



**RAYLI ELEKTROMANYETİK FİRLATICI ENERJİ ÜNİTELERİNİN
TETİKLEME ZAMANLARININ EN İYİLENMESİ**

Rümeysa ÖZER

**YÜKSEK LİSANS
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Rümeysa ÖZER

13/03/2023

RAYLI ELEKTROMANYETİK FIRLATICI ENERJİ ÜNİTELERİNİN TETİKLEME ZAMANLARININ EN İYİLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Rümeysa ÖZER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2023

ÖZET

Elektromanyetik fırlatıcılar (EMF) elektrik enerjisi ile kontrol edilen manyetik alanın bir cismi veya mermiyi hızlandırıp fırlatması prensibine dayanır. EMF sistemler geleneksel (barutlu) ateş sistemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Kontrol edilebilirlik bu avantajların en önemlisidir. Farklı türleri bulunan EMF'ler temel olarak ikiye ayrılır. Bunlar bobinli elektromanyetik fırlatıcılar ve raylı elektromanyetik fırlatıcılardır. EMF'ler darbe güç kaynakları(DGK) ile enerjilendirilirler. Bunlar üniteler halinde kullanılırlar. EMF'in başlıca problemi, maliyeti yüksek olan bu sistemlere verilen enerjinin en iyilenmesidir. Böylelikle merminin namludan çıkış hızı ve etkisi artırılabilir. Bu çalışmada, söz konusu elektromanyetik fırlatıcının DGK ünitelerinin tetikleme zamanları probleminin çözümü için altı farklı yöntem önerilmiş ve sonuçları kıyaslanmıştır. Kullanılan yöntemler: İterasyon, sensör, akım dalga formu kontrolü, genetik algoritma(GA), yerçekimi arama algoritması(YAA) ve parçacık sürü optimizasyon algoritması(PSO). Çalışmada eşdeğer devre modeli ve raylı elektromanyetik fırlatıcı MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Enerji kaynağı olarak her biri 200kj enerji depolayan beş adet kapasitif DGK ünitesi kullanılmıştır, böylece toplam 1Mj enerji sisteme verilmektedir.

Atış sırasında yüksek akımdan sistemin zarar görmemesi ve tekrarlanabilecek atış sayısını arttırabilmek için bu çalışmada sisteme 3kA akım sınırı eklenmiş ve tetikleme zamanları bulunmuştur. Akım sınırlandırılarak ve sınırlandırılmadan elde edilen tetikleme zamanları sisteme uygulanarak sonuçları paylaşılmış ve kıyaslamalar yapılmıştır. GA algoritması akım limiti olmadan en yüksek hız değerine ulaşırken, PSO algoritması akım limiti ile en yüksek hız değerine ulaşmıştır. Bu değerler sırasıyla GA ile akım sınırı olmadan 322,8 m/s ve PSO ile sınırlı olduğunda 219,258 m/s'dir.

Bilim Kodu : 90516

Anahtar Kelimeler : Elektromanyetik fırlatıcı, darbe güç kaynağı, raylı elektromanyetik fırlatıcı, tetikleme zamanı, optimizasyon

Sayfa Adedi : 85

Danışman : Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK

OPTIMIZATION OF TRIGGER TIMES OF RAILGUN ENERGY UNITS

(M. Sc. Thesis)

Rümeysa ÖZER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2023

ABSTRACT

Electromagnetic launchers (EML) are based on the principle that a magnetic field controlled by electrical energy accelerating and launching an object or projectile. EML systems have many advantages over traditional (powdered) fire systems. Controllability is the most important of these advantages. There are different types of EMLs, basically divided into two. These are coilguns and railguns. EMLs are energized by pulse power supplies (PPS). They are used in units. The main problem of EML is optimizing the energy supplied to these costly systems. Thus, the muzzle velocity and effect of the projectile can be increased. In this study, six different methods are proposed to solve the trigger times problem of the PPS units of the electromagnetic launcher and their results are compared. Methods used are Iteration, sensor, current waveform control, genetic algorithm, gravity search algorithm and particle swarm optimization algorithm. In the study, the equivalent circuit model and rail electromagnetic launcher were created using MATLAB/Simulink software. Five capacitive PPS units, each of which stores 200kj of energy, are used as energy source, so a total of 1Mj of energy is given to the system. In this study, 3kA current limit was added to the system and trigger times were found in order to prevent damage to the system from high current during firing and to increase the number of repeatable shots. Trigger times obtained by limiting and not limiting the current were applied to the system. The results were shared and comparisons were made. The GA algorithm reached the highest speed value without the current limit while the PSO algorithm reached the highest speed value with the current limit. These values, respectively, were 322,8 m/s without the current limit obtained with GA and 219,258m/s when limited obtained with PSO.

Science Code : 90516

Key Words : Electromagnetic launchers, pulse power supply, railgun, trigger time, optimization

Page Number : 85

Supervisor : Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi boyunca, her an kıymetli tecrübeleri ve destekleri ile beni yönlendiren ve hiçbir konuda yardımını esirgemeyen Değerli Hocam Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK' e , beni asla yalnız bırakmayıp destek olan, bana her konuda cesaret ve moral veren annem Mukaddes ÖZER ve babam Lütfi ÖZER ile ablam Merve SOLMAZ ve abim Semih Emre ÖZER'e sonsuz minnetlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	2
1.2. Bobinler Elektromanyetik Fırlatıcılar	12
1.3. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	14
1.4. Çok Aşamalı Elektromanyetik Fırlatıcılar.....	22
2. KULLANILAN ALGORİTMALARI.....	25
2.1. Genetik Algoritma (GA)	25
2.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması(PSO)	29
2.3. Yerçekimi Arama Algoritması(YAA).....	32
2.4. İterasyon.....	34
2.5. Sensör	35
2.6. Akım Dalga Formu Kontrol Edilerek.....	35
3. BENZETİM ÇALIŞMALARI	37
3.1. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcı Modeli	37
3.2. Çok Aşamalı Raylı Elektromanyetik Fırlatıcının Tetikleme Zamanlarının Bulunması	44

	Sayfa
3.2.1. İterasyon	45
3.2.2. Sensör ile tetikleme.....	50
3.2.3. Akım dalga formu kontrol edilerek	65
3.2.4. Genetik algoritma.....	68
3.2.5. Yerçekimi arama algoritması	72
3.2.6. Parçacık sürü optimizasyon algoritması.....	74
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Tufan parametreleri	9
Çizelge 1.2. Kerrisk parametreleri	21
Çizelge 3.1. Ray parametreleri.....	37
Çizelge 3.2. Kerrisk parametreleri	41
Çizelge 3.3. Ray parametreleri.....	44
Çizelge 3.4. İterasyon parametreleri	46
Çizelge 3.5. Sensör konumlarına göre tetikleme zamanları ve namludan çıkış hızı.....	50
Çizelge 3.6. Sensörlerin 1.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri.....	51
Çizelge 3.7. Sensörlerin 2.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri.....	53
Çizelge 3.8. Sensörlerin 3.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri.....	56
Çizelge 3.9. Sensörlerin 4.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri.....	58
Çizelge 3.10. Sensörlerin 5.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri.....	61
Çizelge 3.11. Akım dalga formu kontrol etme yöntemi sonuçları	65
Çizelge 3.12. Genetik algoritma parametreleri	68
Çizelge 3.13. Genetik algoritma ile bulunan tetikleme ve hız değerleri	69
Çizelge 3.14. Yerçekimi arama algoritması parametreleri.....	72
Çizelge 3.15. Akım sınırı ile YAA sonuçları.....	72
Çizelge 3.16. Parçacık sürü optimizasyon algoritma parametreleri	74
Çizelge 3.17. PSO sonuçları.....	75
Çizelge 4.1. Yöntemler ile elde edilen tetikleme zamanları ve namludan çıkış hızı.....	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Çok aşamalı bobinli fırlatıcı	13
Şekil 1.2. Raylı elektromanyetik fırlatıcı	14
Şekil 1.3. Raylı elektromanyetik fırlatıcıda kuvvetin oluşumu	15
Şekil 1.4. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcı Manyetik Alan Dağılımı	17
Şekil 1.5. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcı Manyetik Alan Dağılımı	17
Şekil 1.6. Yarı sonsuz düz bir telden geçen akımın oluşturduğu manyetik alan	19
Şekil 1.7. Raylı elektromanyetik fırlatıcının kesit alanı	20
Şekil 1.8. Çok aşamalı raylı elektromanyetik fırlatıcı	22
Şekil 2.1. Genetik algoritma birimleri	26
Şekil 2.2. Genetik algoritma akış şeması	27
Şekil 2.3. Seçilim Yöntemi: Rulet Tekeri.....	28
Şekil 2.4. Tek Noktalı Çaprazlama Yöntemi	29
Şekil 2.5. Mutasyon	29
Şekil 2.6. Parçacık sürü optimizasyon algoritması akış şeması.....	30
Şekil 2.7. Parçacıkların hareketi	31
Şekil 2.8. Yerçekimi arama algoritması akış şeması	33
Şekil 2.9. Flat-top akım şekli	35
Şekil 3.1. Raylı elektromanyetik fırlatıcı devre modeli.....	40
Şekil 3.2. Rayların Kesiti	41
Şekil 3.3. Raylı elektromanyetik fırlatıcı ray ve merminin devre modeli	42
Şekil 3.4. Çok aşamalı elektromanyetik fırlatıcı.....	45
Şekil 3.5. Akım-zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 5ms)	47
Şekil 3.6. Hız-Zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 5ms)	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.7. Hız-Zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 0,1ms)	48
Şekil 3.8. Hız-Zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 0,1ms)	48
Şekil 3.9. Akım-Zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 0,1ms).....	49
Şekil 3.10. Hız-Zaman (Akım sınırı ile adım boyu 0,1ms)	49
Şekil 3.11. Akım-Zaman Grafiği (1.Durum)	51
Şekil 3.12. Hız-Zaman Grafiği (1.Durum).....	52
Şekil 3.13. Kuvvet-Zaman Grafiği (1.Durum).....	52
Şekil 3.14. Konum-Zaman Grafiği (1.Durum)	53
Şekil 3.15. Akım-Zaman Grafiği (2.Durum)	54
Şekil 3.16. Hız-Zaman Grafiği (2.Durum).....	54
Şekil 3.17. Kuvvet-Zaman Grafiği (2.Durum).....	55
Şekil 3.18. Konum-Zaman Grafiği (2.Durum)	55
Şekil 3.19. Akım-Zaman Grafiği (3.Durum)	56
Şekil 3.20. Hız-Zaman Grafiği (3.Durum).....	57
Şekil 3.21. Kuvvet-Zaman Grafiği (3.Durum).....	57
Şekil 3.22. Konum-Zaman Grafiği (3.Durum)	58
Şekil 3.23. Akım-Zaman Grafiği (4.Durum)	59
Şekil 3.24. Hız-Zaman Grafiği (4.Durum).....	59
Şekil 3.25. Kuvvet-Zaman Grafiği (4.Durum).....	60
Şekil 3.26. Konum-Zaman Grafiği (4.Durum)	60
Şekil 3.27. Akım-Zaman Grafiği (5.Durum)	61
Şekil 3.28. Hız-Zaman Grafiği (5.Durum).....	62
Şekil 3.29. Kuvvet-Zaman Grafiği (5.Durum).....	62
Şekil 3.30. Konum-Zaman Grafiği (5.Durum)	63

Şekil	Sayfa
Şekil 3.31. Sensörlerin toplu akım grafikleri	64
Şekil 3.32. Sensörlerin toplu kuvvet grafikleri	64
Şekil 3.33. 5 DGK (200kj*5=1Mj) DGK(4m F,10k V) 'da Akım grafiği	66
Şekil 3.34. 5 DGK (400kj*5=2Mj) DGK(8m F,10k V) 'da Akım grafiği	66
Şekil 3.35. 5 DGK (800kj*5=4Mj) DGK(4m F,20k V) 'da Akım grafiği	67
Şekil 3.36. 5 DGK (1600kj*5=8Mj) DGK(8m F,20k V) 'da Akım grafiği	67
Şekil 3.37. Akım Sınırı Eklenmeden	69
Şekil 3.38. Akım Sınırı Eklenmeden	70
Şekil 3.39. Akım Sınırı Eklenerek	71
Şekil 3.40. Akım Sınırı Eklenerek	71
Şekil 3.41. Akım sınırı eklenmemiş YAA	73
Şekil 3.42. Akım sınırı eklenmiş YAA	73
Şekil 3.43. Akım Sınırı Eklenmeden PSO	75
Şekil 3.44. Akım Sınırı Eklenmiş PSO	76
Şekil 4.1. Yöntemlerin toplu hız grafiği	79
Şekil 4.2. Yöntemlerin toplu akım grafiği	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Benningfield'in elektromanyetik Fırlatıcısı "SIVA".....	3
Resim 1.2. Birkeland'in Bobinli elektromanyetik fırlatıcısı.....	3
Resim 1.3. Birkeland'in Norveç Teknik Müzesinde sergilenen bobinli elektromanyetik fırlatıcısı.....	4
Resim 1.4. Kenny'nin 100-Mile Elektromanyetik Fırlatıcısı	5
Resim 1.5. Fauchon-Villeplees raylı fırlatıcısı	6
Resim 1.6. Fauchon-Villeplees raylı fırlatıcı mermileri	6
Resim 1.7. Londra İmparatorluk savaş müzesinde sergilenmektedir.....	7
Resim 1.8. Barber and Marshall ANU raylı fırlatıcısı ile	8
Resim 1.9. PEGASUS	9
Resim 1.10. Tufan, EMFY-1	10
Resim 1.11. TUFAN'ın DGK üniteleri	10
Resim 1.12. EMFY-2	11
Resim 1.13. EMFY-2 50 mm x 50 mm armatürü.....	11
Resim 1.14. EMFY-3	12

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

A

Amper

ABD

Amerika Birleşik Devleti

F

Farad

H

Henry

j

Joule

m

Metre

mm

Milimetre

m/s

Metre/saniye

N

Newton

Kısaltmalar

Açıklamalar

DGK

Darbe Güç Kaynağı

EMF

Elektromanyetik Fırlatıcı

GA

Genetik Algoritma

PSO

Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

YAA

Yerçekimi Arama Algoritması

1. GİRİŞ

Elektromanyetik fırlatma teknolojisi günümüzde önemi artan bir alandır. Geleneksel topçu ile karşılaştırıldığında, elektromanyetik fırlatıcılar, yüksek namlu çıkış hızı, yüksek atış menzili ve fırlatma süreci üzerinde kontrol gibi avantajlara sahiptir [1].

Elektromanyetik fırlatıcılar (EMF), silahlar, füze savunma sistemleri, roketler ve uydu fırlatıcıları, hiperloop manyetik levitasyon trenleri ve havacılık mançınığı gibi birçok alanda geniş uygulama alanına sahiptir [2-10]. Pek çok ülke ve araştırma grubunda EMF sistemlerinin etkinliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütülmektedir. ABD, Çin, Fransa, Almanya, Belçika, Polonya ve Japonya bu alanda çalışan önde gelen ülkeler arasında yer almaktadır.

Elektromanyetik fırlatıcılar temel olarak elektrik enerjisinin oluşturduğu manyetik alanı istediğimiz doğrultusunda kontrol ederek, mekanik enerjiye çevirirler. Aslında aynı prensip ile çalışan birçok cihaz günümüzün vazgeçilmez elemanlarıdır. Motorlar, Jeneratörler, Transformatörler vb. Elektrik enerjisinin uygulanmasıyla sistemde manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alan amacımıza göre tasarlanan sistem ile enerji mekanik enerjiye çevrilir.

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren cihazlar rotasyonel ve doğrusal elektromekanik enerjiye çeviren cihazlar olarak ikiye ayrılabilir. Rotasyonel mekanik enerjiye çeviren cihazlardan bazıları fırçalı ve fırçasız DC motorlar ve endüksiyon motorlarıdır. Doğrusal enerji elde edilen sistemlere ise parçacık hızlandırıcıları, lineer motorlar ve elektromanyetik fırlatıcılar örnek olarak verilebilir.

Raylı elektromanyetik fırlatıcılarda enerji sisteme üniteler hâlinde uygulanır. Bu enerji ünitelerinin tetikleme zamanlarının doğru seçilmesiyle namludan çıkış hızı artırılabilir. Bu tez çalışmasında Matlab/SIMULINK yazılımı kullanılarak raylı elektromanyetik fırlatıcı oluşturulmuş. Oluşturulan modelin enerji ünitelerinin tetiklenme zamanları altı farklı yöntemle bulunmuş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan yöntemler:

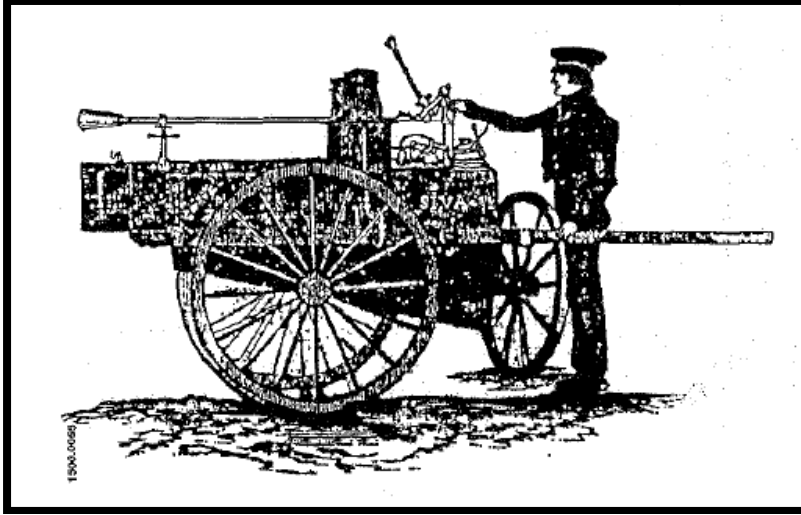
- Genetik Algoritma (GA)
- Yerçekimi Kuvvet Algoritması (YAA)
- Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO)
- İterasyon
- Sensör
- Akım Dalga Formu Kontrol Edilerek'dir.

Enerji ünitelerinin tetiklenem zamanlarının en iyilenmesi ilk önce akım sınırı olmadan gerçekleştirilmiştir. Üniteler devreye ortalama 4kA akım vermişlerdir. Sistemin güvenilirliğini ve gerçekleştirilebilirliğini arttırmak için sisteme 3kA akım sınır eklenerek en iyileme tekrar yapılmıştır. En yüksek namludan çıkış hızı akım kontrolsüz yapıda 322,8 m/s Genetik algoritma ile, Akım sınırlı yapıda 219,258m/s olarak PSO algoritması ile elde edilmiştir.

Dünya çapında elektromanyetik fırlatıcılar konusunda çalışmalara yoğun olarak devam edilmektedir. Bu bölümde elektromanyetik fırlatıcıların gelişiminden ve çalışması devam eden örnekler verilmiştir.

1.1. Elektromanyetik Fırlatıcılar

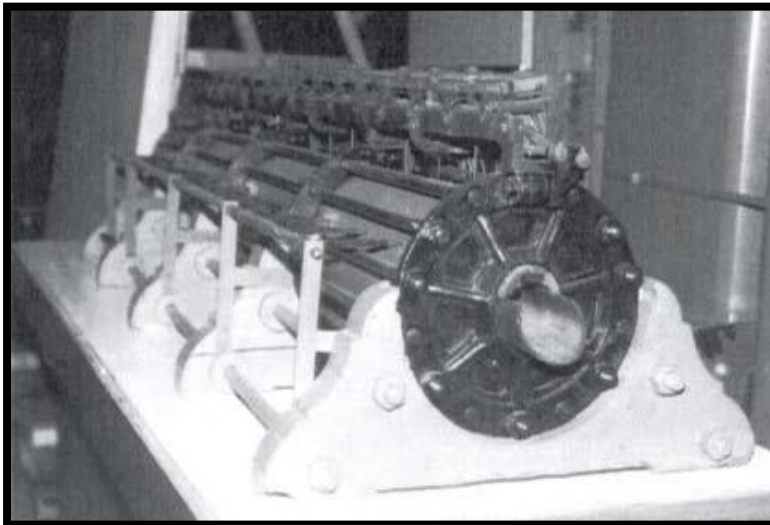
Tarihin ilk elektrikli silahı olan "SIVA", Bennigfield tarafından Amerikada 1844 yılında yapılmıştır[9]. Resim 1.1 de görülen Siva küçük ölçekli taşınabilir bir Coilgun olarak tasarlanmış ve 1844 yılında Jersey adasında, 1845 yılında Londra'da sergilenmiştir. Ancak Siva'nın çalışma prensibi hakkında sadece, itici gücün "galvanik elektrik tarafından patlatılan gazların uygulanma" bilgisi verilmiştir [11].



Resim 1.1. Benningfield'in elektromanyetik Fırlatıcısı "SIVA" [9]

1845 yılında Dr.Charles G.Page sarmal bobinler kullanarak demir mermiler (çubuk) 12-15 metre uzağa fırlatan bir elektromanyetik fırlatıcı yapmışlardır [11].

İlk elektromanyetik fırlatıcı şirketi olan Firearm Şirketi Prof. Kristian Birkeland tarafından Norveç de kurulmuştur. Brikeland 1902 yılından küçük ölçekli Coilgun yaparak bunu Norveç Akademisine tanıtmıştır. Daha sonra Oslo'daki potansiyel hissedarlar için daha büyük versiyonunu 1903 yılında üretti. Ancak atış sırasında akımın 10kA 'i geçmesiyle ark yaparak bobinleri kısa devre yapmıştır. Resim 1.3 de görülen bu model günümüzde Norveç Teknik Müzesinde sergilenmektedir [12].

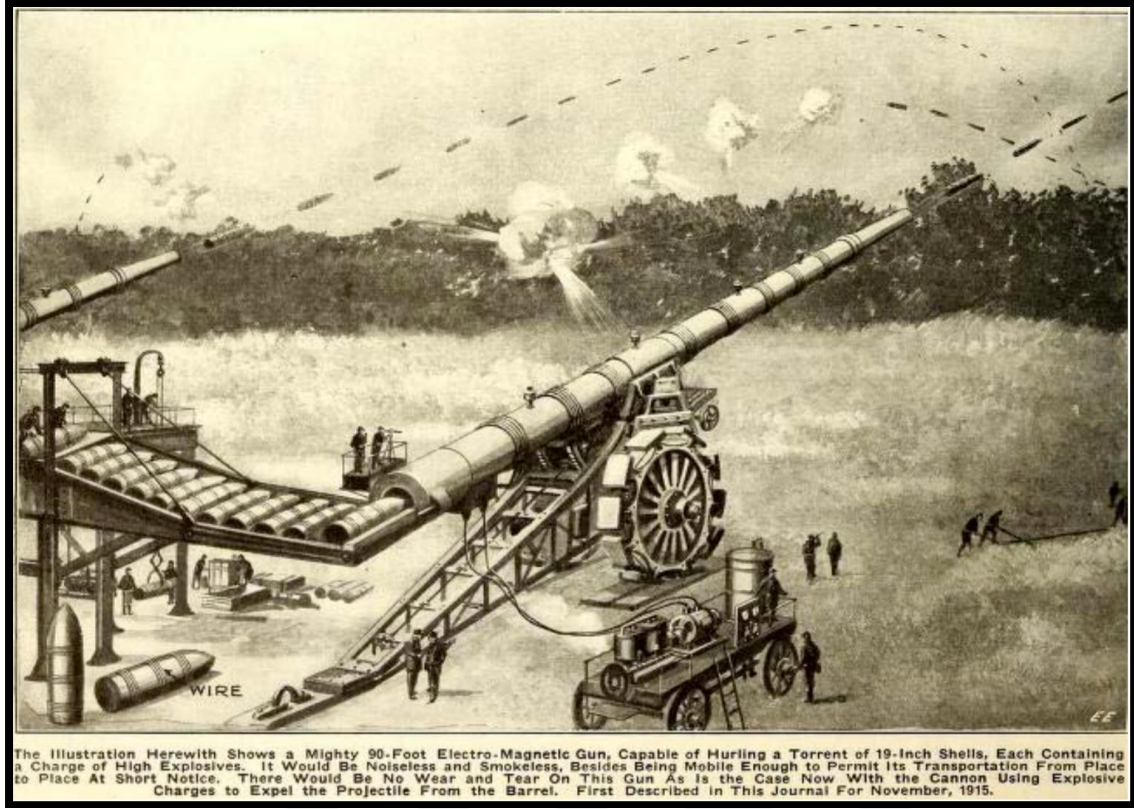


Resim 1.2. Birkeland'in Bobinli elektromanyetik fırlatıcısı [11]



Resim1.3. Birkeland'in Norveç Teknik Müzesinde sergilenen bobinli elektromanyetik fırlatıcısı [11]

Birkelandin fikirlerinden esinlenen Amerikalı mühendis Paul Kenny Resim 1.4 de görülen uzun menzil topçuyu tasarlamıştır. 1908 yılında tasarımını ABD Hükümetine sunmuştur ancak yeterli ödenek olmaması gerekçesiyle reddedilmiştir. 1913 yılında tasarımını Alman ordusu tarafından uygulanabilirliği kabul edilmiştir. Ancak Kenny ABD 'ye dönmüştür. Daha sonrası ile ilgili bilgi bulunmamaktadır.

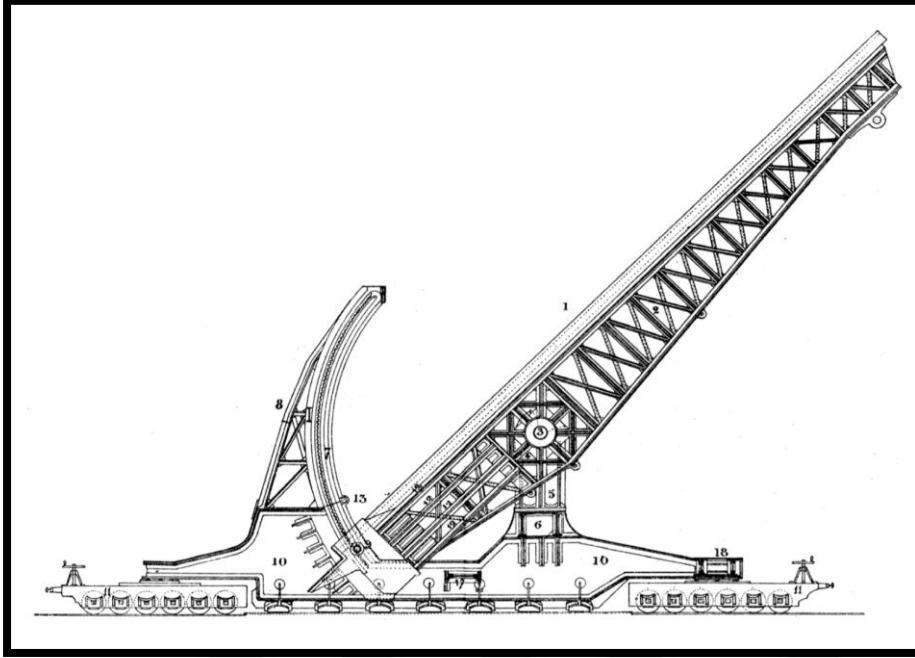


Resim 1.4. Kenny'nin 100-Mile Elektromanyetik Fırlatıcısı [11]

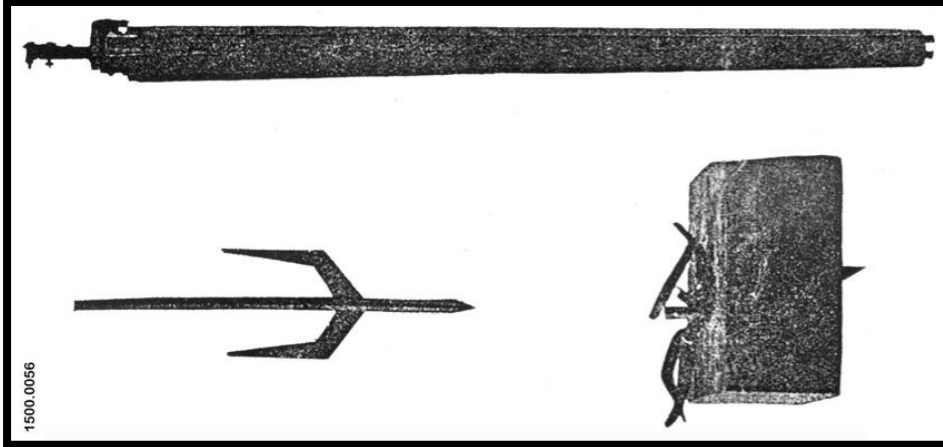
Birinci Dünya Savaşı döneminde 1918 yılında Fransız mucit André Louis Octave Fauchon-Villeplée in lineer motora benzeyen kuvvetli bir elektrik silahı yapmasıyla elektromanyetik fırlatıcı çalışmalarında hareketlenme başladı. Fauchon-Villeplée 1922 yılında iki paralel bara, mermi ve bunlar üzerinden geçen akım ile oluşacak manyetik alandan yararlanan icadının “Mermi Fırlatan Elektrikli Cihazlar” ismiyle patentini almıştır. Ancak silahın yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle çalışmalara devam edilememiştir. Dinamo ile enerjilendirilen 2 metre uzunluğunda namluya sahip olan silahda 600 A 60 V seviyelerine ulaşılmıştır. Resim 1.6 de görülen 270 mm uzunluğundaki 70mm kanatçıklı mermiler 25 metre uzaktaki 80 mm kalınlıktaki ahşap engelleri başarı ile delmiştir.

1918 yılında Fauchon-Villeplée 128 Mj enerji ile 30 metre namluya sahip 3 MA maximum akıma sahip bir EMF tasarladı. Bu tasarımda mermiyi hızlandırmak için Lorentz Kuvvetinden yararlanılan bir raylı elektromanyetik fırlatıcıdır(Raylı elektromanyetik fırlatıcı). Ancak silahın yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle çalışmalara devam edilememiştir. Tasarlanan bu EMF Resim 1.5 de verilmiştir.

1990'larda Fauchon-Villeplée ođlu, PEGASUS tesisinin açılışı için Saint-Louis Enstitüsü'nü (Fransa) (ISL) ziyaret etmiş ve Resim 1.6'da gösterilen mermilerinden birini bağışlamıştır [11].



Resim 1.5. Fauchon-Villeplees raylı fırlatıcısı [9]



Resim 1.6. Fauchon-Villeplees raylı fırlatıcı mermileri [9]

2. Dünya savaşı döneminde Japonyada elektromanyetik fırlatıcı çalışmalarına katıldı. 1942-1944 yılları arasında Tokyada bulunan Shibanra Elektrik Şirketi Kamagawa test merkezinde bobinli elektromanyetik fırlatıcı testleri yapıldı. 10 kg ağırlığındaki mermilerin 2000m/s hızla atılması amaçlandı. 2000 kVA 1500 Hz jeneratör ile enerjilendirilen bobinli fırlatıcı

108 bobine ve 9.7m namlu uzunluğuna sahipti. 100mm uzunluğunda 2kg ağırlığında mermiler maksimum 335 m/s hızla fırlatılabiliştir [9].

Bu fikir 2. Dünya savaşı döneminde Almanyada Joaquim Hansler ve meslektaşları tarafından bu teknolojinin uçaksavar olarak kullanılması önerisine kadar bir süre pasif kalmıştır. 1944 yılından itibaren denemeler yapılmıştır. 10 gramlık bir mermi 1200kurşun asit pili ve iki adet 2m'lik seri iki adet namlu kullanılarak 1.2km/s hız ile fırlatılmıştır. Hansler ve Dr. Otto Muck tarafından kapasitörleri, jeneratörler ve darbe transformatörleri güç kaynakları olarak değerlendirmişlerdir. 40 mm çap 6,5 kg 'lık yüksek patlayıcı uçaksavar mermilerini 2000 m/s ile atabilen 10 metre namluya sahip raylı fırlatıcılar için Flak uçaksavar batası önermişlerdir. Ancak 2.Dünya savaşı sonunda Almanya'nın durumundan dolayı çalışmaların sona ermesine neden olmuştur.

1944 yılında Luftwaffe Flak Komutanlığı isteği üzerine 0.5 kg patlayıcı içeren, 2000 m/s namlu hızına sahip silah çalışmaları yapılmıştır ancak bu çalışmalar teoride kalmıştır. 1947 yılında bu çalışmanın teoride kalmasına gerek olmadığı yeterince enerji ile gerçekleştirilebileceğine arar verilmiştir ancak gerekli enerji Chicago şehrinin yarısının aydınlatılabilecek kadar enerji gerektirmesi nedeniyle yapımından vazgeçilmiştir.

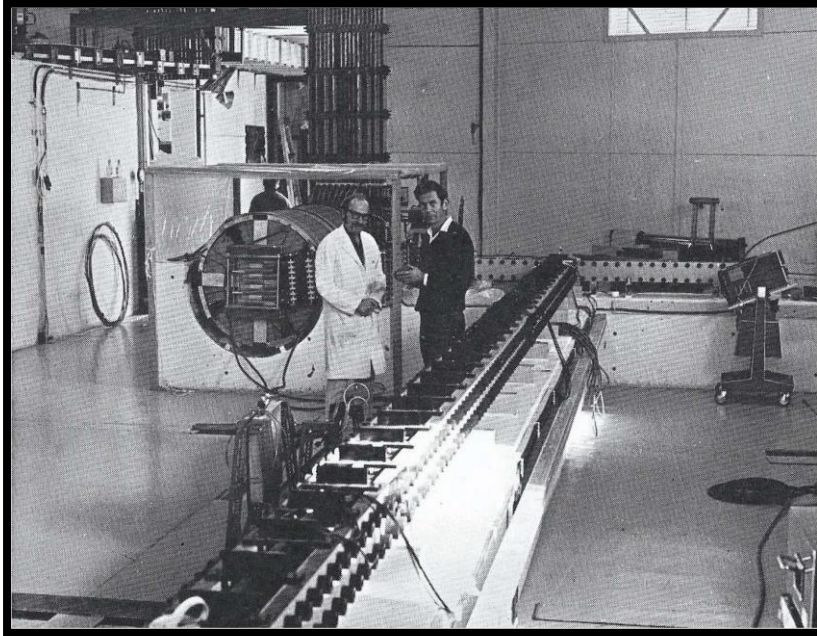


Resim 1.7. Londra İmparatorluk savaşı müzesinde sergilenmektedir

2.Dünya savaşının bitiminden itibaren bu alanda çalışmalar duraksamaya uğramıştır.

