

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BARUT TANE GEOMETRİSİNİN SİLAH  
İÇ BALİSTİĞİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hasan Ali GEZER**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tahsin ENGİN**

**Mayıs 2016**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARUT TANE GEOMETRİSİNİN SİLAH  
İÇ BALİSTİĞİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Ali GEZER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 20.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof.Dr.  
Tahsin ENGİN  
Jüri Başkanı



Prof.Dr.  
Cuma BİNDAL  
Üye



Doç.Dr.  
Murat Kadri AKTAŞ  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Hasan Ali GEZER

26.05.2016

## ÖNSÖZ

İç balistik bilimi; silah ve mühimmat tasarımında yüksek maliyetli deneme atışları yerine, yapılan nümerik hesaplamalarla bilinmesine ihtiyaç duyulan değerlerin (basınç, mermi hızı gibi) belirlenmesi maksadıyla kullanılmaktadır. Silah ve mühimmat tasarımında, ateşleme sonrası namlu içerisinde düşük basınçta yüksek mermi çıkış hızını elde etmek amaçlanmaktadır. Yüksek mermi çıkış hızı; merminin daha uzun mesafelere (menzil) gidebilmesi veya kısa menzilli atışlarda hedefte daha fazla tahribat yaratılması için gerekmektedir. Mermi çıkış hızını yükseltmek, namlu içerisindeki patlama basıncını yükselterek mümkün olabilmektedir. Yüksek patlama basıncına dayanım sağlamak için namlunun et kalınlığını artırmak gerekmektedir. Bu durum silahın maliyetini yükseltmektedir.

Tez kapsamında, katı barutun kullanıldığı 40 mm silah sisteminde ateşleme, barutun yanması, basıncın yükselmesi ve merminin hareketi olaylarını kapsayan iç balistik prosesi ele alınmıştır. 40 mm namlulu silah sisteminde gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile matematik modelden elde edilen nümerik sonuçlar kıyaslanmış ve matematik modelin doğrulaması yapılmıştır.

Elde edilen doğrulanmış matematik model kullanılarak, barut tanelerinin geometrik özelliklerinin yanmaya, basınca ve mermi çıkış hızına etkileri incelenmiştir. Silindirik, küresel, silindirik tek delikli ve silindirik çok delikli barut tane geometrileri dikkate alınmıştır. İnceleme kapsamında ayrıca silindirik barutlarda tane boyunun etkileri ortaya konulmuştur.

## İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY .....	xi

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Amaç ve Kapsam .....	1
1.2. İç Balistik.....	1
1.3. İç Balistikte Verim .....	4
1.3.1. Balistik (Termodinamik) verim .....	4
1.3.2. Piezometrik (Basınç) verim .....	5
1.4. Tanımlar .....	5
1.4.1.Namlulu silahlar.....	5
1.4.2.Mühimmat.....	8
1.4.3.Barutlar .....	9
1.5. Barutun iç balistik olaylarına etkisi .....	10
1.5.1. Lineer yanma hızı sabitleri .....	12
1.5.2. Tane geometrisi etkisi .....	12
1.5.3. Tane büyüklüğü etkisi .....	13

### BÖLÜM 2.

LİTERATÜR ÖZETİ .....	15
-----------------------	----

### BÖLÜM 3.

İÇ BALİSTİK PROSESİ .....	21
---------------------------	----

3.1. İdeal Gaz Yaklaşımı .....	22
3.2. Gerçek Gaz Yaklaşımı ve Nobel-Abel Hal Denklemi .....	23
3.3. Yanma Hızı .....	24
3.4. Barutun Enerjisi .....	25
3.5. Termodinamiğin Birinci Yasası.....	29
3.5.1. Patlama sonucu oluşan enerji.....	29
3.5.2. Merminin hareketine harcanan enerji .....	30
3.5.3. Namlunun ısınmasına harcanan enerji .....	30
3.5.4. Barut gazları hareketine harcanan enerji.....	31
3.6. Etkili Kütle.....	31
3.7. Prosesin Gerçekleştiği Hacim .....	34
BÖLÜM 4.	
MATEMATİKSEL MODEL .....	38
4.1. Modelin Oluşturulması .....	39
4.1.1. Yanmanın olduğu süreç.....	41
4.1.2. Yanma tamamlandıktan sonraki süreç .....	45
4.2. Kabuller .....	47
4.3. Deneysel Çalışmaya İlişkin Bilgiler .....	47
4.4. Modelin Doğrulanması .....	49
BÖLÜM 5.	
BARUT TANE ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ .....	52
5.1. Barut Tane Geometrisinin Etkisi.....	52
5.2. Tane Çapının Etkisi.....	54
5.2.1. Silindirik barut tanesinde çapın etkisi.....	54
5.2.2. Küresel barut tanesinde çapın etkisi.....	57
5.3. Delik Çapının Etkisi.....	59
5.4. Tane Boyunun Etkisi.....	63
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	66

KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ .....	71

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\beta$	:	Yanma hızı sabiti ( $m/(s.(MPa)^n)$ )
$\eta$	:	Gaz molekülerinin kapladığı hacim (covolume) ( $m^3/kg$ )
$\lambda$	:	Barutun gücü ( $N.m/kg$ )
$\theta$	:	Isı transferi düzetme faktörü
$\rho_s$	:	Barut yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$\rho_g$	:	Barut gazlarının yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$\gamma$	:	Özgül ısılar oranı
$a/v^2$	:	Moleküller arasından çekim kuvveti ( $m^3/kg$ )
$C_v$	:	Sabit hacimde barut gazlarının özgül ısısı ( $kJ/kg.K$ )
$C_p$	:	Sabit basınçta barut gazlarının özgül ısısı ( $kJ/kg.K$ )
$d_b$	:	Barut tanesinin çapı (m)
$d_k$	:	Barut tanesinin delik çapı (m)
$du$	:	İç enerji değişimi (kJ)
$E_b$	:	Barut gazlarının hareketine harcanan enerji(kJ)
$E_k$	:	Merminin kinetik enerjisi (kJ)
$E_T$	:	Patlama sonucu oluşan enerji (kJ)
$l$	:	Barut tanesinin boyu (m)
$m$	:	Gazın kütlesi (kg)
$m_b$	:	Barutun kütlesi (kg)
$m_e$	:	Efektif mermi kütlesi (kg)
$m_g$	:	Gazların kütlesi (kg)
$n$	:	Yanma hızı basınç üssü
$p$	:	Basınç (MPa)
$p_a$	:	Ortalama basınç (MPa)



$p_b$	:	Mermi tabanına etki eden basınç (MPa)
$p_{br}$	:	Yanma odası basıncı (MPa)
$P_{max}$	:	Maksimum basınç (MPa)
$t$	:	Zaman (s)
$T$	:	Mutlak sıcaklık (K)
$T_0$	:	Adyabatik alev sıcaklığı (K)
$v$	:	Kütleli özgül hacim ( $m^3$ )
$V_c$	:	Yanma odası hacmi ( $m^3$ )
$V_m$	:	Mermi hızı (m/s)
$web$	:	Barut tanesinin et kalınlığı (mm)
$x$	:	Merminin aldığı yol (m)
$x_m$	:	Namlunun boyu (m)
$z$	:	Biçim fonksiyonu

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. İç balistik prosesinde basınç–yol ilişkisi .....	2
Şekil 1.2. Tipik bir namlulu silah sisteminin şematik gösterimi.....	6
Şekil 1.3. Geri tepmesiz silah sistemi .....	6
Şekil 1.4. Yaygın olarak kullanılan barut tane geometrileri .....	9
Şekil 1.5. Barutun basınca etkisi .....	10
Şekil 1.6. Farklı barut tane geometrilerinin yanma miktarına göre yüzey alanı .....	12
Şekil 1.7. Barut tane boyutunun etkisi .....	13
Şekil 1.8. Barut tanelerinin basınç- namlu boyu grafiğine etkisi.....	14
Şekil 2.1. İç Balistik Kodlarındaki Hata Yüzdesi .....	20
Şekil 3.1. Silah mermi ilişkisi ile silindirik piston arasındaki benzerlik .....	21
Şekil 3.2. Silindirik çubuk barut tanesinde yanma.....	24
Şekil 3.3. Sabit hacimde yanma olayının şematik gösterimi. ....	25
Şekil 3.4. Mermi hareket etmeden önceki durum .....	34
Şekil 3.5. Merminin hareketinin hacim değişimine etkisi .....	36
Şekil 4.1. İç balistik matematik modeli süreçler .....	39
Şekil 4.2. Basınç-Zaman Eğrisi.....	49
Şekil 4.3. Mermi Hızı-Zaman Eğrisi.....	50
Şekil 4.4. Basınç-Namlu Boyu Eğrisi .....	50
Şekil 4.5. Biçim Fonksiyonu Zaman Eğrisi. ....	51
Şekil 5.1. Tane geometrileri Basınç-Namlu Boyu grafiği .....	53
Şekil 5.2. Tane geometrileri Mermi Hızı-Namlu Boyu grafiği.....	53
Şekil 5.3. Çap değişiminin Basınç-Namlu Boyu grafiğine etkisi. ....	55
Şekil 5.4. Çap değişiminin mermi hızına etkisi. ....	56
Şekil 5.5. Küresel barut için çap değişiminin basınca etkisi.....	58
Şekil 5.6. Küresel barut tanesinde çap değişiminin mermi hızına etkisi .....	58
Şekil 5.7. Delik çapı değişiminin Basınç Namlu Boyu grafiğine etkisi .....	61
Şekil 5.8. Delik çapı değişiminin mermi hızına etkisi .....	62

Şekil 5.9. Barut tanesinin boyunun basınca etkisi .....	64
Şekil 5.10. Barut tanesinin boyunun mermi hızına etkisi .....	64

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Geri tepmeli orta kalibre silahta enerji dağılımı .....	4
Tablo 3.1. İdeal gaz hal denklemini oluşturan prensipler .....	22
Tablo 4.1. Bilinen Parametreler .....	40
Tablo 4.2. Hesaplanan Parametreler .....	41
Tablo 4.3. Bazı barut tane geometrilerinin et kalınlıkları .....	43
Tablo 4.4. Bazı barut tane geometrilerinin hacim denklemleri.....	43
Tablo 4.5. 40 mm silahın iç balistik verileri .....	48
Tablo 4.6. Deney sonuçları .....	48
Tablo 4.7. Nümerik ve deneysel sonuçların kıyaslanması.....	51
Tablo 5.1. İncelenen barut tane geometrileri .....	52
Tablo 5.2. Tane geometrileri nümerik analiz sonuçları .....	54
Tablo 5.3. İncelenen silindirik barut tanesi çapları .....	55
Tablo 5.4. Çap değişiminin etkilerine ilişkin nümerik sonuçlar .....	56
Tablo 5.5. İncelenen küresel barut tanesi çapları .....	57
Tablo 5.6. Değişik çaplardaki küresel taneli barutun nümerik sonuçları.....	59
Tablo 5.7. Delik çapının etkisi için incelenen barut tane özellikleri.....	60
Tablo 5.8. Delik çapı değişiminin nümerik analiz sonuçları .....	62
Tablo 5.9. Analiz edilen silindirik barut tane boyları .....	63
Tablo 5.10. Tane boyu değişiminin nümerik sonuçları.....	65

## ÖZET

Anahtar kelimeler: İç balistik, biçim fonksiyonu, barut tane geometrisi

Bu çalışmada silahların iç balistiğinin tanımlaması yapılmıştır. İç balistik hesaplamalarına ilişkin matematik model oluşturulmuştur. Model oluşturulurken barut tane geometrisine bağlı olarak geliştirilen biçim fonksiyon kullanılmıştır. Modelin doğrulanmasında, literatürden temin edilen 40 mm silah sisteminin deneysel atış sonuçları kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ile kodun çözümü yapılmıştır. Matematik model ile test sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçlardaki sapmanın %4 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle matematik model doğrulanmıştır. Bu model kullanılarak silindirik, tek delikli silindirik, çok delikli silindirik ve küresel barut taneleri incelenmiştir. Bu tane geometrilerinin etkisi gösterilmiştir.

# **AN INVESTIGATION INTO THE EFFECT OF PROPELLANT GRANULE GEOMETRY ON INTERIOR BALLISTICS OF GUNS**

## **SUMMARY**

Keywords: Interior Ballistics, Form Function, Propellant Granule Geometry

In this study, the description of interior ballistics of guns is given. The interior ballistics mathematical model is developed for calculation. During the mathematical model development process geometrical properties of propellant are used as the form function. 40 mm gun firing experimental results which got from literature are used in the model verification process. The code solved with the parameters described in the experimental study. Results of the mathematical modal are compared with the experimental results. The comparison showed that the standard deviation between experimental and numerical results was less than 4%. Therefore the modal were verified. After verification process cylindrical, single perforated cylindrical, multi perforated cylindrical and spherical granule types are inspected with the modal. Effect of the granule geometries has shown in this study.

# **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

## **1.1. Amaç ve Kapsam**

Bu tezde, namlulu silah sistemleri için iç balistik temel denklemlerinin elde edilmesi, matematik modelin oluşturulması, barut tane geometrilerinin iç balistik olaylarına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

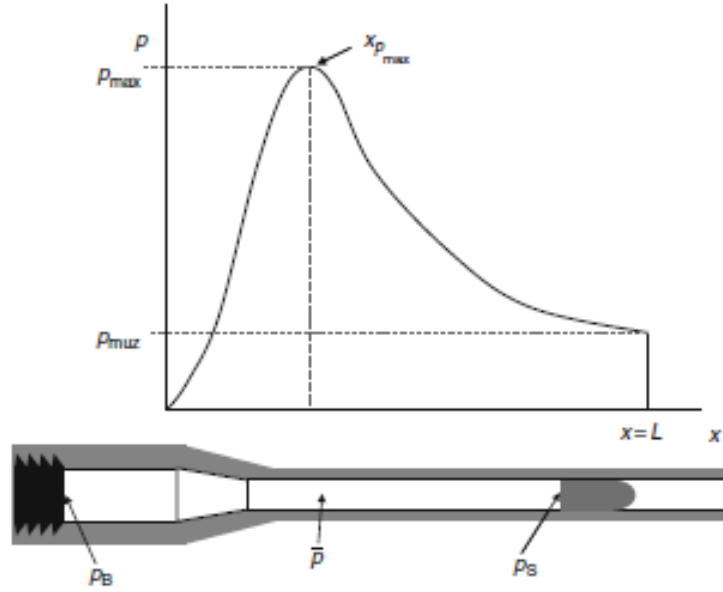
Tez kapsamında, 40 mm silah sistemi ele alınmıştır. Barut tane geometrisi olarak silindirik, silindirik tek delikli ve küresel geometrili barut tanelerinin iç balistiğe etkisi incelenmiştir.

## **1.2. İç Balistik**

Silahlar, kimyasal enerjinin kinetik enerjiye dönüştürüldüğü sistemlerdir. Kimyasal enerji kaynağı olarak yanıcı bir madde olan barut kullanılmaktadır. Barut silahın atım yatağında (yanma odası) yanmakta ve katı fazdan gaz fazına geçmektedir. Bu gazlar atım yatağı içerisinde sıcaklığın ve basıncın artmasına neden olmaktadır. Basıncın, merminin ilk hareketini başlatacak seviyeye geldiğinden itibaren mermi namlu boyunca hızlanarak hareket etmektedir.

İç balistik, silah içerisinde yanıcı maddenin yanması ile başlatılan prosesleri inceleyen bilimsel çalışmadır [1]. İç balistik, merminin silahın namlu ağzından çıkışından önce silah, mermi ve barut arasındaki etkileşimlerle ilgilenir. Bu kategoride; barutun ateşlenmesi, yanma odasında barutun yanması, basıncın yükselmesi, merminin ilk hareketi, sevk çemberinin atım yatağını tıkaması, namlu içindeki mermi dinamikleri ve atış döngüsündeki namlu dinamikleri yer almaktadır [2].

İç balistik; silah ve mühimmatın tasarımı ve mermi menzilinini tayini, hedefte meydana getireceği tahribat konularına ışık tutması açısından önem arz etmektedir. Namlulu silah sisteminde basınç-yol ilişkisinin şematik gösterimi Şekil 1.1.'de sunulmaktadır.



Şekil 1.1. İç balistik prosesinde basınç-yol ilişkisi [3]

Barutlar çeşitli kompozisyon, şekil ve boyutlarda olabilmektedir. Özellikle büyük çaplı silahlarda uzun tel şeklinde, kurdele ve delikli olarak barut taneleri kullanılmaktadır.

Barut tipi, tane şekli ve miktarı; silah için izin verilen maksimum basınç ve istenilen namlu çıkış hızını elde etmek üzere seçilmektedir. Silah sistemi, barutun yandığı ve kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği yanma odası ile mermiye yön veren namlunun bir arada bulunduğu fırlatma aracı olarak tanımlanabilir.

Yanma odasındaki barutun yanması ile kimyasal enerji ısı enerjisine dönüşmektedir. Barut gazlarının ısınması genişlemeye neden olmakta ve merminin hızlanmasını sağlamaktadır. İç balistik ile ilgili çalışmalarda çözümü kolaylaştırmak amacı ile



barut tanelerinin aynı anda yanmaya başladığı ve yanmanın uniform olduğu kabul edilmektedir.

Yanma başladığında yanma odasında basınç hızla yükselmektedir. Basınç, mermi ile namlu arasındaki sürtünme direncini yenecek seviyeye ulaştığında mermi namlu içerisinde hareket etmeye başlamaktadır. Merminin hareketi ile mermi arkasında bulunan reaksiyon hacmi büyümektedir. Reaksiyon hacminin büyümesi basıncın düşmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte yanma oranı, basınca bağlı bir büyüklük olduğundan, merminin hareketinden önce elde edilen yüksek basınç, yanmanın da daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Namlu içerisindeki maksimum basınç merminin bir miktar ilerlediği noktada gerçekleşmektedir. Örnek olarak 5,56 mm silahlarda (hafif silah, tüfek) maksimum basınç merminin, namlu boyunun %11'ine ulaştığı noktada meydana gelmektedir [2].

Maksimum basıncın elde edildiği noktadan sonra basınç düşmeye başlamaktadır. Basınç, namlu ağzında barut kimyasal potansiyel enerjisinin oluşturduğu basıncın %10-30'u mertebesinde [2].

Namlu ağzında basıncın atmosfer basıncına eşit olması istenildiğinde namlunun çok uzun olması gerekmektedir. Bu durum ise maliyet etkin olmamaktadır. Diğer taraftan namlu ağzındaki basınç, mermi namluyu terk ettikten sonra kısa bir mesafede halen merminin hızlanmasına neden olabilmektedir [2]. Orta kalibre silahlarda yanma sonucu oluşan enerjinin dağılımı Tablo 1.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Geri tepmeli orta kalibre silahta enerji dağılımı [1]

Enerji Dağılımı	Oranı (%)
Mermi hareketine harcanan enerji	32.0
Sürtünmeye harcanan enerji	2.0
İtici gazların hareketine harcanan enerji	3.0
Namlu ve mermiye aktarılan ısı enerjisi	20.0
Gazlara aktarılan ısı enerjisi	42.0
Merminin dönmesine ve geri tepmeye harcanan enerji	1.0
Toplam	100.0

### 1.3. İç Balistikte Verim

İç balistik uygulamalarının etkinliğinin belirlenmesinde balistik verim ile piezometrik verim değerleri kullanılmaktadır.

