



Vallier-Heydenreich Metodu ile Silahların Namlu İç Balistiğinin İncelenmesi

Çiğdem SUSANTEZ*

Öz

Namlu iç balistiği namlu tasarımında önemli bir rol oynamakla birlikte, namlu iç balistik parametrelerinin tespiti daha güçlü silahların ve yüksek performanslı silah namlularının imalatı için gereklidir. Milisaniyeler mertebesindeki çok kısa sürelerde namlu içerisinde basınç değeri maksimum değerine ulaşmakta ve namlu içerisindeki mermi, hızını üstel olarak arttırarak namluyu terk etmektedir. Namlu iç balistiğinin incelenmesinde Vallier-Heydenreich metodu bilinen bir metot olmasına rağmen bu konuda yapılan yayınların sayısı azdır. Bu çalışmada öncelikle 7,62 mm (tüfek namlusu) ve 9 mm (tabanca namlusu) kalibre namlular için bilinen namlu uzunluğu, maksimum basınç, namlu ağız hızı, barut hakkı, mermi kütlesi ve çapı verilerinden yararlanarak namlu içinde merminin konumu, hızı, namlu iç basıncı ve iç balistik zamanı birbirlerine bağlı olarak tespit edilmiştir. Sonrasında ise incelenen namlular için elde edilen iç balistik parametrelerinin birbirlerine bağlı eşitlikleri elde edilmiş ve sunulmuştur. Diğer bir ifadeyle, 7,62 mm ve 9 mm kalibre namlular için Vallier-Heydenreich metodu kullanılarak $P-t$, $V-S$, $V-t$, $P-S$, $P-V$ ile $S-t$ grafikleri elde edilmiş ve iç balistik parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri $P(t)$, $V(S)$, $V(t)$, $P(S)$, $P(V)$ ve $S(t)$ şeklinde formüle edilerek literatüre kazandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İç Balistik, Namlu, Vallier-Heydenreich Metodu.

* Dr.Öğr.Üyesi, Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
cigdemsusantez@trakya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2449-2551

Geliş Tarihi/Received : 15.10.2019
Kabul Tarihi/Accepted : 09.03.2020
Araştırma Makalesi/Research Article
DOI:

Investigation of Interior Ballistics of Gun Barrels with Vallier-Heydenreich Method

Abstract

Barrel internal ballistics plays an important role on the design of barrels and determination of internal ballistic parameters of the barrel is necessary for the manufacture of more powerful weapons and barrels with high performance. The pressure value inside the barrel reaches its maximum value in milliseconds and the projectile in the barrel leaves the barrel by increasing its speed exponentially. Although the Vallier-Heydenreich method is a well known method for the investigation of barrel internal ballistics, there are few publications on this subject. In this study, primarily, the position, velocity of the projectile inside the barrel, barrel inner pressure and interior ballistic time were determined in relation to each other for 7.62 mm (rifle barrel) and 9 mm (handgun barrel) caliber barrels by making use of the known data of barrel length, maximum pressure, muzzle velocity, powder charge, mass and diameter of the projectile. Then, the interrelated equations of internal ballistic parameters for the investigated barrels were obtained and presented. In other words, $P-t$, $V-S$, $V-t$, $P-S$, $P-V$ and $S-t$ graphs were obtained using Vallier-Heydenreich method for 7.62 mm and 9 mm caliber barrels and the relationships between internal ballistic parameters with each other were formulated as $P(t)$, $V(S)$, $V(t)$, $P(S)$, $P(V)$ and $S(t)$.

Keywords: Interior Ballistics, Barrel, Vallier-Heydenreich Method.

Giriş

Silahta istenen önemli özelliklerin başında hafif olması, dakikada fazla sayıda atış yapılabilmesi, ömrünün uzun ve dayanıklı olması ile tahrip gücünün yüksek olması gelmektedir. Tahrip gücünün yüksek olması ise mermi hızı ile orantılıdır. Mermi hızı ise namlu boyu ve namlu iç basıncı ile artmaktadır. Namlu iç basıncının maksimum değeri ise namlu mukavemet hesaplarında dikkate alınması gereken önemli bir etkidir (Işık, 2016). Diğer yandan merminin hareketini ve silahın ömrünü etkileyen fiziksel olaylar namlu içerisinde gerçekleştiğinden, namlu silahın ana parçalarındandır. Bu gibi nedenlerden ötürü

silah tasarımında namlu iç balistik verilerinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir.

Vallier-Heydenreich metodunu kullanarak literatüre geçmiş çalışmaların sayısı azdır. Deng, Sun ve Chiu (2012) ve Deng, Sun, Chiu ve Chen (2014)'in namlu ve mermi üzerindeki gerilmeleri simüle eden nümerik çalışmaları ile Deng, Sun ve Chiu (2015)'nin 5,56 mm kalibre namlulu tüfeğin yapısal davranışını simüle ettikleri nümerik çalışmalarında yanma odası basıncı Vallier-Heydenreich metodu ile tespit edilmiştir. Deng vd. (2012)'nin yaptığı çalışmadan 5,56 mm kalibre namlu için, Deng vd. (2014)'ün yaptığı çalışmadan ise 9 mm kalibre namlu için, deneysel olarak elde edilmesi güç olan, merminin hızı, açısal hızı, ivmesi, mermi ve namlu üzerindeki gerilmeler gibi veriler elde edilmiştir. Deng vd. (2015) elastik deformasyon, bağlantı boşluğu ve darbe etkilerini hesaba kattıkları çalışmalarında 5,56 mm kalibre namlulu tüfeğin kinematik durumunu ve gerilmeleri elde etmişlerdir. Cronemberger, Júnior, Gois ve Caldeira (2014) 7,62 mm kalibre namlulu tüfeğin iç balistiğini hem Prodas yazılımı, lumped parametre ve Vallier-Heydenreich metodlarını kullanarak teorik olarak hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Prodas yazılımı ve lumped parametre metodu ile bulunan maksimum basınç değerinin deneysel sonuca en yakın değer olduğunu, namlu çıkış hızı için ise Vallier-Heydenreich metodunun deneylerle uyumlu en iyi sonucu verdiğini görmüşlerdir. Şentürk, Işık ve Evcı (2016), 7,62 mm kalibre namlulu G3 piyade tüfeğinin iç balistiğini termo-mekanik bir yaklaşımla deneysel, nümerik ve analitik metotlarla inceledikleri çalışmalarında namlu iç basıncını, namlu içerisinde mermi hızını ve konumunu Vallier-Heydenreich metoduyla belirlemişlerdir. Ayrıca namludaki sıcaklık dağılımı ve gerilmeleri zamana bağlı ve üç boyutlu olarak elde etmişlerdir. Özgüder, Özbay ve Adin (2017) M101 top namlusunun hafifletilmesi üzerine yaptıkları nümerik çalışmalarında balistik değerlerin karşılaştırılması amacıyla Vallier-Heydenreich metodunu kullanmışlardır. Modellerini sonlu elemanlar programında analiz eden Özgüder vd. (2017), yüksek gerilme değerlerinin oluştuğu bölgeleri dikkate alarak namlu cidar kalınlığını optimize etmişlerdir. Evcı ve Işık (2018) termo-mekanik bir yaklaşımla deneysel, analitik ve nümerik metotlar kullanarak 7,62 mm kalibre namlunun iç balistiği üzerine yaptıkları çalışmalarında Vallier-Heydenreich metodu ile namlu iç basıncını, Noble-Abel denklemiyle de gaz sıcaklığını tespit ederek namludaki sıcaklık dağılımını nümerik olarak elde etmişlerdir. Çift bazlı 7,62x51 mm standart NATO mühimmatını -54°C, -35°C, -20 °C, 0°C, 21°C, 35°C ve 54°C'de