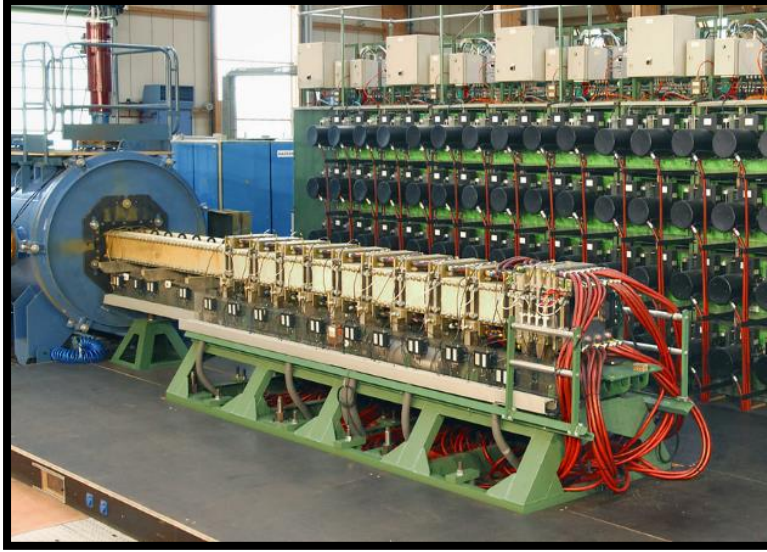
1965 yılında Kaliforniya'da Brast ve Sawle tarafından birçok Raylı elektromanyetik fırlatıcı modeli tasarlanmış ve test edilmiştir. Yapılan modeller artırılmış ve dağıtılmış güç besleme konfigürasyonları denenmiştir [13].

Avustralya Ulusal Üniversitesinde (ANU) Marshall ve Barber meslektaşları yaptıkları ile birlikte gram boyutlu mermileri 1km/s civarında fırlatmayı başaran raylı fırlatıcı Resim 1.8 de görülebilmektedir. Bu raylı fırlatıcı bir indüktör ve yeni bir raylı tüfek açma anahtarı aracılığıyla HPG tarafından desteklenmektedir. Yapılan atışlarda katı bakır armatür kullanılmıştır. Daha sonra Scott Rashleigh plazma armatür kullanarak 5.7km/s namı çıkış hızına ulaşmıştır [14].



Resim 1.8. Barber and Marshall ANU raylı fırlatıcısı ile

Fransız-Alman Araştırma Enstitüsü'nün (ISL) birkaç raylı tabancası vardır, bunların en büyüğü PEGASUS hızlandırıcıdır. 6 m uzunluğunda, 4×4 cm² kalibreli dağıtılmış enerji besleme raylı tüfektir. Enerji kaynağı olarak 10 MJ'lik bir kapasitör bankasına sahiptir. Geçmişte, bu kurulum yaklaşık 300 g kütleyle sahip mermileri 2500 m/s'ye kadar hızlara çıkarmak için kullanılıyordu. Devam eden incelemede, daha ağır mermilerin 2000 m/s'nin üzerindeki hızlara çıkarılmasına çalışılmaktadır. Bunun için yük bölümü içeren yeni bir mermi türü geliştirilmiştir.



Resim 1.9. PEGASUS [8]

Aselsan-tufan

Aselsan 2014 yılından itibaren raylı elektromanyetik fırlatıcılar üzerinde çalışmaktadır. TUFAN 3 nesil olarak çalışmaları devam eden Raylı elektromanyetik fırlatıcı prototipidir. Üç Nesil TUFAN EMFY-1,2,3 'ün parametreleri çizelge 1.1 de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Tufan parametreleri

	EMFY-1	EMFY-2	EMFY-3
Ray Uzunluğu (l)	3m	3m	6,1m
Raylar Arası Mesafe (s)	25mm	50mm	75mm
Ray Boyu (h)	25mm	60mm	50mm
Ray Eni (w)	20mm	60mm	50mm
Enerji	1Mj	2Mj	8Mj
Namludan Çıkış Hızı	1000m/s	1020m/s	2594m/s
Namlu Enerjisi	98,30kj	537kj	2,91Mj
Verim	13,11%	18,08%	36,38%

İlk nesil tufan prototipi Resim 1.10 da görülen EMFY-1 25mmx25mm ölçülü namlu uzunluğu 3m olan raylardan oluşmaktadır. Tufan'da darbeleri güç üretim üniteleri olarak

kapasitif DGK topolojisi kullanılmaktadır. Her biri 200kj olan 5 DGK toplamda 1Mj ile enerjilendirilen sistem ile 38g ağırlıklı fırlatma paketi 1000m/s hızla fırlatılmıştır[15]. Sistemi besleyen DGK üniteleri Resim 1.11 de görülmektedir.



Resim 1.10. Tufan, EMFY-1 [7]



Resim 1.11. TUFAN'ın DGK üniteleri [7]

Aynı sistem kullanılarak 10 DGK toplam 2Mj enerji kullanılarak 125g mermi fırlatılmıştır. Bu çalışmada akımın maksimum değeri 1MA olmuştur. EMFY-2 50mmx50mm kare raylara sahiptir ve namlu uzunluğu 3 metredir.



Resim 1.12. EMFY-2



Resim 1.13. EMFY-2 50 mm x 50 mm armatürü

EMFY-3 50mmx75mm ölçülere sahip uzunluğu 6,1 metre olan raylardan oluşmaktadır. 3.nesil olan bu modelde toplam 8 Mj enerji beslemesi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarla 2594m/s namlu çıkış hızı elde edilmiştir [16].



Resim 1.14. EMFY-3 [6]

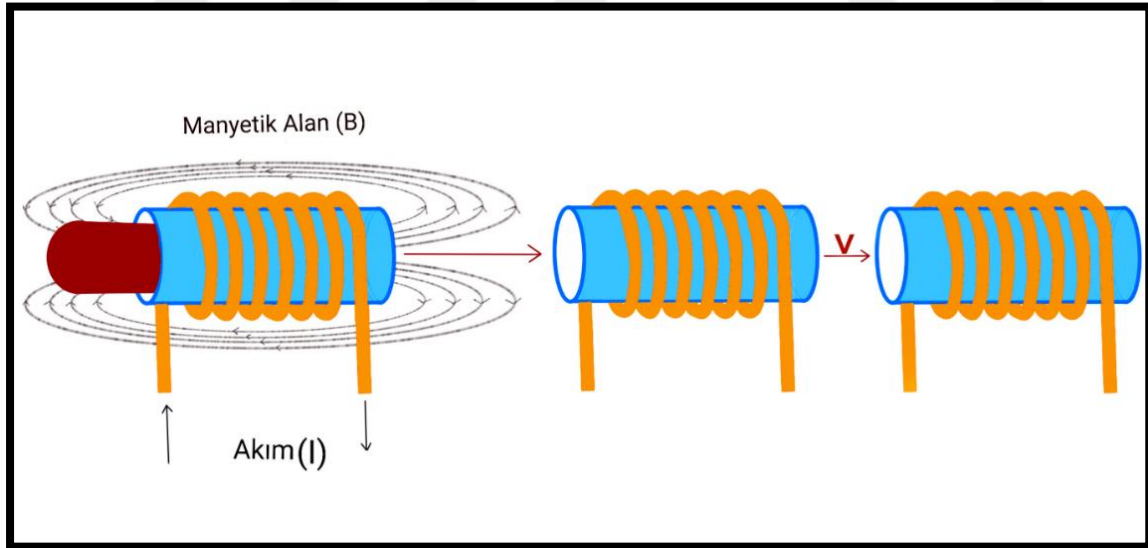
Elektromanyetik fırlatıcılar temel Raylı elektromanyetik fırlatıcı ve Coilgun olarak ikiye ayrılır. Bu yapılarda kendi aralarında özellik değişimlerine göre çeşitli kategoriler ayrılırlar.

1.2. Bobinli Elektromanyetik Fırlatıcı

Karkas etrafına iletken sarılarak oluşturulur. Bobine enerji verildiğinde bobinden geçen akım bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, akımın direncin az olduğu yoldan akması ile aynı şekilde manyetik geçirgenliği düşük olan ortamdaki değil de manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemeden geçmek ister. Karkas başına manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemeden (ferromanyetik ya da magnet) yapılmış bir mermi yerleştirilirse bobin enerjilendirildiğinde oluşan manyetik alanla mermiyi bobinin merkezine çeken bir kuvvet oluşur. Bu kuvvetle mermi bobinin merkezine doğru hızlanarak hareket eder. Ancak enerji kesilmezse mermi bobinin merkezini geçtikten sonra mermiye bu sefer hızlandığı yönün tersinde bir kuvvet uygulanır ve bobin mermiyi yeniden merkezine çeker. Mermi salınım yaptıktan sonra merminin merkezine geri döner. Bu nedenle bobinin enerjisi mermi bobinin

merkez noktasına geldiğinde kesilir. Bu sayede mermi sapan kullanımındaki gibi hızlandırılmış olur. Bobinin enerjisinin kesilme anı çok önemlidir. Eğer enerji erken kesilirse bobine hızlandırıcı uygulanan kuvvet erken kesilmiş olacağı için ulaşılabilecek maksimum hıza ulaşamaz ve etkisi düşmüş olur. Eğer bobinin enerjisi geç kesilirse mermi bobinin merkezini geçtiği anda bobinin merkezine doğru mermiye etki eden kuvvet mermiyi yavaşlatmaya başlar. Bu da merminin hızının ve etkisinin azalmasına neden olur. Aynı zamanda bobinin enerjisinin kesildiği gibi bobindeki enerjinin de sönümlenmesi önemlidir. Bu sönümlenme sayesinde hız artırılabilir. Bobinin enerjisi kesildiğinde hızlı sönümlendirmeyi sağlamak için literatürde mermi bobinin merkezine geldiğinde enerjinin sönümlenmesini hızlandırmak için geliştirilmiş bir boşaltma devresi önerilmiştir [17].

Bobinli elektromanyetik fırlatıcı (Coilgun) yapısı genel olarak çok aşamalı olarak kullanılır. Namluya belli aralıklar ile bobinler yerleştirilir. Bobinler sırayla enerjilendirilirler. Sırayla ilk bobin enerjilendirilir mermi ilk bobinin merkezine geldiğinde ilk bobinin enerjisi kesilir ve ikinci bobin enerjilendirilir. Mermi ikinci bobinin merkezine geldiğinde ikinci bobinin enerjisi kesilerek üçüncü bobine enerji verilir ve işlemler bu şekilde devam eder.



Şekil 1.1. Çok aşamalı bobinli fırlatıcı

Literatürde yapılan çalışmalara göre mermi bobinin başlangıç noktasına geldiğinde bobine enerji verilmesinin hızı arttırdığı gözlemlenmiştir. Ancak kontrol sisteminde kolaylık sağlaması için önceki bobinin enerjisi kesildiği anda yeni aşamanın enerjilendirilme yöntemi de kullanılabilir [18]. Bu sistem için kilit nokta oluşan manyetik alanın yoğunluğudur.

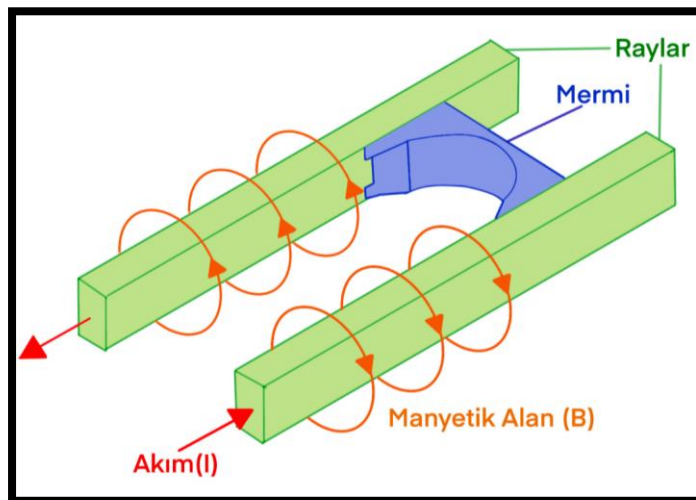
Yoğunluk bobinin sarım sayısı ile doğru orantılı bobinin uzunluğu ile ters orantılıdır. Sarım sayısı arttığında manyetik alan yoğunluğu artarken bobinin uzunluğu arttıkça manyetik alan yoğunluğu azalır. Bobinden geçen akım miktarı attıkça bobinin bu akıma dayanıklı iletken ile yapılması gerekir, buda kullanılacak iletkenin çapını artırır. Bu durum sarım sayısının kısıtlanmasına yani azalmasına neden olur. Sarım sayısı azalırken bobinin uzunluğu artar. Bu durumun sonucu olarak manyetik alan çok zayıflar ve mermiye etki eden kuvvet azalır. Bobinli fırlatıcıların hafif yükler ve daha düşük akımlarda tercih edilmesinin nedeni de budur.

Merminin malzemesi uzunluğu ve kalınlığı gibi özellikleri sistemin verimini ve hızı etkileyen önemli faktörlerdir. Literatürde mermi malzemeleri ve uzunluklarının hıza etkisi incelenmiştir. Bobin boyu ile mermi boyunun aynı olmasının hızı arttırdığı gözlenmiştir. Farklı materyaldeki mermilerin atış performansları incelenmiştir [19].

1.3. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcılar

Raylı elektromanyetik fırlatıcılar Şekil 1.2 de görüldüğü gibi üç ana bölümden oluşur. Bu bölümler:

- Darbe Güç Kaynağı (DGK)
- Raylar
- Armatür (mermi)'dir.



Şekil 1.2. Raylı elektromanyetik fırlatıcı

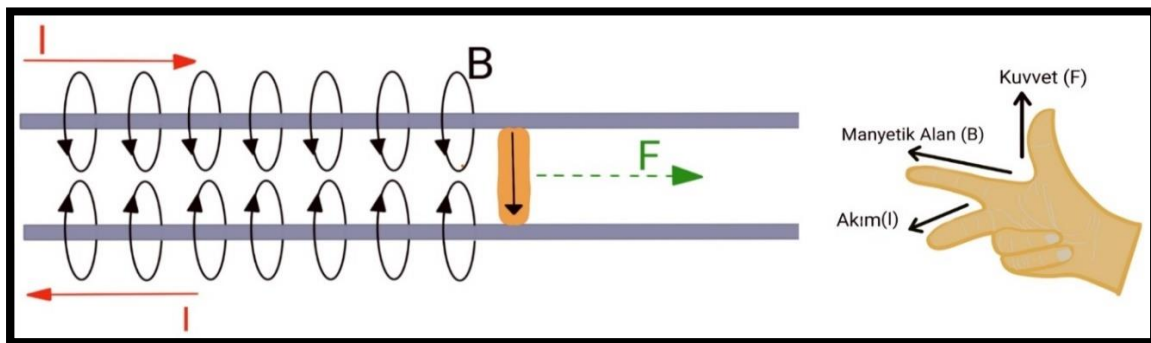
Raylı elektromanyetik fırlatıcılar paralel yerleştirilen iletken raylar ve rayların ortasına konumlandırılan iletken maddeden yapılmış armatürden oluşur. Rayların ve armatürün(merminin) uzunluğu geometrik ölçüleri ve yapıldığı metaryaller elektromanyetik fırlatıcının performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin atış performansına etkileri literatürde incelenen önemli bir konudur.

Seçilen enerji kaynağı raylardan birincisinden deşarj edilmeye başlar. Akım birinci raydan iletken olan armatüre doğru akar ve yolunu ikinci ray üzerinden kaynağa dönerek tamamlar. Akımın akışı ile birlikte Şekil 1.2 de gösterildiği gibi manyetik alan oluşur. Manyetik alan mermiye etki eden Lorentz Kuvvetini oluşturur. Mermiye lorentz kuvveti etki eder ve mermi hızlandırılarak fırlatılır.

Darbeli güç kaynakları depolama biçimlerine göre kapasitör tabanlı, dönen makineler ve darbe oluşturan ağırlar olarak sınıflandırılabilir. Elektromanyetik fırlatıcılar için genellikle kapasitör tabanlı DGK'lar kullanılır. Ancak XRAM, Kompanzasyonlu Darbeli Alternatör (KDA) vb. gibi farklı besleme türlerinin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [20-22].

Raylı elektromanyetik fırlatıcıların kinematik eşitlikleri

Şekil 1.3 de görüldüğü gibi Fleming'in sağ el kuralına göre oluşan kuvvet ile armatür hızlandırılarak fırlatılır. Bu kuvvet Lorentz kuvveti olarak adlandırılır.



Şekil 1.3. Raylı elektromanyetik fırlatıcıda kuvvetin oluşumu

Bio-Savart yayasına göre hareket eden yüklü parçacıklar bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan yükün etrafını dairesel olarak sarar. Oluşan bu alan, I akımını taşıyan bir telden a kadar uzaktaki bir P noktasındaki alan

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a\pi} \quad (1.1)$$

Burada;

B: Manyetik alan (Tesla)

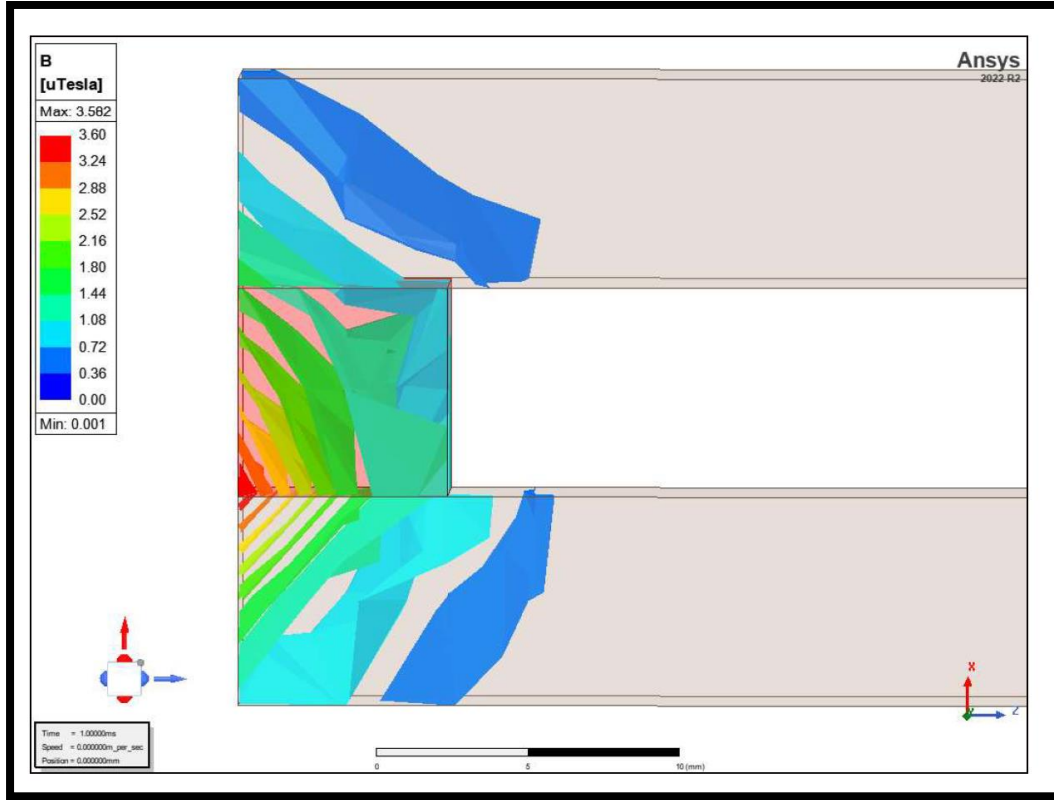
μ : Boşluğun manyetik geçirgenliği ($4\pi 10^{-7}$)(N/A²)

I: Akım (Amper)

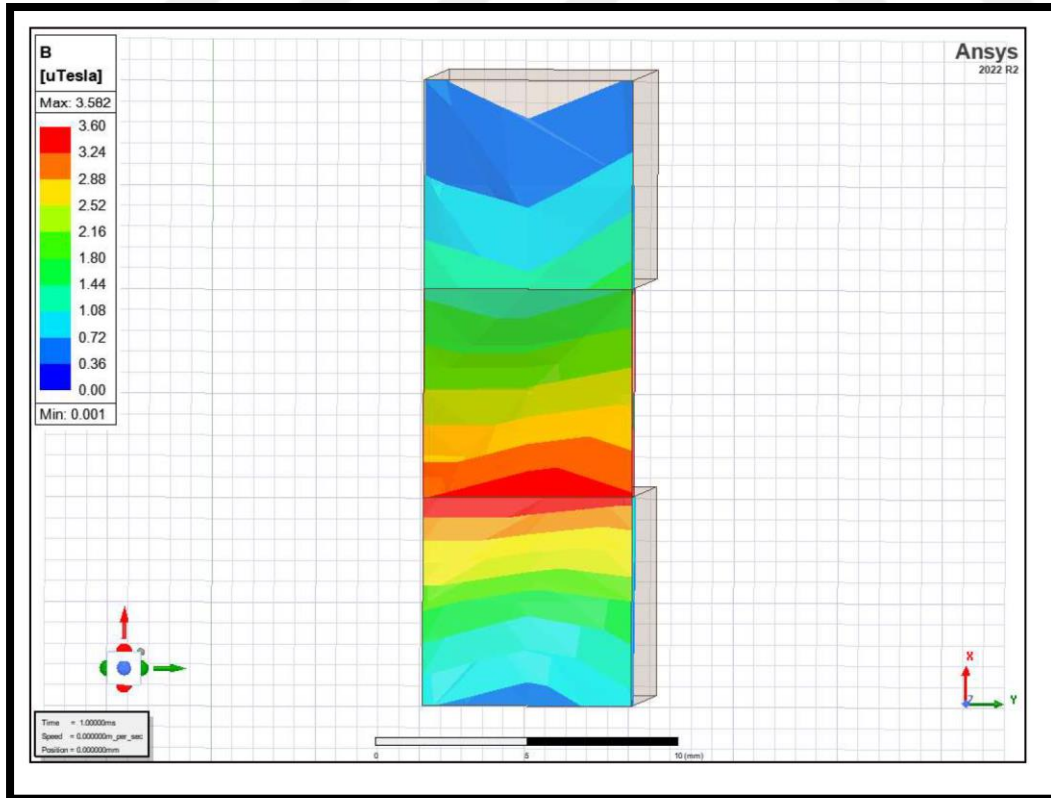
a : Uzaklık (Metre)

Sistemin çalışmasının incelenmesi ve elde edilecek modelde yol gösterici olması için Küçük ölçekli modeli Maxwell/ Ansy'de gerçekleştirilmiştir.

Önce raylardan ve armatürden vd hızıyla akan akım B manyetik alanını oluşturur. Akım ve manyetik alan vektörlerinin hızı, raylar arasında yüklü parçacıklar (q) üzerinde bir kuvvet (F) oluşturur. Ray ve armantürden akım akması ile oluşan manyetik alan (B) Şekil-1.4 de raylı elektromanyeti fırlatıcının yandan ve Şekil-1.5 de raylı elektromanyeti fırlatıcının enerji verilen yüzey görüntüleri verilmiştir. Burada analizleri hızlı yapabilmek için küçük ölçekli bir raylı elektromanyetik fırlatıcı modeli kullanılmıştır.



Şekil 1.4. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcı Manyetik Alan Dağılımı



Şekil 1.5. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcı Manyetik Alan Dağılımı

Manyetik alan mermi üzerinde kuvvet oluşturur. Oluşan bu kuvvet Lorentz kuvvetidir ve Eş. 1.2 de görülebilir. Burada q yüküdür, V_d yükün hızıdır ve B , raylar arasında üretilen manyetik alanın büyüklüğüdür.

$$\vec{F} = q \left(\overrightarrow{v_d} \times \vec{B} \right) \quad (1.2)$$

Armatürden geçen yük miktarı Eş. 1.3 deki gibi formüle edilebilir. Burada I akımdır ve t , l uzunluğundaki armatür boyunca v_d hızındaki bir yükün geçen süresidir.

$$q = It = I \frac{l}{v_d} \quad (1.3)$$

$$q = I \frac{l}{v_d} \quad (1.4)$$

Eş. 1.4 ile Eş. 1.2 birleştirilirse Eş. 1.5 elde edilir.

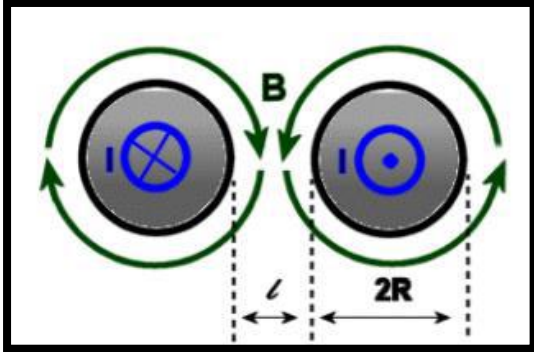
$$\vec{F} = \vec{B} I l \quad (1.5)$$

Armatür yüksekliği boyunca l aşağıdaki eşitliği verir

$$d\vec{F} = \vec{B} I dx \quad (1.6)$$

Şekil 1.4 de verilen Yarı sonsuz düz bir telden geçen akımın oluşturduğu manyetik alan Eş. 1.7 deki gibi ifade edilebilir. r telin merkezinden radyal mesafedir.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \quad (1.7)$$



Şekil 1.6. Yarı sonsuz düz bir telden geçen akımın oluşturduğu manyetik alan

Akımın sadece rayların merkezinden geçtiği ve rayların manyetik özelliklerinin uzun dairesel tellerin özelliklerine benzer olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım ile Eş. 1.6 ve Eş. 1.7 birleştirilirse Eş. 1.8 elde edilir. X rayların merkezinde bir noktadır. Integral işlemleri uygulandığında Eş. 1.9 'u elde ederiz.

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_R^{R+l} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2R+l-x} \right) dx \quad (1.8)$$

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \left[\frac{(R+l)^2}{R^2} \right] \quad (1.9)$$

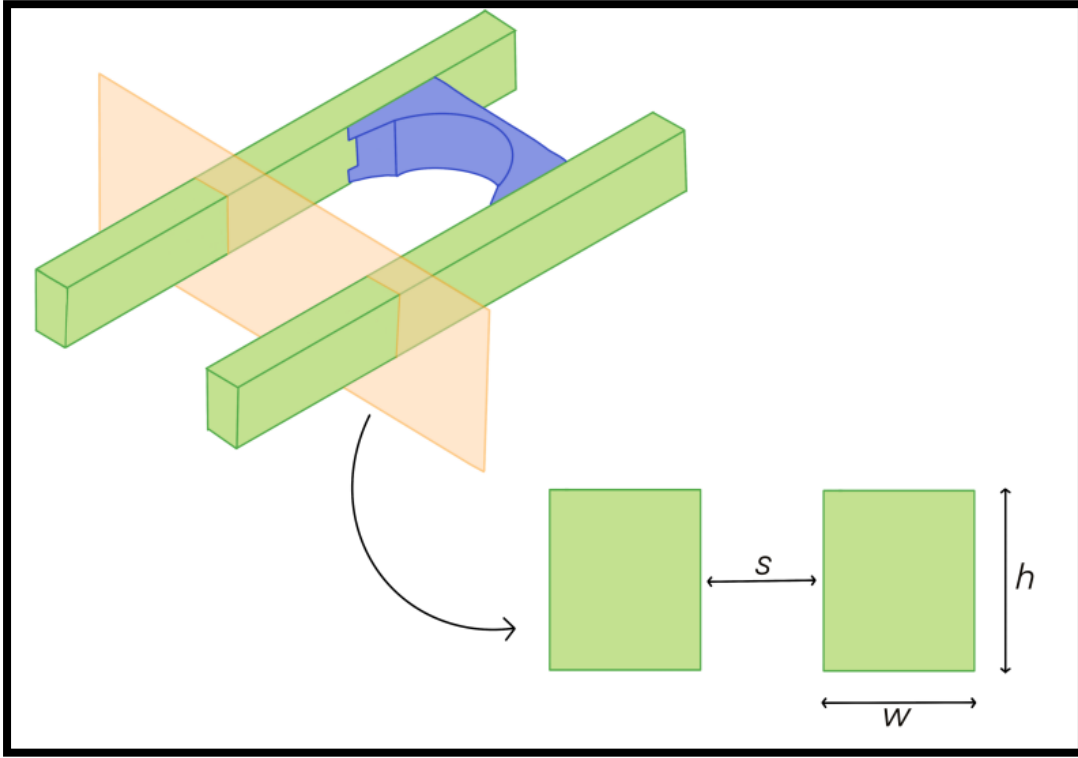
Eş. 1.9 iki kısma ayrılır. Bunlar akımın karesi ve L' yani endüktans gradyanıdır. Endüktans gradyan Eş. 1.10 da görülebilir. Endüktans gradyanın (L') değerli raylı elektromanyetik fırlatıcının geometrisine bağlı değişen bir parametredir ve raylı fırlatıcının performansı için çok önemli bir parametredir.

$$L' = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left[\frac{(R+l)^2}{R^2} \right] \quad (1.10)$$

Eş. 1.10 ve Eş. 1.9 ile birleştirilirse Lorentz Kuvveti formülünü elde ederiz. Elektromanyetik enerjinin tam olarak yarısının raylar boyunca manyetik alanda enerji depolamak için, diğer yarısının ise armatüre kinetik enerji sağlamak için kullanıldığı tahmin edilmektedir. Sonuç olarak Lorentz Kuvveti şu şekilde yazılır;

$$F = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (1.11)$$

Eş. 1.11 raylı elektromanyetik fırlatıcılarında kuvvet hesabında kullanılan temel eşitliktir. Eş. 1.11 de görüldüğü gibi endüktans gradyanı (L') kuvvete doğrudan etki etmektedir ve doğru hesaplanması sonuçların doğruluğu için çok önemlidir. L' , rayların uzunluğu ile endüktansın artması veya azalması olarak tanımlanabilir. Raylı elektromanyetik fırlatıcı için en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada Eş. 1.12'de gösterilen Kerrisk yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, rayların geometrisini ve çeşitli malzemeleri ve logaritmik sabitleri kullanır. Kerrisk yöntemi Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilmiş ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kerrisk Yönteminde kullanılan parametre değerleri Çizelge 1.2 de verilmiştir [23].



Şekil 1.7. Raylı elektromanyetik fırlatıcının kesit alanı

$$L' = \left[A + B \ln \left(a_1 \frac{w}{h} + a_2 \frac{w s}{h h} \right) \right] \ln \left(b_1 + b_2 \frac{s}{h} + b_3 \frac{s}{h} + b_4 \frac{s w}{h h} \right) \quad (1.12)$$

Çizelge 1.2. Kerrisk Parametreleri

KERRİSK PARAMETRELERİ			
Parametre	Değer	Parametre	Değer
a ₁	3,397143	b ₃	0,022093
a ₂	-0,06603	b ₄	0,263739
b ₁	1,007719	A	0,44061
b ₂	2,743651	B	-0,0771

Literatürde endüktans gradyanını hesaplamak için bazı çalışmalar vardır, bunlardan biri COMSOL'de kullanılan FEM modelidir [16,24]. Bu çalışmalarda belirtildiği gibi, endüktans gradyan değeri genellikle Kerrisk'in sonuçlarıyla aynıdır.

Newton'un ikinci yasası kullanılarak Eş.'1.13e ulaşılabilir. Mermiye etki eden kuvvet ve merminin kütlesi bulunduktan sonra Eş. 1.14 kullanılarak merminin ivmesi, Eş. 1.15 kullanılarak hızı ve Eş. 1.17 kullanılarak konumu öğrenilebilir.

$$F_{net} = ma \quad (1.13)$$

$$a = \frac{F_{net}}{m} \quad (1.14)$$

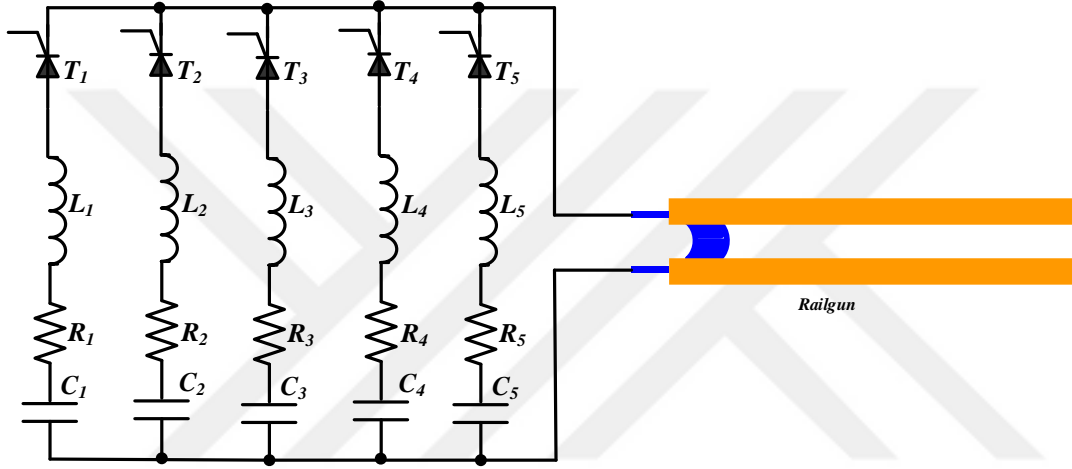
$$v = v_0 + \int_0^t a dt = v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t (F_{net}) dt \quad (1.15)$$

$$x = x_0 + \int_0^t v dt \quad (1.16)$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t (F_{net}) dt dt \quad (1.17)$$

1.4. Çok Aşamalı Elektromanyetik Fırlatıcı

Çok aşamalı raylı elektromanyetik fırlatıcı yapısı raylı elektromanyetik fırlatıcılar için sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Enerjiyi tek ünite ile vermek yerine parçalara ayrılmış üniteler ile vermek raylı fırlatıcıya birçok avantaj sağlar. Sistemin taşınması kolaylaşırken herhangi bir üniteye oluşacak hasar durumunda hasar oluşan ünitenin değiştirilmesi kolaylaşacaktır. Aynı zamanda kaç ünitenin tetikleneceği seçilerek menzil ve namludan çıkış hızı ayarlanabilir. Çok aşamalı Raylı elektromanyetik fırlatıcı Şekil 1.8 de verilmiştir.



