GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

KISA NAMLULU ATEŞLİ SİLAHLARDA İÇ BALİSTİĞE BAĞLI MUKAVEMET ANALİZİ

Burak ÖZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2019

Burak ÖZCAN tarafından hazırlanan "KISA NAMLULU ATEŞLİ SİLAHLARDA İÇ BALİSTİĞE BAĞLI MUKAVEMET ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Abdullah KURT

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Başkan: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Üye: Doç. Dr. Şener KARABULUT

Hacettepe Ankara Sanayi Odası 1. Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksek Okulu, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Tez Savunma Tarihi: 17/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Burak ÖZCAN
17/06/2019

KISA NAMLULU ATEŞLİ SİLAHLARDA İÇ BALİSTİĞE BAĞLI MUKAVEMET ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak ÖZCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, polimer gövdeye sahip, 9 mm kalibrelik 86 mm namlu uzunluğuna ve altı yiv sete sahip silah namlusunun sonlu elemanlar analiz yöntemi ile mukavemet analizleri yapılarak optimal namlu tasarımının yapılması hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşabilmek için namlu ve merminin üç boyutlu tasarımları yapılmış ve Ansys Workbench Explicit Dynamics modülüne transfer edilmiştir. Namlu, mermi çekirdeği ve mermi ceketi için sırasıyla AISI 4340, kurşun antimon alaşımı ve pirinç malzeme atamaları yapılmış ve malzeme davranışları içinde Johnson-Cook (JC) malzeme modeli seçilmiştir. Analizlerde, silahın ateşlenmesi sonucunda namlu cidar kalınlığı boyunca oluşan basınç değerleri Vallier-Heydenreich balistik denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve merminin namluyu terk edinceye kadar geçen süre içerisinde meydana gelen gerilmeler, termal-elastik -plastik şekil değişimleri ve merminin namlu çıkış hızı değerleri sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca merminin namludan çıkış hızı, standart balistik atış düzeneğine sahip laboratuvar ortamında yapılan deneysel atışlarla doğrulanmıştır. Balistik atış deney sonuçları, sonlu elemanlar analizleri ile merminin namludan çıkış hızını ortalama %1,82 hata payı ile tahmin edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, namlu üzerinde maksimum gerilmenin silah ateşlendikten 146 µs sonra, mermi çekirdeğinin plastik şekil değiştirmeye başladığı noktada meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Ateşli Silah, Tabanca, Namlu, İç Balistik, Mukavemet, Sonlu Elemanlar Analizi
Sayfa Adedi	:	58
Danışman	:	Doç. Dr. Abdullah KURT

THE STRENGTH ANALYSIS OF SHORT BARRELED FIREARMS DEPENDING ON THE INTERNAL BALLISTICS

(M. SC. Thesis)

Burak Özcan

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

In this study, it is aimed to make optimum barrel design by carrying out strength analysis with finite element analysis method of gun barrel with polymer body, 9 mm caliber 86 mm barrel length and six groove sets. To achieve this goal, three-dimensional designs of the barrel and projectile were made and transferred to Ansys Workbench Explicit Dynamics module. AISI 4340, lead antimony alloy and brass material assignments were made for the barrel, bullet core and bullet jacket respectively and Johnson-Cook (JC) material model was chosen for the material behavior. In the analysis, the pressure values that occurred during the firing of the gun along the barrel wall thickness were calculated by using Vallier-Heydenreich ballistic equations and the stresses that occurred until the bullet left the barrel, thermal-elastic-plastic strains, strain rates and muzzle velocity values of the projectile were examined by finite element analysis. In addition, the muzzle velocity was verified by experimental firing in a laboratory with standard ballistic firing mechanism. The results of the ballistic firing test showed that the muzzle velocity can be estimated with an average error of 1.82%. It was also concluded that the maximum stress on the barrel occurred at the point where the bullet began to deform plastic 146 μs after the gun was fired.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Firearm, Gun, Barrel, Internal Ballistics, Strength, Finite Element Analysis
Page Number	:	58
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Abdullah KURT

TEŞEKKÜR

Tanıştığımız günden bugüne her türlü maddi manevi desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarıma yön veren çok kıymetli danışmanım Doç. Dr. Abdullah KURT'a, yüksek lisans sürecim boyunca bilgi ve tecrübelerini bizden esirgemeyerek sürekli bize yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Mehmet Seyis'e, tezime sağladığı katkıların dolayı değerli arkadaşlarım Barış Burak AYDOĞAN'a, Berkay KARSAN'a, isimlerini yazamadığım çalışmama yardımcı olan tüm arkadaşlarıma ve Sevgili Eşim Arzu ÖZCAN'a verdikleri destek, gösterdikleri anlayış ve sevgi için sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Bu günlere gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bana duydukları güven, verdikleri destek, gösterdikleri anlayış ve sevgi için kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışma kapsamında vermiş olduğu desteklerden ötürü TİSAŞ'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER 3

2.1. Sonlu Elemanlar Analizi 3

2.1.1. Explicit çözüm döngüsü (zaman adımı) 5

2.1.2. Explicit analizde kararlı zaman adımı 7

2.2. Johson-Cook Malzeme Modeli 8

2.3. İç Balistik 9

2.3.1. İç balistik denklemleri 11

2.4. Kısa Namlulu Ateşli Silahlar (Tabancalar) 17

2.4.1. Tek atışlı tabancalar 17

2.4.2. Toplu tabancalar 18

2.4.3. Otomatik tabancalar 19

3. LİTERATÜR TARAMASI 23

3.1. Deneysel Çalışmalar 23

3.2. Nümerik Çalışmalar 24

3.3. Araştırmaların Değerlendirilmesi 27

4. MALZEME VE YÖNTEM 29

Sayfa

4.1. Namlu ve Mermi İçin Malzeme Bilgileri 29

4.2. Namlu ve Mermi Geometrisi 31

4.3. İç Balistik Hesaplamaları 35

4.4. Sonlu Elemanlar Analizi 36

4.5. İlk Hız Test Yöntemi 39

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 41

6. SONUÇLAR 51

KAYNAKLAR 53

ÖZGEÇMİŞ 57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Karakteristik uzunluk çizelgesi..... 8

Çizelge 2.2. Heydenreich balistik tablosu..... 13

Çizelge 2.3. Vallier-Heydenreich deneysel veri tablosu..... 14

Çizelge 4.1. AISI 4340'ın kimyasal bileşimi..... 29

Çizelge 4.2. CuZn36'ın kimyasal bileşimi 30

Çizelge 4.3. AISI 4340'ın dövme öncesi mekanik özellikleri..... 30

Çizelge 4.4. AISI 4340'ın dövme sonrası mekanik özellikleri..... 30

Çizelge 4.5. Namlu ve mermi parametreleri..... 31

Çizelge 4.6. Namlu ve mermi için JC malzeme modeli parametreleri 31

Çizelge 4.7. Silah parametreleri..... 35

Çizelge 5.1. Namlu çıkış hızı deney sonuçları..... 42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Fiziksel olguların çözücü çizelgesi 3
Şekil 2.2. Explicit çözüm döngüsü (zaman adımı) 7
Şekil 2.3. Eleman karakteristik uzunluğu 8
Şekil 2.4. Barut tipleri 10
Şekil 2.5. Tek atışlı tabanca 17
Şekil 2.6. Toplu tabanca 19
Şekil 2.7. Otomatik tabanca mermi beslemesi 20
Şekil 2.8. Otomatik tabanca mekanizması 21
Şekil 4.1. Mermi iki boyutlu modeli 32
Şekil 4.2. Orijinal mermi modeli 32
Şekil 4.3. Orijinal namlu modelinin kesit görünüşü 33
Şekil 4.4. Sadeleştirilmiş namlu analiz modeli 33
Şekil 4.5. Sadeleştirilmiş mermi modeli 34
Şekil 4.6. Sadeleştirilmiş mermi analiz modeli 34
Şekil 4.7. Orijinal mermi ve namlunun montajlanmış modeli 35
Şekil 4.8. Zamana göre basınç- zaman grafiği 36
Şekil 4.9. Namlu çözüm ağı 37
Şekil 4.10. Mermi çözüm ağı 37
Şekil 4.11. Doğrusal dörtgen eleman 37
Şekil 4.12. Namlu sabitleme yüzeyi 38
Şekil 4.13. Mermi basınç uygulama yüzeyi 38
Şekil 4.14. Zamana göre basınç değişim grafiği 39
Şekil 4.15. Hız ölçüm test düzeneği 40
Şekil 5.1. Merminin hız-zaman grafiği 41
Şekil 5.2. Merminin konum-zaman grafiği 42

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. Namlu içerisindeki merminin hareketi (hızı ve konumu)..... 43

Şekil 5.4. Namluda oluşan maksimum eşdeğer gerilme (MPa) değişimi..... 44

Şekil 5.5. Maksimum eşdeğer gerilmenin zamana göre değişimi 45

Şekil 5.6. Yivlerde oluşan maksimum eşdeğer gerilme (t=209 µs)..... 45

Şekil 5.7. Namlu dış yüzeyinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme (t=154 µs)..... 46

Şekil 5.8. Namlu kesitinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme (t=146 µs) 46

Şekil 5.9. Setlerde oluşan lokal gerilme bölgesi 47

Şekil 5.10. Mermi üzerindeki eşdeğer plastik şekil değiştirmenin zamana göre değişimi 48

Şekil 5.11. Merminin namlu içerisindeki hareketi süresince oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme miktarı..... 48

Şekil 5.12. Merminin namlu içerisindeki hareketi süresince oluşan plastik şekil değiştirme hızı (Strain Rate) 49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışma kapsamında kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda belirtilmiştir.

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Akma gerilmesi sabiti
B	Şekil değiştirme sertleşmesi sabiti
b	Parça ivmesinin bileşenleri (m/sn^2)
C	Şekil değiştirme hızı katsayısı
c	Ses hızı (m/sn)
D	Çap (mm)
ε	Plastik şekil değiştirme
η	Basınç oranı
F	Düğüm kuvvetleri (N)
f	Güvenlik katsayısı
h	Karakteristik uzunluk (mm)
L	Namlu Uzunluğu (mm)
m	Termal yumuşama katsayısı
m	Kütle (kg)
n	Şekil değiştirme üsteli
P	Basınç (MPa)
$\mathbf{P_{avg}}$	Ortalama basınç (MPa)
$\mathbf{P_m}$	Maksimum basınç (MPa)
ρ	Yoğunluk (kg/mm^3)
$\mathbf{S_m}$	Basıncın maksimum olduğu andaki mermi yolu (mm)
σ	Eşdeğer gerilme (MPa)
$\boldsymbol{\sigma_{ij}}$	Gerilme tensörü (MPa)
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman (sn)
V	Hacim (mm^3)
V	Hız (m/sn)

Kısaltmalar	Açıklamalar
3B	Üç Boyutlu
AISI	American Iron and Steel Institute
CFL	Courant Friedrichs-Levy
JC	Johnson-Cook
MKE	Makine ve Kimya Endüstrisi
TİSAŞ	Trabzon Silah Sanayi A.Ş.
NATO	North Atlantic Treaty Organization

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze pek çok farklı silah sistemleri tasarlanmış ve tasarlanmaya devam etmektedir. Gelişen teknolojiye paralel olarak silahların özellikleri de gelişmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. Metodun üç- boyutlu (3B) problemlere uygulanması iki-boyutlu (2B) teoriden sonra kolayca gerçekleştirilmiştir (Kürüm, H., Cebeci, M., 1995).

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programların geliştirilmesi ve gelişen bilgisayar teknolojileriyle birlikte endüstrinin her alanında bu programlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanların başında savunma sanayi dolayısıyla silah sistemleri gelmektedir. Bu sayede çok büyük modelleri (2 milyondan fazla düğüme sahip modeller) (gemi, uçak vb.) bir arada sayısal ağa ayırıp çözüm alınabilmektedir.

Silah sistemlerinin tasarımlarında prototip testlerinin önemi büyüktür. Silahların istenilen özellikleri taşıyıp taşımadığı, gerçekleştirilen bu testler sayesinde bilinmektedir. Çoğu zaman bu testlerin gerçekleştirilmesi oldukça maliyetli ve zor olabilmektedir. Ayrıca tasarlanan silahların test sonucunda istenen özellikleri taşımama durumlarıyla karşılaşılabilir; tasarımların yeniden gözden geçirilmesi ve hatta bu sürecin birden fazla tekrarlanması gerekebilir. Böylelikle tasarımdan üretime geçen süre, planlananın üzerine çıkabilir.

Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak polimer gövdeli bir silah namlusunun mukavemet analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 9 mm kalibrelik 86 mm namlu uzunluğuna ve 6 (sağ) yiv sete sahip silah namlusu referans alınmıştır. Namlu ve merminin 3B modellerini elde etmek için Solidworks tasarım programı kullanılmıştır. Analizler, Ansys Workbench paket programındaki Explicit Dynamics modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan AISI 4340 namlu malzemesi olarak kullanılmıştır. Mermi malzemesi olarak mermi çekirdeği için kurşun antimon alaşımı ve dış kapsül için pirinç kullanılmıştır. Analiz sonuçlarını daha gerçekçi kılmak adına, malzeme

davranışları için Johnson-Cook (JC) malzeme modeli kullanılmıştır. Barutun ateşlenmesinden, merminin namluyu terk edinceye kadar geçen süredeki namlu üzerinde oluşan gerilmeler ve termal-elastik-plastik şekil değiştirmeler incelenmiştir. Analizler için sadece namlu ve mermi modelleri kullanılmıştır. Sınır koşulları oluşturulurken Vallier-Heydenreich balistik denklemlerinden yararlanılmış ve namlu içerisindeki basınç değişimi hesaplanmıştır. Mermiye, balistik denklemler yardımıyla elde edilen basınç uygulanmış ve merminin namlu içerisindeki hareketi sonucunda oluşan etkilerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

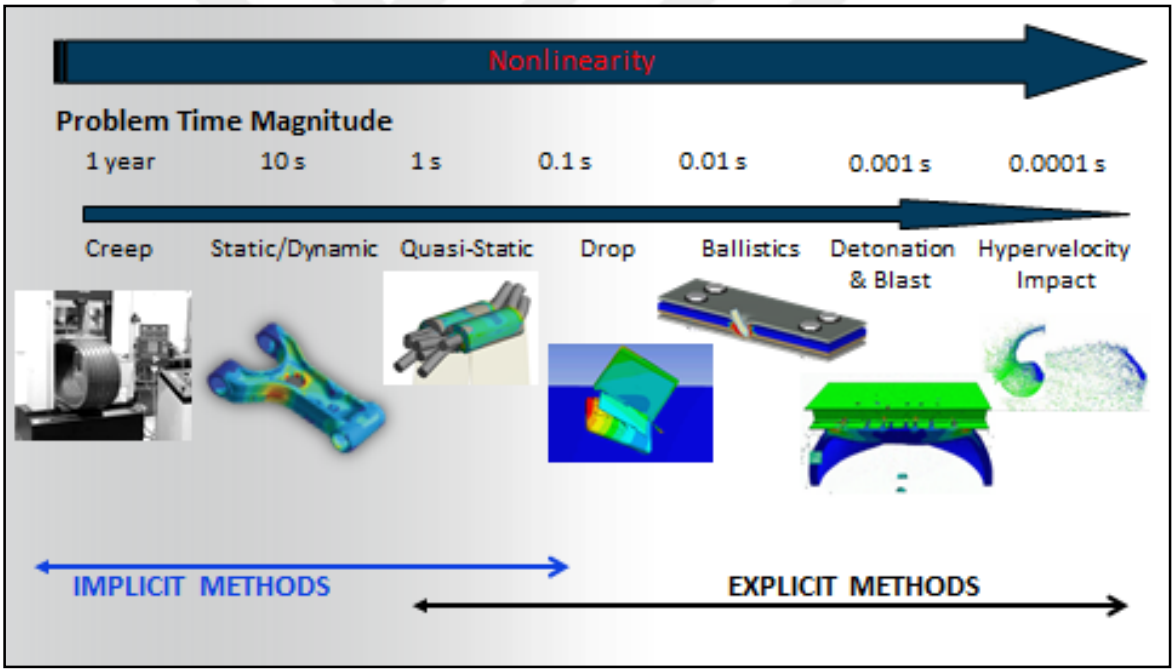
Ülkemizde namlu içeresindeki mermi hızını ölçebilecek bir test düzeneği olmadığı için analiz modelinin doğrulaması, namlu çıkış hızı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmaları ile merminin namludan çıktığı andaki hızı elde edilmiştir. Kalibre ve mermi özelliklerine bağlı olarak ilgili silah için bilinen namlu çıkış hızıyla bu hız değeri karşılaştırılıp doğrulanmıştır.

Çalışma 6 bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümünde Explicit analiz ilkeleri ve malzeme modelleme bilgileri verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmaya esas teşkil eden literatürdeki deneysel ve nümerik çalışmalar incelenmiştir. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan malzemeler ve ilenen prosedürler üzerinde durulmuştur. Beşinci ve altıncı bölümlerde ise analiz sonuçları belirtilmiş ve elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Herhangi bir sonlu elemanlar paket programı problemleri çözerken implicit ya da explicit yöntemlerden herhangi birini veya her ikisini de kullanabilir. Burada önemli olan ilgili problem için hangi yöntemin kullanılacağı/kullanılabileceğidir. Yapısal statik, modal, harmonik, rastsal titreşim, mekanizma analizi gibi problemler çözmek için genellikle implicit yöntem kullanılırken; patlama, çarpışma ve talaş kaldırma simülasyonları gibi çok kısa sürede meydana gelen durumlar için explicit yöntem kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de fiziksel olguların gerçekleşme süresine bağlı olarak çözücü çizelgesi verilmiştir (Ansys, 2018).



