

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROMANYETİK RAYLI FIRLATICILARIN YAKLAŞIM
ALGORİTMASI İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taceddin KIRAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROMANYETİK RAYLI FIRLATICILARIN YAKLAŞIM
ALGORİTMASI İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Taceddin KIRAN
504091080**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Öğr. Gör. Dr. F. Gül BAĞRIYANIK

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091080 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Taceddin KIRAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ELEKTROMANYETİK RAYLI FIRLATICILARIN YAKLAŞIM ALGORİTMASI İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Öğr. Gör. Dr. F. Gül BAĞRIYANIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Biricik eşime,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen tez danışmanım Öğr. Gör. Dr. F.Gül BAĞRIYANIK ve hocalarım Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ ve Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK olmak üzere bütün hocalarıma ve manevi destekleriyle bana yardımcı olan eşim ve aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Mayıs 2015

Taceddin KIRAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. RAYLI FIRLATICI MANYETİK TEORİSİ.....	5
2.1 Temel Teori	5
2.2 Değişken Manyetik Alan.....	9
2.3 Kompleks Elektromanyetik Fırlatıcı Teorisi.....	12
2.4 Elektromanyetik Fırlatıcının Elektrik Devresi	14
2.5 Malzeme Özellikleri	16
2.6 Ray Direnci ve Isınması	16
3. ENERJİ DEPOLAMA CİHAZLARI.....	19
3.1 Kompanzasyonlu Darbe Alternatörü.....	19
3.2 Kapasite Temelli Sistem.....	21
3.3 Güç Kaynağı Tasarımı	22
4. FIRLATICI TASARIMI OPTİMİZASYONU	27
4.1 Ray Yarıçapı - Hız Etkileşimi	28
4.2 Raylar Arası Mesafe - Hız Etkileşimi	29
4.3 Akım- Hız Etkileşimi	30
4.4 Mermi Kütlesi – Hız Etkileşimi	31
4.5 Hız-Yer Değiştirme Etkileşimi (Namlu Uzunluğu)	31
4.6 Tasarım Sonucu.....	32
4.7 Sistem Parametrelerinin Optimizasyonu	33
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR	49
EKLER.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	63

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
I	: Akım
m	: Kütle
NPS	: Naval Postgraduate School
PFN	: Pulse Forming Network (Darbe Şekillendirme Devresi)
R	: Ray yarıçapı
SDIO	: Strategic Defence Initiative Organization
w	: Raylar arası mesafe
v	: Hız
x	: Namlu uzunluğu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Malzeme özellikleri.....	16
Çizelge 3.1 : Kapasite teknik özellikleri.....	25
Çizelge 4.1 : Tasarım sonuçları	32
Çizelge 4.2 : Hassas yaklaşım algoritmasında sistem parametrelerinin iki durum etkileri	41
Çizelge 4.3 : Sistem tasarım değerleri	41
Çizelge 4.4 : Algoritma ile bulunan tasarım sonuçları	41

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Manyetik alan etkisi ve Lorentz kuvveti	5
Şekil 2.2: Mermi kalınlığı w ve sürüklenme hızı v_d	6
Şekil 2.3: Raylardaki akımların oluşturduğu manyetik alan	6
Şekil 2.4: Rayların enine kesit görünümü	8
Şekil 2.5: Hızın namlu içindeki mesafe ile değişimi ($w = 0.2$ m, $R = 0.1$ m).	11
Şekil 2.6: Hızın namlu içindeki mesafe ile değişimi ($w = 0.1$ m, $R = 0.2$ m).	11
Şekil 2.7: Kapasite kaynaklı elektrik devresi	14
Şekil 3.1: İdeal mermi darbe akımı	19
Şekil 3.2: Bir kompulsatör	20
Şekil 3.3: AC-DC dönüştürücü	21
Şekil 3.4: a) Kapasite bankları, b) Gemide kapasite yerleşimi	22
Şekil 3.5: Güç kaynağı devresi	23
Şekil 3.6: Darbe şekillendirme devresi (PFN) darbesi.	24
Şekil 3.7: Mermi hız-yer değiştirme eğrisi.	26
Şekil 3.8: Tasarlanan güç kaynağı devresi.	26
Şekil 4.1: Ray yarıçapının hıza etkisi.	28
Şekil 4.2: Hızın ray açıklığı ile değişimi.	29
Şekil 4.3: Akım ve hız etkileşimi.	30
Şekil 4.4: Kütle ile hız etkileşimi.	31
Şekil 4.5: Namlu içinde hızın değişimi.....	32
Şekil 4.6: Hassas yaklaşım algoritmasının genel akış diyagramı.	36
Şekil 4.7: Hassas yaklaşım algoritması-1.	38
Şekil 4.8: Hassas yaklaşım algoritması-2.	39
Şekil 4.9: Hassas yaklaşım algoritması-3.	39
Şekil 4.10: Hassas yaklaşım algoritması-4.	40

ELEKTROMANYETİK RAYLI FIRLATICILARIN YAKLAŞIM ALGORİTMASI İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Elektromanyetik alanlar konusunda günümüzde oldukça yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların çıktıları olan ürünler, çok sık kullanılmaktadır. Günlük yaşamda iç içe olunan bu konunun askeri uygulamalarda da örnekleri oldukça mevcuttur. Bunlardan birisi de elektromanyetik raylı fırlatıcılardır.

Bu tezde elektromanyetik raylı fırlatıcıların çalışma prensipleri ve manyetik teorisi ortaya konmuştur. Sistem parametreleri değişiminin hıza etkisi incelenmiş ve bu sistem için özel olarak oluşturulmuş olan bir algoritma yardımı ile optimum tasarım yapılmıştır.

Manyetik fırlatıcıların temeli Lorentz kuvvetine dayanmaktadır. Ray ve mermi üzerinden akan akım bir manyetik alan yaratır. Bu manyetik alan mermiye bir kuvvet etki etmesine sebep olur. Böylece mermi bu kuvvet ile ray boyunca ivmelenerek hareket eder ve namlu ucundan fırlar.

Lorentz kuvveti denkleminde ve fırlatıcı tasarımı için uygulanacak olan denklemlere göre merminin hızı; mermi üzerinden geçen akıma, raylar arası mesafeye, rayların yarıçaplarına, namlu uzunluğuna ve mermi kütlesine bağlı olarak değişmektedir. Ray yarıçaplarının, mermi kütlesinin azalması ve mermi üzerinden geçen akımın, raylar arası mesafenin, namlu uzunluğunun artması mermi ivmelenmesine olumlu katkı sağlamaktadır.

Bu tezde 20 kg'lık bir merminin 2500 m/s hızla fırlatılabilmesi için gereken optimum ray açıklığının ve ray yarıçaplarının bulunmasına odaklanılmıştır. Yaklaşım algoritması kullanılırken başlangıçta namlu uzunluğu 10 m ve giriş ortalama akımı 5 MA olarak alınmıştır. Ray açıklığı ve ray yarıçapı için kritik değerler bulununca namlu uzunluğu değeri değiştirilerek sistem parametreleri düzeltilcektir.

Elektromanyetik fırlatıcı kullanmanın avantajlarından yararlanmak için mermi hızının geleneksel silahların atış yapabildiği hızdan daha yüksek seçilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla hız 2500 m/s olarak belirlenmiştir. Bu hız, merminin oldukça uzun menzillere atılabilmesi demektir. Amerika Birleşik Devletleri'nin California Eyaleti'ndeki NPS School'da tasarlanan bir elektromanyetik fırlatıcıda mermi hızı yaklaşık 2400 m/s olarak düşünülmüştür. Mermi menzili yaklaşık olarak 400 km olarak hesaplanmıştır. Bu tezde mermi hızı 2500 m/s olarak hedeflendiğinden bu menzil 400 km civarında düşünülmüştür. Hızı belirledikten sonra mermiyi bu hıza ulaştıracak kuvveti sağlayabilecek güç kaynağı tasarımı yapabilmek için giriş ortalama akımının belirlenmesi gerekir. İkinci bölümde çıkartılan manyetik-kuvvet-hız denklemlerine göre Matlab ortamında yapılan benzetim sonuçları göstermektedir ki bu giriş ortalama akımı yaklaşık olarak 5 MA seviyelerinde olması gerekmektedir. Diğer üretilmiş olan prototiplerde de bu tezde olduğu gibi sistemin beslemesi için mega amper (MA) mertebelerinde darbe akımı kullanılmaktadır.

Tasarım yaparken ilk olarak bilinmesi gereken parametre mermi üzerinden geçen akım değeridir. Bu değer belirlendikten sonra ray yarıçapı, raylar arası mesafe, namlu uzunluğu gibi değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Ray yarıçapı, akımı taşıyabileceği ölçüde büyük fakat akım yoğunluğunun azalmaması içinde yeterince küçük olması gerekmektedir. Dolayısıyla literatürde daha önceden yapılan prototiplerden elde edilen tecrübelerle göre bu değer 0.1 m ile 0.3 m mertebeleri arasında olması gerektiği anlaşılmıştır. Bölüm 2’de çıkartılan denklemlerin Matlab ortamında çözümü sonucu ray yarıçapı olarak 0.1 metrenin uygun olduğu anlaşılmıştır. Bu değer ilk olarak belirli sınırlar içerisinde Matlab programı desteği ile sınanmıştır. Çizdirilen grafiklerden görüldüğü üzere ray yarıçapı 0.1 metre olduğunda hız maksimuma çıkmıştır. Çünkü ray yarıçapı azaldığında akım yoğunluğu ile birlikte manyetik alan yoğunluğu da artmaktadır. Dolayısıyla mermiye etki eden kuvvet için gerekli olan manyetik alan yoğunluğu da artmıştır. Mermi ivmelenmesi ile birlikte hız da artmıştır.

Tasarımın bir diğer gerekli görülen parametresi de raylar arası mesafedir. Bu mesafe aynı zamanda merminin genişliğidir. Lorentz kuvveti ilkesine göre akımın taşındığı yol arttığı zaman buradaki manyetik alanın etkisi daha çok olmaktadır. Dolayısıyla daha çok kuvvet etki etmektedir. Sonuç olarak raylar arası mesafe arttığı zaman mermiye etki eden kuvvetin artması beklenmektedir. Fakat bu mesafe istenildiği kadar artırılmaz çünkü burada önemli olan merminin çapıdır. Sınırlayıcı faktör olan mermi genişliği w (raylar arası mesafe)’yi artırmayı engellemektedir. Bölüm 2’den elde edilen bilgi ve denklemlerin Matlab programı ortamında benzetimi yapılması ile w (raylar arası mesafe) değerinin 2500 m/s’lik mermi hızını elde etmek için 0.25 metre olması gerektiği anlaşılmıştır.

Bir diğer değişken mermi kütlesidir. Bu mermi kütlesi NPS School’da tasarlanan manyetik fırlatıcı için düşünülen mermiye göre 20 kg olarak seçilmiştir. Mermi kütlesi arttıkça merminin hızının azalması beklenir. Fakat vuruş etkisinin artması için de mermi kütlesinin artması gerekir. Bu kriterlere göre mermi kütlesi 20 kg olarak seçilmiştir.

Namlu uzunluğu çok önemli bir parametredir. Çünkü mermi namluda bulunduğu sürece hızlanmaktadır. Bu süre bu tezdeki tasarımda 6.3 ms olarak hesaplanmıştır. Yani mermi 6.3 ms boyunca hızlanmaktadır. 6.3 ms hızlanabilmesi için namlu uzunluğunun 10 m olması gerekmektedir. Namlu uzunluğu arttıkça merminin daha hızlı namludan çıkması beklenmektedir. 10 metre olarak kabul edilen bu değer benzetim sonuçlarına göre uygun bir değerdir. Çünkü istenen hız değerlerine bu tasarımla ulaşılmaktadır. Fakat diğer sistem parametrelerini (w , R) rahatlatmak için Bölüm 4’de namlu uzunluğu da değiştirilmiştir. Bu tezde savaş gemilerinde elektromanyetik fırlatıcı tasarımının optimizasyonunu da ele aldığından dolayı 10 metrelik namlu uzunluğu normaldir. Fakat bu kadar büyüklükteki bir namlu tank, savaş uçağı gibi araçlarda kullanılamamaktadır.

Bölüm 4’de sistem parametrelerinin (ray yarıçapı, raylar arası mesafe, namlu uzunluğu, mermi üzerinden geçen akım, mermi kütlesi) mermi hızına etkisi incelenmiştir. Bu bölümden edinilen bilgiler sayesinde bir yaklaşım algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile parametreler hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Öncelikle sistem parametrelerinin değerleri, sınır değerler içerisine yerleştirilir. Verimi en düşük (mermi hızının en düşük) olan tasarımdan başlayarak parametre ayarları verimli yönde değiştirilir. İlk olarak pozitif verim yönünde parametre

ayarları yapılırken R (ray yarıçapı), w (raylar arası mesafe) değerlerinin değiştirilmesi, istenen hız değerine ulaşmak için yeterli olmayacaktır. Program tarafından bu değerler belleğe alındıktan sonra x (namlu uzunluğu) artırılır. Artırılan namlu uzunluğu sayesinde mermi üzerinden geçen akımın akma süresi artırılmıştır. Bu sayede mermi hızı artmış olur. Belleğe alınan R , w değerleri bu sefer en verimli durumdan verimsiz duruma doğru değiştirilir. Çünkü Bölüm 4.7’de de açıklandığı gibi parametreler sınırlara yakın olduğu zaman raylarda aşırı sıcaklık, rayların akım taşıma kapasitesinin yetersizliği, mermi çapının raylar arası genişlik kadar büyük olma gereksinimi ve raylar arası ark olma ihtimali gibi problemler olmaktadır. Örneğin; R , ray yarıçapının 0.1 metre olması durumunda mermi hızı artar fakat akım yoğunluğu çok olduğu için raylardaki sıcaklık da artar. w , raylar arası mesafenin 0.3 metre olduğu durumda da mermi hızı artar ama bu durumda mermi çapı da bu mesafe (raylar arası mesafe) kadar olmak zorundadır. Bu gibi sebeplerden dolayı sistemi artık verimliden verimsiz duruma yaklaştırmak gereklidir. Böylece ilk durumda sistem parametreleri pozitif etki yaratacak şekilde değiştirilirken, ikinci durumda negatif etki yaratacak şekilde değiştirilir. Merminin 2500 m/s ile hareket etmesi hedefi bu hassas yaklaşım algoritması ile en uygun sistem parametreleri ile sağlanmış olur.

Bu tezdeki tasarımın enerji ihtiyacı 80 MJ’dür ve giriş gücü 10 GW olarak hesaplanmıştır. Güç kaynağı tasarımı sonucu kapasite sayısının fazla olması maliyeti olumsuz etkilemiştir. Bu sebeple üç farklı güç kaynağı tasarımı yapılarak maliyeti daha uygun tasarımlar ortaya konmuştur. Bu farklı tasarımların enerji ihtiyaçları sırası ile 80 MJ, 8 MJ, 1260 kJ’dür. Hesaplamalar sonucu bu üç tasarımın enerji ihtiyacını karşılamak için sırasıyla 1600, 160 ve 25 adet kapasite kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Güç kaynağı olarak kapasiteler uygundur. Diğer seçenek olan kompülatörler ise pahalı aynı zamanda bakım zor yapılardır. Kapasiteler piyasada kolayca bulunabilir ve geliştirmeye uygundur. Arıza yaptıkları zaman yedekleri ile kolaylıkla değiştirilebilirler. Çıkış akım şekilleri kolayca kontrol edilebilir.

Sonuç olarak bu tezde, 20 kg’lık bir mermiyi 2500 m/s hızla fırlatacak bir optimum elektromanyetik fırlatıcı tasarımı yapılmıştır. Tasarımın gerektirdiği güç kaynağı, ray yarıçapı, ray uzunluğu, raylar arası mesafe (mermi genişliği), akım, gerilim, güç parametreleri hesaplanmış ve bu özelliklerin birbiriyle ilişkisi sunulmuştur.

PARAMETER OPTIMIZATION OF ELECTROMAGNETIC RAIL LAUNCHER USING APPROXIMATION ALGORITHM

SUMMARY

Nowadays, there are many studies on the applications of electromagnetic field theory. We are using sorts of technologies which are outcomes of these theories. This subject, which we use in our lives, also has many applications in military applications such as ElectroMagnetic Rail Gun.

In this thesis, working principles of electromagnetic rail launcher and its magnetic theory will be given. The system parameters' effects on the velocity will be examined and by a specially developed algorithm, an ideal design will be done.

Magnetic launcher's theory is based on Lorentz Force. A current, flows through a rail and a projectile creates a magnetic field. This magnetic field causes to some force apply on the projectile which current flows through. Thus, the projectile starts to accelerate by this force and throw out of the muzzle.

Velocity of the projectile depends on; the current which flows through the projectile, distance between the rails, radius' of the rails, the length of the muzzle and mass of the projectile according to the Lorentz force equation and the equations which will be used for designing the launcher. Decreasing radius' of the rails, mass of the projectile and increasing the current which flows through the projectile, the distance between the rails, the length of the muzzle have a positive effect on acceleration of the projectile.

Finding the optimum distance between the rails and rail radius' of a 20 kg projectile for launching with the velocity of 2500 m/s is focused on this thesis. While using approach algorithm, at first length of the muzzle and average input current has been taken as 10 m and 5 MA. When distance between the rails and radius' of the rails will reach the critical limits, length of the muzzle will be changed and the system parameters will be corrected by the approach algorithm.

To take advantages of the magnetic launchers, velocity of the projectile should be chosen as higher than the velocity of the projectile, which is launched by conventional launchers. So the velocity has been chosen as 2500 m/s. This projectile can reach up to very high distances with this velocity. According to an electromagnetic launcher design (NPS School, CA, USA) velocity of the projectile has been considered as 2400 m/s. That projectile's reachable distance is calculated like 400 km. Reaching the velocity of 2500 m/s is also our ambition, so the distance of 400 km can be also considered as our distance of fire impact. After defining the velocity, the average input current should be calculated for designing of the power supply. According to the equations in the Section 2, Matlab simulations show us that average input current should be around 5 MA ranges. Also other prototypes show us that the average input current should be around mega amper ranges like in this thesis.

While designing a magnetic launcher, firstly the average input current should be known. It is necessary to define radiuses of the rails, distance between the rails;

muzzle length after defining average input current. The rail radius needs to be big to carry the current but also needs to be small not to lower the density of current. So at the literature this rail radius should be between the level of 0.1 meter and 0.3 meter according to the experiences from the design of the prototypes formerly. The simulation results of the equations derived in the Section 2 show us that the rail radius should be 0.1 m. Firstly; this value has been tested by Matlab program support in between certain limits. As seen on the graphs, the projectile reaches its maximum velocity when the radius is 0.1 meter. Because when the rail radius is decreased, the current density is increased with magnetic field density. So the magnetic field density which is important for the force applied on the projectile is increased. Thus, the acceleration of the projectile will increase because of the force provided from the magnetic field density. Velocity of the projectile has been increased by increasing acceleration of the projectile.

