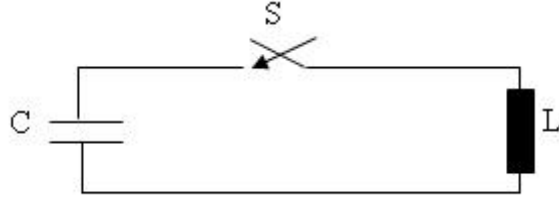
nedeniyle bu cisim içinden akmayı tercih edecek ve manyetik indüksiyon oluşturarak cismi içine çekecektir. Şekil 1.9.'da sargılı fırlatıcının ilkesel gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.9. Sargılı fırlatıcının ilkesel gösterimi

Tek bir sargı kullanmak yerine, yan yana dizilmiş belirli sayıda sargılar kullanıldığında ve içinde hareket eden cismin hızına da bağlı olarak uygun bir hızda “elektrik akımın tetiklenmesi (ateşleme)” gerçekleştirildiğinde, fırlatma işlemi yapılmış olacaktır. Şekil 1.9.’daki sargıdan akım geçirildiğinde, sargı içinde oluşan elektromanyetik alan mermiyi içine doğru çekmek isteyecektir. Bu noktadan hareketle, yan yana dizilmiş ve sıra ile akım verilen sargılar mermiyi içlerine çekerek hızlandıracaklar ve sargıların bittiği yerde kazandığı kinetik enerji ile mermi dışarı fırlatılacaktır.

Bu fırlatıcının elektrik eşdeğer devresi, temelde bir anahtar üzerinden paralel olarak bağlanmış bir sargı ve bir kondansatörden ibarettir. Bu elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1.10.’da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Sargılı fırlatıcının elektriksel eşdeğer devresi

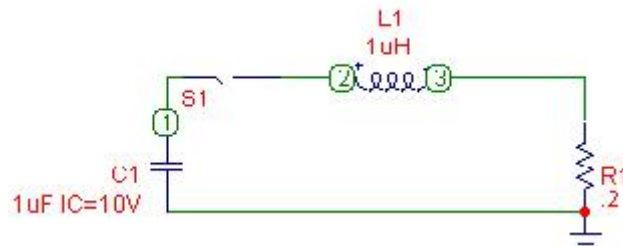
Şekil 1.10.'daki devre oldukça sade olup, sargıdan tekrar kondansatöre akacak ters (negatif) akım, aynı devreden birden fazla bağlanması durumunda, tetikleme zamanının ayarlanması gibi ihtiyaçlardan dolayı devreye bazı ilave elemanların da bağlanmasını zorunlu kılar.

Şekil 1.10.'daki devreden görüleceği gibi elektromanyetik fırlatıcılar da kullanılan sargıdan dolayı indüktans ve direnç, sargıyı besleyen kapasiteden dolayı seri bir RLC devresine benzemektedir. Dolayısıyla elektromanyetik fırlatıcıları incelerken RLC devrelerini özelliklerini de dikkate almak gerekir. Seri RLC devreleri çoğu yüksek gerilimde ve darbeli boşalma devrelerinde öncelikli bir modeldir.

*Gecikmiş sönümlenme durumu* bir seri R-L-C devresinde:

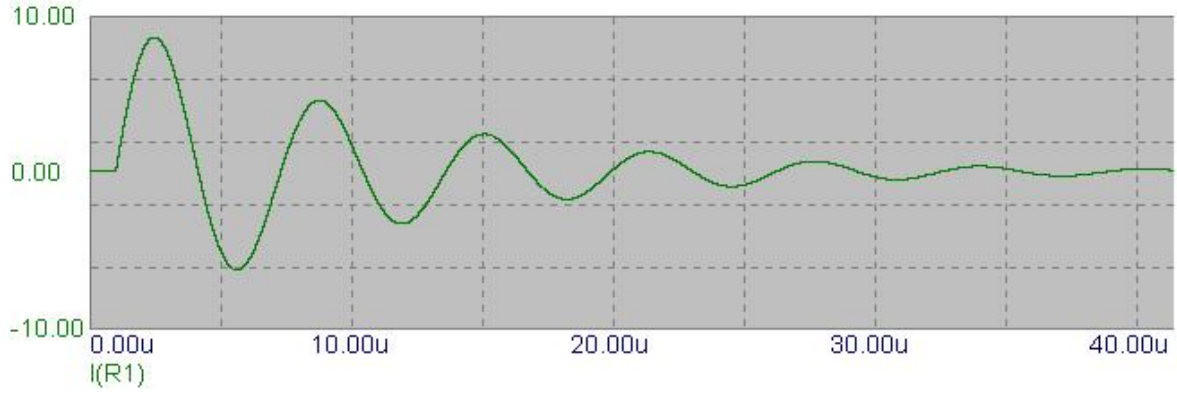
$$\left( R^2 < \frac{4L}{C} \right) \quad (1.30)$$

durumunda ortaya çıkar. Örneğin kondansatör  $1 \mu F$  ve 10V luk başlangıç gerilimine sahip olsun. İndüktans değeri  $1 \mu H$  ve R direnci ise kritik sönümlenmedeki değerinden 10 kat az bir değere sahip olsun, yani R direncinin değeri  $0.2 \Omega$  olsun [4].



Şekil 1.11. Gecikmiş sönümlenmedeki R-L-C devresi

Devre akımı Şekil 1.12.'de gösterilmektedir ve  $t = \pi/2\omega_0$  değerinde tepe değerine ulaşmaktadır.



Şekil 1.12. Gecikmiş sönümlemedeki devrede akımda ortaya çıkan salınım

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (1.31)$$

Burada:

$L$  : Devrenin indüktansı (H)

$C$  : Devrenin kondansatörü (F)

$R$  : Devrenin direnci ( $\Omega$ )

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega_0 L} e^{\frac{-R}{2L}t} \sin \omega_0 t \quad (1.32)$$

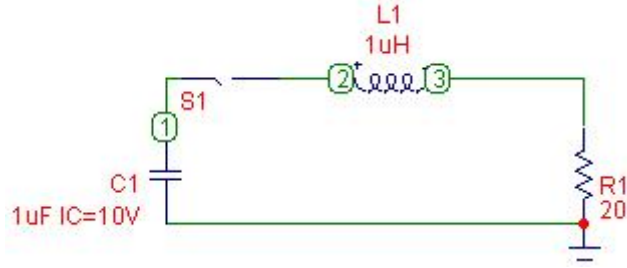
$V_0$  : Kondansatörün başlangıç gerilimi (V)

$$I_{tepe} = \frac{V_0}{\omega_0 L} e^{\frac{-R\pi}{L\omega_0}} \quad (1.33)$$

*Aşırı sönümleme durumu* bir seri R-L-C devresinde:

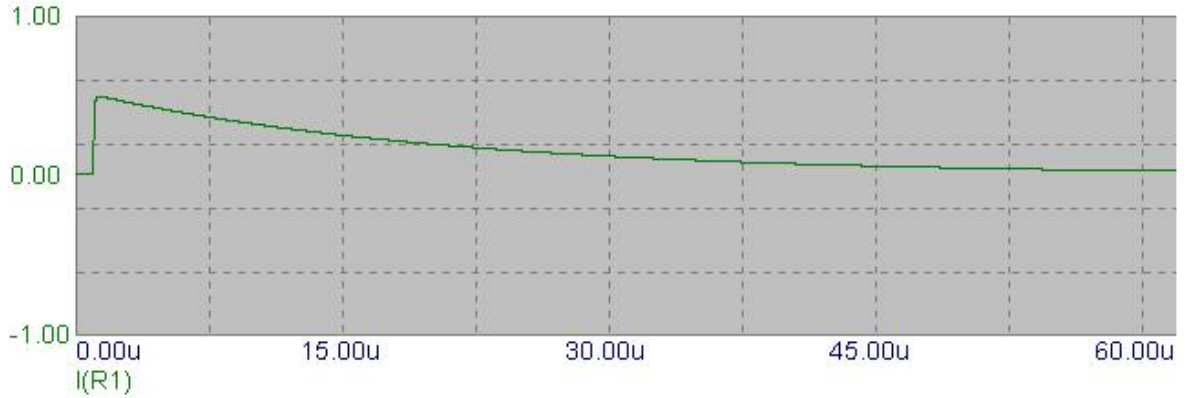
$$R^2 > \frac{4L}{C} \quad (1.34)$$

durumunda ortaya çıkar. Aynı kondansatör gerilimi ve kapasitesi, aynı indüktans değerleri alındığında, direnç değeri ise kritik sönümlenme durumunun 10 kat bir değerde alınırsa elde edilebilecek sonuç Şekil 1.13.'de gösterilmiştir [4].



Şekil 1.13. Aşırı sönümlemedeki R-L-C devresi

Bu durumda anahtar bir kere kapatıldığında yük direnci üzerindeki gerilim kondansatör gerilimine kadar yükselir. İndüktans üzerindeki gerilim minimal bir değer olacağı için R-C devresi tepkisi ile aşırı sönümlü durumdaki tepki aynı oranda olacaktır.



Şekil 1.14. Aşırı sönümlemedeki devrede akımda ortaya çıkan salınım

$$\tilde{\omega}_0 = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (1.35)$$

Burada

L: İndüktans (H)

C: Kondansatör (F)

R: Direnç ( $\Omega$ )

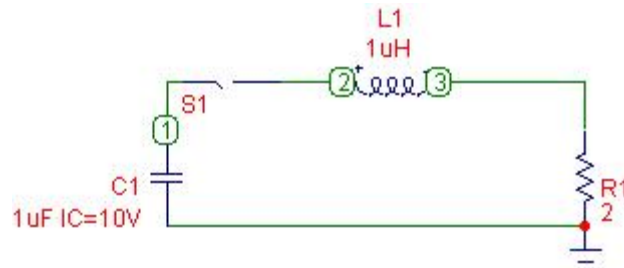
$$i(t) = \frac{V_0}{\tilde{\omega}_0 L} e^{\frac{-R}{2L}t} \sinh \tilde{\omega}_0 t \quad (1.36)$$

$V_0$  : Kondansatörün başlangıç gerilimi (V)

*Kritik sönümleme durumu* bir seri R-L-C devresinde

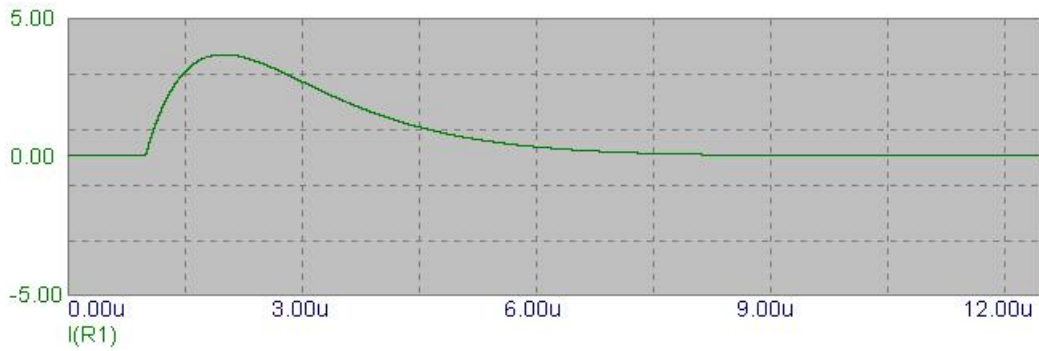
$$R^2 = \frac{4L}{C} \quad (1.37)$$

olması durumudur. Kritik sönümlenmeli modelde direncin kritik sönümlemeyi sağlayacak tam değeri seçilir [4].



Şekil 1.15. Kritik sönümlemedeki R-L-C devresi

Dirençteki gerilim düşümü salınım yapmayacaktır. Akım grafiği Şekil 1.16.'da görülmektedir. Tepe değeri,  $t = 2L/R$  de oluşmaktadır. Bu devre yüksek voltajda enerji depolamada kullanılan kondansatörün ömrünü uzatmak için sıklıkla tercih edilir.



Şekil 1.16. Kritik sönümlemedeki akım karakteristiği

$$i(t) = \frac{V_0 t}{L} e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (1.38)$$

Burada:

$V_0$  : Kondansatörün başlangıç gerilimi (V)

$L$  : Devrenin indüktansı (H)

$R$  : Direnç ( $\Omega$ )

$$I_{tepe} = \frac{2V_0}{eR} \approx 0.736 \frac{V_0}{R} \quad (1.39)$$

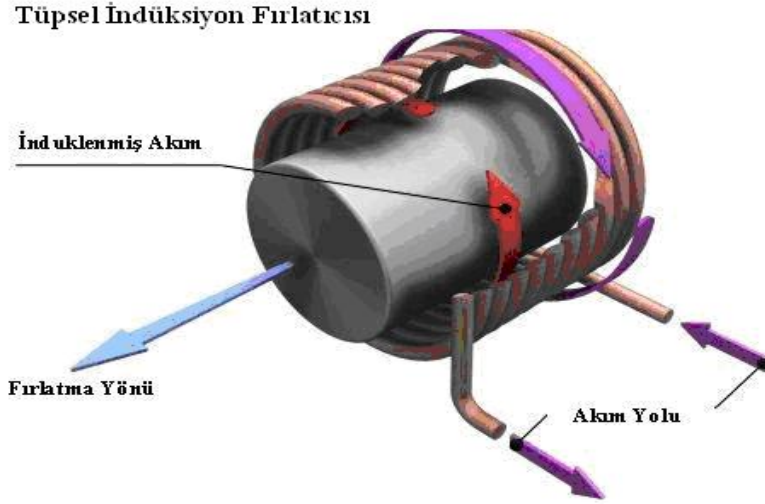
## 1.11. Sargılı Fırlatıcının Temelleri

### 1.11.1. İndüksiyon Sargılı Fırlatıcı

Klasik boru (tüpsel) şeklindeki sargılı fırlatıcı, genel yapı açısından basit reluktanslı (manyetik dirençli ) sargılı fırlatıcı ile benzer temel özelliklere sahiptir. Fark şudur ki: mermi, mermi içinde indüklenmiş girdap akımlarının etkisiyle sargıdan dışarıya doğru itilir. Mermi diyamanyetik olmamalı (bakır veya alüminyum gibi...) ve başlama konumunun ise sargının merkezinden biraz dışında olması gerekmektedir, aksi takdirde sargı ateşlendiğinde net kuvvet oluşturmayacaktır. Mermi üzerinde elde edilen itme, iyi bir tasarıma etki etmek için göz önünde tutulması gereken ortak indüktans ve manyetik yayılma süreçlerine bağlıdır. Çok kademeli fırlatıcı tasarlanırken, daha düzgün ivmelenme görüntüsü vermesi için bağımsız sürücü sargıları mermi uzunluğuna göre daha kısa yapılabilir.

Ayrıca şuna dikkat edilmelidir ki: Merminin katı bir iletken olmamasına ihtiyaç yoktur. Kendi üzerine kısa devre edilmiş sargı içeren mermi kullanılabilir ve verim yararları sağlar [5]. Aynı zamanda mermi, sürücü sargılarıyla şekillendirilmiş iç tarafı yivli mil şeklinde üzerine binen oyukta bulunan tüpüler biçiminde olabilir. Mil sürücü kuvvetinin radyal bileşenine karşı dönme esnasında destek sağlar. Bu özel biçim Theta Gun [6] olarak adlandırılmıştır. Şekil 1.17.'de tüpsel induksiyon fırlatıcısının yapısı görülmektedir.