#### 1.3.1. Balistik (Termodinamik) verim

Merminin namlu ağzındaki kinetik enerjisinin, barutun toplam enerjisine oranına balistik verim denilmektedir.

$$\text{Balistik Verim} = \frac{\text{Merminin Kinetik Enerjisi}}{\text{Barutun Toplam Enerjisi}} \quad (1.1)$$

Balistik verim, barutun yanması sonucu oluşan enerjinin ne kadarının merminin hareketine aktarıldığını ifade etmektedir. İç balistik uygulamalarında balistik verimin yüksek olması amaçlanmaktadır.

### 1.3.2. Piezometrik (Basınç) verim

Merminin namlu ağzına kadar olan hareketi esnasında mermi tabanına etki eden basıncın ortalamasının maksimum basınca oranıdır. Piezometrik verim, basınç ile merminin hareketi ilişkisindeki kararlılığı ifade etmektedir.

$$\text{Piezometrik Verim} = \frac{\text{Mermi Tabanına Etki Eden Ortalama Basınç}}{\text{Maksimum Basınç}} \quad (1.2)$$

Piezometrik verimin yüksek olması; namlu ağzındaki basıncın yüksek olduğunu ve barutun yanmasının tamamlandığı andaki merminin konumunun namlu ağzına daha yakın olduğunu ifade etmektedir.

Piezometrik verimin düşük olması ise; namlu ağzındaki basıncın düşük olduğunu ve barutun yanmasının tamamlandığı andaki merminin konumunun atım yatağına yakın olduğu göstermektedir.

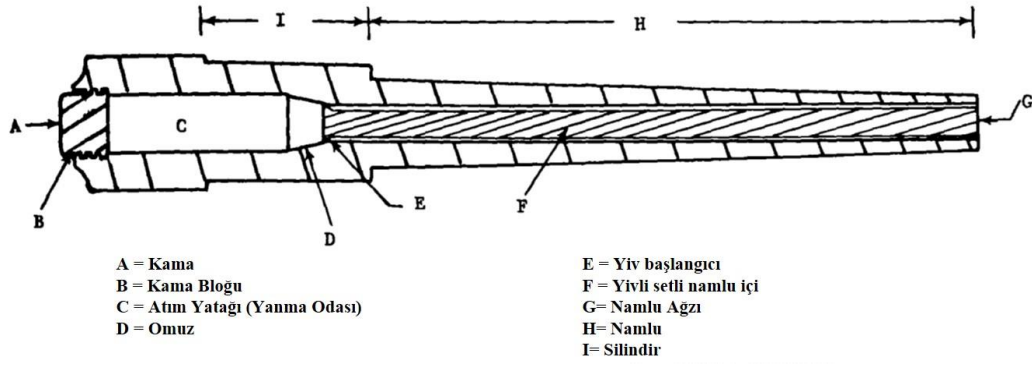
Yüksek balistik verim barutun yanmasının tamamlandığı anının mümkün olduğunca erken gerçekleşmesinin sonucunda elde edilmektedir.

İç balistik proseslerinde; balistik verimin yüksek, piezometrik verimin düşük olması hedeflenmektedir.

## 1.4. Tanımlar

### 1.4.1. Namlulu silahlar

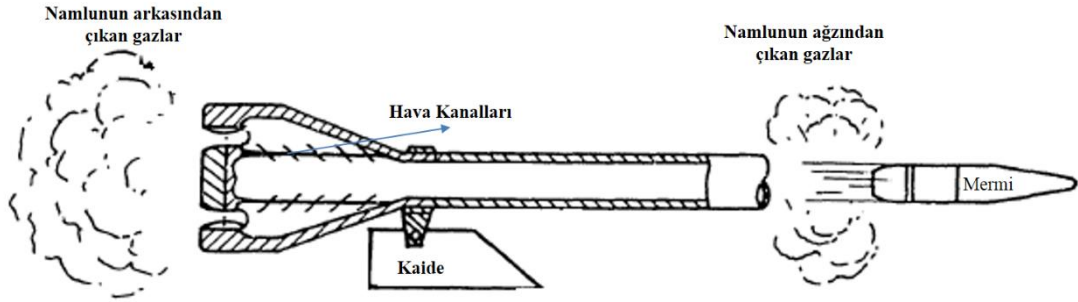
Namlulu silahlar barutun kimyasal potansiyel enerjisinin, merminin kinetik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerdir. Namlulu silah sistemlerinin şematik gösterimi Şekil 1.2.'de sunulmuştur.



Şekil 1.2. Tipik bir namlulu silah sisteminin şematik gösterimi [4]

Şematik gösterimi yapılan silah sistemi geri tepmeli silah sistemlerine bir örnek olarak gösterilebilir. Bu tür silah sistemlerinde geri tepmeyi sönmölemek üzere sistemler yer alabilmektedir.

Namlulu silah sistemleri bir diğör türü geri tepmesiz silah sistemleridir. Bu silah sistemlerinde barutun yanması sonucu oluşan yüksek basıncın silah geri tepmeden tahliye edilmesi için hava kanalları mevcuttur. Geri tepmesiz silahların şematik gösterimi Şekil 1.3.'de sunulmaktadır.



Şekil 1.3. Geri tepmesiz silah sistemi[2]

Geri tepmesiz silah sistemlerinin kullanımı potansiyel enerjinin bir kısmının arka kısımdan atılmaktadır. Bu durum namlunun daha düşük basınca maruz kalmasına dolayısıyla et kalınlığının düşük olmasına ve silahın daha ucuz olmasına neden olmuştur. Bu ve benzeri silah sistemleri namlu gerisinde basınçlı gaz çıkışının oluşturduğu tehlikelerden ötürü kullanılabilirliklerini yitirmeye başlamış ve çeşitli ülkelerin ordularının envanterinden çıkarılmıştır.

Sistem tasarım kriteri olarak, tüm sistemlerde olduğu gibi esas olan minimum enerji ile maksimum iş veya genel olarak optimum verimliliklerdir. Bu maksatla silah tasarımcıları namlu içerisinde oluşan yüksek basıncın kullanım alternatiflerini dikkate almışlardır.

Namlu içerisindeki yüksek basıncı kullanmaya yönelik olarak bir örnek seri atış özelliğine sahip tüfeklerdir. Seri atışı sağlamak üzere namlu içerisinde gaz kanalı bulunmaktadır. Gaz kanalı namlu içerisindeki gazların bir kısmının bir kanal vasıtasıyla besleme sistemine aktarılmasına yönelik tasarlanmıştır. Gaz kanalından gelen gazlar, basıncın etkisi ile atışı tamamlanan ve atım yatağında bekleyen boş kovanın dışarı atılmasını sağlamaktadır. Besleme sisteminde (bazı silahlarda şarjör) bekleyen yeni mermi yaylı bir mekanizması ile atım yatağına sürülmektedir.

Silah sistemlerinde düşük basınç ile yüksek hız (dolayısıyla uzun menzil) arayışı, kısıtlı enerji dengesi sorunları nedeniyle bir noktada kalmaktadır. Tüm enerji ekonomisi çalışmaları belirli bir verim değerinde kalmaktadır. Bu durum, farklı silah tasarımlarının yolunu açmıştır.

Öncelikle mühimmatın üzerinde değişiklikler yapılması yolu değerlendirilmiştir. Mermi üzerinde sevk yakıtının namluyu terk ettikten sonra da yanması yönünde değişiklikler yapılmıştır. Sevk yakıtı merminin havadaki yolculuğu esnasında yanmaya devam etmekte ve itki etkisini sürdürmektedir. Bu tür mühimmatın kullanımı menzilin artmasını sağlamıştır.

Roketler de bu yöntemle merminin sevk edildiği mühimmatlardır. Roketlerde kullanılan lançer fırlatma amacı ile kullanılmaktadır. Çok düşük bir basınç seviyesi söz konusu olduğu için sadece roket mermisinin lançerden çıkmasına yetecek basınca dayanıklı olması yeterli olmaktadır. Roketlerin gelişimi daha sonra güdüm ihtiyacını doğurmuştur. Güdüm sistemleri roketin havada hareket ederken yönünün değiştirilebilmesidir. Bu tip güdümlü roketler füze olarak adlandırılmaktadır.

Roket ve füzelerin gelişimi iç balistik bilimi açısından incelenen iç balistik olaylarının namludan mermi üzerine taşınmasına neden olmuştur. Roket ve füzelerde barut; mühimmatın içerisinde yanması sonucu oluşan yüksek basınçlı gazlar nozuldan dışarı atılarak itki oluşturulmaktadır. Roket ve füze iç balistiği de katı yakıt kullanımı durumunda namlulu silah sistemlerine benzer kanun ve yöntemlerle çözülebilmektedir.

#### **1.4.2. Mühimmat**

Mühimmat, silah sistemine bağlı olarak çeşitli şekillerde bulunmaktadır. Mühimmatlar büyük kalibreli silahlarda sadece çekirdekten oluşmaktadır. Bu tür mermilerle paketlenmiş barutların atım yatağına manuel olarak veya otomatik sistemlerle yerleştirilmesi ile fırlatılmaktadır. Çekirdek üzerinde kullanım amacına göre çeşitli tapalar bulunmaktadır.

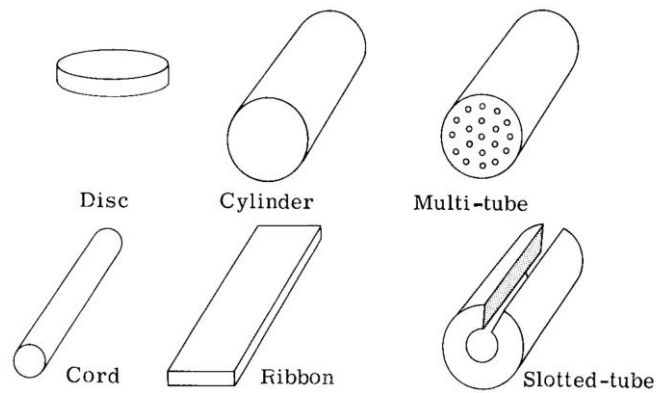
Bazı mermiler ise barutun içerisinde bulunduğu kovana sıkı geçme olarak yerleştirilen çekirdekten oluşan mermilerdir. Örnek olarak, tüfek ve tabancalar gibi hafif silah sistemlerinde kullanılan fişekler verilebilir. Bu tür mermilerle yapılan atışta kovan atım yatağında sabit olarak kalıp ateşleme sonucu oluşan basınç, çekirdeğin sıkı geçme kuvvetini yenerek serbest kalacağı değere ulaştığında, çekirdek namlu içerisinde hareket etmektedir.

Silah sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak mühimmatlarda da gelişmeler yaşanmıştır. Öncelikle mermilerin tasarımında minimum drag gücünü elde etmeye yönelik aerodinamik çalışmalar yapılmıştır.

Menzilin maksimum seviyeye çıkarılabilmesi amacıyla roket ve füzeler geliştirilmiştir. Roket ve füzeler, aslında mermi ile silah sisteminin birlikte değerlendirilebileceği tasarımlardır. Namlu yerine geçen lançer, namlulu silahlardan farklı olarak sadece mühimmatın fırlatılması için kullanılmaktadır.

### 1.4.3. Barutlar

Barutlar, merminin hareketi için gereken enerji, kimyasal potansiyel enerji olarak üzerinde barındıran patlayıcılardır. Barutlar çeşitli kompozisyonlar, şekiller ve boyutlarda olabilmektedir. Özellikle büyük çaplı silahlarda uzun tel, kurdele ve delikli barut taneleri kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan barut tane geometrileri Şekil 1.4.'de sunulmuştur.



Şekil 1.4. Yaygın olarak kullanılan barut tane geometrileri [1]

Modern silah sistemlerinde barut olarak dumansız barutlar kullanılmaktadır. Kompozit katı barutlar, yani kompozisyonunda nitrat ve oksitleyici olarak perklorate tuzu içerenler korozif etkilerinden dolayı silah sistemlerinde kullanılmaz. Çeşitli dumansız barutlar, farklı yanma oranı, fiziksel karakteristikler ve biçimlerde olmaktadır. Dumansız barutun toplam verimi basınç zaman grafiğine göre değerlendirilir. Namlu direnci ile ısı kaybının değişmediği kabul edildiğinde basınç zaman eğrisinin altındaki alan merminin hızı ile orantılıdır.

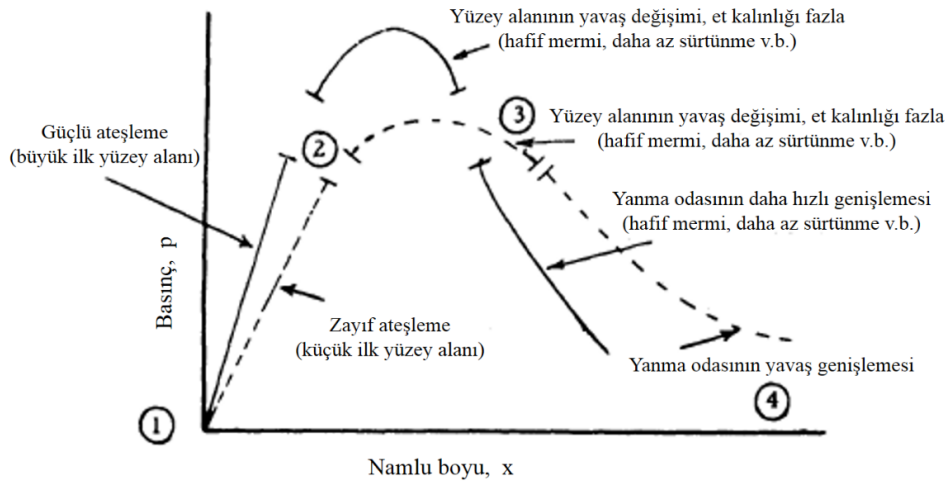
İdeal olarak bir dumansız barutun oluşturduğu basınç zaman eğrisi, hızla maksimum basınca yükselmeli, barutun tamamı yanıncaya kadar bu basınç değerinde kalmalı, bundan sonrada barut gazlarının adyabatik genişlemesi ile sıfıra inmeli. Tüm silah sistemlerinde silah performansını belirleyen hem sabit hem de değişken faktörler bulunmaktadır. Sabit faktörler silahın kendisine ait faktörlerdir. (Örnek olarak namlu

uzunluğu, namlu çapı, yanma odası konfigürasyonu ve hacmi v.b.) Değişken faktörler genellikle patlayıcı (barut), mermi ağırlığı ve mermi ile ilişkili diğer faktörlerdir. Bununla birlikte sabit ve değişken faktörlerin birleşimi ile oluşan faktörler de bulunmaktadır. Örnek olarak paketlenmiş barut ile mermi faktörleri birlikte yanma odası konfigürasyonu belirlemektedir. Paketlenmiş barut ile mermi, silahın boyut ve sabit özellikleri ile sınırlandırılmaktadır. Merminin kendisi özgül dış çapı belirlediği gibi, merminin ağırlığındaki değişim, uzunluğun ve kütle değişkenine bağımlı olarak değerlendirilmelidir. Hafif bir merminin yüksek ilk hızla namluyu terk edeceği hususu aşıkardır. Bununla birlikte, özel mermi boyutu seçimi ile mermi arkasında kalan barutun hacmi sınırlandırılmış olmaktadır.

Herhangi bir silah patlayıcı çalışma sistemi, silahın arıza yapmaması ve deforme olmaması için seçilen maksimum çalışma basıncıyla sınırlandırılmaktadır. Doğru barut seçimi, izin verilen maksimum basıncı aşmayacak şekilde istenilen ilk hız (merminin namludan çıkış hızı) elde etmek üzere yapılmaktadır.

### 1.5. Barutun iç balistik olaylarına etkisi

Barutun iç balistiğe etkileri Şekil 1.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Barutun basınca etkisi [2]



Şekil 1.5. barutun iç balistik prosesine etkisini basınç-namlu boyu grafiğinde şematik gösterimini içermektedir. Burada iki farklı basınç-namlu boyu eğrisi yer almaktadır. Birincisi kesikli çizgilerle ifade edilen eğri, diğeri ise düz çizgi ile ifade edilen eğridir. Her iki eğriyi {1 – 2}, {2 – 3} ve {3 – 4} olmak üzere üç bölümde ele alalım.

{1 – 2} arasında kalan bölgeden kesikli çizginin namlu boyu ile basınç arasındaki ilişkisi incelendiğinde mermi namlu içerisinde hareket ederken basıncın artışının düz çizgi eğriye nazaran daha düşük kaldığı görülmektedir. Burada yanma hızının daha düşük olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Kesikli çizgilerle gösterilen eğrideki durumda yanma hızı yavaştır. Düz çizgilerle gösterilen eğride ise yanma hızı yüksektir.

{2 – 3} arasında kalan bölgede kesikli çizgi ile ifade edilen basınç değişiminde pik noktasına daha uzun sürede varıldığı ve en yüksek basıncın olduğu bölgede daha uzun süre kalındığı basıncın hemen düşmediği görülmektedir. Bu durumda yanma hızının daha yavaş olduğu sonucu çıkmaktadır. Ancak düz eğride basıncın süratle yükseldiği ve en yüksek noktadan sonra süratle düştüğü yani yanmanın hızlı olduğu görülmektedir.

{3 – 4} arasında kalan bölgede kesikli çizgi ile ifade edilen eğride, hacim artışı halde basıncın düşmediği yani yanmanın devam ettiği görülmektedir. Düz çizgi ile ifade edilen eğride ise basınç hızla düşmektedir. Bu durum yanmanın tamamlanmış olduğunu ve mermi ilerlerken neden olduğu hacim artışının basıncın ani düşüşüne neden olduğu görülmektedir.

Şekil 1.5. bir iç balistik prosesinin barut özelliklerinden çok fazla etkilendiğini ortaya koymaktadır. Barutun iç balistiğe etkisi doğal olarak yanma olayından kaynaklanmaktadır. Şimdi yanma olayına barutun etkilerini inceleyelim.