The other important parameter is the distance between the rails. This distance is also diameter of the projectile. According to the Lorentz Force principle, if the way carrying the current were increased under the magnetic field, higher force would be applied on the projectile. As a result, increasing distance between the rails will cause more force to be applied on the projectile. However, this distance can't be extended as much as wanted. Because the limiting factor is the projectile's radius. This radius prevents to extend distance between the rails. By making Matlab simulations of the informations and equations derived in Section 2, it's understood that to get the velocity of 2500 m/s, the distance between of the rails should be 0.25 meter.

Another parameter is projectile's mass. This mass has been accepted as 20 kg according the knowledge from the prototype, which is designed at the NPS School, CA, USA. It is expected that the mass's velocity to be lower when the mass is increased. But for increasing the hit impact the projectile's mass should be increased. According these criterias, the projectile's mass is chosen as 20 kg.

The muzzle length is very important parameter. Because the projectile is accelerated while it's in the muzzle. This time is calculated as 6.3 ms in our design. So the projectile is accelerated during this 6.3 ms. To accelerate the projectile for 6.3 ms, length of the muzzle must be 10 m. It has expected that while increasing length of the muzzle, velocity of the projectile will increase too. In addition, 10-meter muzzle length is appropriate value for reaching the desired velocity according to the simulations on Matlab. To relief other parameters (w , R), in Section 4 also length of the muzzle will be changed. This 10-meter muzzle length cannot be used in war tanks nor jet fighters. However, 10-meter muzzle length is appropriate for military ships.

In Section 4, the system parameters' (radius of the rail, distance between the rails, muzzle length, the current passing through the projectile, and mass of the projectile) effect on the projectile velocity will be shown. From the knowledge gathered from this section, a sensitive approach algorithm has been developed. With this algorithm, the parameters of the system can be calculated precisely.

First of all the system parameters have been put in some limits. Beginning from the lowest efficiency settings (the lowest velocity of the projectile), the system parameters are changed for positive efficiency. By this first step, rail radius' (R) and distance between the rails' (w) value changes will not be sufficient enough for reaching desired projectile velocity. After memorizing these values (w , R) by the program, x (muzzle length) will be increased. With the increased muzzle length, the

time which the current passing through the projectile will be increased. So the projectile's velocity will be higher. At this time, the memorized values of R , w are moved from the efficient situation to the inefficient situation. Because, as explained in the section of 4.7, when the parameters are close to the limits, there can be some problems like; the rails' excessive heat, the rails' insufficient capacity of carrying current, the necessity of the projectile's diameter should be big enough for the distance between the rails and the probability of having an arc between the rails. For example; in the case of the rail radius is 0.1 meter, the velocity of the projectile will be increased but because of the dense current, heat will be higher on the rails. In the case of the distance between the rails is 0.3 meter, the velocity of the projectile will be increased. However, radius of the projectile should be big enough for this distance (distance between the rails). Now on, the system should be moved from efficient to inefficient situation because of these reasons. So in the first case, the system parameters are changed to create a positive impact but in the second case, they are changed to create a negative impact. The target of the projectile's movement with the velocity of 2500 m/s has been achieved by the sensitive approach algorithm.

This thesis' energy requirement is 80 MJ and power input is calculated as 10 GW. After power supply design, the capacitor numbers are resulted in high numbers. Power supply cost has been effected negatively because of this big energy needs. For this reason, three different designs have been created in similar way for more cost-effective power supply. These three different power supplies' energy storages are 80 MJ, 8 MJ and 1260 kJ respectively. After calculations, it is understood that using 1600, 160 and 25 capacitors respectively are enough for energy needs for these 3 different power supply design.

As power supply, capacitors are feasible. Compulsators which is the other option are very expensive and hard to maintenance. Capacitors are easy to be found at market and even if they are broke down it's easy to change with their backups. So capacitors can be chosen as power supplies for electromagnetic rail gun applications. In addition, it is easy to control the output current shape of the capacitors.

As a result, in this thesis, an optimum design of an electromagnetic launcher has been done for launching a 20 kg projectile with the velocity of 2500 m/s. The parameters of rail radius, muzzle length, distance between the rails, current, voltage, power parameters and power supply parameters which are required by the design has been calculated and has been showed the relationships between each features.

1. GİRİŞ

Uygulama olarak uzun bir geçmişi olan elektromanyetik alanlardan, elektromanyetik fırlatıcılarda da yararlanılmaktadır. Bu çalışmalar, 1980'lerin öncesinden beri ABD'de ciddi olarak yapılmaktadır. 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 ilk başarılı fizibilite çalışmalarının ardından elektromanyetik fırlatıcıların uçakların fırlatılması, füzyon reaktörlerinde yakıt elde edilmesi amacıyla parçacık hızlandırıcı, küçük cisimlerin uzaya fırlatılması, hafif mermilerin yüksek hızda fırlatılması gibi konularda kullanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır [1-4]. Daha sonra DARPA ve ABD Ordusu gelişmiş zırhlı savaş araçlarının yüksek hızlı mermilerle zırhlarının delinmesi konusunda araştırmalara yönelmiştir [5-7].

Dünya çapında, yıllar boyunca, büyük ve küçük ölçekli çeşitli prototip elektromanyetik fırlatıcılar inşa edilmiştir. 1977 yılında Dr. Harry Fair (New Jersey, ABD'de orduda itme laboratuvarı yöneticisi) MIT'de yapılan manyetik fırlatıcıların askeri kullanıma uygun olup olmadığını araştırmıştır. Bu araştırma, manyetik fırlatıcı çalışmaları üzerine kurumlar arasında paneller yapılmasına sebep olmuştur.

1980'li yıllarda yine ABD'nin SDIO (Strategic Defence Initiative Organization) tarafından birçok prototip fırlatıcı üretilmiştir. Prototip fırlatıcılar arasında balistik füze çalışmaları da vardı. Bu kurumun kapatılması ile çoğu proje de kapatılmıştır. Bu kurumdan kalan çalışmalar halen Teksas Üniversitesi Elektromekanik Bölümü'nde devam etmektedir. Teksas Üniversitesi'nde yapılan çalışmalardan biri de kompülatör sürücülü 30 mm çaplı raylı manyetik fırlatıcıdır. Bu deneysel manyetik fırlatıcı, 185 gramlık mermiyi 1.85 km/s hızla, 200 ms aralıklarla (5 Hz sıklıkta) atabilen bir prototip fırlatıcıdır. Bu prototip fırlatıcı aynı zamanda amfibi saldırı araçlarında kullanılmak için düşünülmüştür [1].

Elektrotermal ve kimyasal fırlatıcılar dahil geleneksel fırlatıcılar, namlu içinde merminin arka kısmında çok büyük bir basınç elde edilerek fırlatma işlemini

gerçekleştirir. Merminin daha yüksek hızlarda fırlatılması, ya arkasındaki basıncın ya da basıncın uygulanma süresinin artırılmasıyla sağlanır. Basıncın arttırılması, bu basınca dayanıklı daha sağlam namlu yapılmasını gerektirir. Bu durum ekstra ağırlık demektir. Bu da savaş ortamında pratik olmayabilir [8, 9].

Basıncı uygulama süresinin arttırılması, namlu boyunun uzatılmasıyla sağlanır. Böylece namluda oluşan basınç daha uzun süre mermiye etki eder. Dolayısıyla merminin namludan çıkış hızı artar. Fakat süper fırlatıcılar dışında namluyu uzatmak daha fazla yer kaplayacağından, namlunun hareket yeteneğini sınırlamamak ve fazla yer kaplaması bakımından iyi düşünülmesi gereken bir konudur.

Elektromanyetik fırlatıcıların mermi hızının yüksek olmasının yanında ateşleme sıklığı, sistem hafifliği ve bakım kolaylığı gibi birçok avantajları vardır [2, 8]. Ayrıca, elektromanyetik fırlatıcılarda geleneksel (konvansiyonel) silahlarda olduğu gibi itici olarak kullanılan malzemelerin patlama riski yoktur.

Bu tezde, raylı elektromanyetik fırlatıcı teorisi ortaya konulacaktır. Bunun için gemilerde kullanılmakta olan raylı manyetik fırlatıcı sistemleri incelenmiştir. Bu tez kapsamında bu teoriler gelişmiş düzeyde ele alınarak hesaplamalar yapılacaktır. Ayrıca raylı manyetik fırlatıcıya gerekli enerjiyi verebilecek bir güç kaynağı tasarlanacaktır.

Gemilerde manyetik fırlatıcılar, koruma amaçlı ve deniz güçlerine veya kara hedeflerine karşı kullanılmaktadır. Daha yüksek kalibreli fırlatıcılar gerektiğinde elektromanyetik raylı fırlatıcılar öne çıkmaktadır. Bu fırlatıcılarda mermi hızı daha yüksek seviyelere çıkmaktadır.

Elektrikli savaş gemilerine yönelik çalışmaların arttığı günümüzde kontrol kolaylığı olan bu elektromanyetik fırlatıcılar tercih edilebilir. Elektrikli gemilerde tercih edilmesinin bir sebebi de bu fırlatıcının daha sık ateşleme ile kullanılabilmesidir. Yani klasik barut ile ateşleme sistemi olan ateşleyici sistemlerinde ateşlemeler arasında yüksek ısıdan dolayı oluşan sıcaklığın azalması için belli bir miktar bekleme yapılması gerekmektedir. Fakat manyetik fırlatıcılarında yine ısı problemi olmasına karşın bu bekleme süresi daha kısadır.

Elektromanyetik fırlatıcılar, denizaltılarda torpido fırlatmak için, kara savaş araçlarında (örneğin tanklarda) top, mermi fırlatmak için, uçak gemilerinde uçak fırlatmak için kullanılabilir [7].

Bu tezde ilk olarak elektromanyetik fırlatıcıların manyetik denklemleri çıkartılmıştır. Lorentz kuvveti temel alınarak çıkartılan bu denklemlerde elektromanyetik olarak yaratılan kuvvet ile hız ve ivme arasındaki ilişkiler ortaya konmuştur. Tezde, raylar arası mesafe, ray yarıçapı, raydan akan akım, mermi kütlesi gibi değişkenlerin mermi hızına etkisi incelenmiştir. Çalışmaların literatürdeki diğer tasarımlarla benzerlikleri ortaya konmuş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Optimizasyon çalışması olarak 20 kg'lık bir mermiyi 2500 m/s hızla fırlatmanın yolları aranmıştır. Bunun için daha önceden yapılmış olan prototipler incelenmiş ve verilerinden örnekler alınmıştır. Farklılıklar ve üstünlükler ortaya konmuştur. Bunun için Matlab ortamında hesaplama için kodlar yazılmış ve grafik çıktıları yorumlanmıştır.

Güç kaynağı tasarlamak için, NPS School (Monterey, CA, USA)'un tasarımları incelenmiş ve bu tasarımlar örnek alınarak üç farklı sistem için 3 adet güç kaynağı tasarımı yapılmıştır [10, 11]. Bunun için gerekli enerji ihtiyaçları belirlenmiş ve kullanılacak olan kapasitelerin maksimum gerilimi, maksimum akımı, kapasite değerleri, devrenin empedansı, kullanılması gereken endüktanslar ve anahtarlama süresi hesaplanmıştır [6, 10].

2. RAYLI FIRLATICI MANYETİK TEORİSİ

2.1 Temel Teori

Raylı fırlatıcı manyetik teorisi ilk olarak 1901 yılında Birkeland tarafından elektrikli kanon adlı patent ile gündeme gelmiştir. Bu kapsamda elektromanyetik denklemler ve bu denklemler ile mekaniksel bağlantıları ortaya konmuştur. Bir raydan ve mermiden akan akım, ray ve mermi çevresinde bir manyetik alan yaratır. Bu manyetik alan mermi üzerinde bir kuvvet oluşturur. Böylece mermi, bu kuvvet ile ray boyunca ivmelenerek hareket eder ve namlu ucundan fırlar. Bu teorinin temeli Lorentz kuvvetine dayanmaktadır [2]. Lorentz kuvveti,

$$\vec{F} = q(\vec{v}_d \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

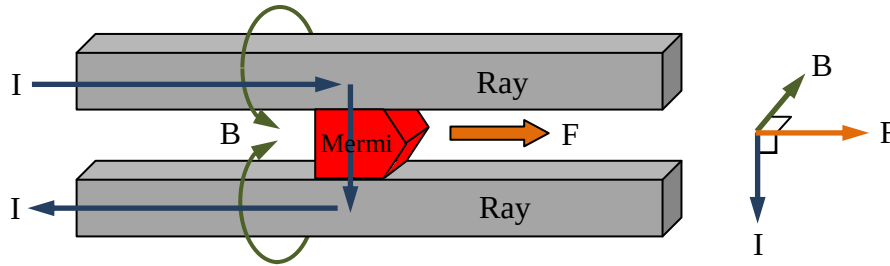
olarak ifade edilir. Bu kuvvet denkleminde

q: Elektrik yükü (C)

v_d : Sürüklenme hızı (drift velocity) (m/s)

B: Manyetik akı yoğunluğu (T)'dir.

Raylardan elektrik akımı akarken oluşan manyetik alan, raylar arasındaki cisim (mermi) üzerine kuvvet uygulayarak cismin (merminin) v_d hızıyla hareket etmesine sebep olur (Şekil 2.1).

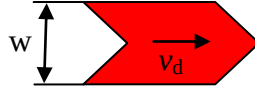


Şekil 2.1: Manyetik alan etkisi ve Lorentz kuvveti [2].

Bu olaydaki elektrik yükü aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$q = I \cdot t = I \cdot \frac{w}{v_d} \quad (2.2)$$

Burada w merminin kalınlığı veya mermi boyunca akımın aktığı yolun uzunluğu veya raylar arası mesafe, v_d merminin sürüklenme hızı, I ise raydan ve mermiden akan akımdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Mermi kalınlığı w ve sürüklenme hızı v_d [2].

Denklem (2.2), denklem (2.1)'de yerine yazılırsa dq yükünün yarattığı dF kuvveti:

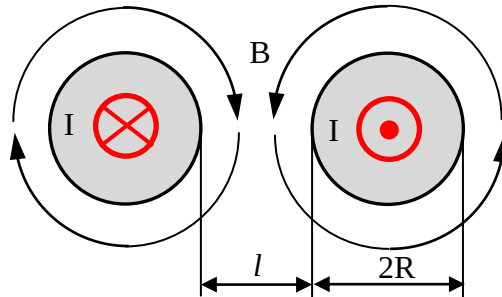
$$dF = dq \cdot v_d \cdot B = \left(I \cdot \frac{dx}{v_d}\right) \cdot v_d \cdot B = B \cdot I \cdot dx \quad (2.3)$$

olur. Biot-Savart yasasına göre yarı sonsuz düz bir iletkenin akımının oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu (endüksiyon) denklemi:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \quad (2.4)$$

olarak yazılır. Bu denklemde μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, I iletkenin akım ve r de iletkenin radyal uzaklığıdır (Şekil 2.3). Bu noktadan sonra iki varsayımda bulunulmuştur:

- Akım sadece rayların ekseninden akmaktadır [2].
- Dikdörtgen kesitli raylar, dairesel kesitli olarak alınmıştır [2].



Şekil 2.3: Raylardaki akımların oluşturduğu manyetik alan [2].

Buna göre denklem (2.4), denklem (2.3)'de yerine yazılırsa Lorentz kuvveti yaklaşık olarak:

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_R^{R+w} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2R+w-x} \right) dx \quad (2.5)$$

olur. Bu denklemdeki integralin karşılığı yerine yazılırsa

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \left[\frac{(R+w)^2}{R^2} \right] = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \left[\frac{R+w}{R} \right] \quad (2.6)$$

elde edilir. Denklem (2.6)'dan sistemin birim uzunluğunun endüktansı olan L' ifadesini elde etmek için kuvvetin

$$F = \frac{1}{2} L' I^2$$

ifadesi göz önüne alınarak;

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{(R+w)^2}{R^2} \right] = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left[\frac{R+w}{R} \right] \quad (2.7)$$

bulunur. Burada L' sistemin birim uzunluğunun endüktansı olup birimi H/m'dir. Kuvvetin kütle ve ivme ile ilişkisini veren

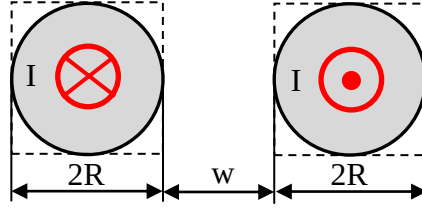
$$F = m.a$$

ifadesi kullanılarak ivme için denklem (2.8) yazılabilir:

$$a = \frac{1}{2m} L' I^2 \quad (2.8)$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\mu_0 I^2 w}{2\pi m R} \quad (2.9)$$

Bu ivme denklemlerinde, m merminin kütlesi, w raylar arası mesafe ve R ise ray yarıçapıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Rayların enine kesit görünümü [2].

Merminin hız denklemi, ivmenin zamana göre integrali alınarak yazılabilir:

$$v = \int a \cdot dt = \frac{\mu_0 I^2 w t}{2\pi m R} \quad (2.10)$$

Hızın tekrar integralinin alınması durumunda merminin ray üzerinde aldığı yol:

$$x = \int v \cdot dt = \frac{\mu_0 I^2 w t^2}{4\pi m R} \quad (2.11)$$

olarak bulunur. Bu denkleme göre merminin hızı ve aldığı yol, akım ile doğru orantılıdır [2, 6, 8]. İvme ve hız, mermi kütlesinin azalmasıyla ve raylar arası açıklığın ve mermi genişliğinin artmasıyla artmaktadır.

Literatürde sunulan çalışmalardan yararlanarak

Ray yarıçapı, $R = 0.1$ m

Raylar arası uzaklık, $w = 0.1$ m

Raydan akan akım, $I = 5$ MA

Mermi kütlesi, $m = 20$ kg

Ray uzunluğu, $x = 10$ m

değerleri ile bir elektromanyetik raylı fırlatıcıdaki merminin ivmesi hesaplanacak olursa, denklem (2.9) kullanılarak mermi ivmesi $a = 5 \times 10^5$ m/s² olarak bulunur (Hesaplama için Ek-1'e bakınız). Bir fırlatıcıdaki merminin hızlanma süresi

$$t_f = \sqrt{\frac{2x}{a}} \quad (2.12)$$

olarak yazılır. Bu denklemde x namlu uzunluğudur. Buna göre $x = 10$ m için yukarıda hesaplanan ivme değeri ile merminin hızlanma süresi 6.3 milisaniye olacaktır. Bu koşullarda merminin namludan çıkış hızı

$$v = \sqrt{2ax} \quad (2.13)$$

bağıntısından yine yukarıdaki değerlerle 3.163 km/s olarak hesaplanır. Kütlesi m, hızı v olan cismin (merminin) kinetik enerjisi,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.14)$$

olur. Buna göre yine verilen örnekteki verilerle mermi 100 MJ'lük kinetik enerji ile namludan çıkacaktır (Hesaplama için Ek-2'ye bakınız). Bu değerler ideal değerlerdir. Bu hesaplarda direnç, endüktans, empedans gibi büyüklüklerin hıza etkileri göz önüne alınmamıştır. Bu büyüklükler, sistemden akan akımı dolayısıyla hızı ve buna bağlı olarak kinetik enerjiyi düşürecek etkenlerdir [2].