Şekil 1.8. Çok aşamalı raylı elektromanyetik fırlatıcı

Raylı elektromanyetik fırlatıcıyı besleyen enerji ünitelerinin tetiklenme zamanları ile sistemin hız ve menzili kontrol edilebilir.

Literatürde çeşitli yollar kullanılarak PPS 'ların tetikleme zamanları belirlenerek namludan çıkış hızı ve verimi kontrol edilmeye çalışılmıştır.

Literatürde Kapasitör tabanlı elektromanyetik fırlatıcının besleme ünitelerinin tetikleme zamanları namludan çıkış hızı alınarak bulunmuştur. Hızı kontrol etmek için flat-top akım şeklini elde etmeyi amaçlamıştır. Bunun için öncelikle çıkış olarak istenen hız seviyesi belirlenmiş daha sonra bu seviyede akım üretmek için iterasyon kullanılarak tetikleme zamanları seçilmiştir. Öncelikle ağırlıksız iterasyon kullanılırken daha sonra daha iyi sonuçlar elde etmek için ağırlık eklenerek iterasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Tetikleme zamanlarını bulmak için genetik algoritma kullanılmış ve bulunan değerler kıyaslanmıştır. Bu çalışmada akım şeklinin kareye yakın olması hedeflenmiştir. İstenen namludan çıkış hızına göre akım

seviyesi belirlenmiştir. Belirlenen akım seviyesinde olacak şekilde enerji ünitelerinin tetiklemem zamanları iterasyon yöntemi ve genetik algoritma ile bulunmuştur. Toplam 243kj enerjiye sahip 12 enerji ünitesi kullanılmıştır. 6,8 gram ağırlığında armatürün namlu çıkış hız 1800 m/s elde edilmiştir. Yöntemler benzer sonuçlar vermiş olsa da iterasyon yönteminin genetik algoritmaya göre sonuca daha hızlı ulaştığı vurgulanmıştır [25].

Raylı elektromanyetik fırlatıcının çıkış hızını maksimize etmek için hıza etki eden raylı fırlatıcılarının parametrelerinin değerlerinin bulunması için Harmoni Arama Algoritması kullanılmıştır. Algoritma kullanılarak armatür ağırlığı, rayların uzunluğu, voltaj seviyesi gibi parametreler algoritma ile seçilerek hız %33,67 arttırılmıştır [26].

Raylı elektromanyetik fırlatıcının çıkış hızına en büyük etkenlerden biri akımdır. Literatür 1’de akım şekli kontrol edilerek hızı maksimum değere ulaştırmak amaçlanmıştır. Genetik algoritma kullanılarak ünitelerin deşarjının yükselme zamanı ile toplam akımın maksimum değeri genetik algoritmanın objektif fonksiyonu olarak alınmış enerji ünitelerinin tetikleme zamanları ise algoritmanın değişkenleridir. Yükselme zamanını ve maksimum akım değerine göre fırlatıcının performansının yükselmeyi amaçlamış çeşitli değerler ile denemeler yapılmıştır [1].

Namlu boyunca yerleştirilen sensörler kullanılarak enerji üniteleri tetiklenmiştir. 100kj kapasitif enerji üniteleri kullanılmıştır.6 metre namlu uzunluğu ile 0,15kg ağırlığındaki armatür ile çalışılmıştır. 11PFU kullanıldığında 703,2m/s, 12 PFU kullanıldığında 795,8m/s, 13PFU kullanıldığında 888,1m/s hızları elde edilmiştir [27].

Tetikleme zamanlarını Çok Düzeyli Hızlı Tetikleme Süresi Algoritması kullanılarak bulunmuştur. Algoritmanın performansını değerlendirmek için parçacık sürü optimizasyon algoritması ve genetik algoritma kullanılmıştır. 32 adet enerji ünitesinin toplam enerjisi 8Mj’dür. Sistemi korumak için bu çalışmada tetikleme zamanları bulunurken akım sınırı eklenmişti. 2275 kA akım sınırı ile 500 gramlık armatür için namludan çıkış hızı 2153 m/s bulunmuştur. Akım sınırı eklenmediği zaman ise tüm enerji ünitelerinin aynı anda tetiklenmesi sonucuna ulaşılmıştır [28].

İncelenen çalışmalar ışığında bu tez çalışmasında altı farklı yöntem kullanılarak enerji ünitelerinin tetikleme zamanları bulunmuştur. Bu yöntemler İterasyon, Akım dalga formu

kontrol edilerek, Sensör Kullanılarak, Genetik algoritma, yerçekimi arama algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritmasıdır. 2.bölümde bu yöntemler anlatılmıştır. 3.Bölümde öncelikle Elektron manyetik fırlatıcının detaylı bir eşdeğeri elde edilmiştir daha sonra en iyileme yöntemleri ile bulunan tetikleme zamanları ve bu tetikleme zamanları sonucunda elde edilen hız sonuçları elde edilmiştir. 4. Bölümde ise yöntemlerin performansları kıyaslanmıştır.



2. KULLANILAN ALGORİTMALARI

Elektromanyetik fırlatıcılarda genellikle Darbe Güç Kaynaklarının (DGK) ünitelere bölünerek uygulanmaktadır. Bu yapıya Çok aşamalı elektromanyetik fırlatıcı adı verilir. DGK ünitelerinin tetikleme zamanlarının doğru seçilmesi merminin hızını etkilemektedir. Bu tetikleme zamanlarının doğru bulunması için tek kesin bir yol henüz yoktur. Bu bölümde Çok aşamalı raylı elektromanyetik fırlatıcının enerji ünitelerinin tetikleme zamanlarının seçilmesi için tez çalışmasında kullanılan yöntemler açıklanmaktadır. Bunlar:

- Genetik Algoritma
- Yerçekimi Kuvvet Algoritması
- Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması
- İterasyon
- Sensör
- Akım Dalga Formu Kontrol Edilerek

2.1. Genetik Algoritma (GA)

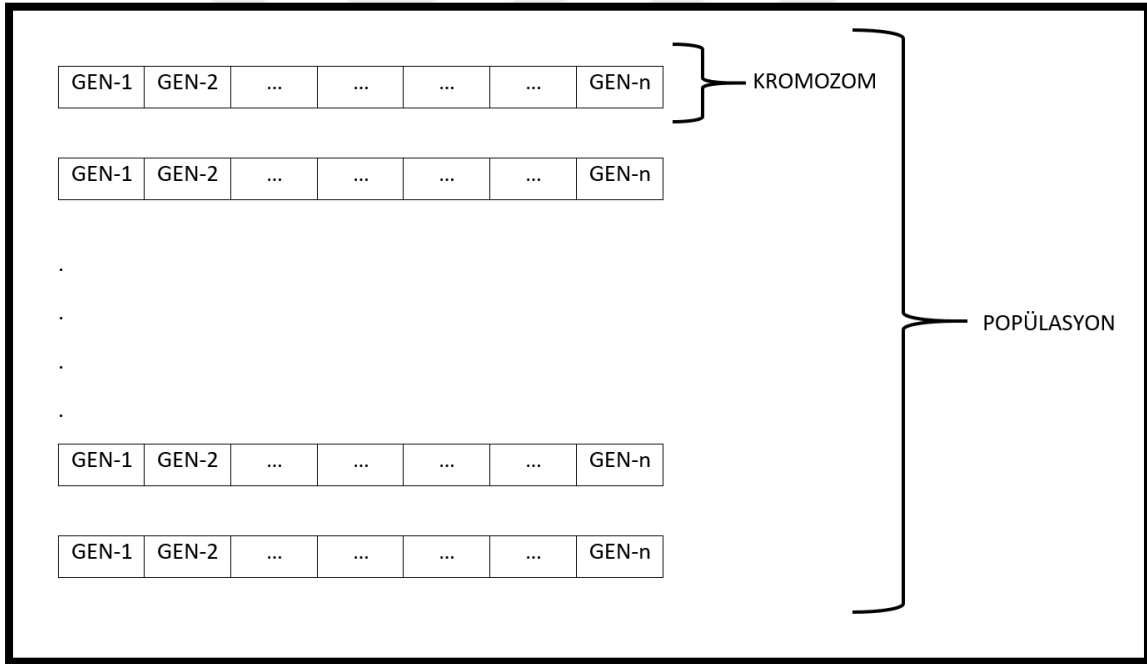
Genetik Algoritma evrim teorisinden ilham alınarak oluşturulmuş meta sezgisel bir algoritmadır. Genetik algoritma 1975 yılında Michigan üniversitesinde J.Holland ve meslektaşları tarafından geliştirilmiş ve “Adaptation in Nature and Artificial Systems” isimli kitabında yayımlanmıştır [29].

Genetik Algoritma Darwin tarafından öne sürülen evrim teorisi prensiplerini benimser. Buna göre en güçlü birey hayatta kalırken zayıf birey doğal seçim ile elenir. Bu prensibe göre bireylerin gücü amaç fonksiyonu ile değerlendirilir. Amaç fonksiyonu algoritmayı kullanarak maksimize etmek veya minimize etmek istediğimiz fonksiyondur. Bu algoritmayı kullanarak amaç fonksiyonun maksimum değerini elde etmek istiyorsak amaç fonksiyon değeri yüksek olan birey yeni nesle aktarılırken amaç fonksiyon değeri küçük olan birey yeni nesle aktarılmaz. Minimum değer aranan durumlarda ise tam ters işlem yapılır.

Nesiller kullanılan algortimada en iyi bireyi elde etmek için kullanılan temel işlemler vardır. Bunlar çaprazlama, mutasyon, seçim, elit birey seçimleridir. Bu yöntemler ve algoritmanın

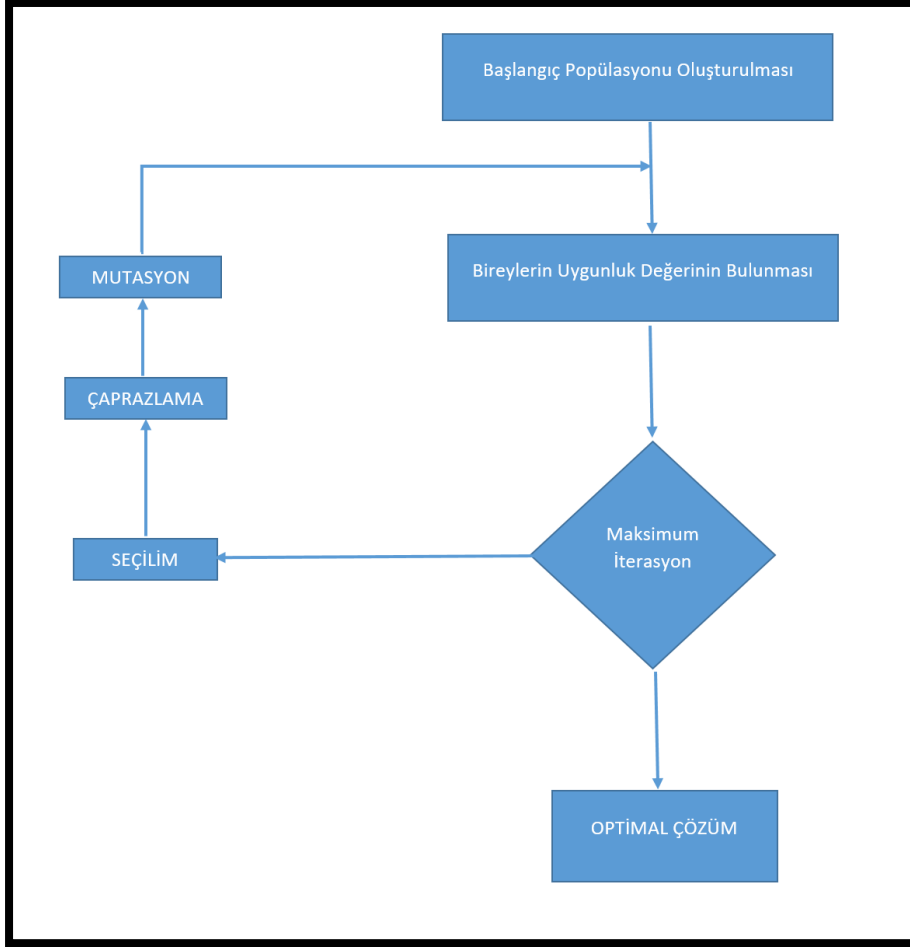
çalışma prensibinin anlaşılması için bilinmesi gereken temel kavramlar anlatılmıştır. Bunlar gen, kromozom ve popülasyondur.

Gen genetik bilgiyi taşıyan tek başına anlamlı en küçük yapıdır. Genler bir araya gelerek (gen dizileri) kromozomları oluşturur. Arama uzayında popülasyon veya nüfus olarak nitelendirilen kromozomlardan oluşan bireyler ile arama yapılır. Her birey alternatif bir çözümü temsil etmektedir. Kromozom ve ya bireyler, genlerin birleşmesi ile oluşturulur. Kromozomların değerleri amaç fonksiyonuna parametre olarak alınır. Elde edilen değer o bireyin uygunluk değeridir. Kromozomların boyutu arama uzayı (değer aralığına) göre belirlenir. Popülasyon ise algoritmasını performansını etkileyen önemli bir parametredir. Arama uzayını kaç birey ile arayacağımızı gösterir. Genellikle 20-50 arasında seçilse de problem özelliğine göre değeri seçilir.



Şekil 2.1. Genetik algoritma birimleri

Genlerin kodlanması için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. En fazla tercih edilen ikili kodlama, değer kodlama, Permütasyon (Sıralı) Kodlama ve Ağaç Kodlama örnek verilebilir. Çözülme istenen probleme uygun olan kodlama yöntemi seçilebilir. Bu çalışma için ikili kodlama kullanılmıştır. Kromozomların değerleri ikili - ondalık dönüşümü yapılarak amaç fonksiyonuna parametre olarak girilmiştir. Genetik Algoritmanın akış şeması Şekil 2.2 de verilmiştir.



Şekil 2.2. Genetik algoritma akış şeması

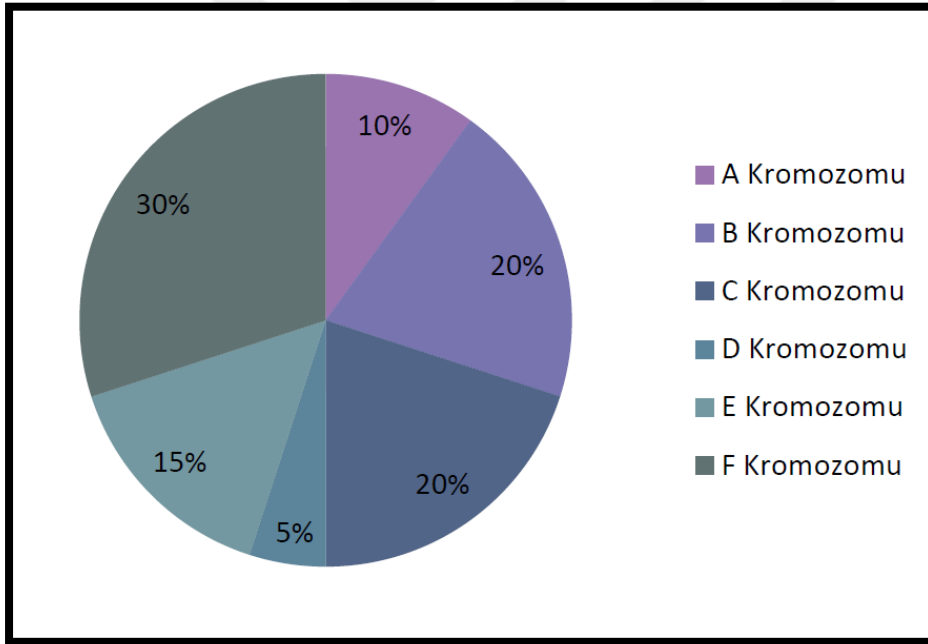
GA'da ilk olarak, bireyler rastgele oluşturulur. Her bir bireysel uygunluk değerleri amaç fonksiyonuna göre belirlenir. Bireyler, amaç fonksiyon değerlerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. Bu noktada elitizm (seçkincilik) oranına göre bireyler seçilir ve bir sonraki nesle aktarılır. Elitizm (seçkincilik) oranı popülasyonun en yüksek uygunluk değerine sahip olan bireylerin değişime uğramadan yeni nesle aktarılmasını sağlar. Çeşitliliği sağlamak için bireyler arasında çaprazlama yöntemi kullanılarak yeni bireyler oluşturulur. Ebeveyn seçimi için farklı yöntemler bulunmaktadır ancak hepsinde yüksek amaç fonksiyonu değerine sahip bireylerin çaprazlama için ebeveyn olarak seçilme şansları daha yüksektir. Çeşitliliği artırmak için mutasyon yöntemi kullanılarak rastgele bireylerde gen değişiklikleri gerçekleştirilir. En iyi, en hızlı sonuca ulaşmak için genetik algoritma parametre değerleri ayarlanabilir.

Yeni nesil oluşturmak için ebeveynleri seçme işlemine seçilim adı verilir. Seçilim için kullanılan bazı yöntemler vardır. En sık kullanılanlara, Rulet Tekerleği (Çemberi) Yöntemi,

Rastgele Seçilim Yöntemi, Turnuva Yöntemi ve Budama Yöntemi örnek gösterilebilir. Bu çalışmada Rulet Tekerleği (Çemberi) Yöntemi kullanılarak ebeveynler seçilmiştir.

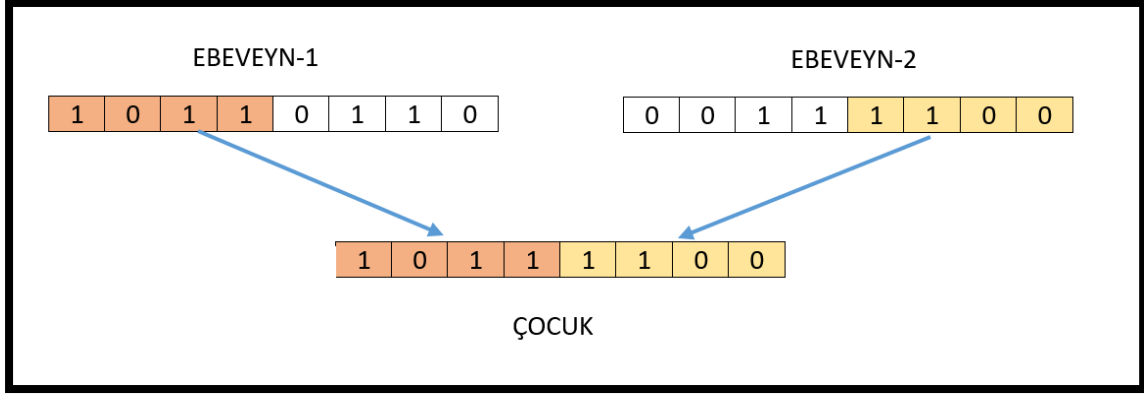
Seçilim için rulet tekeri yöntemi sıklıkla tercih edilen kullanışlı bir yöntemdir. Rulet tekeri yönteminde çember popülasyonda bulunan kromozom sayısı kadar parçaya bölünür. Daha sonra popülasyondaki bireylerin uygunluk değerleri toplanır. Her bireyin rulet tekerindeki oranı ise bireyin uygunluk değerinin toplam uygunluk değerine bölümünün yüzdesi ile elde edilir. Ebeveyn seçimi için çarkın çevrilmesi gerekir [30].

Uygunluk değeri yüksek olan bireylerin seçilme ihtimali yüksek olurken aynı zamanda uygunluk değeri düşük olan bireylere de seçilme şansı verilerek popülasyon da çeşitlilik sağlanmış olur.



Şekil 2.3. Seçilim Yöntemi: Rulet Tekerleri[30]

Yeni nesil oluşturmak için seçilim ile ebeveynler seçildikten sonra çaprazlama işlemi gerçekleştirilerek yeni bireyler oluşturulur. Çaprazlama işleminin kaç noktadan ve hangi nokta veya noktalardan gerçekleştirildiğine göre çeşitleri vardır. Bunlar Tek Noktalı Çaprazlama Yöntemi, İki Noktalı Çaprazlama Yöntemi ve Tekdüze (Uniform) Çaprazlamadır. Şekil 2.4 de Tek Noktalı Çaprazlama Yöntemi gösterilmiştir. Bu çalışmada çaprazlamanın yapılacağı nokta rastgele seçilmiştir.



Şekil 2.4. Tek Noktalı Çaprazlama Yöntemi

Yeni bireyler oluşturulduktan sonra popülasyonun uygunluk değeri en düşük olan bireyleri yerine yeni bireyler geçer. Popülasyonda çeşitlilik sağlama amacıyla mutasyon işlemi uygulanır. Şekil 2.5 de görüldüğü gibi popülasyondan rastgele seçilen bir bireyin rastgele seçilen bir geni değiştirilir.

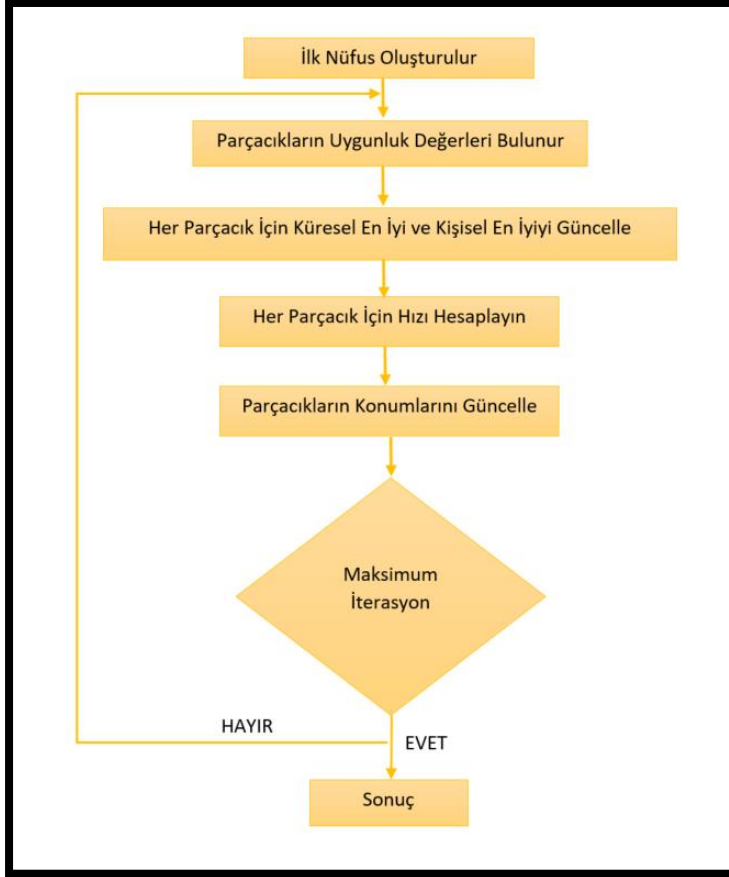


Şekil 2.5. Mutasyon

Elde edilen yeni nesil popülasyon ile aynı işlemler yinelenir. Belirlenen iterasyon sayısına geldiğinde ise algoritmanın en iyi sonucu optimal sonucumuz olur.

2.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması, optimizasyon problemlerinde sıklıkla kullanılan meta-sezgisel bir algoritmadır. Sürüler halinde avlanan hayvanların davranışlarından ilham alan algoritma ilk olarak 1995 yılında Kenndey ve Eberhart tarafından önerilmiştir [31]. PSO'nun genel akış şeması Şekil 2.6 da verilmiştir.



Şekil 2.6. Parçacık sürü optimizasyon algoritması akış şeması

Çözümün bulunmak istenilen bir arama uzayı belirlenir. Bu arama uzayı içerisinde rastgele parçacıklar oluşturulur. Parçacık, algortmada en iyi sonuca ulaşmak için kullanılan bireylere verilen addır. Parçacıkların popülasyonu sürüyü oluşturur. Sürü ile arama uzayındaki probleme en uygun çözüm aranır.

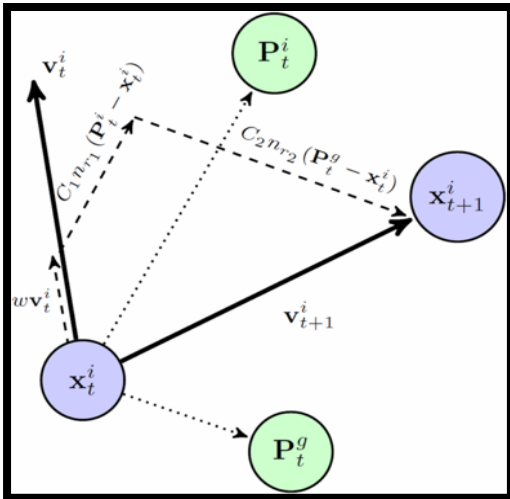
Parçacıkların çözüme yakınlığını ölçmek için uygunluk değerleri kullanılır. Parçacıkların uygunluk değerleri uygunluk fonksiyonu ile belirlenir. Uygunluk fonksiyonu algortmayı kullanarak maksimize etmek veya minimize etmek istediğimiz fonksiyondur. Bu fonksiyonun değişkenleri olarak ilk olarak rastgele oluşturduğumuz sürü bireylerinin konumu kullandığımızda elde ettiğimiz sonuçlar parçacıkların uygunluk değeridir ve konumlarının çözüme uygunluğunu ifade eder.

En iyi çözümün arandığı süre boyunca her parçacığın çözüme en yakın olduğu değer yani en yüksek uygunluk değerine sahip olduğu değer bireysel en iyi değeridir. Bu değere yerel en iyi değer adı verilir. Tüm sürüdeki en yüksek uygunluk değerine sahip olan parçacığın

değeri ise global en iyi değerdir. Bu değerler arama boyunca güncellenerek en iyi sonuca ulaşılır.

Her adımda bireylerin hızı ve pozisyonu hesaplanır. Hız hesaplaması hem bilişsel hem de sosyal bileşenlere göre yapılır. Bulunan uygunluk değerine göre, sürüde en iyi uygunluk değerine sahip birey global en iyi olarak tanımlanır. Her parçacığın iterasyonlar arasındaki en iyi değeri, yerel en iyi olarak tanımlanır. Yeni pozisyonları hesaplarırken öğrenme katsayılarından hangi değer ne kadar etkilendiğini seçebiliriz. Global maksimum ve bireysel maksimum değerinin bireyin hızına etkisi c_1 ve c_2 katsayıları ile seçilebilir. Global maksimumun hıza etkisi c_1 yani sosyal katsayı ile bireysel maksimumun etkisi c_2 yani bilişsel katsayısı ile kontrol edilir. Bu Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmasının en önemli avantajlarından biridir. Parçacıklar hem kendisinin hem de tüm sürünün tecrübesinden yararlanarak hareket ederler. Bu sayede sonuca ulaşma hızını artırır.

Hız hesaplandıktan sonra bireyler bu hız ile sonraki konumlarına geçerler ve yeni iterasyona başlanılarak adımlar tekrarlanır. Hız değerini Eş. 2.1 yardımı ile bulabiliriz. Burada $pbest$ parçacığın yerel en iyi değeri iken $gbest$ global en iyi değerdir. c_1 ve c_2 katsayıları genellikle 2 alınarak kullanılır. Bulunan hız değeri ile Eş. 2.2 kullanılarak pozisyon değişikliği yapılır.



Şekil 2.7. Parçacıkların hareketi

$$v_i(t + 1) = v_i + rand_1 * c_1(pbest - x_i) + rand_2 * c_2(gbest - x_i) \quad (2.1)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2.2)$$

Algoritmanın adımları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

1. Değişkenlerin alt ve üst limitlerinin belirlenmesi (Arama uzayının belirlenmesi)
2. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
3. Her bir parçacığın uygunluk değerlerinin değerlendirilmesi
4. Küresel en iyi güncellenmesi.
5. Her parçacık için kişisel en iyinin güncellenmesi.
6. Her parçacık için hızın hesaplanması.
7. Parçacık pozisyonlarının hıza göre güncellenmesi. (tetikleme süreleri)
8. Maksimum yineleme tamamlanana kadar üçüncü adımdan itibaren adımların tekrarlanması.
9. Son

2.3. Yerçekimi Arama Algoritması (YAA)

Yerçekimi Arama Algoritması (YAA), kütle etkileşimlerinin yerçekimi yasasından esinlenen buluşsal bir optimizasyon yöntemidir [32]. Yerçekimi Arama Algoritması Newton'un yerçekimi kanununa göre etkileşimde bulunan bir grup kütleli arayıcı ajanlar olarak kullanır. Yerçekimi Arama Algoritmasının (YAA) akış şeması Şekil 2.8 de verilmiştir.

Newton'un yerçekimi yasasına göre kütlesi olan her parçacık, kütlesi olan diğer parçacıklara kuvvet uygular. Bu kuvvet, parçacık kütleleriyle doğru orantılıdır, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Yerçekimi kuvveti Eş. 2.3 'de görülebilir. M1 ve M2 parçacıkların kütleleri olduğunda, R bu iki parçacık arasındaki mesafedir ve G yerçekimi sabitidir.

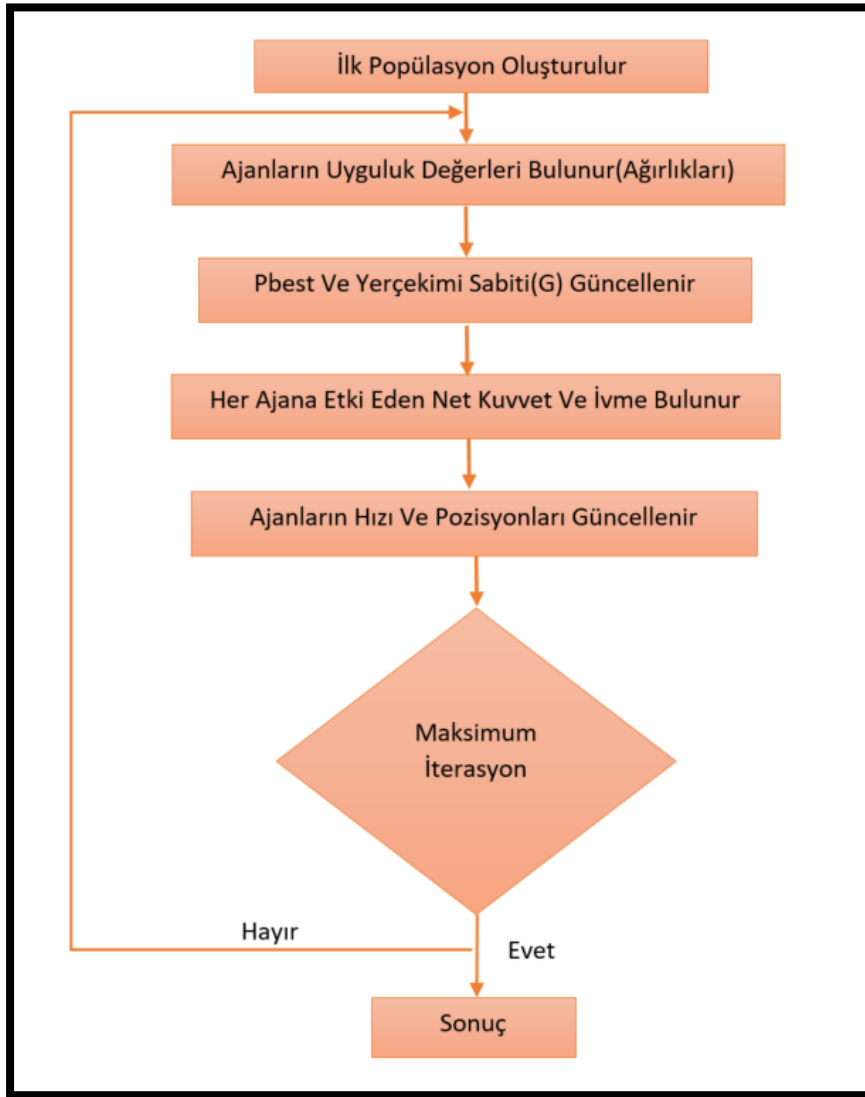
$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad (2.3)$$

$$F_{net1} = \sum_{k=2}^n G \frac{M_1 M_2}{R_{1-k}^2} \quad (2.4)$$

$$a_1 = \frac{F}{M_1} \quad (2.5)$$

$$v_1(t + 1) = rand * v_1(t) + a_1(t) \quad (2.6)$$

$$x_1(t + 1) = x_1(t) + v_1(t + 1) \quad (2.7)$$



Şekil 2.8. Yerçekimi arama algoritması akış şeması

Öncelikle rastgele bir ajan grubu oluşturulur. Rastgele oluşturulmuş bu ajanların değerleri amaç fonksiyonuna değişken olarak alınır ve uygunluk değerleri bulunur. Uygunluk değerleri, ajanların ağırlıkları olur. Ağırlık değerlerine göre her ajana diğer ajanların uyguladıkları net kuvvet Eş. 2.4 kullanılarak bulunur. Eşitlikteki n , toplam ajan sayısıdır. Bir ajana uygulanan net kuvveti bulduktan sonra ajanın ağırlığını bildiğimiz için Eş. 2.5 kullanılarak ivmeyi bulabiliriz. İvmeleri bulunan her ajanın hız değerlerini Eş. 2.6 'ü kullanılarak buluruz. Bulunan hız değerine göre ajanların pozisyonları Eş. 2.7 kullanılarak güncellenir.