şartlandırarak analizlerini gerçekleştiren Evcı ve Işık (2018), namlu iç basıncı ve sıcaklığının mühimmat sıcaklığı ile arttığı, bu nedenle namludaki gerilmelerde de artış gözlemlendiği sonucuna varmışlardır.

İç balistiğin özel bir konu olması ve çok az sayıda teknik elemanı ilgilendirmesine (Öztürk, 1984) rağmen literatürde iç balistik üzerine yapılmış çalışmalar mevcuttur. Brode ve Enstrom (1970) silahın iç balistik verilerini bulan nümerik bir metot ileri sürerek bunu 5 inç/54 kalibre denizci silahına uygulamışlardır. İleri sürdükleri metot kolayca modifiye edilebilecek bir metot olup, namlu boyunca gaz dinamiği hakkında bilgi vermektedir. Hansen ve Heiney (1987) yaptıkları analitik ve deneysel çalışmalarında namlunun dip kısmı ile mermi gerisindeki yoğunluk ve basınç gradyanına, mermi gerisinde ivmelenen gazların neden olduğunu ileri sürmüşler ve namlu içerisinde partikül ivmelenmesinin zamana bağlı değişimini elde etmişlerdir. Franco ve Peter (2001) ısı ve momentum transferindeki analogiyi kullanarak namludaki ısı transfer problemini analiz ettikleri çalışmalarında, mermi hızı, namlu ortalama basıncı ve ortalama sıcaklık verilerini iç balistik kod yardımıyla tespit etmişlerdir. Değirmenci (2015a) 5,56 ve 7,62 mm kalibre namlularda farklı barut ve mermi ağırlıkları için ölçüm verilerine eğri uydurarak hız profilini, hız profilinden ise namlu iç basıncını konuma bağlı olarak elde etmiştir. Değirmenci (2015b) 7,62 mm çaplı fişek içerisine yerleştirilen farklı tane çaplarında ve sıcaklıklardaki barut ile yaptığı testler sonucunda namlu iç basıncı, yanma hızı ve mermi hızının parçacık boyutunun küçülmesi ve yakıt sıcaklığının artması ile arttığını görmüştür. Değirmenci, Evcı, Işık, Macar, Yılmaz, Dirikolu ve Çelik (2016) 7,62 mm kalibre NATO standart tüfek namlusu üzerinde yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmalarında barutun başlangıç sıcaklığını arttırmanın ve barut tanecik boyutunu azaltmanın namlu sıcaklığını, basıncını ve mermi hızını arttığı sonucunu elde etmişlerdir. Işık (2016) geliştirdiği namludaki basınç dağılımı ve mermi hızını veren modeli 7,62 mm kalibre namlu üzerinde deneysel olarak doğrulamıştır. Balistik parametrelerden mermi hızı, namlu iç basıncı, gaz sıcaklığı ve ısı taşınım katsayısının sıcaklık ile arttığı, mermi hızı, namlu iç gaz basıncı ve gaz sıcaklığının maksimum değerlerinin ise barut kütlesi ile arttığını görmüştür. Gezer ve Engin (2016) 40 mm kalibre namlulu silah sistemi için geliştirdikleri iç balistik modeliyle deliksiz silindirik, tek delikli silindirik ve küresel barut tanelerinin iç balistiğe etkilerini incelemişler, silindirik barut üzerine delik açılmasının namlu iç basıncını, yanma hızını ve mermi çıkış hızını arttırdığı sonucunu elde etmişlerdir. Küresel barut kullanıldığında deliksiz silindirik baruta

nazaran daha yüksek namlu iç basıncı ve mermi çıkış hızı değerlerine ulaşılmıştır. Akçay (2017) küresel ve tek delikli barut geometrisi için yaptığı, Resal eşitliğinin nümerik çözümüne dayanan çalışmasında maksimum basınç, namlu iç basıncının konum ve zaman ile değişimi, namlu çıkış hızı gibi balistik veriler elde etmiş, bunların literatür ve deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğunu görmüştür.

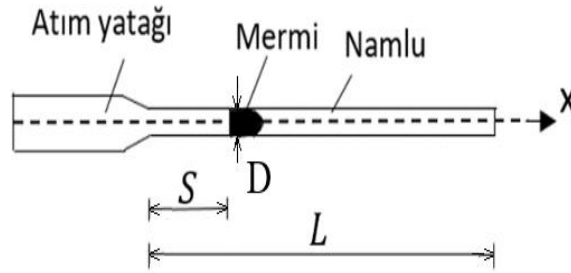
Namludaki maksimum basınç, namlu çıkış hızı, namlu boyu ve ortalama basıncın tayini için gerekli diğer büyüklüklerin bilinmesi durumunda Vallier-Heydenreich metodu çeşitli silahların iç balistik verilerinin belirlenmesinde kullanılan temel bir metottur. Literatürde bu metodu kullanarak yapılan yayın sayısı az olmakla beraber metodun detaylı analizini sunan yayın sayısı yok denecek kadar azdır. Bu çalışmanın amacı Vallier-Heydenreich metodunun detaylı analizi ile 7,62 mm ve 9 mm kalibre namlulu silahların iç balistiğinin araştırılması olup bu çalışma ile literatüre katkı sağlamak hedeflenmektedir.