Şekil 2.1. Fiziksel olguların çözücü çizelgesi (Ansys, 2018)

Explicit yöntem aşağıda belirtilen durumlardan birini veya birkaçını içeren doğrusal olmayan yapısal mekanik uygulamaları modellemek için tasarlanmıştır. Bu uygulamalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Düşük [1 m/s] ila çok yüksek hıza [5000 m/s] kadar gerçekleşen çarpma
- Gerilme dalgası yayılımı

- Yüksek frekanslı dinamik cevap
- Büyük deformasyonlar ve geometrik doğrusalsızlıklar
- Karmaşık temas koşulları
- Malzeme hasarını ve kopmasını içeren karmaşık malzeme davranışları
- Kıvrılma ve ani hareket dahil olmak üzere doğrusal olmayan yapısal tepki
- Katı ve sıvılarda şok dalgası yayılımı

Explicit çözüm yöntemi birkaç mili saniye seviyesindeki çok kısa sürede gerçekleşen olaylar için uygundur. Bir saniyeden uzun süren olaylarda modellenebilmekle birlikte böyle bir problemin çözüm süresi için uzun bir süre beklemek gerekebilir. Analizlerin çözüm süresinin uzun olduğu durumlarda kütle ölçeklendirmesi (mass scaling) ve dinamik gevşeme (dynamic relaxation) teknikleri kulanılabilir (Ansys, 2018).

Düğüm ivmeleri, düğümlerdeki kuvvetler (iç gerilme, temas veya sınır koşullarından kaynaklanan) hesaplandıktan sonra kütleye bölünerek aşağıdaki gibi türetilir:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \tag{2.1}$$

Burada $\ddot{x}_i$ düğüm ivme bileşenlerini (i=1,2,3), F_i düğümlere etki eden kuvvetleri, b_i parça ivmesinin bileşenlerini ve m düğüm kütlesini göstermektedir.

(n–1)/2 zamanına karşılık gelen ivmeler bulunduktan sonra (n+1)/2 zamanına karşılık gelen hızlar şu şekilde bulunabilir:

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \tag{2.2}$$

Son olarak, hızlar n+1 zamanına göre entegre edilerek konumlar güncellenir:

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \tag{2.3}$$

Explicit dinamik bir analizde çözülen temel denklemler;

• Lagrange koordinatlarında kütle, momentum ve enerjinin korunumu

• Malzeme modeli
• İlk koşul ve sınır koşullarının ayarlanması

Lagrange formülasyonları için sayısal ağ, modellenen malzeme ile birlikte hareket eder (her bir tekil düğüm noktası, malzeme parçacıklarına tutturulur) ve bozulur; böylece kütlenin korunumu otomatik olarak sağlanır. (Belytschko, Liu, & Moran, 2000). Herhangi bir zamandaki yoğunluk, bölgenin mevcut hacminden ve başlangıçtaki kütlesinden belirlenebilir:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \tag{2.4}$$

Momentumun korunumunu ifade eden kısmi diferansiyel denklemler, gerilme tensörü σ_{ij} ile ivme kazanır:

$$\rho\ddot{x} = b_x + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} \tag{2.5}$$

$$\rho\ddot{y} = b_y + \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} \tag{2.6}$$

$$\rho\ddot{z} = b_z + \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \tag{2.7}$$

Enerjinin korunumu ise şu şekilde ifade edilir:

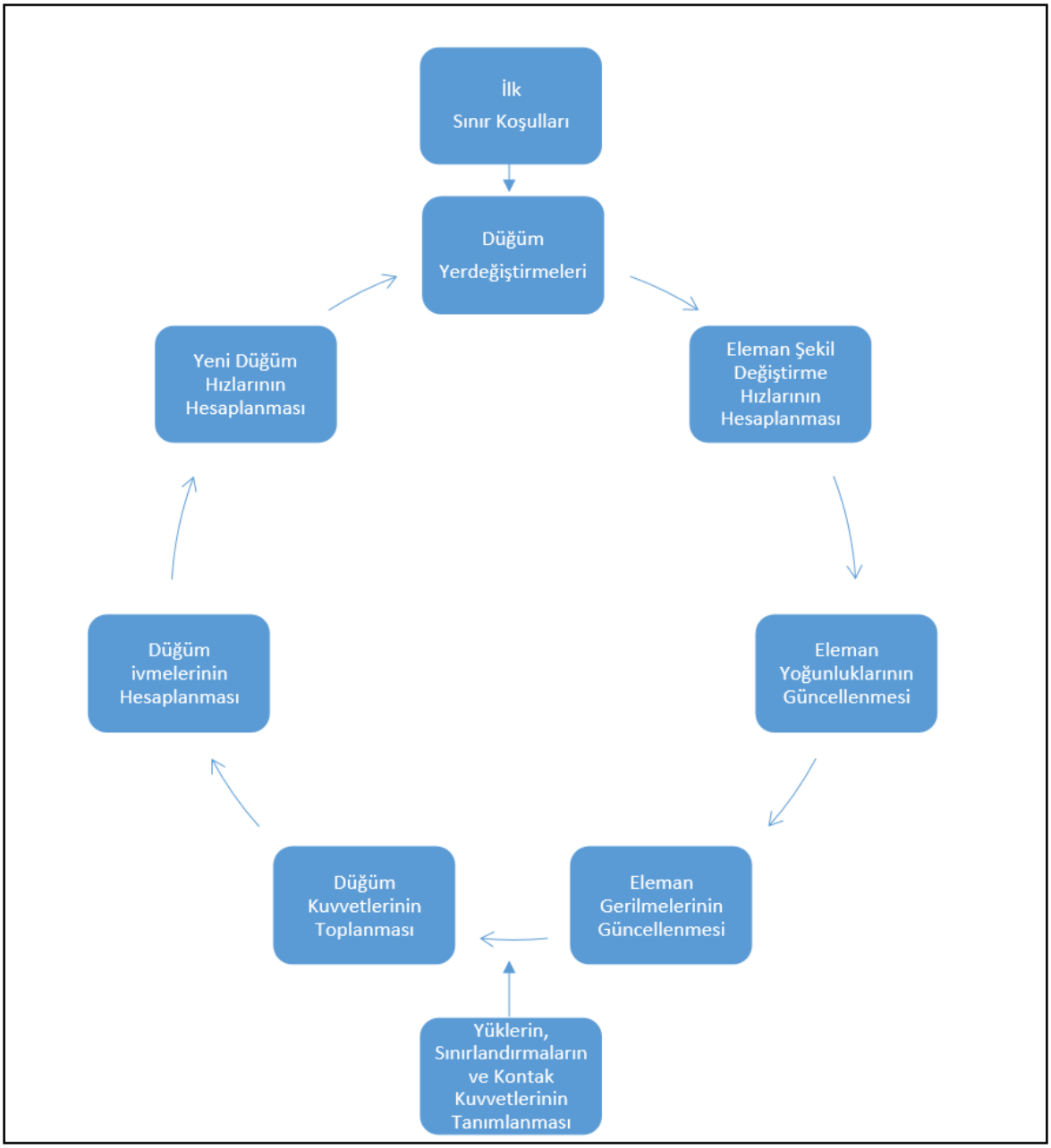
$$\dot{e} = \frac{1}{\rho}\left(\sigma_{xx}\dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\varepsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\varepsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\varepsilon}_{zx} \right) \tag{2.8}$$

Herhangi bir zaman için bu denklemler, önceki zaman aşamasının sonundaki giriş değerlerine dayanarak modeldeki her bir eleman için çözülür.

2.1.1. Explicit çözüm döngüsü (zaman adımı)

Şekil 2.2'de gösterildiği üzere explicit çözüm yönteminde bir döngü için aşağıda verilen olaylar/işlemler gerçekleşmektedir:

- Sayısal ağda zaman adımına karşılık gelen hareket üretilir.
- Düğümlerin hareketi, elemanların deformasyonunu sağlar.
- Eleman deformasyonu, her bir elemandaki malzemenin hacminde ve yoğunluğunda bir değişikliğe neden olur.
- Şekil değiştirme oranlarını türetmek için şekil değiştirme hızı kullanılır (çeşitli eleman formülasyonları kullanarak).
- Formülasyonlar, gerilme oranlarından kaynaklanan gerilmeleri ortaya çıkarır.
- Gerilmeler tekrar düğüm kuvvetlerine dönüşür (çeşitli eleman formülasyonları kullanarak).
- Sınır koşullarından, yüklerden ve temaslardan dış düğüm kuvvetleri hesaplanır,
- Toplam düğüm kuvvetleri, düğüm ivmelerini türetmek için düğüm kütlesine bölünür.
- Yeni düğüm hızlarını türetmek için ivmeler zamana göre entegre edilir.
- Yeni düğüm konumları türetmek için düğümlerin hızları zamana göre entegre edilir.
- Hesaplama, bitiş zamanına ulaşana kadar çözüm süreci (döngü) tekrarlanır.



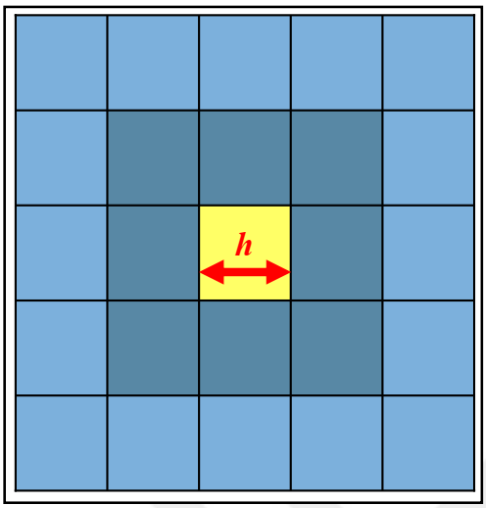
Şekil 2.2. Explicit çözüm döngüsü (zaman adımı)

2.1.2. Explicit analizde kararlı zaman adımı

Kararlılığı sağlamak için zaman adımının büyüklüğü CFL (Courant Friedrichs-Levy) koşulu ile sınırlıdır:

$$\Delta t \leq f * (\frac{h}{c})_{min} \tag{2.9}$$

Burada *h* Şekil 2.3'te gösterilen karakteristik uzunluğu, *c* malzemenin ses hızını ve *f* güvenlik katsayısını göstermektedir.



Şekil 2.3. Eleman karakteristik uzunluğu

Explicit analizlerde zaman adımı sınırlandırılmalıdır, böylece herhangi bir zaman adımında gerilme dalgası sayısal ağdaki en küçük elemanın karakteristik uzunluğundan daha ileriye gidemeyecektir. Çizelge 2.1'de ilgili eleman tiplerine göre karakteristik uzunluğunun nasıl hesaplanacağı verilmiştir.

Çizelge 2.1. Karakteristik uzunluk çizelgesi (Courant, Friedrichs ve Lewy, 1967)

Eleman Şekli /Geometri	Karekteristik Uzunluk
Hexahedral /Pentahedral	Elemanın hacmi en uzun köşegenin karesine bölünür ve √2/3 ile çarpılır.
Tetrahedral	Herhangi bir eleman düğümünün karşıt eleman yüzüne olan en kısa mesafesi
Quad Shell	Kabuk alanının karekökü
Tri Shell	Herhangi bir eleman düğümünün karşıt eleman kenarına olan minimum mesafesi
Beam	Elemanın uzunluğu

2.2. Johson-Cook Malzeme Modeli

Termal-elastik-plastik analizlerde gerçek verileri elde edebilmek için malzeme özelliklerinin ve davranışının iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Aksi takdirde yapılan analiz sonuçları ile gerçek durumdaki verilerin benzerlik göstermesi zordur. Termal-elastik-plastik analizler için malzemenin hem mekanik hem de termal özelliklerinin çok iyi bir şekilde

tanımlanması gerekmektedir. Merminin namlu içerisindeki hareketi sırasında, namlu ve merminin farklı bölgelerinde farklı şekil değiştirme hızları ile deformasyonlar gerçekleşir. Bundan dolayı malzemenin farklı şekil değiştirme hızlarındaki davranışlarının (gerilme-şekil değiştirme eğrileri) da bilinmesi gerekmektedir.

Johson-Cook (JC) malzeme modeli pek çok malzemenin yüksek hızlardaki deformasyonunu modellemek için kullanılabilir. Bu model, farklı sıcaklıklarda farklı şekil değiştirme hızlarını içermektedir (Özcan, Kurt, Şeker, & Seyis, 2018). JC malzeme modeline göre akma gerilmesi aşağıdaki eşitlikte tanımlanmıştır.

$$\bar{\sigma} = (A + B(\bar{\epsilon})^n) * \left(1 + Cln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)\right) * (1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m) \tag{2.10}$$

Burada $\bar{\sigma}$ malzemenin akma gerilmesi, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ şekil değiştirme hızı, $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ referans şekil değiştirme hızı, ε eşdeğer plastik şekil değiştirme, A akma gerilmesi sabiti, B şekil değiştirme sertleşmesi katsayısı, n şekil değiştirme üsteli, C şekil değiştirme hızına bağlı katsayı, m termal yumuşama katsayısı, T sıcaklık, T_r oda sıcaklığı ve T_m ise malzemeye ait ergime sıcaklığıdır. Bu denklemdeki sabitleri elde edebilmek için farklı sıcaklıklarda ve farklı şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-şekil değiştirme eğrilerine ihtiyaç vardır.

2.3. İç Balistik

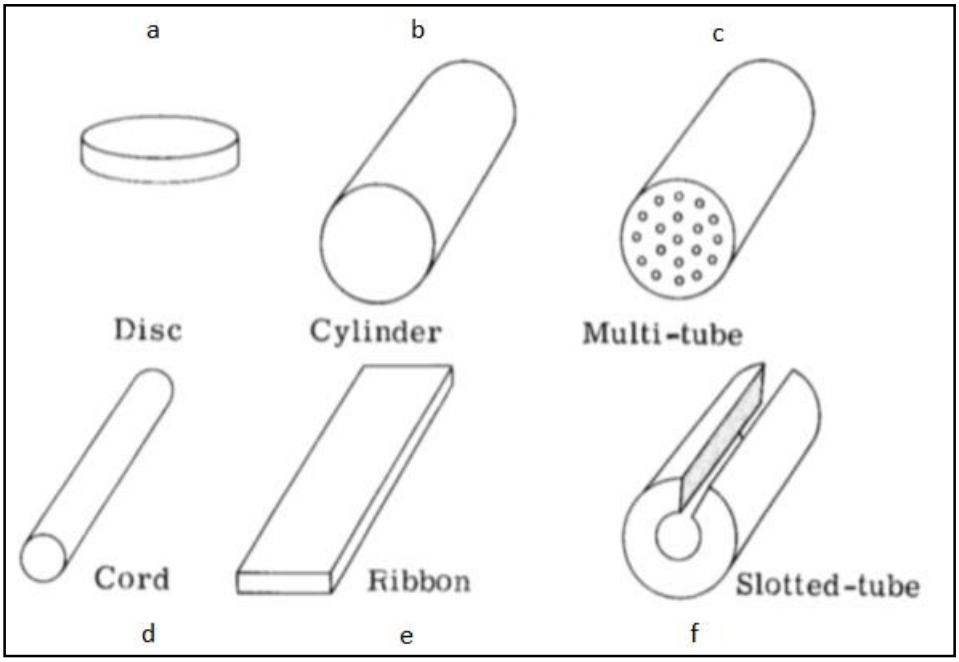
Silahlarda ateşlemenin başlangıcından, merminin silah namlusunu terk edinceye kadar meydan gelen olayların tümünü inceleyen bilim dalına iç balistik adı verilir. İç balistiğin temel görevi mermi, namlu ağzını terk ederken, mermiye istenen bir ilk doğrusal ve açısal hız vermektir. Yivsiz setsiz silahlarda sadece ilk hız kazandırmaktadır. (ÖZTÜRK, 1984)

İç balistik hesaplamalarının amacı sevk barutunun yanması ile açığa çıkan gazların neden olduğu basıncın maksimum değerini belirlemek ve merminin silah namlusundan istenilen hız değeri ile çıkmasını sağlamaktır.

Mermiye yüksek hız kazandırabilmek için kuvvet gerekmektedir. Bu kuvvetin enerji kaynağı kolayca oluşturulabilmeli, kolayca aktarılabilmeli ve güvenli bir şekilde uygulanabilme yeteneğine sahip olmalıdır. (Yıldırım, 2013). Kovan hacminin sevk

barutunun hacmine oranı olan mermi kovan kapasitesi, yanma hızını etkileyen faktörlerden biridir. Bu oran ne kadar yüksekse, diğer bir değişle kovandaki doldurulmamış alan ne kadar küçük olursa ilk yanma oranı da o kadar hızlı olur.

