

## Barut tane geometrisinin silah iç balistiğine etkisinin incelenmesi

Hasan Ali Gezer<sup>\*1</sup>, Tahsin Engin<sup>2</sup>

*17.03.2014 Geliş/Received, 03.02.2016 Kabul/Accepted*

### ÖZ

Bu yayında namlulu silahların iç balistik prosesi tanımlanmıştır. İç balistik hesaplamalarına ilişkin matematik model oluşturulmuştur. Model oluşturulurken barut tane geometrisine bağlı olarak geliştirilen biçim fonksiyonu kullanılmıştır. Modelin MATLAB ® programında kodu hazırlanmıştır. Modelin doğrulanmasında, literatürden temin edilen 40 mm silah sisteminin atış sonuçları kullanılmıştır. Söz konusu atışta kullanılan silah ve mermi parametreleri kodun çözümünde kullanılmıştır. Kodun çözümü ile atış sonuçları kıyaslanmıştır. Mermi çıkış hızı ve namlu içerisindeki maksimum basınç parametreleri açılarından yapılan kıyaslama sonucunda standart sapmanın %4 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle matematik modelin doğrulandığı sonucuna varılmıştır. Bu model kullanılarak silindirik, tek delikli silindirik ve küresel barut tanelerinin iç balistik performansına etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** iç balistik, matematik model, biçim fonksiyonu

## The inspection of effect of propellant granule geometry on gun interior ballistics

### ABSTRACT

The description of interior ballistics of guns are given in the paper. The mathematical model is developed for interior ballistic calculation. During the mathematical model development process geometrical properties of propellant are used as the form function. The code of the mathematical model is written in MATLAB ®. 40 mm gun firing results which got from the literature were 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 firing results. The results showed that the standard deviation of muzzle velocity and maximum pressure in the barrel was less than 4%. Therefore the modal were verified. After verification process cylindrical, single perforated cylindrical and spherical granule shapes' effects on interior ballistics were inspected with the modal.

**Keywords:** Interior ballistics, mathematical model, form function

---

\* Sorumlu Yazar /Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya - hagezer@gmail.com

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya - engint@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

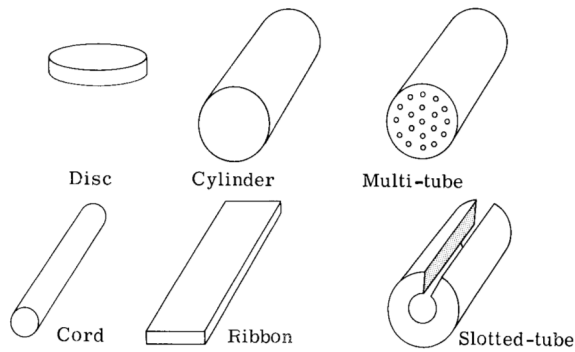
### 1.1. İç Balistiğe İlişkin Tanımlar (Definitions About Interior Ballistics)

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. Basınç, merminin ilk hareketini başlatacak seviyeye ulaştığında 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 içerisindeki mermi dinamikleri ve atış döngüsündeki namlu dinamikleri yer almaktadır [2].

İç balistik; silah ve mühimmatın tasarımı ile merminin menzilin belirlenmesinde ve hedefte meydana getireceği tahribat konularına ışık tutması açısından önem arz etmektedir.

Barutlar çeşitli kompozisyonlar, şekiller ve boyutlarda olabilmektedir. Özellikle büyük çaplı silahlarda uzun tel şeklinde, kurdele ve delikli barut taneleri kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan barut tane tipleri Şekil 1. de sunulmuştur.



Şekil 1. Yaygın olarak kullanılan barut tane şekilleri (Common shapes of propellant granules) [1]

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 (atım yatağı) 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 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.

Namlu içerisindeki maksimum basınç; genellikle mermi hareket ettikten sonra gerçekleşmektedir. Örnek olarak, 5.56 mm tüfeklerde maksimum basınç merminin, namlu boyunun %11'ine ulaştığı noktada meydana gelmektedir [3].