Vallier-Heydenreich metodunun silahın iç balistiği için geliştirilen diğer metotlardan farkı ampirik olarak elde edilip tablolar halinde verilen fonksiyonları kullanmasıdır. Diğer iç balistik metotlarından lumped parametre metodu ise cebirsel denklemlere dayanmaktadır (Cronemberger vd., 2014). Ticari bir yazılım olan Prodas yazılımı ise Baer-Frankle metoduna dayanmaktadır (Erline 2001; Prodas 2002). Cronemberger vd., (2014)'nin de ifade ettiği gibi Vallier-Heydenreich metodu iç balistik zamanının başına ait balistik verileri vermemesine rağmen, kullanışlı ve pratik bir metottur. Vallier-Heydenreich metodunda ampirik olarak elde edilmiş, basınç oranına bağlı olarak verilen fonksiyonlar kullanılarak iç balistik parametreleri tespit edilir. Sonra söz konusu iç balistik parametreleri ve ampirik olarak elde edilmiş, boyutsuz konum parametresine bağlı fonksiyonlar kullanılarak namlu iç basıncı, mermi hızı ve iç balistik zamanı bulunur. Bu çalışmada Vallier-Heydenreich metodu ile namlu iç balistiğinin incelenmesi Matlab programında yazılan kod ile gerçekleştirilmiştir. Bu hususta öncelikle Matlab programında yazılan kod içerisinde kullanılmak amacıyla, Vallier-Heydenreich fonksiyonlarının basınç oranı ve boyutsuz yol parametresine bağlı fonksiyonları Sigma Plot programında eğri uydurma yöntemiyle elde edilmiştir. Sonrasında ise söz konusu fonksiyonlar kullanılarak Matlab programında yazılan kod ile 7,62 mm (tüfek namlusu) ve 9 mm (tabanca namlusu) kalibre namlular için namlu içinde merminin konumu, hızı, namlu iç basıncı ve iç balistik zamanı birbirlerine bağlı olarak tespit edilmiş ve elde edilen söz konusu iç balistik

parametrelerinin birbirlerine bağlı fonksiyonel ilişkileri eğri uydurma yöntemiyle formüle edilerek sunulmuştur.

Materyal ve Metot

Şekil 1’de hafif silah namlusunun geometrisi görülmektedir. D mermi çapını, S namlu içerisinde merminin konumunu, L ise namlu uzunluğunu göstermektedir. Bu çalışma hafif silah sınıfından 7,62 mm ve 9 mm kalibre namlulu silahların iç balistik parametrelerinin birbirlerine bağlı ilişkilerinin elde edilmesini amaçlamakta olup, bu hususta Vallier-Heydenreich metodu kullanılmıştır.



Şekil 1: Hafif Silah Namlu Geometrisi

Tabloların kullanılmasına dayanan Vallier-Heydenreich metodunda kullanılan temel ifadeler denklem (1)-(11)’de verilmektedir (Öztürk, 1984), (Cronemberger vd., 2014), (Oerlikon-Buhrle AG, 1981). Namlu içi ortalama basınç P_{ort} ise eşitlik (1)’de verilmektedir.

$$P_{ort} = 2 \left(\frac{M + 0,5m_p}{L\pi D^2} \right) V_o^2 \quad (1)$$

Burada L namlu uzunluğu, D mermi çapı, M mermi kütlesi, m_p sevk barutu kütlesi ve V_o merminin namlu ağzından çıkış hızıdır.

Namlu içi ortalama basınç P_{ort} ve maksimum basınç P_m ’e bağlı basınç oranı η eşitlik (2)’de, namlu içerisinde basıncın maksimum olduğu anda merminin konumu S_m , ateşlenmeden sonra geçen süre t_m ve mermi hızı V_m ise basınç oranı η ’ya bağlı olarak sırasıyla eşitlik (3), (4) ve (5)’te görülmektedir. Toplam iç balistik zamanı t_o ve mermi namludan çıktığı anda namlu ağız basıncı P_o sırasıyla

eşitlik (6) ve (7)' de verilmekte olup, burada $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\Phi(\eta)$, $\Gamma(\eta)$ ve $\Pi(\eta)$ fonksiyonları ise Vallier-Heydenreich tablolarından elde edilebilmektedir. Tablolarda verilen bu fonksiyonlar basınç oranı η 'ya bağlı olup ampirik olarak elde edilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{ort}}{P_m} \quad (2)$$

$$S_m = L \Sigma(\eta) \quad (3)$$

$$t_m = \frac{2 L \Theta(\eta)}{V_o} \quad (4)$$

$$V_m = V_o \Phi(\eta) \quad (5)$$

$$t_o = \frac{2 L \Gamma(\eta)}{V_o} \quad (6)$$

$$P_o = P_{ort} \Pi(\eta) \quad (7)$$

S namlu içerisinde merminin konumu olmak üzere, eşitlik (8)'de verilen boyutsuz konum parametresi λ , namlu üzerinde ölçülen maksimum basınç P_m , yukarıdaki eşitliklerden elde edilen V_m ve t_m değerleri ile Vallier-Heydenreich tablolarından elde edilen $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ ve $\delta(\lambda)$ fonksiyonları kullanılarak namlu iç balistik parametrelerinden basınç P , mermi hızı V ve iç balistik zamanı t sırasıyla eşitlik (9), (10) ve (11)'den bulunur. $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ ve $\delta(\lambda)$ fonksiyonları boyutsuz konum parametresi λ 'ya bağlı olup ampirik olarak elde edilmiş fonksiyonlardır.

$$\lambda = \frac{S}{S_m} \quad (8)$$

$$P = P_m \psi(\lambda) \quad (9)$$

$$V = V_m \varphi(\lambda) \quad (10)$$

$$t = t_m \delta(\lambda) \quad (11)$$

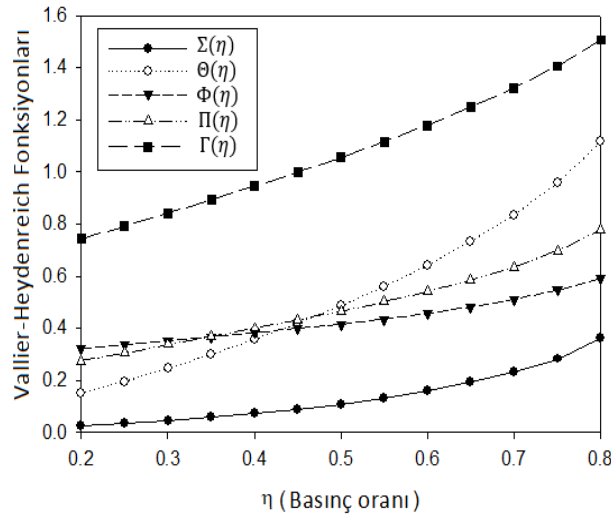
Çalışmada ihtiyaç duyulan temel büyüklükler Tablo 1'de verilmektedir. Söz konusu parametreler ilgili literatürden alınmış olup maksimum basınç P_m namlu üzerinden (Öztürk, 1984), namlu çıkış hızı V_o ise Doppler radar sistemi ile (Değirmenci, 2015a) ölçülebilir.