2.2 Değişken Manyetik Alan

Raylar arasındaki mesafenin veya mermi kalınlığının rayların yarıçaplarından daha küçük olduğunu düşünerek mermi kalınlığı boyunca manyetik alan sabit olarak kabul edilmişti fakat mermi kalınlığı ve ray boyutları değişebilir. Bu durumda bu değişkenlere göre bir kuvvet denklemi çıkartmak daha uygun olacaktır [2, 6, 8]. İçinden I akımı akan bir rayın, kendisinden r uzaklığında oluşturduğu manyetik alanın yarattığı Lorentz kuvvetini bulmak için;

$$\vec{F}_L = \vec{I} (l \times \vec{B})$$

bağıntısı kullanılır. Kuvvet denkleminde

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}$$

denklemi yerine yazılırsa birim uzunluğa etkiyen kuvvet;

$$dF_L = I \cdot dz \cdot B = I \cdot dz \cdot \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi z} \right) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi z} dz \quad (2.15)$$

olarak elde edilir. Burada dz, mermi genişliğinin (kalınlığının) birim uzunluk elemanıdır. Mermiye etki eden toplam Lorentz kuvvetini bulmak için son denklemin raylar arası açıklık boyunca integrali alınırsa, denklem (2.6)'da da yazıldığı gibi,

$$F_L = \int dF_L = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_R^{R+w} \frac{1}{z} dz = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{R+w}{R}\right) \quad (2.16)$$

elde edilir. Zıt yönde akımların aktığı iki ray arasındaki cisim (mermi) üzerinde yaratılan kuvvetin denklemi

$$F_L = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln\left(\frac{R+w}{R}\right) \quad (2.17)$$

haline gelir. Bu kuvvetle mermi ivmelenmesi,

$$a = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi m} \ln\left(\frac{R+w}{R}\right) \quad (2.18)$$

olacaktır. Bu ivme denkleminin zamana göre integrali alındığında hız denklemi;

$$v = \frac{\mu_0 I^2 t}{2\pi m} \ln\left(\frac{R+w}{R}\right) \quad (2.19)$$

olarak elde edilir. Hız denkleminin de integraliyle merminin konumu veya namlu içindeki yeri için

$$x = \frac{\mu_0 I^2 t^2}{4\pi m} \ln\left(\frac{R+w}{R}\right) \quad (2.20)$$

bağıntısı bulunur. Bu tezde bir elektromanyetik raylı fırlatıcının gerçek değerlerle performansını incelemek için sistemin büyüklükleri için aşağıdaki değerler kullanılmıştır:

Ortalama giriş akımı, $I = 5 \text{ MA}$

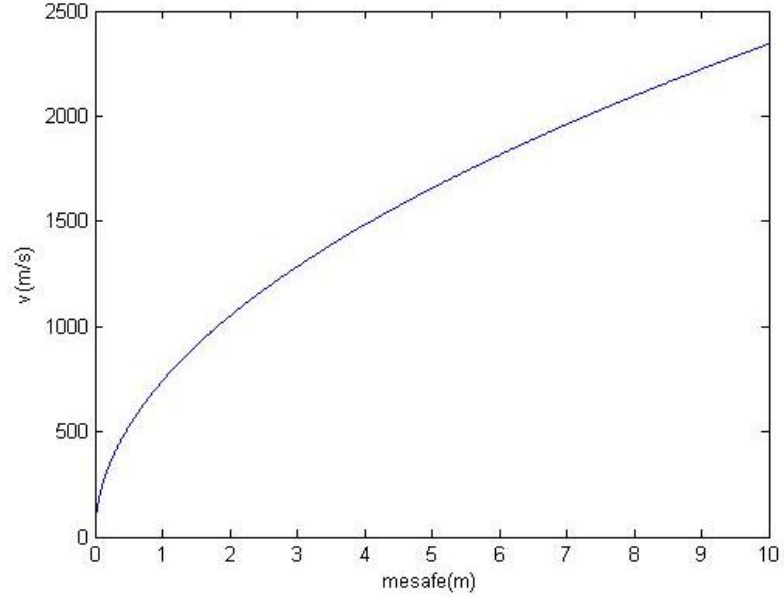
Mermi kütlesi, $m = 20 \text{ kg}$

Ray uzunluğu, $x = 10 \text{ m}$

Raylar arası mesafe, $w = 0.2 \text{ m}$

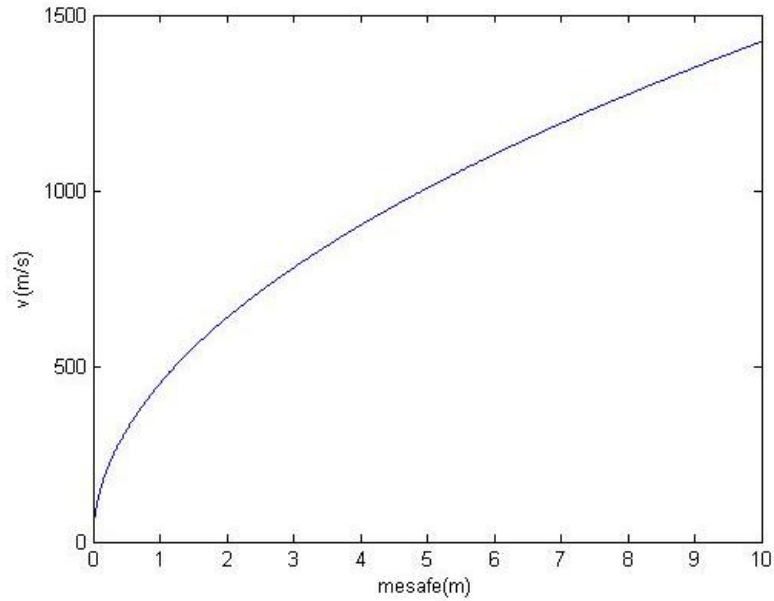
Ray yarıçapı, $R = 0.1 \text{ m}$

Bu değerlerle denklem (2.19) ve denklem (2.20) kullanılarak yapılan hesaplardan yer değiştirmeye göre hızın değişimi için, Matlab'te Ek-2'de verilen kodlarla şekil 2.5'deki grafik elde edilmiştir.



şekil 2.5: Hızın namlu içindeki mesafe ile değişimi ($w = 0.2$ m, $R = 0.1$ m).

Raylı sistem boyutlarının mermi hızına etkisini göstermek için raylar arası mesafeyi $w = 0.1$ m değerine düşürüp ray yarıçapını $R = 0.2$ m'ye çıkarıldığında elde edilen grafik ise şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu hesaplamada kullanılan Matlab kodları Ek-2'de verilmiştir.



şekil 2.6: Hızın namlu içindeki mesafe ile değişimi ($w = 0.1$ m, $R = 0.2$ m).

Benzetimler göstermektedir ki raylar arası mesafenin yarıya inmesi, ray yarıçapının iki katına çıkması, hızı önceki duruma göre yaklaşık olarak 1000 m/s kadar düşürmüştür. Çünkü ray yarıçapının artırılması manyetik alanın yarattığı kuvvetin mermi üzerindeki etkisinin azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca raylar arası mesafenin azalması, mermiye etkileyen kuvvetin de azalmasına neden olur. Bu iki etkenin birleşik etkisi sonucu merminin hızı azalır.

Robert E. Williams (NPS School, Monterey, CA, USA)'ın yapmış olduğu tasarımın detayları incelenmiş ve [12]'deki veriler kullanılarak merminin hızı ile merminin yer değiştirmesinin değişimi incelenmiştir. Raylar arası mesafenin yarıya indirilmesi, ray yarıçapının iki katına çıkartılması beklendik bir etki yapmış ve mermi hızı azalmıştır. Bu tezde yapılan benzetimlerde de aynı etki gözlenmiştir. Bu tezde, raylar arası mesafenin ve ray yarıçapının değiştirilmesi ile 20 kg mermi ağırlığı için istenen mermi hızı 2500 m/s'ye ulaşılmıştır. Bu konuda Bölüm 4'de ve Sonuçlar kısmında detaylı açıklama ve yorumlar yapılmıştır. Bu kapsamda NPS School'un [12] tasarımıyla bu tezin benzetim sonuçları örtüşmekte ve birbirini desteklemektedir.

2.3 Kompleks Elektromanyetik Fırlatıcı Teorisi

Elektromanyetik raylı fırlatıcı sisteminde bu noktaya kadar akım sabit olarak düşünülmüştü aslında akım, kaynağa, endüktansa, dirence ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Denklem (2.17) ile verilen kuvvet denklemi yine mermi hareketlerinin incelenmesi için kullanılacaktır. Genel olarak manyetik alan içinde bir A kesitinden geçen manyetik akı,

$$\Phi_B = \int \vec{B} dA \quad (2.21)$$

denklemini ile ifade edilir.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi z}$$

ile $dA = x \cdot dz$ denklemini kullanarak integral alındığında;

$$\Phi_B = \int \vec{B} dA = \int \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi z} \right) x dz = \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \int_R^{R+w} \frac{dz}{z} = \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \ln \left(\frac{R+w}{R} \right) \quad (2.22)$$

bulunur. Bu denklemde

w: Raylar arası uzaklık,

R: Rayın yarıçapı,

z: Mermi uzaklığı,

dz: z ekseninde birim uzunluk elemanı,

x: ray uzunluğudur.

Denklem (2.22) tek raya göre yazılmış manyetik akı bağıntısıdır. İki ray için hesap yapılırken bu denklem iki ile çarpılmalıdır. Manyetik akı bağıntısından yararlanarak ray endüktansı:

$$L_r = \frac{\Phi_B}{I} \quad (2.23)$$

olarak yazılır. Bu denkleme göre (2.22) denkleminde;

$$L_r = \frac{\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 x}{2\pi} \ln \left(\frac{R+w}{R} \right) \quad (2.24)$$

elde edilir. Bu denklemden merminin rayda ilerledikçe ray endüktansının da artacağı görülmektedir.

Raylardaki elektriksel direnç merminin hareket etmesiyle, sıcaklık ve akım ile değişir. Elektriksel direnç raylı fırlatıcı sistemin performansını ciddi bir şekilde olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklığı göz önüne almadan iki raydan oluşan sistemin eşdeğer elektriksel direnci,

$$R_{ri} = \frac{2\rho x}{A_{cs}} \quad (2.25)$$

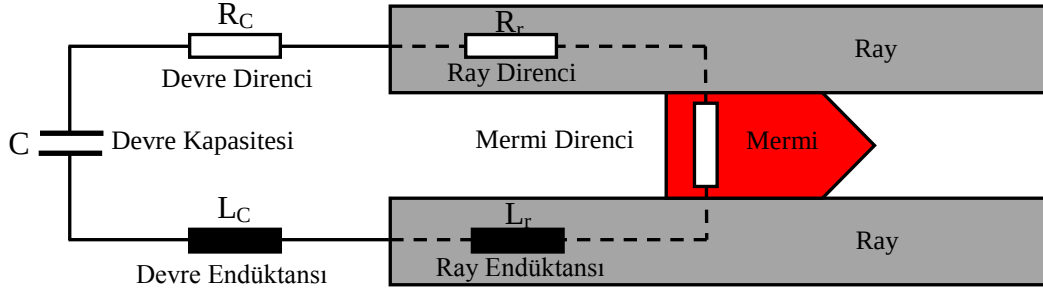
olur. Bu denklemde, x akımın geçtiği ray uzunluğu olmak üzere ρ ray malzemesinin öz direnci ve A_{cs} akımın geçtiği iletkenin enine kesitidir.

Kullanılan örnekte A_{cs} değeri $0,04 \text{ m}^2$ alınmıştır. Sıcaklığa bağlı direnç denklemi;

$$R_{ri} = R_0 [1 + \alpha(\Delta T)] \quad (2.26)$$

olarak yazılır. Bu denklemde, R_{ri} son sıcaklıktaki direnç değeri, R_0 başlangıç sıcaklığındaki direnç değeri ve α direncin sıcaklık katsayısıdır. Bu tezde sıcaklık göz önüne alınmadan, mermi ve devre dirençleri sabit olarak kabul edilmiştir.

2.4 Elektromanyetik Fırlatıcının Elektrik Devresi



Şekil 2.7: Kapasite kaynaklı elektrik devresi [12].

Şekil 2.7’de elektrik devresi gösterilen raylı fırlatıcı sisteminde, sistem için gereken enerji, kondansatörlerde biriktirilen enerjiden sağlanmaktadır [12]. Kondansatörleri besleyen gerilim:

$$u = \frac{q}{C} \quad (2.27)$$

olur. Bu denklemde q kondansatörde biriktirilen elektrik yükü ve C de kondansatörün kapasitesidir.

Raylı fırlatıcı modelinde [12] numaralı referanstaki gibi $q = 25000$ Coulomb ve $C = 2$ Farad olarak alınırsa (2.27) denkleminden kondansatörün uçlarındaki gerilim $u = 12500$ V ve kondansatörde biriktirilen elektrik enerjisi $W_C = 0,5 \times C \times u^2$ denkleminden 156 MJ bulunur.

Şekil 2.7’deki devrenin devre denklemi yazılırken, içinden I akımı geçen bir R direnci üzerindeki gerilim düşümü $R.I$ ve L endüktansındaki gerilim düşümü ise

$$u_L = \frac{d(LI)}{dt} \quad (2.28)$$

bilgisi kullanılacaktır. Buna göre Şekil 2.7’de verilen devrenin devre denklemi;

$$\frac{q}{C} + R_c I + R_r I + R_p I + L_c \frac{dI}{dt} + \frac{d(L_r I)}{dt} = 0 \quad (2.29)$$

olur. Bu denklemde C devrenin kapasitesini, q bu kapasitede biriktirilen elektrik yükünü, R_c devrenin direncini, R_r rayın direncini, R_p merminin direncini, L_c devrenin ve L_r rayın endüktansını göstermektedir. [12] numaralı referansta aynı devre için devre direnci R_c = 205 μΩ, mermi direnci R_p = 20 μΩ ve devre endüktansı L_c = 5 μH olarak ölçülmüştür.

(2.29) denkleminde son terim

$$\frac{d(L_r I)}{dt} = L_r \frac{dI}{dt} + I \frac{dL_r}{dt} \quad (2.30)$$

olarak yazılabilir [12]. Bu denklemde de

$$\frac{dL_r}{dt} = \frac{d(L_r' x)}{dt} = L_r' \frac{dx}{dt} = L_r' v \quad (2.31)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$L_r' = \frac{dL_r}{dx} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{R+w}{R} \right) \quad (2.32)$$

rayın birim uzunluğunun endüktansını ifade eder. Bu bilgiler kullanılarak (2.29) denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{q}{C} + R_c I + R_r I + R_p I + L_c \frac{dI}{dt} + L_r \frac{dI}{dt} + L_r' v I = 0 \quad (2.33)$$

Bu denklemden, akımın zamana göre türevi aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\left[\frac{q}{C} + I(R_c + R_r + R_p + L_r' v) \right]}{L_c + L_r' x} \quad (2.34)$$

Rayların elektriksel dirençlerinden dolayı ısınmasını göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Çünkü zamanla sıcaklık, yapının deformasyonuna sebep olabilir.

Sürtünme ihmal edilirse, ısı değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta Q = \int_0^t R_r I^2(t) dt \quad (2.35)$$

Raydaki ısı değişimi:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{m_r c_h} \quad (2.36)$$

olarak yazılır. Burada m_r rayın kütlesi, c_h özgül sıcaklığıdır. Rayın kütlesi aşağıdaki denklem ile hesaplanır [12].

$$m_r = \rho_r A_{cs} \times \quad (2.37)$$

Bu denklemde ρ_r ray malzemesinin yoğunluğudur.

2.5 Malzeme Özellikleri

Çizelge 2.1’de bazı ray malzemelerinin özdirenç, sıcaklık katsayısı, özgül sıcaklık ve yoğunluk gibi malzeme özellikleri verilmiştir. Mermi hızı, ray malzemesi türünden oldukça etkilemektedir. Tungsten malzemeden yapılan rayda, bakır raya göre mermi hızı 5 m/s kadar azaldığı, gümüş malzemeden yapılan rayda ise mermi hızı 6 m/s kadar arttığı görülmüştür [12].

Çizelge 2.1: Malzeme özellikleri [12].

Ray Malzemesi	Özdirenç $\Omega.m$	Sıcaklık Katsayısı $\alpha(1/K)$	Özgöl Sıcaklık $c_h(J/kgK)$	Yoğunluk $\rho_r(kg/m^3)$
Bakır	17	4.3×10^{-3}	386	8230
Tungsten	54	4.5×10^{-3}	134	19250
Gümüş	16	4.1×10^{-3}	236	10490

2.6 Ray Direnci ve Isınması

Rayın ısınması birçok faktöre bağlıdır. Bunlar:

- Ray direnci,
- Akım genliği ve süresi,
- Mermi ile rayın sürtünmesi
- Ray uzunluğu

NPS School’da Robert E. Williams’ın [12] yapmış olduğu testler sonucu ray direncindeki artışın merminin ray boyunca yer değiştirmesi ile doğru orantılı olarak değiştiği gösterilmiştir. Sözü edilen bu çalışmada fırlatma bittiği anda ray direnci $R_r = 11 \mu\Omega$ olarak llmştir. Devre direnci ise $R_c = 205 \mu\Omega$ olduğu için ray direncinin devreyi çok etkilemediği anlaşılmıştır [12].

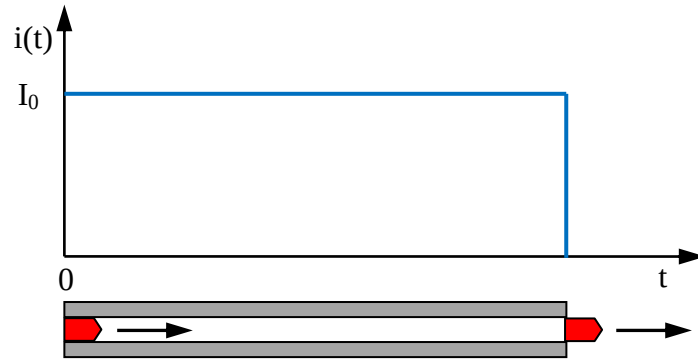
Raylarda oluşan ısı enerjisi

$$dE = R_r I^2 dt \quad (2.38)$$

formülü ile ifade edilir. [12]’de tek bir atışta ray sıcaklığının 1 Kelvin ($0,26^\circ\text{C}$) arttığı hesaplanmıştır. Bu değer rayların bakırdan imal edildiği durum için geçerlidir. Benzer değerler gümüş ve tungsten için de hesaplanmıştır. Devrenin direnci, ray direncinden çok büyük ($R_c \gg R_r$) olduğu için akımın dirençlerde oluşturduğu ısı kayıplar, raylardan çok, çoğunlukla devre direnlerizerinde meydana gelmektedir. Dolayısıyla atış yapıldığı zaman rayda sıcaklık artışından dolayı bir şekil bozukluğu meydana gelmemektedir [12].