Maksimum basıncın elde edildiği noktadan sonra basınç düşmeye başlamaktadır. Basınç, mermi namlu ağzına geldiğinde barut toplam kimyasal enerjisinin %10-30'u mertebesindedir [3]. Orta kalibre silahlarda yanma sonucu oluşan enerjinin dağılımı Tablo 1.'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Geri tepmeli orta kalibre silahta enerji dağılımı (Energy distribution of medium calibre recoil gun) [1]

Enerji Dağılımı	Oranı (%)
Mermi hareketine harcanan enerji	32
Sürtünmeye harcanan enerji	2
İtici gazların hareketine harcanan enerji	3
Namlu ve mermiye aktarılan ısı enerjisi	20
Gazlara aktarılan ısı enerjisi	42
Merminin dönmesine ve geri tepmeye harcanan enerji	1
Toplam	100.0

## 1.2. Temel Denklemler (Basic Equations)

### 1.2.1. Yanma hızı denklemi (Burning rate equation)

Bir silah sisteminin iç balistik analizinde, barutun ne kadarının ne kadar zamanda yandığı ne kadarının gaza dönüştüğünün belirlenmesi gerekmektedir. Bunu belirlemek için barutun yanmasına yönelik birçok kanun kullanılmaktadır. Bu kanunlardan yaygın olarak kullanılan Piobert kanunudur. Piobert, yanmanın barut tanelerinde eş katmanlar halinde gerçekleştiğini kabul etmiş ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla

örtüşdüğünü ortaya koymuştur [1]. Piobert yanma kanununa ilişkin denklem aşağıda verilmiştir.

$$\frac{ds}{dt} = \beta \times P^\alpha \quad (1)$$

Bu denklemde  $ds$  yanma miktarını,  $dt$  zaman aralığını,  $\beta$  yanma oranı sabitini,  $p$  basıncı ve  $n$  ise yanma oranı basınç üssünü temsil etmektedir. Burada  $\beta$  ve  $n$  barut cinsine göre sabit hacimde barut yakılarak gerçekleştirilen neticesinde tespit edilen sabitlerdir.

### 1.2.2. Biçim fonksiyonu (Form function)

Yanma hızı denklemi, birim zamanda barut tanesinin ne kadarlık bir kısmının yandığını veya erozyona uğradığını mm/s biriminde ifade etmektedir. Bu yanma hızının tüm barut tane geometrisindeki etkisini belirlemek için biçim fonksiyonunun hesaplanması gerekmektedir. Birçok kaynaktan biçim fonksiyonu, aşağıdaki formülle ifade edilmekte ve yaygın olarak bu fonksiyon kullanılmaktadır [1] [3] [4].

$$z = (1 - f)(1 + k \times f) \quad (2)$$

Bu denklemde  $k$  biçim fonksiyonu sabiti olup, barut tane geometrisine göre alınmaktadır. Örnek olarak silindirik barut taneleri için 1 kabul edilmektedir. Yine denklemde  $f$  yanma oranını ifade etmekte olup, silindirik barutlarda yanma hızının barut tanesi çapına oranıdır. Ancak çalışmamızda daha kesin bir biçim fonksiyonunu elde etmek üzere barut tane geometrisine bağlı bir çözüm yapılmıştır.

Biçim fonksiyonu, esas itibarıyla  $dt$  zaman aralığında yanan barut kütlelerinin toplam barut kütlelerine oranıdır.

$$z = \frac{\text{yanan barut kütlesi}}{\text{toplam barut kütlesi}} \quad (3)$$

$$z = \frac{m_t}{m_{top}} \quad (4)$$

Bu denklemde,  $m_t$ ,  $t$  anında yanmış barut kütlelerini,  $m_{top}$  ise toplam barut kütlelerini temsil etmektedir. Bu denklemde kütle; yoğunluk ve hacim cinsinden ifade edilmesi durumunda denklem aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$z = \frac{m_t}{m_{top}} = \frac{\rho \times v_t}{\rho \times v_{top}} = \frac{v_t}{v_{top}} \quad (5)$$

Denklemde yer alan  $v_t$ ,  $t$  anında barut tanesinin hacmini,  $v_{top}$  ise toplam barut tanesinin hacmini ifade etmektedir. Yapılan çalışmada barut tane geometrisine bağlı olarak Denklem 5 kullanılmıştır.

### 1.2.3. Hal denklemi (Equation of state)

İdeal gazların davranışına ilişkin yaklaşım, gaz molekülleri arasındaki mesafenin büyük olmasına ve bu nedenle moleküller arasında çarpışma ve etkileşim olmadığı kabulüne dayanmaktadır. Silah içerisindeki yanma sonucunda oluşan gazlar incelendiğinde sıcaklığın yüksek seviyede olduğu, gaz moleküllerinin hızla hareket ettiği ve birbirleri arasında etkileşimin olduğu aşikârdır [3].