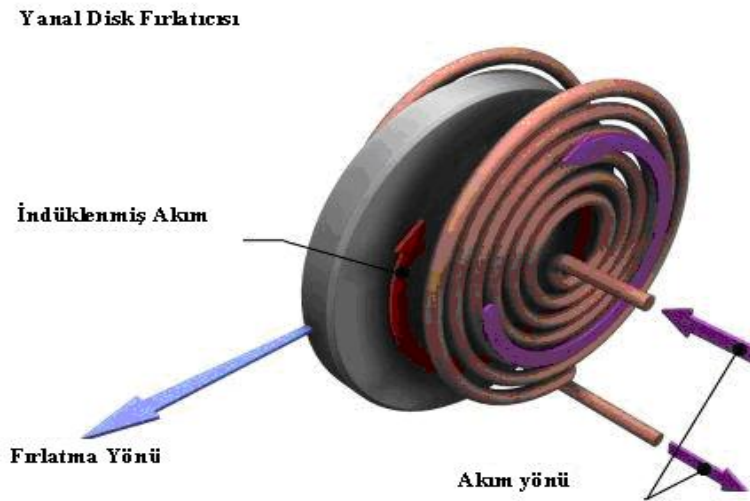




Şekil 1.17. Tüpsel İndüksiyon Fırlatıcısının yapısı

### 1.11.2. Tekrar Bağlantılı Sargılı Fırlatıcı

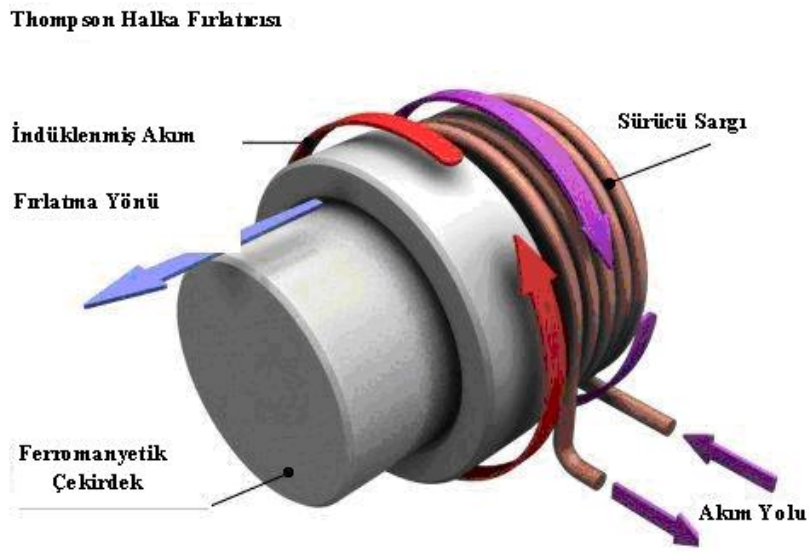
Tekrar bağlantılı sargılı fırlatıcı (ayrıca levha veya disk fırlatıcısı olarak da bilinir) merminin her iki yanına sabitlenmiş iki sargı içerir [7]. Sargıların içine doğru akım dolarken merminin içinde girdap akımları oluşur, sargı akımının etkileşmesiyle girdap akımları mermiyi iter. Merminin sargılardan ayrılmasıyla akı çizgileri sargılardan tekrar bağlanır, bu yüzden buna bu isim verilir [8,9]. Çok kademeli silindirik indüksiyon sargılı fırlatıcı tekrar bağlantılı sargılı fırlatıcı olarak kullanılabilir [10]. Şekil 1.18.'de tekrar bağlantılı sargılı fırlatıcının (levha veya disk fırlatıcısı) açık şekli görülmektedir.



Şekil 1.18. Tekrar bağlantılı sargılı fırlatıcının açık şekli

### 1.11.3. Thompson Sargılı Fırlatıcı

Elihu Thompson'ın fırlayan halka aletinden sonra adlandırılmış ve indüksiyonlu sargılı fırlatıcının başka bir biçimi olmakla beraber klasik indüksiyonlu sargılı fırlatıcının çalışma prensiplerine sahiptir. Yine, mermi bakır veya alüminyum gibi diyamanyetik olmayan maddeden yapılır. Şekil 1.19.'da tek kademeli Thompson sargılı fırlatıcısının muhtemel tasarımı gösterilmektedir.



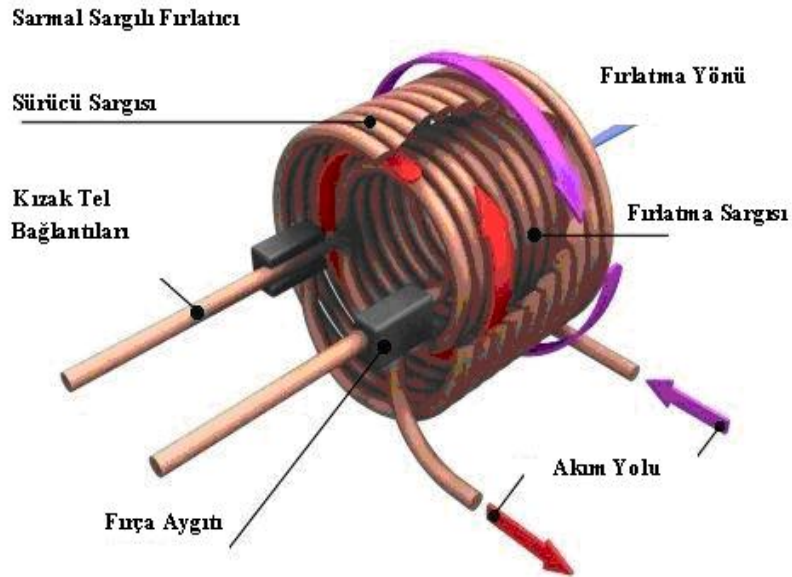
Şekil 1.19. Tek kademeli Thompson sargılı fırlatıcısı

Sargı ateşlendiğinde ferromanyetik çekirdek mıknatıslanır, manyetik akı büyüklük olarak artar ve bu manyetik akı mermi halkasının içerisinde dairesel girdap akımları oluşturur. İndüklenmiş akım sargı akımıyla itilir ve mermi çekirdekte dışarıya doğru atılır. Akı daha hızlı artırılırsa, daha büyük indüklenmiş akım ve mermi üzerinde daha büyük kuvvet elde edilir. En iyi sonuçlar için çekirdek, tabakalardan, yığın demir çubuklardan veya madde tozlarından yapılmalıdır. Bu işlem çekirdekteki girdap akımlarını düşürmek için gereklidir ve bu yüzden hızlı akı sarkmalarına izin verir.

Genel anlamda, akıda yeterli hızlı yükselmeleri üretmek için genellikle birkaç yüz veya daha fazla gerilim farkı kullanılmalıdır. Yeni başlayanlar için yüksek gerilim kapasitörlerinde elektrik çarpma riskinden dolayı bu tür sargılı fırlatıcılar uygun değildir.

#### 1.11.4. Sarmal Sargılı Fırlatıcısı

Bu tür fırlatıcılarda iki tane sargı vardır; sürücü sargısı (stator) ve fırlatıcı sargısı (rotor) [11]. Rotor sargısı, rotorun kızak kollarına fırça takımıyla temas eden stator sargısıyla elektriksel olarak seri bağlanır. Mermi, zıt yönlerde yol alan stator ve rotor içindeki akımlar gibi yönlendirilmiştir, rotor tüpsel indüksiyon fırlatıcısı içindekine benzer, itici güç üretir. Bu durumdaki fark; geri tepki süresi manyetik difüzyon zaman ölçeği olarak sınırlandırılmamaktadır. Şekil 1.20.'de sarmal sargılı fırlatıcının yapısı gözükmemektedir.



Şekil 1.20. Sarmal sargılı fırlatıcının yapısı

Sarmal sargılı fırlatıcısı uzatılmış statorun dış tarafının üstüne binen armatür/mermi olarak da yapılabilir [12]. Raylar merminin her iki yanına yerleştirilmiştir ve kanal akımını stator ve merminin içine iletirler. Fırça teçhizatı, statorun üzerindeki armatürün pozisyonunu önemsemeden armatürün arkasında aniden enerjilendirilmiş statorun bir kısmı olarak düzenlenmiştir.

### 1.11.5. Zıpkın Sargılı Fırlatıcı

Bu sargılı fırlatıcı topolojisi aktif duyarlılık gereksinimini ortadan kaldıran, sürücü sargılarının pasif anahtarlamasını barındırır [13]. Rotor fırlatma esnasında sürekli olan ilk akımla yüklenir. (Akım azalması zaman sabiti olan  $L/R$ , fırlatma zamanından uzun olması gibi...). Fırlatma başlangıcında sürücü sargıları ateşlenir ve mermi, sargıların içine doğru sürülürken her bir ardıl sargının akımı sıfıra gider. SCR anahtarları akım sıfıra giderken frenleme kuvveti veya “geri tepme” üretilmemesi için sürücü sargılarına giden akımı otomatik olarak anahtarlayarak (yönünü değiştirerek) kapatır.

### 1.12. Elektromanyetik Fırlatıcıların Çeşitleri

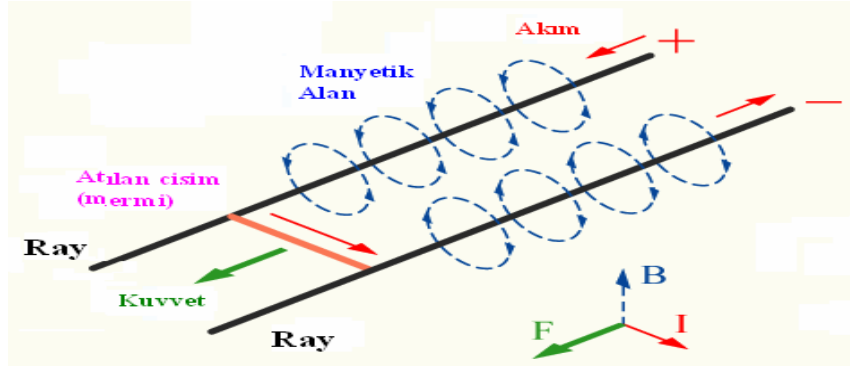
Elektromanyetik fırlatıcılar temelde

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

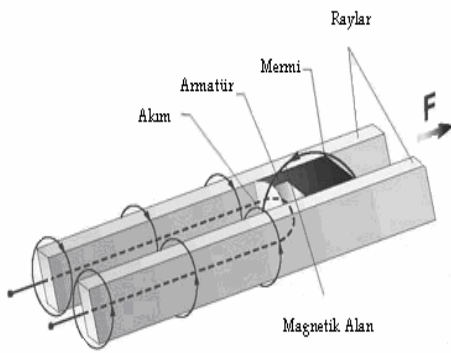
olmak üzere dört ana çeşide sahiptirler.

#### 1.12.1. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar

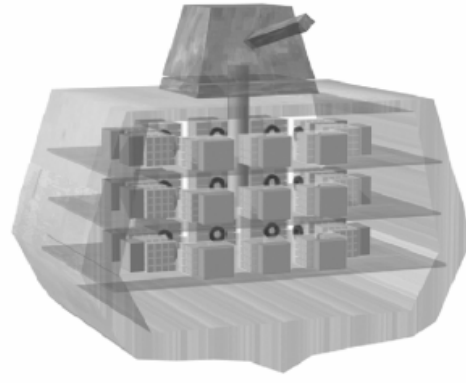
Raylı elektromanyetik fırlatıcılar metal iki ray kullanılarak bu raylar arasındaki cismin, üzerinde (daha çok ufak kütlelerin) oluşturulan elektriksel itme kuvveti ile fırlatılması ilkesine dayanır. Ray malzemesi olarak çoğunlukla bakır kullanılmakla beraber, yüksek etkinlikli raylı silahlar için daha yüksek iletkenlikli, daha yüksek mekanik dayanımlı ve mega amperler mertebesindeki akımları taşıyabilecek daha özel çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Raylı fırlatıcılar konusunda ray direnci ile ilgili olarak raylarda oluşan ısınma nedeni ile ray ömrü, ray oyuk geometrilerinin verimliliğe etkisi v.b. birçok konuda çalışmalar devam etmektedir. Şekil 1.21.'de raylı fırlatıcıların genel yapısı ve gemilerden güdümlü mermilerin aşırı hızlarda fırlatılarak uzak kıyılardaki askerlere destek verilmesini sağlayacak örnek bir raylı fırlatıcı prototip gösterilmiştir.



(a)



(b)

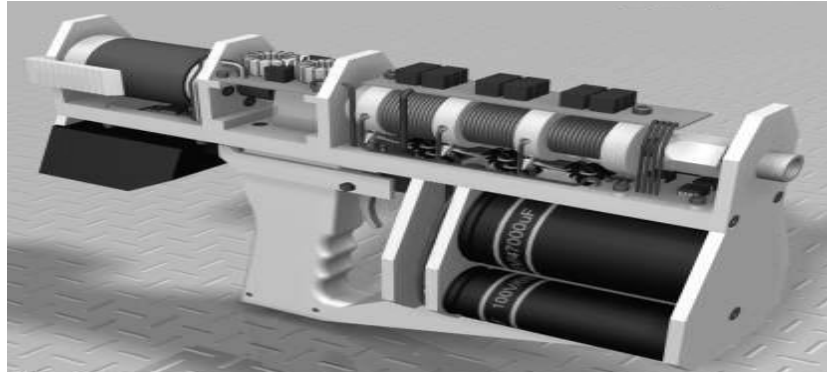
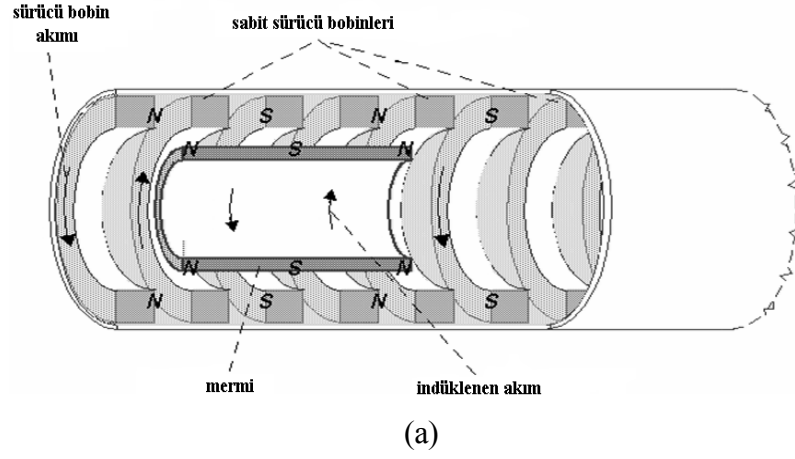


(c)

Şekil 1.21. Raylı elektromanyetik fırlatıcı a) Genel yapı, b) Fiziki yapı, c) Örnek prototip

### 1.12.2. Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılar

Sargılı fırlatıcılar ardışık sürücü sargılar kullanılarak oluşturulan elektriksel itme kuvveti ile bu sargılar arasındaki cismin fırlatılması ilkesine dayanır. Sargılı fırlatıcılar daha çok orta hızlarda fakat büyük kütleli cisimlerin fırlatılmasında önemli rol oynamaktadırlar. Şekil 1.22.'de sargılı fırlatıcıların genel yapısı ile örnek bir sargılı fırlatıcı tabanca prototipi gösterilmiştir.



Şekil 1.22. Sargılı elektromanyetik fırlatıcı a) Genel yapı, b) Tapanca prototipi

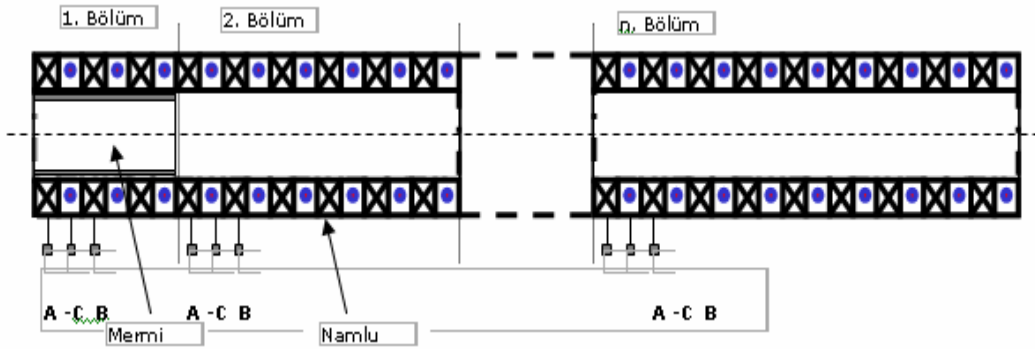
Sargılı fırlatıcıların raylı fırlatıcılara göre temel üstünlükleri mevcut mekanik zorlanmanın daha geniş bir yüzeye yayılmış olması, mermi ve namlu arasındaki temassızlık nedeni ile uzun ömür ve daha yüksek verim olarak sayılabilir. Sargılı fırlatıcılar tek ya da çok bölmeli sargı yapıları kullanılarak üretilbilirler.