Balistikte çapı ifade etmek için kalibre terimi kullanılır. Kalibre ateşli silahlarda namlu iç çapını ifade ederken, mühimmat için merminin çapını ifade eder (F.S.C., 2019).

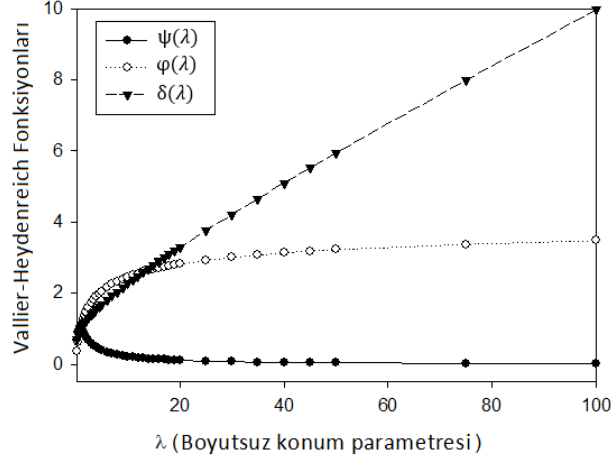
Tablo 1: İncelenen Silah ve Mühimmata Ait Büyüklükler
(Dyckmans, 2007; Millisavunma.com, 2017; Özyılmaz, 2010)

Kalibre	Namlu Boyu L (m)	Maksimum Basınç P_m (MPa)	Namlu Çıkış Hızı V_o (m/s)	Barut Hakkı m_p (kg)	Mermi Kütlesi M (kg)	Mermi Çapı D (m)
7,62 mm	0,511	380,106	838	0,003	0,00965	0,00762
9 mm	0,078	285	370	0,0005	0,008	0,009

Öncelikle (Öztürk, 1984)'de verilen Vallier-Heydenreich fonksiyonlarından $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\Phi(\eta)$, $\Gamma(\eta)$ ve $\Pi(\eta)$ 'nin basınç oranı η 'ya bağlı değişimleri ile $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ ve $\delta(\lambda)$ 'nin boyutsuz konum parametresi λ 'ya bağlı fonksiyonel ilişkileri Sigma Plot programı kullanılarak eğri uydurma yoluyla elde edilmiştir. Söz konusu ilişkiler Şekil 2 ve 3'te sunulurken, fonksiyonel bağıntılar eşitlik (12)-(19)'da verilmiştir. Ampirik olarak elde edilip tablolar halinde verilen Vallier-Heydenreich fonksiyonlarının bu şekilde formüle edilmesiyle, Matlab kodunun içerisine aktarılmaları sağlanmıştır.



Şekil 2: $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\Phi(\eta)$, $\Pi(\eta)$ ve $\Gamma(\eta)$ 'nin η ile değişimi



Şekil 3: $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ ve $\delta(\lambda)$ 'nın λ ile değişimi

$$\Sigma(\eta) = -0,08 + 0,7830\eta - 1,6831\eta^2 + 1,7277\eta^3 \quad R^2=0,9988 \quad (12)$$

$$\Theta(\eta) = -0,1188 + 1,645\eta - 2,1198\eta^2 + 2,4732\eta^3 \quad R^2=0,9997 \quad (13)$$

$$\Phi(\eta) = 0,2215 + 0,6696\eta - 1,0707\eta^2 + 1,0117\eta^3 \quad R^2=0,9998 \quad (14)$$

$$\Pi(\eta) = 0,0659 + 1,3633\eta - 2,0408\eta^2 + 1,8042\eta^3 \quad R^2=0,9997 \quad (15)$$

$$\Gamma(\eta) = 0,5033 + 1,3828\eta - 1,2161\eta^2 + 1,3124\eta^3 \quad R^2=0,9999 \quad (16)$$

$$\psi(\lambda) = \frac{2,16}{\lambda} e^{-0,5 \left(\frac{\ln\left(\frac{\lambda}{6,5696}\right)}{1,4651} \right)^2} \quad R^2=0,9932 \quad (17)$$

$$\varphi(\lambda) = 0,201 + 1,6893(1 - e^{-0,5368\lambda}) + 1,5339(1 - e^{-0,0449\lambda}) \quad R^2=0,9987 \quad (18)$$

$$\delta(\lambda) = 0,6953 + 31,5218(1 - e^{-0,0032\lambda}) + 0,6165(1 - e^{-0,3327\lambda}) \quad R^2=0,9999 \quad (19)$$

Bulgular ve Tartışma

Namlu içerisinde maksimum basınca ulaşıldığında merminin namlu içerisindeki konumu S_m , ateşlemeden sonra geçen süre t_m ve bu andaki mermi hızı V_m büyüklükleri ile toplam iç balistik zamanı t_o ve mermi namludan çıktığı anda namlu ağız basıncı P_o büyüklükleri Tablo 2'de verilmektedir. Analizler Vallier-Heydenreich tablolarında verilen fonksiyonlara eğri uydurma yoluyla yapıldığından, eşitlik (6)'da verilen t_o ile eşitlik (11)'de verilen zaman değerinin

Matlab programında elde edilen son değeri arasında ms mertebesinde noktadan sonra ikinci basamakta farklılık görülebilmektedir.