Problemin çözümüne en yakın değer en yüksek uygunluk değerine (ağırlığa) sahip olan ajanın değeri maksimum değer olarak kaydedilir ve arama boyunca güncellenir. Yerçekimi sabitinin değeri, algoritmanın daha büyük ve daha küçük adımlarla ilerlemesi için güncellenir. Yerçekimi sabitinin gerçek değeri, evrenin gerçek yaşına bağlıdır. Bu güncelleme Eş. 2.8 kullanılarak yapılır. $G(t)$ t zamanı (iterasyon) için yerçekimi sabitinin değeridir. $G(t_0)$, t_0 zamanının ilk kozmik kuantum aralığında yerçekimi sabitinin değerinden esinlenilmiş ilk olarak bizim belirlediğimiz değerdir.

$$G(t) = G(t_0) * \left(\frac{t_0}{t}\right)^\beta, \quad \beta < 1 \quad (2.8)$$

Ajanların yeni konumdaki uygunluk değerleri hesaplanır ve açıklanan adımlar maksimum İterasyon sayısına ulaşılan kadar tekrarlanır. Yerçekimi Arama Algoritmasının adımları:

1. Arama Uzayı tanımlanır.(Aramanın yapılacağı alt ve üst sınır)
2. Rastgele ajanlar oluşturulur.
3. Ajanların uyguluk değerlerinin yani ağırlıklarının bulunması (mases)
4. Yerçekimi sabiti (G), en iyi ve ajan kütleleri güncellenir.
5. Her ajana diğer ajanların uyguladığı net kuvvet bulunur.
6. Parçacıkların ivme ve hız değerleri bulunur
7. Ajanların konumları güncellenir
8. Maksimum iterasyona ulaşılan kadar 3.adımdan itibaren adımlar tekrarlanır.
9. Son

2.4. İterasyon

Bu yöntemle her enerji ünitesinin tetikleme zamanlarını belirlenen zaman tüm olasılıkların denenerek en iyi sonucun seçilmesi. Bu yöntemde öncelikle bir aram uzayı belirlenmiştir. Sonucu bulmak istediğimiz aralık her bir enerji ünitesinin tetikleme zamanıdır. Tetikleme yapılabilecek aralık 0ms ile 65ms arası olarak belirlenmiştir. Bu aralık da tetiklenebilecek tüm değerler denenerek en iyi sonucu veren değer tetikleme değeri olarak seçilmiştir. Öncelikle tetikleme zamanı 0ms olarak başlatılmıştır. Daha sonra üst sınır değerine ulaşılan kadar belirlenen adım boyutu kadar tetikleme zamanı arttırılarak çıkış hızlarına bakılmıştır.

En yüksek çıkış hızını veren tetikleme değeri seçilmiştir. Tüm DGK ünitelerinin tetikleme zamanları bulunana kadar bu işlem tekrarlanmıştır.

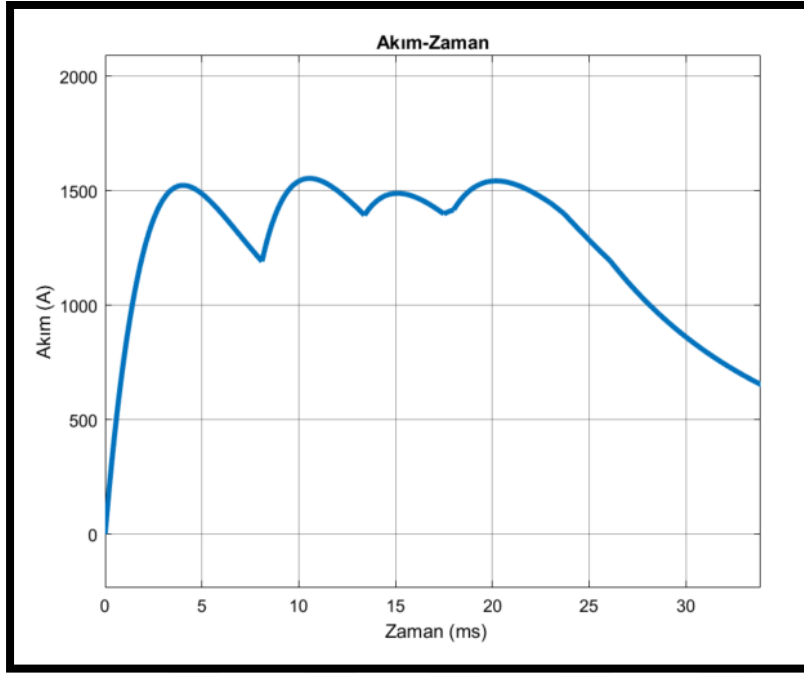
İterasyon yönteminin sonuçları buluş hassasiyeti adım boyutuna bağlıdır. Adım boyu büyüdükçe sonuca ulaşma hızı artacaktır ancak büyük adımlar atarak ilerleneceği için elde edilen düşük kalabilmektedir. Adım boyutu küçültülürse yapılacak iterasyon sayısı ve süre artmakla birlikte sonucu bulma hassasiyeti artacaktır.

2.5. Sensör

En iyi tetikleme bulmak için kullanılan yöntemlerden biride sensör kullanılarak tetiklemedir. Her bir enerji ünitesinin tetiklenmesi için enerji ünitesi sayısı kadar sensör namı boyunca konumlandırılır. Sensörün bulunduğu konuma mermi geldiğinde bir enerji ünitesi ateşlenir.

2.6. Akım Dalga Formu Kontrol Edilerek

Raylı elektromanyetik fırlatıcılarda yüksek seviyelerde akıma ihtiyaç vardır. Aynı zamanda bu akımın hızlı yükselerek istenen seviyeye gelmesi ve merminin rayda bulunduğu süre boyunca sabit kalması istenmektedir. Şekil 2.9 da verilen bu akım şekli flat-top akım şekli olarak adlandırılır. Enerji ünitelerinin tetikleme zamanları doğru seçilerek bu akım şekli elde edilebilir.



Şekil 2.9. Flat-top akım şekli

3. BENZETİM ÇALIŞMALARI

3.1. Raylı Elektromanyetik Fırlatıcı Modeli

Raylı elektromanyetik fırlatıcı bölümünde anlatılan çalışma prensipleri ve eşitlikler kullanılarak klasik iki ray içeren raylı elektromanyetik fırlatıcı modeli MATLAB/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Raylı fırlatıcı modeli Raylı elektromanyetik fırlatıcı kinematik modeli ve elektrik modeli kullanılarak namludan çıkış hızı elde edilmiştir. Rayların uzunluğu üç metredir. Ray malzemesi olarak bakır kullanılırken, mermi için alüminyum tercih edilmiştir. C şeklinde bir mermi kullanıldı. Ray ve merminin malzeme ve boyut bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ray parametreleri

Materyaller			
Ray		Mermi	
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Ray Materyali	Bakır	Mermi Materyali	Alüminyum
Ray Boyu	25mm	Mermi Boyu	25mm
Ray Eni	25mm	Mermi Eni	25mm
Raylar arası aralık	25mm	Mermi Uzunluğu	25mm
Namlu Uzunluğu	3m	Mermi Ağırlığı	125g

Bölüm 1.3.1 de anlatıldığı gibi raylı elektromanyetik fırlatıcıda mermiye etki eden kuvvet Eş. 3.1 de verilmiştir. Burada L' endüktans gradyanıyken I toplam akımdır. Elektromanyetik fırlatıcılarda enerji tek ünite olarak kullanılmaz çoklu üniteler halinde kullanılır. Toplam akım ü. 3.2'de görüldüğü gibi tüm ünitelerin akımları toplamıdır.

$$F_{\text{lorentz}} = \frac{1}{2} L' I_{\text{toplamlam}}^2 \quad (3.1)$$

$$I_{toplam} = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 \quad (3.2)$$

Mermiye fırlatma yönünde etki eden Lorentz kuvveti bulunduktan sonra merminin hareket yönünün ters yönünde etki eden yavaşlatıcı kuvvetler bulunmalıdır. Bunlar mekanik sürtünme kuvveti (Eş. 3.3) ve aerodinamik sürtünme kuvvetidir (Eş. 3.6). Bu kuvvetler C şekilli mermiler için incelenmiştir [33].

Mekanik sürtünme kuvveti, μ_{fr} sürtünme katsayısına ve normal kuvvet F_N' ye bağlıdır. Eş. 3.4'de görüldüğü gibi normal kuvvetin iki bileşeni vardır: elektromanyetik ve mekanik. Normal kuvvetin elektromanyetik bileşeni elektromanyetik kuvvete, sabiti ise mevcut köprü geometrisine bağlıdır.

$$F_f = \mu_{fr} F_N \quad (3.3)$$

$$F_N = F_{N,mech} + F_{N,em} \quad (3.4)$$

$$F_{N,em} = \alpha F_{lorenz} \quad (3.5)$$

F_{drag} aerodinamik sürtünme Eş. 3.6 kullanılarak hesaplanabilir. C_{drag} , ray geometrisine bağlı olan sürüklenme katsayısıdır. İyi tasarlanmış bir geometri ile verimlilik artırılabilir. Merminin havaya sınır alanı A_{lp} ve ρ hava yoğunluğudur.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} C_{drag} A_{lp} \rho_{air} v^2 \quad (3.6)$$

$$F_{net} = F_{lorenz} - F_f \quad (3.7)$$

$$F_{net} = (1 - \alpha \mu_{fr}) F_{lorenz} - \mu_{fr} F_{N,mech} - F_{drag} \quad (3.8)$$

$$F_{net} = F_{lorenz} - F_f - F_{drag} \quad (3.9)$$

Mermiye etki eden net kuvvet bulunduktan sonra Newton'un ikinci yasası kullanılarak kütlelerini bildiğimiz merminin ivmesine ulaşabiliriz. Eş. 3.10'u kullanarak Eş. 3.11 ile

merminin ivmesi bulunur. İvmesi bulunan merminin hızı ve konumu Eş. 3.12 ve Eş. 3.14'ü kullanarak bulabiliriz. Bu sayede merminin namludan çıkış hızını elde etmiş oluruz.

$$F_{\text{net}} = F_{\text{lorentz}} - F_f - F_{\text{drag}} = ma \quad (3.10)$$

$$a = \frac{F_{\text{lorentz}} - F_f - F_{\text{drag}}}{m} \quad (3.11)$$

$$v = v_0 + \int_0^t a \, dt = v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t (F_{\text{lorentz}} - F_f - F_{\text{drag}}) \, dt \quad (3.12)$$

$$x = x_0 + \int_0^t v \, dt \quad (3.13)$$

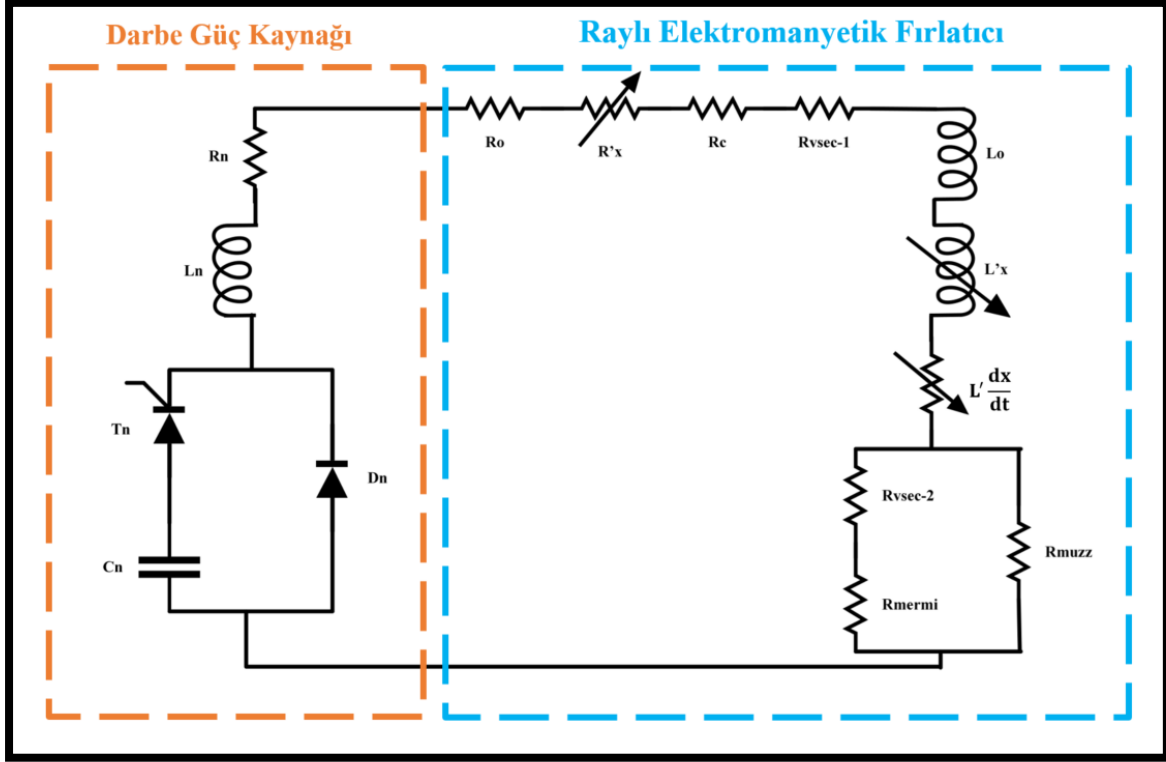
$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t (F_{\text{lorentz}} - F_f - F_{\text{drag}}) \, dt \, dt \quad (3.14)$$

Merminin namludan çıktıktan sonraki hareketini incelemek için merminin menzili bulunmuştur. Mermi namludan çıktığı anda mermiyi hızlandırıcı Lorentz kuvveti ve yavaşlatıcı sürtünme kuvveti kaybolur. Bunların yerini hava direncinin oluşturduğu yavaşlatıcı sürtünme kuvveti alır. Bu kuvvet Eş. 3.15 kullanılarak bulunabilir. Burada ρ havanın özkütlesi iken A cismin hava ile temas eden alanıdır. Merminin hızı v , C_d sürtünme katsayısıdır.

$$F_h = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d \quad (3.15)$$

Mermi ilerlemesi esnasında merminin önünde bir hava sıkışması meydana gelir ve bu sıkışma çevreye bir basınç dalgası olarak iletilir. Bu dalga, ses hızında ilerleyen dalgaya neden olur. Merminin önünde oluşan bu dalga, burun direncini meydana getirir. Eğer mermi havada ses hızının altında ilerliyorsa, bu dalga mermiden daha hızlı hareket ederek mermiden ayrılacaktır. Sesten hızlı hareket eden mermilerdeyse, ses hızında hareket eden bu dalga mermiden kaçamaz ve birleşerek merminin önünde bir şok dalgası oluşturur. Bu sıkıştırılmış dalgaların şok cephesi şeklinde oluşması, merminin daha fazla burun direncine maruz kalmasına neden olur. Burun direnci mermiye uygun bir burun şekli kazandırılarak azaltılabilmektedir [34]. Ancak yapılan çalışmada ses hızının üzerine çıkılmamıştır. Bu nedenle şok dalgası hesaba katılmamıştır.

Enerji hesabının gerçekleştirilmesi için Eş. 3.1 de yer alan akım değerine ihtiyacımız var. Bunun için sistemin elektrik modeli çıkarılmıştır. Raylı elektromanyetik fırlatıcının enerji ünitesi ile birlikte eşdeğer devresi Şekil 3.1 de verilmiştir.



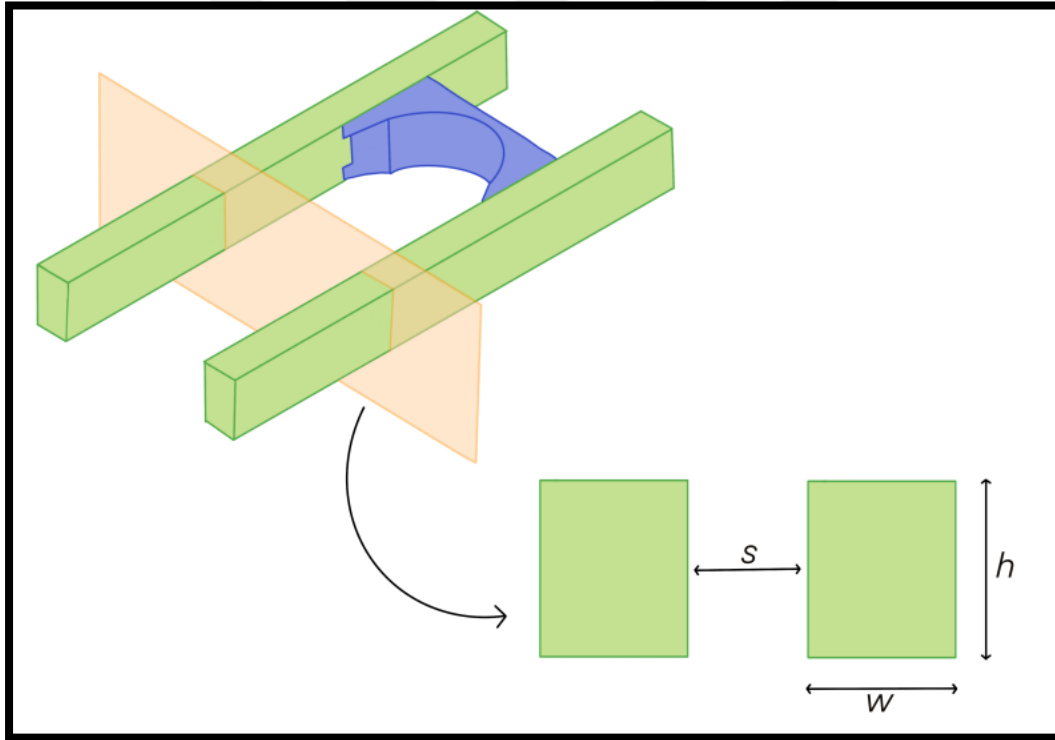
Şekil 3.1. Raylı elektromanyetik fırlatıcı devre modeli

Atış süreci boyunca akımın izlediği yol olan birinci ray mermi ve ikinci ray merminin hareketi ile değişecektir. Mermi namluda ilerledikçe değerleri artacaktır. Bu da rayın eşdeğer endüktansının ve direncinin sabit olmaması, merminin konumuna göre değişmesi anlamına gelir. R_0 sistemin ilk direnci iken L_0 sistemin ilk endüktansıdır. Merminin konumu değiştikçe değişen endüktans ve direnç L' ve R' ile sağlanır. R' direnç gradyanı ve L' endüktans gradyanıdır. R' rayların uzunluğu ile direncinin L' ise endüktansın artması veya azalması olarak tanımlanabilir. Endüktans gradyanı rayın enine, boyuna ve raylar arası mesafe ve malzemesine bağlı bir parametredir. Merminin değişen konumu ile değişen endüktansı ifade eder. Kuvvete dolayısıyla hıza direkt etki eden bir parametredir. L' bu çalışmada Eş. 3.16 da gösterilen Kerrisk Yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Rayın boyu h ile eni w ile gösterilirken s raylar arasındaki mesafedir. Kerrisk katsayıları Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kerrisk parametreleri

KERRİSK PARAMETRELERİ			
Parametre	Değer	Parametre	Değer
a_1	3,397143	b_3	0,022093
a_2	-0,06603	b_4	0,263739
b_1	1,007719	A	0,44061
b_2	2,743651	B	-0,0771

$$L' = \left[A + B \ln \left(a_1 \frac{w}{h} + a_2 \frac{w s}{h h} \right) \right] \ln \left(b_1 + b_2 \frac{s}{h} + b_3 \frac{s}{h} + b_4 \frac{s w}{h h} \right) \quad (3.16)$$



Şekil 3.2. Rayların Kesiti

Eş. 3.17 ile direnç gradyanı hesaplanabilir. L' gibi R' değeride rayların malzemesine ve kesit alanına bağlıdır. Eşirlikteki σ , ray iletkenliğini temsil eder. Paydaki iki değeri raylar üzerindeki yolu ifade eder ve kullanılan ray sayısına göre değişebilir.

$$R' = \frac{2}{\sigma(wh)} \quad (3.17)$$

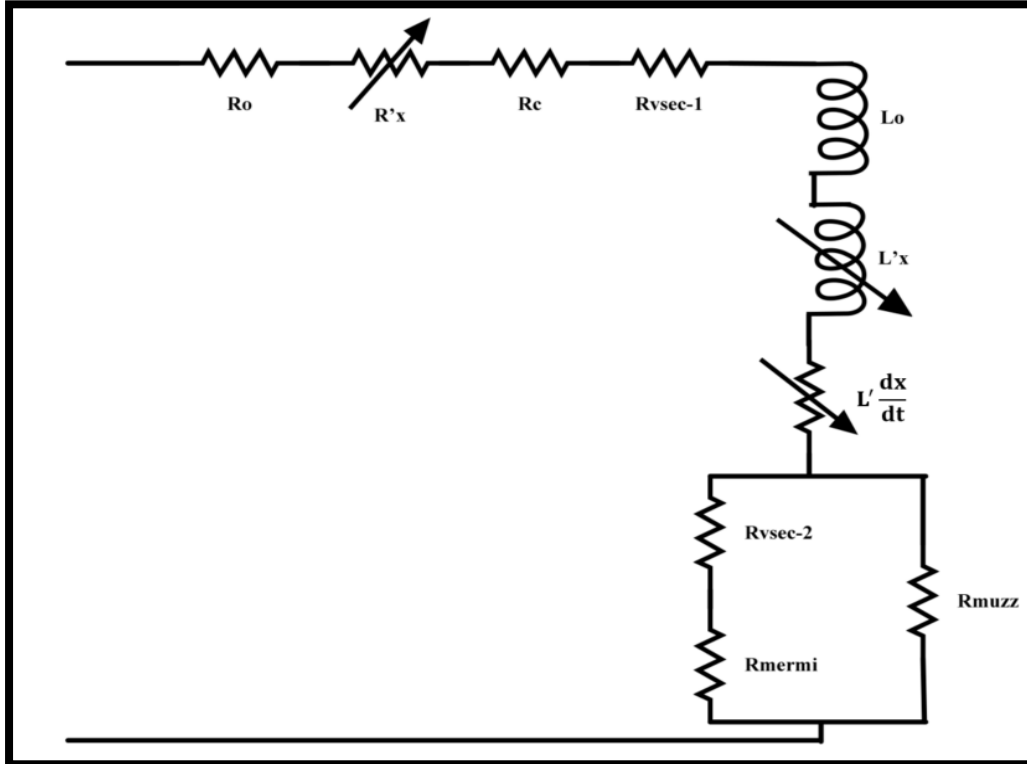
Sistemin elektrik devresi eşitliği Kirchoff'un Gerilim Yasası uygulanarak bulunmuş ve Eş. 3.20 de verilmiştir. Bu eşitlik kullanılarak akım değeri bu sayede de mermi hızına ulaşılmıştır. Eş. 3.20 de verilen tüm bu dirençlerin eşdeğer direnci R eşdeğer endüktans ise L dir. Bunlar Eş. 3.18 ve Eş. 3.19 ile ifade edilebilirler.

$$R = (R_o + R'x + R_c + R_{vsec-1}) + \left(\frac{R_{muz}(R_{vsec-2} + R_{mermi})}{R_{muz} + R_{vsec-2} + R_{mermi}} \right) \quad (3.18)$$

$$L = L_o + L'X \quad (3.19)$$

$$-V_o + \frac{1}{c} \int_0^t i(t) dt + i(t)R + vL'i(t) + L' \frac{di(t)}{dt} \quad (3.20)$$

Elektromanyetik fırlatıcının basit haliyle devre eşdeğeri Eş. 3.20 de de verilmiştir. Burada mermi konumu ile değişen endüktans ve direç, endüktans gradyanı ve direç gradyanı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Raylı elektromanyetik fırlatıcı ray ve merminin devre modeli

Bunların dışında kalan sistemin ilk direnci ve oluşan dirençler çeşitli hesaplar ile bulunmuştur. R_o rayın ilk direnci iken R' 'x merminin ray boyunca yerinin değişmesinden kaynaklanan mermi konumuna(x) göre değişen rayın direncidir. Aynı şekilde L_o rayın ilk endüktansı iken L' 'x merminin ray boyunca yerinin değişmesinden kaynaklanan mermi konumuna(x) göre değişen rayın endüktansıdır. R_{mermi} armatürün yani merminin direncidir. R_c temas direncidir. Raylar arasındaki aralık s, rayların yüksekliği h ve ray uzunluğu l ile gösterilmiştir. Temas direnç sabiti k_c , ray malzemesinin geçirgenliği μ , etkili öz direnç ρ ile ifade edilirken t zamandır.

$$R_{mermi} = \frac{s}{h} \sqrt{\frac{\mu\rho}{2\pi t}} \quad (3.18)$$

$$R_c = \frac{k_c \sqrt{k_t}}{h} = \frac{k_c}{h} \sqrt{\frac{\mu\rho}{2\pi t}} \quad (3.22)$$

$$L_{ray} = xL' \quad (3.23)$$

$$R_{ray} = xR' \quad (3.24)$$

Kayan bir temasın ara yüzünde temas hızına bağlı olarak değişen bir temas hızı deri etkisi (VSEC) oluşur. Bu etkinin oluşturduğu direnç Eş. 3.25 de verilmiştir. Temas hızı cilt etkisi Eş. 3.25 de görüldüğü gibi hız ile doğru orantılı olarak değişir. Düşük hızlarda akım yolu dağılımı homojene yakındır ve bu etki ihmal edilebilir. Ancak hız arttıkça temas hızı cilt etkisi artar bu nedenle model analiz edilirken hesaba katılması önemlidir[35]. R_{vc} orantısallık sabitidir ve değeri Eş. 3.26 kullanılarak bulunabilir. Burada n_c cilt etkisine maruz kalan yüzey sayısıdır. ρ_f filmin özgül direncidir [36]. A_c ise temasta bulunan yüzey alanıdır.

$$R_{VSEC} = R_{VC} v^{1.5} \quad (3.25)$$

$$R_{VC} = n_c \frac{\rho_f}{A_c} \quad (3.26)$$

Temas hızı deri etkisi raylar ve mermi arasında oluştuğu ve iki tarafta da direnç oluşturduğu için temas hızı deri etkisi iki bileşen olarak eşdeğer devreye eklenmiştir [37].

Bunlar R_{VSEC-1} ve R_{VSEC-2} 'dir. Eş. 3.27 ve Eş. 3.28 'de gösterilmiştir. Burada p orantısallık sabitidir ve bu alışma için 0,5 alınmıştır.

$$R_{VSEC-1} = pR_{VSEC} \quad (3.27)$$

$$R_{VSEC-2} = (1 - p)R_{VSEC} \quad (3.28)$$

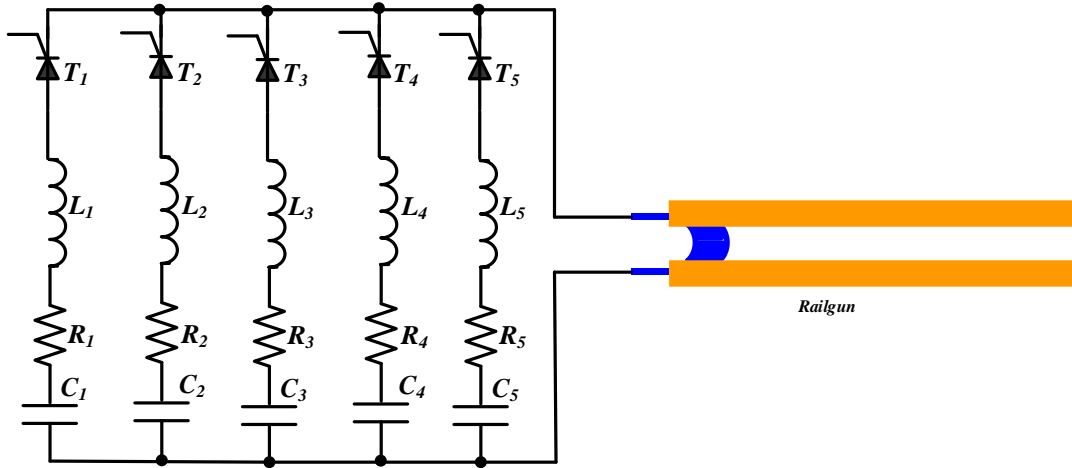
Kullanılan sabitlerin değerleri çizelge3.3 de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ray parametreleri

Parametre	Değeri
Ray Boyu (h)	25mm
Ray Aralığı(s)	25mm
Ray Uzunluğu(l)	3m
Ray Geçirgenliği(μ)	1,26uH/m
Etkili Özdirenç(ρ)	1,7e-8m Ω
Orantısallık Sabiti(Rvc)	3n Ω /((m/s) ^{1.5})
Orantısallık Sabiti(p)	0,5

3.2. Çok Aşamalı Raylı Elektromanyetik Fırlatıcının Tetikleme Zamanlarının Bulunması

Raylı elektromanyetik fırlatıcıyı besleyen enerji ünitelerinin tetiklenme zamanları ile sistemin hızı menzili kontrol edilebilir. Bu bölümde Raylı elektromanyetik fırlatıcının enerji ünitelerinin tetikleme zamanlarını seçmek için kullanılan yöntemlerin sonuçları verilmiştir. Çok Aşamalı raylı elektromanyetik fırlatıcının enerji ünitelerinin tetikleme zamanlarını seçmek için altı farklı yöntem uygulanmıştır. Kullanılan yöntemler ile bulunan tetikleme değerleri ile ulaşılan sonuçlar altınca bölümde verilmiştir.



Şekil 3.4. Çok aşamalı elektromanyetik fırlatıcı

Tetikleme zamanlarını bulmak için kullanılan yöntemler:

1. İterasyon
2. Sensör
3. Akım Dalga Formu Kontrol Edilerek
4. Genetik Algoritma
5. Yerçekimi Kuvvet Algoritması
6. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

Kullanılan yöntemlerin çalışma prensipler üçüncü bölümde anlatılmıştır. Bu bölümde kullanılan algoritmaların temel parametreleri ve sonuçları verilmiştir. İlk olarak 6 yöntem de herhangi bir kısıt eklenmeden çalıştırılmıştır. Bulunan sonuçlarda akımın yüksek seviyelere çıkması sonucunda sistemi korumak adına akım sınırı eklenerek yöntemler yeniden çalıştırılmış ve bulunan sonuçlar kıyaslanmıştır.

Akım sınırı sistemin özellikleri göz önünde bulundurularak 3 kA seçilmiştir. Performans kıyaslaması yapılabilmesi için tüm yöntemlerde aynı akım sınırı ve enerji ünitesi kullanılmıştır. Ünitelerin toplam enerjisi 1Mj'dür.

3.2.1. İterasyon

İlk enerji ünitesi atışın başlangıcında tetiklenmiştir. Geriye kalan enerji ünitelerinin tetiklenme zamanı ise iterasyon kullanılarak bulunmuştur. Bunun için ilk DGK tetiklendikten sonra ikinci DGK tetiklenme zamanı 0 dan başlatılarak simülasyon

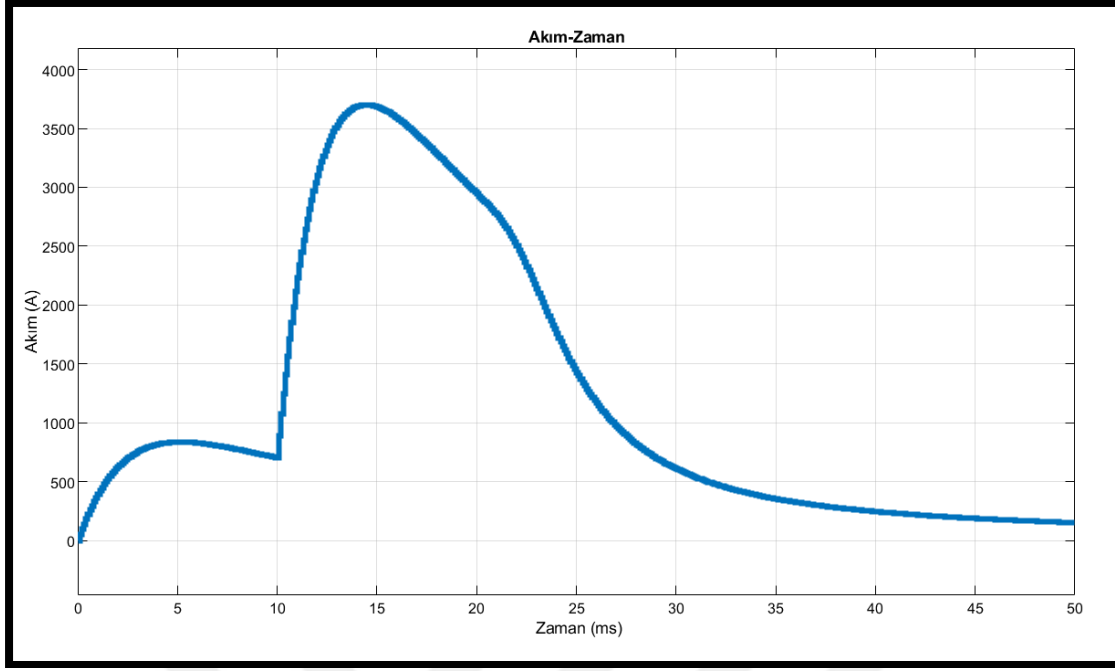
çalıştırılmıştır. 2.tetikleme zamanı için belirlenen alt sınırdan üst sınıra kadar belirlenen adım sayısı kadar tetikleme zamanı artırılarak hız değerlerine bakılmıştır. En yüksek hız değerinin elde edildiği tetikleme zamanı 2.DGK için tetikleme zamanı seçilmiştir. 1. Ve 2. DGK değerleri belirlendikten sonra sırayla tüm enerji ünitelerinin tetikleme zamanları bulunmuştur.

Çizelge 3.4 da yapılan simülasyonların alt-üst sınırları, iterasyon sayısı, adım sayısı, akım sınırı bilgileri ve bulunan tetikleme zamanları ve elde edilen namludan çıkış hızları verilmiştir.