### 1.12.3. Karma Elektromanyetik Fırlatıcılar

Karma fırlatıcılar, yapılarında hem raylı hem de sargılı fırlatıcıları bulunduran sistemlerdir. Karma fırlatıcıların yüksek akımlara ihtiyaç duyan raylı fırlatıcılar ve yüksek maliyetlerle gerçekleştirilebilen sargılı fırlatıcılara karşı en büyük üstünlüğü aynı sonuçlara ulaşmak için daha az akıma ihtiyaç duymalarıdır. Yine karma fırlatıcıların tasarımları ve gerçeklemlerinin raylı ya da bobinli fırlatıcılara karşı daha basit olduğu belirlenmektedir [14].

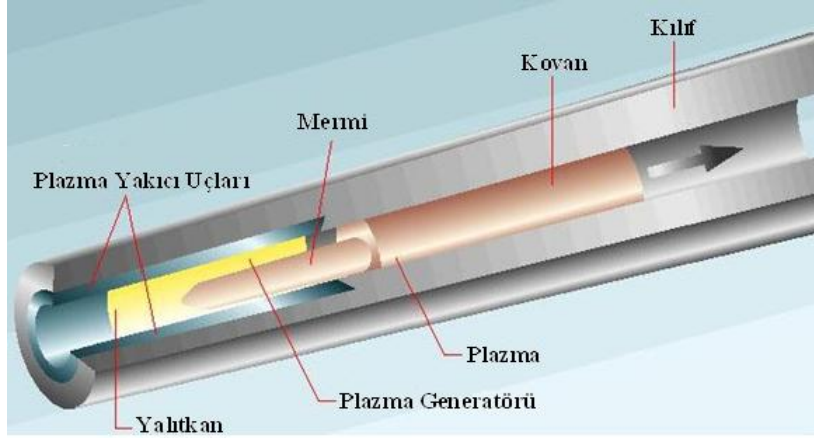
### 1.12.4. Doğrusal Hareketli Fırlatıcılar

Lineer indüksiyon fırlatıcılar, asenkron motor prensibine göre çalışan hava nüveli sargılı fırlatıcılardır. Namludaki sargılar, çok fazlı (3, 5 veya daha fazla) alternatif akım kaynağından beslenerek namluda seyahat eden dalga oluşması sağlanmaktadır. Mermi kapsülü ise içi boş bir alüminyum tüpten oluşmaktadır. Enerji kaynağı olarak kapasitör grupları veya motor/jeneratör sistemi kullanılmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması için namlu birden fazla bölüme ayrılabilir. Her bölüm farklı frekanslara sahip enerji kaynakları tarafından beslenmektedir. Bir bölümdeki enerji kaynağının frekansı, bir önceki bölümden daha yüksektir. Şekil 1.23.'de üç fazlı çok bölmeli bir doğrusal hareketli fırlatıcı yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Üç fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı

Yukarda bahsedilen fırlatıcılardan başka Elektrotermal-Kimyasal (ETC) fırlatıcılarda mevcut olup, bu tür fırlatıcılar uygun bir maddenin elektromanyetik enerji ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin oluşturduğu itiş kuvveti ile çalışır. Ayrıca ETC'ler ile raylı ve sargılı fırlatıcıların birlikte kullanıldığı hibrit sistemler mevcuttur. Şekil 1.24.'de elektrotermal-kimyasal fırlatıcıların yapısı gözükmektedir.



Şekil 1.24. Elektrotermal-kimyasal fırlatıcıların yapısı

Şekil 1.24.'de görüldüğü gibi Elektrotermal silah (onun en basit şekli) geleneksel tüfek tüpünden (elektriksel iletkenler ile desteklenmiş-plazma yakıcıya güç sağlamak için kullanılır, arka tarafa monte edilmiş) oluşmaktadır. Plazma yakıcının Elektrotlarına Akım uygulama ile bir ark üretilir ve bu ark elektrotlar arasına yerleştirilmiş maddeyi plazmanın şekline bağlı olarak yakar (sırayla) yüksek basınç üretir. Kullanılan ortam bir materyaldir ve gazı geleneksel barut gazından düşük moleküler ağırlığa sahiptir. Bunun anlamı fırlatıcı ile birlikte hızlandırılan gaz kütleleri düşebilir ve bundan dolayı yüksek namlu hızına erişilebilir. Fırlatıcı elektriksel olarak ısıtılmış plazmanın basıncı ile hızlandırılır [15].

### 1.13. Elektromanyetik Fırlatıcıların Kullanım Alanları

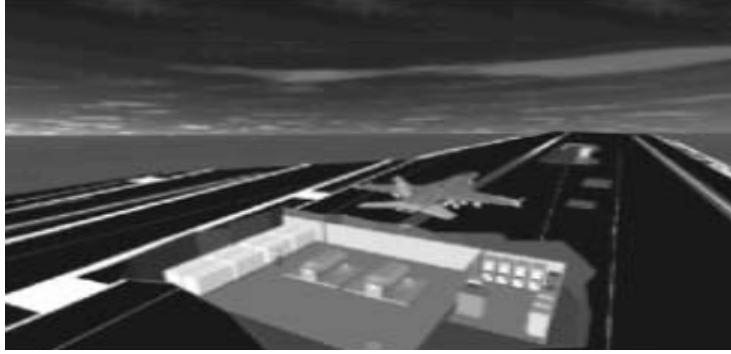
Son yıllarda özellikle ABD'de, elektromanyetik fırlatıcı bilimi ve teknolojisi yeni bir ilerlemenin eşiğindedir [16]. Bu ilerleme yüksek ve çok yüksek hızlı elektromanyetik fırlatıcılardaki yeni gelişmelere paralel olarak, gelişmiş elektromanyetik silah sistemleri için önemli bir adım olmuştur. Elektromanyetik fırlatıcıların kullanıldığı elektromanyetik silah sistemleri, uçak gemilerinden uçakların kaldırılması (fırlatılması), güdümlü silah sistemlerine karşı koruma sağlanması, mermilerin olağanüstü menzillerde fırlatılması, askeri araçlara uygulanabilen elektromanyetik zırh koruma sistemlerin geliştirilmesi, denizaltı ve gemilerden torpido fırlatılması, zırh delme yolu ile zırhlı sistemlerin bozguna uğratılması v.b. birçok uygulama alanına sahiptir. Bu bağlamda Elektromanyetik Fırlatıcı teknolojileri geleneksel silah ve füze sistemlerine karşı esas tehlike ve önemli bir rakip olarak



gösterilmektedir. Şekil 1.25.'de elektromanyetik fırlatıcıların kullanıldığı sistemler gösterilmektedir.



(a)



(b)

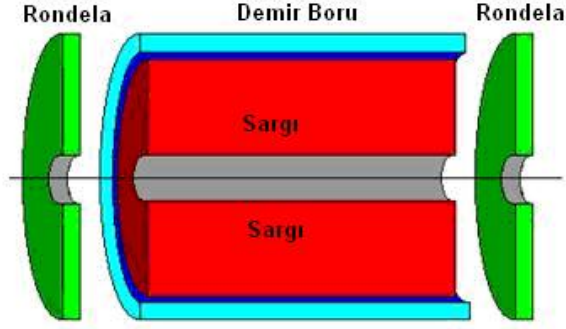
Şekil 1.25. a) Elektromanyetik fırlatıcı yerleştirilmiş askeri savaş aracı  
b) Elektromanyetik fırlatıcı kullanılan uçak fırlatma sistemi

Askeri açıdan sargılı fırlatıcılar geleceğin teknolojisi olabilir ancak raylı fırlatıcılar kinetik enerji fırlatma sistemlerinin öncelikli araştırma konusu durumundadır.

#### 1.14. Sargılı Elektromanyetik Fırlatıcılara Rondelâ ve Boru Ekleme

Sargılı fırlatıcıların çalışmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri; manyetik devredeki relüktanstır. Bu fırlatıcı tipinde mermiyi hareket ettiren güç, manyetik akıdır. Bu akı çok kısa sürelidir. Bu nedenle elektrik devrelerinde akıma karşı koyucu güç olarak tanımlanabilecek direncin manyetik devredeki karşılığı olan relüktans birçok noktada minimize edilmelidir. Bu maksatla bobin çevresine manyetik geçirgenliği yüksek malzemeler yerleştirilmelidir.

Sargının çevresindeki akı geri dönüş yoluna demir eklemek, toplam manyetik akıyı artırır. Ayrıca demir, akının namluya doğru gitmesini sağlar. Dış demir eklemek ucuz olduğu kadar kolaydır da. Sadece iki uca düz rondelâ eklemek ve sargıyı bir demir boru ile çevrelemek yeterlidir. Şekil 1.26.'da bir kesit görüntü verilmiştir. Burada amaç ısı kaybını önlemek olmayıp manyetik kayıpları azaltmaktır. Zira fırlatıcının ısınmasının söz konusu olduğu durumlarda böyle bir muhafazanın varlığı istenmez.

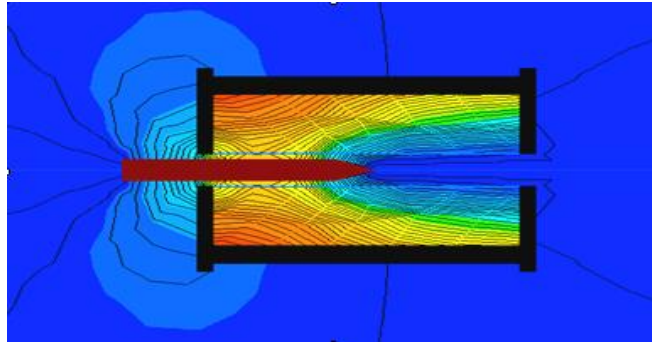


Şekil 1.26. Sargıya boru ve rondela ekleme

#### 1.14.1. Manyetik Alan Çizgileri

Şekil 1.27.'de benzetim yapılmış manyetik akı diyagramı verilmiştir. Şekil 1.27. incelendiğinde dış alanın oldukça zayıf olduğu görülür. Çünkü manyetik akının büyük kısmını demir boru ve rondelâlar taşımaktadır.

Şekil 1.27.'de bu demir tarafından sarılmış bir sargının kesit görünüşüdür. Ortadaki koyu renkli kısım mermidir. Dıştaki koyu hatlar ise demir aksamı göstermektedir. Merminin uç kısımları incelendiğinde mekanik gerilme görülecektir ki hareketi sağlayan da bu gerilmedir.



Şekil 1.27. Manyetik akı

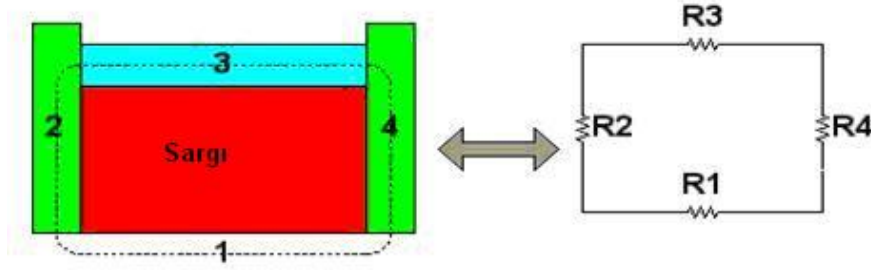
Rondelâlar sargının sağ ve sol uçlarındaki siyah kısımlardır. Rondelâların boruya olabildiğince sıkı temas etmeleri gerekmektedir. Çünkü burada en büyük kayıp hava boşluğundadır.

### 1.14.2. Boru ve Rondelâda Relüktans Hesaplama

Sargı çevresine yerleştirilen boru ve rondelâlar bir manyetik devre olarak modellenebilir. Manyetik devre elektrik devresine oldukça benzer. Direncin eşdeğeri relüktans, akımın eşdeğeri akı, voltajın eşdeğeri mmk (manyeto motor kuvvet) olarak ifade edilebilir.

Elektrik devreler için akım = voltaj / direnç

Manyetik devreler için akı = mmk / relüktans dır.



Şekil 1.28. Rondela ve sargı eklenmiş eşdeğer devre

$$R_{top} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1.40)$$

Toplam manyetik enerji relüktanslarıyla orantılı olarak demir ile boşluk arasında bölünür. Havanın boşluğu nispeten küçük olmasına rağmen, demirin manyetik iletkenliği havadan çok daha iyi olduğu için, manyetik enerjinin büyük bölümü hava boşluğunda harcanır.

Manyetik yolun relüktansı;

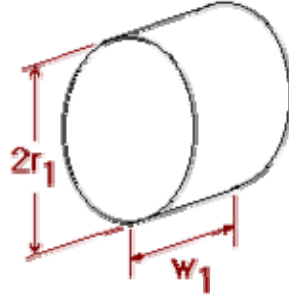
- Yolun uzunluğu arttıkça,
- Kesit küçüldükçe,
- Yoldaki malzemenin relüktivitesi yükseldikçe

yükselir. Bu sebeple R (relüktansı) şöyle tanımlayabiliriz:

$$R = \frac{\text{yol uzunluğu}}{\text{kesit alanı} \times \text{geçirgenlik}} \quad (1.41)$$

Bu formül, bütün manyetik yolun ortalama toplam relüktansını hesaplamak için kullanılabilir. Fiziki boyutları temsil etmek üzere çeşitli isimler kullanacaktır ve sonunda gerçek ölçülebilir boyutlar ile ilgili eşitlikler bulunacaktır. Böylece bu toplam beklenen akı ile demirin gerekli kalınlığını hesaplanabilir ve sınır performans faktörlerinin ne olduğu belirlenebilir.

#### *Hava Kesiti Relüktansının Hesaplanması ( $R_1$ )*



Şekil 1.29. Bir hava silindiri

$$R_1 = \frac{\text{yol uzunluğu}}{\text{kesit alanı}} \times \frac{1}{\mu_0} \quad (1.42)$$

Bir hava silindiri için,  $r_1$  sargının yarıçapı,  $w_1$  sargının genişliği olsun. Bu değerler ortalama değerlerdir ve aslında akı sargının fiziksel genişliğinden daha uzun bir yol izlemektedir. Dairenin kesitinin alanı  $\pi r^2$  dir. Havanın görelî geçirgenliği 1'dir ve böylece kesim geçirgenlik sadece  $\mu_0$  dir. Eğer bu isimleri eşitlikte yerlerine yazarsak relüktansın son ifadesi;

$$R_1 = \frac{w_1}{\pi r_1^2} \times \frac{1}{\mu_0} \quad (1.43)$$

*Düz Rondelanın Relüktansının Hesabı ( $R_2, R_4$ )*

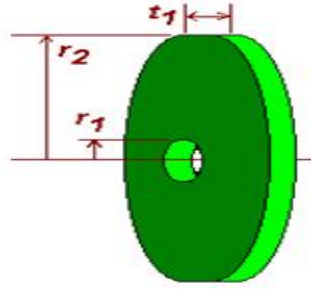
Bu şekil ile hesaplama biraz daha güçtür. Akı dış tarafı boyunca girer ve merkeze doğru radyal olarak ilerler. Sonuçta küçük taraf (rondelânın içine açılan) boyunca çıkar. Rondelanın iç yarıçapını hava kesiti ile aynı isimlendirilecektir. İç yarıçapı  $r_1$ , dış yarıçapı  $r_2$ , rolendanın kalınlığı ise  $t_1$  dir. Dış kenarındaki kesit oldukça geniştir ve dış kenar bobinin tüm kesit alanıdır.

$$A_2 = 2\pi r_2 t_1 \quad (1.44)$$

Kesit alanı akım dalgaları rolendanın içine doğru gittikçe yavaş yavaş azalır. İç delikte alan daha azdır.

$$A_1 = 2\pi r_1 t_1 \quad (1.45)$$

Rondelâ çevresindeki net relüktansın hesaplanması için, sonsuz küçük çemberlerin relüktansları ayrı ayrı toplanmalıdır. Bu arada çemberler yavaş yavaş küçülür. İşte relüktansı bu birbiri içerisine yerleştirilmiş sonsuz incelikte ve sayıdaki çemberin toplamıdır.