Sevk barutu yandığında çoğunluğu karbondioksit ve su buharı içeren gaza dönüşür. İlk önce gazlar tamamen kovanın içinde tutulur. Basınç; kovanın tabanına, duvarlarına ve merminin tabanına eşit olarak etki eder. Mermi hareket etmeye başladığında, gazların doldurduğu hacim artar ve basınç düşmeye başlar. Modern sevk barutlarında, barut tanelerine birtakım işlemler uygulayarak basınçtaki bu düşüş belirli bir dereceye kadar telafi edilebilir. Bu telafi işlemi, çeşitli kimyasalların ilavesini ve barut tanelerinin yüzeyinin kaplanmasını içerir. Bazı sevk barutlarında tanelere delikler delinir (Şekil 2.4) (Moss, Leeming, & Farrar, 1995). Bu durum; sevk barutu yanarken yüzey alanının artmasından dolayı daha hızlı yanmasına neden olur. Bunun bir sonucu olarak, mermi hareket etmeye başladığında iç basınç yavaş bir şekilde düşmeye başlar. Ancak barut tanelerine bu işlem uygulanırken dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. Sevk barutu mermi namluyu terk etmeden önce mutlaka tamamen yanmalıdır. Mermi namluyu terk ettiğinde hala tükenmeyen sevk barutu büyük bir alev çıkaracaktır. Bu alev geceleri ateş eden kullanıcının gece görüş yeteneğini bir süreliğine bozabilir. (Brian, 2008)



Şekil 2.4. Barut tipleri (Moss, Leeming ve Farrar, 1995)

Kısacası iç balistik barut tarafından üretilen gazların etkisiyle hareket eden mühimmatın karakteristik davranışlarıyla ilgili uygulamalı mekanik dalı olarak tanımlanır. Bilimsel uygulamalarının büyük bir çoğunluğu hala deneysel düzeydedir. İç balistik fiziksel ve kimyasal temeller üzerine kurulmuş bir daldır. Maalesef karmaşık, incelikli, anlaşılması güç bir daldır. Teorik sonuçlar incelenirken deneysel sonuçlarında göz ardı edilmemesi gerekmektedir (Yıldırım, 2013).

2.3.1. İç balistik denklemleri

İç balistik hesaplamalarını gerçekleştirmek için literatürde pek çok yöntem mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında deneysel veri tablolarına dayalı olan Vallier-Heydenreich yöntemi kullanılmıştır.

Eş. 2.11'de basınç oranı (η) gösterilmiş olup P_{avg} ateşleme sırasında namlu içerisinde oluşan ortalama basıncı ve P_m ise namlu içerisindeki maksimum basıncı ifade etmektedir.

$$\eta = \frac{P_{avg}}{P_m} \tag{2.11}$$

Eş. 2.12-2.14'te verilen gaz basıncının maksimum olduğu andaki mermi yolu (S_m), merminin namlu içinde hareket etme zamanı (t_m), mermi hızı (V_m) ve namlu uzunluğu L ile gösterilmiş olup

Çizelge 2.2'teki basınç oranına bağlı balistik faktörler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu parametreler Heydenreich tarafından ortaya konulmuş deneysel ifadeler olup merminin namlu içerisindeki hareketi sırasında oluşan basıncı hesaplamakta yaygın olarak kullanılmaktadır (ÖZTÜRK, 1984).

$$S_m = L * \sum(\eta) \tag{2.12}$$

$$t_m = \frac{2*L*\Theta(\eta)}{V_0} \tag{2.13}$$

$$V_m = V_0 * \Phi(\eta) \tag{2.14}$$

Çizelge 2.2. Heydenreich balistik tablosu (ÖZTÜRK, 1984)

η	$\sum(\eta)$	Θ(η)	Φ(η)	Π(η)	T(η)
0,20	0,0262	0,150	0,322	0,274	0,744
0,25	0,0360	0,196	0,337	0,306	0,792
0,30	0,0471	0,246	0,352	0,338	0,842
0,35	0,0597	0,300	0,367	0,368	0,893
0,40	0,0740	0,358	0,383	0,400	0,946
0,45	0,0903	0,420	0,399	0,432	1,000
0,50	0,1090	0,487	0,416	0,465	1,056
0,55	0,132	0,560	0,435	0,501	1,116
0,60	0,160	0,642	0,457	0,541	1,180
0,65	0,192	0,734	0,482	0,585	1,249
0,70	0,231	0,835	0,511	0,635	1,322
0,75	0,283	0,958	0,546	0,697	1,406
0,80	0,360	1,115	0,592	0,779	1.507

Merminin namlu içerisinde geçirdiği süre (t_0) ve namlu ağzındaki gaz basıncı (P_0); Eş. 2.15-2.16'daki deneysel balistik faktörleri $T(\eta)$ ve $\Pi(\eta)$ parametrelerine göre hesaplanabilmektedir.

$$t_0 = \frac{2*L*T(\eta)}{V_0} \tag{2.15}$$

$$P_0 = P_{avg} * \Pi(\eta) \tag{2.16}$$

Maksimum basınç anındaki mermi konumu belirlendikten sonra, Eş. 2.18-2.20'deki eşitliklerde kullanılacak olan merminin herhangi bir andaki konumuna karşılık gelen λ parametresi Eş. 2.17 ile hesaplanabilmektedir.

$$\lambda = \frac{S}{S_m} \tag{2.17}$$

Vallier-Heydenreich yönteminin deneysel veri tablosu kullanılarak (Çizelge 2.3), λ parametresine bağlı $\Psi(\lambda)$, $\Phi(\lambda)$, $\delta(\lambda)$ değişkenleri yardımıyla Eş. 2.18-2.20'daki merminin namlu içerisindeki herhangi bir konuma karşılık gelen basınç, hız ve zaman belirlenebilir.

Çizelge 2.3. Vallier-Heydenreich deneysel veri tablosu (ÖZTÜRK, 1984)

$\lambda = \frac{x}{x_1}$	$\psi(\lambda)$	$\Phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
0,25	0,690	0,375	0,689
0,50	0,890	0,624	0,830
0,75	0,970	0,828	0,924
1,00	1,000	1,000	1,000
1,25	0,966	1,145	1,063
1,50	0,893	1,268	1,119
1,75	0,828	1,372	1,170
2,0	0,769	1,460	1,218
2,5	0,668	1,609	1,306
3,0	0,590	1,726	1,387
3,5	0,527	1,824	1,463
4,0	0,475	1,909	1,536
4,5	0,433	1,981	1,606
5,0	0,397	2,046	1,672
6	0,340	2,158	1,801
7	0,297	2,250	1,923
8	0,263	2,328	2,042
9	0,236	2,395	2,156
10	0,214	2,453	2,267
11	0,195	2,505	2,376
12	0,179	2,551	2,483
13	0,166	2,592	2,588
14	0,154	2,630	2,692
15	0,144	2,665	2,794

Çizelge 2.3. (devam) Vallier-Heydenreich deneysel veri tablosu (ÖZTÜRK, 1984)

$\lambda = \frac{x}{x_1}$	$\psi(\lambda)$	$\Phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
16	0,135	2,698	2,895
17	0,127	2,730	2,994
18	0,120	2,760	3,092
19	0,114	2,787	3,189
20	0,108	2,812	3,286
25	0,860	2,921	3,758
30	0,710	3,004	4,214
35	0,600	3,070	4,659
40	0,520	3,132	5,095
45	0,460	3,182	5,523
50	0,041	3,220	5,946
75	0,027	3,373	7,995
100	0,020	3,480	9,966

$$P = P_m * \Psi(\lambda) \tag{2.18}$$

$$V = V_m * \Phi(\lambda) \tag{2.19}$$

$$t = t_m * \delta(\lambda) \tag{2.20}$$

Çizelge 2.2'de verilen Heydenreich balistik tablosu kullanılarak, Eş. 2.21'de verilen ortalama basınç (P_{avg}) hesaplanabilmektedir.

Böylece mermiye uygulanması sırasında ihtiyaç duyulan Şekil 4.8'teki zamana göre basınç değişimini gösteren basınç-zaman grafiği elde edilmiştir.

$$P_{avg} = 2 * \left(\frac{M + \frac{1}{2} * m_p}{L * \pi * D^2} \right) * V_0^2 \tag{2.21}$$

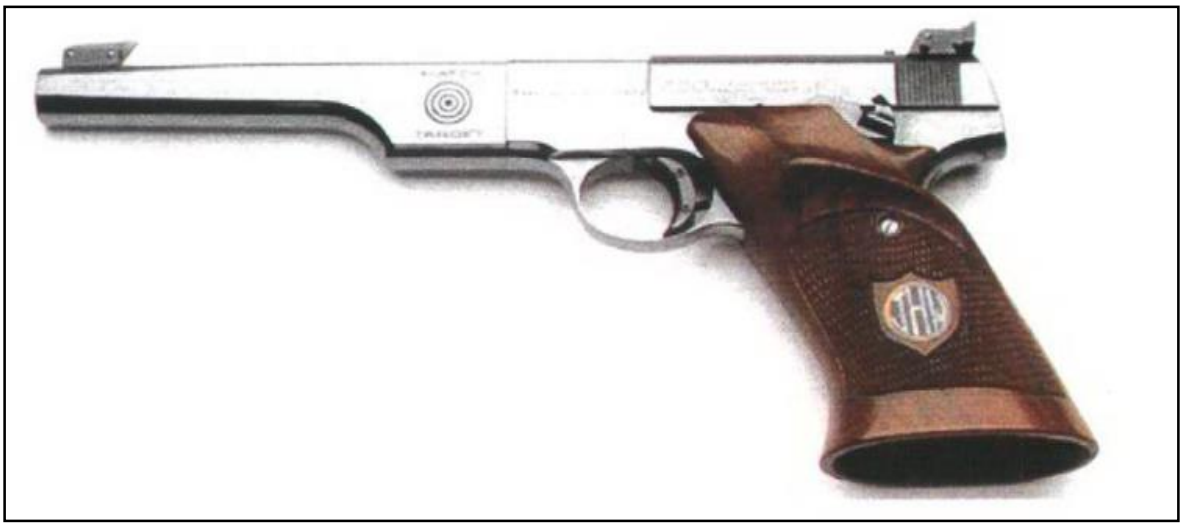
2.4. Kısa Namlulu Ateşli Silahlar (Tabancalar)

İlk kullanımından günümüze kadar geçen sürede kısa namlulu ateşli silahlar genellikle savunma amaçlı küçük silahlar olarak tasarlanmaktadır. Kısa namlulu ateşli silahların diğer silahlara göre avantajı boyutlarının küçük ve hafif olması, bu sebepten ötürü taşınması kolay ve gizlenebilir olmasıdır. Atış tipine bağlı olarak değişik boyut ve şekillerde birçok tabanca çeşidi üretilmiştir. Kısa namlulu ateşli silahlar 3 ana grupta sınıflandırılabilir:

2.4.1. Tek atışlı tabancalar

Tek atışlı tabancalar, ateşleme odası ile namlusu bütünleşik olan ve her atıştan sonra tekrar el ile doldurulması gereken ilkel tabancalardır (

Şekil 2.5). Büyük çoğunluğu 0.22 ″ LR (long-rifle) kalibrelidir ve hedef kullanım için tasarlanmıştır. Genel olarak namlu, ateşleme sırasında yerinde kalması için bazı kilitleme mekanizmalarıyla ana şasiye menteşelidir. Kilit açma sırasında, namlu boş kovanın çıkarılmasına ve yeni bir tane takılmasına izin verecek şekilde aşağı doğru sallanır. Namlunun çerçeveye sıkıca sabitlendiği ve namlunun arka ucunun doldurma / boşaltma için dışarı çıkan, geri çekilen veya aşağı kayan bir mekanizması mevcuttur. (Brian, 2008).



Şekil 2.5. Tek atışlı tabanca (Brian, 2008)

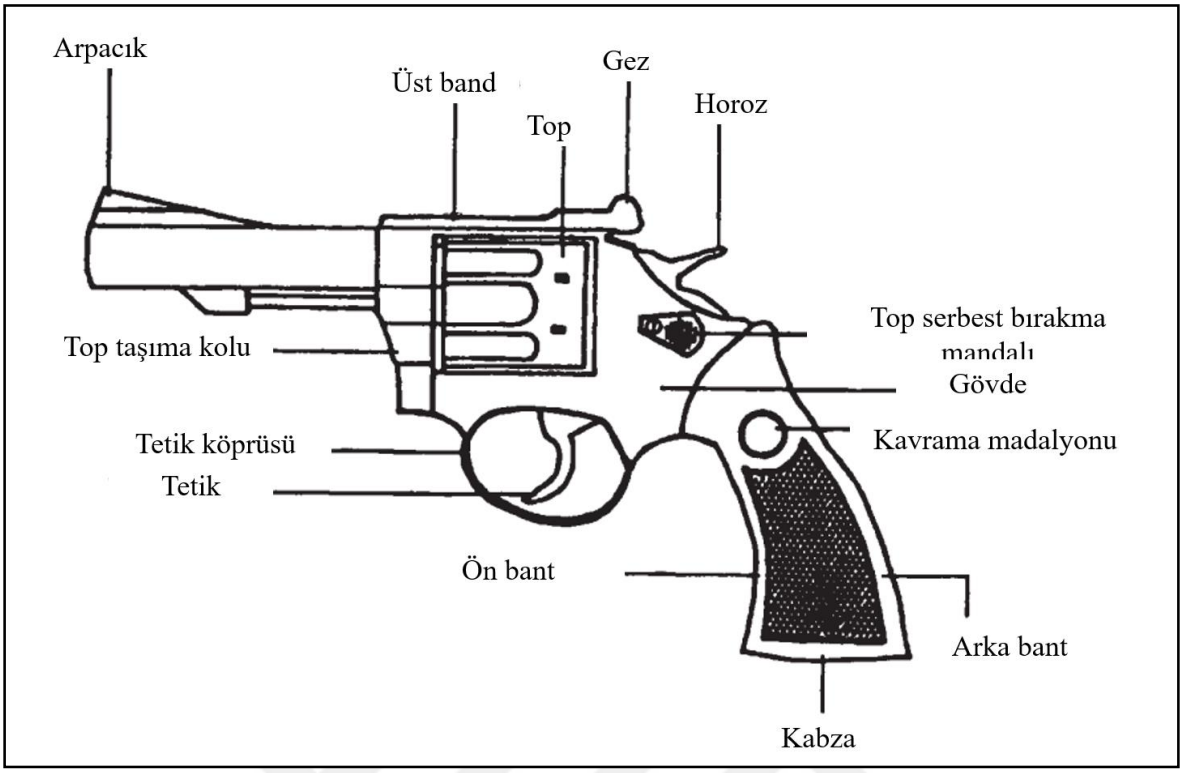
2.4.2. Toplu tabancalar

Toplu tabancaların (Revolver) orta kısmında yataklanmış ve her biri bir adet mermi alabilen birçok mermi yatağına sahip dönen bir silindir bulunmaktadır (Şekil 2.6). Horozun kurulması, namlu ile aynı hizada yeni bir mühimmat yüklemek için silindirik mandallı bir mekanizma üzerinden döndürür. Tetiği çekilir ve daha sonra horoz düşer, böylece tur atılır. Bu, en basit döner tabanca mekanizması tipidir ve kurma horozlu tabanca denir. İlk tip döner tabanca bu mekanizmayı kullanmıştır. Kurma horozlu tabancaya verilebilecek en önemli örnek, 1873'teki Colt kurma horozlu tabancadır (Brian, 2008).

Diğer döner tabanca tipi basma horozlu toplu tabancadır. Bu tasarımda, tetik üzerindeki uzun sürekli bir çekme horozu açılır, silindiri döndürür, sonra horoz tek bir işlemle düşer. Modern döner tabancaların çoğu, tek işlem kabiliyetine sahip olan bu tip bir mekanizma kullanır (Brian, 2008).

Geçmişte, çok az sayıda kendiliğinden döner, döner tabanca da üretilmiştir. Bunlar, bir tur atıldıktan sonra silindiri otomatik olarak döndüren ve horozu tekrar kilitleyen bir harekete sahiptir. Bu türün en başarılısı Webley Fosberry'dir. Bununla birlikte, bu tür bir silah oldukça nadirdir ve günümüzde sadece bir koleksiyoncu öğesi olarak mevcuttur (Brian, 2008).

Toplu tabancaların diğer tabancalara üstünlükleri; üretim maliyetinin düşük ve basit bir tasarıma sahip olmalarıdır. Kullanımı oldukça kolay bir tabanca türüdür. Dezavantajları ise en fazla 6 veya 8 atış yapılabilmesi, doldurma işleminin çoğu modelde nispeten yavaş olması, emniyet tertibatına sahip olmamasıdır (Brian, 2008).