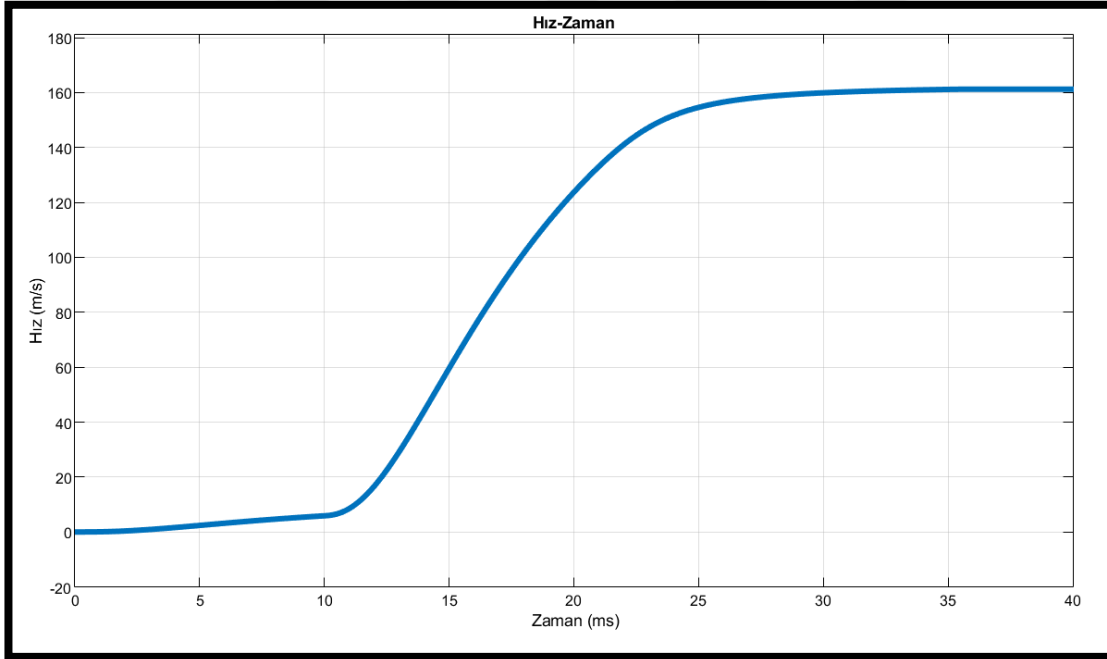
Çizelge 3.4. İterasyon Parametreleri

Alt Sınır	Üst Sınır ms	İterasyon	Adım Boyutu ms	T0 ms	T1 ms	T2 ms	T3 ms	T4 ms	Akım Sınırı kA	Namludan Çıkış Hızı m/s
0ms	325	65	5	0	10	10	10	10	-	162,45
0ms	15	150	0,1	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	-	310,1364
0ms	30	300	0,1	29,9	30	30	81	86	3	169,4

Bu çalışmada ilk olara adım boyutu 5ms seçilmiştir. İlk DGK başlangıç da tetiklenirken kalan 4 DGK 'ında tetikleme zamanı bu yöntem ile 10 ms olarak bulunmuştur. Sonuç olarak 162,45m/s namludan çıkış hızı elde edilmiştir. Elde edilen akım ve hız grafikleri Şekil 3.5 da ve Şekil 3.6 de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Akım-zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 5ms)

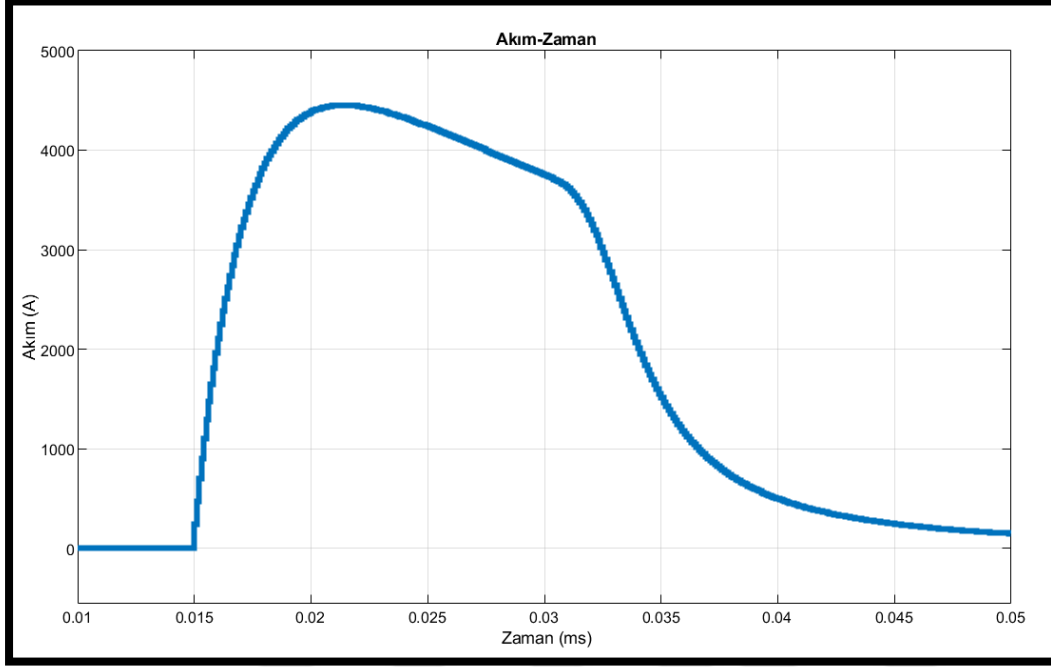


Şekil 3.6. Hız-Zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 5ms)

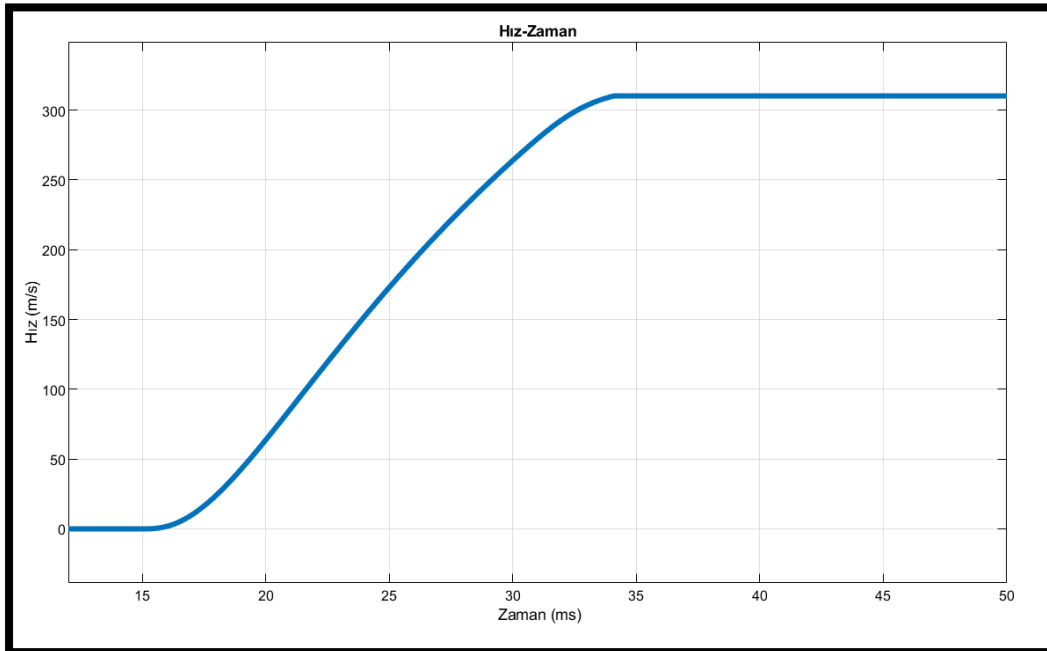
Ancak 5ms adım boyutunun hassasiyeti az bulunmuştur ve adım sayısı küçültülerek daha yüksek hızlara ulaşabileceğimiz sonuçlar bulmak için yöntem yeniden denenmiştir. Adım boyu 1ms yapıldığında 5ms adım boyutu ile aynı sonuç elde edilmiştir.

0,1ms adım boyu belirlendiğinde tüm enerji ünitelerinin aynı anda tetiklenmesi sonucuna ulaşılmıştır. 310,1364m/s namludan çıkış hızı elde edilerek yöntemin performansı

arttırılmıştır. Bu tetikleme zamanları ile elde edilen akım ve hız grafikleri Şekil 3.7 da ve Şekil 3.8 da verilmiştir.



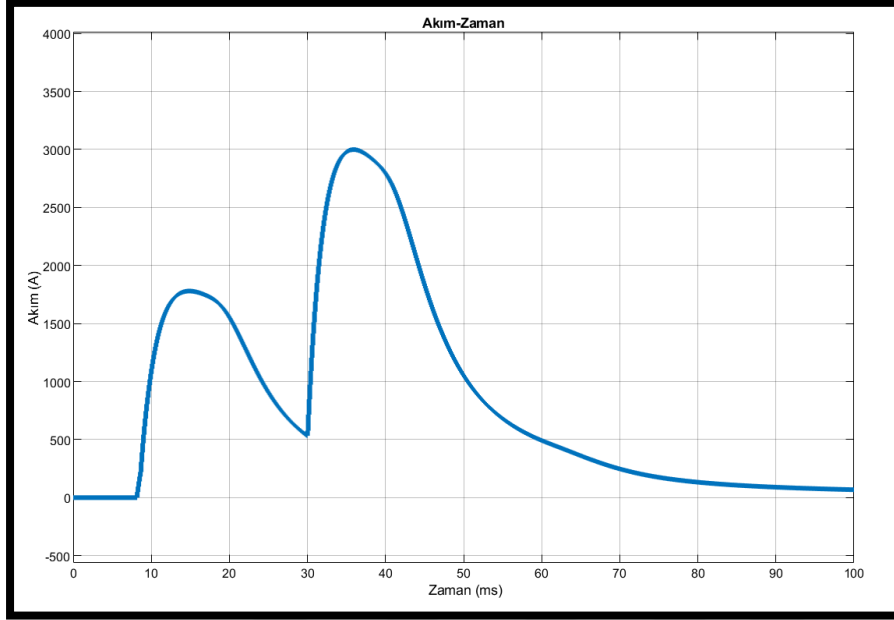
Şekil 3.7. Akım-zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 0,1ms)



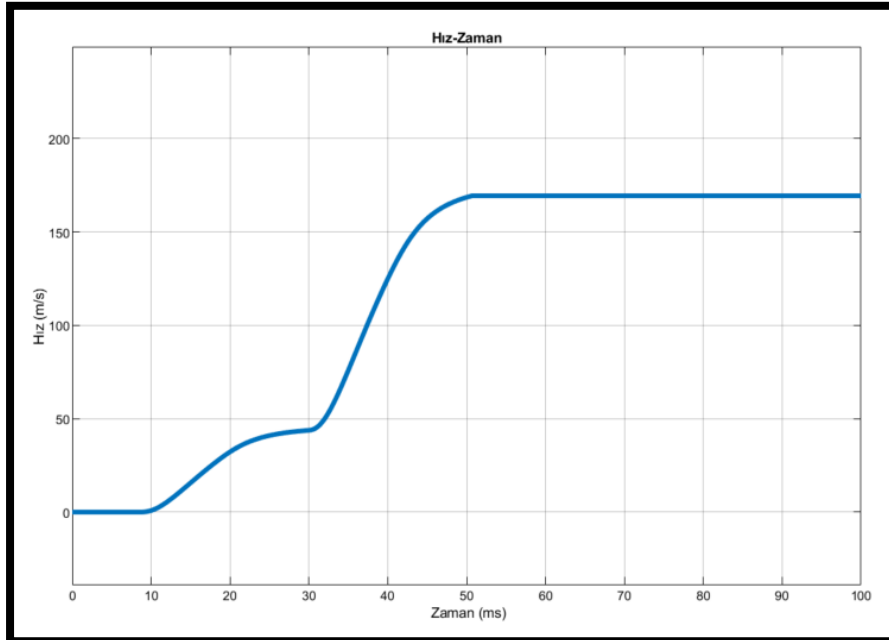
Şekil 3.8. Hız-zaman (Akım sınırı eklenmeden adım boyu 0,1ms)

İki sonuçta da hız değerleri yüksek bulunmasına rağmen akım değerleri 3kA 'in üzerine çıkmıştır. Sistemin korunması için akım sınırı eklenerek tetikleme zamanları bulunmuştur.

Elde edilen akım ve hız grafikleri Şekil 3.9 da ve Şekil 3.10 da gösterilmiştir. Şekil 3.10 da görüldüğü gibi akım değeri sisteme zarar verebilecek seviyeler çıkmadan 169,4 m/s namludan çıkış hızına ulaşılmıştır.



Şekil 3.9. Akım-zaman (Akım sınırı ile adım boyu 0,1ms)



Şekil 3.10. Hız-Zaman (Akım sınırı ile adım boyu 0,1ms)

3.2.2. Sensör ile tetikleme

Merminin konumunu tespit etmek için namlu boyunca sensörler yerleştirilmiştir. Sensörlerden alınan verilere göre enerji ünitelerinin tetikleme zamanları seçilmiştir.

Toplam beş DGK kullanılmıştır. Bunlardan ilk ünite ateşlenerek atış başlatılmıştır. Geriye kalan dört DGK tetikleme zamanları namlu boyunca yerleştirilen dört adet sensör ile belirlenmiştir. Mermi sensörün bulunduğu konuma geldiğinde DGK tetiklenerek atış gerçekleştirilmiştir. Sensörlerin konumları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Çizelge 3.5 da beş durum için sensör konumları, enerji ünitelerinin tetikleme zamanları ve elde edilen namludan çıkış hızı verilmiştir.

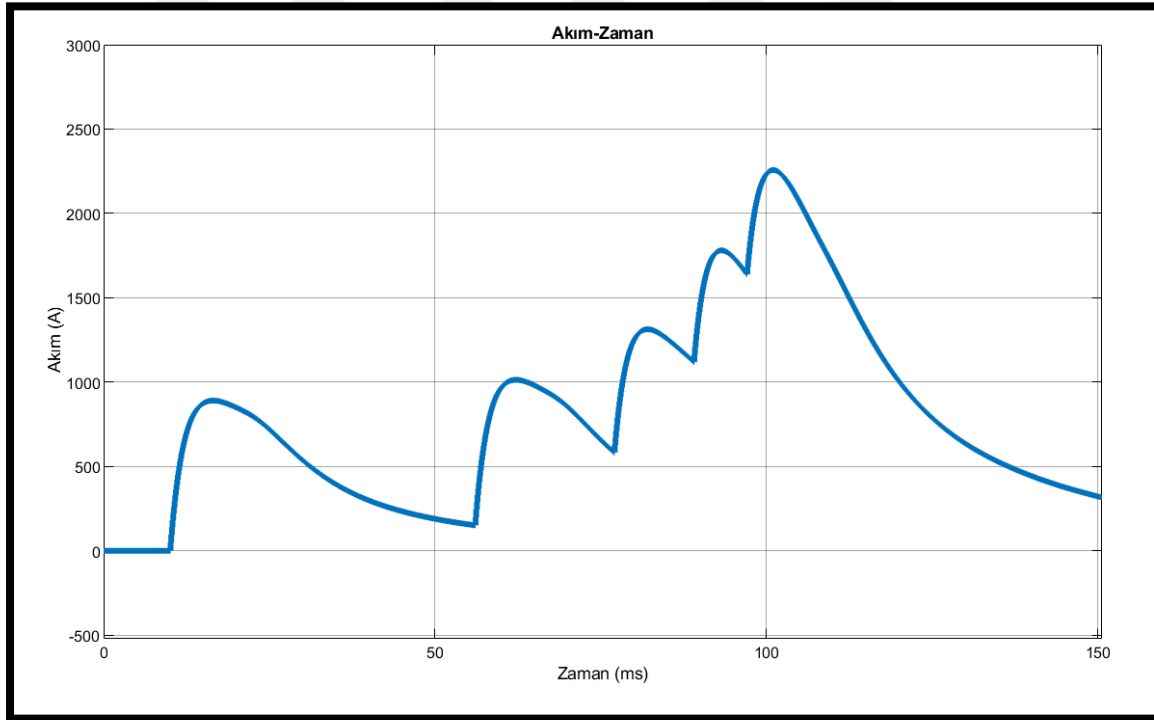
Çizelge 3.5. Sensör konumlarına göre tetikleme zamanları ve namludan çıkış hızı

	Durum	Sensör-1	Sensör-2	Sensör-3	Sensör-4	Sensör-5	Hız (m/s)
1	Pozisyon (m)	0	0,5	1	1,5	2	125,6
	Tetikleme Zamanı(ms)	10	56	77	89	97	
2	Pozisyon (m)	0	0,5	0,75	1	1,25	166,2
	Tetikleme Zamanı(ms)	10	56	68	76	80	
3	Pozisyon (m)	0	0,25	0,5	0,75	1	177,7
	Tetikleme Zamanı(ms)	10	38	51	57	62	
4	Pozisyon (m)	0	0,1	0,35	0,6	0,85	189,2
	Tetikleme Zamanı(ms)	10	28	40	46	50	
5	Pozisyon (m)	0	0	0,1	0,2	0,3	207,3
	Tetikleme Zamanı(ms)	10	10	20	23	25	

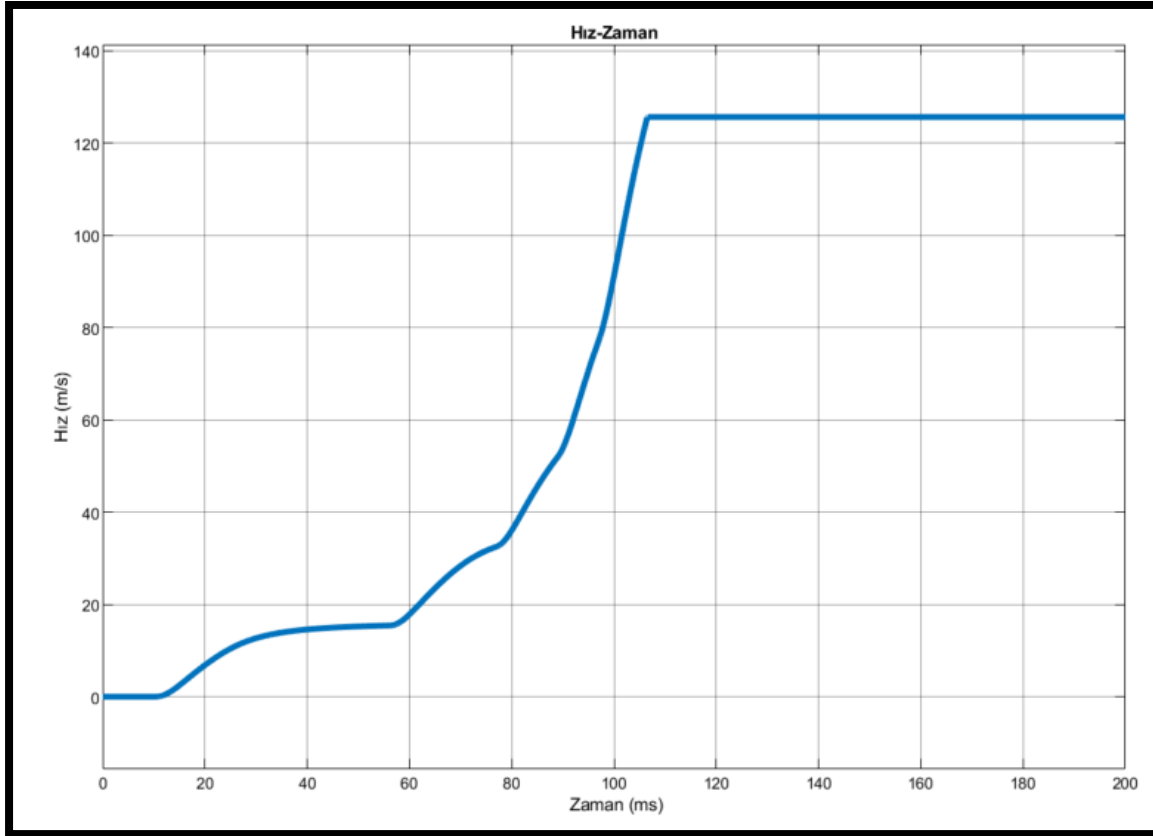
Bu bölümde tabloda verilen konumlara yerleştirilen sensörler ile tetikleme yapıldığında elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 3.6. Sensörlerin 1.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri

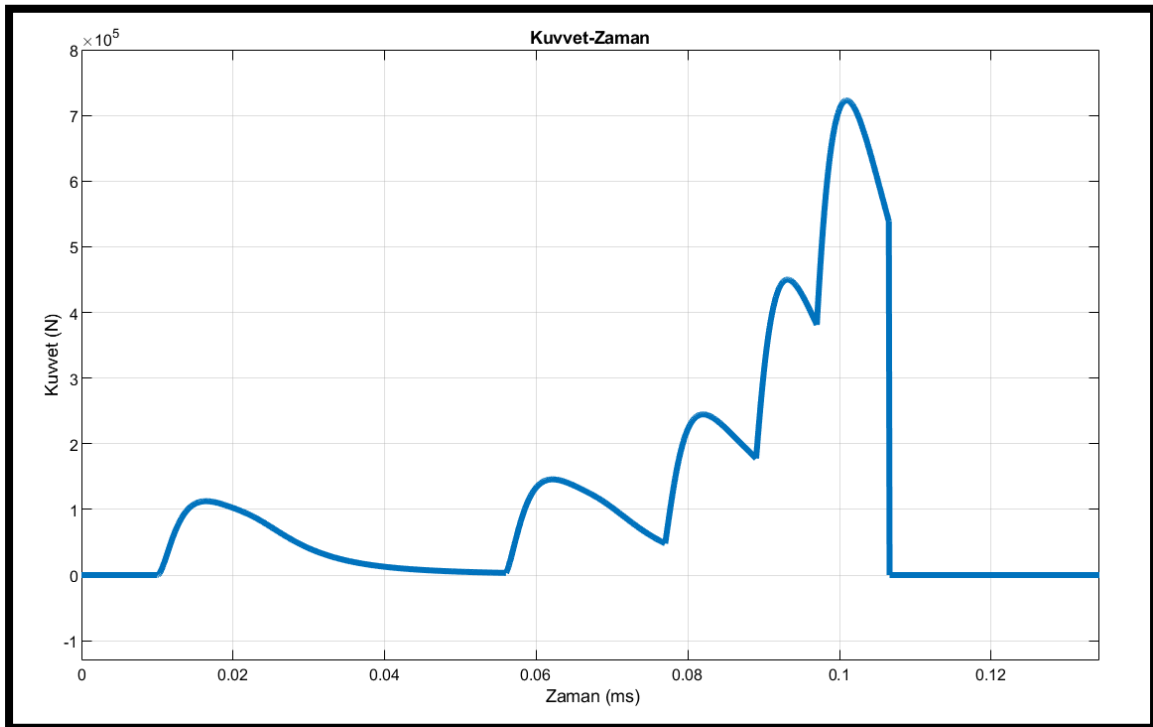
Sensör	Konum (m)	Tetikleme Zamanı (ms)	Hız (m/s)
1	0	10	125,6
2	0,5	56	
3	1	77	
4	1,5	89	
5	2	97	



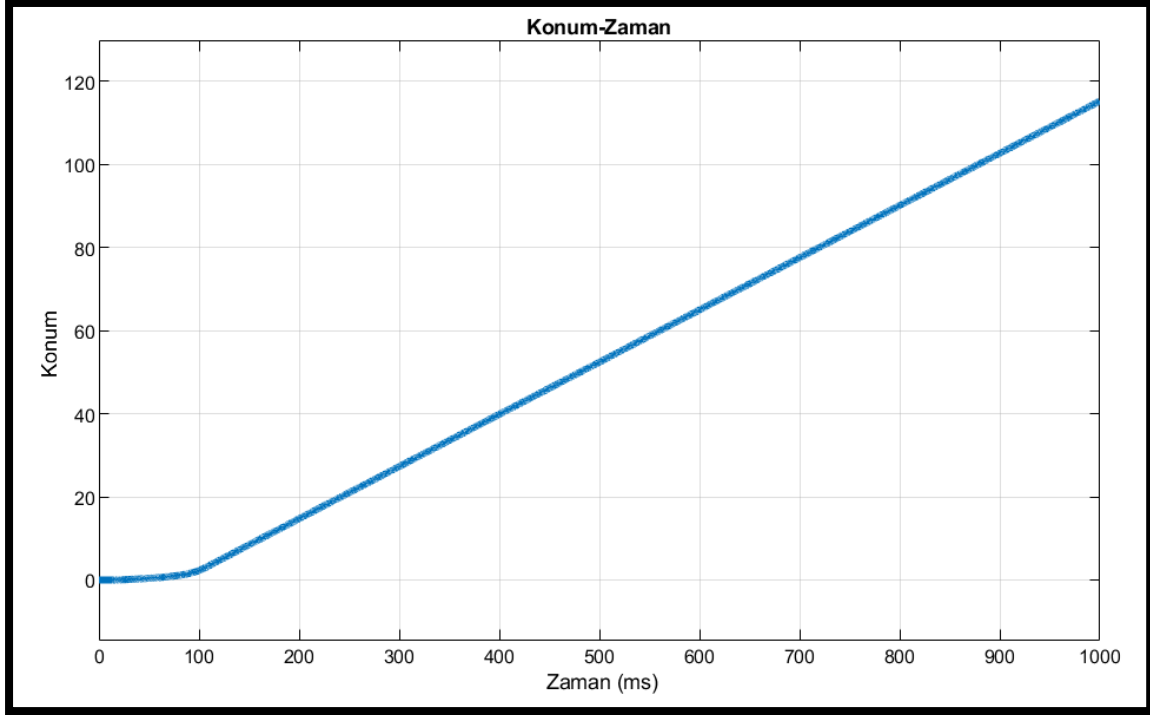
Şekil 3.11. Akım-Zaman Grafiği (1.Durum)



Şekil 3.12. Hız-Zaman Grafiği(1.Durum)



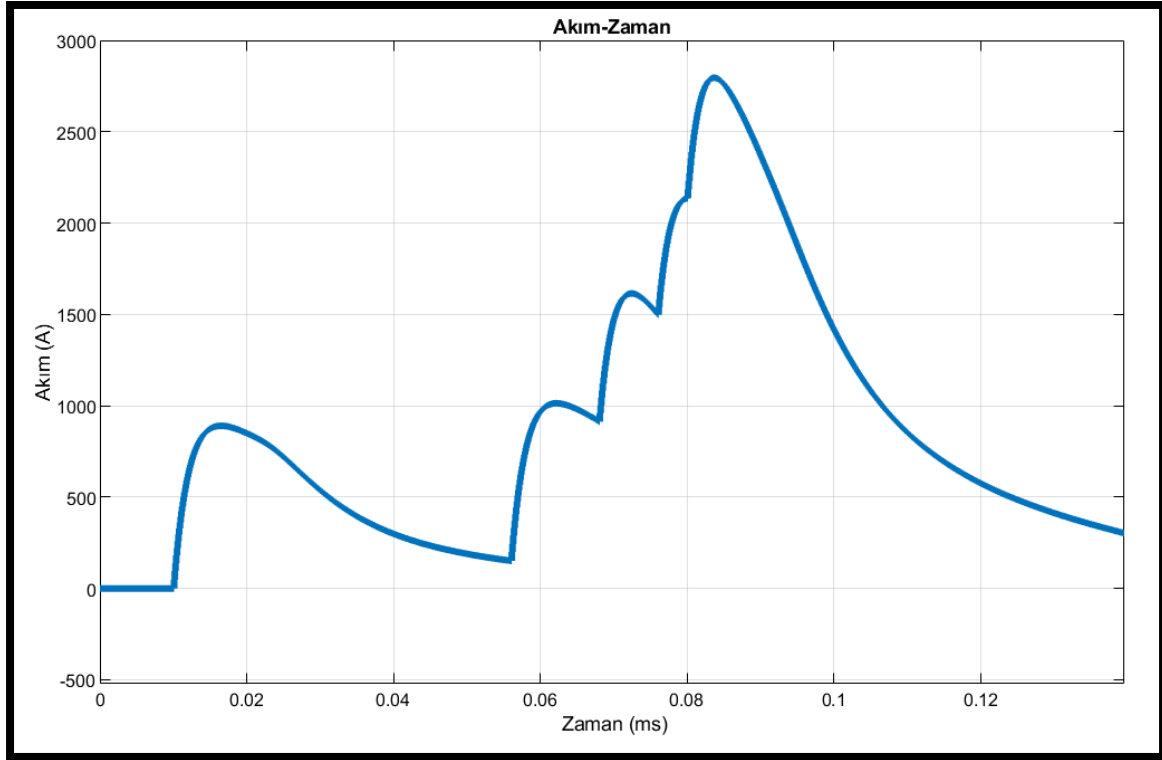
Şekil 3.13. Kuvvet-Zaman Grafiği (1.Durum)



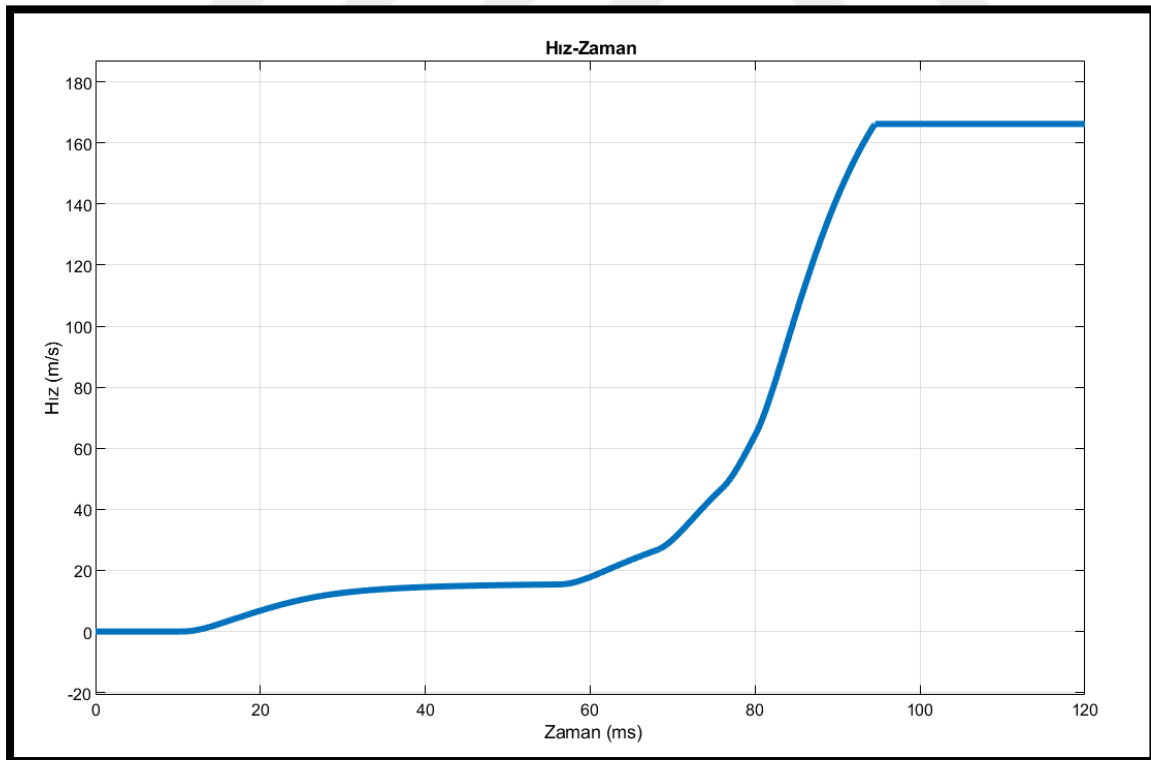
Şekil 3.14. Konum-Zaman Grafiği (1.Durum)

Çizelge 3.7. Sensörlerin 2.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri

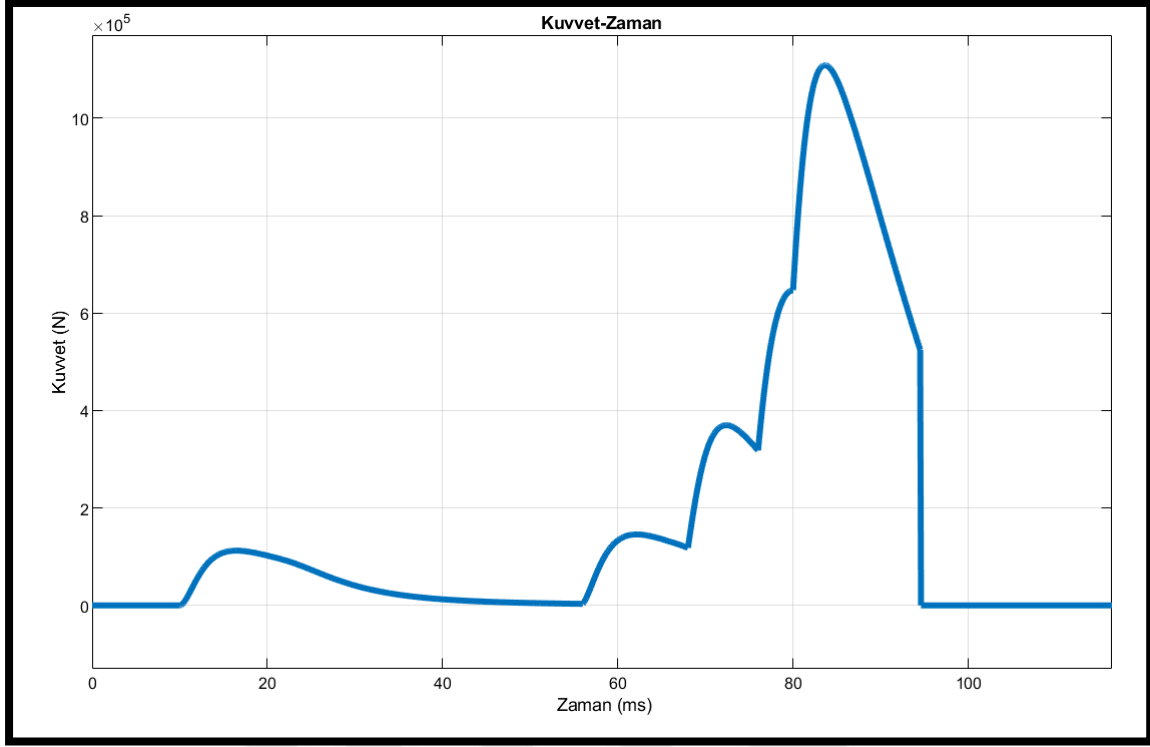
Sensör	Konum (m)	Tetikleme Zamanı (ms)	Hız (m/s)
1	0	10	166,2
2	0,5	56	
3	0,75	68	
4	1	76	
5	1,25	80	