Şekil 1.30. Rondela

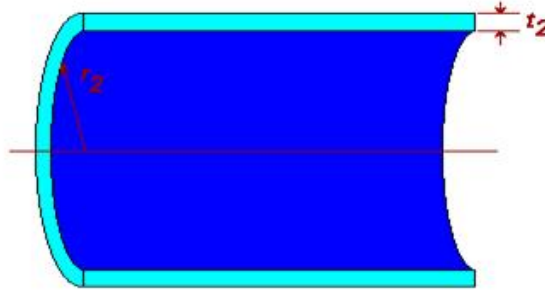
$$\begin{aligned} R_2 &= \int_{r=r_1}^{r_2} \left( \frac{\text{boy}}{\text{alan}} \times \frac{1}{\mu} \right) dr = \int_{r=r_1}^{r_2} \left( \frac{1}{2\pi r t_1} \times \frac{1}{\mu} \right) dr \\ &= \frac{1}{2\pi t_1 \mu} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr = \frac{1}{2\pi t_1 \mu} [\ln r_2 - \ln r_1] \end{aligned} \quad (1.46)$$

Bu formülden görüldüğü gibi, relüktans, rondelânın kalınlığıyla ters orantılıdır, yani rondelanın iç çapı küçüldükçe relüktans artar. İç dairenin çapı sıfıra yaklaştıkça büyüyen relüktans, rondelânın dış yüzeyindeki kaçak akının yanında ihmal edilebilir büyüklüktedir. Sonuç olarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$R_2 = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi t_1 \mu} \quad (1.47)$$

### Boru Relüktansının Hesabı ( $R_3$ )

Borunun kesit alanı, dış tarafın etrafındaki kalın halka biçiminde şekillenmiş katmandır. Borunun iç yarıçapı  $r_2$ , dış yarıçapı ise  $r_2 + t_2$  dir. Böylece alanı, dıştaki daire ile içteki dairenin farkı olarak ifade edilebiliriz.



Şekil 1.31. Boru yan kesiti

$$\begin{aligned} A &= \pi (r_2 + t_2)^2 - \pi r_2^2 = \pi (r_2^2 + 2r_2 t_2 + t_2^2 - r_2^2) \\ &= \pi t_2 (2r_2 + t_2) \end{aligned} \quad (1.48)$$

Kesit alan belirlenmiştir ve borunun relüktansını genel tanımdan hesaplayabiliriz.

$$R_3 = \frac{w_1}{\pi \mu t_2 (2r_2 + t_2)} \quad (1.49)$$

Toplam relüktansı yukarıdaki kısımları toplayarak bulabiliriz.

$$R_{toplama} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_{toplama} = \left[ \frac{w_1}{\pi r_1^2} \times \frac{1}{\mu_0} \right] + 2 \left[ \frac{\ln(r_2/r_1)}{t_1 \mu_1} \times \frac{1}{\mu_0} \right] + \left[ \frac{w_1}{\pi \mu_1 t_2 (2r_2 + t_2)} \times \frac{1}{\mu_0} \right]$$

$$R_{toplama} = \frac{1}{\pi \mu_0} \left[ \frac{w_1}{2\pi r_1^2} + \frac{2 \ln(r_2/r_1)}{t_1 \mu_1} + \frac{w_1}{t_2 \mu_1 (2r_2 + t_2)} \right] \quad (1.50)$$

Hava          Rondela          Boru

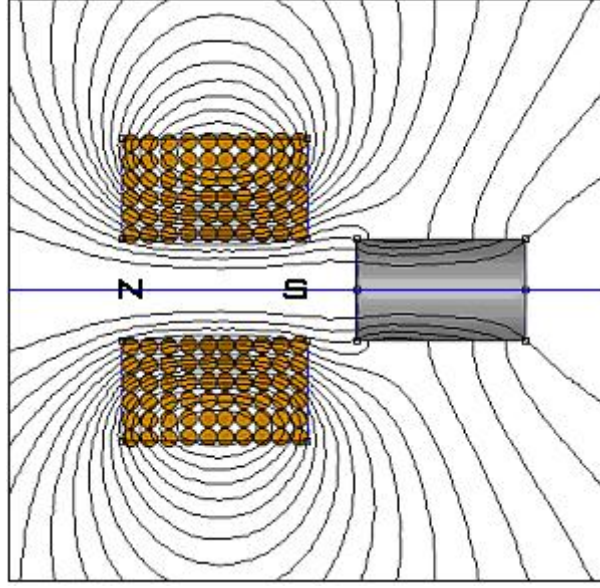
Sargılı fırlatıcılara rondela ve boru eklenirken dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Hava boşluğu, dolayısı ile manyetik relüktans olabildiğince azaltılmalıdır.
- Sargı öyle bir indüktansa sahip olmalıdır ki, mermi sargı içinde olduğu sürece enerji olmalı, ancak sargı terk edilirken manyetik alan ortadan kalkmalıdır.
- Hava boşluğunu en aza indirmek için namlu et kalınlığı olabildiğince az olmalıdır.
- Manyetik kaybı azaltmak için kullanılan boru ve rondelanın paketlenmiş ve manyetik geçirgenliği yüksek (biri yüzü yalıtkan) saç levhalardan olması son derece faydalıdır.

## 1.15. Elektromanyetik Fırlatıcıların Temel İlkeleri

### 1.15.1. Sargılı İvmelendirici

Sargılı fırlatıcılar iki kısımdan oluşmaktadır; sargı ve mermi (çekirdek). Kısa bir demir veya çelik çubuk sargının yanına yerleştirilsin. Sargıdan akım geçtiği anda çubuk sargının içine çekilecektir. Bu çekmenin oluşma sebebi sargının iki ayrı kutup oluşturacak şekilde çubuğu mıknatıslamasıdır. Çubuk sargıniki ile aynı mıknatıslanmaya maruz kalır. Böylece çubuğun bobine bakan tarafı zıt kuptu görür. Bobinin hangi ucuna yerleştirildiğine bakılmaksızın çekme meydana gelecektir. Çünkü sargı çubuğu, kendi manyetik alanı ile aynı yönde kutuplayacaktır. Eğer çubuk daimi bir mıknatıs olursa durum biraz daha farklı olacaktır. Çünkü akımın yönü ve çubuğun yönlendirilmesi çubuğu ya itecek ya da çekecektir. Bunun daha detaylı bir şekli birbirine yakın durumdaki bir sargı ile bir çubuk Şekil 1.32’de gösterilmektedir.



Şekil 1.32. Birbirine yakın durumdaki bir sargı ile bir çubuk

Sargının mermiyi çekme kuvveti değerinin hesaplanması neredeyse imkânsızdır. Yapılması gereken şey bobinin her eleman parçası için belirlenen kuvvet değerlerinin toplanması yani bir integral alma işlemidir. Bu analitik matematik kullanmanın mümkün olmadığı akı dağılımının bir kestirimini gerektirecektir. Bu da bizim FEMM ve Quickfield gibi sayısal alan çözüm programlarına götürecektir. Bunun sonucunda statik bir manyetik sistemi kuvvetleri ve akı dağılımı hatasız bir şekilde hesaplanabilir [17].

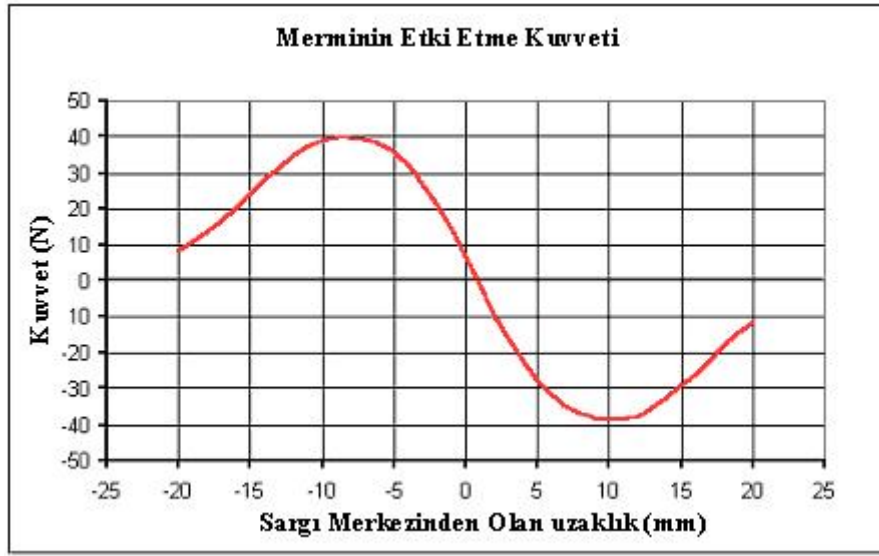
Görüldüğü gibi maalesef olaylar bu kadar basit değildir. Statik bir durumun çözülmesi, indüklenen gerilim ve akım gibi elektromanyetik prensibinin önemli kısımlarını görmezden gelir.

Mermi sargının içinde hızlanırken, kaynak gerilimine zıt yönde bir gerilim, akı çizgilerini azaltır. Bu durum sargı akımını ve manyetik alanı azaltmaya çalışır. Pratikte manyeto statik çözümler dinamik performansın iyi bir göstergesi olmayabilir. Bunun bir istisnası merminin yavaş hareket etmesi durumunda indüklenen gerilimin kaynak gerilimi yanında ihmal edilebilir olmasıdır. Bu yaklaşımda, akım az derecede etkilenmektedir. Bunun anlamı bir seri manyeto statik benzetim, uç hızını belirlemede etkin bir kestirim üretebilir.



### 1.15.2. Sonlu Eleman Kuvveti Benzetimi

Sargılı fırlatıcılarda en iyi sonucu elde etmenin yolu kuvvetin sargı içinde mermi hareketi ile değişimini anlamaktır. Şekil 1.33.'deki grafik,  $20\text{mm}\times 10\text{mm}$  boyundaki yuvarlak burunlu bir mermi üzerinde tipik kuvvet değişiminin göstermektedir. Kuvvet eğrileri neredeyse simetriktir. Fakat merminin simetrisi orta noktanın hemen önünde kuvvetin sıfıra düştüğü manasına gelmektedir.



Şekil 1.33. Sargının merkezinden olan uzaklığa bağlı olarak kuvvetin değişimi

$50\text{Amm}^2$  sabit akım yoğunluğu ve düz bir şekilde yerleştirilmiş namlu içindeki mermi ile yapılan 21 simülasyonluk bir seri işlem sonucunda kuvvet eğrisi çizilmiştir [17]. Sargı ve mermi geometrilerindeki farklılıklardan dolayı tam şekildeki değişim elde edilememesine rağmen kuvvet-yer değiştirme eğrisinin genel şekli böyledir. Bir seri manyeto statik benzetiminden elde edilen bu eğri elbette bir sadeleştirmedir. Çünkü sargının içindeki indüklenmiş gerilim, akımı etkileyecektir.

Burada önemli olan şey; bu eğrinin, sargının içinde yarı yolda meydana gelen maksimum kuvveti aşağı yukarı veriyor olmasıdır. Şu bilinmelidir ki mermi orta noktayı geçerken kuvvetin eğimi hayli diktir. Burada akım darbesinin tamamen söndürülmesi önerilir. Aksi taktirde mermi bizim kaçınmamız gereken şekilde ters yönde bir ivmeye maruz kalacaktır.

Bir selenoidin mermisi üzerine uyguladığı kuvveti tanımlayan bağıntı şudur.

$$F = \frac{1}{2} NI \frac{d\phi}{dx} \quad (1.51)$$

Burada

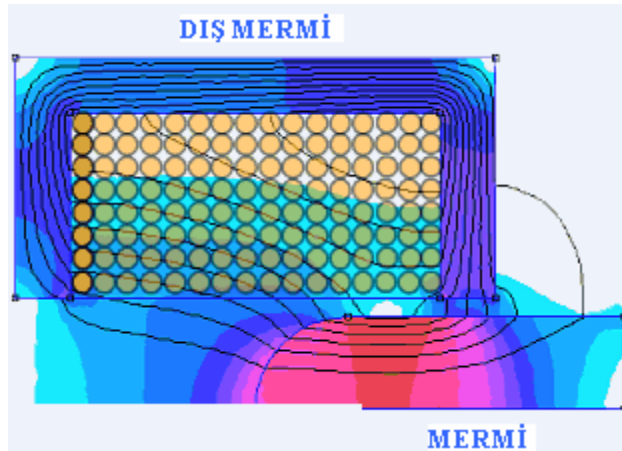
$N$  : Sarım sayısı

$I$  : Akım

$\frac{d\phi}{dx}$  : Mermi yer değiştirmesi ile akı çizgilerinin değişim oranı

$N$  ve  $I$  bellidir. Ancak akı çizgilerinin belirlenmesi biraz zordur. Çünkü akı çizgileri sargının ve merminin geometrisine bağlıdır. Belki de bu formülü kullanmaktan kaçınmanın en iyi yolu kuvvetin artırılmasıdır. Bunu yapmak için de ya sarım sayısı artırılmalı ya akım artırılmalı ya da akı çizgilerinin değişimi artırılmalıdır.

Yukarıdaki (1.51) nolu denklem eşitliğinden de anlaşılacağı gibi mermi kuvvetini etkileyecek parametrelerden biri de akı çizgileridir. Verilen bir akım için akı çizgilerinin artırılması mermi üzerine etkiyen kuvveti artıracaktır. Akı çizgileri iki şekilde artırılabilir; yüksek doyumlu akı yoğunluğuna sahip bir mermi kullanılarak (demir-kobalt gibi) ya da sargı etrafında harici akı yolu ekleyerek bu gerçekleştirilebilir.



Şekil 1.34. Bobine bir akı yolu eklenmesi durumunda akı çizgileri

Artan akı çizgileri devrenin zaman sabitini artıran bir endüktans artışına neden olacaktır. Bunun için yapılacak düzenleme benzer dinamik ve tepe akımının elde edilebilmesi için devreyi daha yüksek gerilim ve harici bir dirençle beslemektir.

### 1.15.3. Çekirdek (Kütle) Doyması

Doymanın etkileri tartışılmadan önce doymanın ne anlama geldiğini açıklamaya ihtiyaç vardır. Basit şekilde, doyma maksimum mıknatıslanmaya ulaşma şeklinde ifade edilebilir. Mıknatıslanma ise bir diğeriyle aynı hizaya dizilmiş birçok mikroskobik atomik iki kutuplular olarak düşünülebilir. Eğer bir dış alan uygulanırsa bu dipoller bu alanla birlikte düzgün bir şekilde yönlendirilir. Daha güçlü bir dış alan uygulanırsa daha fazla dipol hızlanır.

Dipollerin tümü hızlanınca doymaya gittiği söylenebilir. Şimdi sorulacak soru ise sargı ile mermi arasındaki çekme kuvvetinin sebebi nedir?’ olacaktır. Sonuçta kuvvet yük hareketinden doğmaktadır. Sargının içinde bir yük hareketi mevcuttur. Elektromanyetizma konusunda herhangi bir kitap açıldığında iki paralel sonsuz uzunlukta akım taşıyan teller arasındaki kuvvet ifadesi bulunabilir. Eğer tellerden akan akım aynı yönlü (paralel ) ise teller arasında kuvvet çekme eğiliminde olacaktır. Eğer akımlar zıt yönlü (paralel değil) ise itme eğiliminde olacaktır.

Bu sargıların arasındaki kuvvet onların çapına, kendi çaplarına, dağılımlarına ve yerleştirildikleri ortama bağlıdır (örneğin serbest uzay). Burada ilgilenecek konu akımın artması ile sargıları etkileyecek kuvvetin artacağıdır. Şimdi bir sargı ve bir mermi düşünölsün, sargıların her biri aynı akımı taşımaktadır. Mermi ise birçok küçük akım sargısından oluşmaktadır (orbital elektron). Normalde mıknatıslanmış bir ferromanyetik malzemede akım sargıları domenler olarak adlandırılan küçük gruplara ayrılmış şekilde organize olmuşlardır. Bu domenler makroskopik boyutta öyle rasgele yönlendirilmiştir ki malzeme hiç mıknatıslanma sergilemez. Harici bir alan uygulandığında domenler halindeki halkalara, onları alanla hizalayacak şekilde moment uygulanır. Bunun anlamı; alanla birlikte daha iyi hizalanan domenler, daha az hizalanan domenlerin zayıflatmasına maruz kalır. Daha iyi hizalanmış domenler, etraflarındaki daha az hizalanmış olanların halkalarını ele geçirir. Daha güçlü harici alan, daha fazla tamamen hizalanmış halka demektir.