Tablo 2: Silahların İç Balistik Değerleri

Kalibre	$S_m(mm)$	$t_m(ms)$	$V_m(m/s)$	$t_o(ms)$	$P_o(MPa)$
7,62 mm	44,8	0,50	332,6027	1,21	72,5519
9 mm	5,8	0,15	141,4179	0,39	45,2735

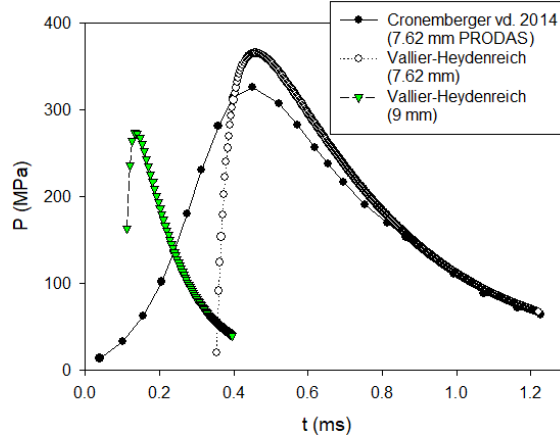
Elde edilen ilgili fonksiyonel bağıntılar kullanılarak ve Matlab programında oluşturulan kod ile merminin namlu içerisindeki konumu S , mermi hızı V , namlu içi basıncı P ve zaman t balistik parametreleri 7,62 mm ve 9 mm kalibre namlulu silahlar için elde edilmiştir. Şekil 4, 5 ve 6'da 7,62 mm kalibre namlulu silah için elde edilen iç balistik verilerinin literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Analiz sonuçları ile literatür arasında olan ufak farklılıkların nedeninin Tablo 1'de verilen giriş parametrelerindeki ufak farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4'te 9 mm kalibre namlulu silahın maksimum basınca 7,62 mm kalibre namlulu silahtan daha kısa sürede ulaştığı görülmektedir. Şekil 5 ise namlu eksenini boyunca merminin üstel olarak hız kazandığı ve namlu uzunluğu arttıkça namlu çıkış hızının da artacağı sonucunu sergilenmektedir. Şekil 6'dan da görüleceği gibi 9 mm kalibre namlulu silahta 7,62 mm kalibre namlulu silaha göre namlu boyu daha kısa olduğundan iç balistik zaman daha kısa ve ulaşılan maksimum hız değeri de daha düşüktür. Şekil 7 ve 8'de incelenen silahlarda sırasıyla namlu iç basıncı ve mermi konumu ilişkisi ile namlu iç basıncı ve mermi hızı ilişkisi verilmekte olup, Şekil 4, 7 ve 8'den açıkça görülebildiği gibi 7,62 mm kalibre namlulu silahta daha yüksek basınç değerlerine erişilmiştir. Bu ise silahın barut hakkı ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 9'da ise mermi konumunun zamanla lineere yakın bir artış gösterdiği görülmektedir.

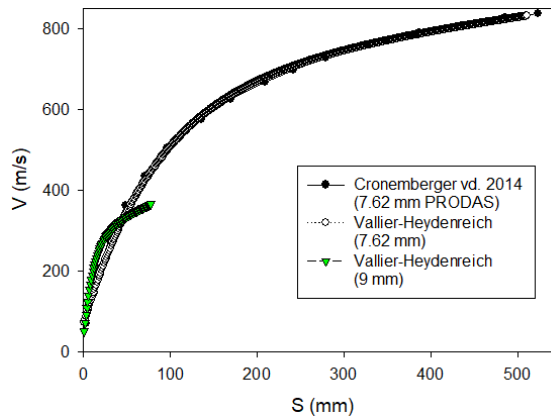
Şekil 4, 6 ve 9'da görüldüğü gibi Vallier-Heydenreich metoduyla iç balistik zamanın başında balistik parametreler hesaplanamamaktadır. Diğer yandan 9 mm kalibre namlulu silah için analizler daha önceki zamanlarda başlamıştır. Burada eşitlik (11)'de verilen Vallier-Heydenreich metoduyla zamanın hesaplanmasında $\delta(\lambda)$ fonksiyonu ve t_m süresi etkilidir. Şekil 3'te görüldüğü gibi $\delta(\lambda)$ fonksiyonu λ ile artış, dolayısıyla S_m ile azalma göstermektedir. Bu çalışmada incelenen 9 mm kalibre namlulu silahın S_m değeri daha küçük (dolayısıyla λ değeri

daha büyük) olmasına rağmen t_m süresi 3,33 kat daha küçük olduğundan analiz zamanı daha önce başlamaktadır.

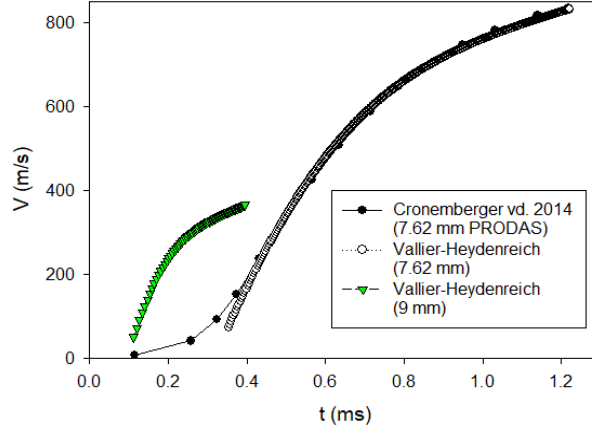
İç balistik parametrelerinin birbirleriyle fonksiyonel olarak ilişkilerinin formüle edilmesi iç balistik çalışmalarında önem arz etmektedir. Bu nedenle elde edilen iç balistik parametrelerinin birbirleriyle ilişkileri Sigma Plot programı kullanılarak elde edilmiş ve eşitlik (20)-(26)'da sunulmuştur. Eşitliklerdeki ilgili katsayıların değerleri ise Tablo 3,4,5,6,7 ve 8'de verilmektedir. Determinasyon katsayıları R^2 değerlerinden de görüldüğü üzere analiz sonuçlarına eğri uydurma yoluyla elde edilen eşitlikler yüksek hassaslık değerine sahiptir. Bu sayede elde edilen fonksiyonel ilişkiler çeşitli iç balistik problemlerinin analizinde kullanılabilir hale getirilmiştir.