İç balistik çalışmalarında yanma sonucu oluşan gazların davranışını, ideal gaz olarak değerlendirmek hatalara neden olmaktadır. Düşük basınç ve yüksek sıcaklıklarda bir gazın yoğunluğu azalır ve ideal gaz gibi davranır [5]. Ancak iç balistikte çok yüksek gaz basınçları söz konusudur. Bu nedenle ideal gazlar için Van der Waals hal denklemi yetersiz kalmaktadır. İç balistik çalışmalarında, gaz moleküllerinin birbirlerine çekme kuvvetinin ihmal edildiği, ancak moleküllerin kapladığı hacmin (covolume) hesaba katıldığı Nobel-Abel Hal denklemi kullanılır [3].

$$p(v - m_g b) = m_g RT \quad (6)$$

Bu denklemde  $p$  basıncı,  $v$  sistemin hacmini,  $m_g$  gazın kütlelerini,  $R$  özgül gaz sabitini  $T$  mutlak sıcaklığı ve  $b$  gaz moleküllerinin birim kütlelerinin kapladığı hacmi ifade etmektedir [5].

### 1.2.4. Barut özgül enerjisi (Force)

Birim kütleli barutun yanması sonucu oluşan enerjiye barutun özgül enerjisi denilmektedir [3]. Barutun gücü sabit bir değer olup, adyabatik şartlarda barutun yanması sonucu tespit edilmektedir [2]. Güç sabiti, deneysel olarak barutun sabit hacimde yanması sonucu oluşan maksimum basıncın ölçülmesi ile belirlenmektedir [3].

$$\lambda = R \times T_0 \quad (7)$$

Bu denklemde  $\lambda$  barutun özgül enerjisini,  $R$  özgül gaz sabiti ve  $T_0$  adyabatik alev sıcaklığını temsil etmektedir.

### 1.2.5. Enerji denklemi (Equation of energy)

Dumansız barutun yanması sonucu enerji açığa çıkmaktadır. Bu enerji aşağıda sunulan denklemle ifade edilmektedir [1].

$$E = m \times C_v \times T_0 \quad (8)$$

Bu denklemde  $m$  yanan barut miktarını,  $C_v$  sabit hacimde özgül ısıyı,  $T_0$  adyabatik alev sıcaklığını temsil etmektedir.

## 2. MATEMATİK MODELİN OLUŞTURULMASI VE DOĞRULANMASI (DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL AND VERIFICATION)

### 2.1. Kabuller (Assumptions)

Matematik model oluşturulurken;

- Yanmanın her barut tanesinde aynı anda başladığı ve eşit katmanlar halinde gerçekleştiği,
- Barut gazlarının akışının tek boyutlu, viskoz olmayan ve sıkıştırılabilir olduğu,
- Barut gaz karışımının basınç ve sıcaklık arasındaki ilişkinin Noble-Abel hal denklemi ile tanımlandığı,
- Barut tanelerinin tamamının aynı boyut ve konfigürasyonda olduğu,
- Barut tanelerinde tüm deliklerin simetrik yerleştirildiği ve et kalınlığının eşit olduğu,
- Bir birim barutun yanması sonucu aynı oranda enerji açığa çıktığı ve eşit oranda gazları ısıttığı,
- Sürtünme ve merminin dönüşüne harcanan enerjinin efektif mermi kütlesi yaklaşımı ile modele dâhil edildiği,
- Geri tepmenin ihmal edilebilir seviyede düşük olduğu,
- Prosesin izentropik olduğu kabulleri yapılmıştır.

### 2.2. Matematik Model (Mathematical Model)

İç balistik olayların matematik modelinde temel olarak, barut tanesinin yanması, yanmanın tüm baruta uygulanması, basınç oluşumu, basıncın mermiyi hareket ettirmesi ve merminin aldığı yola ilişkin denklemlerin elde edilmesi gerekmektedir.