### 1.5.1. Lineer yanma hızı sabitleri

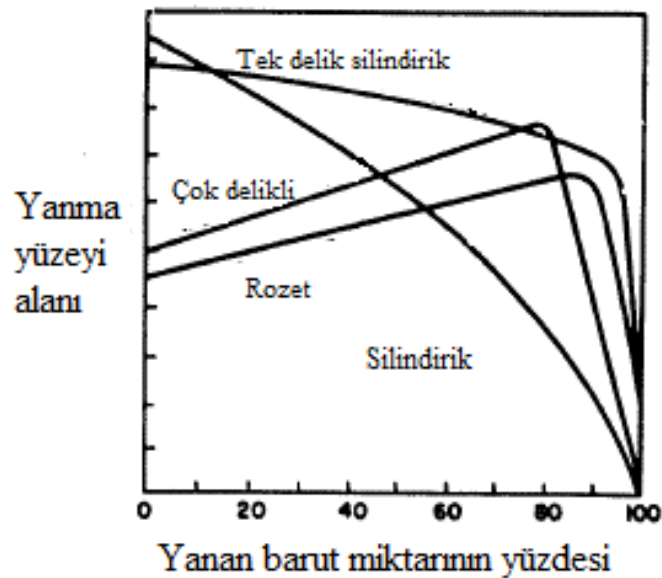
Lineer yanma hızı denklemi Denklem (1.3)'de sunulmaktadır.

$$\frac{ds}{dt} = \beta p^n \quad (1.3)$$

Bu denklemde  $\beta$  ve  $n$  yanma hızı sabitleridir. Barutun cinsine bağlı sabitlerdir. Bu sabitler sabit hacimde gerçekleştirilen aynı barutun farklı miktarlarda yakılması sırasında basınç ölçümünün yapılması ile deneysel olarak tespit edilmektedir. Farklı barut kompozisyonu kullanımı ile  $\beta$  ve  $n$  üzerinde değişiklikler yapılarak yanma hızının kontrolü yapılabilmektedir. Dördüncü bölümde bu denklem daha detaylı olarak incelenmektedir.

### 1.5.2. Tane geometrisi etkisi

Barutun tane geometrisi yanma hızını etkilemektedir. Şekil 1.1.'de yaygın olarak kullanılan barut tane geometrileri verilmektedir. Bu geometrilerin bazılarının yanmaya etkileri Şekil 1.6.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Farklı barut tane geometrilerinin yanma miktarına göre yüzey alanı[2]

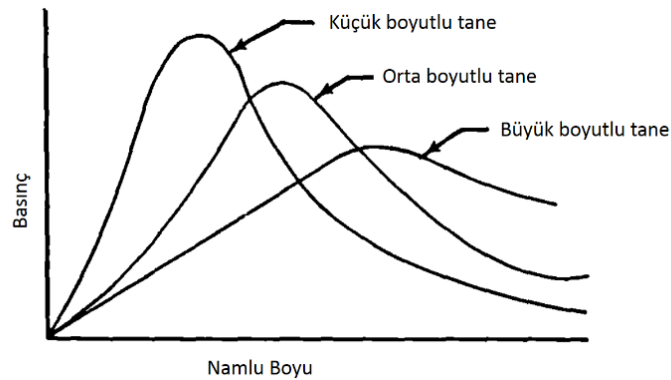
Şekil 1.6.'de silindirik, çok delikli, tek delikli, rozet barut tanelerinin yanan barutun miktarına göre yanma yüzeyi alanının değişimi görülmektedir.

Yanma yüzeyinin alanı rozet ve çok delikli silindirik tanelerinde yanma ilerledikçe artmaktadır. Silindirik ve tek delikli silindirik tanelerde ise yanma ilerledikçe yanma yüzeyi alanı azalmaktadır.

Yanma yüzeyi alanının yanma ilerledikçe artması, yanmanın proses boyunca hızlanarak ilerlemesine neden olmaktadır.

### 1.5.3. Tane büyüklüğü etkisi

Barutun tane büyüklüğü de yanma hızını etkileyen bir özelliktir. Tane büyüklüğünün basınç ve namlu boyu grafiğine etkileri Şekil 1.7.'de sunulmaktadır.



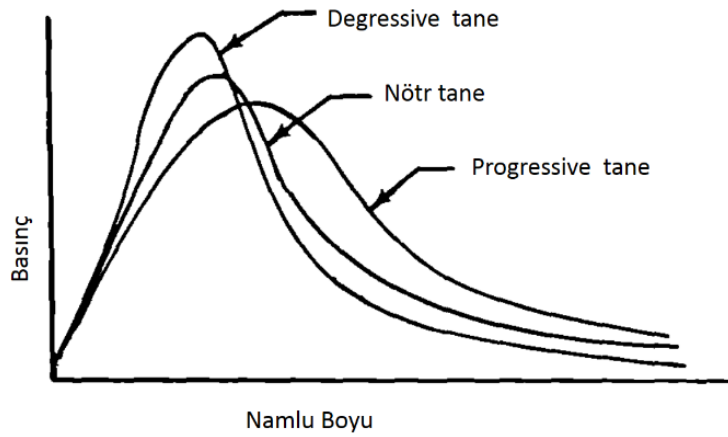
Şekil 1.7. Barut tane boyutunun etkisi [2]

Şekil 1.6. incelendiğinde küçük tane boyutlarına haiz barut tanelerinin daha hızlı ve dolayısıyla daha sürede yanmasına ve basınç artışının daha kısa sürede elde edilmesine neden olmaktadır. Barut tanesinin boyutunun büyümesi halinde ise yanma yavaş gerçekleşmekte ve basınç artışı daha uzun sürede gerçekleştirilmektedir.

Grafik incelenirken namlunun çıkışı noktaları incelendiğinde, büyük boyutlu taneli barutun kullanıldığı prosteşte çekirdek namluyu terk ettikten sonra dahi namlu içerisinde yüksek basınç kalmaktadır. Teorik olarak namlu içerisinde kalan bu basınç, namluyu terk eden merminin havada bir miktar daha hızlanmasına neden olsa

da kayıp bir enerjidir. Bu kayıp enerjinin mümkün olduğunca az olması, namlu içerisindeki basıncın çekirdeğin kinetik enerjisini artırması açısından önemlidir. Bu nedenle, çekirdek namluyu terk ettiğinde namlu içerisinde basıncın mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir.

Baruta ait özelliklerin iç balistik prosesine etkileri yukarıda aktarılmıştır. Barut tane özelliklerinin etkilerinin iç balistik olaylara yansımaları neticesinde baruta verilen tanımlama Şekil 1.8.'de sunulmuştur.



Şekil 1.8. Barut tanelerinin basınç- namlu boyu grafiğine etkisi [2]

Şekil 1.8. Barut tanesinin özelliklerine göre iç balistik prosesinde meydana gelen değişimin değerlendirme kriteridir. Kullanılan barutun özelliklerine göre basınç hızla yükselirse barut tanesi açısından azalan oranlı (degressive) taneli, basınç daha yavaş bir şekilde yükselirse bu durumda barut tanesi ilerici (progressive) taneli olmaktadır. Bu iki tane davranışının arasında kalan barut taneleri ise nötr olarak adlandırılmaktadır [2], [4].

Yapılan inceleme neticesinde barut tanesinin özelliklerinin etkileri sonuç bölümünde ayrıntıları ile incelenecektir.

## BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde taneli katı barutun kullanıldığı iç balistik çalışmaları incelenmiştir. İncelenen çalışmaların seçiminde öncelikle son dönemde yapılan çalışmaların yer almasına özen gösterilmiştir. Ancak, tüm çalışmalara ışık tutan ve temel niteliğinde daha eski tarihli olan çalışmalardan da söz edilmiştir. Aşağıda sunulan çalışmalarda prensip olarak seçilen yöntem ve elde edilen sonuçlar genel hatları ile ele alınmıştır.

Baer ve Frankle tarafından yapılan çalışmada iç balistik performansının belirlenmesine yönelik olarak kullanılan denklemler yüksek hızlı dijital bilgisayarlarda programlanmıştır. Farklı taneli ve farklı kimyasal kompozisyondaki çok çeşitli barutlar için denklemler geliştirilmiştir. Yapılan çalışma ile silah atışlarından elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve geliştirilen metodun doğrulandığı ortaya konulmuştur [5].

IBHVG2 (Interior Ballistics of High Velocity Guns 2), yüksek hızlı silahların iç balistik programıdır. Bu kod, Baer-Frankle iç balistik kodunun güncellenmiş bir versiyonudur. IBHVG2 gaz basıncını, merminin yer değiştirmesi ile hızını zamana bağlı olarak verilmesi dâhil, iç balistik yörüngesini hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. IBHVG2 Fortran programlama dilinde hazırlanmıştır [6].

A. Bougamra ve H. Lu tarafından yapılan çalışmada, küçük kalibreli (çaplı) silahlar için katı barutun yanmasına ilişkin nümerik model geliştirildiği belirtilmektedir. Yeniden düzenlenmiş parametreler kullanılarak elde edilen denklemlerin lineer olmayan aksisimetrik kısmi diferansiyel denklem formunda olduğu ifade edilmektedir. Çalışmada bu denklemlerin CFD kodu olan Fluent'e aktarıldığı belirtilmektedir. Yapılan nümerik analiz sonucunda hareket eden bir mermi ile yanma sonucu oluşan gazların arasındaki ilişkinin çözümlenebildiği gösterilmiştir.

Yapılan çözüm sonucunda oluşan eğri ile 5,56 mm'lik silahın performansının yeterli şekilde tahmin edilebildiği ifade edilmiştir [7].

Ercan Değirmenci tarafından yapılan araştırmada; çift bazlı katı küresel barut kullanılarak 300-425, 425-500, 500-600, 600-710 ve 710-850  $\mu\text{m}$  aralıklarındaki çap ile -60, -40, -20, 0, 20, 40 ve 60  $^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda tane boyutu ile sıcaklığın yanma hızı, namlu içi basıncı ve mermi hızına etkisini incelemiştir. Yanmanın yakıt ısısı, yoğunluğu, yanma sıcaklığı, partikül boyutu ve kütlesi gibi katı yakıtın özellikleri ölçülmüştür. Sabit hacminde (kapalı yanma odası) yanma hızı farklı basınç ve sıcaklıklarda yakıt numuneleri için ölçüm yapıldığı ifade edilmektedir. Buna ilave olarak 7,62 mm test namlusu kullanılarak atışlar gerçekleştirildiği, bu atışlarda namlu boyunca gerilim ölçülmüş ve merminin çıkış hızı Doppler radarı ile ölçüldüğü ifade edilmiştir. Bu çalışmada yakıt sıcaklığının artmasının, partikül boyutlarının küçültülmesinin yanma hızını, namlu içi basıncını ve mermi hızını artırdığı ortaya konulmaktadır [8].

C. Woodley ve ark. tarafından yapılan çalışmada 40 mm silahın ateşlenmesine yönelik yazılan kod kullanılarak barutun ısıtılması ve ateşleme alt modellerine ilişkin yapılan tahmin ile ölçülen sonuçlar kıyaslanmıştır [9].

J.-S. Jang ve ark. tarafından yapılan çalışmada Euler ve Lagrange yaklaşımı kullanılarak iç balistik nümerik kodu hazırlandığı ve bu kod kullanılarak silah namlusu içindeki iç akış ve sıkıştırılabilirlik etkisinin hesaplandığı belirtilmektedir. Mermi hareketi ile hareketli sınırı ifade eden sanal hücre ekstrapolasyonun kullanıldığı belirtilmektedir. Barutun yanmasını da içeren kod, 40 mm silah atış sonuçları ile kıyaslandığı ifade edilmektedir. Nümerik analiz sonuçları ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğunun tespit edildiği ve kodun güvenilirliğinin doğrulandığı belirtilmektedir. Porozite ve barut boyutuna göre, yüksek hızlı silahlar için iç balistik kodu kullanılarak kıyaslamalar yapıldığı ifade edilmektedir. Yanma analizi ile barut tanesinin hareketinin silah ateşleme mekanizmasının anlaşılmasına katkı sağladığı gösterilmiştir [10].

S. Jaramaz ve ark. tarafından yapılan çalışmada; katı taneli barutun iki fazlı akışının teorik ve nümerik modeli ile iç balistik prosesinde silah namlusu içerisinde yanma ürünleri ortaya konulmuştur. Çalışmada barutun ateşlenmesi ile fünyesinin ateşlenmesi olmak üzere iki durum incelenmiştir. Teorik model oluşturulurken iki faz için kütle, momentum ve enerjinin korunumu ele alınmıştır. Şarttan bağımsız olarak kararlı, yakınsak nümerik prosedür teorik modeldeki denklemleri çözmek için kullanılmıştır. Bu çalışma ile verilen mühimmat için tüm iç balistik hesaplamalarını gerçekleştiren TWOPIB kodu geliştirildiği ortaya konulmuştur [11].

Ma ve ark. tarafından yapılan çalışmada torbalanmış barut hakkı yerine geliştirilen ve bir çok avantajı bulunan modüler barut kullanılarak yapılan iç balistik çalışmalarında, aynı anda gerçekleşmeyen ateşlemenin basınç dalgalarını artırdığı ve silahların ateşleme güvenliğinde sorunlara neden olduğu iddia edilmiştir. Barut hakkının yapısının karmaşık olması modüler barut kullanılan iç balistik prosesinin simüle edilmesini zorlaştırdığı öne sürülmüştür. Çalışmalarında modüler barutların iç balistiğini daha doğru simüle etmek üzere kod geliştirilmiştir. Modüler barutun kullanıldığı tek boyutlu iki fazlı akışın modeli geliştirilmiştir. Yapılan çalışmanın farkının barut haklarının arasındaki süreksizliğin hesaba katılması, kovan duvarının alevin ilerlemesine engel olmasının dikkate alınması, modüler barut kovanının hareketinin hesaba katılması v.b. hususlar olduğunu ifade edilmiştir. Yapılan çalışmada tam dolu ve üç farklı barut hakkı bulunan kovan ile farklı barut pozisyonları modele göre incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre modelin güvenilir olduğu, kovan mekanik özellikleri, barutun konumu, barut noktalarının modüler barut kullanılan durumlarda iç balistik performansına etkilerinin tespiti için kullanılabileceği ortaya konulmuştur [12].

Miura ve ark. tarafından yapılan çalışmada; taneli veya uzun yarıklı tüp şeklinde barutların kullanıldığı, aksisimetrik iki boyutlu iç balistik katı/gaz iki fazlı akışkan dinamiği kodu Euler-Lagrange yaklaşımı ile geliştirildiği ifade edilmektedir. Kodun doğrulması boru şeklinde barutun kullanıldığı deneysel test sonuçları ile kıyaslayarak gerçekleştirilmiştir. Barutun tane büyüklüğü ve şekli nümerik olarak araştırılmıştır. Barut tane boyut ve şekli barutun yandığı yanma odasındaki enerji oluşumunun

hızını, merminin namlu ağzındaki kinetik enerjisini ve yanma odası basınç dalgalanmasını etkilediği gösterilmiştir [13].

Jang ve ark. tarafından yapılan çalışmada; katı barutun pozisyonunun iç balistik performansına etkisi IBcode (Interior Ballistic Code) kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmada barutun konumuna ilişkin üç varyasyon incelenmiştir. Birincisinde barutun kamaya çok yakın olduğu durumu incelenmiş ve negatif diferansiyel basıncı, mermi tabanındaki basınç ile yanma odası basıncı arasındaki farkının barutun yanma odasının tam ortasına yerleştirildiği varyasyondan daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur. Barutun yanma odasının tam ortasına konulmasının performansı artırdığı tespit edilmiştir [14].

Mahmoud Rashad ve ark. tarafından yapılan çalışma klasik topçu silahları ile atılan merminin iç balistik performansına yöneliktir. İki fazlı akışkan dinamiği metodu kullanılarak tek delikli yüksek yoğunluklu silindirik baruta yönelik matematik model geliştirilmiştir. Model kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerinin her iki faz için çözülmesi ile oluşturulmuştur. Simülasyon büyük çaplı deniz silah atışlarına uygulanmıştır. Modelin onaylanması için taneli barut kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin verileri ile modelden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Farklı silindirik barut tane geometrileri araştırılmıştır. Tane boyutları maksimum yanma odası basıncını ve merminin namlu çıkış hızını etkilediği sonucuna varılmıştır. Minimum basınç dalgası elde etmeye yönelik olarak silindirik barut tane boyutunun belirlenebileceği sonucuna varılmıştır. Simülasyon sonuçları çerçevesinde merminin fırlatılması için uygun silindirik barut tane dizaynına yönelik rehber sunulmuştur [15].

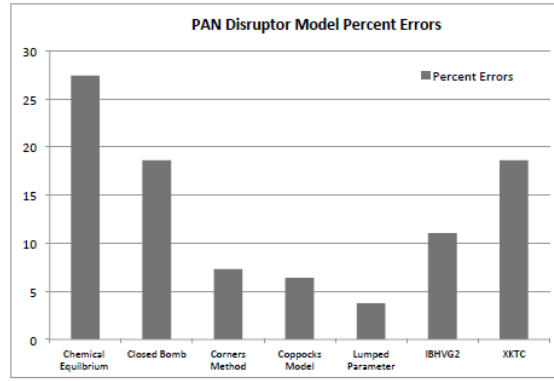
Jaramaz ve ark. tarafından yapılan çalışmada otomatik bombaatar için yüksek/düşük basınç yanma odalarının iç balistik prensiplerinin uygulanması üzerine çalışma yapılmıştır. Belirli bir otomatik bombaatarın optimizasyonu için teorik ve deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Teorik çalışma barut gazları ile yanmamış barut parçacıklarının yüksek basınçlı yanma odasından düşük basınçlı yanma odasına ve ayrıca yanma odasından bombaatar namlusuna kadar barutun yanması incelenmiştir.



Deneysel araştırmada; barut tipi, yanma odası hacimlerin ilişkileri, sayısı, boyutları, yanma odalarını birbirinden ayıran duvardaki deliklerin yerlerinin ve deliklerinin çapraz yerleşiminin etkileri incelenmiştir. Teorik alışma sonucu hazırlanan kodun tüm bu etkileri doğru bir Şekilde simüle ettiği ortaya konulmuştur [16].

Krcmar ve ark. tarafından silahtan atılan mikro hava aracı (GLMAV) konsepti incelenmiştir. Mikro hava aracı (MAV) mermi içerisine yerleştirilerek silahtan atılmaktadır. Mermi en yüksek noktaya geldiğinde hava aracının serbest kalmaktadır. 80 mm çaplı hafif mermi 57-100 m/s gibi düşük hızla fırlatılmaktadır. Bu çalışmada silahtan atılan mikro hava aracı (GLMAV) fırlatıcısının i balistiği sıfır boyutlu STANAG 4367 standardına göre hazırlanan modelin çözümü iki yanma odalı sistem kullanılarak yapılmaktadır. Düşük ve yüksek basınç yanma odaları için hesaplanan basınç değerleri ölçülen değerlerle kıyaslanmıştır. Yapılan alışma neticesinde teorik hesaplama sonuçları ile deneysel sonuçların %10'nun üzerinde farklı olduğu grlmştir [17].