3. ENERJİ DEPOLAMA CİHAZLARI

Bir elektromanyetik raylı fırlatıcının birkaç kilogram mertebesinde ağırlığa sahip bir mermiyi yaklaşık olarak 10 milisaniye'lik bir sürede istenen hızda fırlatabilmesi için GW (Giga Watt) mertebesinde güce ihtiyacı vardır. Ayrıca bu gücü karşılayacak güç kaynağının elektromanyetik fırlatıcıların dakikada 6-12 fırlatış yapacağını göz önüne alarak bu çalışma temposuna uygun yapıda tasarlanması gerekir. Bunun yanında fırlatıcının namlu kısmından maksimum yararlanabilmek için güç kaynağından elde edilecek akımın, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, hızla belli bir I_0 değerine çıkması, mermi namluyu terk edene kadar bu akım değerinde sabit kalması ve merminin namluyu terk ettiği anda akımın sıfıra düşmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1: İdeal mermi darbe akımı [2].

Bu şekilde akım üreten akım kaynakları konusunda iki seçenek öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi kondansatörlerden oluşan güç kaynaklarıdır [13]. İkincisi de alternatif gerilim generatörlü, doğrultucu devreli güç kaynaklarıdır. Bu iki kaynak türünün de birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır.

3.1 Kompanzasyonlu Darbe Alternatörü

Kompanzasyonlu darbe alternatörü veya diğer adıyla “kompülsatör” tek fazlı veya çok fazlı sargılarla kompanze edilmiş bir alternatif akım üreticidir. Bu üreticinin çıkışına doğrultucu devresi bağlanarak elektromanyetik fırlatıcı beslenir. Bunlarda kullanılabilecek aktif, pasif ve seçici pasif olmak üzere üç çeşit kompanzasyon seçeneği vardır.

Kompulsatörler, düşük güçlü bir kaynaktan beslenen kondansatörlerde enerjinin depolanıp istenildiği zaman kısa sürede, yüksek güçte çıkış verebilen üreteçlerdir. Kompulsatördeki sargılar normal alternatörlerdekilere farklıdır. Bunlardaki sargılar düşük endüktanslı olduğu için ani akım değişimleri üretirler.

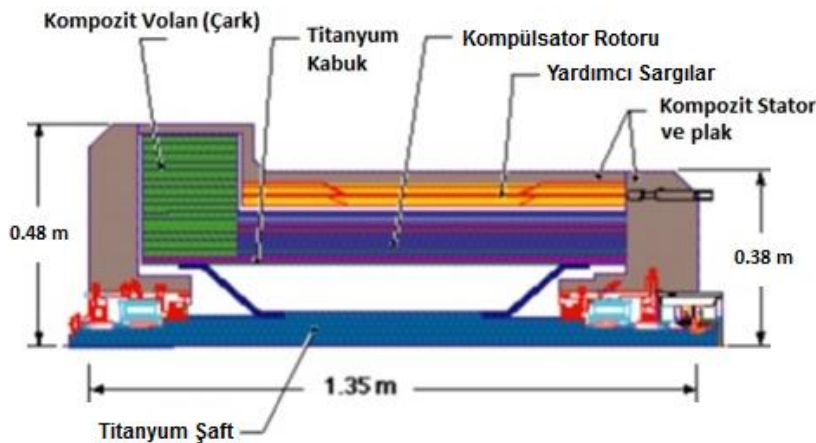
Aktif kompanzasyonda rotor sargısına seri bağlı ve rotor sargısının aynısı olan bir sargı daha vardır. Bu alternatörde rotor sargıları kompanzasyon sargısının altında dönmektedir. Bu devrede kompulsatör empedansı olmadan makine tüm gücünü yüke aktarır.

Aktif kompanzasyon, elektromanyetik fırlatıcılar için uygun bir güç kaynağı kompanzasyon tekniği değildir. Çünkü darbe akımı çok kısa sürelidir ve bu hızlı değişen darbe akımı yük endüktansı uçlarında aşırı gerilimler yaratır.

Pasif kompanzasyonda aktif sargıların yerine düşük değerli empedanslar kullanılmıştır. Armatürün tam dönmesi için kompulsatör empedansı düşük kalmıştır. Kompulsatörün çıkış akımı, yüksek tepe değerli, sinüsoidal sönümlü darbe akımıdır. Darbe akımının hızla yükselmesi ve düşmesi sebebiyle ideal mermi darbe akımı bu tip kompulsatörden elde edilemez [10].

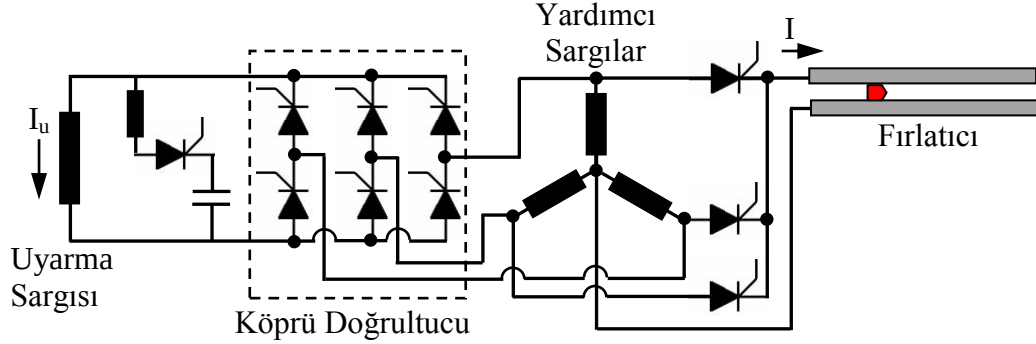
Son olarak seçici pasif kompanze yönteminde, geleneksel pasif yöntemin aksine eksenel simetrik bir koruyucu ile birlikte kompanze akımlarını ayrı kısa devre akımı sargılarından akmaya zorlar. Böylece rotor pozisyonundaki makine endüktans ayarları kontrol edilerek kompulsatör çıkışındaki akımın dalga şekli ayarlanır [10].

Kompulsatörler için bir başka seçenek 3 fazlı çok kutuplu makine kullanmaktır. Bu makineler çıkış akımında daha esnek kontrol sağlamaktadır. Şekil 3.2’de bir örnek kompulsatör gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Bir kompulsatör [10].

Bu komp lsat rler kendi uyarma akımları ile yükü beslemek için  ekil 3.3'deki AC-DC dönüştürücüye ihtiyaç duymaktadır. Şekil 3.3'deki devrede alternatif akım tristörler ile DC'ye çevrilip yardımcı sargılar üzerinden fırlatıcıya uygulanmaktadır. Bu devrede uyarma akımı tam dalga köprü doğrultucu ile doğrultulmaktadır.

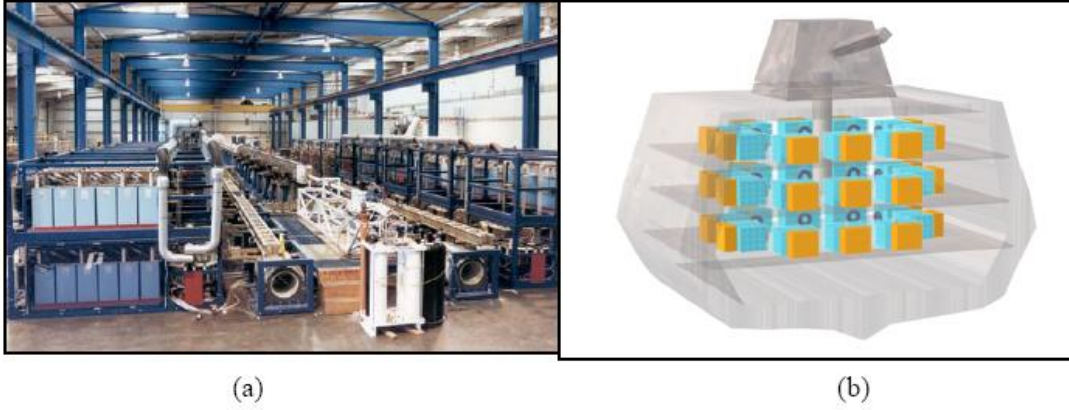


Şekil 3.3: AC-DC dönüştürücü [10].

Teknas Üniversitesi Austin Merkezi'nde 500 Hz'lik sistem için 352 adet, 2 kHz'lik sistem için 664 adet tristör kullanılmıştır. Komp lsat rler ile ilgili problemlerden birisi bu sistemlerin kolaylıkla geli tirilememesidir. G   çıkışında değişiklik yapma gereksinimi durumunda başka bir kompülsatör alınarak eskisiyle paralel çalıştırmak gerekir. Yeni sisteme uygun olarak AC-DC dönüştürücünün de değişmesi gerekir. Komp lsat rler ticari ama dan daha çok araştırma amaçlı üretildiklerinden piyasada bulmak zordur. Bu nedenle araştırma kurumları elektromanyetik fırlatıcılardan çok komp lsat rleri geliştirmekle ilgilenmektedir [10].

3.2 Kapasite Temelli Sistem

Manyetik fırlatıcı araştırmalarında en çok kullanılan güç kaynağı kapasitelerdir. Genellikle kapasiteler gruplanarak kullanılır. Gereken enerji miktarının artması durumunda kapasitelerin arttırılması gerekir [13]. Bu sistemin yapısı oldukça basittir. Kapasite, darbe akımı şekillendirici endüktans, yüksek güçlü anahtarlar, kapasite için koruyucu diyot, anahtarlar için tetikleyici ve kontrol edici elemanlar bu sistemin temel bileşenleridir [14]. Bu bileşenler piyasadan rahatlıkla bulunabilmektedir. Bu elemanlarla kapasite çıkışının manyetik fırlatıcıya sabit bir darbe akımı verecek şekilde tasarımı yapılır. Kapasiteler enerji kaynağı olarak kullanılacaksa enerji yoğunlukları en az 2.5 MJ/m³ olmalıdır [12].



Şekil 3.4: a) Kapasite bankları, b) Gemide kapasite yerleşimi [12].

3.3 Güç Kaynağı Tasarımı

Kompülatörlere kıyasla düşük enerji yoğunluklarına rağmen kolay elde edilişi, gerektiği zaman güç artımı yapılabilirliği, laboratuvar ve savaş şartlarına uygun olması sebebiyle kapasiteler daha çok tercih edilmektedir. Kapasitif güç kaynağına örnek olarak NPS School'da (Monterey, CA, USA,1996) Fred Charles Beach tarafından yapılmış olan [6] tasarım göz önüne alınmıştır.

Tasarlanacak kapasitif güç kaynağı ile 2 kV'ta 1 MA tepe değerli, 500 µs süreli darbe akımı üretebilmek hedeflenmiştir [6]. Bu darbe akımını üretebilmek için gerilimi 10 kV, kapasitesi 2 mF olan kondansatörler tercih edilecektir (ref: General Atomics, Energy Products, Capacitors) [13]. Böylelikle kondansatörlerin her biri 50 kJ enerji depolayabilecek durumda olacaktır. Bu tasarım 5 kondansatör grubu olarak ele alınmıştır. Her grupta paralel iki kondansatör bulunmaktadır. Böylece toplamda 10 adet kapasite kullanılmıştır (Şekil 3.5). Transformator girişi 10 kV, 200 kA, transformator çıkışı ise 2 kV, 1000 kA olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Bu devrenin empedansı;

$$Z_0 = \frac{V_{yük}}{2I} = \sqrt{\frac{L_{Toplam}}{C_{Toplam}}} \quad (3.1)$$

olur. Bu denklemde

$V_{yük}$: Kapasite gruplarının toplam gerilimi

I : Boşalma sırasındaki akım

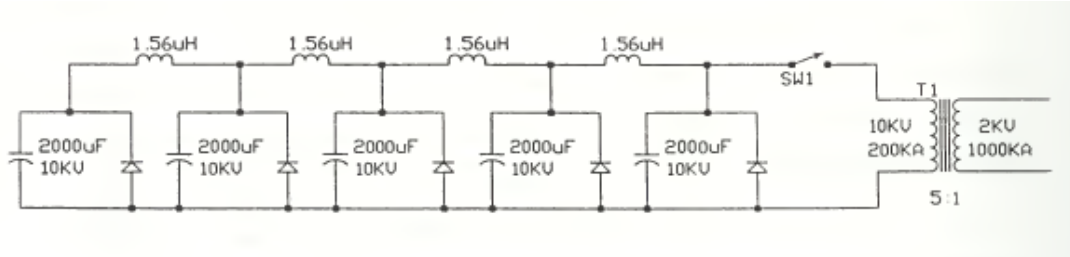
L_{Toplam} : Kapasite grupları arasındaki endüktansların toplamı (toplam endüktans)

C_{Toplam} : Kapasite gruplarının eşdeğer kapasitesidir.

Z_0 kullanılarak darbe akımı süresi hesaplanabilir:

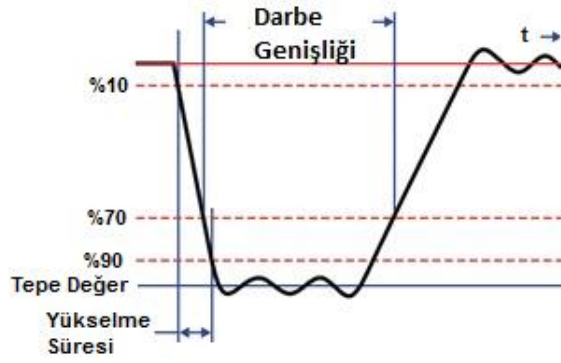
$$t_{darbe} = 2C_{Toplam}Z_0 \quad (3.2)$$

10 kV'ta 500 μ s boyunca 200 kA sabit akım akıtan bu devre için denklem (3.1) ve denklem (3.2)'den $Z_0 = 0.25\Omega$ ve $L_{Toplam} = 6.25 \mu H$ olarak hesaplanır. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi bu toplam endüktans, kapasiteler arasına $6.25 \mu H/4 = 1.56 \mu H$ endüktansa sahip bobinler yerleştirilerek elde edilir. Böylece transformatörün birincil tarafında 10 kV'ta 200 kA tepe değerli, 500 μ s süreli akım elde edilmiş olur. Birincil ve ikincil taraftaki güçlerin korunumundan, transformatörün ikincil tarafında gerilim 2 kV'a düşürülerek, 1000 kA'lık akım elde edilmiş olur [6].



Şekil 3.5: Güç kaynağı devresi [6].

Şekil 3.5'deki devre, darbe şekillendirme devresi (PFN: Pulse Forming Network) olarak geçmektedir (ref. General Atomics, Pulse Forming Network) [14]. Bu devrenin özelliği süresi ayarlanabilir darbe akım vermesidir. Bu devrelerde genellikle darbe akımının tepe değerinin %10'u ile %90'ı arasında geçen süre darbe akımının yükselme süresi olarak alınır. Darbe süresi (genişliği) de darbe akımının, tepe değerinin %70'nin üstünde olduğu süre olarak tanımlanır [14]. Darbe şekillendirme devreleri, elektromanyetik fırlatıcılar, lazer, radar gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Darbe şekillendirme devresi (PFN) darbesi.

Bu tezde 20 kg'lık mermi hızlandırıldığı için ivmelenmesi 2. Bölüm'de verilen örnekteki ivmelenmeden yüksektir. Dolayısıyla daha uzun süreli bir darbe akımına ihtiyaç vardır. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere mermi namludan çıkana kadar darbe akımı beslemesi yapmak gerekmektedir [2]. Çünkü manyetik kuvvetten tam olarak yararlanabilmek için mermi namludan çıkana darbe akımının uygulanması gerekir. Akım, mermi namludan çıkmadan kesilirse yani daha kısa süre uygulanırsa namlu çıkışında tasarımda hedeflenen 2500 m/s hıza ulaşamaz.

Bu tezin tasarım parametreleri olarak 2 kV'ta 5 MA tepe değerli, 8 ms süreli darbe akımı elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu darbe akımını üretebilmek için 10 kV'ta 1 MA'lık darbe akımı üretebilecek değerlerde kapasitelere gereksinim vardır. Ayrıca kondansatörlerin bu darbe akımını 8 milisaniye boyunca verebilmesi gerekmektedir. [6] numaralı referansta verilen örneğe kıyasla bu tezin darbe akımı süresi oldukça uzundur ($8 \text{ ms} \gg 500 \mu\text{s}$). Yine bu örneğin giriş gücü 2 GW olarak çıkmıştır ve $2 \cdot 10^9 \text{ W} \cdot 500 \mu\text{s} = 1 \text{ MJ}$ enerji demektir.

Bu tezde yapılan tasarımın giriş gücü ise 10 GW olarak hesaplanmıştır. Bu güçle tez tasarımından elde edilecek enerji $10 \cdot 10^9 \text{ W} \cdot 8 \text{ ms} = 80 \text{ MJ}$ 'dür. Güçler ve enerjiler arasındaki farkın en büyük sebebi bu tezde mermi kütlesinin 20 kg olarak seçilmiş olmasıdır. Giriş ortalama akımı çok büyüktür. [6]'daki örnekte ise 150 gramlık bir mermi kütlesi söz konusudur. Giriş ortalama akımı bu tezde konu edilen giriş ortalama akımından 5 kat daha düşüktür. Dolayısıyla sözü edilen örnekte merminin ivmelenmesi çok hızlıdır ve gerekli olan darbe akımı süresi μs 'ler mertebesinde. Fakat bu tezde darbe akımı süresi 8 ms çıkmıştır. Çünkü mermi kütlesi 20 kg seçilmiştir ve 80 MJ'lük enerji ihtiyacı vardır. Bu enerji 1600 adet 50 kJ'lük kapasiteyle sağlanabilir (Çizelge 3.1), (1. tasarım). Bu ise maliyet açısından büyük bir problemdir. Bu kadar kapasiteyi denizaltılara ve gemilere sığdırmak zordur.

Mermi kütlesi 200 grama düşürüldüğü zamanki gerekli darbe akımı süresi 799 μ s olarak çıkmıştır (Hesaplama için Ek-7). Dolayısıyla bunun için gereken enerji ihtiyacı 8 MJ'dur. 50 kJ'lük kapasitelerden 160 adet seçilmesiyle 8 MJ'luk enerji kaynağı sağlanmış olur (2. tasarım). Denklem (3.1) ve Denklem (3.2)'ye göre Z_0 ve t_{darbe} süresi hesaplandığında $Z_0 = 0.005 \Omega$, $C_{toplam} = 80 \text{ mF}$ ve $L_{toplam} = 2 \mu\text{H}$ olarak bulunur. Bu şekilde bir tasarımla 200 gramlık bir mermi 5 MA'lık bir akımla fırlatılabilir. Fakat bu kadar yüksek bir akımı kablo ile taşımak ayrı bir problemdir. Maliyet açısından düşünülürse güç kaynağı projenin en pahalı kısmıdır.

Tasarlanan güç kaynağı için General Atomics'in C serisi 32349 no'lu kapasiteleri seçilmiştir [13]. Seçilen bu kapasitenin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Kapasite teknik özellikleri [13].

Ürün No.	Kapasite	Maksimum Gerilim	Enerji	Maksimum Akım	Dolma/Boşalma Ömrü	Endüktans
32349	206 μF	22 kV	50 kJ	150 kA	3000	45 nH

Bu kapasitenin eni, genişliği ve yüksekliği, sırasıyla 305 mm x 407 mm x 696 mm'dir. Buna göre her bir kapasite yaklaşık $0,086 \text{ m}^3$ yer kaplayacaktır [13].