Barut tanesinde yanma hızı ile ilgili denklem olarak, bu makalenin önceki bölümünde de bahsedildiği üzere Piobert yanma kanunu denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{ds}{dt} = \beta \times p_A^n \quad (9)$$

Barut tane yanma hızının tüm baruta uygulanması için kullanılan biçim fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$z = \frac{v_t}{v_{top}} \quad (10)$$

Barutun yanması sonucunda namlu içerisinde oluşan basınca ilişkin denklem aşağıda sunulmuştur.

$$p_A = \frac{c \times \lambda \times z - \left(\frac{1}{2}\right)(\gamma - 1)(1 + \chi)(m_e \times v^2)}{V_c(t) - c \times \left[\left(\frac{1}{\rho_s}\right) + z(t) \left(\eta - \left(\frac{1}{\rho_s}\right)\right)\right]} \quad (11)$$

Bu denklemde;  $p_A$  ortalama basıncı,  $c$  barut kütlelerini,  $\lambda$  barutun özgül enerjisini,  $z$  biçim fonksiyonunu,  $\gamma$  özgül ısılar oranını,  $\chi$  düzeltme katsayısını,  $m_e$  efektif kütleyi,  $v$  merminin hızını,  $V_c(t)$  t anında yanma odası hacmini,  $\rho_s$  katı fazdaki barutun yoğunluğunu ve  $\eta$  gaz moleküllerinin birim kütlelerinin kapladığı hacmi (covolume) göstermektedir.

Basıncın merminin hareketine olan etkisini tespit etmek üzere hızın zamana bağlı değişimini veren aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{a}{m}(p_A - p_a) \quad (12)$$

Bu denklemde;  $dv$ ,  $dt$  zaman aralığında mermi hızında meydana gelen değişimi,  $a$  merminin taban alanını,  $p_A$  namlu içerisindeki ortalama basıncı  $p_a$  ise atmosfer basıncını ve  $m$  merminin kütlelerini temsil etmektedir.

### 2.3. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

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 [6].

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 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. 40 mm silahın iç balistik verileri (Interior ballistics data of 40 mm gun) [6] [7]

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

Deneysel çalışma sonucunda ölçülen maksimum basınç ve mermi ilk hızı (namlu çıkış hızı) değerleri Tablo 3.'de sunulmaktadır.

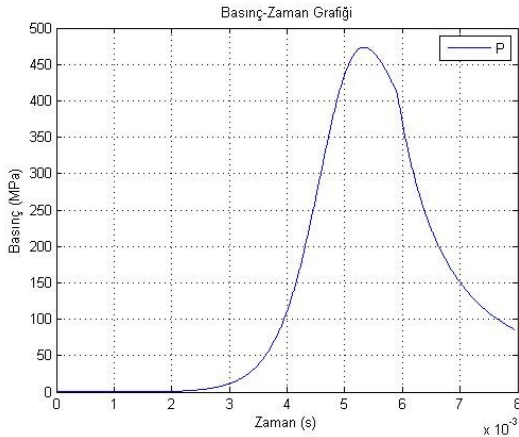
Tablo 3. Deneysel sonuçlar (Experimental results ) [6]

Atım Nu.	Barut Kütlesi (g)	Mermi Kütlesi (g)	Maksimum Basınç (MPa)	İlk Hız (m/s)
1	437.95	789.05	420	1215
7	436.87	789.07	418	1229
11	437.77	789.94	428	1234

#### 2.4. Matematik Modelin Doğrulanması (Mathematical Modal Verification)

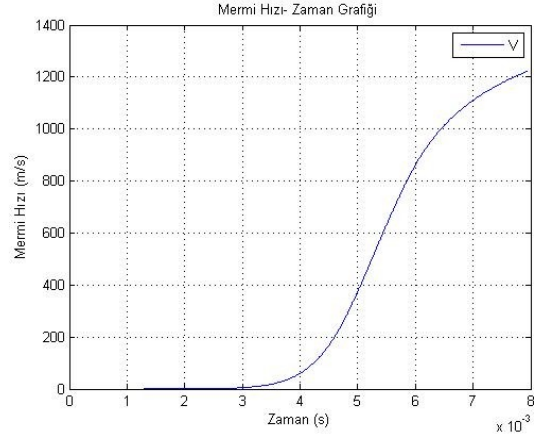
Yapılan çalışmada geliştirilen matematik modelin, MATLAB programında kodu yazılmıştır. Bu kod kullanılarak ve deneysel çalışmadaki silah, mermi, barut ve diğer veriler kullanılarak sonuçlar alınmıştır. Simülasyon sonuçlarının grafik gösterimlerine kod içerisinde yer verilmiştir. Buna göre kodun çalıştırılması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

Şekil 2.'de namlu içerisinde oluşan basıncın zamana bağlı eğrisi yer almaktadır. Buna göre maksimum basınç 5.2 ms sürede gerçekleşmiştir.