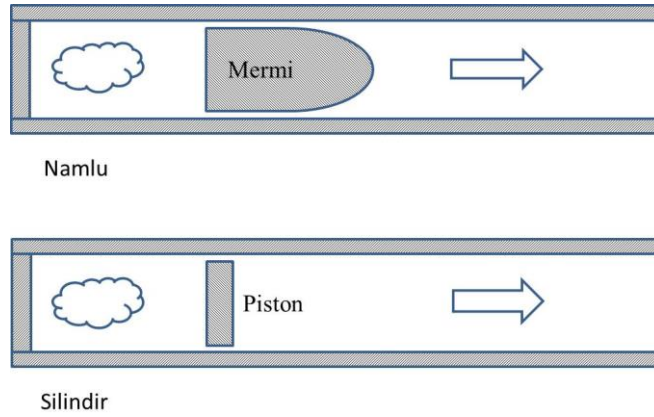
Miner tarafından yaygın olarak kullanılan iç balistik kodlarının kıyaslaması yapılmıştır. Miner, alışmasında Chemical Equilibrium, Closed Bomb, Corners Method, Coppocks Model, Lumped Parameter, IBHVG2 ve XKTC kodlarının tanıtımını yapmış ve aralarındaki farkları ortaya koymuştur. apı 0,50 kalibre (12,7 mm) olan silah ile gerçekleştirdiği deneylerin sonuçları ile kodların nümerik zmden elde edilen sonuçları kıyaslamıştır [18]. Tespit ettiği hata yüzdeleri Şekil 2.1.de gösterilmektedir. Buna göre Lumped Parameter kodu ile yapılan üzümlerde deneysel sonuçlara göre %4 seviyelerinde kalan hata bulunduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 2.1. İç Balistik Kodlarındaki Hata Yüzdesi [18]

### BÖLÜM 3. İÇ BALİSTİK PROSESİ

Silah içerisinde barutun yanması sayesinde kimyasal enerji, ısı enerjisine ve kinetik enerjiye dönüşmektedir. Burada ihtiyaç duyulan kinetik enerji merminin hareketidir. Bu kapsamda en basit şekli ile ateşleme prosesi, tek tarafı kapalı bir boru içerisinde barutun yanması ile basıncın yükselmesi, merminin boru boyunca hareket etmesidir. Konu, termodinamik kitaplarında yaygın olarak çözümünü yaptığımız piston silindir sistemlerine benzemektedir.



Şekil 3.1. Silah mermi ilişkisi ile silindir piston arasındaki benzerlik.

Termodinamik bilimi, sistemlerin denge halindeki durumlarını tespit etmeye çalışmaktadır. Sistem, yerçekimi dışında kalan bütün dış etkilerden izole edildiğinde sistem özellikleri zamanla değişmiyorsa denge halindedir. Sistem denge halinde değilse dış etkilerden izole edilmez basınç farkları, konsantrasyon farklarını gidermek üzere bir değişme gözlenir [19].

Esas itibarıyla, iç balistik olaylarında yanmanın başlaması ile basınç hızlı bir şekilde artmakta, basıncı denge durumuna getirmek üzere merminin hareketi ile hacim artmaktadır. Ancak iç balistikte çok yüksek basınçlar söz konusudur. Ayrıca amaç,

merminin mümkün olan en yüksek hızda mermiyi terk etmesini sağlamaktır. Bu nedenle iç balistikte denge durumuna gelinmesinden söz etmek mümkün değildir.

### 3.1. İdeal Gaz Yaklaşımı

İç balistik olaylarının incelenebilmesi için, silah içerisinde barutun yanması ile oluşan basınç artışının hacimde meydana getirdiği artımın belirlenmesi gerekmektedir. Aralarındaki ilişkiyi belirlemek üzere bir denkleme ihtiyaç duyulmaktadır.

Bir maddenin basıncı, sıcaklığı ve özgül hacmi arasındaki ilişkiyi veren herhangi bir bağıntıya hal denklemi denilmektedir [20]. Bu durumda iç balistik olayları için hal denkleminin yazılması gerekmektedir.

Eğer barutun yanması sonucu oluşan gazların ideal gaz olduğu kabul edilirse hal denklemi kolaylıkla yazılır. İdeal gaz tanımı ise; gazın mutlak basıncının sifıra doğru yaklaştırılması halinde gaz molekülleri arasındaki uzaklık molekül çapına oranla çok büyük değerler almakta ve moleküller arasında karşılıklı çekim kuvveti ortadan kalmaktadır. Bu koşulu gerçekleştiren gazlara ideal gaz denilmektedir [19].

İdeal gaz hal denklemini oluşturan kanun ve prensipler Tablo 3.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. İdeal gaz hal denklemini oluşturan prensipler

Nu.	Kanun Adı	Açıklama
1	Charles'ın kanunu	Bir gazın hacmi, sıcaklığı ile orantılıdır
2	Avogadro'nun prensibi	Bir gazın hacmi, gazın mol sayısı ile orantılıdır.
3	Boyle'un kanunu	Bir gazın basıncı hacim ile ters orantılı değişir.

Bu üç ilişkilendirmeyi bir araya getirdiğimizde ideal gaz kanununa ulaşmaktayız. İdeal gaz hal denklemi Denklem (3.1)'de görüldüğü gibidir.

$$pv = mRT \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $p$  basıncı,  $v$  kütleli özgül hacmi,  $m$  gazın kütesini,  $R$  üniversal gaz sabiti ve  $T$  mutlak sıcaklığı temsil etmektedir.

İdeal gaz yaklaşımında gaz molekülleri arasındaki mesafe çok büyük olduğu bu nedenle moleküller arasında çarpışma olmadığı ile gazın sıcaklığının gazların iç enerjisini etkilemediği varsayılmaktadır.

### 3.2. Gerçek Gaz Yaklaşımı ve Nobel-Abel Hal Denklemi

İç balistik olaylarında barutun yanması sonucu oluşan yüksek basınç ve sıcaklık dikkate alındığında gazların arasındaki mesafe küçük kalmaktadır. Bu nedenle gazlar molekülleri arasındaki etkileşimi ihmal etmek iç balistik olaylarının doğru bir çözümünü vermeyecektir.

Bu nedenle gerçek gazlar için Van der Walls hal denklemini dikkate alalım.

$$\left[ p + \frac{a}{v^2} \right] (v - \eta) = RT \quad (3.2)$$

Bu denklemde ideal gaz hal denkleminde farklı olarak yer alan;  $a/v^2$  moleküller arasındaki çekim kuvvetini,  $\eta$  ise gaz moleküllerinin kapladığı hacmi ifade etmektedir [19], [20].

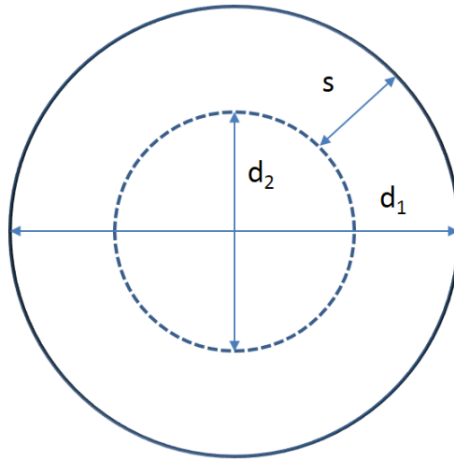
Van der Walls modeli, ideal gaz davranışı ile sıkıştırılmaz akış arasında köprü oluşturmaktadır [21]. İç balistik olaylarının incelenmesinde genellikle Noble-Abel Hal denklemi kullanılmaktadır [1]–[4], [22], [23].

$$p(v - m_g \eta) = m_g RT \quad (3.3)$$

Bu denklemde  $p$  basıncı,  $v$  hacmi,  $m_g$  gazların kütlesi ve  $\eta$  gaz molekülerinin kapladığı hacmi ifade etmektedir. Nobel Abel hal denklemi Van der Walls hal denkleminin gaz molekülleri arasındaki çekim kuvveti ihmal edilmiş halidir.

### 3.3. Yanma Hızı

Katı barut tanesinin tüm barut yüzeyinde eş zamanlı olarak yanmaya başladığı kabul edilirse Şekil 3.2.deki gösterildiği gibi erozyon meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Silindirik çubuk barut tanesinde yanma

Katı barutun kullanıldığı sistemlerde yanma olaylarının izahında, Vieille veya Saint Robert olarak adlandırılan yanma hızı denklemi yaygın olarak kullanılan denklemdir [24], [25].

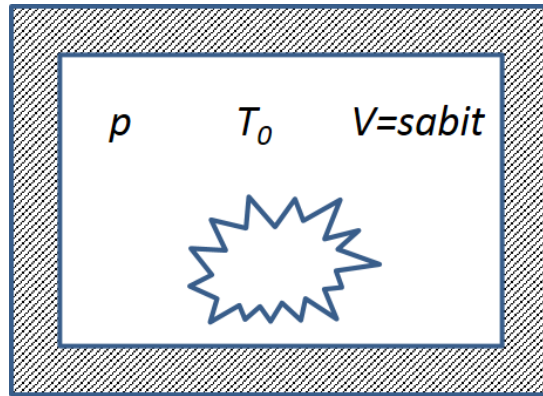
$$s = \beta p^n \quad (3.4)$$

Bu denklemde  $s$  lineer yanma hızını,  $\beta$  yanma hızı sabitini ve  $n$  yanma hızı basınç üssünü ifade etmektedir.  $\beta$  ve  $n$  kullanılan barutun cinsine bağlı sabitlerdir. Bu denklem iç balistik ile ilgili literatürde en yaygın kullanılan denklemdir. Bu denklemin zamana bağlı ifade edilmesi durumunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{ds}{dt} = \beta p^n \quad (3.5)$$

### 3.4. Barutun Enerjisi

Yanma odasındaki barutun yanması ile enerji açığa çıkmaktadır. Şekil 3.3.'de sabit hacimde yanma olayı dikkate alınmıştır.



Şekil 3.3. Sabit hacimde yanma olayının şematik gösterimi.

Birim ağırlıktaki barutun yanması sonucu oluşan gazların patlama sıcaklığının adyabatik alev sıcaklığı ( $T_0$ ) olarak ifade edilmesi durumunda elde edilen enerjiye barutun gücü (force) denilmektedir. Aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\lambda = RT_0 \quad (3.6)$$

Sabit hacimde belirli miktarlarda barutun yakılması sonucu oluşan maksimum basıncın ölçülmesi sonucu tespit edilen değerler Nobel-Abel hal denklemi

kullanılarak çözüldüğünde gaz moleküllerinin kapladığı hacmi ifade eden  $\eta$  (covolume) değeri tespit edilebilmektedir.

Gaz moleküllerinin kapladığı hacim  $\eta$  (covolume) ve ölçülen maksimum basınç kullanılarak barutun gücü  $\lambda$  hesaplanır.

$$\lambda = \left( \frac{P_{max}}{m_b} \right) (V_c - m_b \eta) \quad (3.7)$$

Bu denklemde;  $\lambda$  barutun gücünü,  $P_{max}$  maksimum basıncını,  $m_b$  barutun kütlesini ve  $V_c$  yanma odasının hacmini ifade etmektedir. Bu denklemlerde gerekli sadeleştirmeler yapılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\lambda = P_{max} \left( \frac{V_c}{m_b} - \eta \right) \quad (3.8)$$

veya

$$\lambda = P_{max} \left( \frac{1}{\rho_b} - \eta \right) \quad (3.9)$$

Bu denklemde  $\rho_b$  barutun yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu noktada yanma odasında yer alan tüm barutun tamamının yandığı kabulü yapılırsa  $m_g = m_b$  olur.

$$\lambda = P_{max} \left( \frac{1}{\rho_g} - \eta \right) \quad (3.10)$$

Şimdi gaz yoğunluğunun  $\rho_g$  belirlenmesi gerekmektedir. Barutun yanması sonucu  $T_0$  sıcaklığında gazlar oluşmaktadır. Bu gazların oluşturduğu iç enerji merminin



hareketi, silahın geri tepmesi, barut gazlarının hareketi ile silahın ısınmasında kullanılmaktadır. Gazların iç enerji değişimi aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$du = C_v dT \quad (3.11)$$

Bu denklemde  $du$  iç enerji değişimini,  $C_v$  sabit hacimde barut gazlarının özgül ısılarını ifade etmektedir. Bu denklemi ayrıca aşağıdaki denklemle ifade etmek mümkündür.

$$du = C_v(T_0 - T) \quad (3.12)$$

Aynı şekilde entalpi için denklemi yazılırsa aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$dh = C_p(T_0 - T) \quad (3.13)$$

Belirli bir durum için entalpi ve iç enerji aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir. İç enerji

$$u = C_v T \quad (3.14)$$

ve entalpi;

$$h = C_p T \quad (3.15)$$

yazılabilir.  $C_p$  ile  $C_v$  sabit basınç ve sabit hacimdeki özgül ısıları temsil etmektedir. Bu durumda özgül ısılar oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.16)$$

Bu durumda  $C_p$  ile  $C_v$  özgül hacimlerin farkı universal gaz sabiti vermektedir.

$$C_p - C_v = R \quad (3.17)$$

Bu iki denklemin birlikte çözümü neticesinde;

$$\gamma C_v - C_v = R \quad (3.18)$$

veya

$$C_v(\gamma - 1) = R \quad (3.19)$$

denklemini elde edilir.

$$C_v = \frac{R}{(\gamma - 1)} \quad (3.20)$$

Bu denkleminde R yerine;

$$\lambda = RT_0 \quad (3.21)$$

yazılırsa;

$$(\gamma - 1) = \frac{\lambda/T_0}{C_v} \quad (3.22)$$

veya

$$C_v T_0 = \frac{\lambda}{(\gamma - 1)} \quad (3.23)$$

elde edilir. Bu denklemde  $C_v T_0$  ifadesine barutun özgül enerjisi veya barutun kimyasal potansiyel enerjisi denilmektedir [4].

### 3.5. Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin Birinci Yasası diğer bir ismi ile enerjinin korunumu ilkesi olarak da adlandırılmaktadır. Buna göre enerji yoktan var, vardan yok edilemez ve sadece çeşit değiştirebileceği ilkesine dayanmaktadır. İç balistik olaylarında barutun yanması sonucu barutun kimyasal potansiyel enerjisi ortaya çıkmaktadır. Buna toplam enerji denilebilir. Bu enerji merminin, gazların ve silahın hareketi ile kinetik enerjiye, silah ve gazların ısıtılması ile ısı enerjisine dönüşmektedir.

$$E_T = E_k + E_h + E_b \quad (3.24)$$

Namlu içerisindeki barutun patlaması ile açığa çıkan enerjinin, namlu içerisindeki işlerin yapılmasına (merminin hareketi, namlunun ısınması, silah geri tepmesi ve itici gazların hareketi v.b.) ve itici gazların iç enerjilerindeki değişime yol açmaktadır.

#### 3.5.1. Patlama sonucu oluşan enerji

Patlama sonucu oluşan enerji denklemde belirtilmektedir.

$$E_T = m_b z C_v (T_0 - T) \quad (3.25)$$

Bu denklemde  $m_b$  barutun kütlesini,  $z$  barut biçim fonksiyonunu,  $C_v$  sabit hacimde barut gazlarının özgül ısısını,  $T_0$  adyabatik alev sıcaklığını ve  $T$  ise barutun sıcaklığını temsil etmektedir. Bu denklemde gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$E_T = m_b z C_v T_0 \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \quad (3.26)$$

halini alır. Bu denklemde  $C_v T_0 = \lambda / (\gamma - 1)$  yerine konulursa;

$$E_T = m_b z(t) \frac{\lambda}{(\gamma - 1)} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \quad (3.27)$$

Bu denklemde  $E_T$  patlama sonucu oluşan enerjii,  $m_b$  barutun kütlesini,  $\lambda$  barutun gücünü ve  $\gamma$  özgül ısılar oranını ifade etmektedir.

### 3.5.2. Merminin hareketine harcanan enerji

Merminin hareketine harcanan enerji, merminin kinetik enerjisidir.

$$E_k = \frac{1}{2} m_m V_m^2 \quad (3.28)$$

### 3.5.3. Namlunun ısınmasına harcanan enerji

Patlama sonucu oluşan enerjinin ısı kaybına harcanan kısmının kinetik enerji cinsinden oranı olarak ifade edilebilir [2].

$$E_h = \frac{1}{2} \theta m_e V_m^2 \quad (3.29)$$

Bu denklemde;  $m_e$  efektif mermi kütlesini ve  $\theta$  ısı transferi düzeltme faktörünü temsil etmektedir. Eğer  $\theta = 0$  ise ısı transferi bulunmamaktadır. Orta kalibre silahlarda  $\theta$  genellikle 0.17 kabul edilmektedir. Bu düzeltme faktörü küçük kalibreli silahlarda yüksek, büyük kalibreli silahlarda düşük olduğu kabul edilmektedir [4].

### 3.5.4. Barut gazları hareketine harcanan enerji

İç balistik olaylarda patlama sonucu yanmamış barut parçacıkları ile barut gazlarının hareketine de enerji harcanmaktadır.

$$E_b = \frac{1}{2} \left( \frac{m_b z V_m^2}{3} \right) \quad (3.30)$$

### 3.6. Etkili Kütle

Termodinamiğin birinci yasası çerçevesinde iç balistik prosesinde enerji dengesine ilişkin denklemler elde edilmiştir. Tüm bunları, enerji denkleminizde yerine koyarsak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{m_b z(t) \lambda}{(\gamma - 1)} \left( 1 - \frac{T}{T_0} \right) = \frac{1}{2} m_m V_m^2 + \frac{1}{2} \theta m_e V_m^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{m_b z V_m^2}{3} \right) \quad (3.31)$$

Bu denklemde gerekli düzenleme yapılırsa denklem,

$$\frac{m_b z(t) \lambda}{(\gamma - 1)} \left( 1 - \frac{T}{T_0} \right) = \frac{1}{2} m_m V_m^2 + \frac{1}{2} \theta m_e V_m^2 + \frac{1}{6} m_b z V_m^2 \quad (3.32)$$

veya

$$\frac{m_b z(t) \lambda}{(\gamma - 1)} \left( 1 - \frac{T}{T_0} \right) = \frac{1}{2} V_m^2 \left[ m_m + \frac{m_b z}{3} \right] + \frac{1}{2} \theta m_e V_m^2 \quad (3.33)$$

elde edilir. Denklemden yer alan kütle ile ilgili terimlerin yerine tamamını temsil edecek bir kütle ifade belirlenmesi hem denklemleri daha kolay yazılmasını hem de konunun daha iyi anlaşılması yardımcı olmaktadır. Etkili kütle tanımı ile ilgili denklem aşağıda sunulmuştur.

$$m_e = m_m + \frac{m_b z}{3} \quad (3.34)$$

Etkili kütle yaklaşımı eşitlikte yerine yazılırsa;

$$\frac{m_b z(t) \lambda}{(\gamma - 1)} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) = \frac{1}{2} V_m^2 m_e + \frac{1}{2} \theta m_e V_m^2 \quad (3.35)$$

veya

$$\frac{m_b z(t) \lambda}{(\gamma - 1)} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) = (1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e \quad (3.36)$$

halini alır. Bu denklemde gerekli düzenleme yapıldığında,

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{(\gamma - 1)(1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e}{m_b z(t) \lambda} \quad (3.37)$$

elde edilir. Bu ifadeyi Nobel Abel hal denklemini kullanıldığında;

$$p_a v(t) = m_b z(t) RT \quad (3.38)$$

Denklemden  $p_a$  namlu içerisinde mermi arkasında kalan hacimdeki ortalama basıncı,  $v(t)$  prosesin gerçekleştiği hacmi,  $m_b z(t)$  yanan barut miktarının zamana bağlı ifadesini,  $R$  üniversal gaz sabitini ve  $T$  ise prosesin gerçekleştiği sıcaklığı temsil etmektedir. Şimdi bu denklemin sağ tarafını  $T_0$  bölüp çarparsak;

$$p_a v(t) = m_b z(t) R T \frac{T_0}{T} \quad (3.39)$$

veya

$$p_a v(t) = m_b z(t) R T_0 \frac{T}{T_0} \quad (3.40)$$

ifadesini elde ederiz. Bu denklemde  $\lambda = R T_0$  ifadesini yerine yazarsak;

$$p_a v(t) = m_b z(t) \lambda \frac{T}{T_0} \quad (3.41)$$

veya

$$\frac{T}{T_0} = \frac{p_a v(t)}{m_b z(t) \lambda} \quad (3.42)$$

elde edilir. Denklem (3.37) ile Denklem (3.42) birlikte çözüldüğünde;

$$\frac{p_a v(t)}{m_b z(t) \lambda} = 1 - \frac{(\gamma - 1)(1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e}{m_b z(t) \lambda} \quad (3.43)$$

gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$p_a v(t) = m_b z(t) \lambda - (\gamma - 1)(1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e \quad (3.44)$$

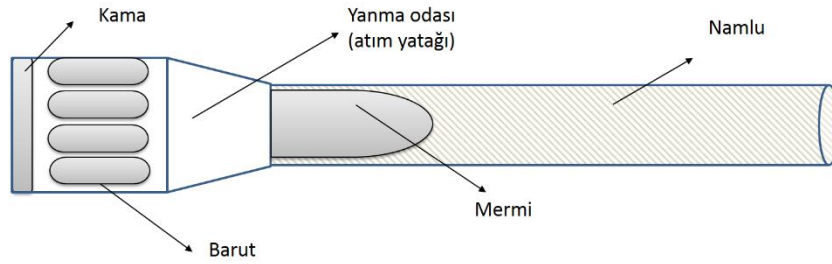
veya

$$p_a = \frac{m_b z(t) \lambda - (\gamma - 1)(1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e}{v(t)} \quad (3.45)$$

elde edilir. Bu denklem, namlu içerisindeki ortalama basıncı veren denklemdir.  $v(t)$  prosesin gerçekleştiği hacmi ifade etmektedir.