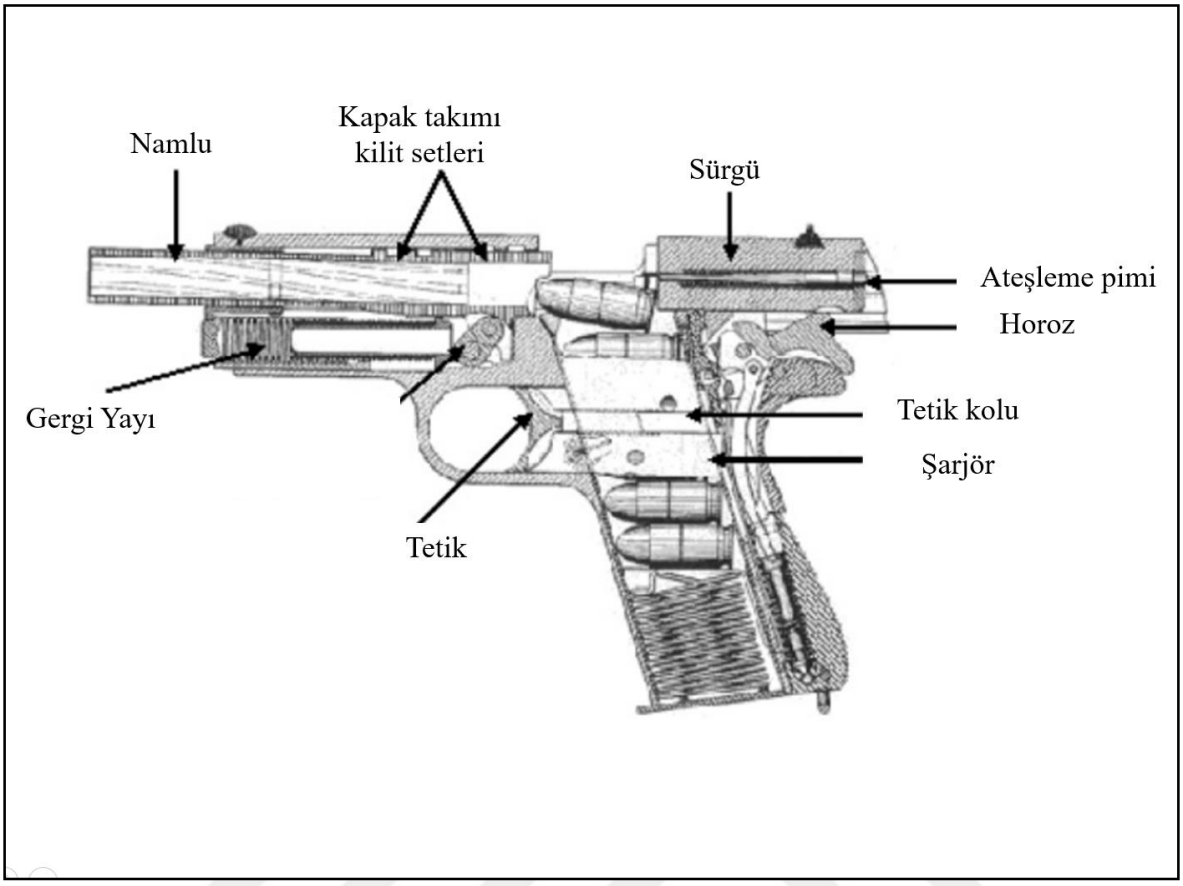


Şekil 2.6. Toplu tabanca (Brian, 2008)

2.4.3. Otomatik tabancalar

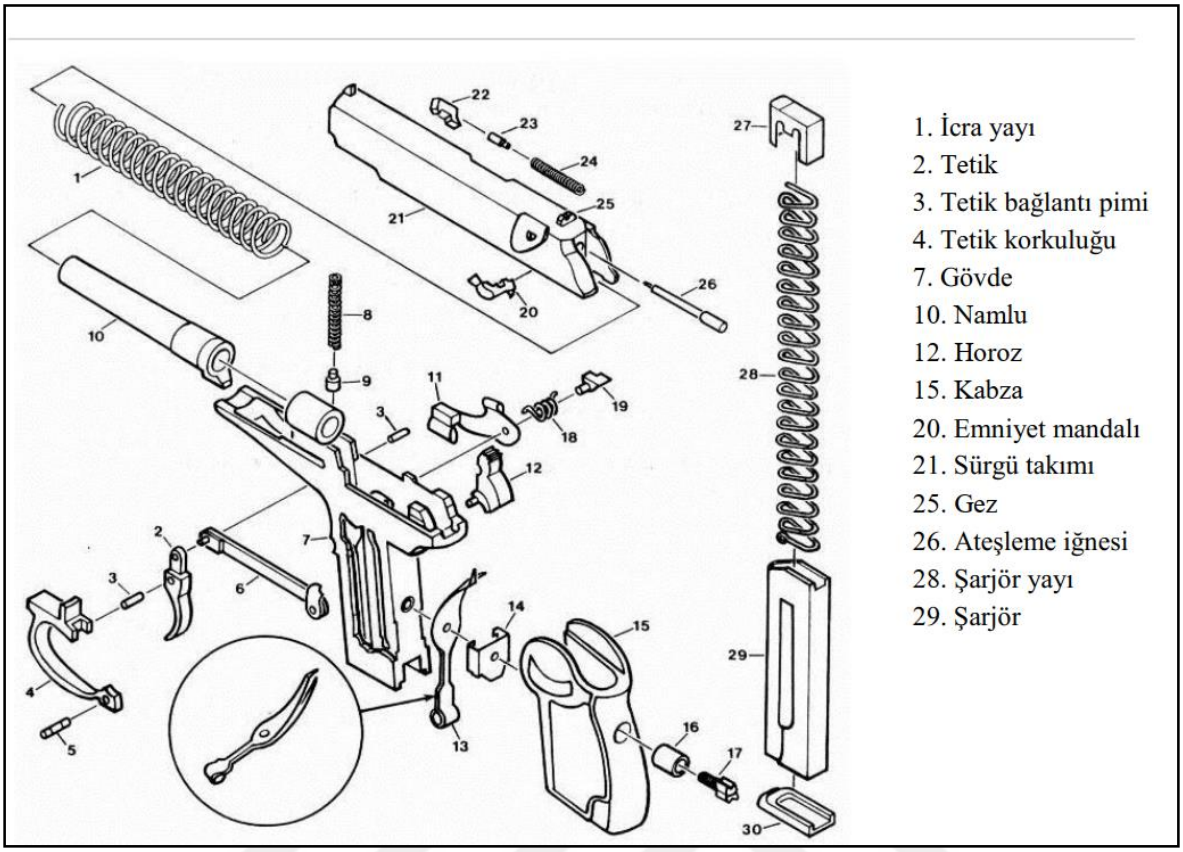
Bu tür bir silahta, mermiler, kabza çerçevesinin içine yerleştirilmiş çıkarılabilir yaylı bir haznede bulunur. Merminin namluya ilk verilişinin atıcı tarafından yapıldığı, sonra tetik çekimini müteakip ateş eden, ani geri tepmeli olarak çalışan, kendi kendine mermi yatağına mermiyi süren ve boş kovanı dışarı atarak bunu otomatik olarak yapan tabancalardır (Şekil 2.7).

Tetiği çekerken, horoz düşer ve mermi ateşlenir, mermi genişleyen gazlar tarafından namluya itilir. Bu gazlar ayrıca, mermi kovanı üzerinde, sürgü ve kama gövdesinin arkaya doğru zorlayan eşit ve zıt bir kuvvet uygular. Bu, boş kovanı, sürgünün yan tarafındaki veya bazen üst kısmındaki bir boşluktan çıkarır. Geriye doğru hareketinin sonunda, yaylı sürgü, şarjörün üst kısmından yeni bir mermi alarak ileri doğru hareket eder ve silah ateşlemeye hazır hale gelir (Brian, 2008).



Şekil 2.7. Otomatik tabanca mermi beslemesi (Brian, 2008)

Mermileri şarjörde bulunduğu için "şarjörlü tabanca" olarak da isimlendirilmektedirler. Şekil 2.8'de otomatik tabanca mekanizması verilmiştir. Ateşleme sistemlerinin yapısına göre; yarı otomatik ve tam otomatik olarak iki gruba ayrılırlar (Brian, 2008).



Şekil 2.8. Otomatik tabanca mekanizması (Brian, 2008)

Yarı otomatik tabancalar:

Merminin namluya ilk verilişinin kullanıcı tarafından yapılmasından sonra tetiği her çekişte bir atış yapan ve ikinci atışa hazır hale gelen tabancalardır. Her atış için tetiğin ayrı ayrı çekilmesi gerekmektedir. Merminin namluya ilk veriliş işlemi namlunun üstündeki sürgüden tutulup geriye çekerek yapılır ve bu işlem tek bir mermiyi şarjörden çıkarıp namluya sürer. Yarı otomatik tabancalar da emniyet tertibatı bazı modellerde tetiği bazı modellerde horoz sistemini kilitler (Brian, 2008).

Tam otomatik tabancalar:

Merminin namluya ilk verilişinin kullanıcı tarafından yapıldıktan sonra tetik bir defa çekilip bırakılmadığı zaman şarjördeki mermiler bitinceye kadar ateş edebilen tabancalardır. Aynı zamanda kullanıcılara, tetiği çekip bırakmak kaydıyla tek tek atış yapılmasına olanak sağlarlar. Günümüzde otomatik tabancaların pek çok mermi kapasiteli (13, 14, 15, 16, 17 ve 18 v.b) olan tipleri üretilmektedir (Brian, 2008).

3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde yapılan çalışmalar deneysel ve simülasyon olarak ayrı kategoride incelenmiştir.

3.1. Deneysel Çalışmalar

Morphy vd. yaptıkları çalışmada barut gazlarının patlamasının namluda oluşturduğu ısı sebebiyle namlu yüzeyinde aşınmaya sebep olduğunu belirtmektedirler. Yaptıkları deneyde namlu yüzeyinin aşınmaya dirençli hale gelmesi için karbürizasyon yöntemlerinin etkilerini incelemişlerdir (Morphy ve Fisher, 1981).

Zhang vd. çalışmalarında bir otomatik tüfeğin dinamik simülasyonunu yapmışlardır. İçerisinde birçok sürtünme mekanizması ve tampon yayı bulunan bir çeşit sürtünme tamponunun matematiksel ve fiziksel modelini oluşturmuşlardır. Deneysel sonuçların teorik ve simülasyon sonuçlarıyla uyuştuğunu gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçların özellikle belirli bir ateşlenme oranına sahip olması istenen otomatik silahların dizayn kalitesi açısından büyük önem taşıdığını göstermişlerdir (Zhang ve Jia, 2011).

Özcan yaptığı çalışmada borlama, karbürleme ve borokarbürleme deneylerinin sonuçlarına göre parametreleri optimize etmiş ve ardından gerçek ölçekli namlu üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Yiv setlerini geometrik açıdan bozmadığı ve namlunun yüzey kalitesini düşürmediği için yöntem olarak toz borlama yöntemini seçmiştir. Namlu olarak MKE'den tedarik edilen MP5 namlusunu kullanmıştır. Yaptığı atış testleri sonrasında malzemenin mikroyapı ve mikrosertlik açılarından herhangi bir değişime uğramadığını gözlemlemiştir (Özcan, 2012).

Değirmenci yaptığı çalışmada NATO standart 7.62 mm ve 5.56 mm namlular, farklı mermi ve barut ağırlıkları kullanarak geniş bir ateşleme testi gerçekleştirmiştir. İç basınç dağılımını ve mermi hızlarını zamana ve konuma bağlı olarak deneysel olarak hesaplamıştır. Çalışmasında belirlediği hız fonksiyonuyla 7.62 ve 5.56 mm namlulardaki iç basınç dağılımını ve mermi hızlarını uzun ve pahalı ölçümlere gerek kalmadan %90 doğruluğunda hesaplamayı başarmıştır (Değirmenci, 2015).

Piticari vd. yaptıkları çalışmada namlu ağzı eklentilerinin otomatik tüfek namlusundaki eğme (bending) titreşimlerine etkisini incelemişlerdir. Yüksek performanslı ve yüksek hızlı kameralar kullanarak, 5.56 mm otomatik tüfeğin ağız kısmında önce eklenti olmaksızın sonrasında üç farklı eklenti ile nasıl titreştiğini kaydetmiş ve analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, namlu ağzına yapılan eklentilerin namlu ağzı titreşiminde büyük bir etkisi olduğunu göstermişlerdir (Piticari, Pirlot, Sava ve Vanhove, 2015).

3.2. Nümerik Çalışmalar

Nelson vd. yaptıkları çalışmada ateşlenme sırasında namlu duvarlarında oluşan ısı transferini hesaplamışlardır. Bu ateşlenmenin namlu duvarlarındaki deformasyon üzerindeki etkilerini göstermişler ve bunların kontrol altına alınması için çözüm önerileri göstermişlerdir (Nelson & Ward, 1981).

Huang, çalışmasında 105 mm top namlusunu modelleyip hacim enerji yoğunluğu metodu ve sonlu elemanlar analizi uygulayarak namlularda oluşan patlamaya bağlı hasar analizi yapmıştır. Enerji yoğunluğu metodu ile 105 mm top namlusunun ateşlendikten 80 µs sonra yaklaşık 727 MPa basınçta parçalandığını gözlemlemiştir. Oluşan parçalanmaların zamana göre nasıl davrandığının tahminlerini yapmıştır (Huang, 1993).

Öztürk çalışmasında hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemini Ansys Fluent yazılımı üzerinden kullanarak namlu tasarımının geri tepme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmasında problemin fiziki modelini oluşturduktan sonra geri tepme kuvvetinin azaltılması için hazırlanan modeller ile karşılaştırma analizleri yapmıştır. Bulduğu sonuçların ateşli silahlar üzerinde yapılabilecek Ar-Ge çalışmalarına fayda sağlayabileceğini belirtmiştir (Öztürk, 1999).

Gough yaptığı çalışmada iç balistik hesaplaması için tek boyutlu bir model oluşturmuştur. Oluşturduğu bu modeli Lumped parametresi sonuçları ile geliştirerek teorik değerlerle karşılaştırmış ve gerçeğine yakın değerler elde ettiğini kanıtlamıştır (Gough, 2001).

Fedaravicius vd. yaptıkları çalışmada ordu personelinin eğitimi için bir lazer silah simülatörü yapmış ve bu simülatörün verimliliğini arttırmak için içerisine silahların geri tepme düzenlerini simüle eden mekanizma ve sistem modülleri eklemişlerdir. Ateşlenme sırasında

ortaya çıkan kuvvetleri hem teorik hem deneysel olarak incelemiş, aynı zamanda geri tepme parametrelerini belirlemişlerdir. Elde edilen verileri kullanılarak lazer simülatörün yapısal sentezini yapmış, deneysel çalışmaların teorik değerlerle sağlamasını gerçekleştirmiş ve ordu personelinin eğitiminde başarılı bir şekilde kullanılabilecek bütün bir simülasyon yaratmayı başarmışlardır (Fedaravicius, Ragulskis ve Slizys, 2005).

Tawfik çalışmasında hareket halindeki bir merminin etkisindeki Euler-Bernoulli çubuğunun kararlılığını sonlu elemanlar modelinin özdeğer analizini kullanarak yeniden açıklamıştır. Çubuğun özdeğerleri merminin kütlesi, hızı ve konumuna göre değiştiği için sistemin en küçük özdeğeri sıfıra (kararsızlık oluşana) ulaşana kadar farklı hızlar, kütleler ve konumlardaki özdeğerleri hesaplamıştır. Sonrasında Newmark algoritmasını kullanarak farklı hız ve kütle oranlarındaki çubuğun dinamiğini incelemiştir. Çalışmasında, kademeli namlu kullanımlarında namlu çapının küçük bir miktarda arttırılmasıyla namlunun kararlılığının arttırılabileceğini göstermiştir (Tawfik, 2008).

Gündüzer çalışmasında PRODAS paket programını kullanarak iç balistik temel denklemlerini esas alan balistik değerleri elde etmiştir. M101 top namlusunun iç balistik değerleri ile 3 boyutlu tasarım programı olarak Catia kullanarak bir model oluşturmuş ve Ansys Workbench yazılımını kullanarak bu modele sonlu elemanlar analizi uygulamıştır. Analiz sonucunda gerilme dağılımındaki kritik yerleri belirlemiş ve namlu cidar kalınlığı ve emniyet faktörünü hesaba katarak tasarım optimizasyonu yapmıştır. Elde edilen sonuçların namlu cidarı optimizasyonu ile ilgili akademik çalışmalara fayda sağlayabileceğini belirtmiştir (Gündüzer, 2011).

Sönmez, atış esnasında namludaki en fazla gerilmenin olduğu namlu yanma odasına etki eden gerilmelerin matematiksel modelini çıkarmış, farklı sevk barutların kullanıldığı atışlardan elde edilen anlık namlu iç basınç değerlerini kullanarak, farklı malzemelerden üretilen namluların yanma odalarında etkili olan gerilme değerlerini ve yanma odalarında ki toplam deformasyon değerlerini, zamana bağlı olarak yapılan analizler neticesinde elde etmiştir (Sönmez, 2009).

Değirmenci vd. yaptıkları çalışmada silah namlusundaki taşınımlı ısı aktarımı katsayılarını elde etmek için termo-kimyasal bir yaklaşım formüle etmişlerdir. Namlu ekseni boyunca Reynolds ve Prandtl sayılarını hesaplamak için basınç dalgasının hızını, yoğunluğunu ve

açığa çıkan gaz karışımının ısı iletimini kullanmışlardır. Sonrasında, sürekli değişen taşınımlı ısı aktarımı katsayılarına bu iki sayıyı kullanarak hesapladıkları Nusselts sayısı ile karar vermişlerdir. Elde edilen katsayıların, deneysel ateşlenme sonucunda elde edilen gerçek katsayılara oldukça yakın olduğunu gözlemlemişlerdir (Değirmenci ve Dirikolu, 2012).