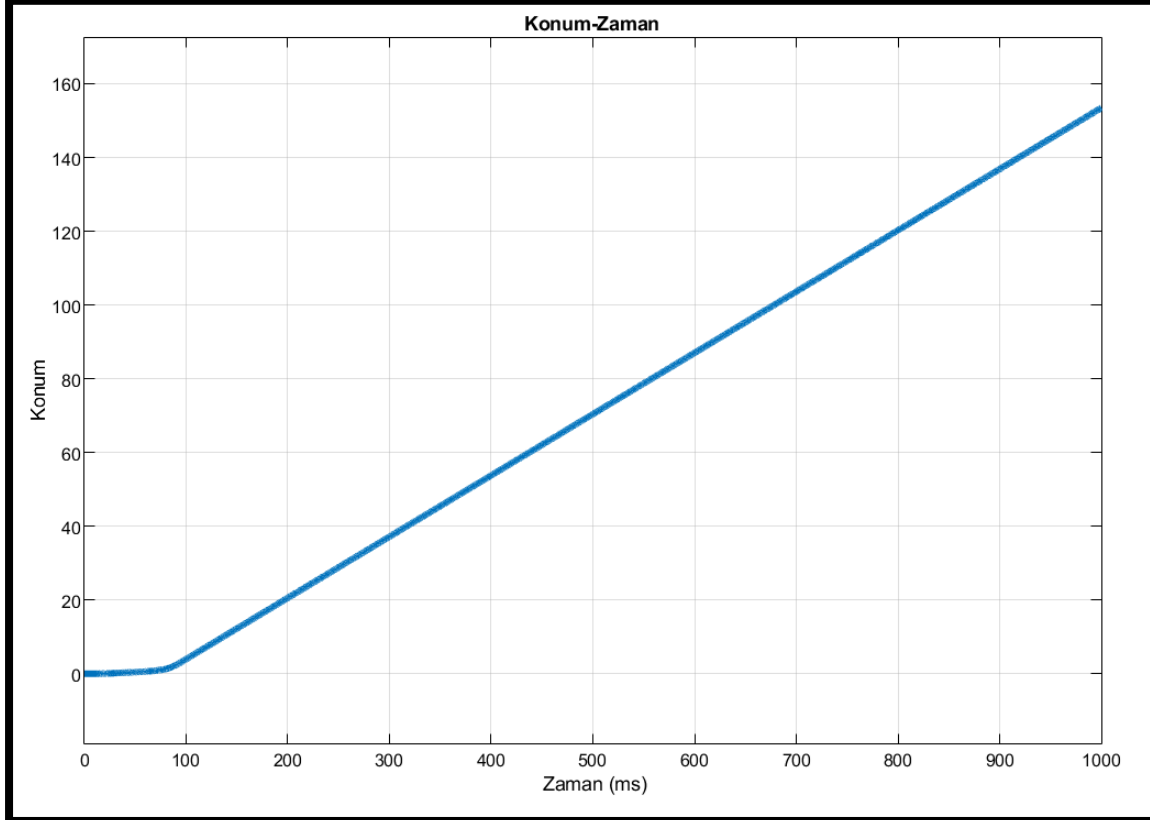
Şekil 3.15. Akım-Zaman Grafiği (2.Durum)



Şekil 3.16. Hız-Zaman Grafiği (2.Durum)



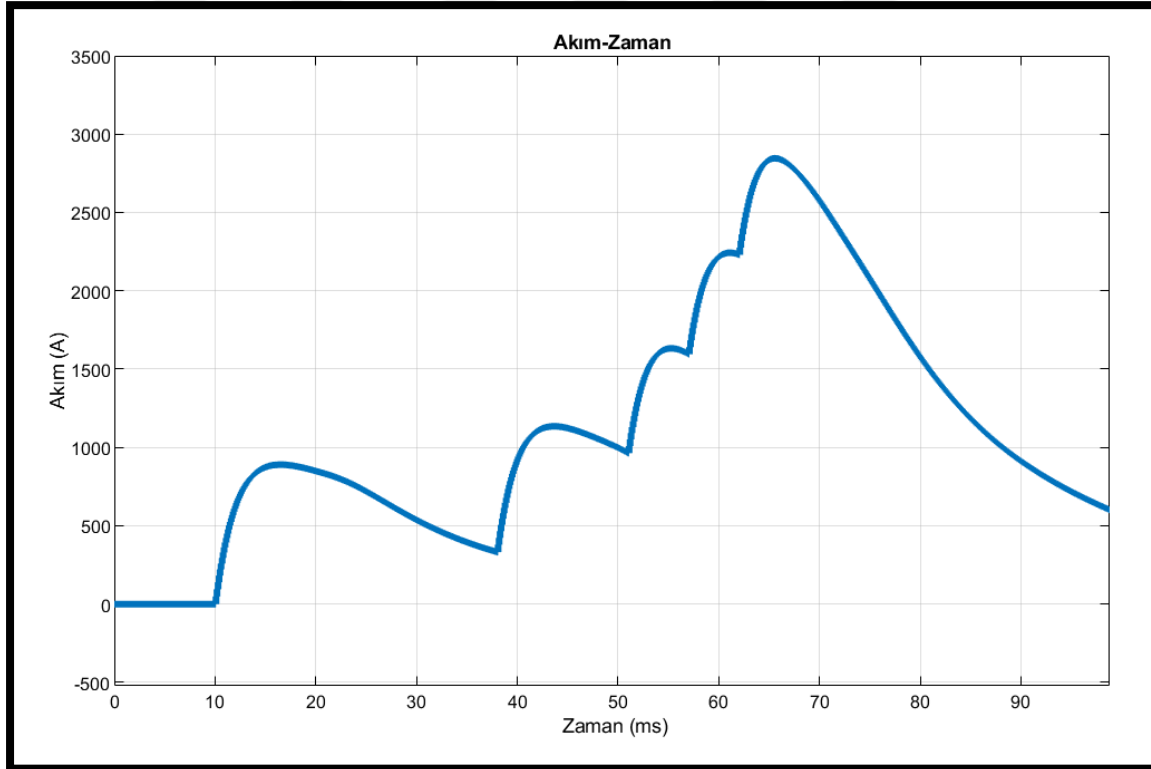
Şekil 3.17. Kuvvet-Zaman Grafiği (2.Durum)



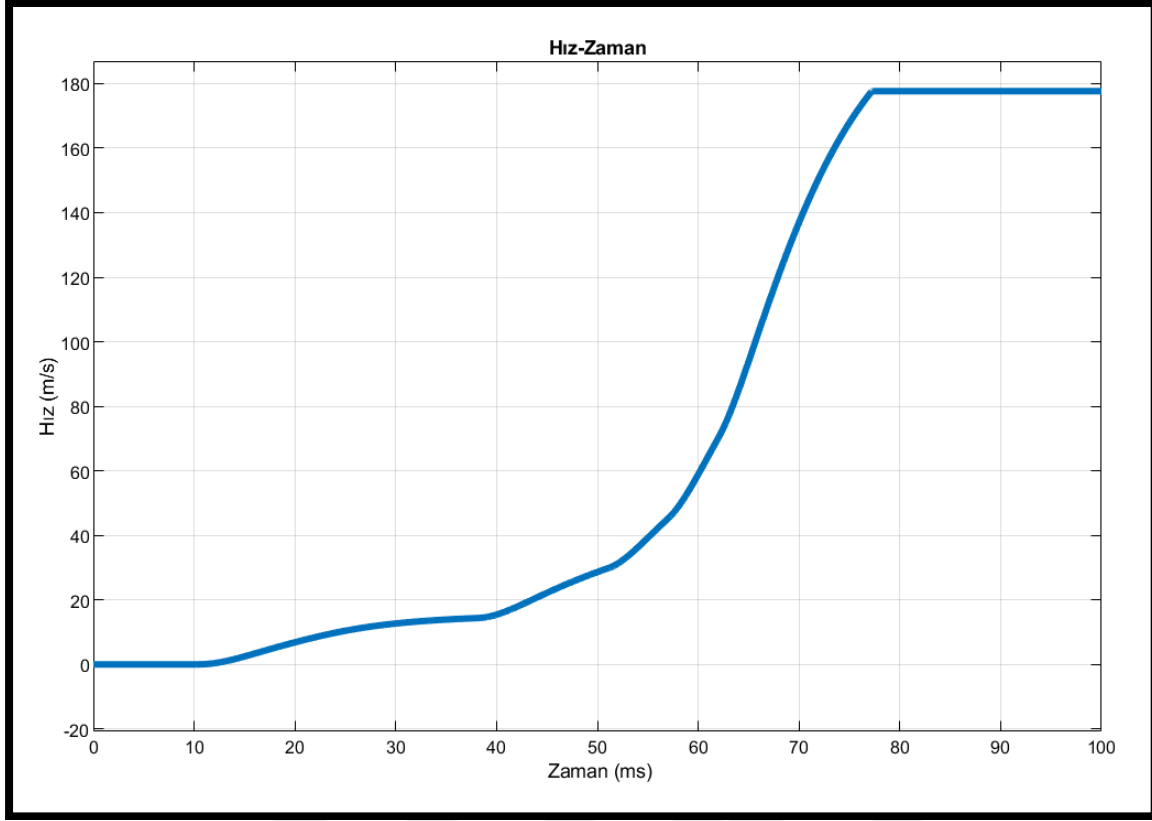
Şekil 3.18. Konum-Zaman Grafiği (2.Durum)

Çizelge 3.8. Sensörlerin 3.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri

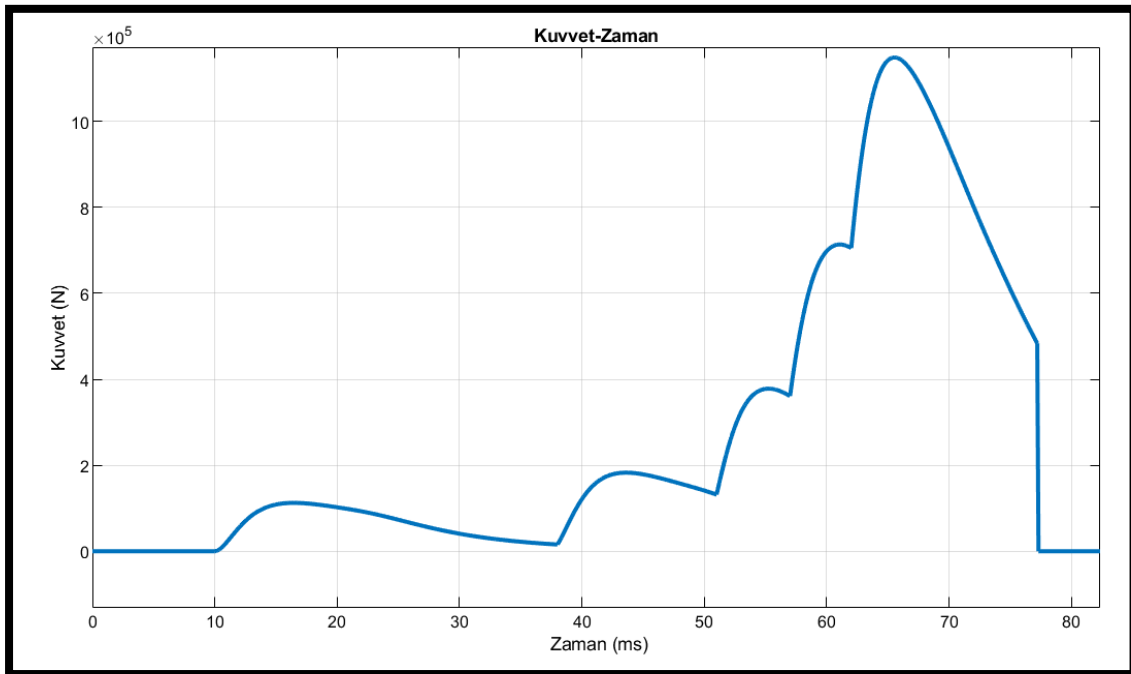
Sensör	Konum (m)	Tetikleme Zamanı (ms)	Hız (m/s)
1	0	10	177,7
2	0,25	38	
3	0,5	51	
4	0,75	57	
5	1	62	



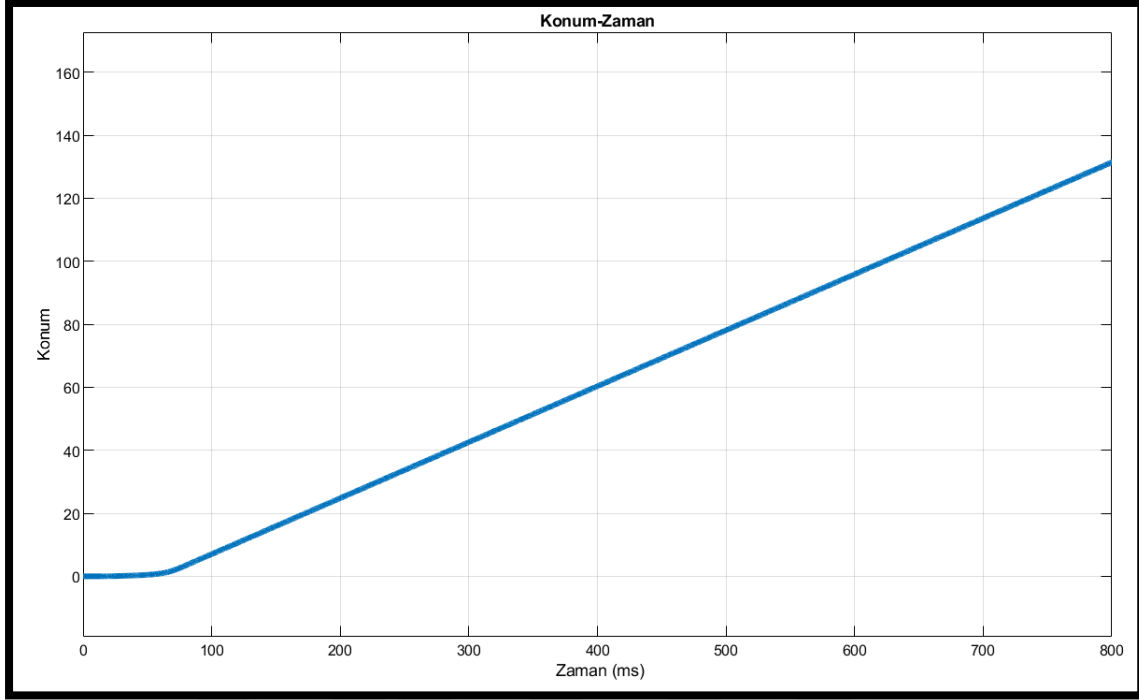
Şekil 3.19. Akım-Zaman Grafiği (3.Durum)



Şekil 3.20. Hız-Zaman Grafiği (3.Durum)



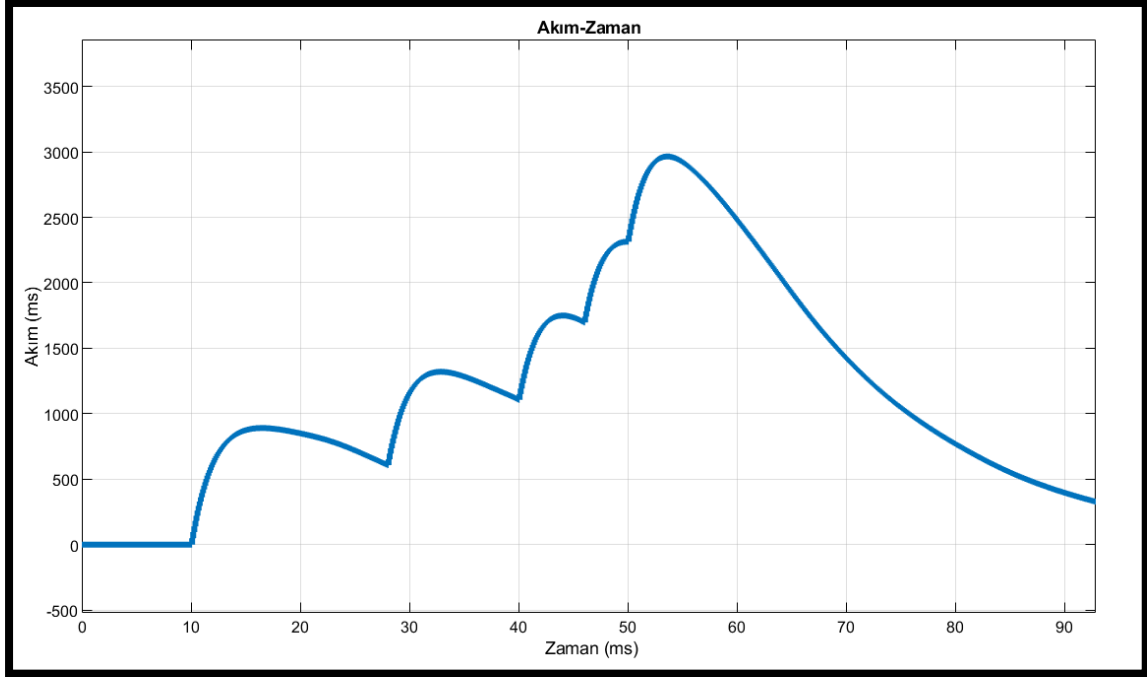
Şekil 3.21. Kuvvet-Zaman Grafiği (3.Durum)



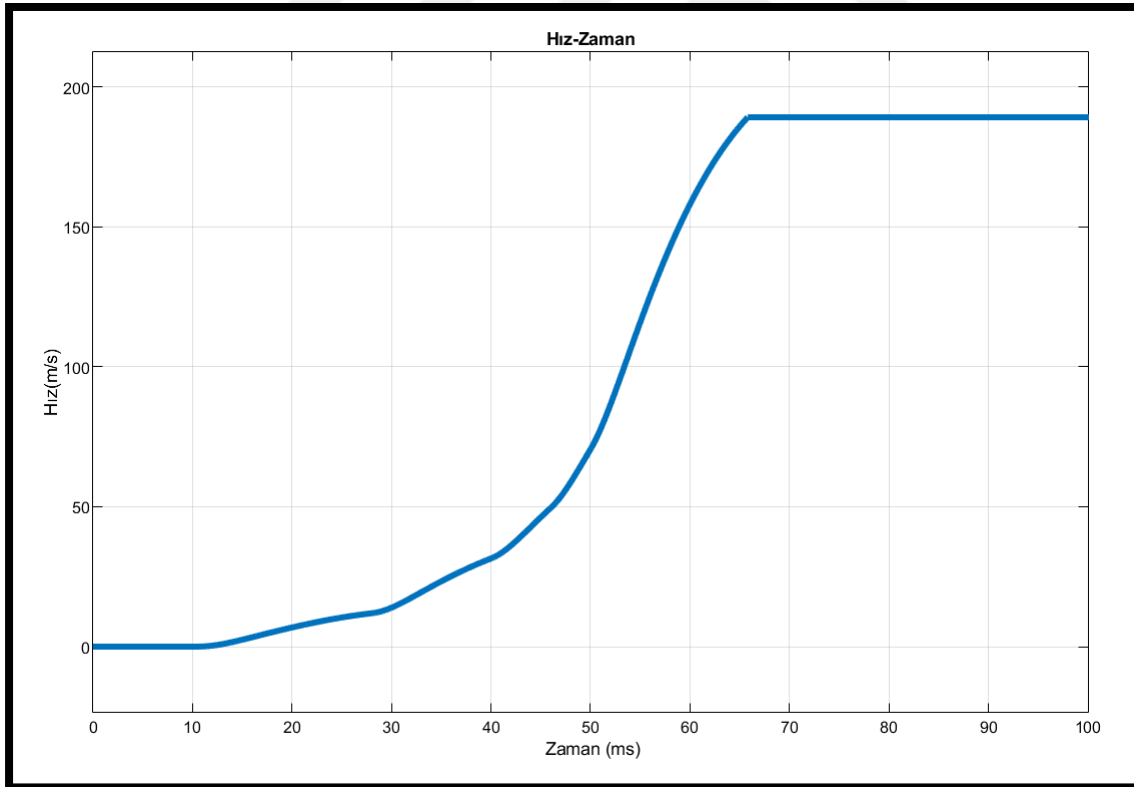
Şekil 3.22. Konum-Zaman Grafiği (3.Durum)

Çizelge 3.9. Sensörlerin 4.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri

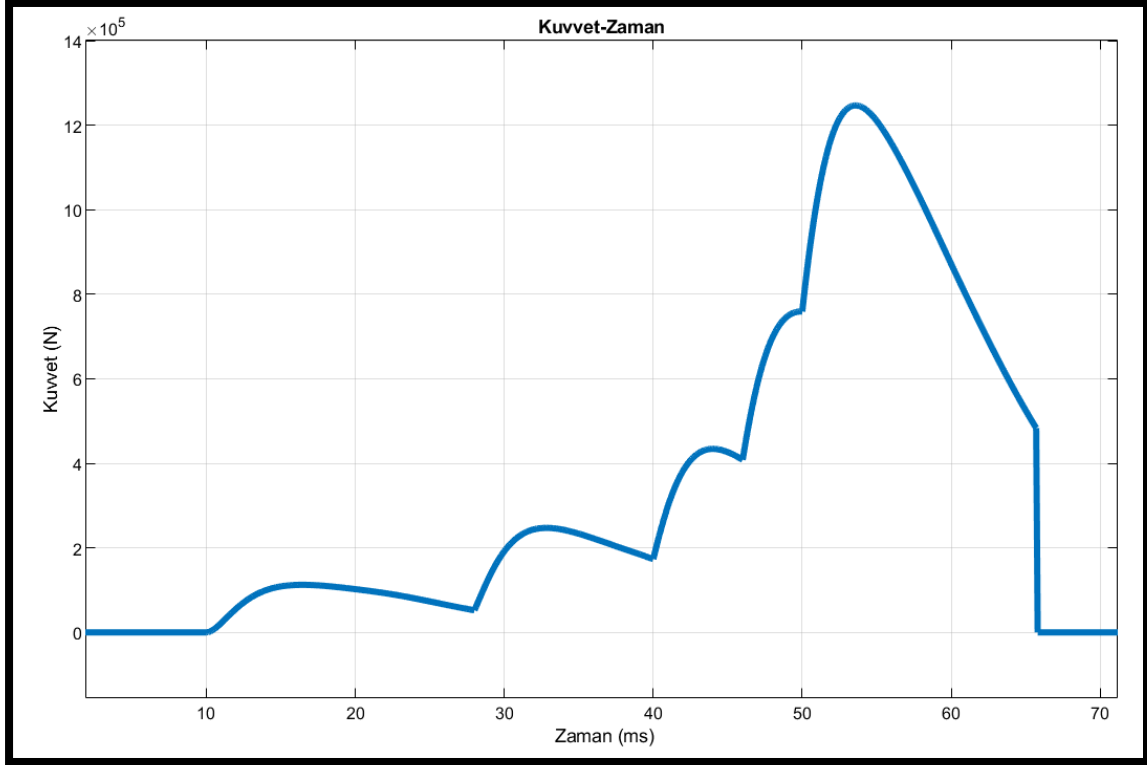
Sensör	Konum (m)	Tetikleme Zamanı (ms)	Hız (m/s)
1	0	10	189,2
2	0,1	28	
3	0,35	40	
4	0,6	46	
5	0,85	50	



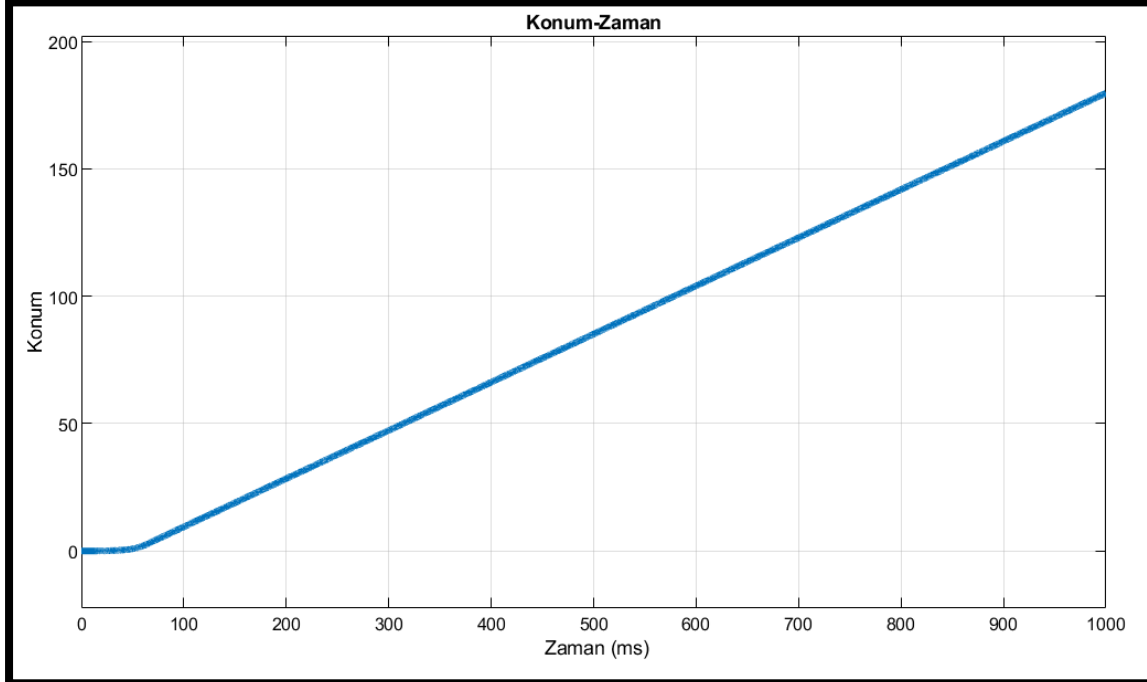
Şekil 3.23. Akım-Zaman Grafiği (4.Durum)



Şekil 3.24. Hız-Zaman Grafiği (4.Durum)



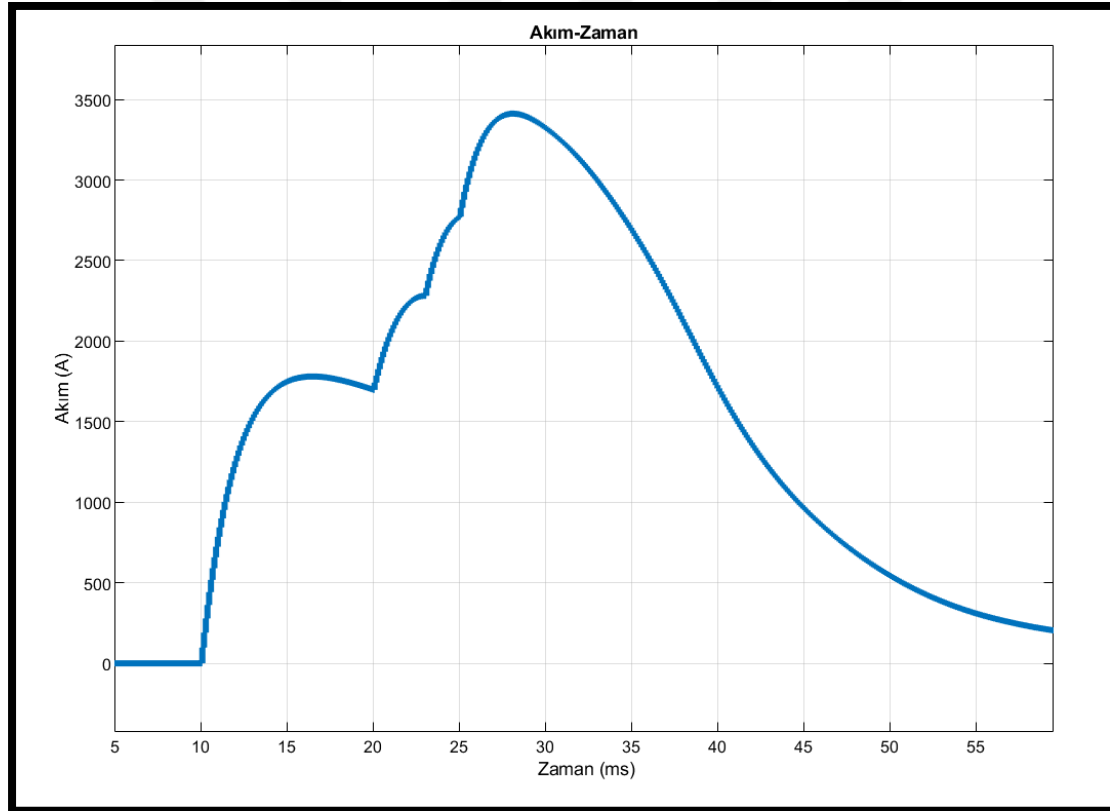
Şekil 3.25. Kuvvet-Zaman Grafiği (4.Durum)



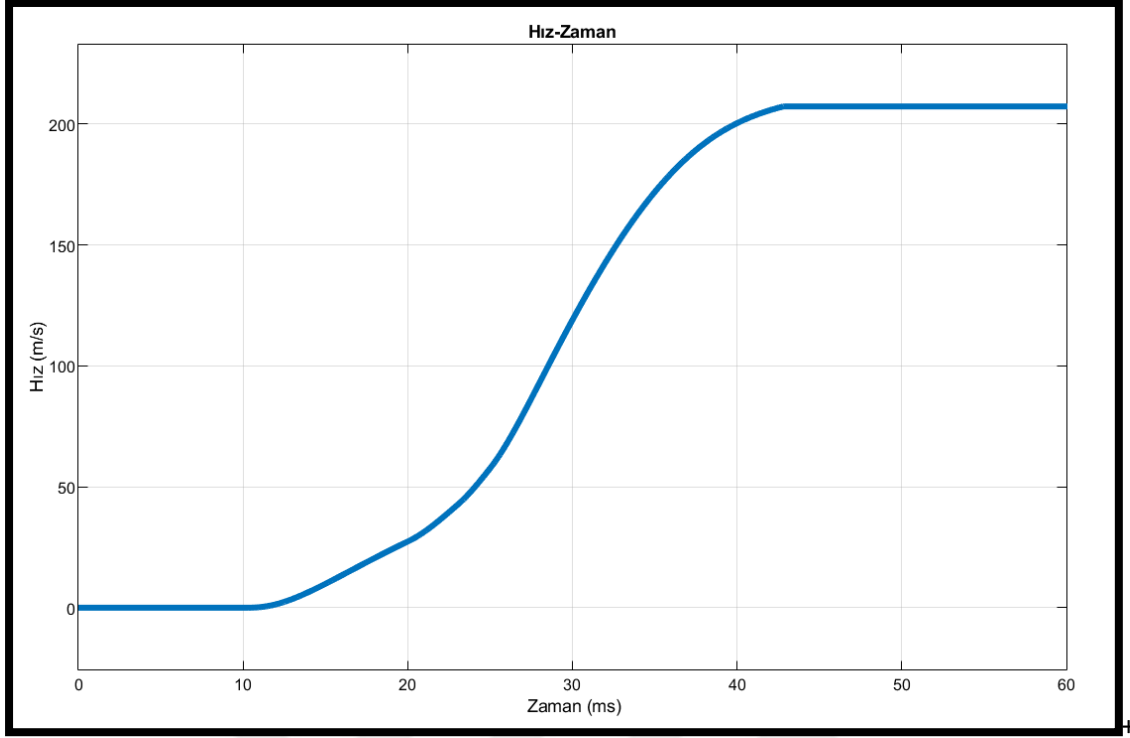
Şekil 3.26. Konum-Zaman Grafiği (4.Durum)

Çizelge 3.10. Sensörlerin 5.durum pozisyonuna göre tetikleme ve hız değeri

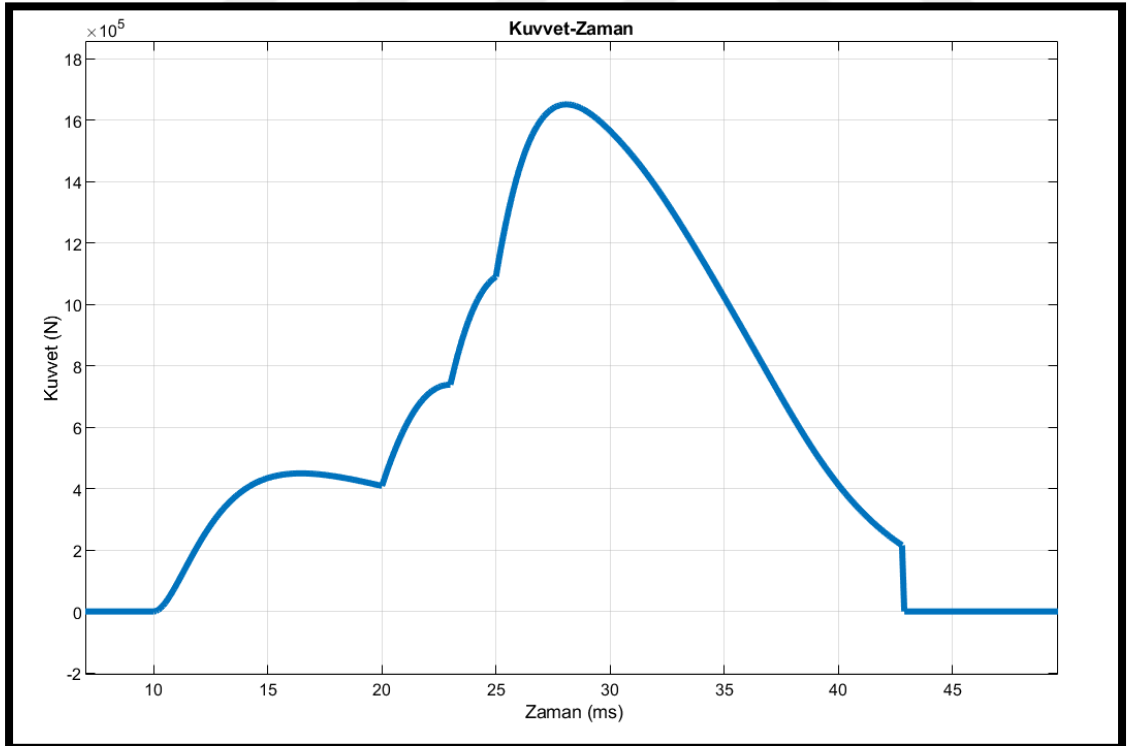
Sensör	Konum (m)	Tetikleme Zamanı (ms)	Hız (m/s)
1	0	10	207,3
2	0	10	
3	0,1	20	
4	0,2	23	
5	0,3	25	