### 3.7. Prosesin Gerçekleştiği Hacim

Mermi hareket etmeden önce mermi yanma odasında (atım yatağı) bulunmaktadır. Ateşleme başlamadan önce atım yatağında sadece katı barut taneleri bulunmaktadır. Miktar, şekil ve yoğunluğuna göre bir hacim kaplamaktadır. Bu hacim ilgili şematik gösterim Şekil 3.4.'de sunulmaktadır.



Şekil 3.4. Mermi hareket etmeden önceki durum

Şekil 3.4.'de yanma odası hacmi  $v_c$ , barutun kütlesi  $m_b$  ve barutun yoğunluğu  $\rho_s$  ise yanma başlamadan önceki an için kullanılabilir hacim aşağıda belirtilmiştir.



$$v(t) = v_c - \frac{m_b}{\rho_s} \quad (3.46)$$

Yanma başladıktan sonra bir süre mermi harekete başlamamaktadır. Bunun nedeni sürtünme enerjisi ve varsa yerçekimi kuvveti gibi etkilerdir. Bu durumda barutun bir kısmı yanmakta ve gaz fazına geçmektedir. Barutun yanan kısmının tamamının gaza dönüştüğü kabul edilebilir.

$$v(t) = v_c - \left[ \frac{m_b}{\rho_s} - \frac{m_b z(t)}{\rho_s} \right] \quad (3.47)$$

Gazların moleküler olarak kapladıkları hacmin, Nobel Abel hal denkleminde dikkate alındığı daha önce belirtilmiştir. Barutun gaz fazına geçen kısmını tespit etmek üzere yanan barut miktarının tamamının gaza dönüştüğü kabulü yapılmıştır.

$$m_b = m_g \quad (3.48)$$

Gazların kapladığı hacim (covolume)  $\eta$  olarak gösterilmiştir. Bu husus denklemde yerine konulduğunda elde edilir.

$$v(t) = v_c - \left[ \frac{m_b}{\rho_s} - \frac{m_b z(t)}{\rho_s} \right] - m_b z(t) \eta \quad (3.49)$$

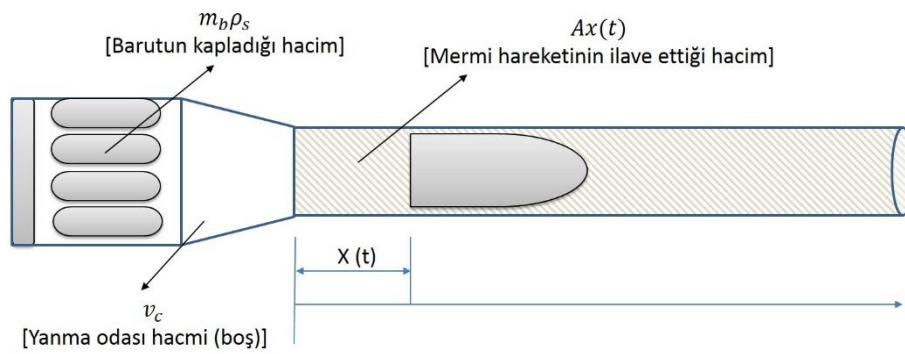
Bu denklemde gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

$$v(t) = v_c - \frac{m_b}{\rho_s} + \frac{m_b z(t)}{\rho_s} - m_b z(t) \eta \quad (3.50)$$

veya

$$v(t) = v_c - \frac{m_b}{\rho_s} + m_b z(t) \left[ \frac{1}{\rho_s} - \eta \right] \quad (3.51)$$

elde edilir. Merminin hareketinin hacme etkisinin şematik gösterimi Şekil 3.5.'de yer almaktadır.



Şekil 3.5. Merminin hareketinin hacim değişimine etkisi

Ateşleme yapıldıktan sonra bir süre geçmesini müteakip yanma odasındaki basınç sürtünme ve diğer kuvvetleri yenerek merminin hareketine yetecek seviyeye ulaşmaktadır. Bu durumdan sonra mermi ilerledikçe merminin arkasındaki hacmin artması söz konusu olmaktadır. Namlunun kesit alanı  $A$  ise ve mermi  $x(t)$  miktarda yol aldıysa toplam hacim aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$v(t) = v_c - \frac{m_b}{\rho_s} + m_b z(t) \left[ \frac{1}{\rho_s} - \eta \right] + Ax(t) \quad (3.52)$$

Böylelikle merminin hareketi de dahil olmak üzere proses hacmi elde edilmiştir. Bu ifade Denklem (3.45) yerine yazıldığında;

$$p_a = \frac{m_b z(t) \lambda - (\gamma - 1)(1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e}{v_c - \frac{m_b}{\rho_s} + m_b z(t) \left[ \frac{1}{\rho_s} - \eta \right] + Ax(t)} \quad (3.53)$$

elde edilir.

Bu bölümde iç balistik prosesinde temel denklemler elde edilmiştir. Müteakip bölümde bu denklemlerin matematik modelde nasıl kullanıldığı ve kod yazımı anlatılmaktadır.

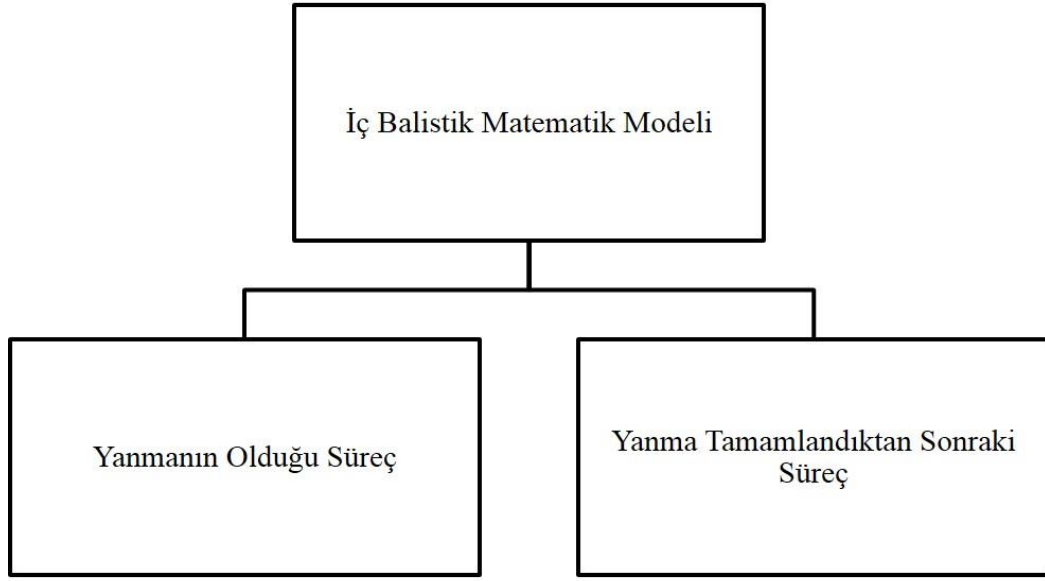
## **BÖLÜM 4. MATEMATİKSEL MODEL**

Bu bölümde, iç balistik temel denklemleri kullanılarak iç balistik olayların matematik modelinin oluşturulması, model oluşturulurken yapılan kabullerin aktarılması amaçlanmaktadır.

İç balistik olaylar genellikle yanma odasındaki barutun yanması sonucu basıncın yükseldiği ve merminin harekete başladığı bölüm ile barutun yanmasının tamamlandığı ve merminin namlu içerisindeki basınç nedeniyle hareketine devam ettiği bölüm olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır.

Barut miktarı, namlu uzunluğu ve barut geometrisine bağlı olarak mermi silahı terk ettikten sonra da barutun yanmaya devam edebileceği bir sistem tasarımı yapılabilmektedir. Ancak, böyle bir durumda yanmanın gecikmesi namlu içerisindeki basıncın düşük kalmasına dolayısıyla merminin namluyu düşük hızda terk etmesine neden olacaktır. Bu durumda amaçlanan yüksek namlu çıkış hızına ulaşılamayacaktır.

Matematik model kurulurken yukarıda bahsedilen amaç doğrultusunda iç balistik olaylar iki bölümde incelenmiştir. Bölümler Şekil 4.1.'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. İç balistik matematik modeli süreçler

#### 4.1. Modelin Oluşturulması

İç balistik olaylarının incelenmesinin en önemli nedeni namluyu terk eden merminin ilk hızının tahmin edilmesi isteğidir. Bu maksatla öncelikle bir barut tanesinin yanması ele alınmış ve tüm barutun yanmasına yansıtılmıştır. Barutun yanması sonucu oluşan basıncın zamana bağlı hesaplanması gerekmektedir. Basıncın zamana bağlı belirlenmesi durumunda mermi hızının namlu içerisindeki değişiminin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Merminin namlu içerisinde hareketini namluyu terk ettiği ana kadar incelemek ve bu andaki ilk hızını belirlemek gerekmektedir. Tüm bu hususların tespitine olanak sağlayan denklem sistemi iç balistik matematik modelini oluşturmaktadır.

Denklem sistemini oluşturmadan önce bilinmesine ihtiyaç duyulan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Tablo 4.1. Bilinen Parametreler

Parametre	Sembol
Merminin ağırlığı	$m_m$
Mermi taban alanı	$A$
Yanma odası hacmi	$v_0$
Namlunun boyu	$x_n$
Namlunun çapı	$D$
Barutun ağırlığı	$m_b$
Barut tanesi geometrisi	-
Barut tanesi boyu	$l$
Barut tanesi çapı	$d_b$
Barut tanesi iç çapı	$d_k$
Barutun yoğunluğu	$\rho_b$
Özgül ısılar oranı	$\gamma$
Barut güç sabiti	$\lambda$
Yanma hızı sabiti	$\beta$
Yanma hızı basınç üssü	$n$

Tablo 4.1.'de belirtilen parametrelere göre literatürde gerekli araştırmalar yapılmalıdır. Bu parametreler silah ve barut üreticilerinden temin edilebilmektedir. Matematik modelde elde edilmesi amaçlanan parametreler ise Tablo 4.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Hesaplanan Parametreler

Parametre	Sembol
Yanma hızı	$s$
Barut tanesi et kalınlığı	$web$
Biçim fonksiyonu	$z$
Ortalama basınç	$p_a$
Yanma odası basıncı	$p_{br}$
Mermi tabanındaki basınç	$p_b$
Merminin hızı	$v$
Merminin konumu	$x$

Tablo 4.2.'de belirtilen parametrelerin hesaplanmasında için model oluşturulurken iç balistik prosesi iki aşamada değerlendirilmelidir.

#### 4.1.1. Yanmanın olduğu süreç

Öncelikle yanma hızını hesaplamaya yönelik denklemlerin çözümünü ele alalım. Matematik modelde kullanılan yanma hızı denklemi aşağıda gösterilmektedir.

$$\frac{ds}{dt} = \beta p_A^n \quad (4.1)$$

Bu denklemde  $ds$  olarak birim zamanda barut tanesi üzerinde meydana gelen erzyon,  $dt$  zaman aralığını,  $\beta$  yanma hızı sabitini,  $p_A$  ortalama basıncı ve  $n$  yanma hızı basınç üssünü temsil etmektedir. Bu denklemin çözümünde sonlu farklar yaklaşımı kullanıldığında aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.,

$$\frac{ds}{dt} \cong \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s(t_{i+1}) - s(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (4.2)$$

Bu denklemi ana denklemde yerine koyarsak;

$$\frac{s(t_{i+1}) - s(t_i)}{t_{i+1} - t_i} = \beta p(t_i)^n \quad (4.3)$$

elde edilir. Gerekli işlemler yapıldığında aşağıda şekilde ifade edilebilir.

$$s(t_{i+1}) = s(t_i) + [\beta p(t_i)^n](t_{i+1} - t_i) \quad (4.4)$$

Bu denklemi genel olarak yazdığımızda;

$$s_{i+1} = s_i + \frac{ds_i}{dt} \Delta t \quad (4.5)$$

denklemi elde edilir. Bu çözüm matematik modelin temelini teşkil etmektedir.

Yanma hızı tespit edildiği durumda yanma hangi aşamaya kadar devam edeceğini belirlemeliyiz. Bunun için barut tanesinin et kalınlığını (*web*) belirlemek gerekmektedir. Bazı barut tane geometrileri için et kalınlıkları Tablo 4.3.'de verilmektedir.



Tablo 4.3. Bazı barut tane geometrilerinin et kalınlıkları

Barut Geometrisi	Tane çapı	Delik çapı	Et Kalınlığı (web)
Silindirik	$d_b$	–	$d_b$
Silindirik Tek Delikli	$d_b$	$d_k$	$\frac{1}{2}(d_b - d_k)$
Küresel	$d_b$	–	$d_b$
Silindirik (7 delikli)	$d_b$	$d_k$	$\frac{1}{4}(d_b - 3d_k)$

Yanma hızı denklemi ile barutun yanan miktarının belirlenmesi ile et kalınlığının hesaplanmasının ardından biçim fonksiyonunun ( $z$ ) bulunması gerekmektedir. Bunun için daha önce çıkarılan biçim fonksiyonu denklemi kullanılmaktadır.

$$z = \frac{v_t}{v_{top}} \quad (4.6)$$

Bu denklemde bulunan  $v_t$  ve  $v_{top}$  barut tanesinin  $t$  anındaki ve başlangıçtaki hacimlerini ifade edilmektedir. Bazı tane geometrilerinin hacimlerini hesaplamak üzere denklemler Tablo 4.4.'de sunulmuştur.

Tablo 4.4. Bazı barut tane geometrilerinin hacim denklemleri

Barut Geometrisi	Tane çapı	Delik çapı	Tane Boyu	Hacim
Silindirik	$d$	–	$l$	$\frac{\pi}{4}d^2l$
Silindirik Tek Delikli	$d_b$	$d_k$	$l$	$\frac{\pi}{4}(d_b^2 - d_k^2)l$
Küresel	$d$	–	–	$\frac{\pi}{6}d^3$
Silindirik (7 delikli)	$d_b$	$d_k$	$l$	$\frac{\pi}{4}(d_b^2 - 7d_k^2)l$

Biçim fonksiyonunun belirlenmesi ile barutun yanması sonucu oluşan basıncın belirlenmesine geçilebilir. Şimdi efektif mermi yaklaşımı ile diğer etkilerin de modelde yer almasını sağlayalım.

$$m_e = m_m + \frac{1}{3} m_b z \quad (4.7)$$

Bu denklemi kullanarak efektif kütlelerin hesaplanması ile artık basınç belirlenebilir. Basıncı belirlemek üzere aşağıdaki denklem kullanılır.

$$p_a = \frac{\lambda m_b z - \frac{1}{2} [(\lambda - 1)(1 + \theta)] m_e V_m^2}{\left[ v_c - m_b \left[ \frac{1}{\rho_b} + z \left( \eta - \frac{1}{\rho_b} \right) \right] \right]} \quad (4.8)$$

Bu denklemle basınç hesaplanır. Merminin aldığı yolu hesaplamak için basıncın merminin hareketine etkisinin belirlenmesi gerekmektedir.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A}{m_e} [(p_b - p_{atm}) - F_r] \quad (4.9)$$

Bu denklemi sonlu farklar yaklaşımı ile tekrar yazarsak;

$$V(t_{i+1}) = V(t_i) + \frac{A}{m_e} [(p_b - p_{atm}) - F_r](t_{i+1} - t_i) \quad (4.10)$$

Sonlu farklar yaklaşımı ile hız denklemini genel olarak yazarsak;

$$V_{i+1} = V_i + \frac{dV_i}{dt} \Delta t \quad (4.11)$$

denklemini elde edilir.

$$\frac{dx}{dt} = V \quad (4.12)$$

Sonlu farklar yaklaşımı ile ifade edildiğinde;

$$x_{i+1} = x_i + \frac{dx_i}{dt} \Delta t \quad (4.13)$$

elde edilir. Böylelikle zamana bağlı olarak barutun yanması, basıncın artması ve merminin hareketine ilişkin denklemler elde edilmiştir. Bu döngü barutun yanmasının tamamlanmasına kadar sürdürülmektedir.