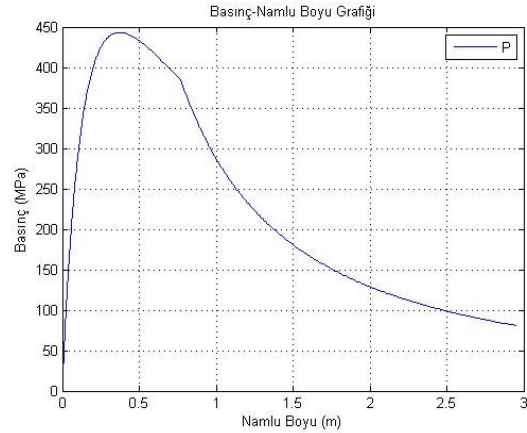
Şekil 2. Basınç-Zaman Eğrisi (Pressure-Time Curve)

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



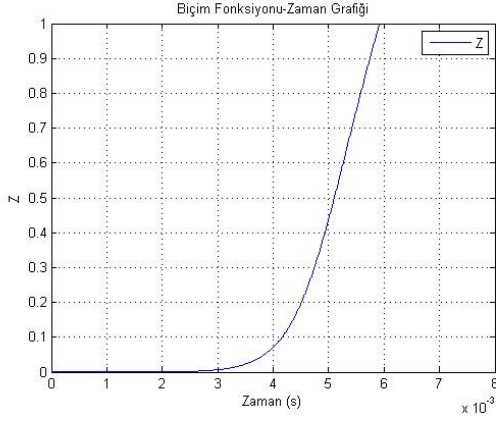
Şekil 3. Mermi Hızı-Zaman Eğrisi (Velocity-Time Curve)

Şekil 4.'de merminin namlu boyunca hareketi esnasında basınç değişimi verilmektedir. Buna göre maksimum basınç, merminin namlu içerisinde yaklaşık 0.5 m mesafeye geldiğinde gerçekleşmektedir. Eğri incelendiğinde mermi yaklaşık 0.8 m mesafe ilerlediğinde eğrinin karakteristiğinde bir değişim gözlenmektedir. Bu nokta barutun tamamının yandığı noktayı göstermektedir.



Şekil 4. Basınç-Namlu Boyu Eğrisi (Pressure-Travel Curve)

Şekil 5.'de biçim fonksiyonunun zamana göre değişim eğrisi yer almaktadır. Biçim fonksiyonunun yanan 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 5. Biçim Fonksiyonu Zaman Eğrisi (Form Function-Time Curve)

Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslaması Tablo 4.'de sunulmuştur.

Tablo 4. Nümerik ve deneysel sonuçların kıyaslanması (Comparing numerical and experimental results)

Özellikler	Nümerik	Test	Fark	Fark (%)
Namlu çıkışında merminin hızı	1222.7	1234	11.3	0.9
Maksimum ortalama basınç	443.4	428	15.4	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 doğrulanması yapılmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

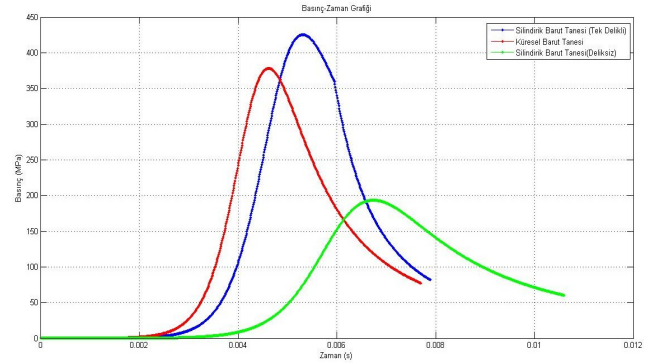
Matematik model kullanılarak farklı geometrideki barut tanelerinin iç balistiğe etkileri incelenmiştir. Bununla ilgili olarak değerlendirmeye alınan barut tane geometrileri Tablo 5.'de gösterilmiştir.