Sargı alanı artırıldığında çok daha fazla halka hizalanacaktır. Bu olay bir yere kadar devam eder. Sonunda tüm halkalar hizalanmış olur yani malzeme doymaya gider. Harici bir alan dipollerin hizalanmasına ve bir çekim kuvvetinin gelişmesine neden olur. Merminin doyması sonuçta bir sınırlamadır. Bunun yanında çekme kuvvetinde sınırlama yoktur. Ancak doymuş bir mermi ile fırlatıcının çalıştırılması verimi düşürür.

Mıknatısın kutup kavramı kullanılarak bunun üzerinde düşünmenin başka bir yolu daha vardır. Mermi, kendisinin doyma mıknatıslanması tarafından belirlenen maksimum kutup şiddetlerine sahip büyük bir dipol olarak düşünülebilir. Bir manyetik kutup bir manyetik alana yerleştirildiğinde kuvvete maruz kalır. Buradaki mermi ise birbirine zıt iki kutup içermektedir. Eğer bir manyetik alana yerleştirilirse her kutup etrafındaki alan şiddetine bağlı olarak bir kuvvete maruz kalacaktır. Kuvvetin yönü ise kutupların işaretine bağlı olarak (+ kuzey/ - güney) değişir. Kutbun işareti kuvvetin yönünü belirleyeceğinden merminin ön kısmı sargı merkezine çekilecektir ve merminin sonu da sargının dışına itilecektir. Gerçekte bu böyle olmazken kutupların kullanımı geçerli bir yaklaşımdır.

Önemli olan nokta şudur; alan bobinin merkezinde daha güçlüdür bu yüzden merminin ön kutbuna uygulanan çekme kuvveti, arka kısmına uygulanan itme kuvvetinden daha güçlüdür. Bu da net bir çekme kuvveti sağlayacaktır. Burada doymuş bir mermi maksimum şiddete sahip bir dipol olarak düşünülebilir. Ancak sargı akımı hala artırılabilir ve bununla birlikte çekme kuvveti artırılabilir. Alan değişimi (eğimi) artırıldıkça daha büyük bir kuvvete neden olacaktır. Kutuplardaki kuvvetler matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$F = \mu_0 P H \quad (1.52)$$

Burada “ $P$ ” kutup alan şiddetidir. Mermi zıt yönde iki farklı alan şiddetine sahip olduğuna göre denklem (1.52) yazılabilir. Eğer kutupların eşit genliğe sahip oldukları düşünülürse

$$F = \mu_0 P (H_1 - H_2) \quad (1.53)$$

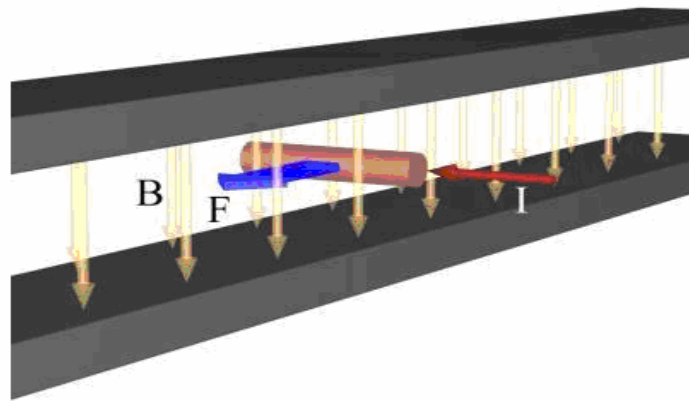
elde edilir.

Akıldan çıkarılmaması gereken bir noktada şudur; malzemeler doyma akı yoğunluğu değeri ile sık sık belirtilmesine rağmen bu akı yoğunluğunun bu değerle sınırlandırıldığı anlamına gelmez. Doymuş bir malzemenin etrafındaki alan artırıldığında boşluğunkine eşit bir  $dB/dH$  ile artmaya devam edecektir. Bunun sonucunda denilebilir ki malzeme tamamen boşluk olmuştur. Boşluk “ $\mu_r = 1$ ” bağıl geçirgenliği ile akı oluşturmaya devam etmektedir. Bu sonlu eleman analizinde B-H eğrilerinin kullanılmasında oldukça önemlidir. Çünkü malzemenin doyma noktasının arkasında olabilecek çok büyük alan değerleri için doğru  $dB/dH$  kullanılmalıdır.

Özetle doymanın basit açıklamasından ve çekme kuvvetinin nedenlerinin altının çizilmesinden görülebilir ki; doymuş bir mermi kullanılsa da bobin silahının mermi hızı artırılabilir. Buradaki problem ise; mermi doyuma gittiğinde kuvvet alanla (ya da akımla) orantılı olmasına rağmen, akımın karesi ile artan bir alan oluşturulabilmesi için daha fazla enerji gerekebilir. Kuvveti ikiye katlamak için bobine verilen enerjinin 4 katına çıkması gereklidir.

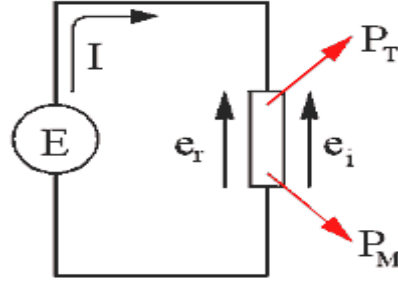
### 1.16. Elektromekanik Enerji Dönüşümü

Elektromekanik enerji dönüşümündeki çekirdek prensipleri tüm elektrik makinelerine uygulanmaktadır ve sargılı fırlatıcılar da bir istisna değildir. Sargılı fırlatıcılara değinmeden önce bir stator alanı ve bu alana maruz kalan bir armatürü olan basit bir lineer elektrik motorunun incelenmesinde fayda olacaktır. Bu şekil 1.35.’de gösterilmektedir. Yalnız bu analizde gerilim kaynağı ve armatür devresinde indüktans bulunmamaktadır. Bu şu anlama gelmektedir; sistemde armatür’ün hareketinden dolayı indüklenen gerilim manyetik endüksiyon ile ilişkilidir.



Şekil 1.35. İlkel bir lineer motor

Armatür uçlarına bir gerilim uygulandığında onun direncine bağlı olarak bir akım meydana gelecektir. Bu akım ' $I \times B$ ' ile verilen kuvvete bağlı olarak armatürü hızlandıracaktır. Bir manyetik alanda hareket eden iletken boyunca bir gerilim endüklenir. Bu endüklenen gerilim uygulanan gerilime ters yönde bir gerilim oluşturur (Lenz Yasası). Şekil 1.36.'da elektriksel gücün termal ve mekanik güce dönüşümünü göstermektedir.



Şekil 1.36. Motor eşdeğer devresi

Üzerine uygulanan gerilimle armatürün nasıl mekanik güç meydana getirdiğine bakılacak olursa; Armatürün indüksiyon alanına doğru bir açı ile yerleştirilmesi durumunda, kuvvet aşağıdaki basitleştirilmiş formül ile ifade edilir.

$$F = B \cdot i \cdot l \quad (1.54)$$

Ani mekanik güç kuvvet ve hızın çarpımıdır.

$$p_M = B \cdot i \cdot l \cdot v \quad (1.55)$$

Burada ' $v$ ' armatür hızıdır. Devreden;

$$E = e_r + e_i = iR + e_i$$

$$i = \frac{E - e_i}{R} \quad (1.56)$$

İndüklenmiş gerilim armatürün hızının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$e_i = Blv \quad (1.57)$$

(1.57) denklemi, (1.56) denkleminde yerine yazarsak

$$i = \frac{E - Blv}{R} \quad (1.58)$$

ve (1.58) denklemi, (1.55) eşitliğinde yerine yazılırsa

$$P_M = \frac{Blv(E - Blv)}{R} \quad (1.59)$$

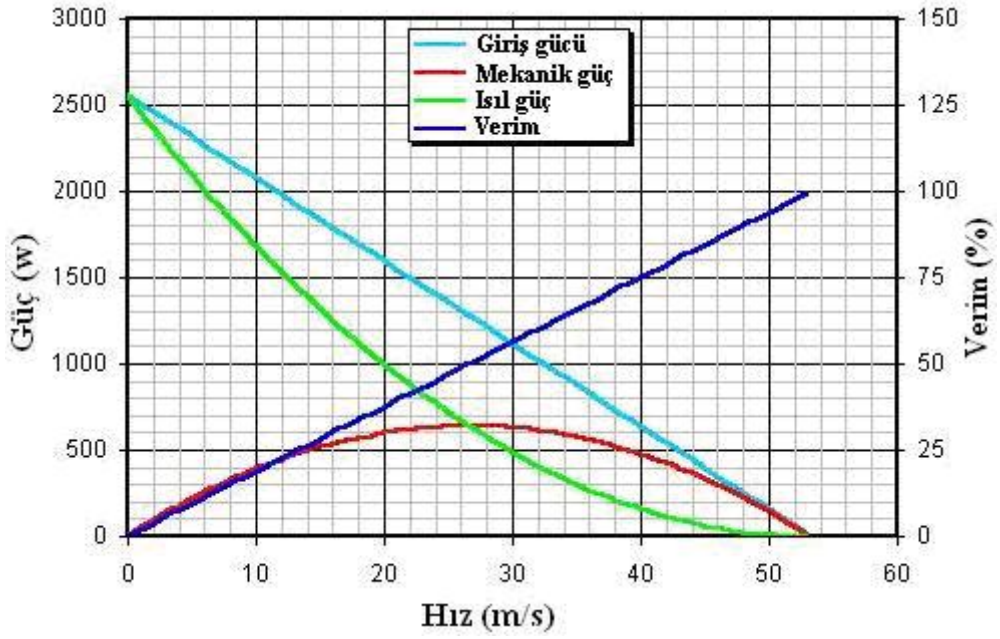
elde edilir.

Armatürü besleyen güçte son olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_s = iE = \frac{E(E - Blv)}{R} \quad (1.60)$$

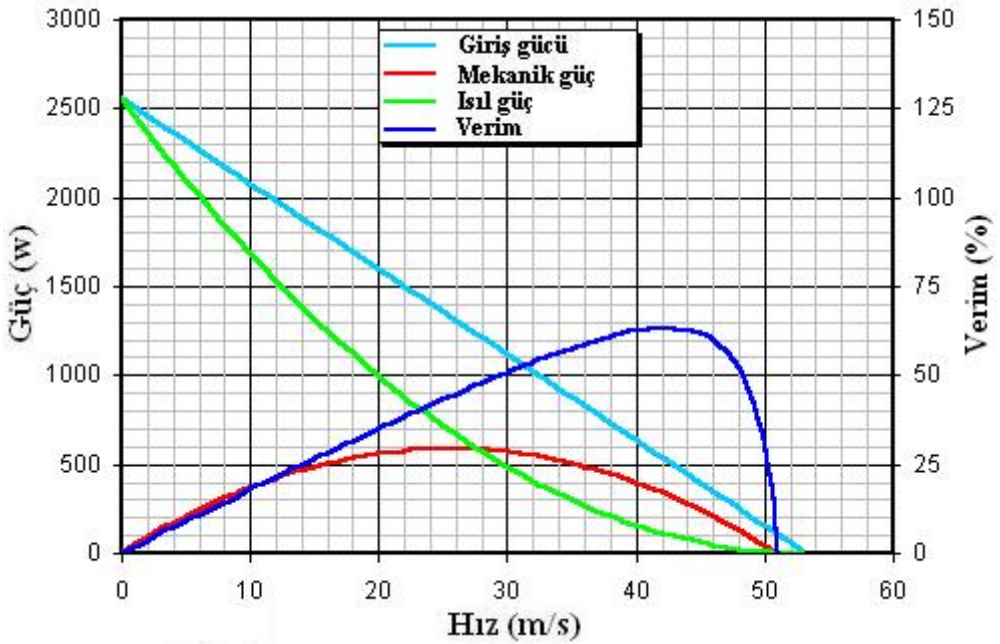
Armatüre uygulanan gücün dağılımının hıza göre değişimini gösteren eğriler çizilebilir. Bu analizin bobin silahı üzerindeki davranışını açıklayabilmek amacıyla elde olan bazı değişkenlerin değerleri üzerinden düşünelim. Başlangıç noktamız teldeki akım yoğunluğu olsun; buradan diğer parametreler için değerleri belirleyebiliriz. Maksimum akım yoğunluğu  $90 \text{ A/mm}^2$  dir. Tel çapı ve uzunluğunu sabit olarak kabul edersek ( $L=10\text{m}$ ,  $D=1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ) tel direnci ve akım  $R=0.1\Omega$ ,  $I=160\text{A}$  olur.

Direnç değeri ve akım bilindiğine göre, akımı sürmek için gerekli gerilim  $V= 16\text{V}$  olarak bulunabilir. Tüm bunlar motorun sürekli durum karakteristiklerini çizmek için gerekli parametrelerdir.



Şekil 1.37. Sürtünmesiz motor modelinin karakteristik eğrisi [17].

Bu modeli daha gerçekçi hale getire bilmek için örneğin 2 N luk sabit sürtünme kuvveti eklenebilir. Aslında mekanik güç kaybı armatür'ün hızıyla doğru orantılıdır. Bu sürtünme değeri etkinin açık bir şekilde görülebilmesi için oldukça büyük seçilmiştir. Eğri Şekil 1.38.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.38. Sabit sürtünme durumunda karakteristik eğriler [17].

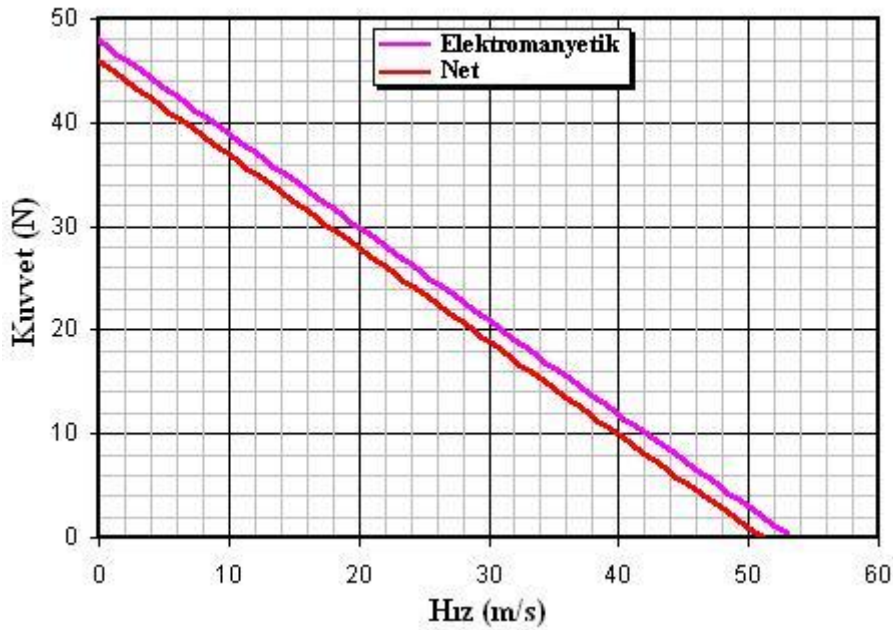


Sürtünmenin varlığı güç eğrilerini biraz değiştirmiştir. Böylece maksimum armatür hızı, sıfır sürtünme durumuna göre biraz daha küçüktür. En büyük fark verim eğrisinde görülmektedir; eğri önce bir artışı sonrada armatür yüksüz hızına ulaştığından hızlı bir düşüşü göstermektedir. Verim eğrisinin bu şekli tipik bir sürekli mıknatıslı DC motor eğrisidir.

Kuvvetin ve dolayısıyla ivmenin; hızla nasıl değiştiğine bakmakta fayda olacaktır. Eğer (1.58) denklemi, (1.54) eşitliğinde yerine yazılırsa  $F$  'nin  $v$  'ye bağlı bir ifadesi elde edilecektir.

$$F = Bl \left( \frac{E - Blv}{R} \right) \quad (1.61)$$

Bu ifade çizilirse Şekil 1.39.'daki grafik elde edilir.



Şekil 1.39. Armatür kuvvetinin hıza bağlı değişimi [17].