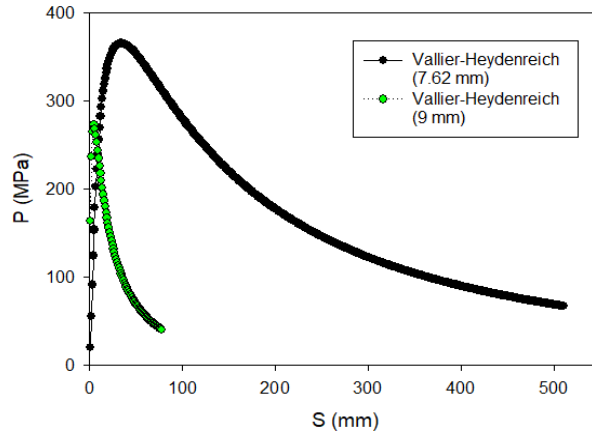
Şekil 4: Basınç Zaman Grafiği



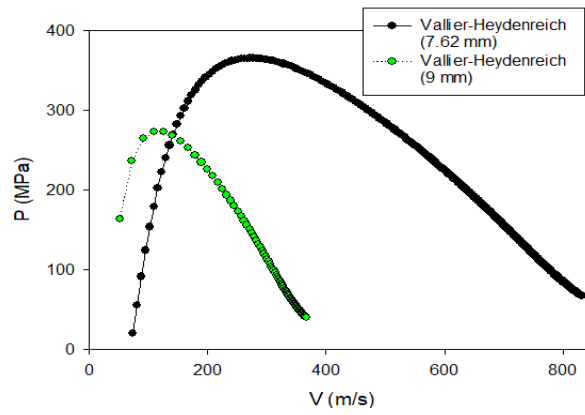
Şekil 5: Hız Konum Grafiği



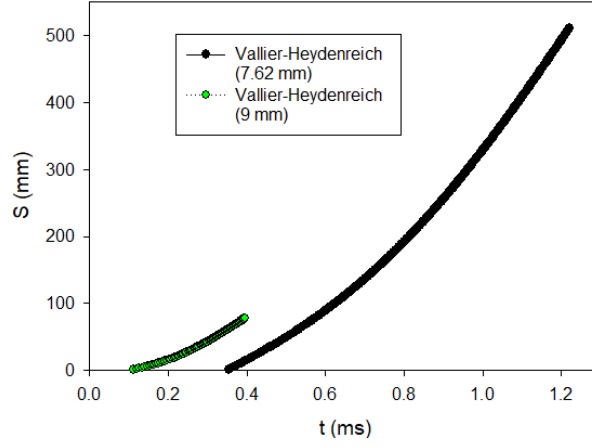
Şekil 6: Hız Zaman Grafiği



Şekil 7: Basınç Konum Grafiği



Şekil 8: Basınç Hız Grafiği



Şekil 9: Konum Zaman Grafiği

Basıncın zaman ile değişimi:

$$P(MPa) = y_{01} + a_1 \left(\frac{c_1 - 1}{c_1} \right)^{\left(\frac{1-c_1}{c_1} \right)} \left[\left[\frac{t(\text{ms}) - x_{01}}{b_1} + \left(\frac{c_1 - 1}{c_1} \right)^{(1/c_1)} \right]^{c_1 - 1} e^{- \left[\frac{t(\text{ms}) - x_{01}}{b_1} + \left(\frac{c_1 - 1}{c_1} \right)^{(1/c_1)} \right]^{c_1} + \frac{c_1 - 1}{c_1}} \right] \quad (20)$$

Tablo 3: Basınç Zaman Fonksiyonundaki Katsayılar

Kalibre	a_1	b_1	c_1	x_{01}	y_{01}	Geçerlilik Aralığı t (ms)	R^2
7,62 mm	302,3661	0,3153	1,2964	0,4672	54,1806	0,3662 $\leq t$ $\leq 1,2214$	0,9961
9 mm	242,3801	0,1021	1,2162	0,1361	27,1264	0,1114 $\leq t$ $\leq 0,3964$	0,9994

Hızın konum ile değişimi:

$$V(m/s) = a_2 (1 - e^{-b_2 S(mm)}) + c_2 (1 - e^{-d_2 S(mm)}) \quad (21)$$

Tablo 4: Hız Konum Fonksiyonundaki Katsayılar

Kalibre	a_2	b_2	c_2	d_2	R^2
7,62 mm	209,7064	0,0408	635,8539	0,0064	0,9980
9 mm	154,0112	0,1825	225,0822	0,0334	0,9984

Hızın zaman ile değişimi:

$$V(m/s) = y_{03} + a_3(1 - e^{-b_3 t(ms)}) \quad (22)$$

Tablo 5: Hız Zaman Fonksiyonundaki Katsayılar

Kalibre	y_{03}	a_3	b_3	Geçerlilik Aralığı t (ms)	R^2
7,62 mm	-1302,7505	2208,0664	2,7400	$0,3533 \leq t \leq 1,2214$	0,9999
9 mm	-532,4510	921,5377	8,9291	$0,1122 \leq t \leq 0,3964$	0,9997

Basıncın konum ile değişimi:

$$P(MPa) = y_{04} + \frac{a_4}{S(mm)} e^{-0,5 \left(\frac{\ln(S(mm)/x_{04})}{b_4} \right)^2} \quad (7,62 \text{ mm kalibre (23) namlulu silah için})$$

$$P(MPa) = \frac{a_4}{S(mm)} e^{-0,5 \left(\frac{\ln(S(mm)/x_{04})}{b_4} \right)^2} \quad (9 \text{ mm kalibre (24) namlulu silah için})$$

Tablo 6: Basınç Konum Fonksiyonundaki Katsayılar

Kalibre	a_4	b_4	x_{04}	y_{04}	R^2
7,62 mm	36786,6573	1,4651	294,3548	$1,6579 \cdot 10^{-6}$	1
9 mm	3551,9866	1,4651	37,9063	-	1

Basıncın hız ile değişimi:

$$P(MPa) = y_{05} \quad (25)$$

$$+ a_5 \left(\frac{c_5 - 1}{c_5} \right)^{\left(\frac{1 - c_5}{c_5} \right)} \left| \left[\frac{V(m/s) - x_{05}}{b_5} + \left(\frac{c_5 - 1}{c_5} \right)^{(1/c_5)} \right]^{c_5 - 1} \right| e^{- \left| \left[\frac{V(m/s) - x_{05}}{b_5} + \left(\frac{c_5 - 1}{c_5} \right)^{(1/c_5)} \right]^{c_5} + \frac{c_5 - 1}{c_5} \right|}$$

Tablo 7: Basınç Hız Fonksiyonundaki Katsayılar

Kalibre	a_5	b_5	c_5	x_{05}	y_{05}	Geçerlilik Aralığı t (ms)	R^2
7,62 mm	939,1915	871,9143	1,2329	287,2197	-576,1381	$0,3533 \leq t \leq 1,2214$	0,9993
9 mm	655,4256	354,7353	1,2206	119,6755	-381,1963	$0,1122 \leq t \leq 0,3964$	0,9994

Konumun zaman ile değişimi:

$$S(mm) = y_{06} + a_6 t(ms) + b_6 t(ms)^2 + c_6 t(ms)^3 \quad (26)$$

Tablo 8: Konum Zaman Fonksiyonundaki Katsayılar

Kalibre	y_{06}	a_6	b_6	c_6	Geçerlilik Aralığı t (ms)	R^2
7,62 mm	-29,2407	-55,5268	427,1896	-14,9604	$0,3533 \leq t \leq 1,2214$	1
9 mm	-0,1285	-76,4581	854,5467	-409,9828	$0,1122 \leq t \leq 0,3964$	1

Tablo 9' da görüldüğü gibi veri giriş parametreleri olarak ilgili literatürden alınan V_o namlu çıkış hızı ve P_m maksimum basınç değerleri bu çalışmadan elde edilen söz konusu değerler ile karşılaştırıldığında hesaplanan yüzde hata değerleri kabul edilebilir sınırlar arasındadır. Cronemberger vd. (2014)'nin çalışmasının da gösterdiği gibi Vallier-Heydenreich metodu namlu çıkış hızını en iyi tahmin eden metod olup, bu çalışmada namlu çıkış hızı için yüzde hatanın yok denecek kadar az olduğu görülmüştür.