Daha uygulanabilir bir güç kaynağı tasarımı yapabilmek için tasarım kriterlerinde değişiklikler yapılmıştır (3. tasarım). Yeni tasarımda;

$$I = 1000 \text{ kA}$$

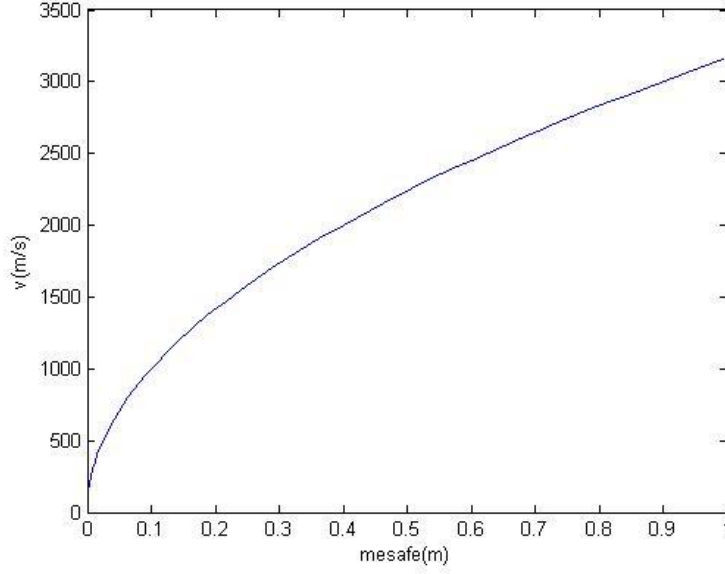
$$R \text{ (ray yarıçapı)} = 0.1 \text{ m}$$

$$w \text{ (raylar arası mesafe)} = 0.25 \text{ m}$$

$$m \text{ (mermi kütlesi)} = 50 \text{ gr}$$

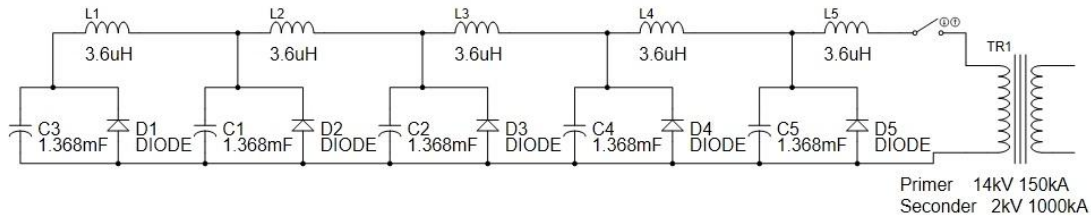
$$x \text{ (namlu uzunluğu)} = 1 \text{ m}$$

alınmıştır. Bu şekilde bir tasarım ile mermi namludan yaklaşık 3000 m/s hızla çıkmaktadır (Şekil 3.7). Bu merminin namluyu terk edene kadar namlu içinde geçirdiği süre Ek-8'deki Matlab kodlarıyla 630 μ s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.7: Mermi hız-yer değiştirme eğrisi.

Bu tasarım değerlerine göre $2 \text{ kV} \times 1000 \text{ kA} = 2 \text{ GW}$ 'lık bir güç ihtiyacı vardır. Bu güç, $630 \text{ } \mu\text{s}$ kullanılacağına göre 1260 kJ 'luk bir enerjiye ihtiyaç vardır. Buna göre 50 kJ 'luk 25 adet kapasite ile bu enerji ihtiyacı karşılanabilir. Böylece daha uygulanabilir bir tasarım yapılmış olur. Kapasiteler toplamda $2,159 \text{ m}^3$ yer kaplayacaktır. Transformator giriş tarafındaki değerler ise 14 kV ve 150 kA olacak şekilde düşünülmüştür. Denklem (3.1) ve denklem (3.2)'ye göre $Z_0 = 0.046 \text{ } \Omega$, $C_{\text{toplam}} = 6.84 \text{ mF}$ ve $L_{\text{toplam}} = 14,4 \text{ } \mu\text{H}$ olarak hesaplanır. Aralarında paralel bağlı her 5 kapasite bir grup olarak düşünülmüştür. Bu şekilde 5 grup tasarlanıp gruplar arasına $3,6 \text{ } \mu\text{H}$ 'lık endüktanslar yerleştirilmiştir. Güç kaynağında kullanılmak üzere Çizelge 3.1'de teknik özellikleri verilen kapasite seçilmiştir. Tasarlanan bu yeni güç kaynağının devresi, Proteus programında çizilerek Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Tasarlanan güç kaynağı devresi.

4. FIRLATICI TASARIMI OPTİMİZASYONU

Bu bölümde; 20 kg'lık bir merminin hızına, ray açıklığı ve ray yarıçapının etkisi incelenecektir. Mermi hızının 2500 m/s olması için optimum açıklık ve yarıçap aranacaktır. Giriş akımı 5 MA olarak kabul edilecektir. Bu akım değeri, Robert E. Williams'ın NPS School, CA, USA'de geliştirmiş oldukları prototipin giriş akımı değeridir [12]. Bölüm 2'de çıkarılan denklemler göz önüne alındığında (denklem (2.17), denklem (2.18), denklem (2.19)) ve hesaplamalar sonucu akım mertebesinin 5 MA civarında alınması gerektiği anlaşılmıştır. Çizdirilen grafiklerden de anlaşılabacağı üzere bu 5 MA değeri, istenen hıza ulaşmak için uygun bir seçimdir.

Mermi hızının ray yarıçapı ve raylar arası genişlikle ilişkisini görmek için grafikler çizdirilecek ve sonuçları yorumlanacaktır. Ayrıca kütlenin ve akımın hıza etkisi incelenecektir. Bu etkiler göz önüne alınarak optimum fırlatıcı tasarımı yapılacaktır. Tasarım için gereken benzetimler Matlab ile yapılmıştır ve Matlab kodları ekler bölümünde verilmiştir.

Yapılacak analizlerle sistem parametrelerinin hız ile etkileşimleri görülerek sistemin optimizasyonu yapılacaktır. Sistem parametrelerinin hız ile etkileşimi verildikten sonra oluşturulmuş olan algoritmaların akış diyagramları anlatılacaktır. Bu akış diyagramlarına göre yazılmış program kodları tez sonundaki eklerde verilecektir. Bu programlar iki kısımdan oluşmaktadır:

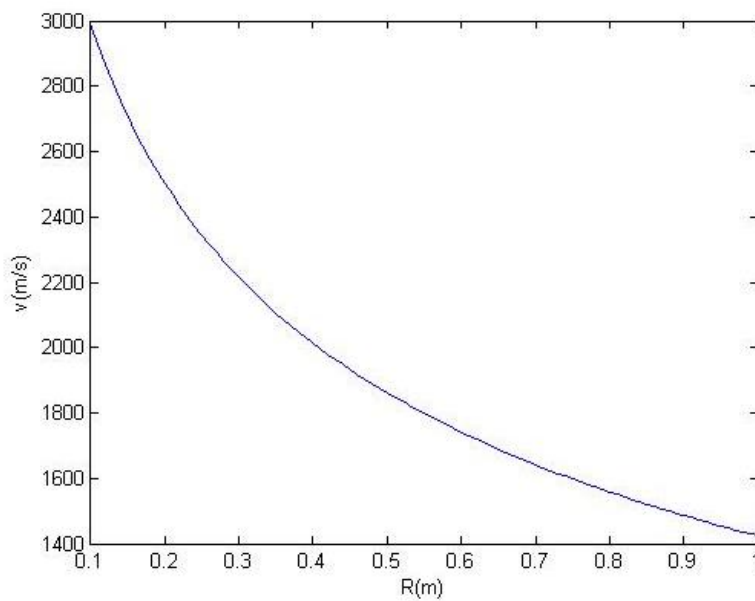
- Sistem parametrelerinin pozitif verim yönünde değiştirilmesi
- Sistem parametrelerinin negatif verim yönünde değiştirilmesi

Sistem parametreleri pozitif verim yönünde değiştirildiğinde istenen hız değerine ulaşamama olasılığı vardır. Bundan dolayı namlu uzunluğu parametresi de kullanılarak istenen hız değerine ulaşılmaya çalışılacaktır. Böylelikle hıza etki eden ray yarıçapı R ve raylar arası açıklık w değerlerini, istenen hız elde edecek şekilde (negatif verim yönünde) değiştirmek mümkün olacaktır.

4.1 Ray Yarıçapı - Hız Etkileşimi

Ray yarıçapının (R) artması ile mermi üzerinde manyetik alan yoğunluğunun azalması sonucu manyetik kuvvet de azalacaktır. Kuvvetin azalması ile ivme ve hız da azalacaktır. Benzetimde de görüldüğü gibi R arttıkça hız azalmaktadır. Bu inceleme ile ilgili Matlab kodları Ek-3’de verilmiştir. Ek-3’deki kodlarla maksimum ivme $4,479 \times 10^5 \text{ m/s}^2$, maksimum hız ise 2993 m/s olarak hesaplanmıştır. Rayların yarıçapları 0.1 metreden 1 metreye değiştirilerek hız ile yarıçap ilişkisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Daha önceden yapılan prototipler, ray yarıçapları 0.1, 0.2, 0.3 m gibi değerler alınarak tasarlanmıştır. Bundan dolayı ray yarıçapının hıza etkisini göstermek için 0.1 m ile 1 m aralığında hız değişimi çizdirilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere ray yarıçapı 0.1 m iken hız maksimumdur. Dolayısıyla R yarıçapı 0.1 metre olarak kabul edilmiştir. Amerika’nın California eyaletindeki NPS School çalışanları da R yarıçapını 0.1 metre olarak kabul etmiştir [2]. Bu, akım taşıma açısından uygun bir ray yarıçapı değeridir.

Ray yarıçapı 0.1 metreden daha az olursa bu fırlatıcının raylarından geçen akım yoğunluğu artacaktır. Oluşturacak olduğu manyetik alan yoğunluğu artacaktır. Buna bağlı olarak Lorentz kuvveti de büyüyecektir. Fakat ray yarıçapını bu kadar azaltmak doğru değildir. Çünkü raylar bu şekilde ray direncinin büyümesi, ısınmanın artması ve verimin düşmesi açısından sorun teşkil edebilecektir. Örnek tasarımlara bakıldığında ray yarıçapının en az 0.1 metre olarak alındığı görülmektedir.



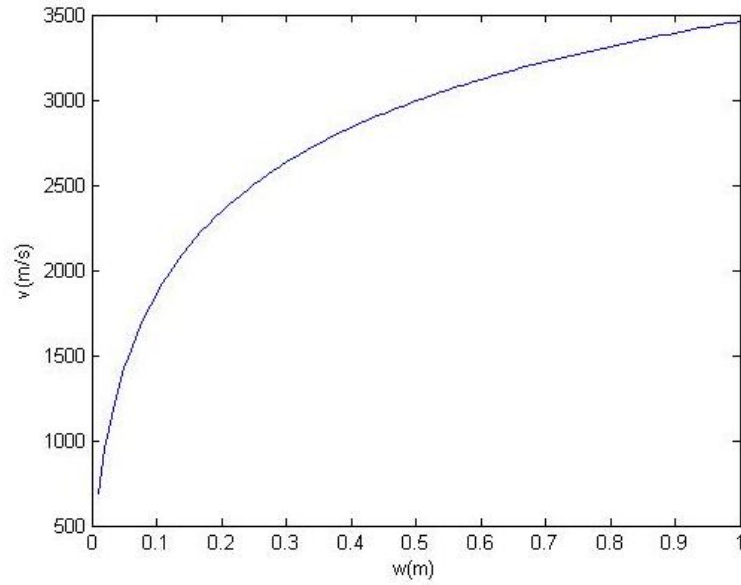
Şekil 4.1: Ray yarıçapının hıza etkisi.

4.2 Raylar Arası Mesafe - Hız Etkileşimi

Bu kısımda raylar arası mesafe ile merminin hızı etkileşimi anlatılacaktır. Raylar arası mesafe aslında merminin kalınlığıdır. Bu mesafenin artmasıyla mermi hızının artması beklenir. Çünkü raylar arası mesafenin artmasıyla akımın almış olduğu yol (l) artacaktır.

$$F = B.i.l \quad (4.1)$$

Bu denkleme göre mermiye etkiyen kuvvet te artacaktır. Sonuçta ivmelenmeye bağlı olarak hız da artacaktır. Daha önceki R-v analizinde görüldüğü üzere R yarıçapının 0.1 m olduğu yerde mermi hızı en yüksek çıkmıştır. Dolayısıyla R yarıçapı 0.1 m kabul edilmiştir. w açıklığını sıfırdan 1 metreye kadar artırarak yapılan analizin sonucu Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Hızın ray açıklığı ile değişimi.

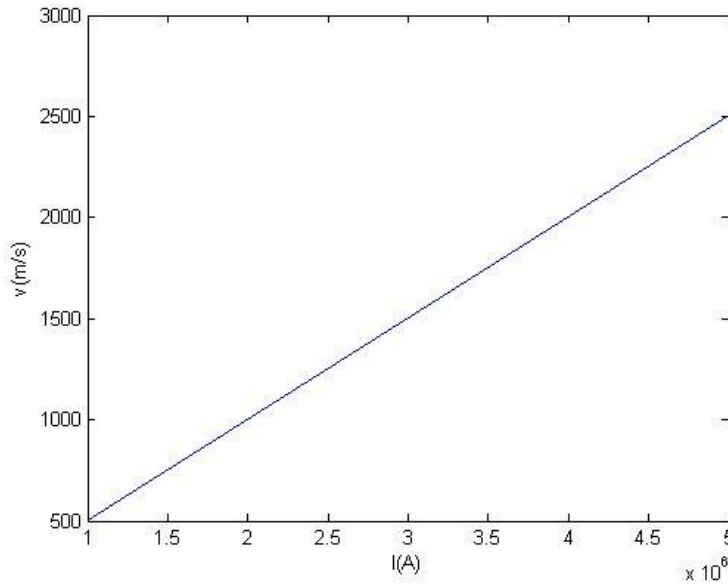
Burada w (ray açıklığı) 1 metre iken hız 3462 m/s ve ivmelenme $6 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ olarak hesaplanmıştır (Ek-4). Ray açıklığı 1 metreye ulaştığında maksimum hız elde edilmiştir. Fakat 1 m ray açıklığına eşit büyüklükte bir mermi anlamlı değildir. Tasarım ölçtümüz olan 2500 m/s’yi yakalayabilmek için w (raylar arası açıklık)’yi 0,25 olarak alabiliriz. 2500 m/s’ye denk gelen raylar arası açıklık değeri Ek-4’te verilen matlab koduyla bulunmuştur. Amerika’nın California eyaletinde NPS School’da yapılan çalışmalarda bu w değeri 0.2 metre olarak hesaplanmıştır [1].

Fakat bizim optimizasyon çalışmasında en uygun raylar arası açıklık değerinin 0.25 metre olacağı görülmüştür.

Sonuç olarak ray yarıçapının (R) 0.1 metre ve ray açıklığının (w) 0.25 metre olduğu yerde mermi hızı yaklaşık olarak 2500 m/s hızla hareket etmektedir. 0-1 metre aralıklarındaki ray yarıçapı ve ray açıklığı için optimum tasarım belli olmuştur.

4.3 Akım- Hız Etkileşimi

Şekil 4.3'den görüldüğü gibi akım arttıkça hızda artmaktadır. Çünkü akım arttığı zaman mermiye etki eden manyetik alandan kaynaklı kuvvet de artar. Mermi bir Lorentz kuvveti etkisi altında kalarak hızlanmaya başlar. Şekil 4.3'den görüldüğü üzere bu tasarım şartları altında merminin 2500 m/s hızla gitmesi için 5 MA'lık bir akım gereklidir (Ek-5).



Şekil 4.3: Akım ve hız etkileşimi.

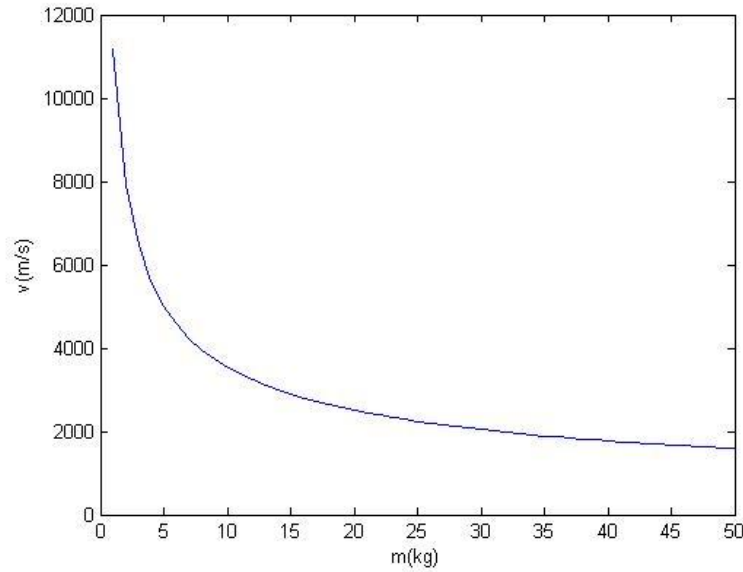
Normalde mermi hızı I^2 ile doğru orantılı olarak değişmektedir (Denklem 2.19) fakat denklemde t_f büyüklüğü vardır. Bu büyüklük, merminin namludan çıkana kadar geçen süreyi gösteren büyüklüktür. Akım arttığı zaman ivme I^2 ile doğru orantılı olarak artar. Fakat denklem (2.13)'e göre merminin namludan çıkış zamanı (t_f) hesaplanırken $1/I$ ifadesi gelmektedir. Dolayısıyla denklem (2.19)'daki I^2 ifadesi etkisi sadece I varmış gibi olur. Dolayısıyla akım artışı ile mermi hızı lineer olarak artar. Denklem (2.18)'den elde edilen bilgiler ışığında hazırlanan Matlab simulasyonundan anlaşılmaktadır ki istenen hıza ulaşmak için mega amper

mertebeğinde akım gereklidir. Böylece NPS School'dan alınmış olan bu bilgiler doğrulanmış olur [2], [12]. Akım için değişim aralığı olarak 1-5 MA girilmiştir. NPS School'un bazı tasarımlarında (Allan S. Feliciano, [1]) bu değer 5 MA'dır. NPS School'un bazı tasarımlarında mermi hızı daha düşüktür (1000 m/s) [6].

4.4 Mermi Kütlesi – Hız Etkileşimi

Mermi kütlesi azaldıkça merminin hızı artması beklenmektedir. Çünkü mermi kütlesi azaldıkça ona etki eden kuvvet sabit olması koşuluyla kütlenin ivmelenmesi artar ($F = m.a$). Bu durum Şekil 4.4'den görülmektedir. Merminin kütlesi azaldıkça merminin hızı eksponansiyel olarak artmıştır. Ek-6'daki matlab kodlarıyla da hızın 2500 m/s olması için gerekli kütle miktarı tespit edilmiştir ($m = 20$ kg).