Buradan anlaşılıyor ki armatür maksimum bir ivmelenme kuvveti ile harekete başlar. Bu kuvvet armatürün harekete başlamasının hemen ardından düşmeye başlar.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA**

### **2.1. Yapılan Çalışmanın Amacı**

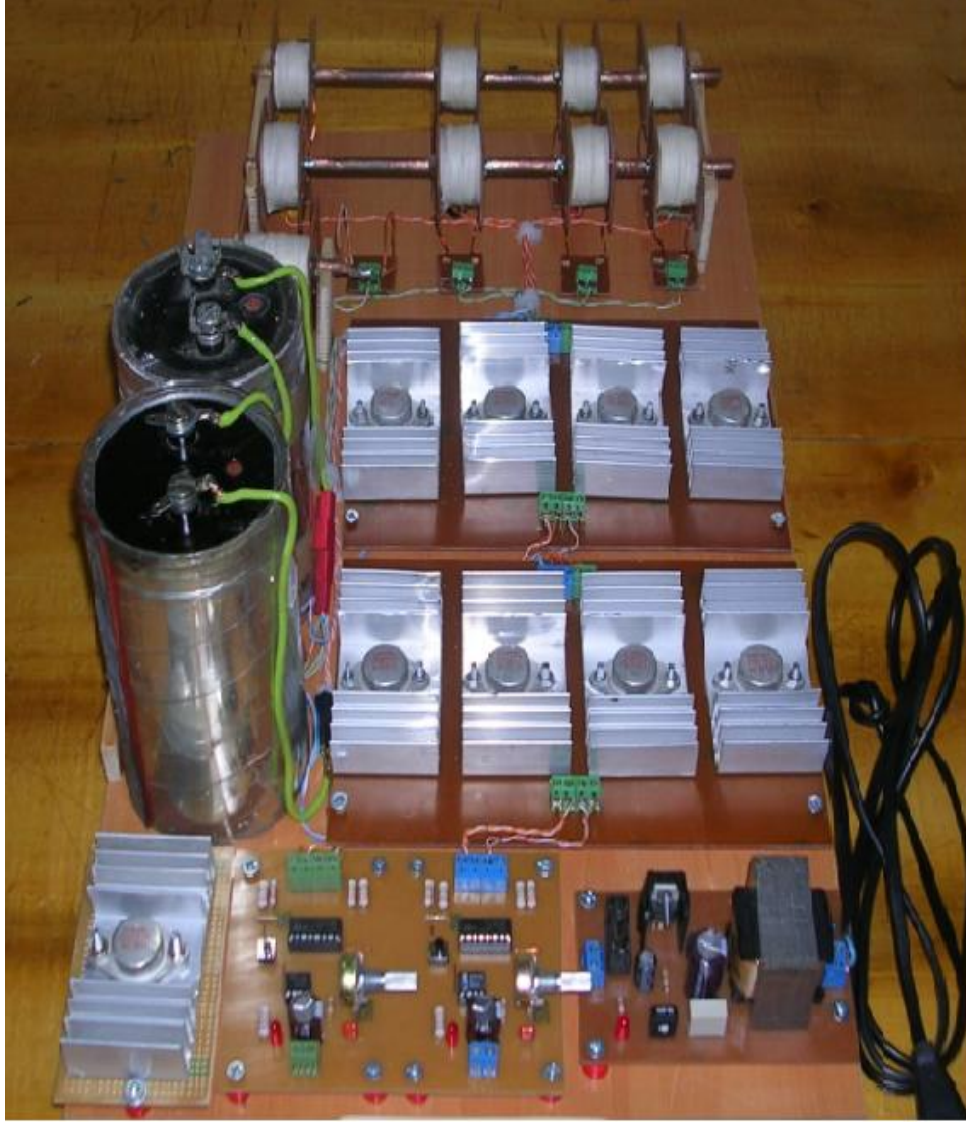
Birçok başarılı uygulamasını iletişim alanında gördüğümüz ve uygulamaları sadece bir asırlık geçmişe sahip olan elektromanyetik alanlar, yeni bir uygulama alanı ile karşımıza çıkmaktadır. Varlıkları milattan önceki çağlarda fark edilen elektrik ve manyetik alanlar, teknolojinin de yeterli olgunluğa ulaşması ile birlikte elektromanyetik fırlatıcılar çağımızda önem kazanan bir konudur. Günümüzde elektromanyetik fırlatıcıların uygulama alanları, tekstil sanayisinde mekik hareketi, zıpkın uygulamalarında, yakın mesafede kütle atışlarında, uçak gemilerinde vb gibi birçok uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Çalışmamızda elektromanyetik fırlatıcı ile herhangi bir mekanik itici kullanmadan sargının oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle, cismin fırlatılmasını gerçekleştirmektir. Bu amaçla tasarlanacak olan uygun bir kontrol devresi ile elektromanyetik fırlatıcı cisminin yatay (doğrusal) olarak fırlatması sağlanmaktadır.

Çalışmamızda bir elektromanyetik fırlatıcı tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken hususlar incelenmiş, hem teorik hem de pratik olarak izlenmesi gereken yollar belirtilmiştir. Pratik olarak, teorideki en ideal durumlara ulaşmak mümkün olmadığından fırlatıcının verimi teorideki kadar yüksek olmaya bilir. Diğer taraftan uygulamasını gerçekleştirdiğimiz fırlatıcının daha yüksek verimlere nasıl çıkarılabileceği bu çalışmada anlatılmıştır.

### **2.2. Gerçekleştirilmiş Devre Modeli**

Yapılan çalışmada gerçekleştirilen elektromanyetik fırlatıcı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Gerçekleştirilen elektromanyetik fırlatıcı devresi

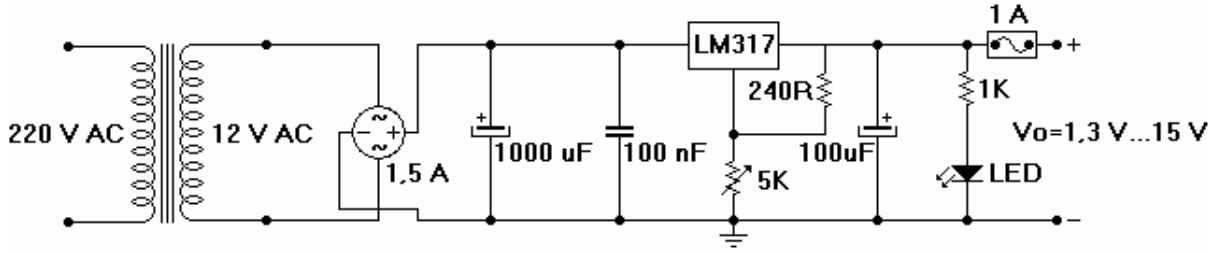
Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi gerçekleştirdiğimiz elektromanyetik fırlatıcı 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

- Anahtarlama Devresini Besleyen Güç Kaynağı
- Anahtarlama Devresi
- Güç Katı
- İvmelendirici Sargılar

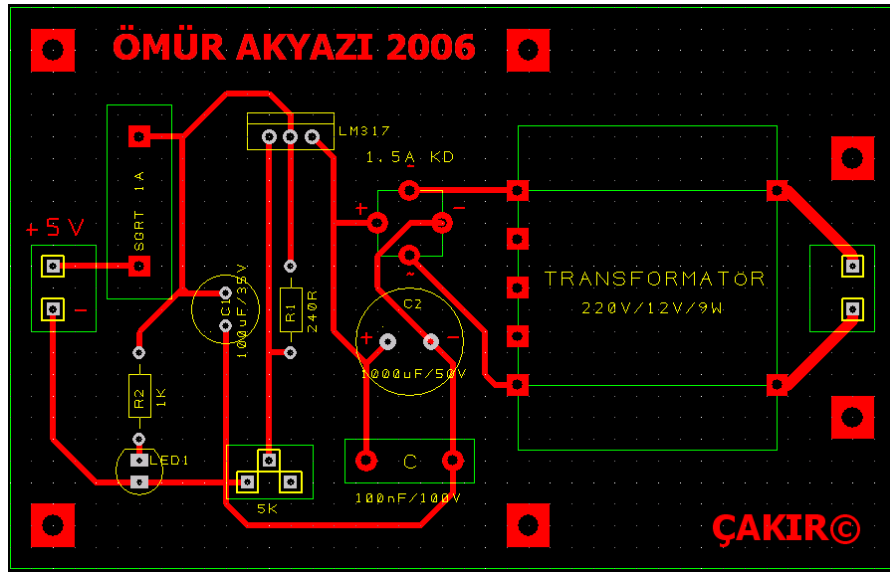
dır. Şimdi bunları sıra ile açıklayalım.

### 2.2.1. Anahtarlama Devresini Besleyen Güç Kaynağı

Güç kaynağının devre şeması Şekil 2.2.'de ve baskı devre şeması Şekil 2.3.'de görülmektedir. Devrenin giriş gerilimi 220V AC'dir. 220V şebeke gerilimi 9W'lık bir transformatörle 12V AC'ye indirilmekte ve AC çıkış gerilimi 1,5A'lık bir köprü diyotla DC'ye dönüştürülmektedir. Köprü diyot çıkışındaki 1000 $\mu$ F'lık kapasite DC işaretteki dalgalanmaları azaltmak için koyulmuştur. Kapasite çıkışındaki DC işaret LM317 doğru akım gerilim düzenleyicisi ve çevre elemanları (240 $\Omega$ , 5k $\Omega$  potansiyometre) ile regüle edilmektedir. Devrenin çıkışında güç kaynağını çalıştırdığını gösteren bir LED ve aşırı akımlara karşı devreyi koruyan 1A'lık bir sigorta bulunmaktadır. Güç kaynağının çıkış gerilimi, 5k $\Omega$ 'luk potansiyometre yardımıyla 1,3V ile 15V arasındaki herhangi bir değere ayarlanabilir.



Şekil 2.2. Güç kaynağının devre şeması



Şekil 2.3. Güç kaynağının baskı devre şeması

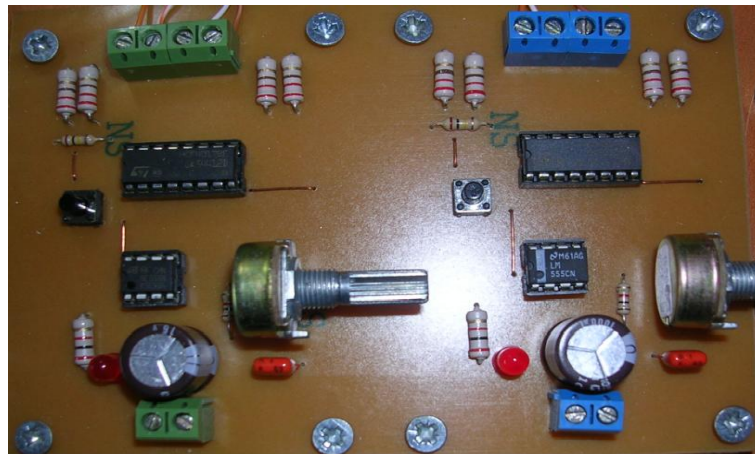
Devrede güç kaynağının görünüşü Şekil 2.4.'de gösterilmektedir.



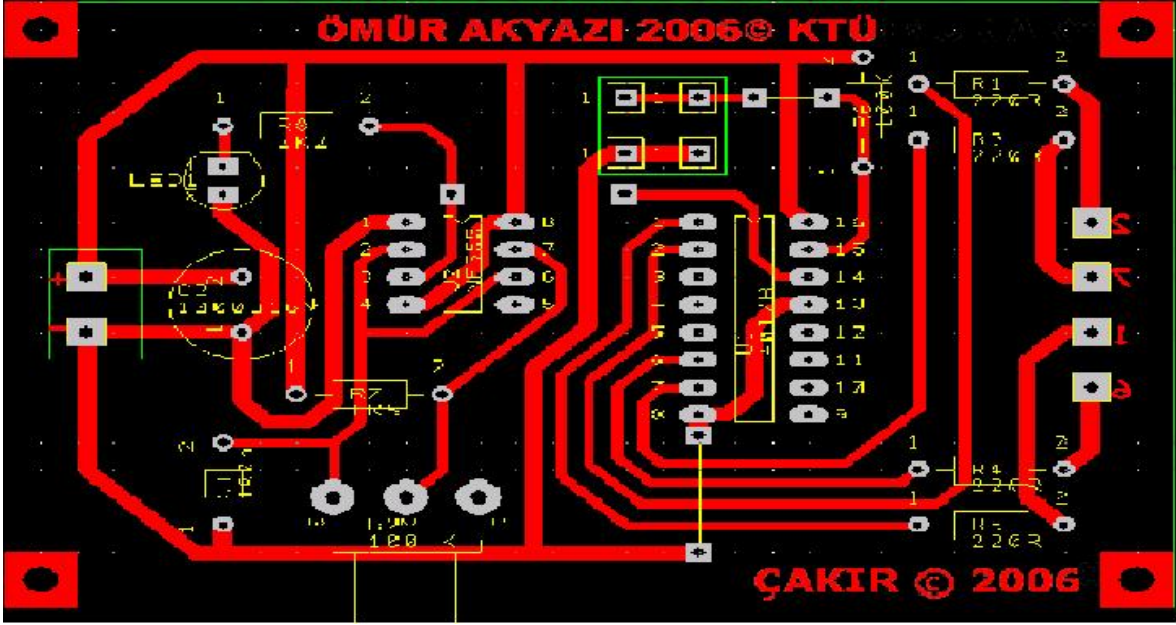
Şekil 2.4. Anahtarlama devresini besleyen güç kaynağı

### 2.2.2. Anahtarlama Devresi

Elektromanyetik fırlatıcılarda sargıların tetiklenme zamanı büyük önem taşımaktadır. Mermi daha sargının başlangıcında iken sargı enerjilenmeli, tam orta noktada yani sargı ile mermi merkezleri aynı hizaya geldiğinde sargının enerjisi kesilmelidir. Böyle yapılmak suretiyle merminin maksimum hıza erişmesi sağlanabilir. Tasarlanan devrede sargıların sıra ile tetiklenmesini sağlayan anahtarlama devresinin görünüşü Şekil 2.5.'de ve baskı devre şeması Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.

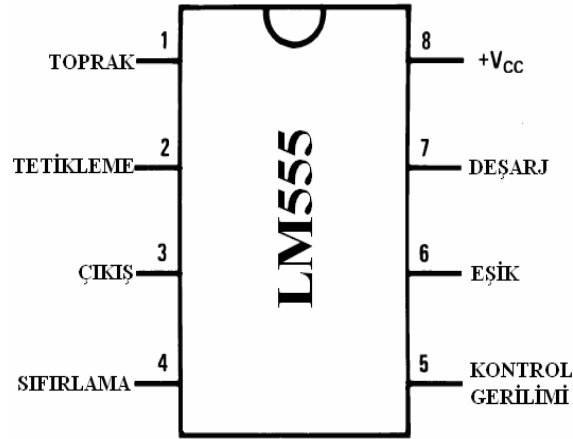


Şekil 2.5. Sargıların tetiklenmesini sağlayan anahtarlama devresi



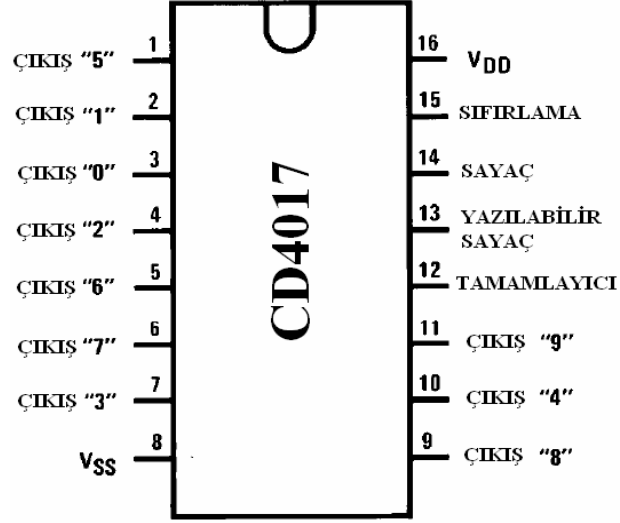
Şekil 2.6. Sargıların tetiklenmesini sağlayan anahtarlama devresinin baskı devre şeması

LM555 entegresi devre içinde osilatör olarak kullanılmıştır. İstenilen frekans ve doluluk oranının doğru olarak ayarlanması için iki adet direnç ve bir adet kapasitör LM555'in ilgili bacaklarına bağlanır.