Tablo 9: Analizlerdeki Yüzde Hata

Kalibre	Namlu çıkış hızı V_o (m/s) (Millisavunma.com, 2017)	Hesaplanan V_o için % Hata	Maksimum Basınç P_m (MPa) (Millisavunma.com, 2017)	Hesaplanan P_m için % Hata
7,62 mm	838	0,72	380,106	3,84
9 mm	370	1,12	285	4,07

Sonuç

Bu çalışmada 7,62 mm ve 9 mm kalibre namlulu silahların Vallier-Heydenreich metoduyla iç balistik parametrelerinin birbirlerine bağlı ilişkileri tespit edilmiştir. Bu amaçla öncelikle literatürde tablolar halinde verilen Vallier-Heydenreich fonksiyonlarının basınç oranı ve boyutsuz yol parametrelerine bağlı eşitlikleri eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiştir. Bu eşitlikler geliştirilen Matlab programında kullanılarak analizi yapılan silahlar için namlu içerisinde mermi konumu, hızı, namlu iç basıncı ve iç balistik zamanı birbirlerine bağlı olarak elde edilmiş ve bu değerlerin birbirlerine bağlı fonksiyonel eşitlikleri ilk defa bu çalışmada formüle edilmiştir. Böylece söz konusu fonksiyonel ilişkiler literatüre kazandırılarak bunların iç balistik üzerine yapılacak çalışmalarda kullanılması planlanmaktadır. Bu çalışma pahalı ticari yazılımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmanın ilk adımı niteliğindedir.

Diğer yandan Vallier-Heydenreich metodunu detaylı olarak sunan bu çalışma literatürde konuyla ilgili eksikliği kapatacak ve elde edilen fonksiyonel bağıntılarla iç balistik üzerine yapılacak yeni çalışmalara ışık tutacaktır.

Extended Summary

Introduction

The most important features of a gun are having long and durable life, less weight, the capability of more shots in a minute and high destructive power. High destructive power is directly proportional to the projectile velocity. Projectile velocity increases with barrel length and pressure inside the barrel. The maximum value of the pressure inside the barrel is an important factor that should be taken

into consideration in barrel strength calculations (Işık, 2016). On the other hand, as physical phenomena effecting the projectile motion and barrel life occur inside the barrel, barrel is an important part of a gun. Due to such reasons, it is important to have information about interior ballistic data of a barrel for the gun design.

Interior ballistics is a special subject and it concerns a small number of technical personnel working on this subject. (Öztürk, 1984). There are a limited number of studies about Vallier-Heydenreich method in the literature.

The method of Vallier-Heydenreich is one of the basic methods in the interior ballistics. This method is applicable if the maximum pressure inside the barrel, muzzle velocity, barrel length and other necessary quantities for determination of the mean pressure are known. Not only there are few number of studies about Vallier-Heydenreich method in the literature, but also the publications presenting detailed analysis of this method is almost nonexistent.

In this study, primarily Vallier-Heydenreich functions were obtained as functions of pressure ratio and dimensionless shot travel parameter by curve fitting. Then, these primarily obtained Vallier-Heydenreich functions were used in a code written in Matlab to have the position and velocity of the projectile inside the barrel, barrel inner pressure and interior ballistic time for barrels with respectively 7.62 mm and 9 mm inner diameter. The interrelated functional relations of these internal ballistic parameters have been obtained by curve fitting and presented.

Material and Method

The governing equations used in Vallier-Heydenreich method are given in equations (1)-(11). (Öztürk, 1984), (Cronemberger vd., 2014), (Oerlikon-Buhrle AG, 1981). The mean interior barrel pressure P_{ort} ; can easily be calculated depending on barrel length L , projectile diameter D , projectile mass M , propellant mass m_p and muzzle velocity V_o as shown in equation (1).

$$P_{ort} = 2 \left(\frac{M + 0.5m_p}{L\pi D^2} \right) V_o^2 \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{ort}}{P_m} \quad (2)$$

$$S_m = L \Sigma(\eta) \quad (3)$$

$$t_m = \frac{2 L \Theta(\eta)}{V_o} \quad (4)$$

$$V_m = V_o \Phi(\eta) \quad (5)$$

$$t_o = \frac{2L \Gamma(\eta)}{V_o} \quad (6)$$

$$P_o = P_{ort} \Pi(\eta) \quad (7)$$

Where η is pressure ratio depending on mean pressure P_{ort} and maximum pressure P_m inside the barrel. S_m is the position of the projectile, t_m is the time after fire, V_m is the velocity of projectile when pressure reaches its maximum value inside the barrel, t_o is total interior ballistic time and P_o is muzzle pressure at the moment of projectile exits the barrel. $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\Phi(\eta)$, $\Gamma(\eta)$ and $\Pi(\eta)$ are Vallier-Heydenreich functions depending on pressure ratio.

After having dimensionless shot travel parameter λ from the position of the projectile inside the barrel S and that of the projectile when pressure reaches its maximum value S_m , pressure inside the barrel P , projectile velocity V and interior ballistic time t are obtained respectively from the equations (9), (10) and (11) by using Vallier-Heydenreich functions $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ ve $\delta(\lambda)$ depending on dimensionless shot travel parameter.

$$\lambda = \frac{S}{S_m} \quad (8)$$

$$P = P_m \psi(\lambda) \quad (9)$$

$$V = V_m \varphi(\lambda) \quad (10)$$

$$t = t_m \delta(\lambda) \quad (11)$$

In this study, equations of Vallier-Heydenreich functions (Öztürk, 1984) of $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\Phi(\eta)$, $\Gamma(\eta)$ and $\Pi(\eta)$ depending on pressure ratio η and $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$ and $\delta(\lambda)$ depending on dimensionless shot travel parameter λ have been obtained by curve fitting in Sigma Plot and then these equations have been used in a code written in Matlab. The projectile position S , pressure inside the barrel P , projectile velocity V and interior ballistic time t were obtained by Matlab code and the interrelated equations of these interior ballistic parameters have been established with high determination coefficients by using Sigma Plot.