Mermi ile hızın etkileşimi için hava sürtünmesinin de hesaplanması gerekir. Bu sürtünme namı içerisnde merminin bulunma süresini de etkilemektedir. İvmenin etkilenmesi sonucu hızın da azalması beklenir. Fakat bu tezde merminin havayla sürtünmesi göz önüne alınmamıştır.

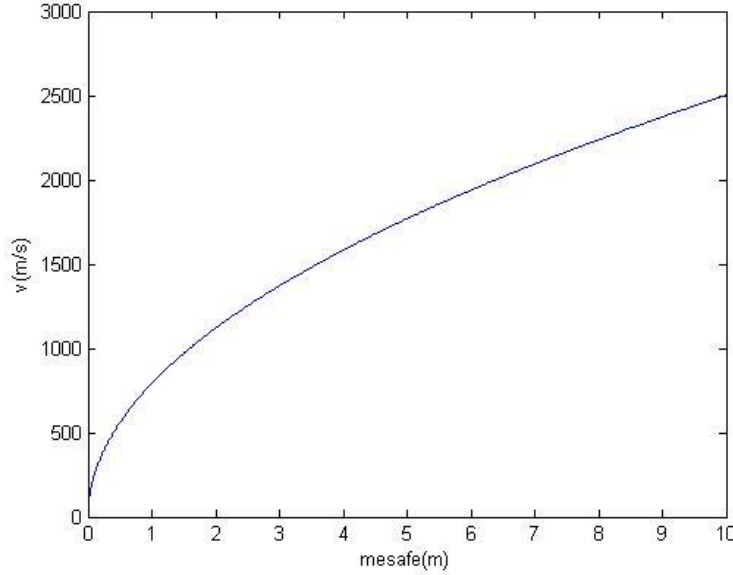


Şekil 4.4: Kütle ile hız etkileşimi.

4.5 Hız-Yer Değiştirme Etkileşimi (Namlu Uzunluğu)

Mermi hızının namlu içerisindeki hız değişimi Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Mermiye akım Bölüm 3'de söz edildiği gibi darbeli (kare dalga) şekilde verilmiştir. Anahtarlama hızı 8 ms'dir (Denklem (3.1), (3.2)). 8 ms süresinde mermi hızı 2500

m/s hıza ulaşmıştır. Dolayısıyla Ek-7 de verilen, hazırlanan Matlab kodları ile namlu uzunluğunun 10 m olması gerektiği anlaşılmıştır. Fırlatıcının kullanılacağı yer, 10 m namlu uzunluğuna uygun değilse mermi istenen hıza ulaşmadan namludan ayrılacağı unutulmamalıdır.



Şekil 4.5: Namlu içinde hızın değişimi.

4.6 Tasarım Sonucu

Sonuç olarak aşağıda ve Çizelge 4.1’de verilen parametrelere sahip bir tasarım ortaya çıkmıştır.

m_{mermi} (Merminin kütlesi) = 20 kg

v_{mermi} (Merminin namludan çıkış hızı) = 2500 m/s

$I_{\text{giriş}}$ (Ortalama giriş akımı) = 5 MA

R (Rayların yarıçapı) = 0.1 m

w (Raylar arası mesafe) = 0.25 m

x (Namlu uzunluğu) = 10 m

E (Merminin namludan çıkış enerjisi) = 62.6 MJ

Çizelge 4. 1: Tasarım sonuçları.

m (kg)	V_{mermi} (m/s)	$I_{\text{giriş}}$ (MA)	R (m)	w (m)	X (m)	E (MJ)
20 kg	2500 m/s	5 MA	0.1 m	0.25 m	10 m	62.6 MJ

Bu tasarımı yapabilmek için 10 GW'lık bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. 8 ms süreli darbe akımı da hesaba katılırsa gerekli olan enerji miktarı 80 MJ'dür. Bölüm 3'de 10 GW ve 80 MJ'luk bir elektromanyetik fırlatıcının güç kaynağı bilgisi Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bu değerler (1600 adet kapasite) gemiler için uygun olmadığından farklı tasarımlar da yapılarak gerekli enerji miktarı değiştirilmiştir. Böylece farklı sayılarda kapasite ihtiyaçları doğmuştur (sırasıyla 1600, 160, 25 adet kapasite kullanılmalıdır).

Bu enerji ihtiyacını karşılayacak ekipmanlar çok yer tutmaktadır. Bundan dolayı, bu teknoloji savaş gemilerinde kullanılırken uygun sayıda kapasiteleri olan güç kaynakları kullanılmalıdır. Bu enerji ile mermi yaklaşık olarak 6 – 7 mach hıza 6 – 7 sn'de ulaşmaktadır [15]. Böylece vuruş menzili geleneksel fırlatıcılara göre daha fazladır [16]. Elektromanyetik fırlatıcı ile mermi yolunun, maksimum yüksekliği 120 km olan bir eğik atış yolu gibi düşünülürse, 400 km mesafedeki bir hedefi 300 saniyede (5 dakikada) vurması beklenir. Kısa sürede hedef vurmak da elektromanyetik fırlatıcı kullanımının avantajlarından birisidir.

Giriş akım değeri için daha önceden tasarlanmış olan tasarımlardan örnek alınarak varsayım yapılmıştır. Örnek alınabilmesi için öncelikle merminin namli çıkışındaki kinetik enerjisini hesaplamak gereklidir. Bu değer 62.6 MJ olarak hesaplanmıştır. Bu büyüklükteki bir enerjiyi sağlamak için referanslara başvurulmuştur. Kaynaklardan edinilen bilgilere göre böyle bir enerji MA'ler seviyesinde bir giriş akımı ile sağlanmaktadır. Bu değer Matlab benzetimi ve Bölüm 2'deki denklemler (Denklem (2.17), Denklem (2.18)) ile doğrulanmıştır. Diğer değerler Matlab ile benzetimi yapılarak grafikler yardımıyla bulunmuştur.

4.7 Sistem Parametrelerinin Optimizasyonu

Bu bölümde elektromanyetik fırlatıcılar için yaklaşım algoritması yöntemiyle sistem parametrelerinin optimizasyonu yapılacaktır. Bu amaçla akış diyagramları oluşturulup Matlab ortamında yazılan programlar yardımıyla sistem parametrelerine hassas yaklaşım yapılarak değerler bulunacaktır.

Fırlatıcıda manyetik kuvvetten yararlanılmak istenmektedir ve geleneksel fırlatıcılardan farklı olması ve avantajlı olması nedeniyle 2500 m/s hız hedefi konulmuştur. Bu hız ile merminin alabileceği yol artmıştır ve askeri alanda zırh delmek için hız önemlidir.

Denklem (2.17), denklem (2.18), denklem (2.19) ile ve NPS School’da daha önceden yapılmış olan çalışmalar ile fırlatıcı güç devresinden gelmesi gereken gerekli akımın 5 MA mertebelerine çıkarılması gerektiği ve ancak bu mertebelerde bir mermiyi bu kadar hızlarda fırlatılabildiği görülmüştür. Bu değer ile birlikte rayların yarıçapı (R), raylar arası mesafe (w), namlu uzunluğu (X), mermi kütlesi (m) önem arz etmektedir. Bu değerler optimum şekilde ayarlanırsa güç kaynağı artırımına gerek duyulmaz. Böylece kapasiteler için gereken alan azalmış olacak ve maliyet daha aza inecektir. Dolayısıyla güç kaynağı artırımına gitmeden yani sistemden akıtılacak akım (I) değeri değiştirilmeden bu değerler değiştirilerek mermi hızına etki edilmelidir. Bu katsayılara göre bir algoritma koşturulup istenen parametreler ile mermi fırlatılması sağlanacaktır. Bunun için çekilen akım değeri sabit düşünülecektir. Çünkü çekilebilecek enerji miktarı belirlenmiştir.

Kütlenin gönderilecek olduğu mesafenin değişmesi sebebiyle merminin hızı değişken olarak düşünülecektir. Merminin 400 km menzile değilde farklı bir mesafeye gönderilmesi için mermi hızı 2500 m/s olmayabilir. Kullanılacak olan mermi farklı kütlelerde olabilir. Dolayısıyla ivmelenme ve mermi hızı değişecektir.

Raylar arası mesafenin ve rayların yarıçaplarının değişimi ile manyetik alanın mermiye etkisi değişmiş olacaktır. Dolayısıyla istenen kütle ve hızda mermi fırlatılmış olur. Namlu uzunluğu merminin 2500 m/s hıza ulaşımı ve anahtarlama süresine göre belirlemişti. 8 ms anahtarlama hızına göre namlu uzunluğu değeri 10 m olarak belirlenmişti. Bu bölümde ise farklı hızlara göre işlemler yapılacağı için namlu uzunluğu da değişken olarak ele alınacaktır. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi mermi 2500 m/s hıza 10 m namlu uzunluğunda, 2000 m/s hıza ise 7 m namlu uzunluğunda ulaşmıştır.

Ray yarıçapı R, $0.1 \text{ m} < R < 0.5 \text{ m}$ olarak kabul edilmiştir. Ray yarıçapı azaldıkça akım taşıma kapasitesi düşebileceğinden alt sınır değer 0.1 m olarak ele alınmıştır. Üst sınır değer olan 0.5 m için sistem verimliliği çok azalmaktadır. Çünkü akım yoğunluğu azalmaktadır (Şekil 4.1).

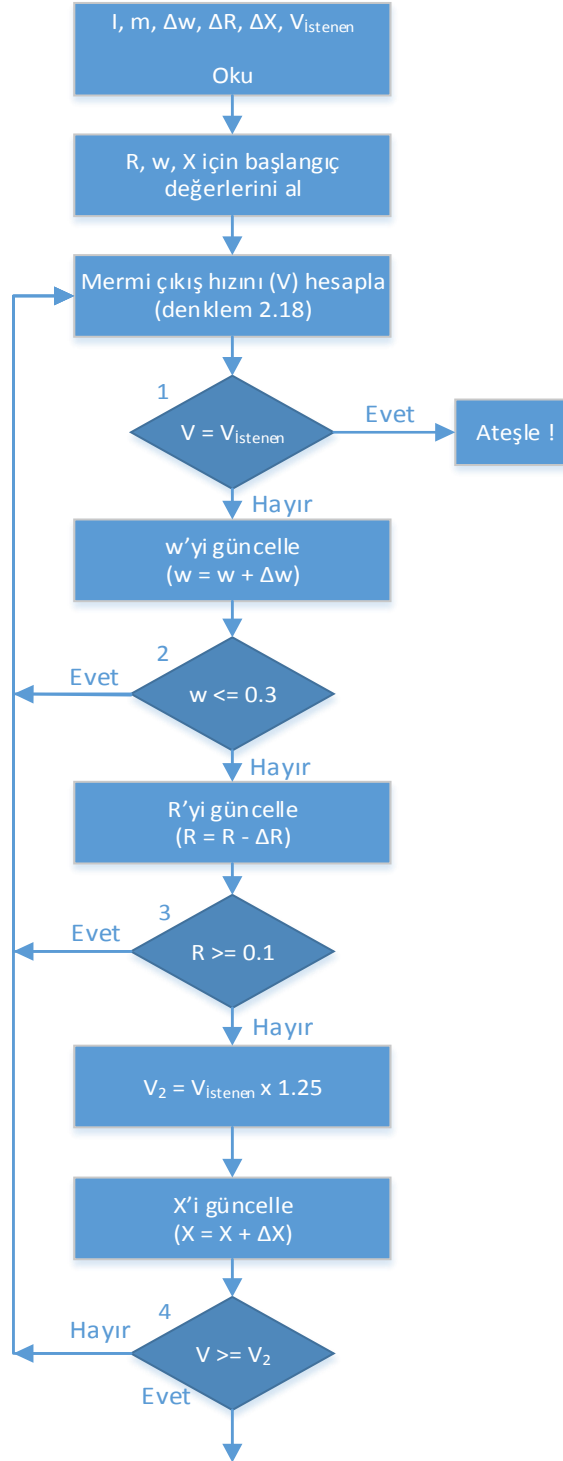
Raylar arası mesafe w, $0.1 \text{ m} < w < 0.3 \text{ m}$ olarak kabul edilmiştir. Alt sınır değer olarak 0.1 m alınmıştır. Çünkü bu değer altına düşüldüğünde elektriksel ark oluşma ihtimali vardır. Üst sınır değer 0.3 m olursa bu boyutlarda mermi bulmak zordur ve mermi üzerinden geçecek olan akım çok ısınmaya sebebiyet verecektir.

Namlu uzunluğu x , $2 \text{ m} < x < 10 \text{ m}$ olmalıdır. Şekil 4.5’de namlu uzunluğu ile hız değişimi görülmektedir. Görüldüğü üzere 2 m ’nin üstündeki namlu uzunluklarında ancak istenen 2500 m/s hız değerlerine ulaşılmaktadır. Hem yer sorunu yaratmamak hem de merminin namluda kalma süresini çok uzatmamak için namlu uzunluğunun 10 m ’den fazla olması istenmemektedir. m (mermi kütlesi) ise 20 kg olarak düşünülmektedir.

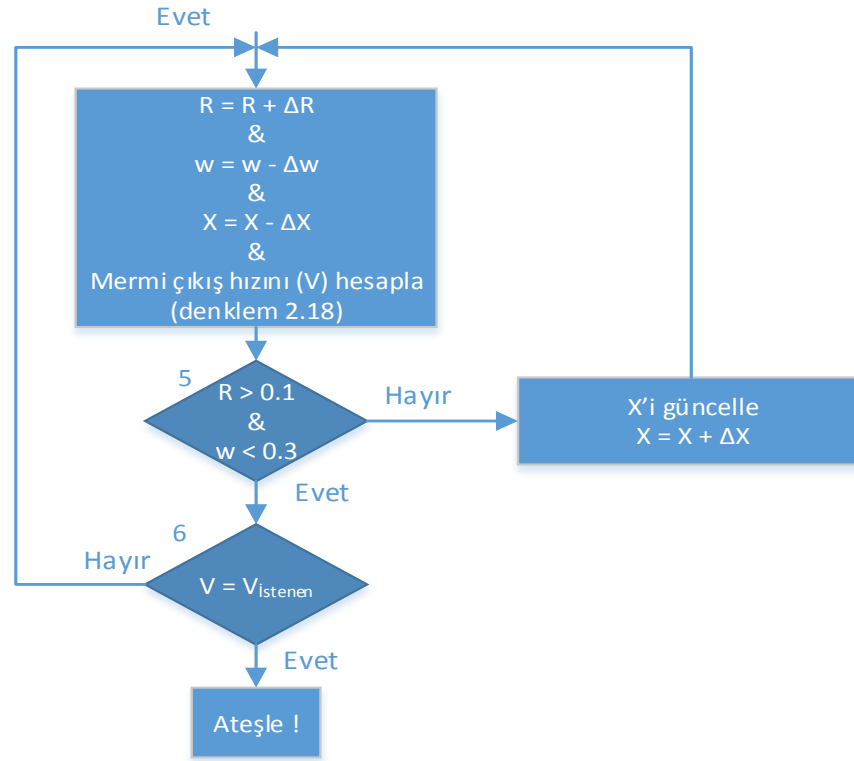
İlk olarak Şekil 4.6’da hassas yaklaşım algoritmasının genel akış diyagramı verilecektir. Bölüm 4.7’de verilen kriterler içerisinde bu akış diyagramı işleyecektir. Genel akış diyagramı sonrasında ise tezin amacına uygun uygulamalar yapılacaktır. Bu uygulamada giriş parametreleri, istenen hız değeri ve mermi kütlesi bellidir. Bu algoritma sonucu elde edilen parametreler ile Bölüm 4’den elde edilen parametreler kıyas edilecektir.

Genel akış diyagramında I , m , Δw , ΔR , Δx , V_{istenen} değerleri okunur. R , w ve x değerleri için başlangıç değerleri alınır. Denklem (2.18)’e göre merminin namludan çıkış hızı hesaplanır. Hız değeri, istenen hız değerine eşitse ateşleme yapılır (if blok - 1). Değilse w değeri güncellenir ($w = w + \Delta w$). w değeri 0.3 m ’den küçükse bu işleme devam edilir (if blok - 2). Değilse R güncellenir ($R = R - \Delta R$). R değeri 0.1 m ’den büyükse bu işleme devam edilir (if blok-3). Değilse artık x değeri ile güncelleme yapılacağı için istenen hız değeri 1.25 katına çıkarılır. x değeri güncellenir ($x = x + \Delta x$). İstenen hız değerine artık v_2 denir. Çünkü program tekrar merminin namludan çıkış hızının hesaplandığı bloğa dallanmaktadır. Program hiyerarşik olarak işlemleri tekrar yaptığından istenen hız tekrardan 1.25 ile çarpılır. Tekrardan çarpım işlemi yapılmaması için istenen hız değeri farklı bir değişken olan v_2 ’ye atanmıştır. İstenen hız değerine (v_2) ulaşıp ulaşamadığı if bloğu-4’de kontrol edilir. Ulaşılmış ise, artık programın kalan kısmında verim negatif yönde olacak şekilde parametreler güncellenmektedir ($R = R + \Delta R$, $w = w - \Delta w$, $x = x - \Delta x$). Bu blokta tekrar hız hesaplama yapılmaktadır. Çünkü programın başlangıç kısmındaki hız hesaplama bloğuna dallanırsa hiyerarşik akışdan dolayı program sadece w değerini güncelleyerek istenen hız değerine ulaşmaya çalışacaktır. Bu durumda w değeri tek başına gereğinden çok değişmiş olacaktır. Böylece optimizasyon yapılamamaktadır. Bunu engellemek adına sistem negatif yönde çalıştırılmaya başlanınca tekrar hız hesabı yapılması en doğru adımdır. $R > 0.1 \text{ m}$ ve $w < 0.3 \text{ m}$ ise (if blok - 5) istenen hız değerine ulaşıp ulaşmadığı kontrol edilir (if blok - 6). 5

no'lu if bloğunun cevabı hayır ise x değeri tekrar güncellenir. Program parametre ayarına tekrar dallanır. Böylece sistem parametreleri optimum bir şekilde bulunmuş olur. Yani R , w , x değerleri sınır değerlere daha uzak fakat istenen kütlede istenen hız değeri ile mermiyi fırlatma işlemi yapılabilir.