Deng vd. çalışmalarında doğrusal olmayan süreksiz sonlu elemanlar metodu kullanarak 5,56 mm tüfek mermisinin ateşlendikten sonra namlunun içinde oluşan basınç altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Namlu basıncını formüle etmek ve girdi olarak kullanmak için Vallier-Heydenreich metodunu kullanmışlardır. Simülasyon sonucunda bu metot ile mermi ve namlunun gerilme-gerinimin (strain) yanı sıra, mermi hızının ve dönüşünün de hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Aynı zamanda namlu ağzındaki merminin hızını deneysel verilerle karşılaştırmış ve tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. Çalışmalarındaki simülasyonun gelecekteki namlu dizaynı araştırmalarında zaman kazandırabileceğini belirtmişlerdir (Deng, Sun ve Chiu, 2012).

Jedlicka vd. bu çalışmalarında 9 mm bir Luger tabancanın kovanlarının balistik analizini yapmışlardır. Analizi yapılacak kovan olarak standart 8 g FMJ mermi kovanı seçmişlerdir. Analizi yaparken tanınmış bir iç balistik modeli farklı bir yaklaşımla incelemişlerdir. Analizlerinin sonucunda yeni tür mermi geliştirmelerinde mermi ağırlığının silahın balistik karakterine nasıl etkileri olduğunu göstermeyi amaçlamışlardır (Jedlicka, Komenda ve Beer, 2012).

Stiavnicky vd. yaptıkları çalışmada ateş etme sırasında merminin ilerleyişiyle oluşan namlu titreşimlerini düzeltme yollarını nümerik olarak incelemişlerdir. Mermi ve namluyu LS-DYNA yazılımı kullanarak, namlunun herhangi bir üretim hatası yokmuş gibi, mermiyi ise NATO standart 5,56 mm kalibre gibi modellemişlerdir. Yaptıkları inceleme sonucunda merminin ateşlenme anındaki namlu davranışını; namlunun eklentili ve eklentisiz halleri için ayrı ayrı göstermişlerdir (Stiavnicky ve Lisy, 2013).

Akçay vd. bu çalışmalarında bir makineli tüfek namlusundaki sıcaklık dağılımını hesaplamak adına zamana bağlı bir ısı transferi problemi çözmüşlerdir. Namlunun duvar sıcaklık dağılımını öngörmek için iç balistik teorisi kullanarak zamana bağlı taşınımlı ısı aktarımı katsayısını hesaplamışlardır. Diferansiyel denklemin nümerik çözümünü sonlu

farklar yöntemi kullanarak yapmışlardır. Namlu malzemesinin ısı karakteristiklerini sıcaklıktan bağımsız kabul etmişlerdir. Elde edilen nümerik verileri literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırmışlar ve tatmin edici seviyede uyuştuğunu gözlemlemişlerdir (Akçay ve Yükselen, 2014).

Danış katı yakıtlı konvansiyonel silahlar için balistik simülasyon yazılımı oluşturmayı hedeflemiş olup bu doğrultuda iç balistik hesaplamalarını sayısal olarak çalışılmış ve iki sayısal model üretmiştir: sıfır boyutlu model ve bir boyutlu model. Yığılı parametre yaklaşımına dayanan sıfır boyutlu modelinde, namlu çıkış hızını bulmak için itici tanelerin tutuşmasıyla birlikte balistik parametrelerin varyasyonunu incelemiştir. Bir boyutlu modelinde, problemi, boyutsuz viskoz olmayan akış olarak modellemiş ve çözüm tekniği olarak Roe yaklaşık Riemann çözücüsünü kullanmıştır. Her iki modelde, Noble-Abel yaklaşımına dayalı gaz akışını simüle etmiş olup her iki yaklaşım arasındaki farkları incelemiştir (Danış, 2014).

Cronemberger vd. 7,62 mm tüfek namlusunun balistik özelliklerini teorik hesaplamaları deneysel sonuçlarla karşılaştırarak araştırmışlardır. Teorik hesaplamalarında PRODAS yazılımında Vallier-Haydenreich yöntemimi kullanmışlar ve her bir matematiksel model için dikkate alınması gereken parametreleri belirlemişlerdir. Teorik çözümleri deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır ve silahtaki enerji dönüşümünün termodinamik analizini sunmuşlardır (Cronemberger ve Lima, 2014).

3.3. Araştırmaların Değerlendirilmesi

Literatürde yapılan çalışmalar deneysel ve nümerik çalışmalar olarak ikiye ayrılmıştır. Deneysel çalışmalar incelendiğinde ateşleme testleri yapılarak namludaki basınç, sıcaklık dağılımı, mermi davranışları ve hasar analizi gibi konular farklı metotlarla incelenmiştir. Nümerik çalışmalarda ise analitik ve simülasyon metotlarının kullanıldığı görülmüştür. Namludaki basınç, sıcaklık dağılımları, namlu titreşimi ve hasar analizleri, mermi hız dağılımları gibi konular incelenmiş ve bunların deneysel çalışmalarla tutarlılık içerisinde olduğu gözlenmiştir. Güncel metotlar kullanılarak namlu titreşimlerinin azaltılması için metotlar ve eklentiler geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada literatüre benzer şekilde Vallier-Heydenreich yöntemiyle namlu içerisindeki basınç dağılımı elde edilmiştir. Bu basınç dağılımı mermiye uygulanarak merminin namlu içerisindeki hareketi modellenmiş olup Deng ve diğerlerinin yaptığı çalışmada olduğu gibi namlu çıkış hızıyla doğrulanmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada namlu ve mermi malzeme modeli Johnson–Cook malzeme modeliyle modellenmiştir. Böylelikle sadece sabit şekil değiştirme oranlarındaki elastik-plastik davranış değil farklı şekil değiştirme oranlarındaki termal-elastik-plastik davranış da modellenmiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, tabanca namlusunun iç balistik etkilerinden kaynaklanan zamana göre merminin namlu içerisindeki hızı ve konumu gibi olaylar, mermi ve namlunun deformasyonu ve gerilmeleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntemler aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

4.1. Namlu ve Mermi İçin Malzeme Bilgileri

Çalışmada, AISI 4340 çelik malzemeden üretilmiş 9 mm kalibrelik 86 mm namlu uzunluğuna ve 6 (sağ) yiv sete sahip tabanca namlusu ve kurşun-antimon alaşımı malzemeye sahip mermi kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de namlu ve Çizelge 4.2'de ise mermi malzemelerinin kimyasal bileşimi gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında referans alınan namlu yerli bir silah üreticisinin (TİSAŞ) geliştirdiği ticari bir üründür. Firmanın ticari kaygılarından dolayı namlu geometrisinin bazı detayları bu çalışma kapsamında verilememiştir.

Çizelge 4.1. AISI 4340'ın kimyasal bileşimi (Azom.com, 2019)

Element	Yüzde Bileşim
Demir, Fe	95,195 - 96,33
Nikel, Ni	1,65 - 2,00
Krom, Cr	0,700 - 0,900
Manganez, Mn	0,600 - 0,800
Karbon, C	0,370 - 0,430
Molibden, Mo	0,200 - 0,300
Silikon, Si	0,150 - 0,300
Kükürt, S	0,0400
Fosfor, P	0,0350

Çizelge 4.2. CuZn36'ın kimyasal bileşimi (Aurubis-stolberg.com, 2019)

Element	Yüzde Bileşim
Bakır, Cu	63,5-65,5
Demir, Fe	0,05 mak.
Kurşun, Pb	0,05 mak.
Alüminyum, Al	0,02 mak.
Nikel, Ni	0,3 mak.
Kalay, Sn	0,1 mak.

Namlu çeliğinin (AISI 4340) dövme öncesi mekanik özellikleri Çizelge 4.3'te ve dövme sonrası mekanik özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. AISI 4340'ın dövme öncesi mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı	950 MPa
Akma Dayanımı	780 MPa
Elastiklik Modülü	208 GPa
Kopma Uzaması	%18
Sertlik	290 HB
Yoğunluk	7850 kg/m^3

Çizelge 4.4. AISI 4340'ın dövme sonrası mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı	1109 MPa
Akma Dayanımı	1010 MPa
Elastiklik Modülü	238 GPa
Kopma Uzaması	%9
Sertlik	330 HB
Yoğunluk	7850 kg/m^3

Namlu ve mermi parametreleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Namlu ve mermi parametreleri

Namlu malzemesi	AISI 4340
Kalibre	9 mm
Namlu uzunluğu	86 mm
Namludaki yiv set adedi	6 (sağ)
Mermi çekirdek malzemesi	Kurşun-antimon alaşımı
Mermi gömlek malzemesi	Pirinç
Merminin namludan çıkış hızı	350 m/s
Barut miktarı	0,325 g
Mermi ağırlığı	8±0,075 g

Namlu ve mermi için Eş. 2.10'da gösterilen Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri ise Çizelge 4.6'da verilmiştir (Ansys, 2018).

Çizelge 4.6. Namlu ve mermi için JC malzeme modeli parametreleri

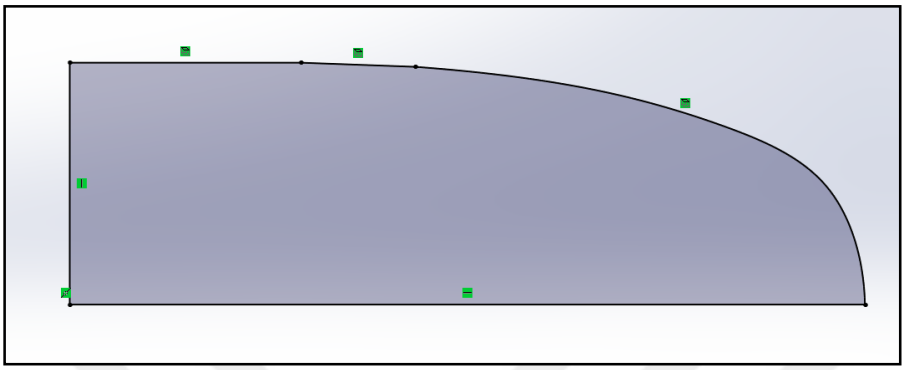
	A(MPa)	B(MPa)	n	c	m	T_r	T_m	$\dot{\bar{\varepsilon}}_o$
AISI 4340	792	510	0,26	0,014	1,03	27	1519,85	1
Kurşun-Antimon alaşımı	90	292	0,31	0,025	1,09	27	1082.9	1

4.2. Namlu ve Mermi Geometrisi

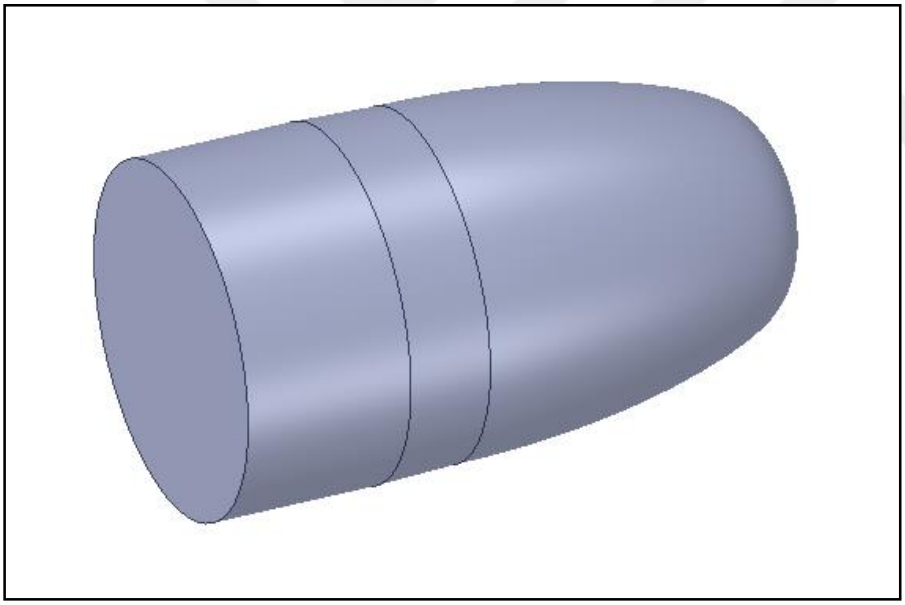
Mermi ve namlu geometrisinin üç boyutlu modelleri Solidworks üç boyutlu modelleme yazılımında gerçekleştirilmiş olup modelleme için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

- Mermi modeli 9 mm Parabellum referans alınarak iki boyutlu skeç oluşturulur (Şekil 4.1).
- Oluşturulan iki boyutlu skeçten üç boyutlu model oluşturulur (Şekil 4.2).
- Namlu geometrisinin üç boyutlu modeli TİSAŞ'tan temin edildiği için doğrudan Solidworks ortamında açılır (Şekil 4.3).
- Namlu geometrisi için gerekli sadeleştirilmeler yapılır (Şekil 4.4).
- Mermi geometrisi için gerekli sadeleştirmeler yapılır (Şekil 4.5).

- Mermi ve namlu modeli montajlanır (Şekil 4.7).
- Montajlanan modeli Ansys Workbench programında açabilmek için parasolid (xt) olarak kayıt edilir.



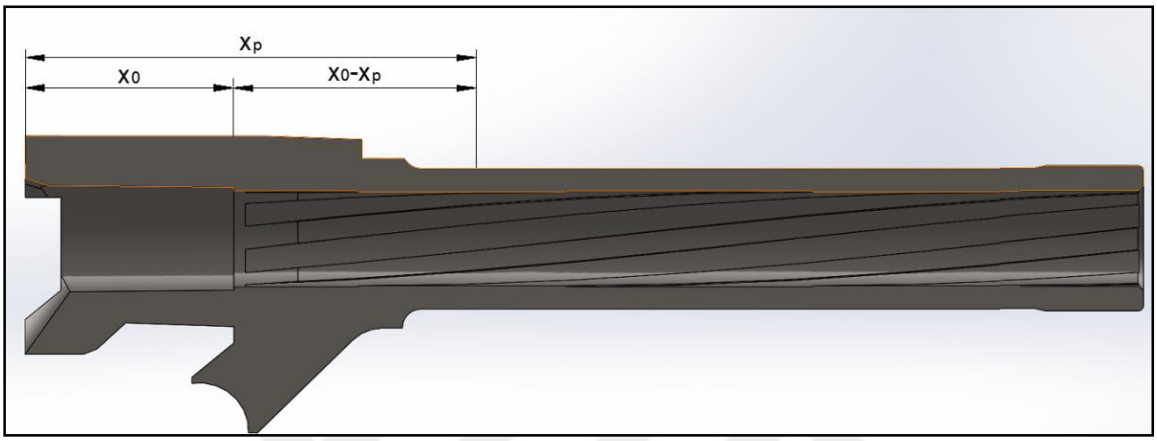
Şekil 4.1. Mermi iki boyutlu modeli



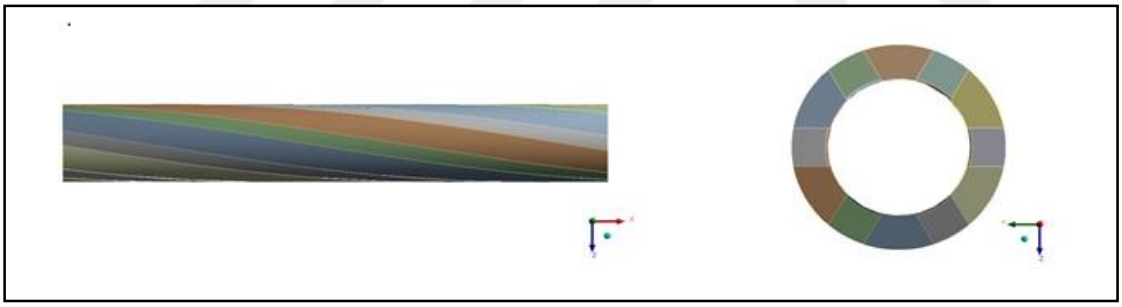
Şekil 4.2. Orijinal mermi modeli

Referans alınan orijinal namlu modelinin kesit görünümü
Şekil 4.3'de verilmiştir. Ancak analizler için bazı sadeleştirilmiş yapılarak
Şekil 4.4'te verilen geometrik model hazırlanmıştır. Bu sadeleştirmeler; geometrik modeli dörtgensel tabanlı elemanlara bölebilmek, eleman sayısını azaltmak ve böylece analiz süresini düşürmek amacıyla yapılmıştır. Bu sadeleştirmeler yapılırken mümkün oldukça orijinal modelin davranışını değiştirmeyecek sadeleştirmelerin yapılmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca dörtgensel tabanlı elemanlara bölebilmek için namlu geometrisi; yiv ve set helisleri doğrultusunda 12 ayrı parçaya bölünmüştür. Mermi modelinin birbirine yakın

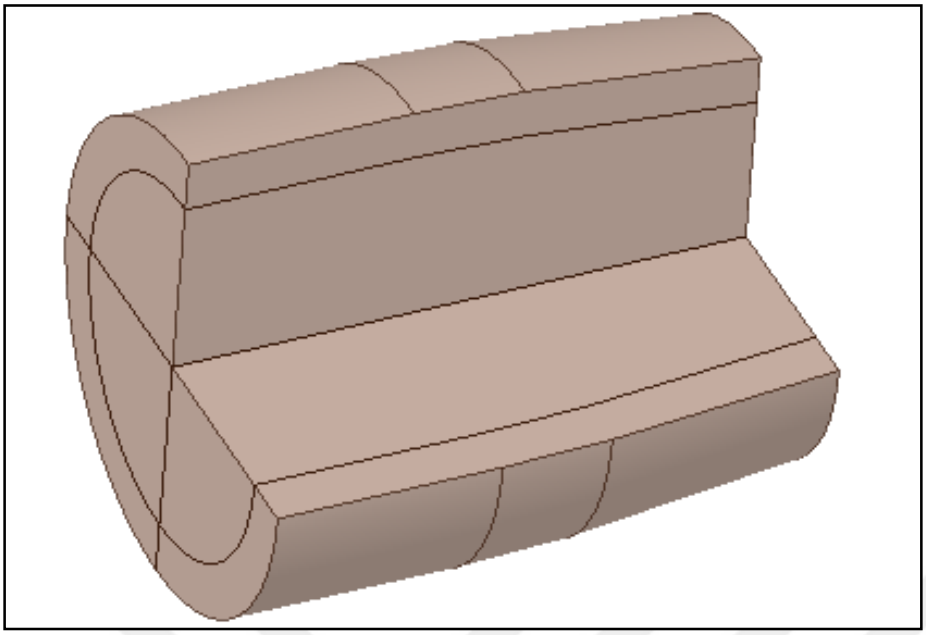
boyutlarda dörtgensel tabanlı elemanlara bölebilmek için, merminin namlu içerisindeki hareketinde herhangi bir teması olmayan uç kısmından hareket doğrultusuna dik düzlem ile kesilerek kısaltılmış (Şekil 4.5) ve 8 parçaya bölünmüştür (Şekil 4.6). Mermi hacmi analiz modelinde daha küçük olarak modellenmiş olup aynı kütleyi yakalayabilmek için analiz modelinde mermi yoğunluğu artırılarak aynı kütle (8 g) elde edilmiştir.