Results and Discussion

Analyzes have been performed for barrels with respectively 7.62 mm and 9 mm inner diameter. It has been shown that results for barrel with 7.62 mm inner diameter are consistent with the literature (Cronemberger vd.2014).

It has been also shown that gun with 9 mm caliber barrel reaches its maximum pressure in less time than gun with 7.62 mm caliber barrel. Projectile increases its speed exponentially along the axis of the barrel and muzzle velocity increases with barrel length. It has been known that inner pressure increases with powder charge and as a result it is greater for the case of 7.62 mm caliber barrel than that of the 9 mm caliber barrel.

Although earlier times can not be assessed by Vallier-Heydenreich method, the minimum value of the evaluated time changes from gun to gun. In this method, interior ballistic time depends on $\delta(\lambda)$ function and t_m . Although first value of the $\delta(\lambda)$ function is greater for the case of 9 mm caliber barrel, as t_m value is much more smaller for that case, analysis for the case of 9 mm caliber barrel starts at an earlier time than analysis for the case of 7.62 mm caliber barrel.

It is important to have functional relations of inner ballistic parameters depending on each other for ballistic studies. Functions of ballistic parameters depending on each other (P(t), V(S), V(t), P(S), P(V) and S(t)) have been obtained with high values of determination coefficient. These functional relations is applicable to be used in various interior ballistic problems.

Conclusion

In this study, projectile position and velocity, barrel inner pressure and interior ballistic time have been obtained for guns respectively have 7.62 mm and 9 mm caliber barrels by using Vallier-Heydenreich method and Matlab program. Interrelated equations of inner ballistic parameters have also been obtained and presented for the first time in this study. It is aimed to bring these functional relations to the literature and use them in studies on interior ballistics.

Kaynakça**Makaleler ve Bildiriler**

- Akçay, M. (2017). Internal and transitional ballistic solution for spherical and perforated propellants and verification with experimental results. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi (J. of Thermal Science and Technology)* 37(1), 35-44.
- Brode, H.L. ve Enstrom, J.E. (1970). A numerical method for calculating interior ballistics. *The Rand Corporation*, P-4466, Santa Monica, California, USA, 1-8.
- Cronemberger, P.O., Júnior, E.P.L., Gois, J.A.M. ve Caldeira, A.B. (2014). Theoretical and experimental study of the interior ballistics of a rifle 7.62. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, 13(2), 20-27.
- Değirmenci, E. (2015a). Semi-empirical prediction of internal pressure distribution and muzzle velocity in the rifled barrel of a light weapon. *Measurement*, 70, 123-128.
- Değirmenci, E. (2015b). Effects of grain size and temperature of double base solid propellants on internal ballistics performance. *Fuel*, 146, 95-102.
- Değirmenci, E., Evcı, C., Işık, H., Macar, M., Yılmaz, N., Dirikolu, M.H. ve Çelik, V. (2016). Thermo-mechanical analysis of double base propellant combustion in a barrel. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1287-1299.
- Deng, S., Sun, H.K. ve Chiu, C.J. (2012). Rifles in-bore finite element transient analysis. *International Conference on Mechanical, Production and Materials Engineering*, 16-17 Haziran, Bangkok, Tayland, 58-62.
- Deng, S., Sun, H.K., Chiu, C.J. ve Chen, K.C. (2014). Transient finite element for in-bore analysis of 9 mm pistols. *Applied Mathematical Modelling*, 38, 2673-2688.
- Deng, S., Sun, H.K. ve Chiu, C.J. (2015). Nonlinear transient finite element analysis for rifle's power transmission mechanism with structure coupling effects. *Applied Mechanics and Materials*, 764-765, 324-328.
- Erlin, T.F. (2001). Simulations varying projectile sabot front-bell stiffness and its effect on dispersion. *Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, ARL-MR-506*, 1-15.

- Evcı, C. ve Işık, H. (2018). Analysis of the effect of propellant temperature on interior ballistics problem. *Journal of Thermal Engineering*, 4(4), Special Issue 8, 2127-2136.
- Franco, P. ve Peter, H. (2001). Gun barrel erosion: Study of thermally insulating layers. *19th International Symposium of Ballistics*, 7–11 Mayıs, Interlaken, İsviçre, 315-321.
- Gezer, H.A., Engin, T. (2016). Barut tane geometrisinin silah iç balistiğine etkisinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 251-257.
- Hansen, E.C. ve Heiney, O.K. (1987). Pressure and gas flow gradients behind the projectile during the interior ballistic cycle. *10th International Symposium on Ballistics*, 27–29 Ekim, San Diego, Kaliforniya, A.B.D., 1-9.
- Işık, H. (2016). Namlu içerisindeki balistik parametrelerin modellenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi (The Journal of Defense Sciences)*, 15(2), 157-177.
- Özgüder, O., Özbay, M. ve Adin, H. (2017). Namlu içi balistik davranışın sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 609-620.
- Şentürk, A., Işık, H. ve Evcı, C. (2016). Thermo-mechanically coupled thermal and stress analysis of interior ballistics problem. *International Journal of Thermal Sciences*, 104, 39-53.

Kitaplar

- F.S.C. (2019). *Firearm safety certificate study guide*. Sacramento: Office of the Attorney General California Department of Justice Bureau of Firearms.
- Oerlikon-Bührle, A.G. (1981). *Oerlikon pocket-book, 2nd Revised Edition*. Zurich, Switzerland.
- Öztürk, A.R. (1984). *İç balistik (Genişletilmiş ikinci baskı)*. Ankara: T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu Genel Müdürlüğü Özel Yayınları.

Tezler

- Özyılmaz, Ö. (2010). *Hafif silah tasarımının balistik açıdan incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

E-kitaplar

Dyckmans, G. (2007). *Fundamentals of ballistics, internal ballistics, E-book in ballistics, theory and software*. <https://e-ballistics.com/ebook/> adresinden alınmıştır.

Yazarı Belli Olmayan Web Siteleri

Millisavunma.com, MKEK hafif ve ağır mühimmat ailesi. (2017). 21 Ocak 2017'de <http://www.millisavunma.com/mkek-hafif-ve-agir-muhimmat-ailesi/> adresinden alınmıştır.

Prodax, Arrow tech associates, Baer Frankle Analysis. (2002). 10 Mart 2018'de http://www.prodax.com/tutorials/IB/IBF_6.htm adresinden alınmıştır.