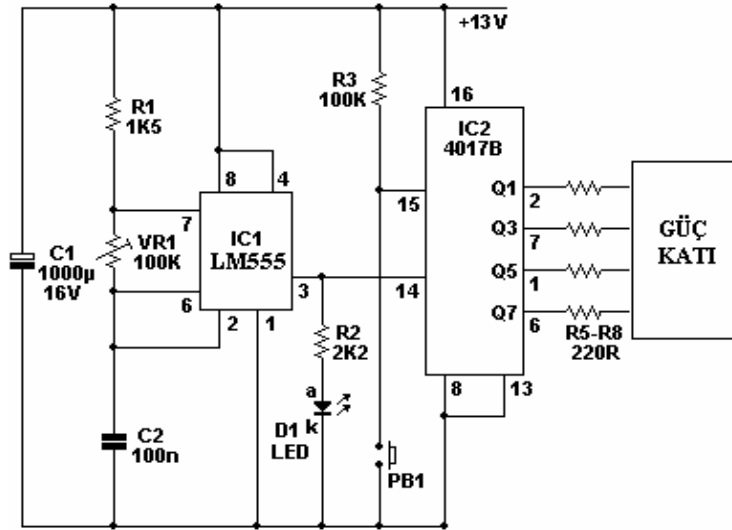
Şekil 2.7. LM555 entegre devre şeması

LM555'de üretilen kare dalga, 10 bölümlü Johnson sayıcısı olan CD4017'nin 14 nolu bacağına bağlanır. CD4017 entegresinin devre şeması Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



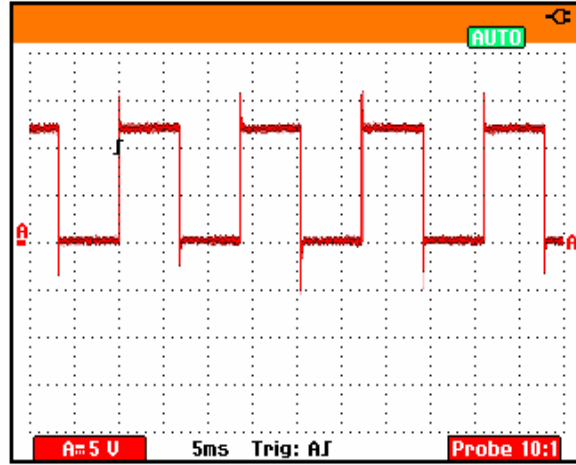
Şekil 2.8. CD4017 entegre devre şeması

LM555 ve CD4017 entegrelerinden oluşan anahtarlama devresinin bağlantı şeması Şekil 2.9.'da verilmiştir.

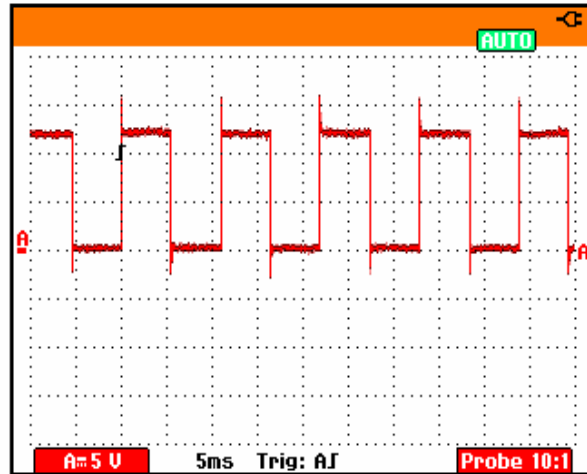


Şekil 2.9. Anahtarlama devresi bağlantı şeması

LM555'in gerekli işlevini yerine getirip getirmediğini entegrenin 3 nolu bacağına bağlı D1 nolu LED'in ON-OFF durumundan anlamaktayız. LM555'in 6 ve 7 nolu bacakları arasına bağlanmış olan 100K değerindeki ayarlanabilen direnç ile CD4017'nin girişine uygulanan kare dalga'nın frekansı değiştirilir. Direnç değerleri sırasıyla  $96.5K\Omega$  ve  $76.5K\Omega$  iken elde edilen LM555 çıkış sinyalleri Şekil 2.10. ve 2.11.'de gösterilmiştir.



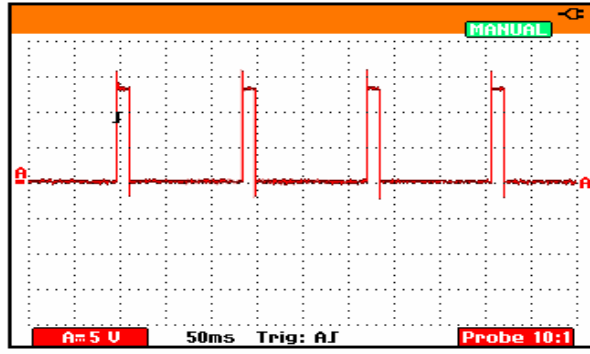
Şekil 2.10. LM555 çıkış sinyali ( $VR1=96.5K\Omega$ ,  $f=74Hz$ )



Şekil 2.11. LM555 çıkış sinyali ( $VR1=76.5K\Omega$ ,  $f=91Hz$ )

CD4017'nin 15 nolu bacağına bağlanan tetikleme düğmesi yardımı ile Güç Katı için gerekli olan tetikleme işaretlerinin üretimi gerçekleştirilir. CD4017'nin 2 nolu bacağından elde edilen çıkış sinyali Şekil 2.12.'de verilmiştir.



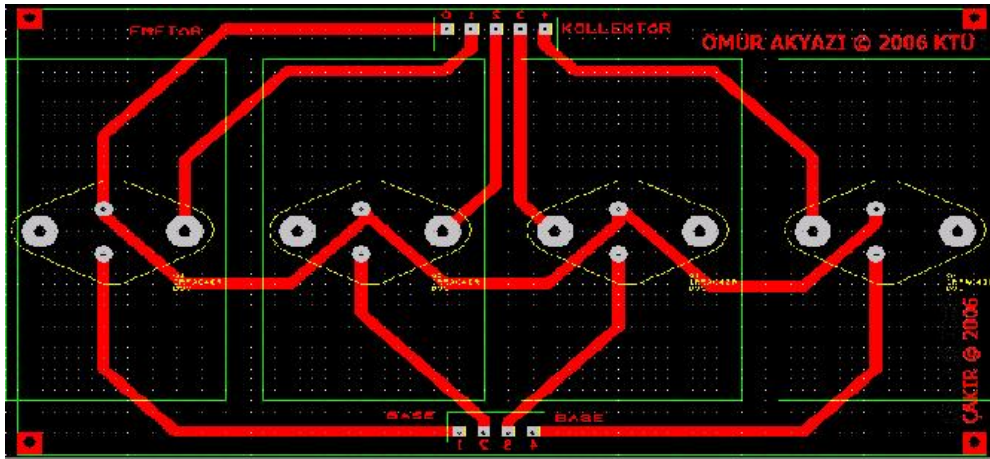


Şekil 2.12. Fluke 199C osiloskobundan alınan CD4017 çıkış işareti

Şekil 2.12.'de görülen çıkış sinyalleri, güç katında bulunan 2N3773 NPN güç transistörlerinin base bacağına uygulanarak, sargıların sırasıyla enerjilenmesi sağlanır.

### 2.2.3. Güç Katı

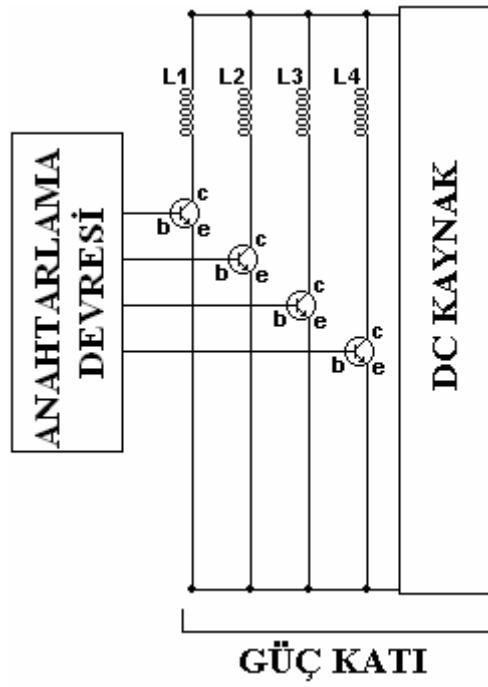
Güç Katı, toplam 8 güç transistöründen oluşmaktadır. Transistörler 16A, 140V NPN 2N3773 özelliklerine sahiptir. Kumanda devresinde üretilen sinyaller, ilgili transistörlerin base uçlarını ilettime sokarak, transistörlerin kolektör ve emiter uçlarının kısa devre olmasını sağlar. Transistörlerin ilettime geçmesiyle transistörlere bağlı sargılar enerjilenir ve böylece fırlatılacak olan cisim üzerinde harekete geçmesi için gerekli olan manyetik alan elde edilir. Güç Katı baskı devre şeması, devre genel yapısı ve devre şeması sırasıyla Şekil 2.13. , Şekil 2.14. ve Şekil 2.15.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Güç katı baskı devre şeması



Şekil 2.14. Güç Katı genel görünüşü



Şekil 2.15. Güç Katı devre şeması

Transistör anahtarlamalı elektromanyetik fırlatıcılarda mermi sargının merkezini geçtikten sonra sargı akımının kesilmesine izin verir. Burada sargıları besleyen enerji

kaynağı olarak varyak, tam köprü doğrultucu ve kondansatörden oluşan sistem kullanılmıştır.

Kondansatörün devredeki rolü, plakalar arasında depolanan gerilimi tutmaktır. Kondansatör uçlarında depolanan gerilim, güç transistörlerinin iletme geçmesiyle sargılar üzerinden boşalır. Bir kondansatörde depolanacak gerilim ile kapasitesi arasındaki bağıntı:

$$Q = C \times V \quad (2.1)$$

dir. Burada:

Q: Elektrik yükü (Coloumb)

C: Kapasite (Farad)

V: Voltaj (Volt)

Kondansatör seçiminde bağlayıcı olan sadece gerilim olmayıp, LC devresindeki rezonans frekansı da unutulmamalıdır. Bunlara ilave olarak, yüksek gerilim değerleri için uygun değerde kapasite de seçilmelidir. Bu seçim yapılırken devrenin çok yüksek gerilim değerleri için manyetik doyuma girebileceği de unutulmamalıdır.

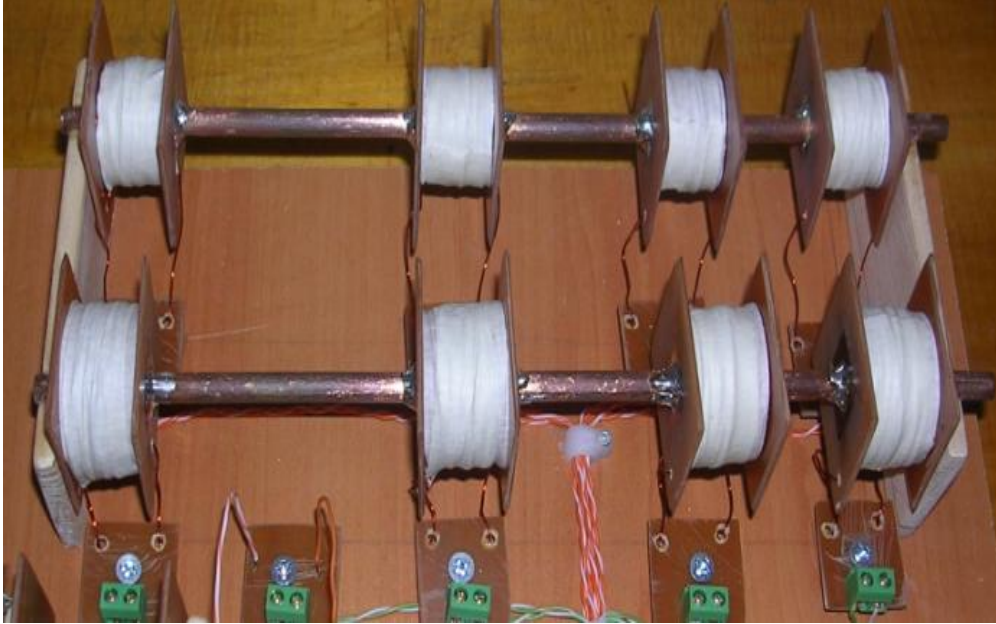
#### 2.2.4. İvmelendirici Sargılar

Elektromanyetik fırlatıcılarda, mermiyi ivmelendiren sargılar tasarlanırken belirlenecek akımı taşıyacak en küçük kesitli, tepe akımının belirlenen akım değerini aşmasını engelleyecek yeterli dirence sahip olması gerekmektedir.

Şu bilinmelidir ki sargı akımını sınırlayan sargının indüktansı değil sargının direncidir. Akımın oluşması için gerekli zaman devrenin “L/R” zaman sabiti ile belirlenir. Burada “R” sargının iç direncini ve aynı zamanda harici direnci içermektedir. Eğer “L/R” çok büyükse mermi sargıdan geçerken akım maksimum değerine ulaşacak yeterli zamana sahip olamayacaktır. Maksimum kuvveti elde edebilmek için sargı akımı mermi bobine girmeden önce anahtarlanarak devreye verilmelidir. Bu anahtarlama mesafesi merminin yaklaşık hızına ve devrenin “L/R” zaman sabitine bağlıdır.

Akım mermi sargının merkezinden geçerken (veya az öncesinden ) mümkün olduğu kadar hızlı bir biçimde düşürülmeli veya kesilmelidir. Akımı kesme karakteristiği açma karakteristiğinden daha önemlidir. Çünkü mermi bu anda daha hızlı hareket etmektedir.

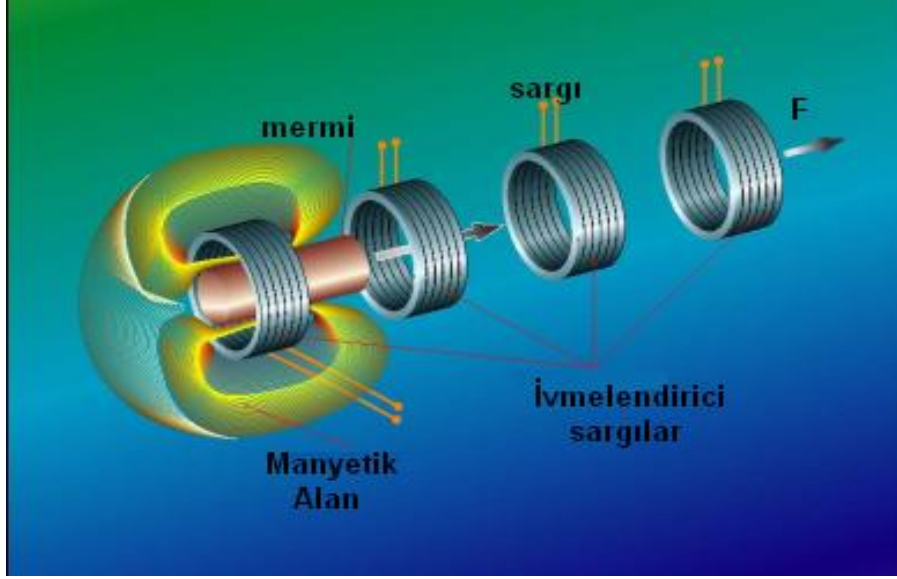
Tasarım prosedürü merminin bobinin dışarısında olmasını gerektirir. Mermi bobinin dışında olduğu zaman endüktans en düşük değerini alır ve pik akımıysa en büyük değerini alır. Şekil 2.16.'da merminin ivmelendirilmesi için tasarlanan sargılar gösterilmektedir.



Şekil 2.16. İvmelendirici sargılar

Şekil 2.16.'da görüldüğü gibi iki farklı ivmelendirici sargımız vardır. Bu sargıların kesitleri birbirlerinden farklıdır. Biri 0.60mm kalınlığında bakır iletkenle ( $R_{0.60}=2.2\Omega$ ,  $L_{0.60}=1.914\text{mH}$ ) sarılmış diğeri ise 0.50mm kalınlığında bakır iletkenle ( $R_{0.50}=2.7\Omega$ ,  $L_{0.50}=1.719\text{mH}$ ) sarılmıştır. Her bir ivmelendirici sargının sarım sayısı 500 dür. İletken kesitleri farklı olduğundan sargılara uygulanan gerilim (Gerçekleştirilen çalışmada sargılara uygulanan gerilim değeri 30V DC dir.) aynı olmak şartıyla oluşturacakları manyetik alanlar farklı olacaktır. Bunun sonucunda fırlatılacak cismin hızı da farklı olacaktır.