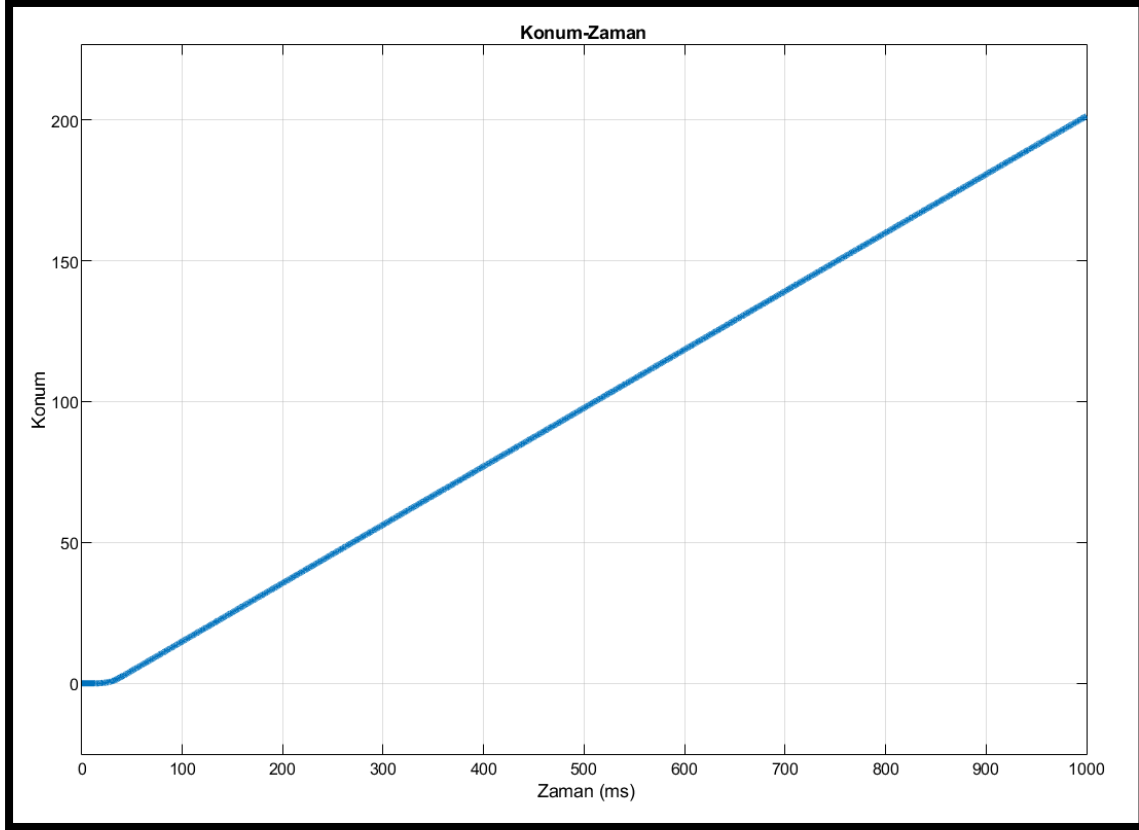
Şekil 3.27. Akım-Zaman Grafiği (5.Durum)



Şekil 3.28. Hız-Zaman Grafiği (5.Durum)



Şekil 3.29. Kuvvet-Zaman Grafiği (5.Durum)



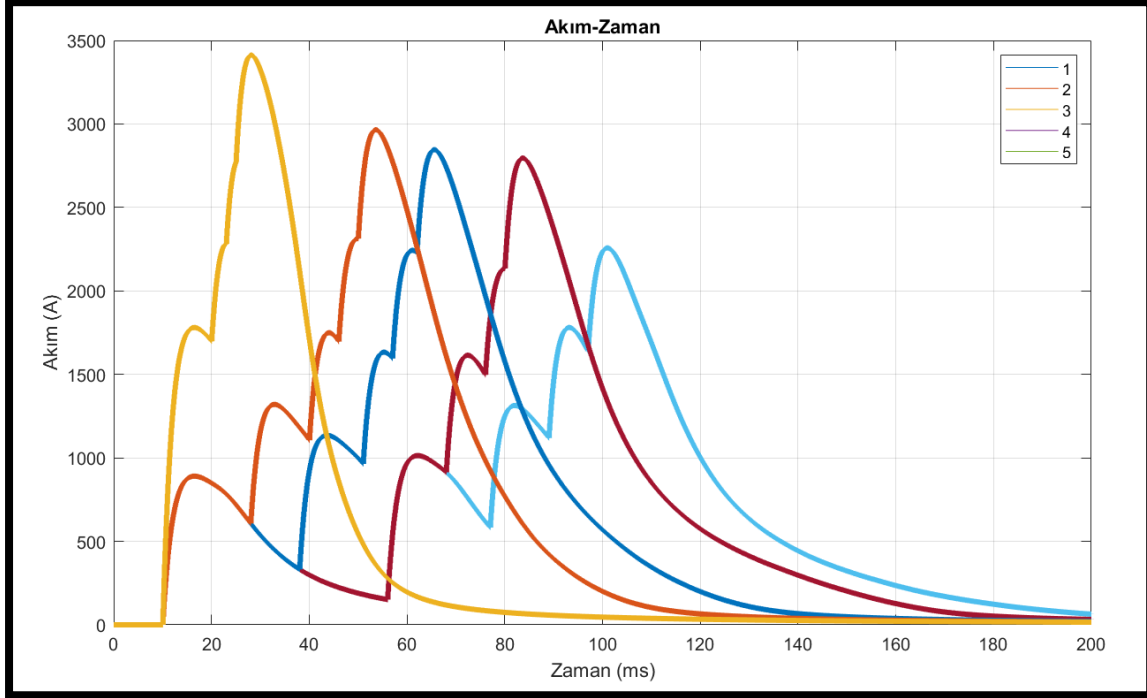
Şekil 3.30. Konum-Zaman Grafiği (5.Durum)

Tabloda yer alan durumlar ile tetiklemeler ile elde edilen akım ve kuvvet grafikleri Şekil 3.31 ve Şekil 3.32 da gösterilmiştir. Sensör konumları optimize edilerek namludan çıkış hızı 207,3 m/s 'ye kadar çıkarılmıştır. Akım beş durumun dördünde sınırlar içinde kalmış olsa da bir durumda sınır üstüne çıkmıştır.

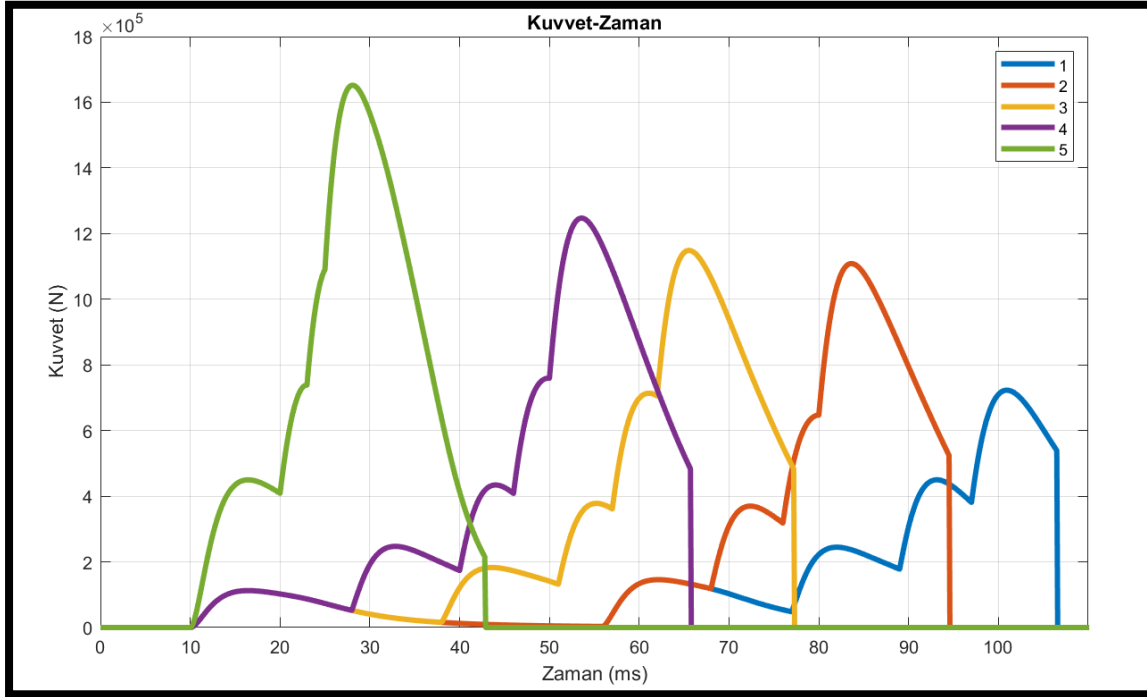
Bu yöntem kullanıldığında tetikleme zamanını seçmek istediğimiz DGK sayısı kadar sensöre ihtiyacımız olur. Aynı zamanda sensörlerden alınan verilerin değerlendirilip tetikleme yapılması için işlenmesi gerekecektir. Bu da sisteme kontrol sistemi eklenmesi gerektirir. Eklenen bu elemanlar maliyeti arttıracaktır. Aynı zamanda sensörlerden verilerin alınması yorumlanması ve tetikleme yapılması süresinde engelleyemeyeceğimiz gecikmeler sistemin verimini azaltacaktır.

Bahsedilen dezavantajlar ile birlikte bu yöntem ile sisteme verilen enerjinin değiştiği bir durumda bile önceden hesaplama yapılmasına gerek olmadan tetikleme zamanlarına karar verilebilmektedir. Bu da atış sırasında bu yöntemi avantajlı hale getirir. Sensörlerin

yerleştirildiği noktalar seçilerek hız daha iyi kontrol edilebilir. Ancak böyle bir durumda bile akımı tam olarak kontrol edemeyiz ve aşırı akım sisteme zarar verebilir.



Şekil 3.31. Sensörler toplu akım grafikleri



Şekil 3.32. Sensörler toplu kuvvet grafikleri

3.2.3. Akım dalga formu kontrol edilerek

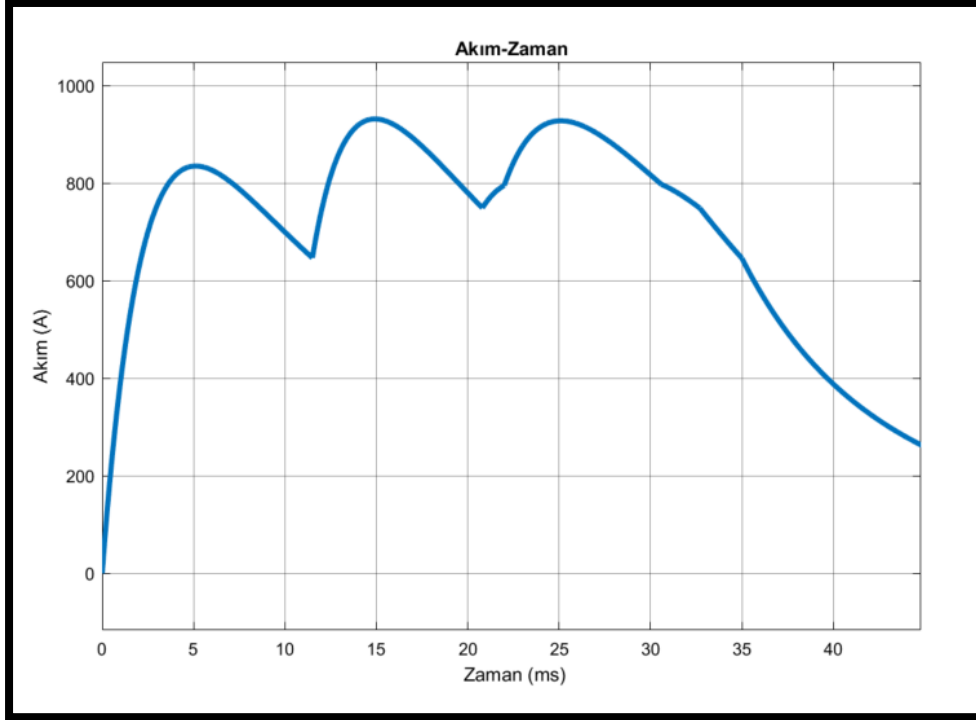
Bu yöntemde akım dalga formu kareye yakın hale getirilerek namludan çıkış hızının artırılması amaçlanmıştır. Bunun için akımın atış boyunca kalması istenen bir seviye belirlenmiş ve mevcut (küçük farklarla) akım bu bant içinde tutulmuştur alt değerin altına inerse DGK ünitelerinden biri tetiklenmiş ve akım seviyesi yükseltilmiştir. Aynı zamanda akımın belirlenen üst limiti aşması da aynı şekilde sınırlandırılmıştır. Farklı DGK enerji üniteleri ile dört farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon bilgileri Tablo-7'de verilmiştir. Bulunan tetikleme zamanları ile elde edilen akım grafikleri Şekil 3.33-3.36' de verilmiştir.

Farklı enerjilerde bu yöntemin performanslarını incelemek için DGK ünitelerinin parametreleri değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Parametrelerde yapılan değişiklikler bu değişiklikler sonucu elde edilen namludan çıkış hızları Çizelge 3.11'de verilmiştir. Tüm denemelerde beş DGK ünitesi kullanılırken enerji değerleri değiştirilmiştir.

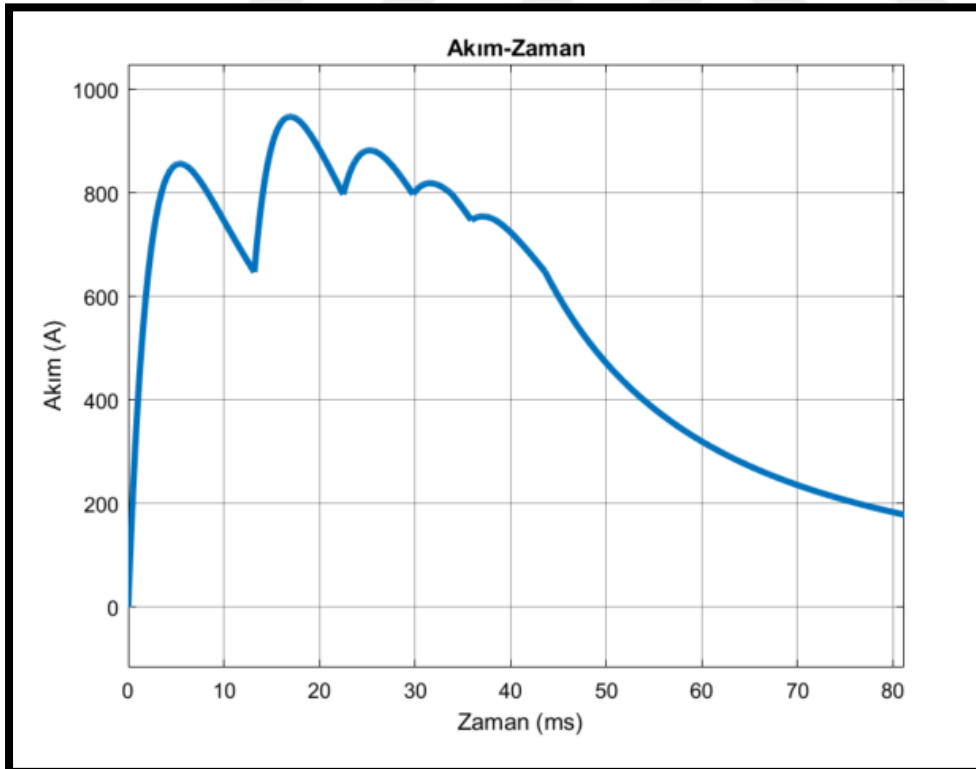
İlk denemede toplam enerjisi 1Mj olan beş adet 4mF 10kV kondansatör içeren 200kj enerjiye sahip enerji üniteleri kullanılmıştır. Elde edilen tetikleme süreleri Çizelge 3.11'de gösterilmiştir. 1Mj için 28,3 m/s namlu çıkış hızı ile elde edilmiştir. Akım grafiği Şekil 3.35'de verilmiştir. Bu yöntemle elde edilen tetikleme süreleri ile elde edilen hız seviyesi, enerji arttıkça artmasına rağmen düşüktür. Bu nedenle yöntemin amacımıza uygun olmadığına karar verilmiştir.

Çizelge 3.11. Akım dalga formu kontrol etme yöntemi sonuçları

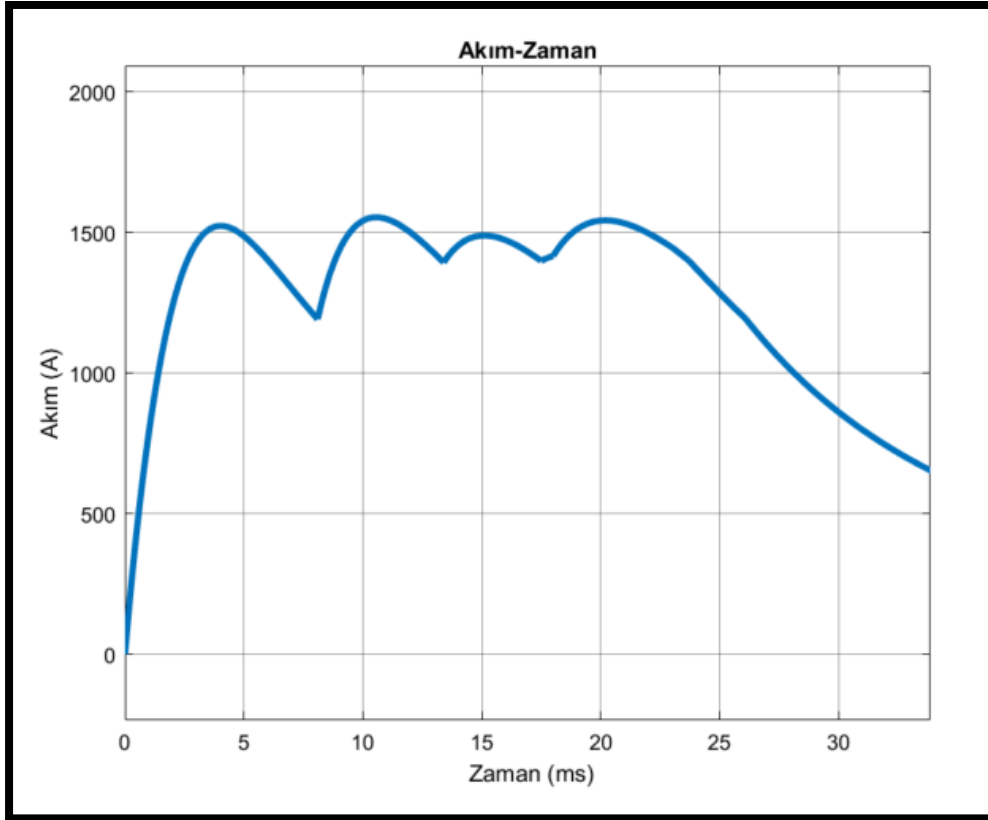
	Toplam Enerji Mj	DGK Enerji kj	Enerji Ünite Sayısı	T1 ms	T2 ms	T3 ms	T4 ms	T5 ms	Hız (m/s)
1	1	200	5	0	11	21	22	31	28,3
2	2	400	5	0	13	22,5	29,8	35,9	37,14
3	4	800	5	0	8,115	13,4	17,5	18	69,64
4	8	1600	5	0	8,6	14	18,1	22,9	79,38



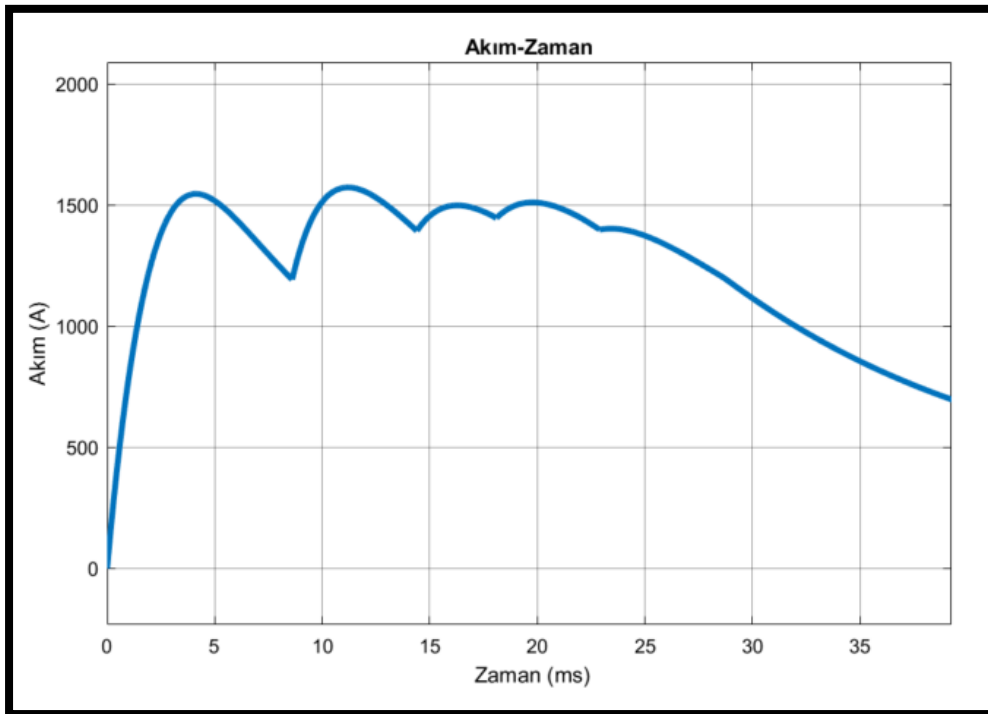
Şekil 3.33. 5 DGK (200kj*5=1Mj) DGK(4m F,10k V) 'da Akım grafiği



Şekil 3.34. 5 DGK (400kj*5=2Mj) DGK(8m F,10k V) 'da Akım grafiği



Şekil 3.35. 5 DGK ($800\text{kj} \cdot 5 = 4\text{Mj}$) DGK(4m F,20k V) 'da Akım grafiği



Şekil 3.36. 5 DGK ($1600\text{kj} \cdot 5 = 8\text{Mj}$) DGK(8m F,20k V) 'da Akım grafiği

3.2.4. Genetik Algoritma

Beş enerji ünitesinin tetikleme zamanları genetik algoritma kullanılarak bulunmuştur. Genetik algoritmanın amaç/uygunluk fonksiyonu namludan çıkış hızı olarak seçilmiştir. Genetik Algoritmanın temel parametreleri Çizelge 3.12 de verilmiştir.

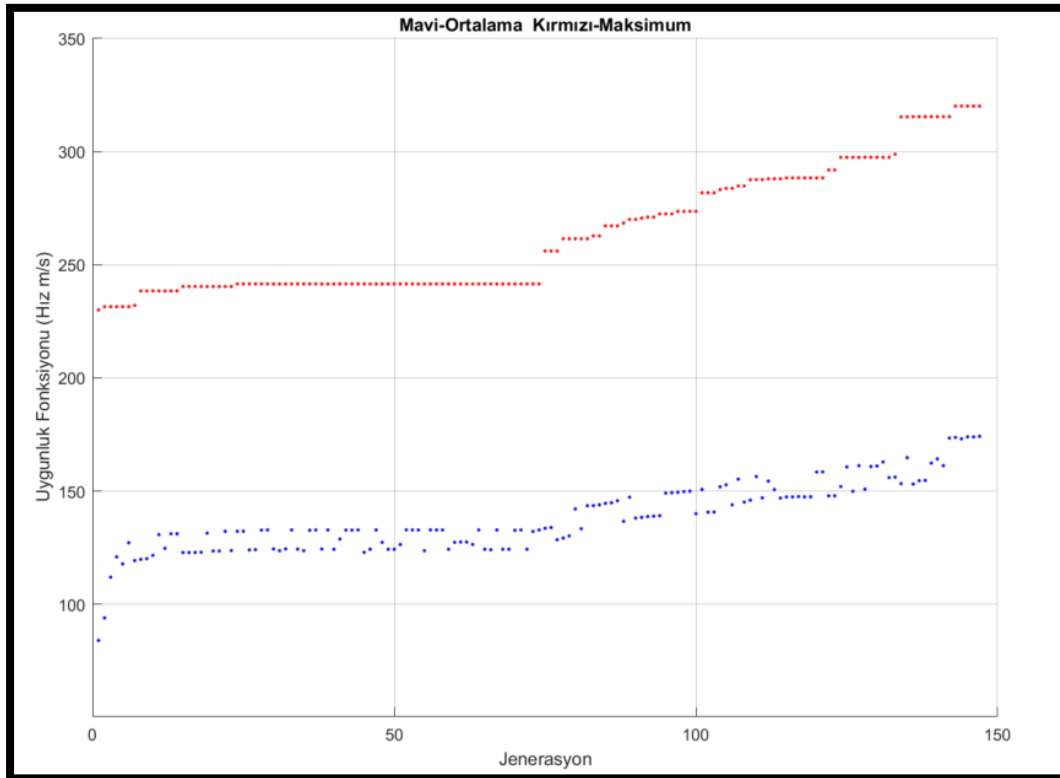
Çizelge 3.12. Genetik algoritma parametreleri

Genetik Algoritma Parametreleri	
Uygunluk Fonksiyonu	Namludan Çıkış Hızı
Değişkenler	Enerji Ünitelerinin Tetikleme Zamanları (t1,t2,t3,t4,t5)
Popülasyon	20
Çaprazlama oranı	0,5
Jenerasyon Sayısı	250
Mutasyon oranı	0,3
Elit Oranı	0,5

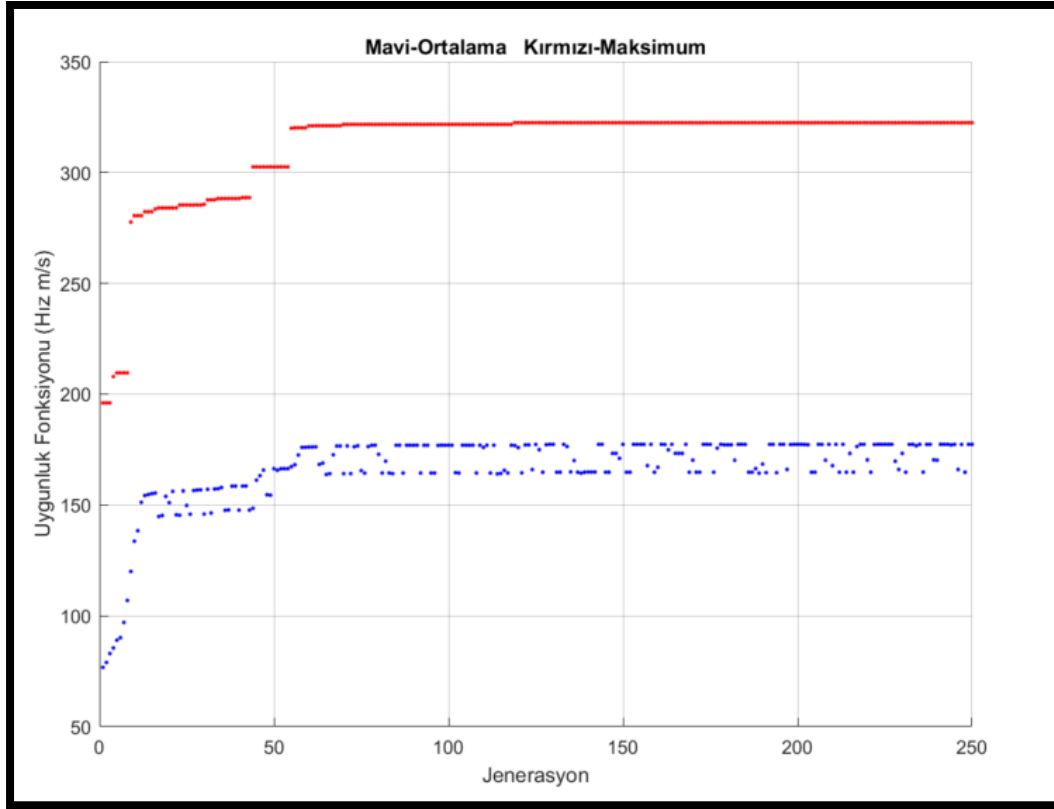
En iyi sonuca ulaşıldığından emin olmak için genetik algoritma kullanılarak denemeler yapılmıştır. Akım sınırlı ve akım sınırı eklenmeden tetikleme zamanları bulunmuş ulaşılan hız değerleri değerlendirilmiştir. Çizelge 3.13 da yapılan simülasyonlar sonucu bulunan tetikleme değerleri ve bu tetikleme değerleri ile elde edilen namludan çıkış hızı verilmiştir. Şekil 3.37-3.40 de ise simülasyonların nesillere göre popülasyonun en iyi uygunluk değerine sahip bireylerin uygunluk değerleri ve popülasyonun ortalama uygunluk değerleri grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 3.13. Genetik algoritma ile bulunan tetikleme ve hız değerleri

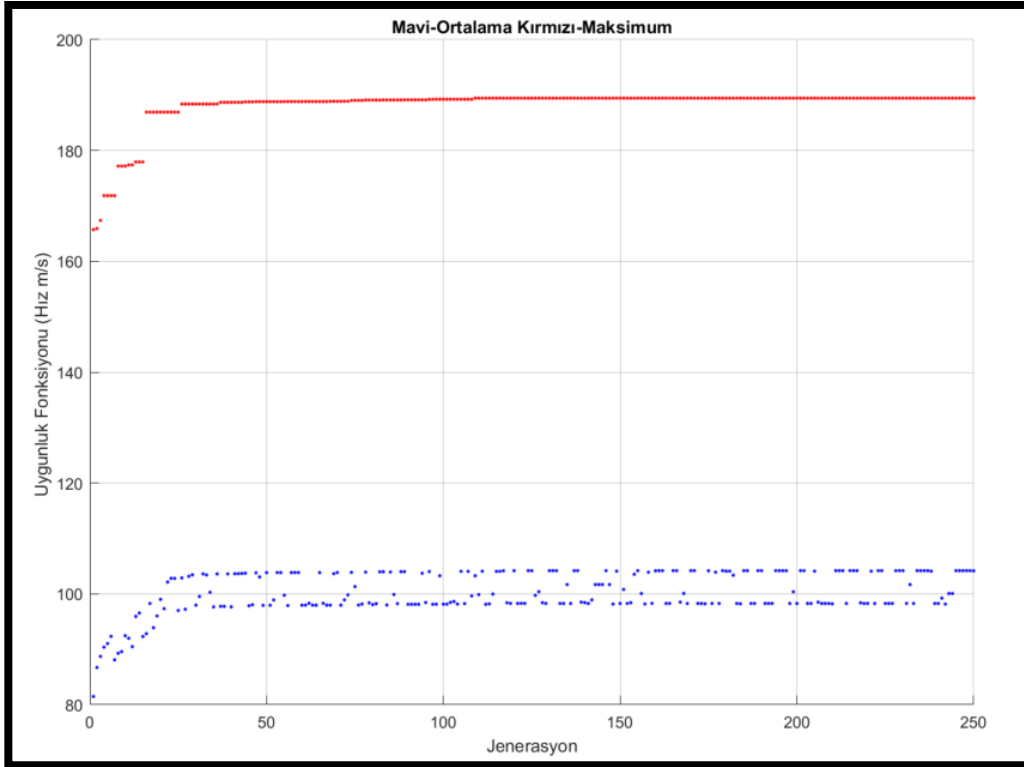
	Akım Sınırı kA	T1 (ms)	T2 (ms)	T3 (ms)	T4 (ms)	T5 (ms)	Hız (m/s)
1	-	506	506	511	512	514	322,8
2	-	0	0	0	0	320	322.503
3	-	101,9	102	102,1	102,2	102,5	322.503
4	-	0	0	0	0	2	322.503
5	-	101,3	101,7	102	102,2	102,5	322.503
6	3	51,2	56,2	57,1	66,8	77,2	211,6207
7	3	51,3	57,1	66,8	69	77,2	211,6207
8	3	0	0	0	1	102,4	211,6207
9	3	26	51,2	57,1	69	156	211,6207
10	3	51,2	57,1	69	73,2	77,2	211,6207



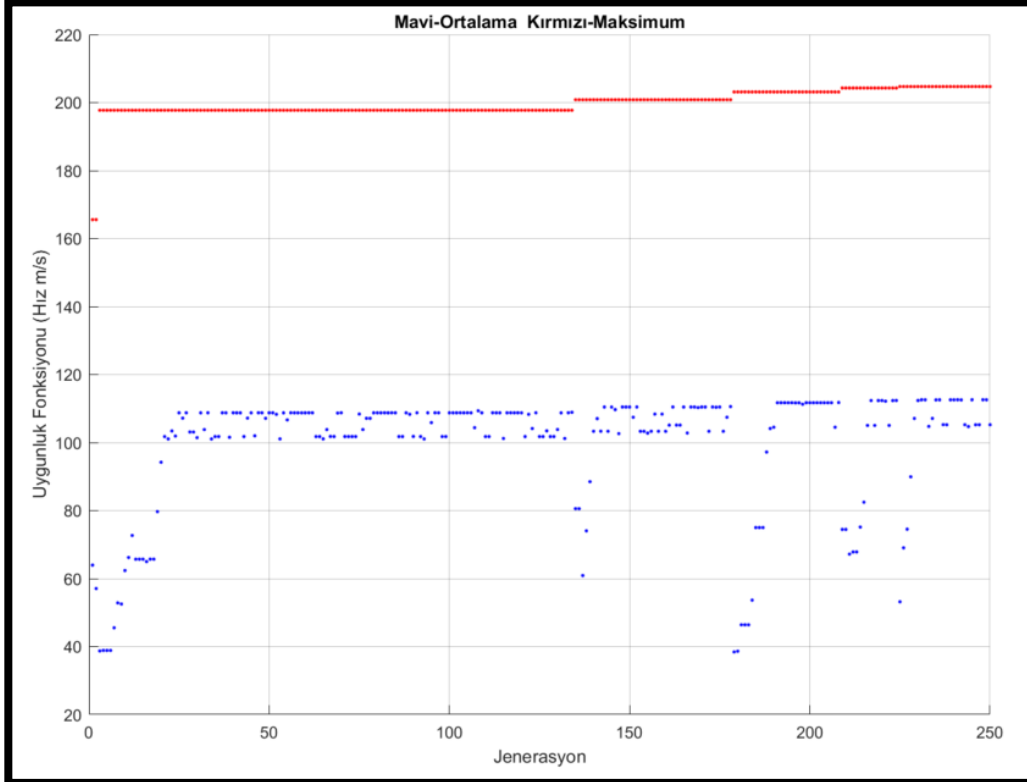
Şekil 3.37. Akım Sınırı Eklenmeden



Şekil 3.38. Akım Sınırı Eklenmeden



Şekil 3.39. Akım Sınırı Eklenerek



Şekil 3.40. Akım Sınırı Eklenerek

3.2.5. Yerçekimi kuvvet algoritması

Yerçekimi Arama Algoritması akım sınırı eklenmeden kullanıldığında, Şekil3.41 de görüldüğü gibi 100. iterasyondan sonra tüm DGK'lerin aynı anda ateşlenmesi sonucuna ulaşılarak 322m/s namlu çıkış hızı elde edilmiştir.