#### **4.1.2. Yanma tamamlandıktan sonraki süreç**

Yanma tamamlandıktan sonra yanma hızının ve biçim fonksiyonunun hesabı yapılamayacaktır. Bu andan itibaren adyabatik genişleme söz konusudur. Barutun ateşlenmesi ile merminin namluyu terk etmesi arasındaki sürenin milisaniye mertebesinde gerçekleştiği düşünüldüğünde ısı transferi için yeterli süre söz konusu değildir. Bunun için hesaplamaları kolaylaştırmak üzere prosesin adyabatik ve sürtünmenin ihmal edildiği düşünülmektedir. İzentropik proses için basınç, hacim, sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişkin aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left[ \frac{v_2}{v_1} \right]^{-\gamma} = \left[ \frac{\rho_2}{\rho_1} \right]^{\gamma} = \left[ \frac{T_2}{T_1} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.14)$$

Barut tamamen yandığı anda basınç ve hacim  $p_1$  ve  $v_1$  olarak değerlendirilerek hesaplamalara devam edilmektedir. Bu denklemde yer alan  $\gamma$  özgül ısılar oranı olarak değerlendirmek hataya neden olabilmektedir. Bunun yerine düzeltilmiş özgül ısılar oranı kullanılabilir.

$$\frac{\gamma - 1}{k - 1} = 1 + \chi \quad (4.15)$$

Bu denklemde  $k$  özgül ısılar oranı,  $\chi$  ısı transferi faktörünü temsil etmektedir. Genişleme basınç ve hacimler oranları ile belirlenirken hız ve merminin aldığı yol için gerekli denklemler barutun yandığı süreçle aynı olup, aşağıda sunulmuştur.

$$V_{i+1} = V_i + \frac{dV_i}{dt} \Delta t \quad (4.16)$$

ve

$$x_{i+1} = x_i + \frac{dx_i}{dt} \Delta t \quad (4.17)$$

Geliştirilen matematik model yukarıda detaylı olarak anlatılmıştır. Söz konusu modelin kodu MATLAB programında yazılmıştır.

## 4.2. Kabuller

Barutun yanma hızı hesaplanırken, yanmanın tüm barut tanelerinde aynı anda başladığı ve eşit katmanlar halinde gerçekleştiği öngörülmüştür. Barut tanelerinin tamamının aynı boyut ve konfigürasyonda olduğu, tüm deliklerin simetrik yerleştirildiği ve et kalınlığının eşit olduğu kabul edilmiştir.

Barut tanelerinin atım yatağında (yanma odası) yandığı, oluşan basıncın mermiyi namlu ekseninde hareket ettirdiği kabul edilmiştir. Hesaplamaların çözüme ulaşılabilir olması için akışın viskoz olmayan ve sıkıştırılabilir olduğu öngörülmektedir. Barut gazları karışımının basınç ve sıcaklık arasındaki ilişkinin Noble-Abel hal denklemi ile tanımlandığı kabul edilmiştir.

Sürtünme ve merminin dönüşüne harcanan enerjinin modele dâhil edilmesinin efektif mermi kütlesi yaklaşımı ile yapılması öngörülmüştür. Geri tepmenin ihmal edilebilir seviyede düşük olduğundan hesaplamalara katılmamıştır.

Birim barutun yanması sonucu aynı oranda enerji açığa çıktığı ve prosesin sürtünmesiz ve adyabatik (yani izentropik) olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir.

## 4.3. Deneysel Çalışmaya İlişkin Bilgiler

Fransa, Almanya ve İngiltere'nin katılımı ile oluşturulan EUROPA teknik düzenleme organizasyonu tarafından 40 mm silah sisteminin üç bazlı yarıklı barut kullanılarak iç balistik simülasyonu gerçekleştirilmiş ve deneysel verilerle kıyaslanmıştır [9].

EUROPA tarafından yapılan deneysel çalışmada; 600 cm<sup>3</sup> hacimli atım yatağına ve 3 m namlu boyuna sahip silah kullanılmıştır. Barutun kütlesi 440 g ve mermi kütlesi 790 g'dır. Deneysel çalışmada kullanılan silah ve barutun özellikleri Tablo 4.5.'de sunulmuştur.

Tablo 4.5. 40 mm silahın iç balistik verileri

Parametre	Değer	Birim
Silahın çapı (kalibre)	40	mm
Atım yatağı (yanma odası) hacmi	598	cm <sup>3</sup>
Namlu boyu	2955	mm
Katı barutun yoğunluğu	1.63	g/cm <sup>3</sup>
Barutun geometrisi	Yarıklı	-
Barut tane uzunluğu	400	mm
Barut tane çapı	3.738	mm
Barut tane delik çapı	0.945	mm
Barut yanma oranı sabiti	0.1118	cm/(s*MPa <sup>n</sup> )
Barut yanma oranı basınç üssü (n)	0.9718	-
Barut adyabatik alev sıcaklığı	444	K
Barut itki gücü	1.678	MJ/kg
Barut co-volume	1.018	cm <sup>3</sup> /g
Barut özgül ısılar oranı	1.2303	-

Deneysel çalışma sonucunda ölçülen maksimum basınç ve mermi ilk hızı (namlu çıkış hızı) değerleri Tablo 4.6.'de sunulmaktadır.

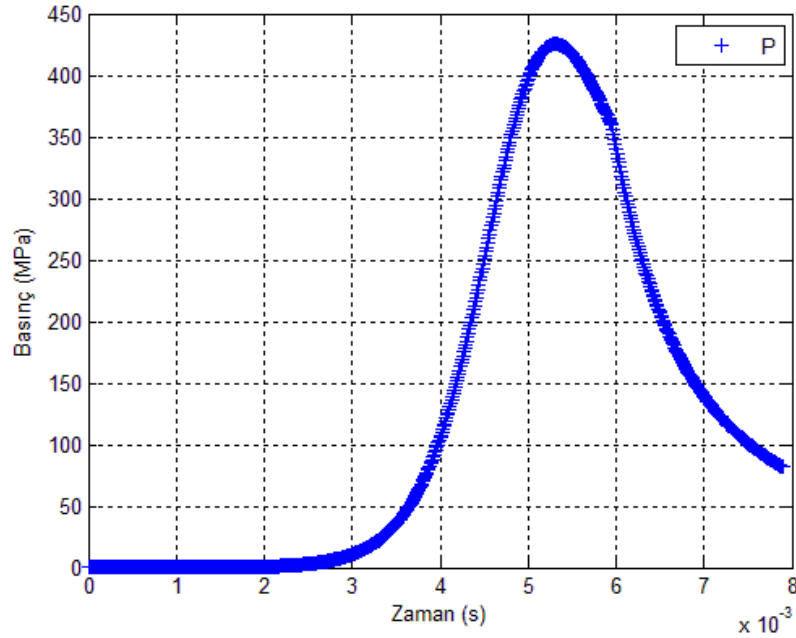
Tablo 4.6. Deney sonuçları

ATIM NU.	BARUT KÜTLESİ (g)	MERMİ KÜTLESİ (g)	MAKSİMUM BASINÇ (MPa)	İLK HIZ (m/s)
1	437.95	789.05	420	1215
7	436.87	789.07	418	1229
11	437.77	789.94	428	1234

#### 4.4. Modelin Doğrulanması

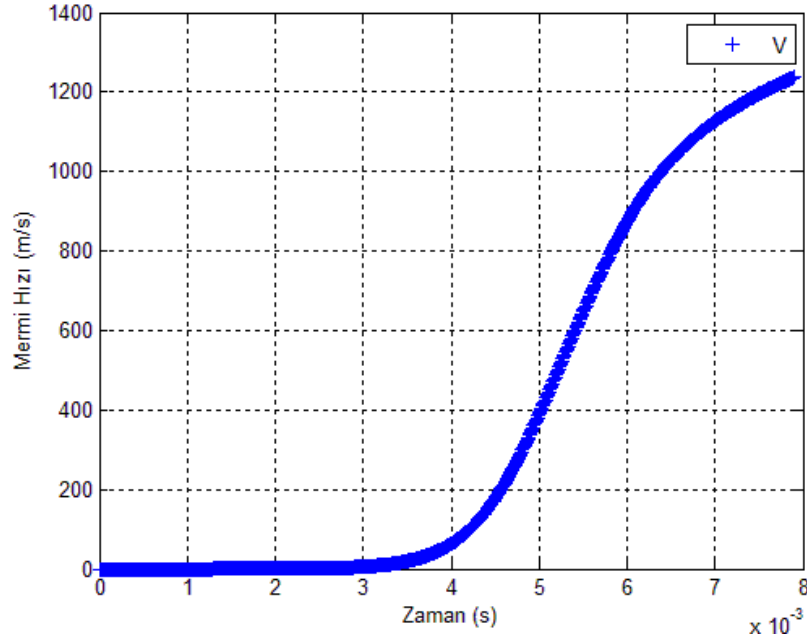
Yapılan çalışmada geliştirilen matematik modelin, MATLAB programında kodu yazılmıştır. Bu kod ile deneysel çalışmadaki silah, mermi, barut ve diğer veriler kullanılarak sonuçlar alınmıştır. Simülasyon sonuçlarının grafik gösterimlerine kod içerisinde yer verilmiştir. Buna göre kodun çalıştırılması neticesinde elde edilen sonuçların grafik gösterimleri aşağıda sunulmaktadır.

Şekil 4.2.'de namlu içerisinde oluşan basıncın zamana bağlı eğrisi yer almaktadır. Buna göre maksimum basınç 5.2 ms sürede gerçekleşmiştir.



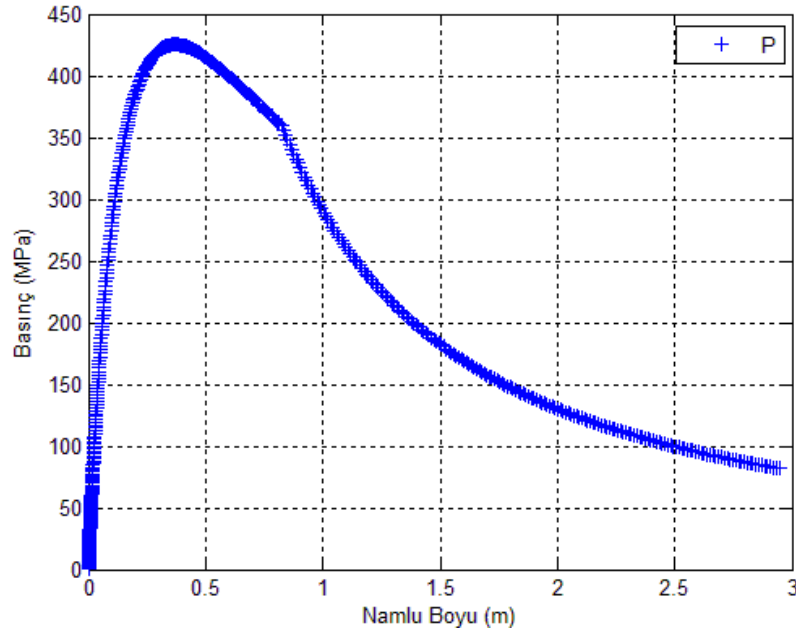
Şekil 4.2. Basınç-Zaman Eğrisi

Şekil 4.3.'de mermi çıkış hızının zamana bağlı değişimi yer almaktadır. Buna göre ateşleme gerçekleştirildikten yaklaşık 3 ms sonra merminin hareket etmeye başladığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Mermi Hızı-Zaman Eğrisi

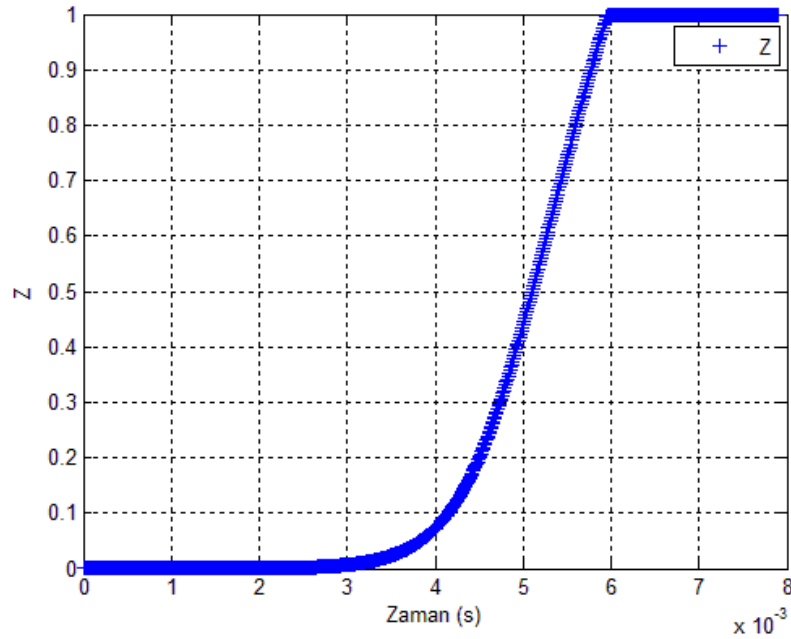
Şekil 4.4.'de merminin namlu boyunca hareketi esnasında basınç değişimi verilmektedir. Buna göre maksimum basınç, mermi namlunun yaklaşık 0.5 m mesafeye geldiğinde gerçekleşmektedir. Eğri incelendiğinde mermi yaklaşık 0.8 m mesafe kat ettiğinde eğrinin karakteristiğinde bir değişim gözlenmektedir. Bu nokta barutun tamamının yandığı noktayı göstermektedir.



Şekil 4.4. Basınç-Namlu Boyu Eğrisi



Şekil 4.5.'de biçim fonksiyonunun zamana göre değişim eğrisi yer almaktadır. Biçim fonksiyonunun yanar barutun toplam baruta oranı olduğu dikkate alınarak eğrinin incelenmesi halinde, barut ateşlendikten yaklaşık 6 ms süre sonra barutun tamamının yandığı görülmektedir. Barut ateşlendikten sonra basıncın düşük olması nedeniyle 3 ms sürede yanma hızının düşük olduğu, bu süreden sonra doğrusal olarak arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.5. Biçim Fonksiyonu Zaman Eğrisi.

Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslaması Tablo 4.7.'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. Nümerik ve deneysel sonuçların kıyaslanması

Özellikler	Simülasyon	Deneysel	Fark	Fark (%)
Namlu çıkışında merminin hızı	1222.7 m/s	1234 m/s	11.3 m/s	0.9
Maksimum ortalama basınç	443.4 MPa	428 MPa	15.4 MPa	3.6

Simülasyon sonucu elde edilen değerler ile deneysel veriler kıyaslanmış mermi ilk hızında % 0.912 sapma ve maksimum basınçta ise % 3.59 mertebesinde sapma olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, ışığında oluşturulan matematik modelin doğrulandığı sonucuna varılmıştır.

## BÖLÜM 5. BARUT TANE ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ

İç balistik matematik modelinin doğrulanması yapıldıktan sonra artık matematik modelin farklı durumlar için etkilerin belirlenmesinde kullanılabilir. Farklı barut tanelerinin özelliklerinin iç balistik üzerindeki etkilerini belirlemek üzere; barut tane geometrisi, tane çapı, tane boyu, tek delikli silindirik tanenin delik çapındaki değişimin etkileri bu bölümde araştırılmaktadır.

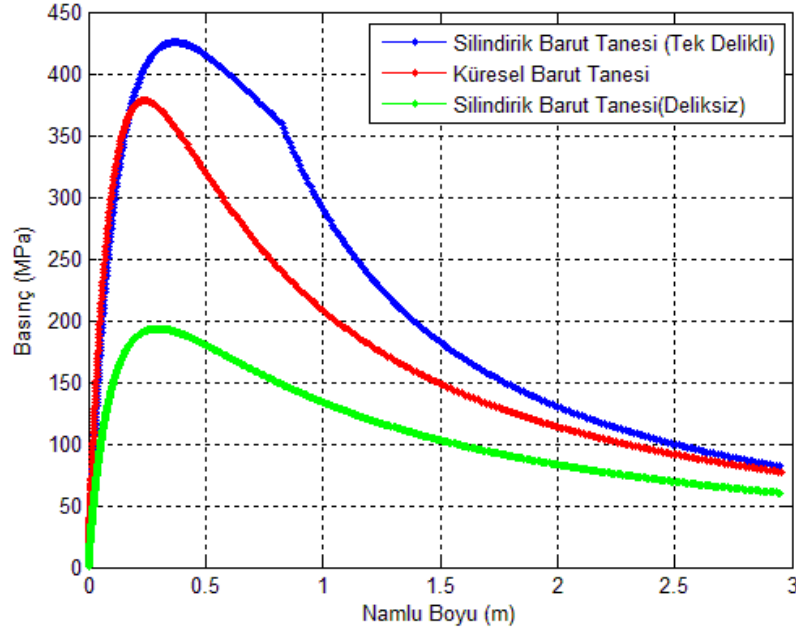
### 5.1. Barut Tane Geometrisinin Etkisi

Barut tane özelliklerinden öncelikle tane geometrisinin etkileri incelenecektir. Geometri, şekil veya biçim olarak ta düşünülebilir. Tane geometrisinin etkileri incelenirken silindirik, silindirik tek delikli ve küresel geometrili tanelerin iç balistikte oluşturduğu farklar değerlendirilmiştir. Bununla ilgili olarak değerlendirmeye alınan barut tane geometrileri ve çap, delik çapı ve tane boyu Tablo 5.1.'de gösterilmiştir.

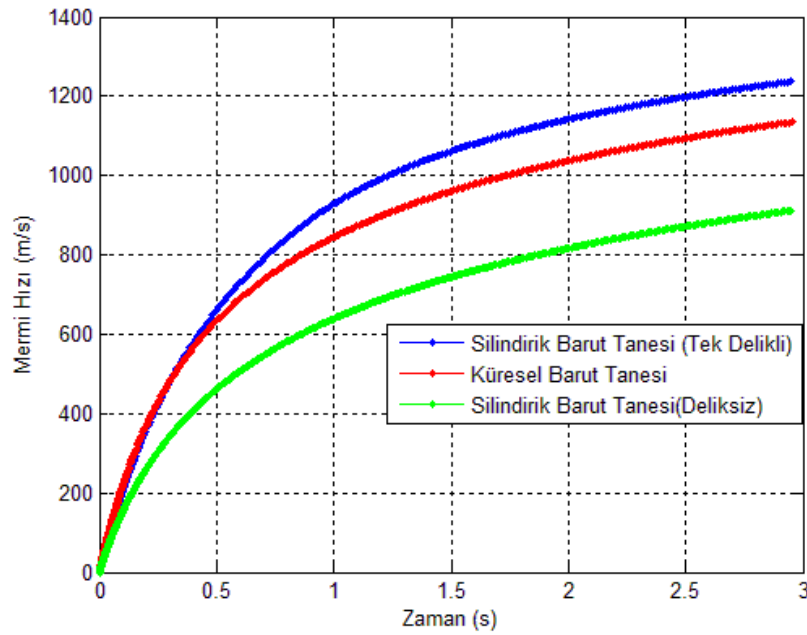
Tablo 5.1. İncelenen barut tane geometrileri

TANE ŞEKLİ	ÇAPI db (mm)	DELİK ÇAPI dk (mm)	BOYU l (mm)
Silindirik Barut Tanesi (deliksiz)	3.738	-	400
Silindirik Barut Tanesi (tek delikli)	3.738	0.945	400
Küresel	3.738	-	-

Buna göre yapılan analiz sonucunda Tablo 5.1.'de belirtilen barut tane geometrileri geliştirilen iç balistik kodunda çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçların grafik gösterimi Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Tane geometrileri Basınç-Namlu Boyu grafiği



Şekil 5.2. Tane geometrileri Mermi Hızı-Namlu Boyu grafiği

Şekil 5.1. ve Şekil 5.2. incelendiğinde yeşil eğri silindirik deliksiz barut tanesi kullanılması durumundaki ve mavi eğri tek delikli silindirik barut tanesi kullanılması durumundaki basınçtaki değişimi göstermektedir. Bu iki grafikten elde edilen sonuçlar Tablo 5.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Tane geometrileri nümerik analiz sonuçları

TANE ŞEKLİ	MERMİ ÇIKIŞ HIZI (m/s)	MAKSİMUM ORTALAMA BASINÇ (MPa)	SÜRE (ms)
Silindirik Barut Tanesi (deliksiz)	912	193	11
Silindirik Barut Tanesi (tek delikli)	1237	425	7.9
Küresel	1135	378	7.7

Elde edilen değerler incelendiğinde tek delik açılması barut tanesinin et kalınlığını düşürdüğü için silindirik barut tanesi daha kısa sürede yanmaktadır. Yanma hızlı gerçekleştiği için basınç hızla yükselmekte ve mermi namluyu daha yüksek hızla terk etmektedir.