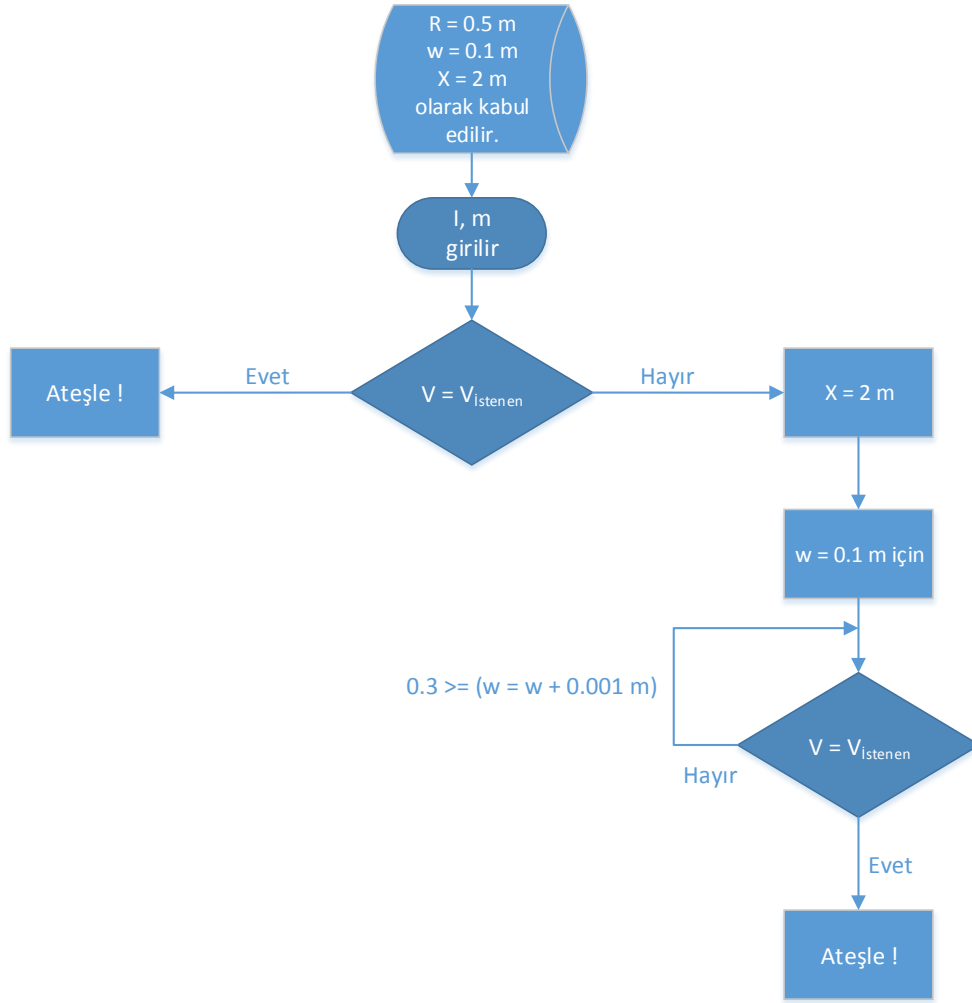
Şekil 4.6: Hassas yaklaşım algoritmasının genel akış diyagramı.



Şekil 4.6 (devam): Hassas yaklaşım algoritmasının genel akış diyagramı.

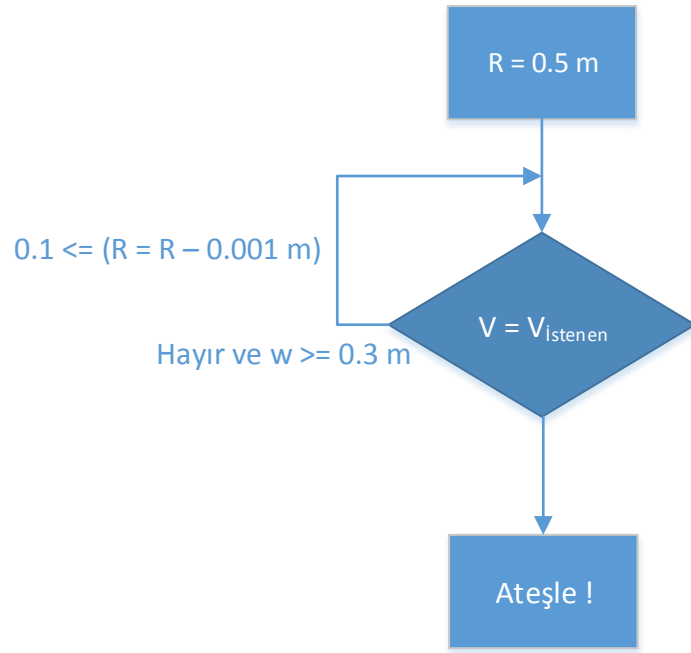
Tezin amacı doğrultusunda, $R = 0.5$ m, $w = 0.1$ m, $x = 2$ m başlangıç değerleri ile 20 kg'lık bir mermiyi 2500 m/s hızla fırlatabilmek için aşağıdaki algoritma uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.7 – Şekil 4.10).

Hassas yaklaşım algoritması - 1 (Şekil 4.7); Mevcut sistem parametrelerine göre istenen mermi fırlatma hızına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Eğer istenen hız değeriyle fırlatılabilecekse “Ateşle” komutu verilir. Değilse; $x = 2$ metreden başlayarak ilk olarak $w = 0.1$ metreden başlayarak 0.01 metre arttırılarak istenen hıza ulaşıldı mı kontrol edilir. Bu değerin 0.3 metreyi geçmemesi gerekmektedir.



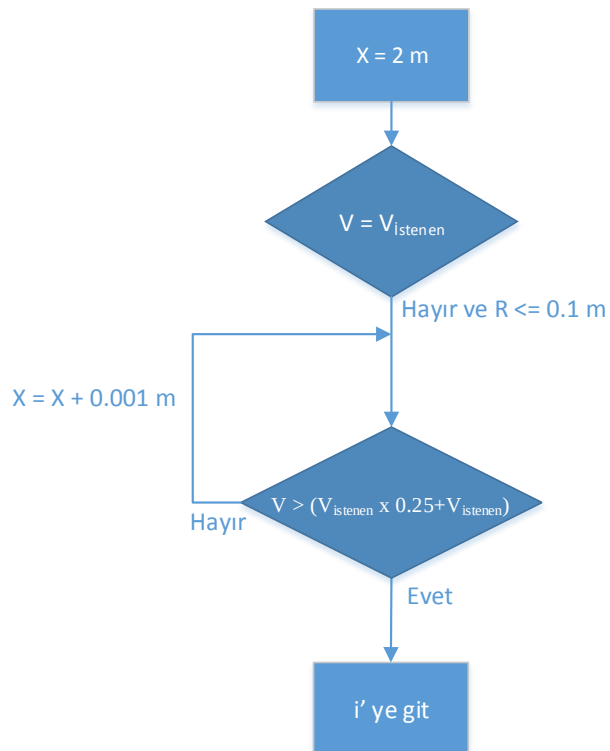
Şekil 4.7: Hassas yaklaşım algoritması-1.

Hassas yaklaşım algoritması - 2 (Şekil 4.8); İstenen hız değerine ulaşamayıp ve w (raylar arası mesafe) değeri 0.3 metreye eşit ya da büyük olursa R (ray yarıçapı) değerinde değişim yapılması gerekmektedir. $R = 0.5$ metreden başlayarak her bir adımda 0.01 m azaltarak istenen hız değerine ulaşılması hedeflenmektedir.



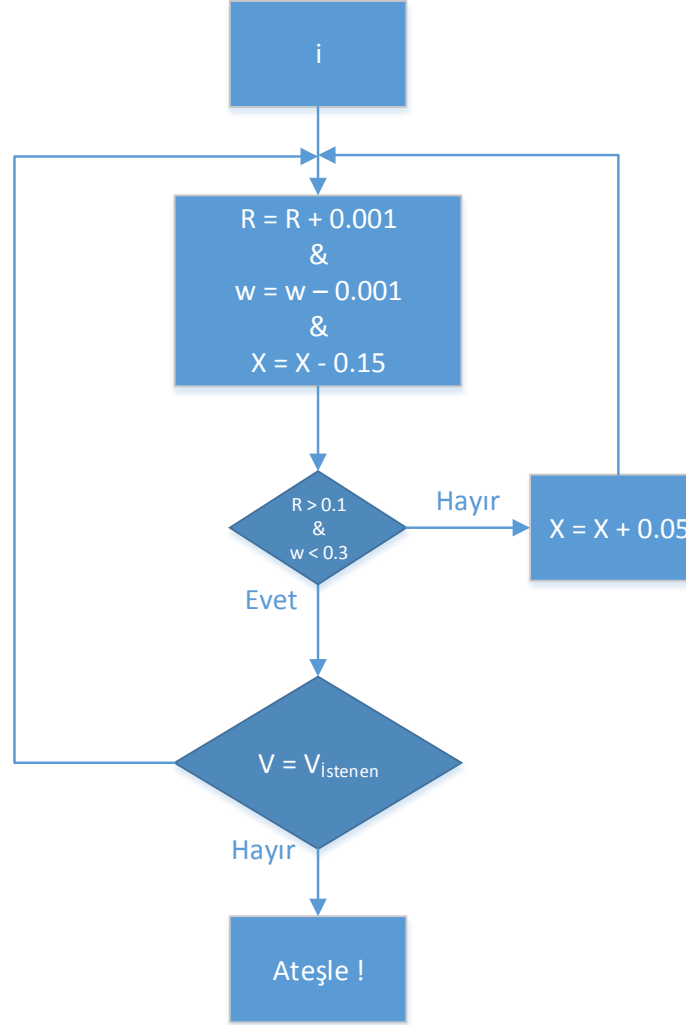
Şekil 4.8: Hassas yaklaşım algoritması-2.

Hassas yaklaşım algoritması - 3 (Şekil 4.9); R ray yarıçapının 0.01 metre adım adım azaltılması sonucu istenen hız değerine ulaşılmaması ve R değerinin 0.1 metreye eşit ya da daha küçük olması durumunda tasarım limit dışına çıkmış sayılır ve x değeri istenen hız değerine ulaşmadığı takdirde 0.1 metre ile adım adım artırılır.



Şekil 4.9: Hassas yaklaşım algoritması-3.

Yaklaşık olarak bu akış diyagramları sonucunda; $w = 0.3$ m ve $R = 0.1$ m'ye yakın değerlere ulaşmıştır. Dolayısıyla x değeri artırıldığı zaman istenen hız değeri 2500 m/s mertebelerine rahatlıkla ulaşacaktır. Böylece w , R , x değerleri adım adım değiştirilerek optimum hıza ulaşılabilir. Bu hız değerine ulaşıldığında artık akış i 'ye gitmektedir.



Şekil 4.10: Hassas yaklaşım algoritması-4.

Hassas yaklaşım algoritması - 4 (Şekil 4.10); i 'ye dallandıktan sonra R değeri 0.01 m artırılır, w değeri de 0.01 m azaltılır. Eğer bu değerlerden R değeri 0.1 m'den büyükse ve w değeri 0.3 m'den küçükse istenen hız değerine ulaşıp ulaşamadığı kontrol edilir. Ulaşılmamışsa bu işlem tekrar edilir. Bu akış diyagramında önceki hassas yaklaşım algoritmalarından farklı olarak artık R , w değerleri sistemi pozitif verime taşıyacak şekilde değilde negatif verime taşıyacak şekilde çalışmasıdır. Negatif yönlü çalışma “2. durum” olarak ele alınacaktır. Bu sistemin zorlanması

hafifletmek adına yapılmıştır. Çünkü algoritma i'ye dallanmadan önce R ve w değerleri limitlere dayanmıştı. Artık sistemin bu basamak ile rahatlatılması gerekmektedir. Sistem performansına çift yönlü yaklaşılması hedeflenmiştir (performansa olumlu ve olumsuz yaklaşım, Çizelge 4.2).

Farklı olarak x değeri de azaltılmaya başlanmıştır. Çünkü x değeri artırıldığında bu artış değeri fazlaysa R ve w'nin fonksiyonel görevinden dolayı (Bölüm 4.1 ve 4.2) sistemin manyetik alan enerjisinden faydalanması istemeden azaltılmış olabilir. Bu nedenle x değeri azaltılarak çift kontrol yapılmıştır.

Çizelge 4.2: Hassas yaklaşım algoritmasında sistem parametrelerinin iki duruma etkileri.

Durum	Ray yarıçapının değişimi (R)	Raylar arası açıklığın değişimi (w)	Namlu uzunluğunun değişimi (x)	Performansa etkisi
1. Durum	-	+	+	+
2. Durum	+	-	-	-

R değeri 0.1 metreden büyük değilse, w değeri de 0.3 metreden küçük değilse x değeri 0.05 metre artırılır. X değeri artırıldığı için mermi hızı artırılmış olur. Böylece R ve w değerinin optimize edilmesi için tekrar fırsat yakalanmış olur. En sonunda istenen mermi hızına erişilmiş olur ve mermi ateşlenir.

Çizelge 4.3: Sistem tasarım değerleri.

m (kg)	V _{mermi} (m/s)	I _{giriş} (MA)	R (m)	w (m)	x (m)
20 kg	2500 m/s	5 MA	0.1 m	0.25 m	10 m

Çizelge 4.3'de yaklaşım algoritması kullanılmadan oluşturulan sistem tasarım değerleri görülmektedir. Çizelge 4.4'de yaklaşım algoritması kullanılarak oluşturulan sistem tasarım değerleri görülmektedir (Ek-9).

Çizelge 4.4: Algoritma ile bulunan tasarım sonuçları.

m (kg)	V _{mermi} (m/s)	I _{giriş} (MA)	R (m)	w (m)	x (m)
20 kg	2500 m/s	5 MA	0.124 m	0.276 m	10.48 m

Her iki tasarımda da 20 kg'lık mermi kullanılmıştır. İstenen mermi hızı aynıdır. İki sistemin de aynı güç kaynağından beslendiği düşünülmektedir.

Burada amaç aynı enerji miktarıyla daha verimli bir sistem elde etmektir. İlk tasarıma göre R (ray yarıçapı) 2.4 cm artmıştır. Bu sistem için verimli bir sonuçtur. Çünkü 0.1 metrede akım yoğunluğu daha fazladır. Dolayısıyla bu tasarımda sistem daha az ısınacak ve kullanılan malzemelerin ömrü uzayacaktır. Ray yarıçapı arttığı için sistem direnci azalıp güç kaynağından çekilen enerji miktarı da azalmıştır. Daha az enerji çekilmesi kapasite ömürlerinin de uzun olmasını sağlayacaktır.

Raylar arası mesafe (w) 2.6 cm artmıştır. Bölüm 4.2 de anlatıldığı gibi w'nin artması ile manyetik alandan faydalanma süresi artmaktadır. Çünkü mermi üzerinden akan akımın aldığı yol artmıştır. w aralığının artması mermi boyutunu artıracığı için bir dezavantajdır. Fakat bu mesafenin artması merminin namluyu terk etme anındaki ark oluşumu ihtimalini azaltacaktır.

Namlu (ray) boyu (x) 48 cm artmıştır. Namlu boyunun artması nedeniyle mermi namluyu daha geç terk edecektir. Bu da sistemin daha fazla ısınmasına yol açacağından aslında bir dezavantajdır. Fakat rayları soğutmak mermiyi soğutmaktan daha kolay olduğundan buna izin verilebilir. Çünkü raylar direk olarak hava ile temas halindedir (Algoritma kodları ve hesaplamaları için Ek-9'a bakınız).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektromanyetik teoriye bağılı teknolojiler, askeri alanda zırh delici ve füze savunma sistemleri gibi konularda oldukça güven verici ürünler ortaya koymaktadır. Manyetik fırlatıcıların vurucu menzilinın geleneksel fırlatıcılara göre fazla olması ve onlardan daha ucuz olması bu teknolojinin daha çok tercih edilmesine yol açmıştır.

Bu tezde elektromanyetik fırlatıcıların manyetik alan denklemleri çıkartılmış, amaca uygun güç kaynağı çeşitleri gösterilmiştir. Çıkarılan manyetik denklemlere göre mermiye etki eden kuvvet hesaplanmıştır. Kuvvete göre de merminin hızı, ivmesi ve aldığı yol bulunmuştur. Manyetik denklemler raylar arasındaki mesafenin ve ray yarıçapının değişimine göre de çıkartılmıştır. Sistemin elektriksel devresinin devre analizi yapılmıştır.

Elektromanyetik fırlatıcılarda güç kaynağı olarak en uygun akım kaynağı kapasitelerdir. Diğer bir güç kaynağı seçeneğı olan kompülsatör, fiyatının yüksekliğı, piyasada bulunmayıp sadece araştırma projeleri için kullanılması ve sistemde güç arttırmanın ve azaltmanın kolay olmaması sebebiyle tercih edilmemiştir.

Güç kaynağı tasarımı için üç farklı devre oluşturulmuştur. Tezde hedeflenen 20 kg'lık mermiyi 2500 m/s hızla fırlatma amacı için 1600 adet 10 kV gerilimli, 50 kJ'luk kapasiteye ihtiyaç vardır. Mermi kütlesi 200 grama düşürüldüğü zaman ihtiyaç olan kapasite sayısı 160'a düşmüştür. Bunlardan farklı olarak 3. bir tasarım yapılarak, namlu uzunluğu, giriş akımı, mermi kütlesi büyüklükleri değiştirilerek kapasite ihtiyacı makul seviyelere çekilmiştir. Buna göre 25 adet 50 kJ'lük, 14 kV'luk kapasitelerle yapılmış olan 2 kV'ta 1000 kA veren bir fırlatıcı güç kaynağı tasarımından [6] örnek alınarak tezdeki amaçlara uygun bir devre tasarımı yapılmıştır. Bu işlem sırasında devre empedansı ve paralel kapasiteler arasına konulması gereken endüktans değerleri de hesaplanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde Robert E. Williams (NPS School, Monterey, CA)'ın tasarımı incelenmiş ve oradaki verilerle mermi hızı ile mermi yer değiştirme grafiğı elde edilmiştir [12]. Burada farklı iki ray yarıçapı ve farklı iki raylar arası mesafeye göre

tasarımı söz konusudur (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6). Şekillerden anlaşılacağı üzere ray yarıçapı arttığı zaman ve raylar arası mesafe azaldığı zaman merminin hızı azalmıştır. Çünkü ray yarıçapı artarsa akım yoğunluğuna bağlı olarak manyetik alan yoğunluğu azalır. Raylar arası mesafe azalırsa akımın mermi üzerinden gittiği yol azalır. Mermiye daha az kuvvet etki eder. Robert E. Williams'ın yapmış olduğu bu tasarım bu tez ile örtüşmektedir [12]. Çünkü Bölüm 4'de yapılan optimizasyon sonuçlarında (Şekil 4.1, Şekil 4.2) benzer grafikler elde edilmiştir. NPS School (Monterey, CA, USA) yapılmış olan bu çalışmaların dışında bu tezde kütle-hız ilişkisi, akım-hız ilişkisi grafikleri çıkarılmıştır [12]. Bölüm 2'de çıkarılan denklemler ile (denklem (2.17), denklem (2.18), denklem (2.19)) tasarım doğrulanmıştır.

Bir prototip fırlatıcı yapmak için ilk olarak bu tezin 2. bölümündeki manyetik denklemleri çıkartmak gerekir. Sonrasında mermi tasarımı, fırlatıcı rayların tasarımı ve güç kaynağı tasarımı gibi konulara geçilebilir. Bir prototip fırlatıcı yapma konusunda ilk aşama olan kuvvet denklemlerinin çıkartılması bu tezde anlatılmıştır. Fırlatıcı rayların tasarımı optimum şekilde yapılmıştır. İleride prototip fırlatıcı yapmak isteyenler için bu tez bir kaynak olabilir. Prototip tasarımında mermiye etki eden kuvvetin miktarı, merminin hızı ne olmalı, merminin ne kadar ivmelenmesi gerektiği, ray yarıçapları ne kadar olmalı, raylar arası genişlik ne olmalı gibi soruların yanıtları bu tezde bulunmaktadır. Dolayısıyla prototip fırlatıcı tasarımındaki ilk aşama bu tez ile geçilmiş olur, güç kaynağı tasarımında ise nelere dikkat edilmesi gerektiği anlatılmıştır. Üç farklı tasarım ile üç farklı güç kaynağı devresi oluşturulmuştur.