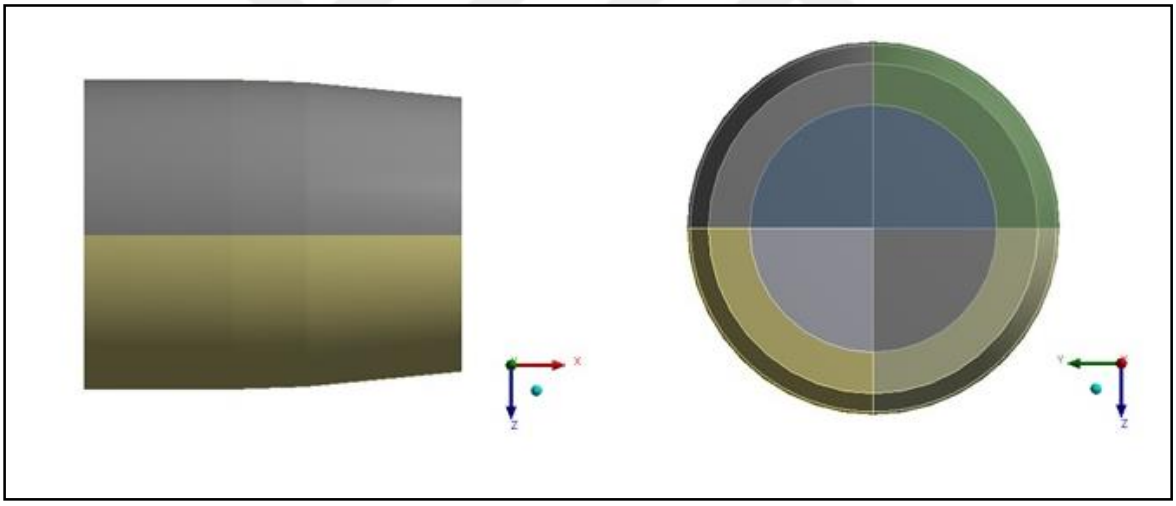
Şekil 4.3. Orijinal namlu modelinin kesit görünüşü



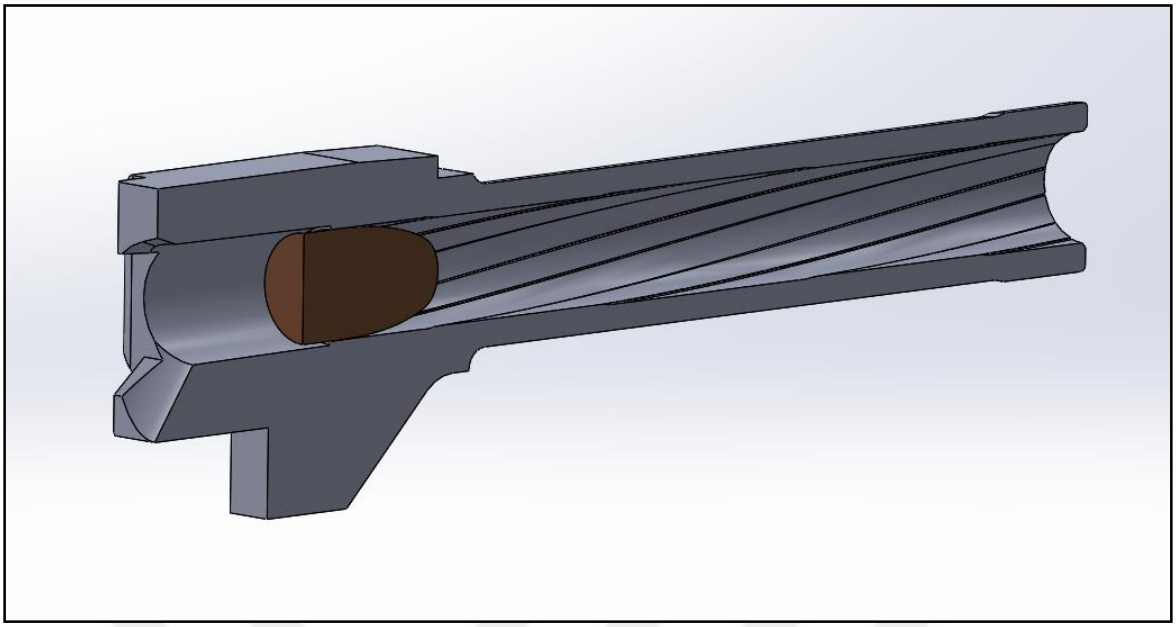
Şekil 4.4. Sadeleştirilmiş namlu analiz modeli



Şekil 4.5. Sadeleştirilmiş mermi modeli



Şekil 4.6. Sadeleştirilmiş mermi analiz modeli



Şekil 4.7. Orijinal mermi ve namlunun montajlanmış modeli

4.3. İç Balistik Hesaplamaları

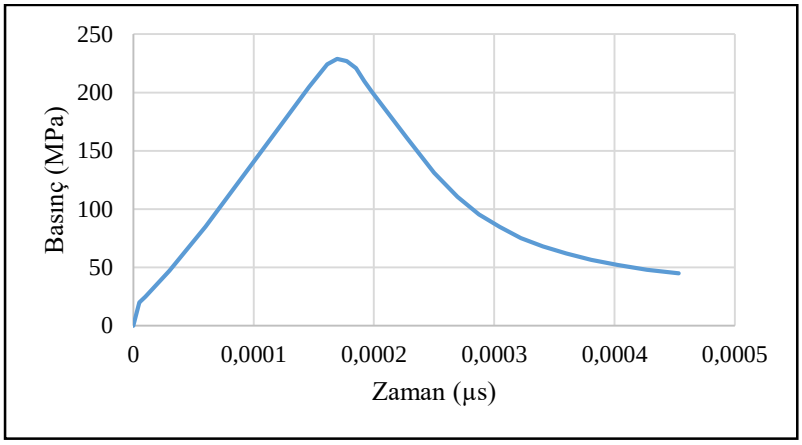
İç balistik verileri, 2.3.1 numaralı bölüm altında anlatılan deneysel veri tablolarına dayalı olan Vallier-Heydenreich yöntemi kullanılarak elde edilmiştir (Oerlinkon-Buhrle, 1981).

Çizelge 4.7'de verilen silah parametreleri kullanılarak, Eş. 2.21'de verilen eşitlik vasıtasıyla ortalama basınç (P_{avg}) hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7. Silah parametreleri

Namlu uzunluğu (L)	86 mm
Maksimum basınç (P_m)	230 MPa
Mermi ilk hızı (V_0)	350 m/s
Barut kütlesi (m_p)	0,325 g
Mermi kütlesi (M)	8 g
Mermi çapı (D)	9 mm

Böylece mermiye uygulanması için ihtiyaç duyulan, Şekil 4.8'deki zamana göre basınç değişimini gösteren basınç-zaman grafiği elde edilmiştir.



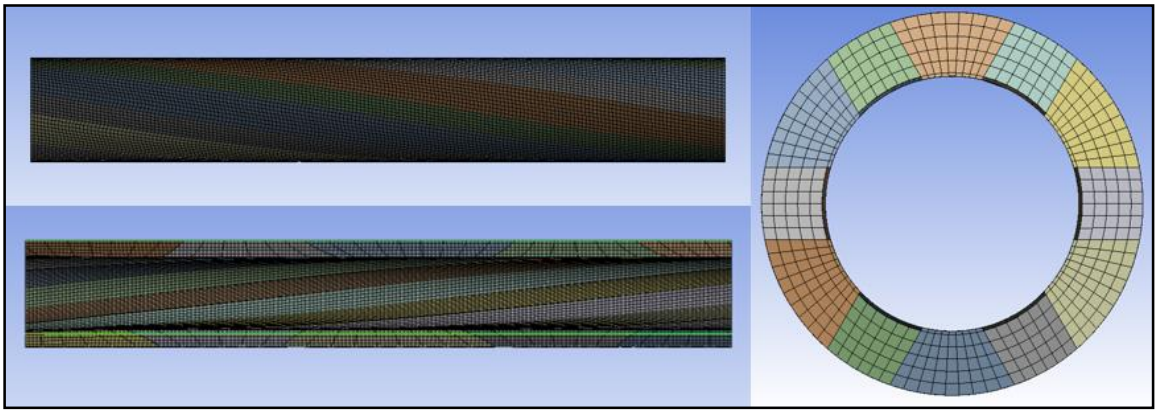
Şekil 4.8. Zamana göre basınç- zaman grafiği

4.4. Sonlu Elemanlar Analizi

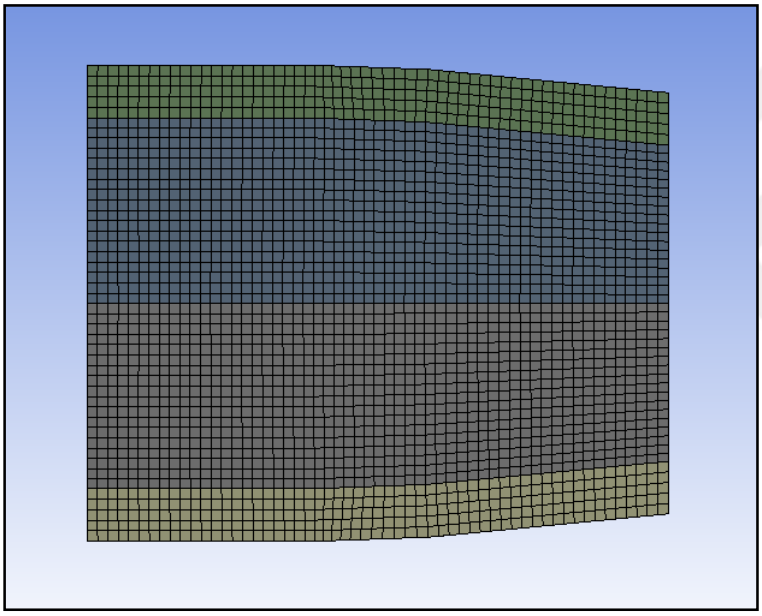
Explicit analizlerde doğru analiz modelinin oluşturulması, gerçekçi sonuçlara ulaşmak açısından önemlidir. Doğru analiz modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle olarak malzeme davranışının doğru olarak simüle edilmesi gerekmektedir. Metal malzemelerin termal-elastik-plastik davranışını modellemede yaygın olarak kullanılan Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde hata oranın az olması ve analiz çözüm adımının büyük olabilmesi için dörtgensel elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri Ansys Workbench Explicit Dynamics modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Explicit analizlerde çözüm ağı (mesh) yoğunluğu sonuçların doğruluğunu ve çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. Çok yoğun bir çözüm ağının kullanılması halinde eleman sayısı artacak ve bunun sonucunda elemanların karakteristik uzunluk değeri küçülecektir. Karakteristik uzunluğun küçülmesi ise analizin zaman adımı değerini küçültüp çözüm süresini uzatacaktır. Ancak yeteri kadar yoğun bir çözüm ağı oluşturulmadığında ise sonlu elemanlar modeli, problemi yeteri doğrulukta yansıtamayacaktır.

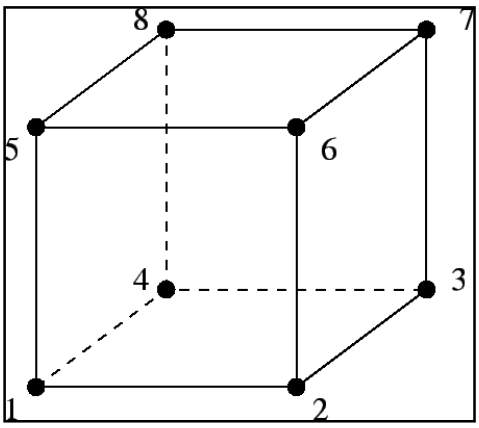
Namlu ve mermi geometrisinin çözüm ağları sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Çözüm ağı oluşturulurken Şekil 4.11’de verilen üç boyutlu doğrusal dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Namlu geometrisi için çözüm ağında 90720 ve mermi geometrisinde ise 104664 eleman kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Namlu çözüm ağı

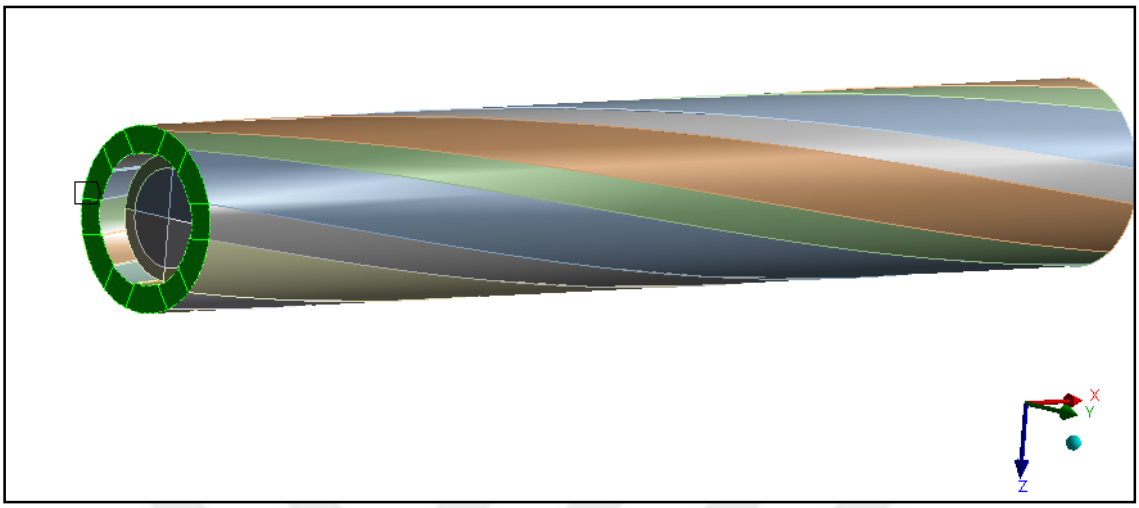


Şekil 4.10. Mermi çözüm ağı



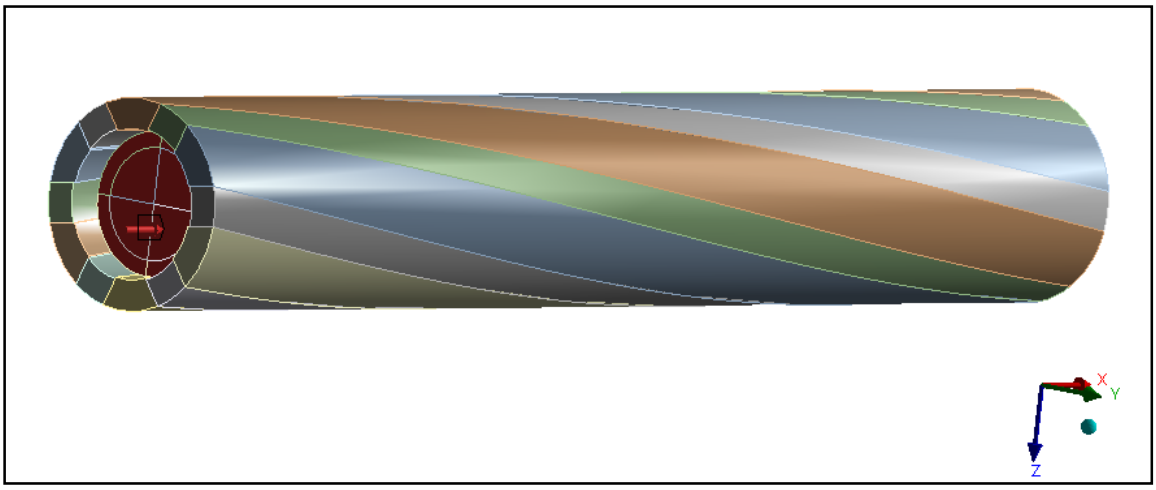
Şekil 4.11. Doğrusal dörtgen eleman

Namlu analiz modelinde Şekil 4.12'de gösterilen namlunun sol uç yüzeyi sabitlenmiştir. Bu, seçilen yüzey için tüm yönlerde hiçbir yer değiştirme olmayacağı anlamını taşır.