## 5.2. Tane Çapının Etkisi

Barut tane büyüklüğünün etkilerini tespit etmek maksadıyla hazırlanan ve doğrulanan matematik model kullanılarak barutun büyüklüğünü değiştirerek iç balistik prosesine etkileri araştırılmıştır.

### 5.2.1. Silindirik barut tanesinde çapın etkisi

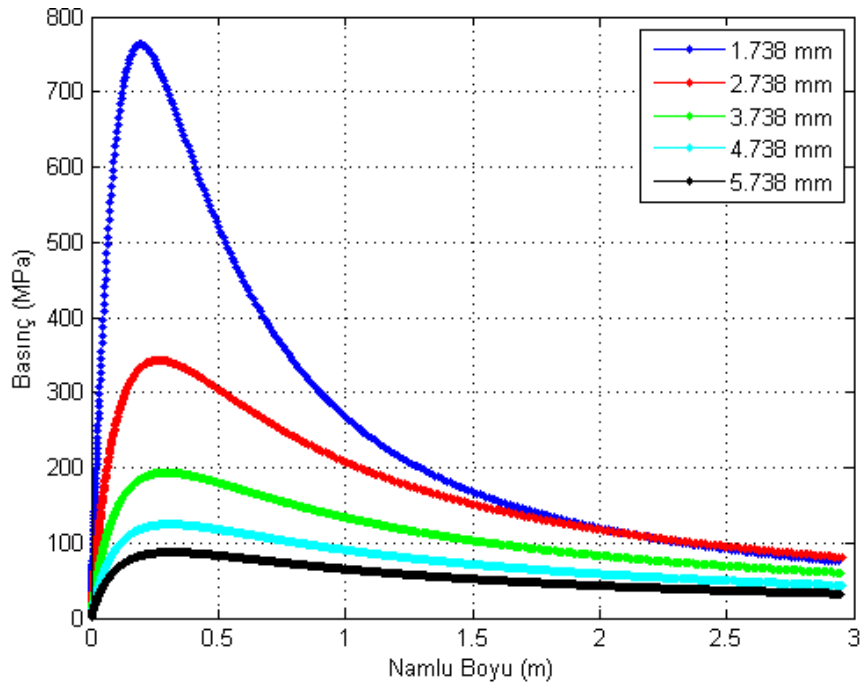
Bu araştırmada, deliksiz silindirik barut tanesinin değişik  $d$  çaplarında iç balistiğe etkisi incelenmiştir. Diğer tüm parametreler sabit kalmıştır. İncelemede

değerlendirilen silindirik barut tane çapları Tablo 5.3.'de sunulmuştur. İncelemede sonuçların daha belirgin olması için tane çapı 1 mm'lik artımlarla belirlenmiştir.

Tablo 5.3. İncelenen silindirik barut tane çapları

DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	ÇAP (mm)
1	Silindirik	1.738
2	Silindirik	2.738
3	Silindirik	3.738
4	Silindirik	4.738
5	Silindirik	5.738

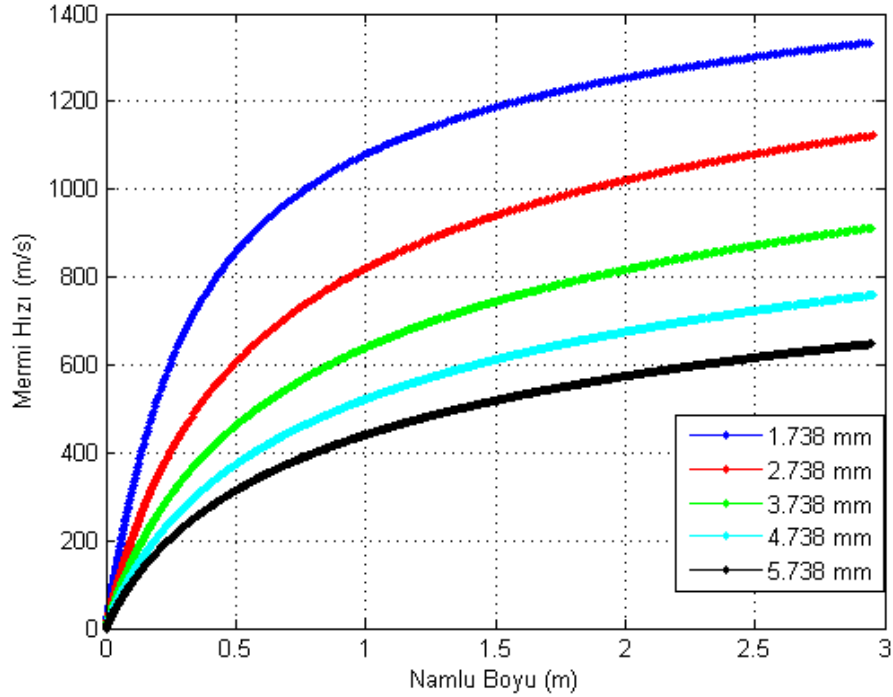
Yapılan nümerik analiz sonucunda elde edilen Basınç-Namlu Boyu eğrisi Şekil 5.3.'de sunulmaktadır.



Şekil 5.3. Çap değişiminin Basınç-Namlu Boyu grafiğine etkisi.

Bu eğriler incelendiğinde çap büyüdükçe namlu içerisindeki maksimum basınç giderek azalmaktadır. Tüm diğer parametreler sabit kalmak üzere basınç ile barut

tane çapı arasında ters orantının olduğu görülmektedir. Barutun tane çapı azaldıkça basınç yükselmektedir. Tane çapı değişiminin Mermi Hızı- Namlu Boyu grafiğine etkilerini Şekil 5.4.'de görülmektedir.



Şekil 5.4. Çap değişiminin mermi hızına etkisi.

Eğriler incelendiğinde basınç artışına benzer şekilde tane çapının mermi hızına ters orantılı etkisinin olduğu görülmektedir. Nümerik çözüm sonuçları Tablo 5.4.'de sunulmuştur.

Tablo 5.4. Çap değişiminin etkilerine ilişkin nümerik sonuçlar

DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	ÇAP (mm)	MAKSİMUM BASINÇ (MPa)	MERMİ ÇIKIŞ HIZI (m/s)
1	Silindirik	1.738	763	1334
2	Silindirik	2.738	343	1123
3	Silindirik	3.738	193	912
4	Silindirik	4.738	125	759
5	Silindirik	5.738	87	648

İç balistik prosesinde amaç düşük basınçta yüksek mermi çıkış hızı elde etmektir. Durum 1 ve Durum 2 dikkate alındığında maksimum basınç 420 MPa bir artış ve

mermi çıkış hızı 211 m/s artışa neden olmaktadır. Durum 1’de belirtilen hızı elde etmek üzere 763 MPa basınca dayanıklı bir silah sistemi tasarımı yapmak gerekmektedir. Tabii ki namlu çeliği kullanıldığında ilave silahın et kalınlığının çok yüksek olması gerektiği ve yüksek maliyetlere neden olacağı aşikârdır. Bunun yerine Durum 2 gibi sonucu tercih etmenin iç balistik açıdan daha ekonomik ve etkin olacağı sonucu çıkmaktadır.

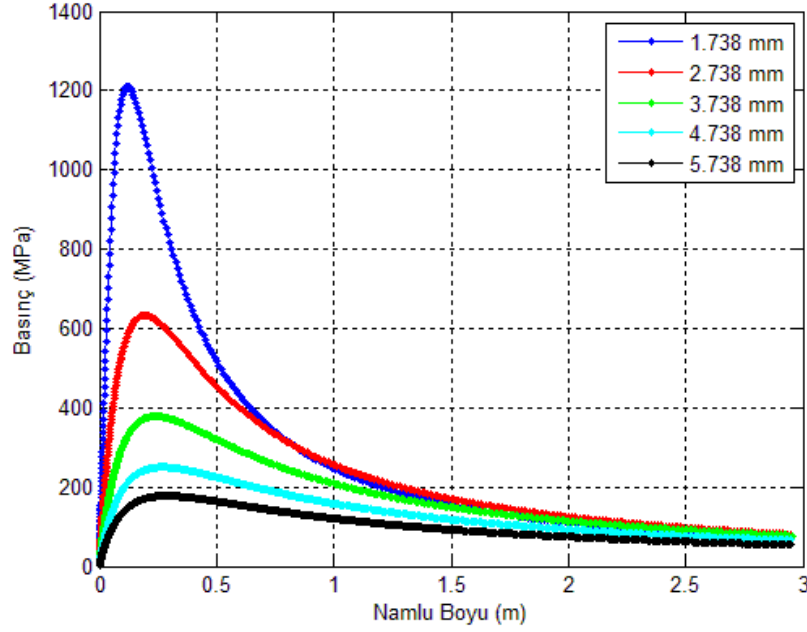
### 5.2.2. Küresel barut tanesinde çapın etkisi

Bu araştırmada, son yıllarda çok tercih edilen küresel barut tanesinin değişik  $d$  çaplarında iç balistiğe etkisi araştırılmaktadır. Bu araştırmada da diğer tüm parametreler sabit kalmıştır. İncelemede değerlendirilen küresel barut tanesi çapları Tablo 5.5.’de sunulmuştur. İncelemede sonuçların daha belirgin olması için tane çapı 1 mm’lik artımlarla belirlenmiştir.

Tablo 5.5. İncelenen küresel barut tanesi çapları

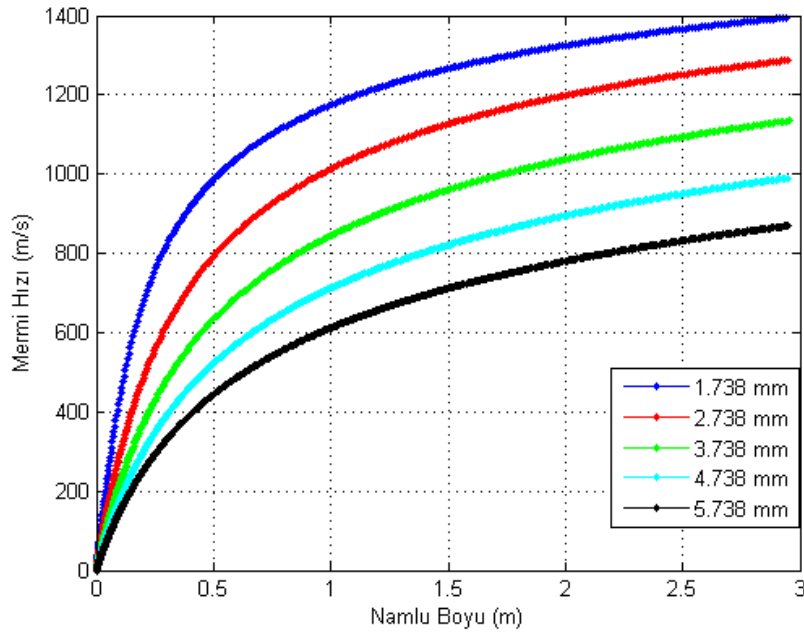
DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	ÇAP (mm)
1	Küresel	1.738
2	Küresel	2.738
3	Küresel	3.738
4	Küresel	4.738
5	Küresel	5.738

Yapılan nümerik analiz sonucunda elde edilen Basınç-Namlu Boyu eğrisi Şekil 5.5.’de sunulmaktadır.



Şekil 5.5. Küresel barut için çap değişiminin basınca etkisi

Bu eğriler incelendiğinde çap büyüdükçe namlu içerisindeki maksimum basınç giderek azalmaktadır. Tüm diğer parametreler sabit kalmak üzere basınç ile barut tane çapı arasında ters orantının olduğu görülmektedir. Barutun tane çapı azaldıkça basınç yükselmektedir. Tane çapı değişiminin Mermi Hızı- Namlu Boyu grafiğine etkilerini Şekil 5.6.'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Küresel barut tanesinde çap değişiminin mermi hızına etkisi



Eğriler incelendiğinde basınç artışına benzer şekilde tane çapının mermi hızına ters orantılı etkisinin olduğu görülmektedir. Nümerik çözüm sonuçları Tablo 5.6.'da sunulmuştur.

Tablo 5.6. Değişik çaplardaki küresel taneli barutun nümerik sonuçları

DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	ÇAP (mm)	MAKSİMUM BASINÇ (MPa)	MERMİ ÇIKIŞ HIZI (m/s)
1	Küresel	1.738	1210	1395
2	Küresel	2.738	632	1288
3	Küresel	3.738	378	1135
4	Küresel	4.738	250	990
5	Küresel	5.738	177	870

Durum 1 ve Durum 2 dikkate alındığında maksimum basınç 578 MPa bir artış ve mermi çıkış hızı 107 m/s artışa neden olmaktadır. Durum 2 ve Durum 3 dikkate alındığında maksimum basınç 254 MPa bir artış ve mermi çıkış hızı 153 m/s artışa neden olmaktadır. Tüm tablo incelendiğinde de benzer durum söz konusu olmaktadır. Aynı miktarda barutun kullanıldığı bir atışta küresel barut kullanımı silindirik barut kullanımından çok daha düşük basınçlarda yüksek mermi çıkış hızı elde edilmesine neden olmaktadır.

Küresel barut, son dönemlerde ülkeler tarafından yatırım yapılarak temin edilen ve kullanılan bir barut tane geometri çeşididir.

### 5.3. Delik Çapının Etkisi

Barut tane özelliklerinde biri de uzun yıllardır kullanılan delikli barutlardaki delik çapıdır. Küresel barut kullanımından önce iç balistik bilimi ile ilgili olanlar deliksiz barut tane geometrilerine nazaran daha hızlı bir yanmanın elde edildiği delikli barut tane geometrilerini denemişlerdir. Öncelikle tek delikli olan taneler daha sonra

artırılarak yedi ve daha fazla delikli halde üretim yöntemleri araştırılmış ve iç balistik uygulamalarında kullanılmıştır.

Delikli barut tanesinin üretimindeki en büyük sorunlardan bir tanesi deliklerin barut geometrisinde yerleşimidir. Üretimde tam merkezleme veya homojen dağılım gibi hususlarda sorunlar görülebilmektedir. Ancak inceleme ideal olarak merkezlenmiş tek delikli barut tanesinde deliğin çap değişiminin etkilerini tespit etmeye yönelik olmaktadır.

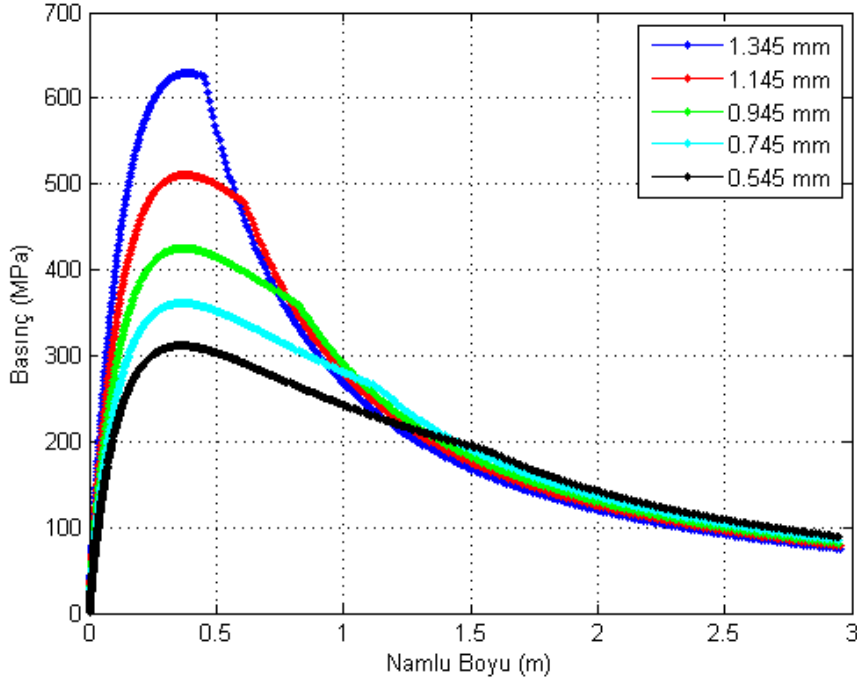
İnceleme kapsamında barut tane çapının sabit kalması koşulu ile deliğin çapının değişimi ayrıca delikli barut tane çalışmalarında tanımlanan et kalınlığını da ortaya koymaktadır. Delik çapındaki değişim et kalınlığı veya yabancı literatürde *web* olarak tanımlanan özelliğin de değişiminin etkilerini ortaya koymaktadır.

Yapılan araştırmada kullanılan barut tanesinin çap, delik çapı ve et kalınlığı değerleri Tablo 5.7.'de sunulmaktadır.

Tablo 5.7. Delik çapının etkisi için incelenen barut tane özellikleri

DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	ÇAP (mm)	İÇ ÇAP (mm)	ET KALINLIĞI (mm)
1	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	1.345	2.393
2	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	1.145	2.593
3	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	0.945	2.793
4	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	0.745	2.993
5	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	0.545	3.193

Yapılan numerik analiz sonucunda delik çapının ve dolayısıyla et kalınlığının değişiminin Basınç-Namlu Boyu grafiğine etkisi Şekil 5.7.'de sunulmuştur.