Sargının kesiti, kullanılmak istenilen mermi tarafından ve enerjiyi depolamak için kullanılan kondansatörün karşılayacağı indüktans değeri ile belirlenir. Sargının iç çapı namlu çapı ile sınırlandırıldığı için mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. Şekil 2.17.'de ivmelendirici sargıların açık şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.17. İvmelendirici sargıların açık şekli

Merminin ivmelenmesi için kullanılan sargının sarım sayısının artırılması ile daha güçlü bir manyetik alan üretir. Sarım sayısının artırılması indüktansı hızlı bir şekilde artıracaktır. İndüktansın artışı zaman faktörünü gündeme getirir ki zaman sargılı fırlatıcılarda önemli bir parametredir. Çünkü mermi hareket etmektedir ve üzerinde uygulanan kuvveti meydana getirecek olan manyetik alanın zamanı sınırlıdır. Eğer indüktans çok büyük olursa alan yeterince hızlı oluşturulamaz. Bunun daha ötesinde eğer manyetik alan mermi bobininin içine girdikten çok sonra en güçlü durumuna gelirse mermi geriye fırlayacaktır ihtiyaç duyulan indüktans değeri kullanılan kondansatörün değerine, devre direncine ve anahtar sisteminin dayana bileceği maksimum tepe akımına bağlıdır. Daha hızlı akım oluşturabilmek için daha küçük indüktans kullanılması düşünülür. Fakat indüktansın düşmesiyle tepe akımı yükselir.

Sargılı fırlatıcılarda kullanılan iletkenin direnci devredeki tek direnç olup varlığı kaçınılmazdır. Direncin çok büyük olması kondansatörün yavaşça boşalmasına neden olacaktır. Devredeki direnç küçüldükçe kondansatör yükünü olabildiğince hızlı bir biçimde bobin üzerine boşaltabilecektir. Ancak direncin aşırı biçimde küçülmesi de ayrı bir probleme neden olacaktır. Çünkü bu durumda devre salınıma girecek ve enerji kondansatör-bobin arasında gidip gelecektir.

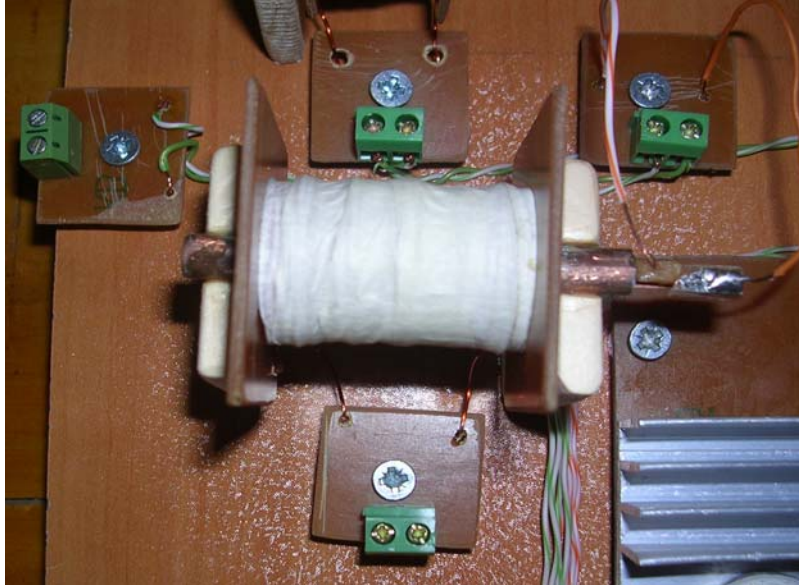
Sargılı fırlatıcı tasarımında ilk hedef direnci minimize etmek olmalıdır. Ancak bu şekilde sargı üzerinde yaratılacak manyetik alan büyütülebilir. Burada osilasyondan korkmaya gerek yoktur, çünkü fırlatılacak mermi (manyetik iletkenliği olan herhangi bir

malzeme) sargı enerjisinin çoğunu absorbe ederek, osilasyona neden olacak enerjiyi kayda alınmayacak kadar küçük bir seviyeye düşürecektir.

Tasarımda diğer bir amaç ise doğru zamanlamadır. Eğer sargı akımı çok kısa süreli olursa mermi akımdan sonra hareket edecektir. Yani mermi bobin boyunca hareket ederken, hareket esnasında bobinde akmakta olan bir akımdan söz edilemeyecektir. Eğer akım çok uzun süreli olursa da bu sefer mermi sargının orta noktasını geçtikten sonra tekrar geri çekilecektir. Mermi ve sargı kombinasyonu için doğru zamanlamanın yapılması şarttır.

Sargılı fırlatıcılarda,  $L$  indüktansı sabit değerlidir, fakat merminin yerleştirildiği konum ile değişir. Bobine akan yarı sinüs dalgası biçimindeki akımın fazı da bobindeki bu değişimden ciddi bir biçimde etkilenecektir. Merminin yerleştirildiği pozisyon manyetik akımın yönü üzerinde de etkili olacaktır.

Sargılı fırlatıcıların çalışma ilkeleri Karma fırlatıcılar içinde geçerlidir. Bu tür fırlatıcılar, yapılarında hem raylı hem de sargılı fırlatıcıları bulundurmaktadır. Karma fırlatıcıların maliyeti daha düşük verimi daha yüksektir. Karma fırlatıcı tasarımı ve gerçeklenmeleri diğer fırlatıcı türlerine göre daha basittir. Yapılan çalışmada gerçekleştirilen Karma fırlatıcısı genel görünümü, Şekil 2.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Karma fırlatıcı genel görünüşü

Karma fırlatıcı, sargılı fırlatıcı sisteminde kullanılan kontrol devresi ile çalıştırılmaktadır. Ancak, yapı itibariyle sargılı fırlatıcılardan farklı olarak, ray sistemine

sahip olmasından dolayı bu ray sistemini besleyecek ayrı bir DC güç kaynağına ihtiyaç vardır. Karma fırlatıcısında kullanılan sargı kesiti 0.60mm, sarım sayısı 500, sargı direnci  $1.8 \Omega$ , sargı indüktansı 0.846mH, ray olarak kullanılan malzeme türü bakırdır.

Yapılan çalışmada gerek sargılı fırlatıcıda gerekse karma fırlatıcıda sargıların ürettiği kuvvet:

$$F_u = B.i.l \quad (2.2)$$

Burada

$F_u$  : Üretilen kuvvet

$B$  : Sargıların oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu

$i$  : Fırlatılacak nesne üzerinden akan girdap akımı

$l$  : Fırlatılacak nesnenin boyu

üretilen bu kuvvet:

$$F_u = F_i + F_s + F_y \quad (2.3)$$

olup burada:

$$F_i = M \frac{dv}{dt} \quad \text{İvme kuvvet}$$

$$F_s = f.v \quad \text{Sürtünme kuvveti}$$

$$F_y = G \quad \text{Yük kuvveti}$$

$G$  : Hareket eden nesnenin ağırlığı

$M$  : Hareket eden nesnenin kütlesi

$f$  : Hareket eden nesnenin sürtünmesi

dır. Yerçekimi ivmesi “g” olmak üzere

$$M = \frac{G}{g} \quad (2.4)$$

Sürtünme katsayısını ihmal ettiğimizde sargıların oluşturduğu kuvvet:

$$F = M \frac{dv}{dt} + G \quad (2.5)$$

olacaktır. Burada

$$G = \gamma.D.l \quad (2.6)$$

buradan (2.4) ve (2.6) denklemleri (2.5) denkleminde yerine yazılırsa

$$F = \frac{\gamma.D.l}{g} \frac{dv}{dt} + \gamma.D.l \quad (2.7)$$

elde edilir. Buradan  $\frac{dv}{dt}$  çekilerek hızın kuvvete, fırlatılacak cismin ağırlığına bağımlılığını inceleye biliriz. Bu durumda hız:

$$V = \int \frac{F.g - G}{G} dt + V_0 \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'den de anlaşılacağı gibi hız kütle'nin ağırlığıyla ters orantılı, sargıların oluşturduğu kuvvet ve ilk hızla doğru orantılıdır. Yapmış olduğumuz çalışmada bu ölçütler dikkate alınarak sargılar tasarlanmıştır.



### 3. SONUÇLAR

- Mermi boyu sargı boyuna eşit olmalıdır. Mermi, başlangıçta sargının dışında olmalı, sargı ortasına geldiğinde sargının enerjisi kesilmelidir.
- Enerji kaybını önlemek için namlu olarak kullanılacak malzeme manyetik yalıtkan olmalıdır.
- Hava boşluğu dolayısıyla oluşan manyetik relüktans olabildiğince azaltılmalı ve hava boşluğunu en aza indirmek için namlu et kalınlığı olabildiğince az olmalıdır.
- Mermi olarak kullanılacak cisim manyetik iletken olmalıdır.
- Sargı endüktansı, kondansatör kapasitesi ve çalışma gerilimi uygun değerlerde seçilmelidir.
- Manyetik kaybı azaltmak için kullanılan boru ve rondelanın paketlenmiş ve manyetik geçirgenliği yüksek (birer yüzü yalıtkan) saç levhalardan olması son derece faydalıdır.
- Tek sargılı elektromanyetik fırlatıcılarda sargının tetiklenmesi çok önemli değildir ancak yan yana sıralanmış birden fazla sargılı fırlatıcılarda sargıların sıra ile tetiklenmesi önemlidir. Mermi sargının başında iken enerji uygulanmalı sargının ortasına gelince sargının enerjisi kesilmelidir. Aksi takdirde mermi ileri yönde ivmeleneyeceğine ters yönde ivmelenilebilir.
- Karma elektromanyetik fırlatıcıların sargılı elektromanyetik fırlatıcılara göre verimi daha yüksek, maliyeti daha düşüktür.
- Elektromanyetik fırlatıcıların diğer mekanik fırlatıcılara nazaran kayıpları daha az, verimleri daha fazladır ve gelişmeye daha açıktırlar.

#### 4. ÖNERİLER

Elektromanyetik fırlatıcılarda, tek sargı yerine birden fazla sargı kullanılması, sargı iletken kesitinin büyük seçilmesi, sarım sayısının az olması uygun olabilir. Sarım sayısının az olması sargının indüktans ve direnç değerlerinin istenilen sınırlarda olmasını sağlar. İletken kesitinin büyük olması sargı üzerinde oluşacak manyetik alanın artmasını sağlar.

Elektromanyetik fırlatıcılarda birden fazla sargının kullanılması durumunda sargıların tetiklenme zamanları çok önemlidir. Bunun için led ya da lazer diyotlar kullanılarak, devreye her bir sargı için optik kesiciler eklenebilir. Sargı enerjilendiğinde ilk sargıdan büyük bir akım akacak ve mermi harekete başlayacaktır. Mermi ilk optik kesiciye ulaştığında bu sargıdan akan akım kesilecek ve sonraki sargıdan akım akmaya başlayacaktır. İlk sargının manyetik alanı aniden kesilmeyeceği için kesici (foto transistor) uygun bir yere yerleştirilmelidir. Elektromanyetik alan şiddeti, mermi sargının ortasına ulaştığında sıfır olacaktır. Bu nedenle momentum, mermiyi sonraki sargının manyetik alanına itecek kadar büyük olmalıdır. Optik kesiciler uygun bir şekilde yerleştirilirse mermi, her bir sarımın ivmelendirmesiyle namludan çıkıncaya dek hızlanacaktır. Ya sargılar ve kesiciler arasındaki mesafe giderek artan bir şekilde olmalı, ya da mermi hızlanan bir şekilde değil de sabit bir hızla hareket etmelidir.

Kesici kullanmanın avantajı, sistemin geri beslemeye sahip olmasını ve kendi kendine zamanlamayı ayarlamasını sağlamaktır. Bu yöntem alternatif olacak diğer bir yöntemde sına ve hata yöntemidir. Eğer bu yöntem kullanılacaksa her bir sargı için büyük bir kapasite kullanılması uygun olabilir. Her bir kapasite deşarj olurken bir karşılaştırıcı kapasitenin voltajının belli bir seviyeye gelip gelmediğine bakar ve belli seviyeye ulaştığında karşılaştırıcı sonraki sargıyı tetikler. Eğer sargılar gittikçe daha küçük olacak şekilde yerleştirilirse, her bir kısım giderek daha az zaman alacak böylece nesne giderek hızlanacaktır. Buradaki püf noktası, optimum sargı boylarını ve karşılaştırıcı voltajını bulmaktır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Fair, H.D., "Introduction", IEEE Transaction on Magnetics, 22,1 (1986) 1379.
2. H. D. Fair, "Hypervelocity hyperkinetic energy weapons", Mil. Technol. XIV (1990) 39–55.
3. Edminister, J.A. çev: Aydemir, M.T., Afacan, E. ve Nakiboğlu, K.C., "Elektromanyetik" SCHAUM'S Outlines, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2000.
4. <http://home.san.rr.com/nessengr/techdata/rlc/rlc.html>. 11 Temmuz 2006.
5. Andrews, J.A. ve Devine, J.R., "Armature Design for Coaxial Induction Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 27,1 (1991).
6. Burgess, T.J., Cnare, E.C., Oberkampff, W.L., Beard, S.G. ve Cowan, M., "The Electromagnetic Theta Gun and Tubular Projectiles", IEEE Transactions on Magnetics, 18,1 (1982).
7. Berning, P.R., Hummer, C.R. ve Hollandsworth, C.E., "A Coilgun-Based Plate Launch System", IEEE Transactions on Magnetics, 35,1 (1999).
8. Cowan, M., "The Reconnection Gun", IEEE Transactions on Magnetics, 22,6 (1986).
9. Cowan, M., Widner, M.M., Cnare, E.C., Duggin, B.W., Kaye, R.J., ve Freeman, J.R., "Exploratory Development of the Reconnection Launcher 1986-1990", IEEE Transactions on Magnetics, 27,1 (1991).
10. Kaye, R.J., "Design and Performance of a Multi-Stage Cylindrical Reconnection Launcher", IEEE Transactions on Magnetics, 27,1 (1991).
11. Engel, T.G., Surls, D. ve Nunnally, W.C., "Prediction and Verification of Electromagnetic Forces in Helical Coil Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, 39,1 (2003).
12. Engel, T.G. ve Nunnally, W.C., "Development of a Small-Bore, High-Efficiency, Helical Electromagnetic Launcher", 14th IEEE International Pulsed Power Conference, (2003) 1099-1102.
13. Bresie, D.A., Bacon, J.L., Ignram, S.K., Kennington, K.S., ve Weeks, D.A., "SPEAR Coilgun", IEEE Transactions on Magnetics, 31,1 (1995).
14. Shirong, Y., Ying, W., Shanbao, C., Guohua, P., Xuquiong, L. ve Wei, W., "A Novel Type Rail-Coil Hybrid Electromagnetic Launcher", IEEE Transaction on Magnetics, 41,1 (2005) 266–267.

15. <http://www.global-defence.com/1997/High-speed.html>. 10 Haziran 2006.
16. Fair, H.D., “Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era”, IEEE Transaction on Magnetics, 41,1 (2005) 158–164.
17. [http://www.coilgun.eclipse.co.uk/coilgun\\_fundamentals\\_1.html](http://www.coilgun.eclipse.co.uk/coilgun_fundamentals_1.html). 21 Haziran 2006.

## ÖZGEÇMİŞ

15.07.1979 tarihinde Trabzon'un Vakfıkebir ilçesinde doğdu. İlk ve ortaokulu Trabzon Çarşıbaşı ilçesinde bitirdikten sonra Endüstri Meslek Lisesi sınavlarına girerek Trabzon Akçaabat Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünü kazandı. Bu bölümde bir yıl okuduktan sonra derslerdeki başarısından dolayı Teknik liseye girmeye hak kazandı.1997 yılında Akçaabat Teknik lisesini başarı ile bitirdi. Lise öğrenimimi tamamladıktan sonra yaklaşık iki yıl kadar alanıyla ilgili serbest piyasada çalıştı.

1999 yılında girmiş olduğu ÖSS sınavı ile Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünü kazandı. Bu bölümü 2003 yılında bölüm 3.sü olarak başarıyla bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.