Tablo 5. İncelenen barut tane geometrileri (Inspected propellant granule geometry)

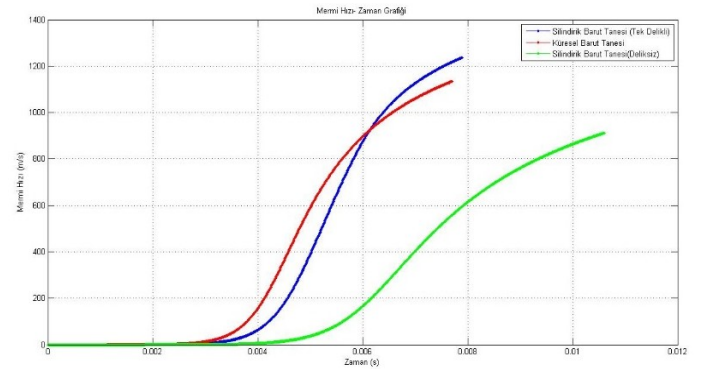
Tane Şekli	Çapı db (mm)	Delik çapı dk (mm)	Boyu l (mm)
Silindirik Barut Tanesi (deliksiz)	3.738	-	400
Silindirik Barut Tanesi (tek delikli)	3.738	0.945	400
Küresel	3.738	-	-

Tablo 5.'de belirtilen barut tane geometrileri geliştirilen iç balistik kodunda çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuçların grafik gösterimi Şekil 6. ve Şekil 7.'de gösterilmektedir.



Şekil 6. Barut tane geometrisi basınca etkisi (Effect of the propellant granule geometry)



Şekil 7. Barut tane geometrisinin ilk hıza etkisi (Effect of the propellant granule geometry)

Şekil 6. ve Şekil 7. 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 6.'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Delik etkisinin analizi (Effect of perforation)

Tane Şekli	Mermi Çıkış Hızı (m/s)	Maksimum Ortalama Basınç (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 açılmış barut tanesinin et kalınlığının düşmüş olduğu için silindirik barut tanesi daha kısa sürede yanmaktadır.

Yanma, hızlı gerçekleştiği için basınç hızla yükselmekte ve mermi namluyu daha yüksek hızla terk etmektedir.

Diğer bir değerlendirme küresel barutlar üzerine gerçekleştirilmiştir. Küresel barut, barut üretim teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak son yıllarda daha çok tercih edilen bir barut tane geometrisi çeşididir. Tercih edilmesinde gerekçe Şekil 6. ve Şekil 7. incelendiğinde rahatlıkla görülmektedir. Aynı çaptaki silindirik bir barut tanesine göre yanma hızı daha yüksek olmakla birlikte elde edilen basınç artışı daha kontrollü gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, küresel barut tanesi kullanılarak mermi çıkış hızında da artış elde edileceği görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

İç balistik bilimi, silah ve mühimmat tasarımında yüksek maliyetli atışlar yerine nümerik olarak ihtiyaç duyulan değerleri tespit etmek üzere kullanılmaktadır. Silah ve mühimmat tasarımında yüksek mermi çıkış hızının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Yüksek mermi çıkış hızı, uzun menzil elde edilmesi için gerekmektedir. Ancak mermi çıkış hızının yükseltilmesi namlu içerisindeki basıncın yükseltilmesi ile gerçekleştirilmektedir. İç balistik çalışmalarında amaç, kontrollü bir yanma ile düşük basınçta yüksek mermi çıkış hızının elde edilmesidir.

Yapılan çalışma ile 40 mm silah sistemine yönelik silah iç balistik modeli oluşturulmuştur. Matematik modele yönelik olarak kod yazılmış ve doğrulanması yapılmıştır. Kod kullanılarak yapılan incelemelerde silindirik barut tanesi üzerinde delik açılmasının yanma hızını ve mermi çıkış hızını artırdığı gösterilmiştir. Çalışmada son yıllarda daha çok tercih edilen küresel barut geometrisinin yanma hızını olumlu etkilediği ve mermi çıkış hızını artırdığı gözlenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. M. Moss, D. W. Leeming ve C. L. Farrar, *Military Ballistics*, London: Brassey's, 1995.
- [2] D. E. Carlucci ve S. S. Jacobson, *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [3] H. Krier ve M. Summerfield, *An introduction to gun interior ballistics and a simplified ballistic code*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1979.
- [4] J. Corner, *Theory of the Interior Ballistics of Guns*, New York: John Wiley & Sons, 1950.
- [5] Y. A. Çengel ve M. A. Boles, *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, İstanbul: McGraw Hill, 1996.

- [6] Woodley, P. Carriere, J. Franco, X. Nussbaum, Chabaux ve B. Longuet, "Comparison of Internal Ballistics Simulations of 40 mm Gun Firings," 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, 2007.
- [7] J. Jang, H. G. Sung, T. S. Roh ve D. W. Choi, "Numerical analysis of interior ballistics through eulerian-lagrangian approach," *Journal of Mechanical Science and Technology*, cilt 8, no. 27, pp. 2351-2357, 2013.