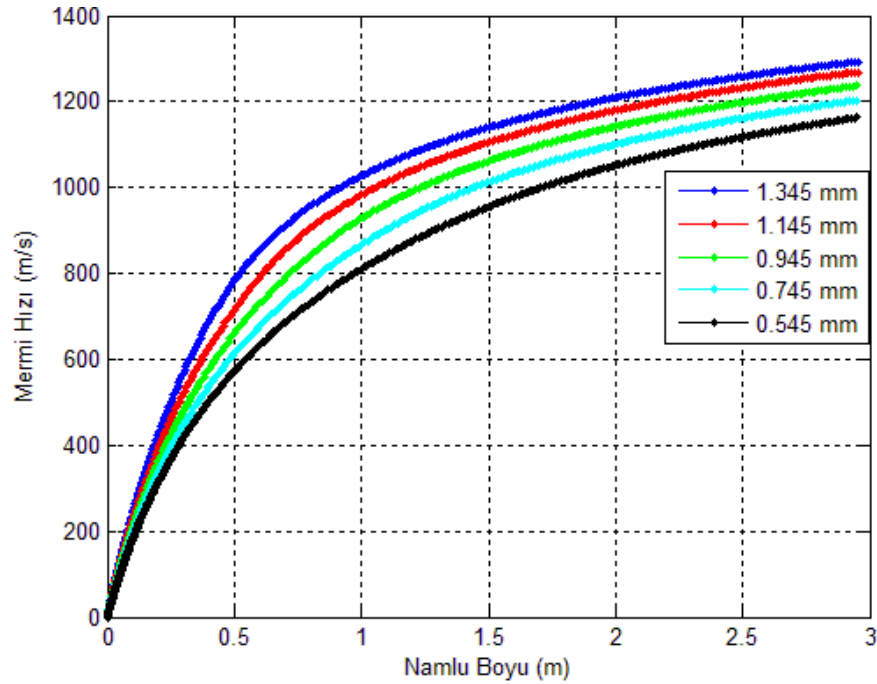


Şekil 5.7. Delik çapı değişiminin Basınç Namlu Boyu grafiğine etkisi

Grafikler incelendiğinde delik çapının artmasının basıncı doğru orantılı olarak etkilediğini otaya koymaktadır. Grafikte herhangi bir renk ile gösterilen eğride eğri karakteristiğinin değiştiği noktalar söz konusudur. Örnek olarak mavi eğrinin yaklaşık 0.4 m mesafede eğrinin karakteristiğinin değiştiği görülmektedir. Bu nokta, kırmızı eğride yaklaşık 0.6 m mesafeye denk gelmektedir. Bu noktalar gerçekte barutun yanmasının tamamlandığı anı göstermektedir. Barutun yanması tamamlandığında izentropik genişleme söz konusu olmaktadır. Bu durum eğrilerde de açıkça görülmektedir.

Delik çapı arttıkça, namlu içerisinde meydana gelen basınç giderek artmaktadır. Delik çapındaki artış barutun et kalınlığını azaltmakta ve aynı miktarda barutun daha hızlı yanmasını sağlamaktadır.

Delik çapındaki değişimin mermi hızını nasıl etkilediği Şekil 5.8.'de görülmektedir.



Şekil 5.8. Delik çapı değişiminin mermi hızına etkisi

Şekil 5.8.'de de delik çapındaki artışın (ya da et kalınlığındaki azalmanın) mermi hızını doğru orantılı olarak etkilediği görülmektedir. Ancak grafikten de görüldüğü üzere Şekil 5.7.'deki basınç değişimi kadar büyük değişikliklerin mermi hızında olmadığı görülmektedir. Tek delikli barut tanesi kullanılarak değişik çaplardaki delikler için nümerik sonuçlar Tablo 5.8.'de sunulmuştur.

Tablo 5.8. Delik çapı değişiminin nümerik analiz sonuçları

DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	ÇAP (mm)	İÇ ÇAP (mm)	ET KALINLIĞI (mm)	MAKSİMUM BASINÇ (MPa)	MERMİ ÇIKIŞ HIZI (m/s)
1	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	1.345	2.393	630	1293
2	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	1.145	2.593	510	1270
3	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	0.945	2.793	425	1237
4	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	0.745	2.993	361	1203
5	Silindirik (Tek Delikli)	3.738	0.545	3.193	312	1164

Tablo 5.8.'de verilen sonuçlar çerçevesinde Durum 1 ile Durum 5 arasında 318 MPa basınç farkı varken mermi çıkış hızında 129 m/s fark olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar çerçevesinde tek delikli barut tanesi kullanılarak düşük basınçta yüksek hız elde edilebildiği görülmektedir.

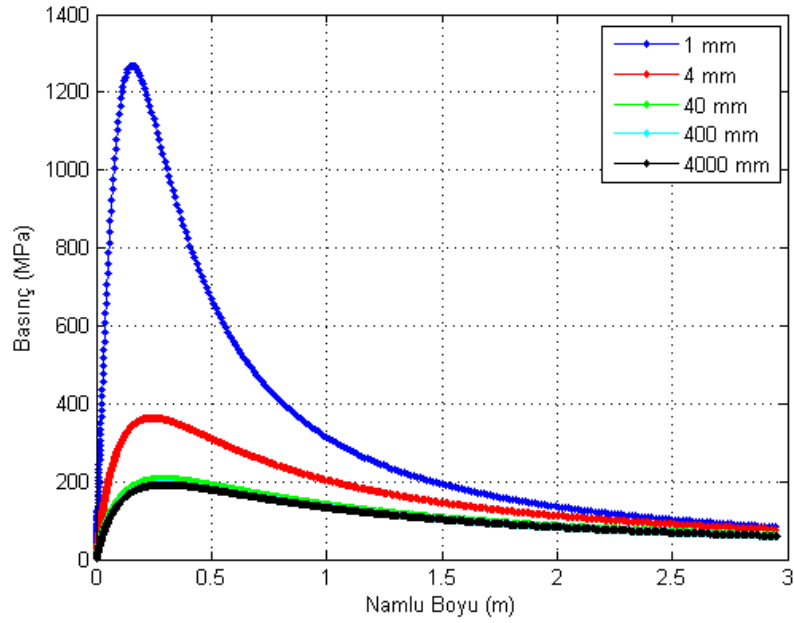
#### 5.4. Tane Boyunun Etkisi

Silindirik geometrili barut tanesinin boyunun iç balistik prosesine etkisinin belirlenmesine yönelik olarak Tablo 5.9.'de belirtilen tane boyları kullanılarak nümerik çözüm yapılmıştır.

Tablo 5.9. Analiz edilen silindirik barut tane boyları

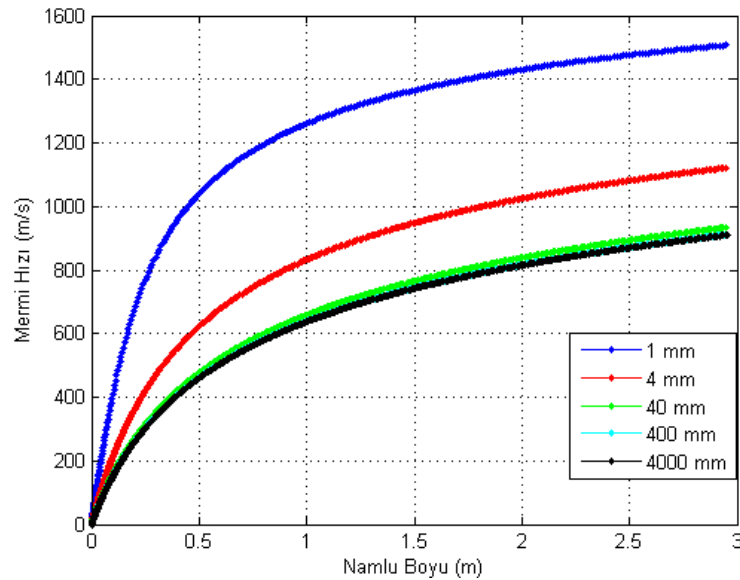
DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	TANE BOYU (mm)
1	Silindirik	1
2	Silindirik	4
3	Silindirik	40
4	Silindirik	400
5	Silindirik	4000

Nümerik çözüm sonucunda elde edilen veriler çerçevesinde farklı tane boyları için çizilen Basınç-Namlu Boyu eğrileri Şekil 5.9.'da sunulmaktadır. Şekil 5.9.'da gösterilen eğriler incelendiğinde tane boyunun 40 mm olmasının kritik nokta olduğu bu boydan sonraki daha büyük taneler için basıncın aynı kaldığı görülmektedir. Diğer bir husus ise 40 mm'nin altında kalan boylar için basıncın çok duyarlı olmasıdır.



Şekil 5.9. Barut tanesinin boyunun basınca etkisi

Nümerik çözüm sonucunda elde edilen veriler çerçevesinde farklı tane boyları için çizilen Mermi Hızı-Namlu Boyu eğrileri Şekil 5.10.'da sunulmaktadır. Bu eğriler incelendiğinde basınç değerlerinde olduğu gibi 40 mm'nin üzerindeki tane boyları mermi hızını da etkilememektedir. Bu değerlerin altında kalan tane boyları için ilk hızda artış sağlanmaktadır.



Şekil 5.10. Barut tanesinin boyunun mermi hızına etkisi

Silindirik barut tanesinin sadece boyunun değişiminin iç balistiğe etkilerine ilişkin nümerik analiz sonuçları Tablo 5.10.'da sunulmaktadır.

Tablo 5.10. Tane boyu değişiminin nümerik sonuçları

DURUM	BARUT TANE GEOMETRİSİ	TANE BOYU (mm)	MAKSİMUM BASINÇ (MPa)	MERMİ ÇIKIŞ HIZI (m/s)
1	Silindirik	1	1268	1508
2	Silindirik	4	364	1122
3	Silindirik	40	206	934
4	Silindirik	400	193	912
5	Silindirik	4000	192	910

Sonuçlar incelendiğinde 40 mm ve üzerinde tane boyuna sahip silindirik barut tanesinin iç balistik olarak herhangi bir etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Diğer taraftan tane boyunun Durum 2 ve Durum 3 aralığında çok yüksek bir basınç artımı olmadan mermi hızının artmasına katkıda bulunduğu görülmektedir. Ancak Durum1 ile Durum 2 arasında tane boyundaki 3 mm seviyesinde değişimin basınç olarak 904 MPa, mermi çıkış hızı olarak ise 386 m/s farka neden olabildiği görülmektedir. Bu durum iç balistik olarak amaçlanan düşük hızda yüksek mermi hızına ulaşmada etkili olmadığı görülmektedir. Durum 1'de belirtilen şartlarda artışın nedeni tane boyunun tane çapından daha küçük olmasıdır. Bu durumda barut tanesi boyuna daha önce yanmakta ve radyal yönde yanma tamamlanmadan barut tanesi tamamen yanmaktadır.

## **BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu tez kapsamında klasik namlulu silahlarda katı barutun yakılması sonucu oluşan olaylar incelenmiştir. Namlu içerisinde barutun yanması ile merminin namluyu terk etmesi arasında olaylar iç balistik biliminin konusunu teşkil etmektedir.

Tez kapsamında öncelikle iç balistik temel denklemlerinin çıkarılması, problemin çözümüne yönelik olarak gerekli kabuller yapılarak denklemlerin çözülebilir şekle dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Temel denklemler kullanılarak matematik model oluşturulmuştur. Matematik model 40 mm'lik silah sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışma neticeleri ile kıyaslanmış ve matematik modelin doğrulaması yapılmıştır.

Matematik model kullanılarak silindirik, tek delikli silindirik ve küresel barut tane geometrilerinin iç balistik üzerine etkileri incelenmiştir. İnceleme neticesinde küresel ve tek delikli silindirik barut tanelerinin, silindirik barut tanelerine göre yanma hızının yüksek olduğu tespiti yapılmıştır. Yanma hızının yüksek olması basıncın daha kısa sürede artmasına ve mermi hızının daha yüksek olmasına neden olduğu gösterilmiştir.

İnceleme kapsamında ayrıca, silindirik ve küresel barut tanelerinin çap değişiminin etkileri değerlendirilmiştir. Her iki inceleme kapsamında barut tane çapının düşük değerlerde yüksek basınç ve yüksek mermi çıkış hızına neden olduğu belirlenmiştir. Bu hususla ilgili olarak esas olanın, barut tanesinin et kalınlığının düşmesinin yanma hızını doğru orantılı olarak artırması olduğu gözlenmiştir. İç balistik uygulamalarında silindirik veya küresel barut tane geometrilerinin kullanımı durumunda, çap değişikliğinin ani basınç değişikliklerine neden olabileceğinin dikkate alınması gerektiği tespit edilmiştir. Silahın izin verilen çalışma basınç



kriterine bağlı olarak, barut tanesinin çap seçiminin yapılması hususu ortaya konulmuştur.

Barut tanesinin delikli olmasının da iç balistik olayları açısından büyük farklar yaratabildiği tespit edilmiştir. Delikli tane geometrilerinin yanma hızını artıran etkilerinin olduğu ortaya konulmuştur. Ancak yine de silah tasarım kriterlerinin göz önünde bulundurulması gerektiği belirlenmiştir. Barut tanesinin et kalınlığında çok düştük değişiklikler büyük basınç değişikliklerine neden olabildiği ortaya konulmuştur.

Silindirik barut tane geometrilerinde tane boyunun, tane çapı veya tane et kalınlığı dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Tane boyunun; tane çapı veya et kalınlığından düştük olması durumunda basıncın aniden yükselmesine neden olabildiği ortaya konulmuştur. Bununla birlikte tane boyunun çok uzun olmasının da basınç ve mermi çıkış hızı açısından etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

Küresel barut tanesinin kullanılması durumunda, aynı çaptaki silindirik barut tanesine göre yanma hızının daha yüksek olduğu ve basınç artışının kontrollü gerekleştilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, küresel barut tanesi kullanılarak mermi çıkış hızında da artış elde edileceği gösterilmiştir.

Tez kapsamında, katı barut kullanılan klasik tipte namlulu silah sistemlerinin iç balistik olayları incelenmiştir. İç balistik, sadece silah sistemlerinin konusu değildir. İç balistik, uzay teknolojilerinde de uzaya araç gönderme gibi barışl amaçlarla kullanılan bir bilimdir.

Bu tez kapsamında esas itibariyle, silah, mermi ve barut gibi bileşenlere ilişkin parametreler temin edildiği şekilde kullanılmıştır. İlave düzeltme faktörleri matematik modele ilave edilmemiştir. Matematik model oluşturulurken kullanılan temel denklemler, iç balistik üzerine yazılmış kaynaklarda yaygın olarak kullanılan denklemlerdir. Matematik model ileride gerçekleştirilecek çalışmalar mehz teşkil etmek üzere basit şekilde geliştirilmiştir. Yapılan kabuller literatürde yaygın olarak

yapılmış olan kabullerdir. Bu haliyle model daha karmaşık iç balistik uygulamalarına kolaylıkla dönüştürülerek kullanılabilir düzende oluşturulmuştur.

Gelecek dönemde yapılacak çalışmalarda iç balistiğin barışçıl amaçla kullanıldığı alanlarda incelemeler yapılması planlanmaktadır. Bu incelemelerde, bu tez içerisinde elde edilen modelin roket veya füze iç balistiğine dönüştürülmesi ve imkânlar dâhilinde deneysel olarak doğrulanması planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] C. L. Farrar and D. W. Leeming, *Military Ballistics: A Basic Manual*. Brassey's Publishers, 1983.
- [2] H. Krier and M. Summerfield, "Interior ballistics of guns," *Prog. Astronaut. Aeronaut.*, vol. 66, 1979.
- [3] D. Carlucci and S. Jacobson, *Ballistics: Theory and design of guns and ammunition*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [4] U. S. A. M. Command, *AMCP 706-150: Engineering Design Handbook: Ballistics Series: Interior Ballistics of Guns, 1965*. U.S. Government Printing Office, 1965.
- [5] P. G. Baer and J. M. Frankle, "The Simulation Of Interior Ballistic Performance Of Guns By Digital Computer Program," Maryland, 1962.
- [6] R. D. Anderson and K. D. Fickie, "IBHVG2--A User's Guide," US Army Ballistic Research Laboratory, Maryland, 1987.
- [7] A. Bougamra and H. Lu, "Interior Ballistics Two-Phase Reactive Flow Model Applied to Small Caliber Projectile-Gun System," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Mar. 2015.
- [8] E. Degirmenci, "Effects of grain size and temperature of double base solid propellants on internal ballistics performance," *Fuel*, vol. 146, pp. 95–102, Apr. 2015.
- [9] C. Woodley, A. Carriere, P. Franco, J. Nussbaum, X. Chabaux, and B. Longuet, "Comparisons of Internal Ballistics Simulations of 40mm Gun Firings," in *23RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS*, 2007, no. April, pp. 359–367.
- [10] J.-S. Jang, H.-G. Sung, T.-S. Roh, and D.-W. Choi, "Numerical analysis of interior ballistics through eulerian-lagrangian approach," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 8, pp. 2351–2357, Sep. 2013.
- [11] S. Jaramaz, D. Micković, and P. Elek, "Two-phase flows in gun barrel: Theoretical and experimental studies," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 37, no. 5, pp. 475–487, Jun. 2011.

- [12] C. Ma and X. Zhang, "Interior Ballistic Modeling and Simulation for Different Charge Zones in Modular Charge System," *J. Appl. Mech.*, vol. 80, no. 3, p. 031404, Apr. 2013.
- [13] H. Miura, A. Matsuo, and Y. Nakamura, "Numerical Prediction of Interior Ballistics Performance of Projectile Accelerator Using Granular or Tubular Solid Propellant," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 38, no. 2, pp. 204–213, Apr. 2013.
- [14] J.-S. Jang, H.-G. Sung, T.-S. Roh, and D.-W. Choi, "Numerical Study On Properties of Interior Ballistics According To Solid Propellant Pos," in *26th International Symposium on Ballistics*, 2011, pp. 721–730.
- [15] M. Rashad, X. Zhang, and H. Elsadek, "Interior Ballistic Two-Phase Flow Model of Guided-Projectile Gun System Utilizing Stick Propellant Charge," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Jul. 2014.
- [16] S. Jaramaz, D. Mickovic, Z. Zivkovic, and R. Curcic, "Interior Ballistic Principle Of High/Low Pressure Chambers In Automatic Grenade Launchers," in *19th International Symposium of Ballistics*, 2001, no. May, pp. 7–11.
- [17] J. Kremer, C. Steinbach, and K. Dahhani, "Interior Ballistics Simulation of the Two Chambers GLMAV Launcher," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 39, no. 5, pp. 768–773, Oct. 2014.
- [18] R. T. Miner, "Computational interior ballistics modeling," 2013.
- [19] A. R. Büyüktür, *Termodinamik*, 1st ed. İstanbul: Birsen Yayınevi, 1995.
- [20] Y. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach, SI Version*. McGraw-Hill Education, 2014.
- [21] A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- [22] F. R. W. Hunt, *Internal ballistics*. London: H.M. Stationery Office, 1951.
- [23] J. Corner, "Theory of the interior ballistics of guns," 1950.
- [24] K. K. Kuo and M. Summerfield, *SOLID-PROPELLANT COMBUSTION*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [25] M. Russell, *The chemistry of fireworks*, 2nd ed. 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

Hasan Ali GEZER, 31.07.1974 de İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1993 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve 1997 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 1997–2005 yılları arasında Kara Kuvvetleri Teknik ve Proje Yönetim Daire Başkanlığında Hafif Silah Sistemleri Proje Subayı, 2005–2011 yılları arasında 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığında sırasıyla Entegre Lojistik Destek Kısım Amiri, Tırtıllı Araç Bölüm Amiri, Leopard Tankları Proje Subayı görevlerini icra etti. 2011-2015 yılları arasında MSB Diyarbakır Kalite Yönetim Bölge Başkanlığında Muayene Komisyonu Üyesi olarak görev aldı. 2015 yılında MSB ARGE ve Teknj.D.Bşk.lığında Silah, Mühimmat Roket ve Füze Sistemleri Şube Müdürlüğünde Füze Proje Subaylığı görevine atandı ve halen bu pozisyonda görevini sürdürmektedir. Hasan Ali GEZER, evli ve iki çocuk babasıdır.