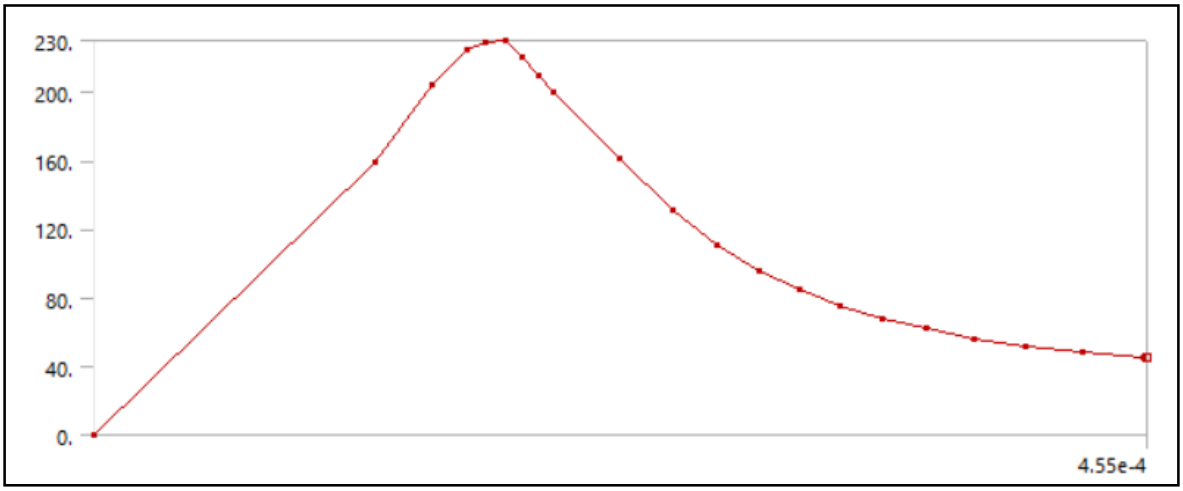


Şekil 4.12. Namlu sabitleme yüzeyi

İç balistik denklemlerinden elde edilen ve Şekil 4.8'de gösterilen basınç, zamana bağlı olarak değişecek biçimde merminin arka yüzeyine uygulanmıştır (Şekil 4.13). Merminin arka yüzeyine uygulanan bu basıncın grafiği ise Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Mermi basınç uygulama yüzeyi



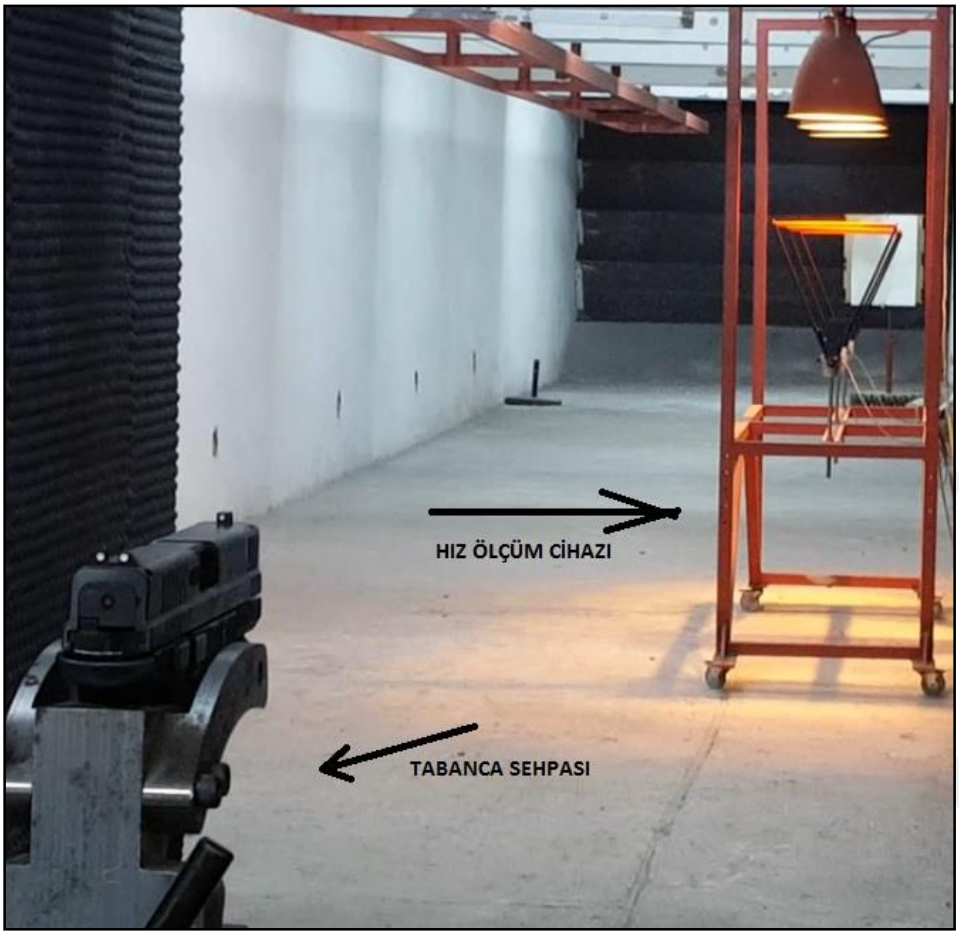
Şekil 4.14. Zamana göre basınç değişim grafiği

4.5. İlk Hız Test Yöntemi

Analiz sonuçlarında elde edilen mermi namlu çıkış hızı ile test verilerinden elde edilen çıkış hızı karşılaştırılarak analiz sonuçlarının doğrulanması hedeflenmiştir. Merminin namlu çıkış hızını ölçebilmek için TOP 3-2-045/4.1 ilk muayene deney standardına göre deney süreci gerçekleştirilmiştir. İlk hız ölçüm deneyleri yapılırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

- 3 adet tabanca seçilip seri numaraları kaydedilir.
- Seçilen tabancalar sırasıyla sehpaya montajlayıp atışa uygun hale getirilir.
- Sehpayı ve hız ölçüm düzeneğini hazırlamak amacıyla her bir tabanca ile en fazla 10 adet deneme atışı yapılır.
- Tabanca başına 12'şer atış yapılarak tabancaların 10 metre mesafedeki hızları ölçülüp, kaydedilir.
- En yüksek ve en düşük değerler çıkarıldıktan sonra kalan 10 atış değerlerinin ortalaması kaydedilir.

Deney düzeneği Şekil 4.15’te gösterilmektedir.

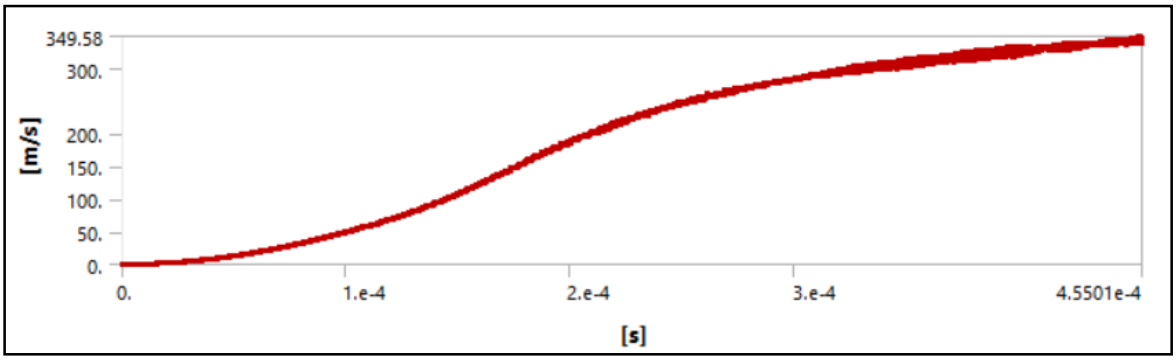


Şekil 4.15. Hız ölçüm test düzeneği

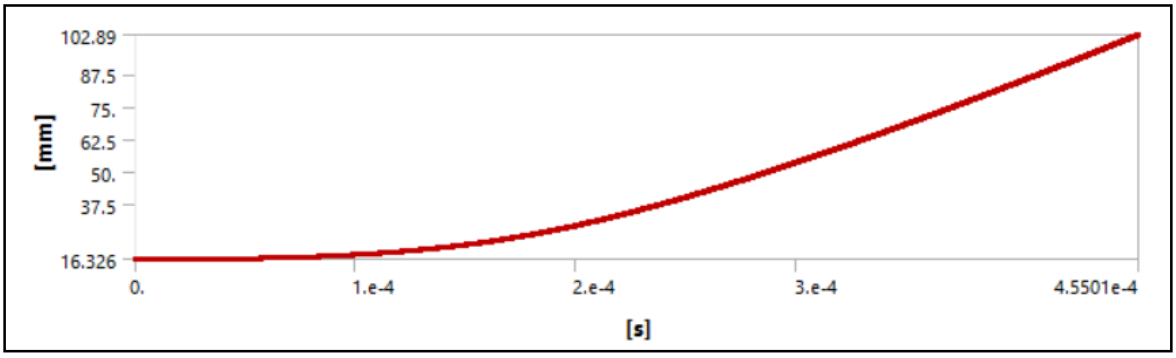
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan analiz çalışmalarıyla 9 mm kalibrelik bir tabancanın ateşlenmesi sonucunda namlu ve mermide meydana gelen etkiler incelenmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğunu ortaya koyabilmek için analiz sonuçlarından elde edilen namlu çıkış hızı ile deney sonuçlarından elde edilen namlu çıkış hızları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen namlu çıkış hızı Şekil 4.16'e göre 349,58 m/s olarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarında elde edilen üç farklı seri numaralı tabanca için, namlu çıkış hızı sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. 15, 21 ve 22 seri numaralı tabancaların namlu çıkış hızı değerleri ortalama sırasıyla 344, 345 ve 341 m/s'dir. Bu üç namlu çıkış hızının ortalaması 343,33 m/s'dir. Analiz sonucunda elde edilen namlu çıkış hızıyla gerçek namlu çıkış hızının birbirine çok yakın gerçekleştiği ve aradaki farkın %1,82 olduğu görülmüştür. Bu sebeple; elde edilen verilerin ideal tasarımı oluşturabilmek adına yol gösterici olarak kullanabileceği görülmüştür. Deng v.d benzer özelliklere sahip silahta yaptıkları çalışmalarda namlu çıkış hızıyla gerçek namlu çıkış hızı arasındaki farkı maksimum %256 bulmuşlardır (Deng, Sun ve Chiu, 2012).

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de merminin zamana göre hızı ve konumu gösterilmiştir. Merminin hız grafiği incelendiğinde; yaklaşık 100 µs'ye kadar mermi hızının çok yavaş olduğu; buna karşılık 100 µs'den sonra ise hız değerinin belirgin bir biçimde yükseldiği (ivmelendiği) görülmektedir. Başka bir deyişle, merminin ilk ateşleme anındaki iç balistik enerjisinin büyük bir kısmı setler arasına sıkışan merminin plastik deformasyonu için harcanmaktadır. Merminin çevresel yüzeyinde setlerin sıkıştırmasından dolayı izler oluştuktan sonra mermi hızlanarak namlu içerisinde yol almaktadır (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17).