Fırlatıcı Tasarımının Optimizasyonu bölümünde mermi 20 kg olarak, giriş akımı da 5 MA olarak ele alınmıştır. Kütle ve akımı sabit düşünülen bu tasarımda mermi hızının 2500 m/s olması amaçlanmıştır. Buna göre ray açıklığı ve ray yarıçapı için formüllerin Matlab'de hesaplanması ve grafikler yardımıyla optimum değerleri hesaplanmıştır. Tezde fırlatıcıdan akan akımın, mermi kütlesinin, ray açıklığının, ray yarıçaplarının, namlu uzunluğunun hıza etkisi gösterilmiştir. Bunlara göre optimum tasarım yapılmıştır. Namlu uzunluğu 10 metre olarak hesaplanan bu sistem, savaş gemilerinde elektromanyetik fırlatıcı olarak kullanılabilir.

Akım değeri belirlenirken ilk olarak merminin namlu çıkışındaki kinetik enerjisine bakılmıştır. Hız 2500 m/s ve kütle 20 kg olduğu için merminin namlu çıkışındaki

kinetik enerjisi 62.6 MJ olacaktır. Bu büyüklükteki kinetik enerjiyi sağlayabilmek için 5 Mega Amper mertebesinde bir giriş akımına gereksinim vardır. Bölüm 2’de çıkarılan denklemlerde bu akım değeri yerine konduğu zaman (denklem (2.17), denklem (2.18), denklem (2.19)) anlaşılmaktadır ki bu MA’ler mertebesindeki akım değeri normaldir. Matlab simülasyonlarında bu denklemler gerçekleştirildiği zaman da giriş akımı olarak 5 MA seçilmesinin doğru olduğu anlaşılmıştır.

Ray yarıçapı olarak 0.1 metre seçilmiştir. Ray yarıçapı seçilirken bir aralık belirlenmesi gerekir. Çünkü bu aralık değerlerine göre Matlab simülasyonunda grafik elde edilecektir. Bu aralık değerleri Amerika Birleşik Devletleri’nde Monterey, California’daki NPS School tarafından (Robert E. Williams, Allan S. Feliciano, Fred Charles Beach) yapılmış olan tasarımlara göre belirlenmiştir [2, 6, 12]. Bir başlangıç ve aralık değeri olması için ray yarıçapının aralığı bu tasarımlardan alınmıştır. 0.1 metre ile 1 metre arasında çizilen bu grafikte ray yarıçapı 0.1 metre iken hızın maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Burada ray yarıçapının daha küçük seçilmemesinin sebebi rayın akım taşımada problemi olmaması içindir. Çünkü ray çapı daha da küçülürse direncin ve akım yoğunluğunun artmasına bağlı olarak ısı kayıpları ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla ray yarıçapı optimum olarak 0.1 metre olarak seçilmiştir.

Raylar arası mesafe (w) 0.25 metre olarak seçilmiştir. Akım ve ray yarıçapı değeri belirlendikten sonra Denklem (2.18)’e göre raylar arası mesafeyi belirlemek gerekmektedir. Akım ve R değeri belli olduktan sonra w değeri için bir kaynaktan aralık değeri bulmaya gerek kalmamıştır. Çünkü tasarımın ilerleyeceği nokta belli olmuştur. 0 ile 1 metre arasındaki w değişimine göre hız değişimi çizilmiştir. Bu grafikten ve de Matlab kodlarından anlaşıldığı üzere raylar arası mesafe 0.25 metre olduğu zaman mermi hızı 2500 m/s’ye ulaşmaktadır.

Mermi kütlesi 20 kg olarak seçilmiştir. Kütlenin artışı ile merminin ivmelenmesi azalmaktadır. Bununla ilgili olarak 0-50 kg arasında değerler ile mermi hızı değişiminin grafiği çizdirilmiştir. Mermi boyutlandırılırken çarpma sırasındaki etki düşünülerek boyutlandırma yapılır. Buna göre fazla etki için mermi kütlesi artırılırsa merminin ivmelenmesi düşük olur ve mermi istenen menzile ulaşamayabilir. Mermi kütlesi daha az olması durumunda da ivmelenme artar fakat merminin etkisi azalır. Bu kısıtlar göz önünde alınarak tasarlanan mermi 20 kg olarak kabul edilmiştir.

Mermi boyutlandırılması bu tezin konusu olmadığı için direk olarak bir kaynaktan bu bilgi alınmıştır (Robert E. Williams) [12].

Bölüm 4'ün sonunda sistem parametreleriyle hız etkileşimi grafiklerinden oluşturulan hassas yaklaşım algoritmasıyla optimum tasarım elde edilmiştir. Bu algoritma Matlab m-file ile denenmiştir. Hassas yaklaşım algoritması ile daha hassas namlu uzunluğu, ray yarıçapı, raylar arası mesafe hesaplanabilmektedir. Böylece daha verimli bir sistem tasarlanmış olmaktadır. Örnek olarak;

- Ray yarıçapının 0.1 metre ile 0.5 metre arasında olması düşünülmüştür. Çünkü ray yarıçapı 0.1 metreden küçük olursa raydan daha yoğun akım geçeceği için sistem daha çok ısınacaktı. Ray yarıçapı 0.5 metreden büyük olursa, bu durumda da akım yoğunluğu ve dolayısıyla manyetik kuvvet azalacaktı.
- Raylar arası mesafenin 0.1 metre ile 0.3 metre arasında olması düşünülmüştür. Çünkü raylar arası mesafenin 0.1 metreden küçük olması durumunda akımın mermi üzerinden akacağı yol kısılacığı için mermiye daha az kuvvet etki edecekti. Buna karşılık raylar arası mesafe 0.3 metreden büyük olursa bu boyutta mermi yapmak zor olacaktı.
- Namlu uzunluğunun 2 metre ile 10 metre arasında olması düşünülmüştür. Namlu uzunluğunun 2 metre olması kaplayacağı alan açısından uygun bir seçim olurdu fakat uzunlukta bir namluda istenen mermi hız değerine ulaşamayacaktı. 10 metreden daha uzun namlularda daha yüksek hızlara ulaşılır ama mermi daha uzun bir süre namluda kalacağı için mermi, sistemin daha fazla ısınmasına yol açar.

Sistem parametrelerinde bu kadar geniş bir aralık seçilmesinin sebebi merminin gönderilecek olduğu mesafenin değişken olmasıdır. Değişken mesafe yüzünden gerekli mermi hızı değişmektedir. 500 m/s gibi bir hız değeri de, 3000 m/s gibi bir hız değeri de beklenebilir. Fakat önceki bölümlerde söz edilmiş olduğu gibi merminin havayla sürtünmesi göz önüne alınmamıştır. Bu hava sürtünmesi hızı sınırlayacaktır. Dolayısıyla x namlu uzunluğu 10 metrenin üstüne çıkarılmamıştır. Bu algoritmadan amaç manyetik alanı en verimli şekilde kullanmaktır.

Sonuç olarak merminin namludan çıkış enerjisi 62.6 MJ olarak hesaplanmıştır. Buna uygun olacak şekilde kapasite seçimleri yapılmış, örnek bir güç kaynağı devresi

tasarlanmıştır. Sistemin optimizasyonu için ilk olarak bir akım değeri ve mermi kütlesi belirlenmiştir. Sonrasında rayların yarıçapları, raylar arası genişliği ve namlu uzunluğu belirlenmiştir. Bu değişkenler Matlab ortamında grafiğe dökülmüş ve yorumlanmıştır. Bu yorumlara göre bir algoritma geliştirilip bu kodlara göre Matlab ortamında simülasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonuçları Bölüm 4’de mevcuttur.

Bu teze eklenebilecek konular arasında;

- Raylar arası mesafenin azalması durumunda raylar arası ark ihtimalinin hesaplanması,
- Merminin hava ile sürtünmesi hesaplanarak namlu içinde merminin gerçek ivmelenmesinin hesaplanması,
- Güç kaynakları devreleri için kapasiteleri şarj edici devrelerin tasarımı,
- Daha yoğun enerji verecek bir kapasite üzerine çalışılması,
- Bu sistemlerde kullanılabilecek devre kesici, transformatör ve kablo tipinin belirlenmesi

bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Hartke, John P.** (1997). Characterization and Magnetic Augmentation of a Low Voltage Electromagnetic Railgun, (Yüksek Lisans Tezi), Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [2] **Allan S. Feliciano** (2001). The Design and Optimization of a Power Supply For A One-Meter Electromagnetic Rail Gun, (Yüksek Lisans Tezi), Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [3] **Hasirci U., Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L.** (2011). Concerning the Design of a Novel Electromagnetic Launcher for Earth to Orbit Micro- and Nanosatellite Systems, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 39, No. 1.
- [4] **Hasirci U., Balikci A.** (2009). Design of an Electromagnetic Launcher for Earth-to-Orbit (ETO) Microsatellite Systems, Department of Electronics Engineering, Gebze Institute of Technology, Kocaeli, Turkey, IEEE.
- [5] **Karl E. Reinhard** (1992). A Methodology for Selecting an Electromagnetic Gun, (Yüksek Lisans Tezi), Graduate School University of Texas at Austin.
- [6] **Fred Charles Beach** (1996). Design and Construction of a One Meter Electromagnetic Rail Gun, (Yüksek Lisans Tezi), Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [7] **Fish, Scott and Redding, Eric.** (1997). Prime Power and Pulsed Energy Storage EM Gun Equipped Tank Combat Missions, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 1, pp. 642-646.
- [8] **Michael R. Lockwood** (1999). Design and Construction of an Expandable Series Trans-Augmented Electromagnetic Rail Gun, (Yüksek Lisans Tezi), Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [9] **McNab, I.R.,** (1999). Early Electric Gun Research, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 1, pp. 250-261.
- [10] **Dwight S. Warnock** (2003). Design and Optimization of A 600-KJ RailGun Power Supply, (Yüksek Lisans Tezi), Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [11] **URL-1, Design of 500 kJ Pulsed Power Supply Using Computer Simulation.** <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/10250/10/10_chapter%205.pdf>
- [12] **Robert E. Williams** (2004). Naval Electric Weapons: The Electromagnetic Rail Gun and Free Electron Laser, (Yüksek Lisans Tezi), Naval Postgraduate School, Monterey, California.

- [13] URL-2, **General Atomics**, Energy Capacitors.
<<http://www.ga.com/series-c-high-voltage-energy-storage-capacitors>>, alındığı tarih: 05.04.2014.
- [14] URL-3, **General Atomics**, Pulse Forming Networks.
<<http://www.ga.com/pulse-forming-networks>>, alındığı tarih: 05.04.2014.
- [15] URL-4, **General Atomics**, Rail Gun Systems. <<http://www.ga.com/railgun-systems>>, alındığı tarih: 05.03.2015.
- [16] **Luke, Ivan T. Jr. and Stumborg, Michael F.**, (2001). The Operational Value of Long Range Land Attack EM Guns to Future Naval Forces, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 1, pp. 58-61.

EKLER

Ek-1: İvme, Hız, Yer Değiştirme Hesapları için Matlab Kodları

Ek-2: Hız ile Yer Değiştirme Hesaplaması için Matlab Kodları

Ek-3: Ray Yarıçapı ile Hız Değişimi Hesaplaması için Matlab Kodları

Ek-4: Raylar Arası Mesafe ile Hız Değişimi Hesaplaması için Matlab Kodları

Ek-5: Giriş Akımı ile Mermi Hızı Etkileşimi Hesaplaması için Matlab Kodları

Ek-6: Mermi Kütlesi ile Mermi Hızı Etkileşimi Hesaplaması için Matlab Kodları

Ek-7: Merminin Namlu İçindeki Yer Değiştirmesi ile Hız Değişimi Grafiği

Ek-8: Merminin Farklı Bir Tasarım için Namlu İçindeki Yer Değiştirmesi ile Hız Değişimi Grafiği

Ek-9: Hassas Yaklaşım Algoritması

Ek-1: İvme, Hız, Yer Değiştirme Hesapları için Matlab Kodları

```
clearall
clc

R=0.1;
w=0.01;
I=5000000;
m=20000;
X=10;

ln= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a=((u0*(I^2)*w)/((2*pi)*m*R));
a

tf=sqrt((2*X)/a);
tf

v=(((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));
v

KE=(1/2)*m*v^2;
KE
```

Ek-2: Hız ile Yer Değiştirme Hesaplaması için Matlab Kodları

```
clearall
clc

R=0.2;
w=0.1;
I=5000000;
m=20;
X=10;

ln= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a((((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))))));
a

tf=sqrt((2*X)/a);
tf
i=1;

for t=0:0.00001:tf;
v(i)=((((u0*I^2)*t)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
mesafe(i)=((((u0*I^2)*(t^2))/((4*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
i=i+1;
end

t=0:0.00001:tf;
plot(mesafe,v)

KE=(1/2)*m*v.^2;
KE
```

Ek-3: Ray Yarıçapı ile Hız Değişimi Hesaplaması için Matlab Kodları

```
clearall
clc
I=50000000;
m=20;
R=1;
w=0.5;
i=1;
X=10;

for R=1:-0.01:0.1;

ln(i)= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a(i)=(((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln(i)))/(log(exp(1))))));

tf=sqrt((2*X)/a(i));

v(i)=(((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln(i)))/(log(exp(1)))));

i=i+1;

end
v(i-1)
a(i-1)
R=1:-0.01:0.1;
plot(R,v)
xlabel('R(m)');
ylabel('v(m/s)');
```


Ek-4: Raylar Arası Mesafe ile Hız Değişimi Hesaplaması için Matlab Kodları

```
clearall
clc
I=5000000;
m=20;
R=0.1;
w=0;
i=1;
X=10;

for w=0:0.01:1

ln(i)= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a(i)=(((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln(i)))/(log(exp(1)))));

tf=sqrt((2*X)/a(i));

v(i)=(((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln(i)))/(log(exp(1)))));

if 2490<v(i) && v(i)<2510
w
end

i=i+1;

end
v(i-1)
a(i-1)
w=0:0.01:1;
plot(w,v)
xlabel('w(m)');
ylabel('v(m/s)');
```

Ek-5: Giriş Akımı ile Mermi Hızı Etkileşimi Hesaplaması için Matlab Kodları

```
clearall
clc
m=20;
R=0.1;
w=0.25;
i=1;
X=10;

for I=1000000:100:5000000

ln= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a(i)=(((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))))));

tf=sqrt((2*X)/a(i));

v(i)=(((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));

i=i+1;

end
v(i-1)
a(i-1)
I
I=1000000:100:5000000;
plot(I,v)
xlabel('I(A)');
ylabel('v(m/s)');
```

Ek-6: Mermi Kütlesi ile Mermi Hızı Etkileşimi Hesaplaması için Matlab Kodları

```
clear all
clc
m=0;
R=0.1;
w=0.25;
i=1;
X=10;
I=5000000;

for m=0:1:50

ln= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a(i)=(((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));

tf=sqrt((2*X)/a(i));

v(i)=(((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));

if 2490<v(i) && v(i)<2510
m
end

i=i+1;

end
v(i-1)
a(i-1)
m=0:1:50;
plot(m,v)
xlabel('m(kg)');
ylabel('v(m/s)');
```

Ek-7: Merminin Namlu İçindeki Yer Değiştirmesi ile Hız Değişimi Grafiği

```
clear all
clc

R=0.1;
w=0.25;
I=5000000;
m=0.2;
X=10;

ln= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a=(((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
a

tf=sqrt((2*X)/a);
tf
i=1;

for t=0:0.00001:tf;
v(i)=(((u0*I^2)*t)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));

mesafe(i)=(((u0*I^2)*(t^2))/((4*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));

i=i+1;
end

t=0:0.00001:tf;
plot(mesafe,v)
xlabel('mesafe(m)');
ylabel('v(m/s)');

KE=(1/2)*m*v(i-1)^2
v(i-1)
mesafe(i-1)
```

Ek-8: Merminin Farklı Bir Tasarım için Namlu İçindeki Yer Değiştirmesi ile Hız Değişimi Grafiği

```
clear all
clc

R=0.1;
w=0.25;
I=1000000;
m=0.05;
X=1;

ln= ((R+w)/R);

u0=4*pi*(10^-7);

a=((((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))))));
a

tf=sqrt((2*X)/a);
tf
i=1;

for t=0:0.00001:tf;
v(i)=(((u0*I^2)*t)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));

mesafe(i)=(((u0*I^2)*(t^2))/((4*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));

i=i+1;
end

t=0:0.00001:tf;
plot(mesafe,v)
xlabel('mesafe(m)');
ylabel('v(m/s)');

KE=(1/2)*m*v(i-1)^2
v(i-1)
mesafe(i-1)
```

Ek-9: Hassas Yaklaşım Algoritması

```
clear all
clc

R=0.5;
w=0.1;
I=50000000;
m=20;
X=2;
hiz=2500;

ln= ((R+w)/R);
u0=4*pi*(10^-7);
a=((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));
tf=sqrt((2*X)/a);
v=((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));
mesafe=((u0*I^2)*(tf^2))/((4*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));

%   v
%   mesafe

while (hiz>=v)&&(w<=0.3)
    w=w+0.001;
    ln= ((R+w)/R);
    a=((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));
    tf=sqrt((2*X)/a);
    v=((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));
end
% w
% v
% mesafe

while (w>=0.3)&&(R>=0.1)
    R=R-0.001;
    ln= ((R+w)/R);
    a=((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));
    tf=sqrt((2*X)/a);
    v=((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1))));

end
% w
% R
% v
% mesafe
```

```

bhiz=hiz+hiz*0.25;

while (v<bhiz)
    X=X+0.0001;
    ln= ((R+w)/R);
    a=((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
    tf=sqrt((2*X)/a);
    v=((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
end
% w
% R
% X
% v
% mesafe

while (R<=0.5)&&(w>=0.1)&&(v>=hiz)
    R=R+0.001;
    w=w-0.001;
    X=X-0.15;
    ln= ((R+w)/R);
    a=((u0*(I^2))/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
    tf=sqrt((2*X)/a);
    v=((u0*I^2)*tf)/((2*pi)*m))*((log(ln))/(log(exp(1)))));
    if (R>=0.5)|| (w<=0.1)
        X=X+0.05;
    end
end

w
R
X
v
mesafe

```


ÖZGEÇMİŞ



AdSoyad: Taceddin KIRAN

DoğumYeri ve Tarihi: Beyoğlu, 16/09/1986

Adres: 5. Etap Metrokent Sitesi A2 Blok
Daire: 94 Başakşehir / İstanbul

E-Posta: taceddinkiran@hotmail.com

Lisans: Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim: Araştırmacı, TUBİTAK MAM Enerji Enstitüsü
(27 Mart 2012 – Şubat 2015)

Pilotaj Eğitimi, THY A.O.
(23 Şubat 2014 – Halen)