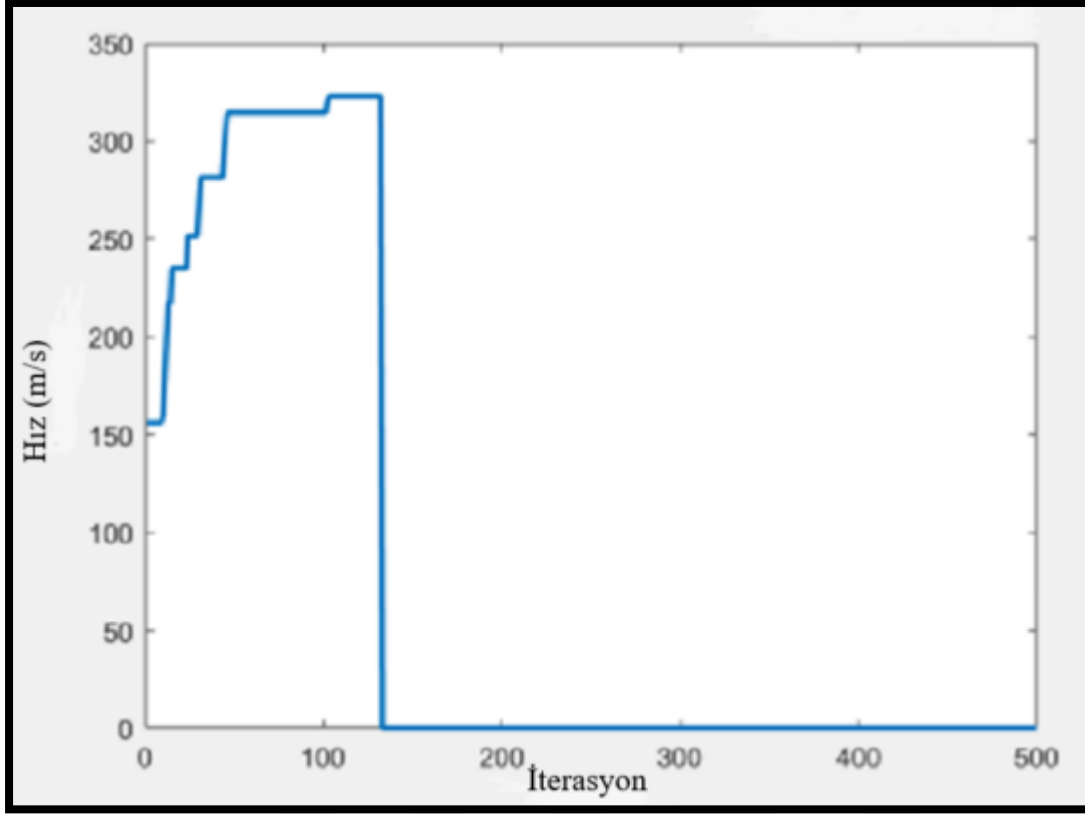
Çizelge 3.14. Yerçekimi arama algoritması parametreleri

Yerçekimi Kuvvet Algoritma Parametreleri	
Ajan Sayısı	50
Her ajanın boyutu	5 (5 tetikleme zamanı)
Yineleme	100
G0 (Yerçekimi Sabiti)	1000
Yerçekimi sabiti zayıflatıcı katsayı	20
Alt sınır-Üst Sınır	0-66(ms)

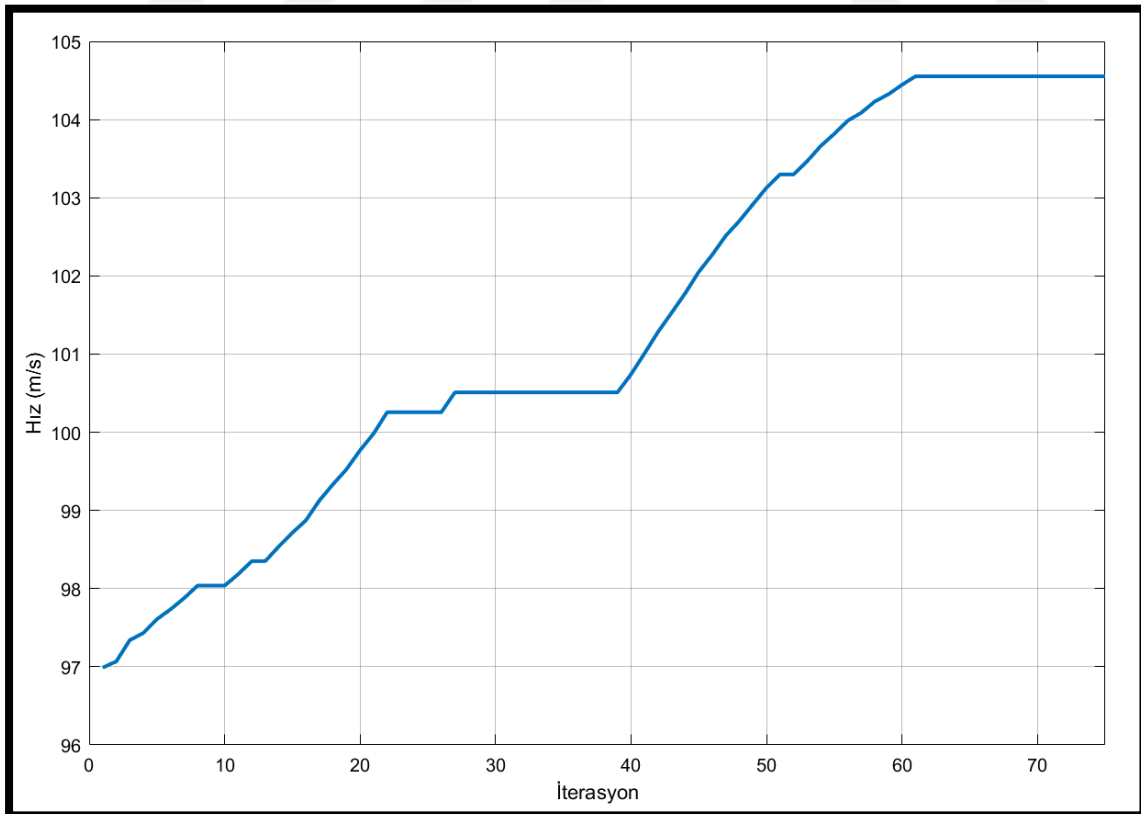
Akım sınırı eklendiğinde ise Çizelge 3.15 da verilen tetikleme değerleri bulunmuş ve namludan çıkış hızı 104,55 m/s ile sınırlı kalmıştır. Sonuca Şekil 3.42 de verilen iterasyon hız grafiğinde de görülebileceği gibi 70.iterasyon civarında ulaşılmıştır. Hem elde edilen hız değeri düşük kalmıştır hemde bu değere diğer yöntemlere göre yavaş ulaşılmıştır.

Çizelge 3.15. Akım sınırı ile YAA sonuçları

	Örnekleme zamanı (ms)	Akım Sınırı	T1	T2	T3	T4	T5	Hız
1	0,1	-	0	0	0	0	0	322
2	0,1	3kA	660	138	133	76	646	104,55



Şekil 3.41. Akım sınırı eklenmemiş YAA



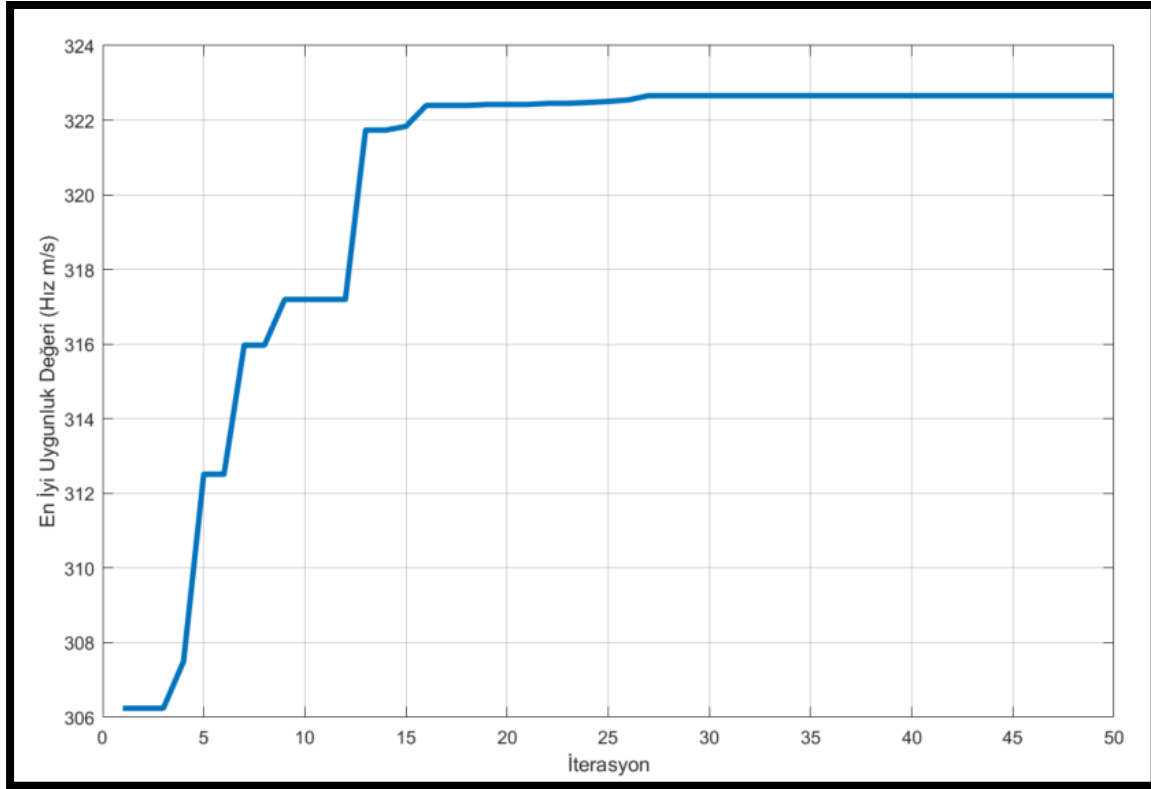
Şekil 3.42. Akım sınırı eklenmiş YAA

3.2.6. Parçacık sürü optimizasyon algoritması

Kullanılan Parçacık sürü optimizasyon algoritmasının(PSO) temel parametreleri Çizelge 3.16 da verilmiştir. Aynı parametreler kullanılarak akım sınırı eklenerek ve eklenmeden simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.16 da verilmiştir., PSO sonuçlara Şekil 3.43 ve Şekil 3.44 da görüldüğü gibi 30. İterasyondan itibaren ulaşmıştır. Tabloda verilen 3.simülasyonda ise iterasyon sayısı 20 alınmıştır bu çalışma için hız 239m/s hızla sınırlı kalmıştır. PSO diğer yöntemlere göre en hızlı sonuca ulaşan yöntem olmuştur. Aynı zamanda akım sınırı eklendiğinde en yüksek hız sonucuna bu yöntem ile ulaşılmıştır.

Çizelge 3.16. Parçacık sürü optimizasyon algoritma parametreleri

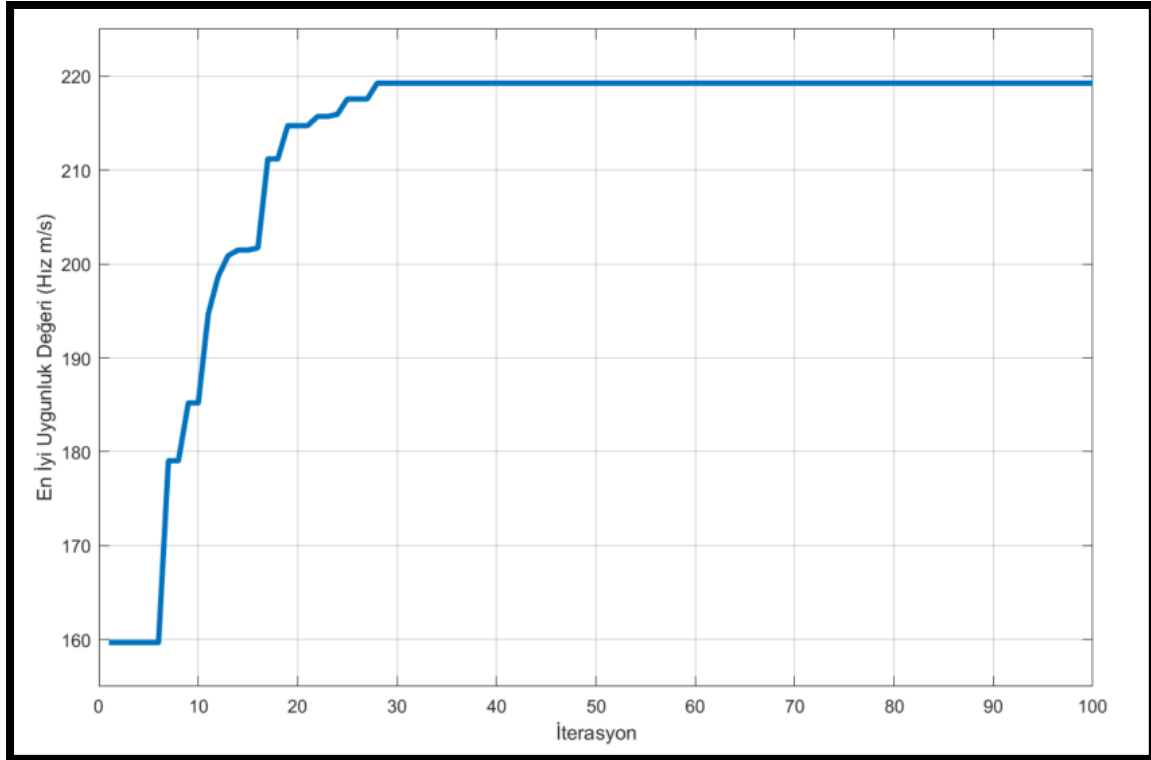
Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritma Parametreleri	
Popülasyon –Sürü	50
Sürüdeki parçacık sayısı	5 (5 tetikleme zamanı)
C1 (bilişsel katsayı) (Kişisel Hızlanma Katsayısı)	2
C2 (sosyal katsayı)(Sosyal (Global) Hızlanma Katsayısı)	2
İterasyon -Yineleme	100
W(Aralık Katsayısı)	1
W_{damp} (Atalet Katsayısı Sönümlenme Oranı)	0,89
Alt sınır-Üst Sınır	0-66(ms)



Şekil 3.43. Akım Sınırı Eklenmeden PSO

Çizelge 3.17. PSO sonuçları

	Akım Sınırı kA	Örnekleme Zamanı (ms)	İterasyon	T1 ms	T2 ms	T3 ms	T4 ms	T5 ms	Hız (m/s)
1	-	0,1	50	42,2	42,5	42,6	42,7	43,1	322,4208
2	-	0,1	100	40	40,1	40,1	40,2	40,2	322,6586
3	-	0,1	20	18,6	18,7	18,8	18,9	45,5	239,4800
4	3	0,1	100	15	15	15,1	16,3	60,2	219,2580
5	3	0,1	100	10	10	10,1	11,3	40,4	219,2580



Şekil 3.42. Akım Sınırı Eklenmiş PSO

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toplam altı yöntem kullanılarak Çok Aşamalı Raylı Elektromanyetik Fırlatıcının enerji ünitelerinin tetikleme zamanları bulunmuştur. Öncelikle akım sınırı eklenmeden yöntemler kullanıldığında hız değerleri kıyaslanmıştır. Ancak bu durumda namludan yüksek akım geçtiği gözlemlenmiştir. Sistemi yüksek akımdan korumak için eleman özellikleri göz önünde bulundurularak akım sınırı belirlenmiştir. Belirlenen akım sınırı ile yöntemler yeniden kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler ile bulunan tetikleme değerleri ve bu tetikleme değerleri ile elde edilen hız sonuçları Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yöntemler ile elde edilen tetikleme zamanları ve namludan çıkış hızı

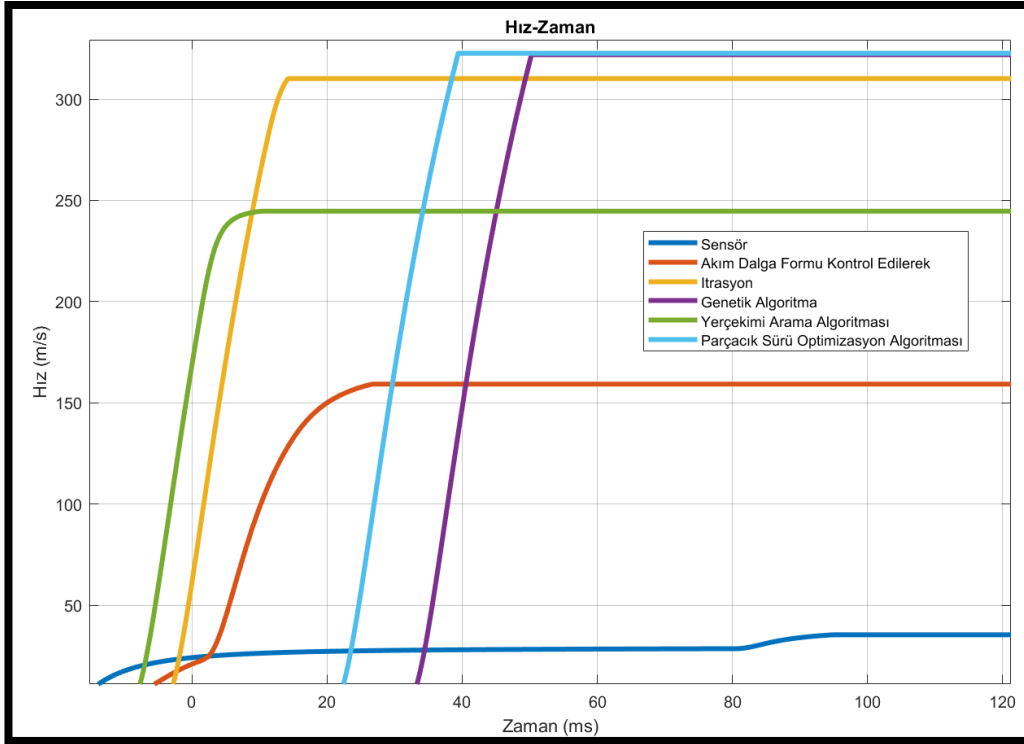
Yöntem	Akım Sınırı	T1 ms	T2 ms	T3 ms	T4 ms	T5 ms	Namludan Çıkış Hız m/s	Maximum Akım kA
Sensör	-	10	10	20	23	25	207,3	0,93
Akım Dalga Formu	-	0	11	21	22	31	28,3	3,2
İterasyon	-	0	10	10	10	10	162,45	3,7
	-	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	310,1364	4,45
	3kA	8,1	8,6	29,9	30	30	169,4	3
Genetik Algoritma	-	50,6	50,6	51,1	51,2	51,4	322,8	4,45
	3kA	51,3	57,1	69	66,8	77,2	211,6207	3
Yerçekimi Arama Algoritması	-	0	0	0	0	0	322	4,45
	3kA	13,3	13,8	64,6	66	76	104,55	3
Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması	-	40	40,1	40,1	40,2	40,2	322,6586	4,45
	3kA	10	10	10,1	11,3	40,4	219,2580	3

Akım dalga formu kontrol yöntemi kullanıldığında akım değeri silahın yapısına zarar vermeyecek seviyelerde tutularak sistem güvende tutulmuştur ancak hız seviyesi çok düşük kalmıştır. Namlu çıkış hızı maksimum 28,3m/s elde edilmiştir. Sisteme verilen enerji ile çok

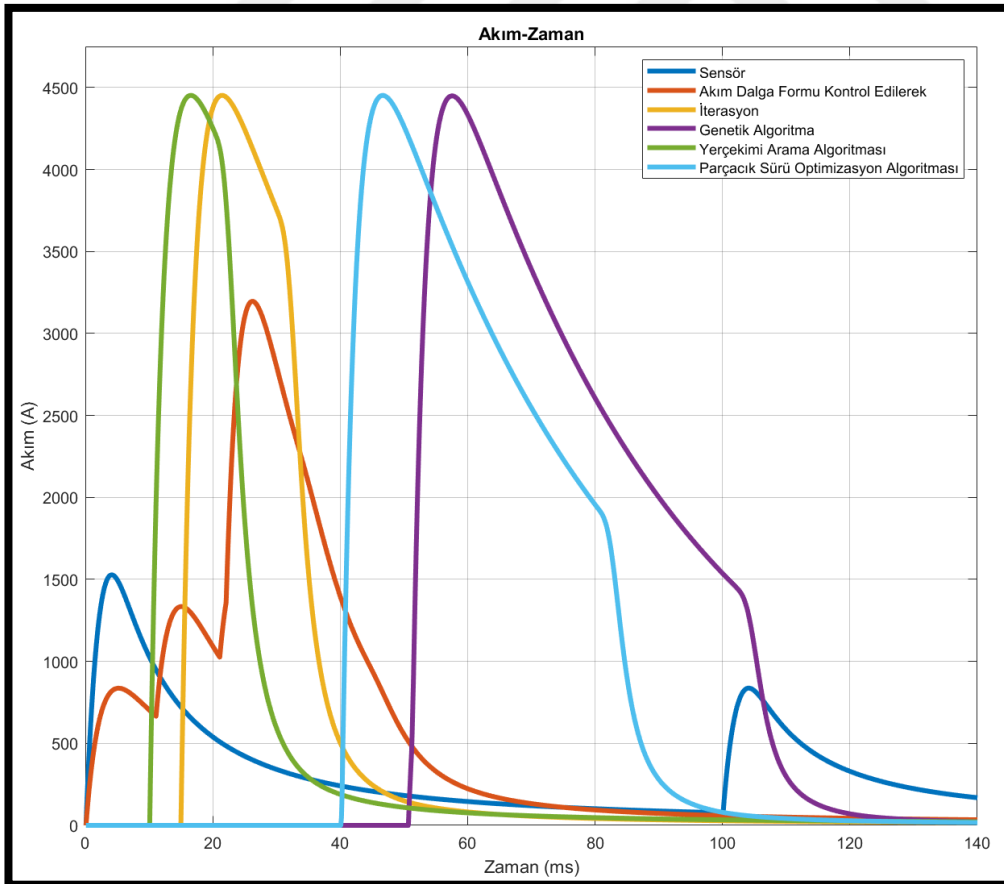
daha yüksek hızlara ulaşılabilecekken hızın bu seviyede kalması bu yöntemin tercih edilmeme sebebidir.

Namlu boyunca sensorler yerleştirilerek tetikleme yapıldığında maksimum 207,3m/s hıza ulaşılabilmektedir. Bu yöntemin avantajı sisteme verilen enerji değiştirilse bile merminin pozisyonuna göre tetikleme yapıldığı için önceden tetikleme zamanı belirlenmesine gerek duyulmadan atış yapılabilecek olmasıdır. Dezavantajları ise diğer yöntemlere göre daha düşük namludan çıkış hızına ulaşmasının yanı sıra sisteme tetikleme yapılacak DGK sayısı kadar sensöre ihtiyaç duyulacak olmasıdır. Sensörlerde alınan verilerin işlenerek tetikleme yapılması için kontrol sisteminde eklemeler yapılması gerekir. Bu kontrol sisteminde oluşacak gecikmelerde kaçınılmazdır. Bu gecikmelerde sistemin performansını negatif olarak etkileyecektir. Şekil 10 daki akım-zaman grafiğinde de görülebileceği gibi akım sadece 3 numaralı sensör pozisyonlamasında 3kA 'i geçmiştir. Şekil 3.31 de verilen ve en yüksek hıza 5 numaralı konumlandırma ile ulaşılmıştır ve akım 3kA altında kalarak sistem güvenliği sağlanmıştır. Ancak maliyeti arttıracak olmasına rağmen performansı düşük kalmaktadır bu nedenle bu yöntemle devam edilmemiştir.

İterasyon yönteminde ilk DGK atışın başında tetiklenirken diğer 4 DGK'ın ise tetiklenme zamanı 10ms olarak bulunmuştur. Bu tetikleme zamanları ile namludan çıkış hızı 162,42m/s elde edilmiştir. Daha iyi sonuçlar alabilmek adına örnekleme adımı küçültülerek iterasyon yöntemi tekrarlanmıştır. Bu durumda 4 DGK tetikleme zamanları 14,9ms bulunurken 310,1364m/s namludan çıkış hızı elde edilmiştir. Ancak Şekil 4.2 de görülebileceği gibi akım 3,5kA 'in üzerine çıkmıştır.



Şekil 4.1. Yöntemlerin hız grafikleri



Şekil 4.2. Yöntemlerin akım grafikleri

GA, PSO ve YAA algoritmaları yakın sonuçlara ulaşarak yöntemler arasında en yüksek hızlar elde edilmiştir. Akım limiti eklenmeden yapılan simülasyonlarda en iyi sonucu 322,8 m/s namlu hız değeri ile genetik algoritma bulmuştur. PSO ile 322,6586 m/s elde edilirken ve YAA ile 322m/s hızına ulaşılmıştır. GA küçük farkla en yüksek hızı elde etmiş olsa da en hızlı optimum sonuca ulaşan algoritma PSO'dur. Ancak namlu çıkış hızları yüksek çıkmasına rağmen algoritmalar ile bulunan tetikleme zamanlarında akım değerleri 3kA 'e hatta 3,5kA akım değerinin üzerine çıkmıştır.

Sistem elemanlarının zarar görmesi engellenerek ulaşılacak en yüksek hızlara ulaşmak için PSO YAA ve GA algoritmaları ve İterasyon yöntemi akım sınırı eklenerek yeniden çalıştırılmıştır. Akım sınırı olarak 3kA seçilmiştir. Bu sınır elektromanyetik fırlatıcının ve kontrol sisteminin elemanlarının özelliklerine göre seçilmelidir. Sensör yöntemi kullanıldığında akım değeri belirlenen sınırın üzerine çıkmadığı için bu bölümde değerlendirilmeye devam edilmiştir.

3kA Akım sınırı eklendiğinde YAA algoritması 104,55 m/s, İterasyon yöntemi ile 169,4 m/s, GA algoritması 211,6207 m/s , PSO algoritması 219,258 m/s namludan çıkış hızlarına ulaşmıştır.

Sınırlayıcı koşul eklendiğinde 219,258 m/s namludan çıkış hızı ile PSO en iyi performansı gösterirken sınır olmadan en yüksek hız sonuçlarına 322,8 m/s hız ile GA ulaşmıştır.

Benzetim çalışmalarında en iyi performansları PSO ve GA kontrollü Manyetik fırlatıcı göstermiştir. Bu nedenle uygulama çalışmalarında GA ve PSO'nun denetim maksadıyla kullanılması uygun olacaktır.

Uygulamaya geçilmeden önce, yapılan analizlerin yüksek kapasiteli bir bilgisayarda Maxwell/ANSYS ile de doğrulanması büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. Ma, A. J., Zhang, B. D., Yuan, C. W., Yuan, R., Xu, W., Yan, P. (2017). A method of generating timing for a given target current waveform in electromagnetic launch technology. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(7), 1561-1566.
2. Ji, W. Y., Jeong, G., Park, C. B., Jo, I. H., Lee, H. W. (2018). A study of non-symmetric double-sided linear induction motor for Hyperloop All-In-One System (propulsion, levitation, and guidance). *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-4.
3. Guerrieri, M. (2022). Hyperloop, HeliRail, Transrapid and high-speed rail systems. Technical characteristics and cost-benefit analyses. *Research in Transportation Business & Management*, 100824.
4. Sadeghi, S., Saeedifard, M., Bobko, C. (2021). *Dynamic Modeling and Simulation of Propulsion and Levitation Systems for Hyperloop*. In 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA) (1-5). IEEE.
5. Baneqee, S., Biswas, P., Bhaduri, R. (2010). Some aspects of rail and actuator used in electromagnetic levitation systems. An Ansys based simulation study. *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion* (1-6). IEEE.
6. Tosun, N., Karagöz, M., Yurdakonar, F., Gülletutan, G., Yıldırım, B., Keysan, O. (2022). Muzzle Voltage Experiments of the EMFY-3 Launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50(10), 3434-3442.
7. Ceylan, D., Karagöz, M., Cevik, Y., Yıldırım, B., Polat, H., Keysan, O. (2019). Simulations and experiments of EMFY-1 electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(7), 3336-3343.
8. Hundertmark, S., Vincent, G., Simicic, D., Schneider, M. (2017). Increasing launch efficiency with the PEGASUS launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(7), 1607-1613.
9. McNab, I. R. (1999). Early electric gun research. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(1), 250-261.
10. Hundertmark, S. (2011). *Applying railgun technology to small satellite launch*. In Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST2011 .747-7514.
11. McNab, I. R. (2018). Brief history of the EML symposia: 1980–2018. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(5), 2136-2142.
12. Egeland, A. (1989). Birkeland's electromagnetic gun: a historical review. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 17(2), 73-82.
13. Brast, D. E., Sawle, D. R. (No. NASA-CR-62876). (1965). Feasibility study for development of a hypervelocity gun final report. NASA .California

14. Rashleigh, S. C., Marshall, R. A. (1978). Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*, 49(4), 2540-2542.
15. Karagoz, M., Çevik, Y., Tan, E., Civil, A., Cavbozar, O., Gocmen, U., Sahin, M. S. (2017). *Aselsan EMFY-1 electromagnetic launcher: First experiments*. In 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC) 1-3.
16. Tosun, N., Civil, A., Oruç, A. Y., Yıldırım, B., Özceylan, B. M., Bolat, B., Keysan, O. (2022). Sensitivity Analysis for the Inductance Gradient of EMFY-3 Electromagnetic Launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 50(2), 381-386.
17. Deng, H. M., Wang, Y., Lu, F. L., Yan, Z. M. (2020). Optimization of reluctance accelerator efficiency by an improved discharging circuit. *Defence Technology*, 16(3), 662-667.
18. Hassannia, A., Abedi, K. (2021). Optimal switching scheme for multistage reluctance coilgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(3), 1241-1246.
19. Deng, H. M., Wang, Y., Yan, Z. M. (2022). Study on the influence of armature on the efficiency of reluctance accelerator. *Defence Technology*, 18(2), 293-304.
20. Liebfried, O., Brommer, V. (2013). A four-stage XRAM generator as inductive pulsed power supply for a small-caliber railgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(10), 2805-2809.
21. Cui, S., Liu, Q., Zhao, W. (2013). Simulation research of a CPA powered railgun system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(5), 1484-1487.
22. Liebfried, O., & Roch, M. (2014, June). *Augmented railgun with integrated XRAM current multiplication*. In 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC) 279-282.
23. Kerrisk, J. F. (1981). Current distribution and inductance calculations for rail-gun conductors. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 82, 29551.
24. Tosun, N., Keysan, O. (2021). Inductance Gradient Calculations of EMFY-3 Electromagnetic Launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*
25. Zhang, H., Cheng, G., Guo, W., Su, Z., Zhang, T., Yang, Y. (2015). Calculating timing sequence of capacitor-based railgun with given muzzle velocity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(9), 3298-3303.
26. Chao, T., Yan, Y., Ma, P., Yang, M., Hu, Y. W. (2015). Optimization of electromagnetic railgun based on orthogonal design method and harmony search algorithm. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(5), 1546-1554.
27. Chang, X., Yu, X., Liu, X., Li, Z. (2017). *Triggering strategy of railgun power supply for the accurate control of the armature muzzle velocity*. In 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC) 1-4.

28. Tosun, N., Polat, H., & Keysan, O. (2021). *Electromagnetic Launcher Speed Control with a Multilevel Fast Triggering Time Algorithm (MFTTA)*. In 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC) 1-10.
29. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. London. MIT press.
30. Elmas, Ç. (2016). *Yapay zeka uygulamaları: (yapay sinir ağı, bulanık mantık, sinirsel bulanık mantık, genetik algoritma)*. Ankara. Seçkin Yayıncılık.
31. Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks 4, 1942-1948.
32. Rashedi, E., Nezamabadi-Pour, H., Saryazdi, S. (2009). GSA: a gravitational search algorithm. *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248.
33. Yin, Q., Zhang, H., Li, H. J., Yang, Y. X. (2019). Analysis of in-bore magnetic field in C-shaped armature railguns. *Defence Technology*, 15(1), 83-88.
34. Kuşcu, R., (2022). *Raylı elektromanyetik silahlarda mühimmat geometrisinin atışa etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
35. Engel, T. G., Neri, J. M., Veracka, M. J. (2008). Characterization of the velocity skin effect in the surface layer of a railgun sliding contact. *IEEE transactions on magnetics*, 44(7), 1837-1844.
36. Holm, R. (2013). *Electric contacts: theory and application*. Berlin. Springer Science & Business Media.
37. Yu, X., Fan, Z. (2010). Simulation and two-objective optimization of the electromagnetic-railgun model considering VSEC resistance and contact resistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(1), 405-410.





Gazili olmak ayrıcalıktır