Şekil 4.16. Merminin hız-zaman grafiği

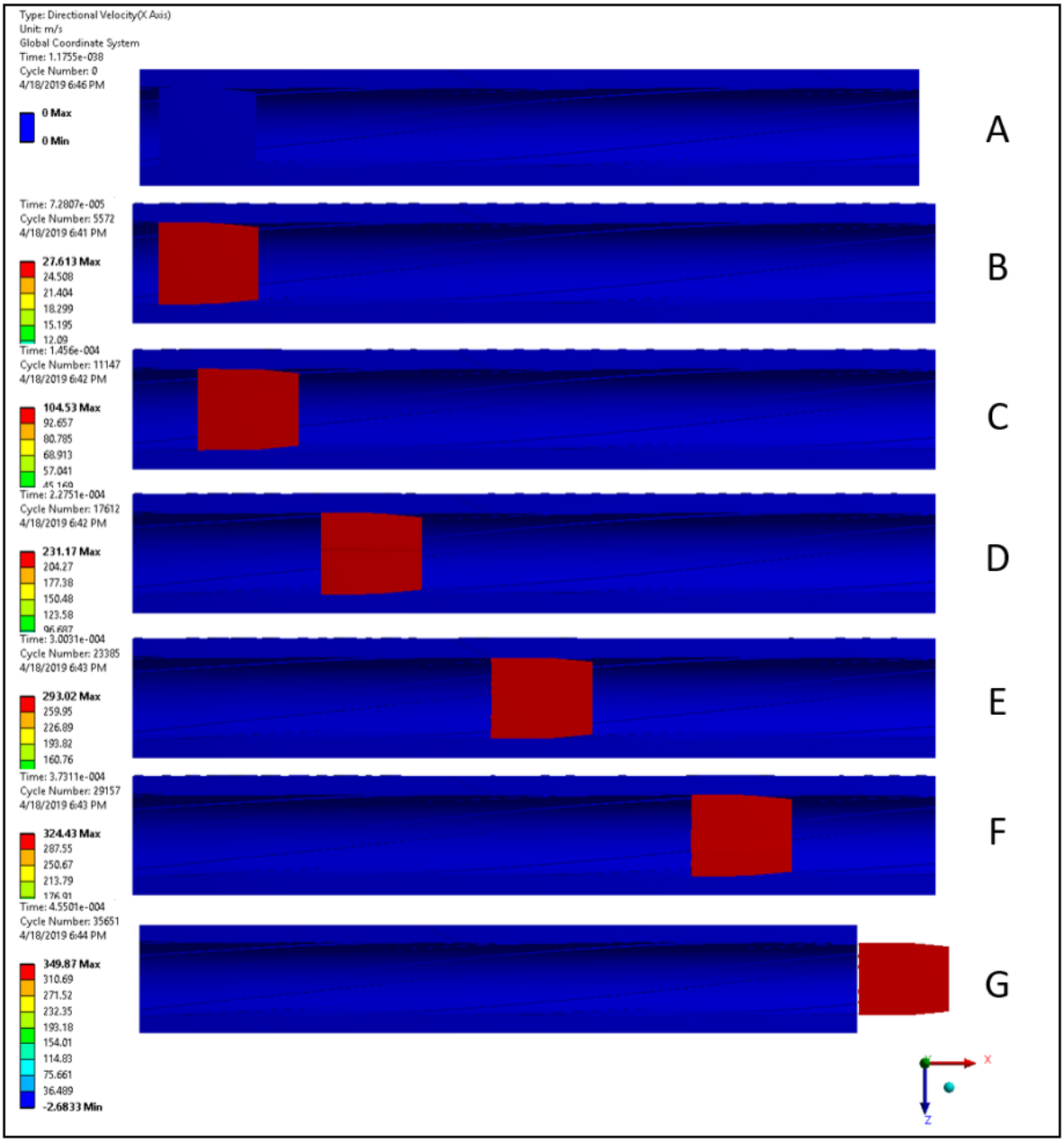


Şekil 4.17. Merminin konum-zaman grafiği

Çizelge 4.8. Namlu çıkış hızı deney sonuçları

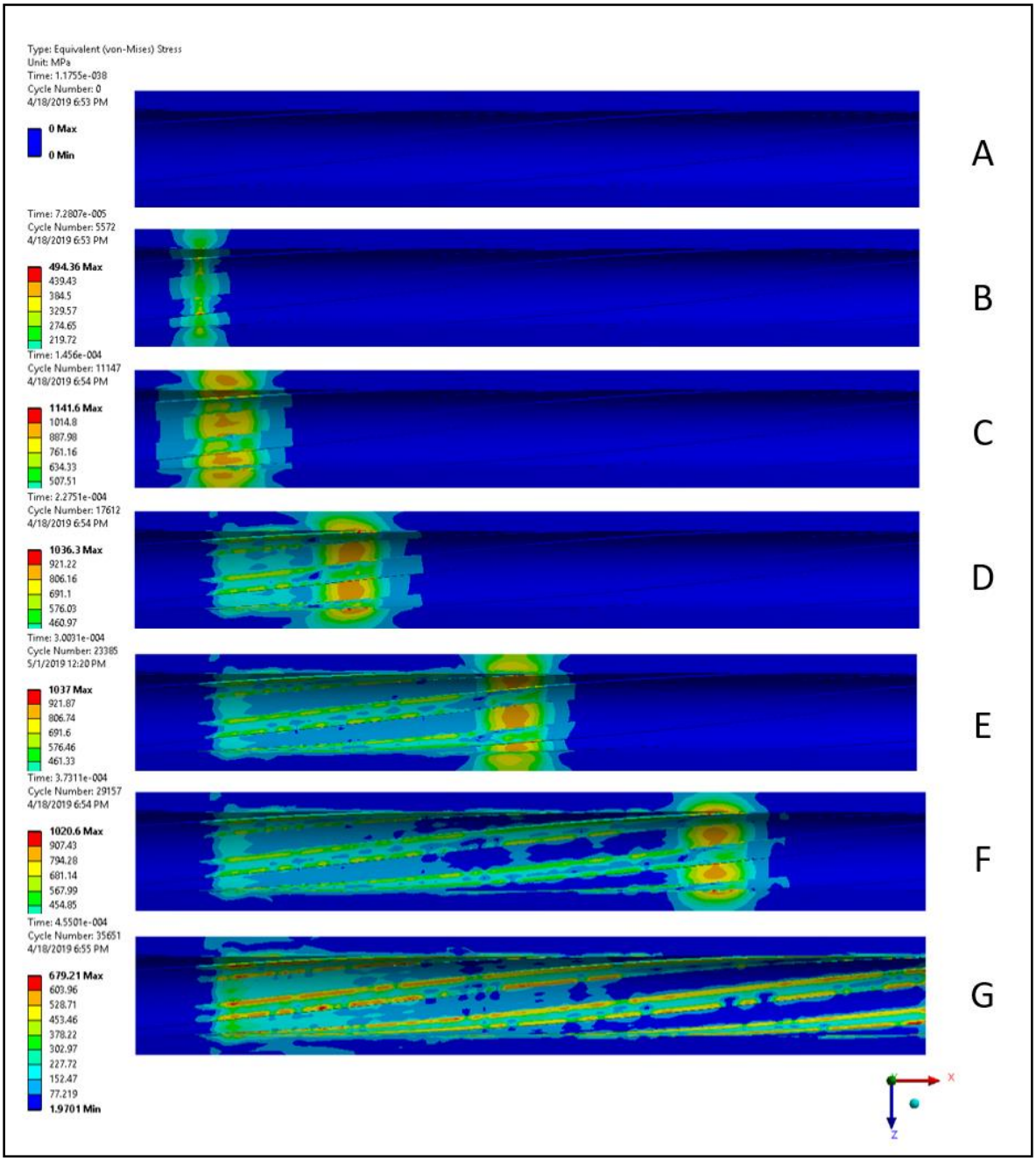
15 Numara	21 Numara	22 Numara
340 m/s	347 m/s	345 m/s
343 m/s	344 m/s	341 m/s
344 m/s	348 m/s	354 m/s
349 m/s	340 m/s	341 m/s
337 m/s	350 m/s	342 m/s
356 m/s	340 m/s	345 m/s
348 m/s	354 m/s	340 m/s
346 m/s	341 m/s	338 m/s
343 m/s	349 m/s	343 m/s
341 m/s	342 m/s	336 m/s
346 m/s	344 m/s	339 m/s
347 m/s	349 m/s	341 m/s
ORT 344 m/s	ORT 345 m/s	ORT 341 m/s

Namlu içerisindeki merminin hareketi t=0 µs, t=75 µs, t=150 µs, t=225 µs, t=300 µs, t=375 µs ve t=455 µs için Şekil 4.18’te sırasıyla A, B, C, D, E, F ve G olarak verilmiştir.

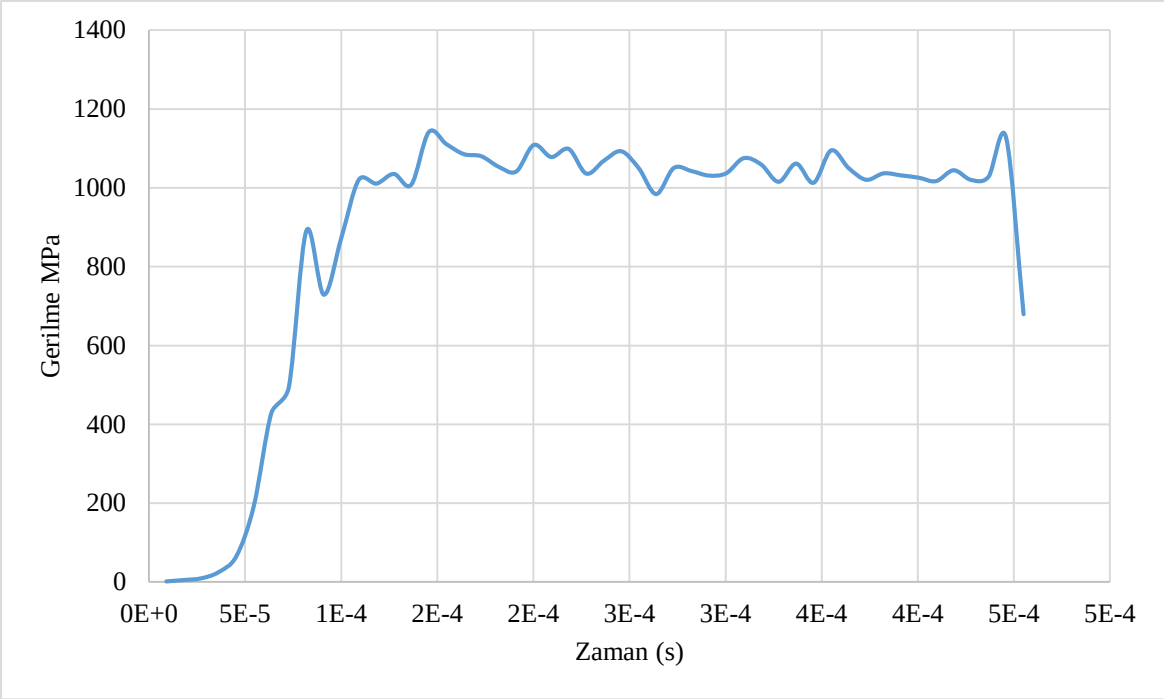


Şekil 4.18. Namlu içerisindeki merminin hareketi (hızı ve konumu)

Namluda oluşan von Mises gerilmesi olarak da ifade edilebilen eşdeğer gerilme t=0 µs, t=75 µs, t=150 µs, t=225 µs, t=300 µs, t=375 µs ve t=455 µs için Şekil 4.19’te sırasıyla A, B, C, D, E, F ve G olarak verilmiştir. Ayrıca eşdeğer gerilmenin zamana bağlı değişimi Şekil 4.20’te gösterilmiştir.

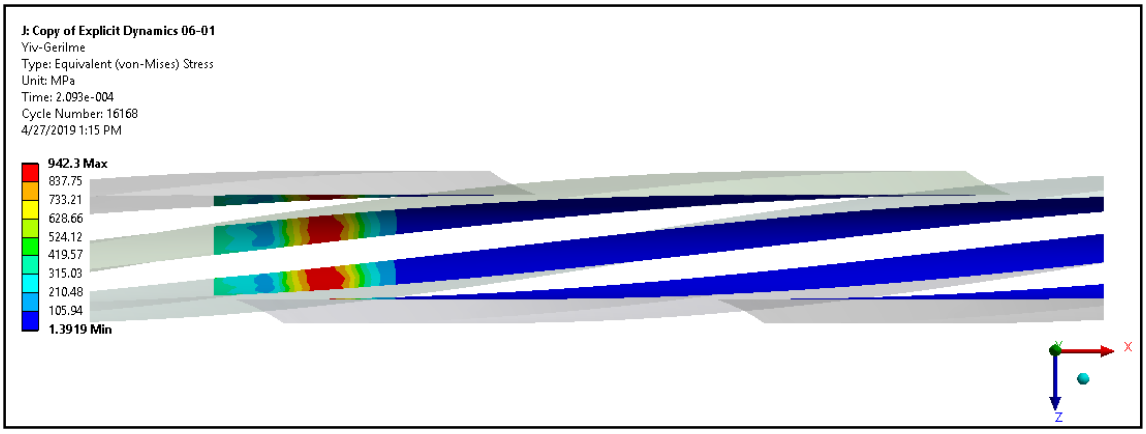


Şekil 4.19. Namluda oluşan maksimum eşdeğer gerilme (MPa) değişimi

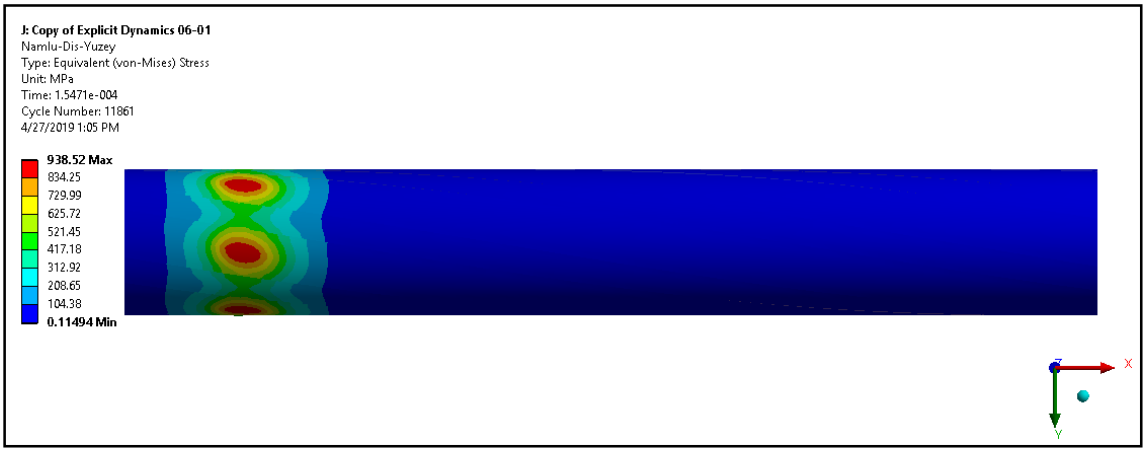


Şekil 4.20. Maksimum eşdeğer gerilmenin zamana göre değişimi

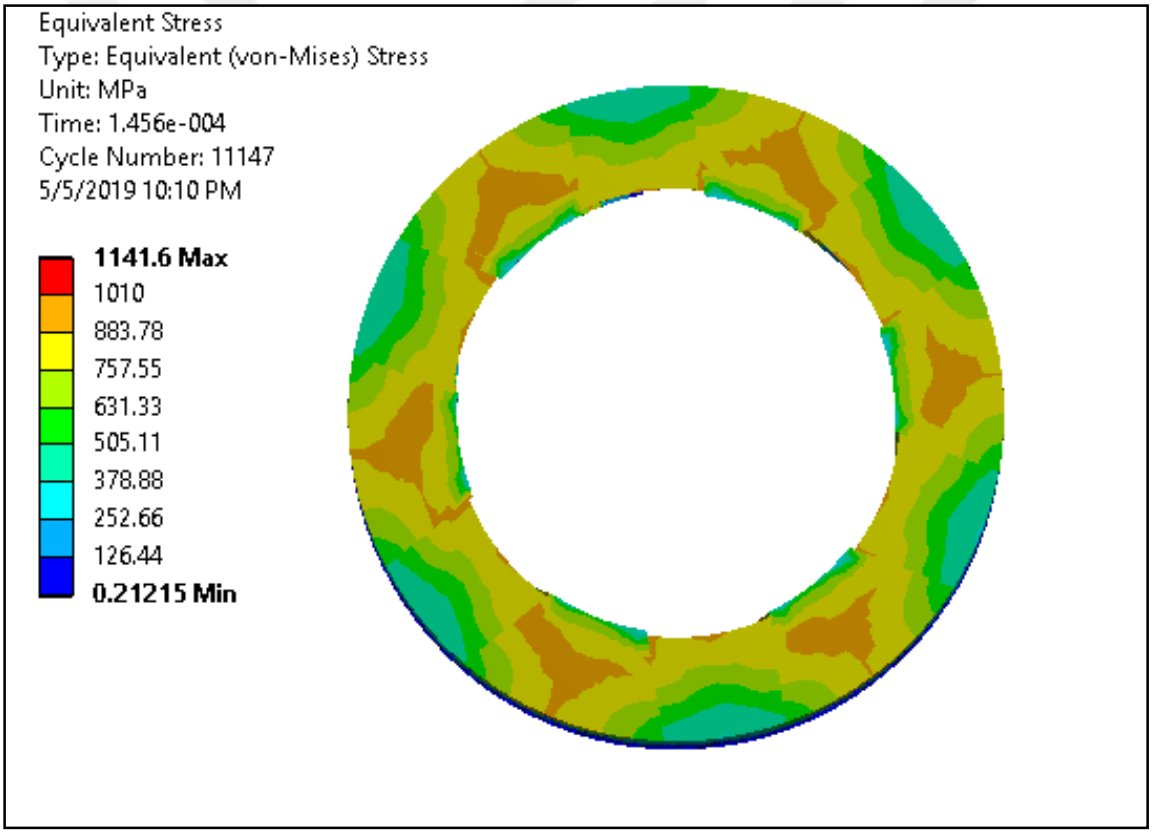
Elde edilen bu eşdeğer gerilme değeri merminin hareketi sırasında oluşan maksimum eşdeğer gerilmesi olup setlerde oluşmaktadır. Namlu setlerinde oluşan eşdeğer gerilme değeri maksimum t=146 µs için 1141,6 MPa'dır (Şekil 4.20), yivlerde oluşan eşdeğer gerilme değeri t=209 µs için maksimum 942 MPa (Şekil 4.21) ve namlu dış yüzeyinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme ise t=154 µs için 938 MPa (Şekil 4.21) civarındadır.



Şekil 4.21. Yivlerde oluşan maksimum eşdeğer gerilme (t=209 µs)

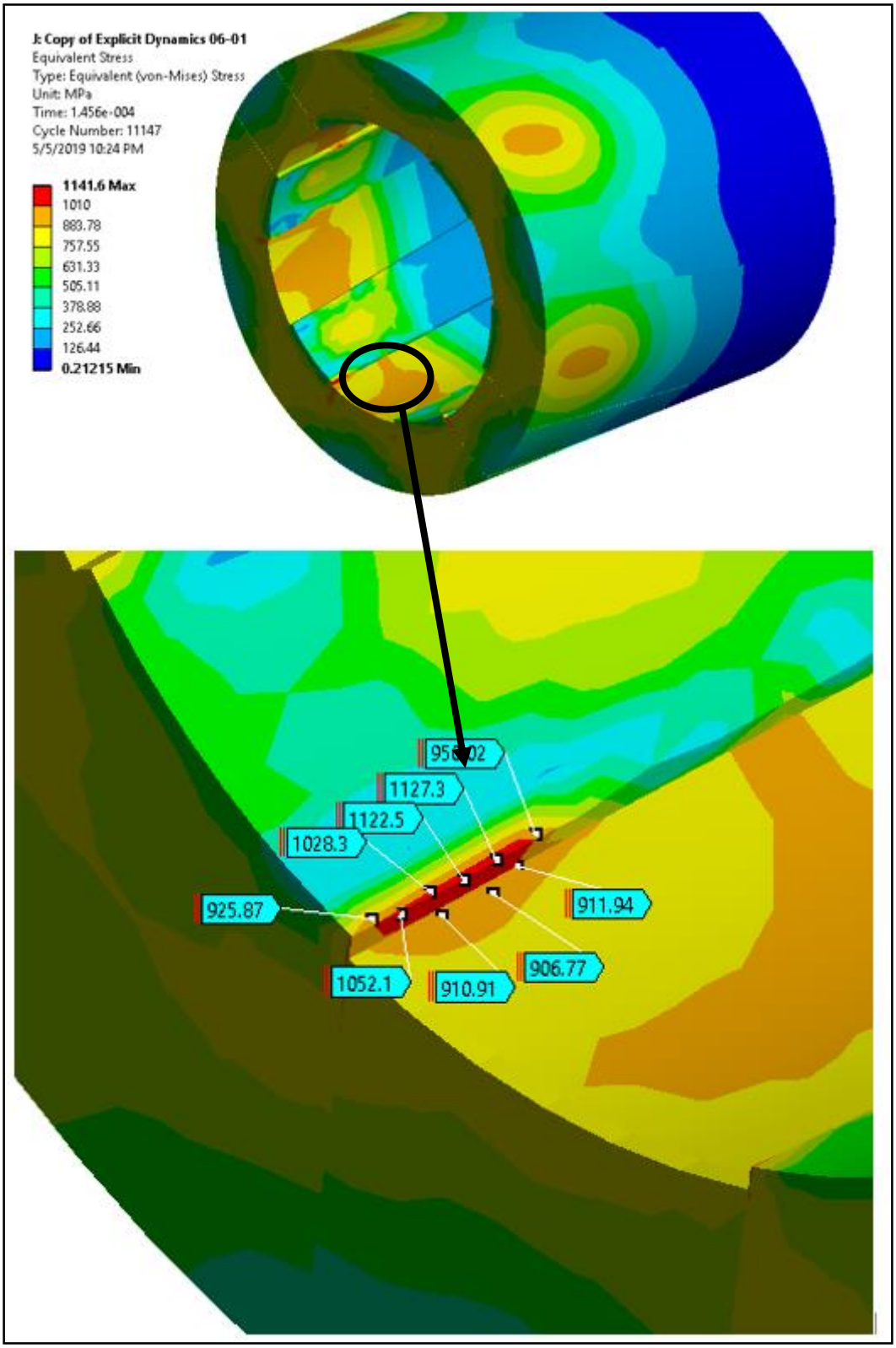


Şekil 4.22. Namlu dış yüzeyinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme (t=154 µs)



Şekil 4.23. Namlu kesitinde oluşan maksimum eşdeğer gerilme (t=146 µs)

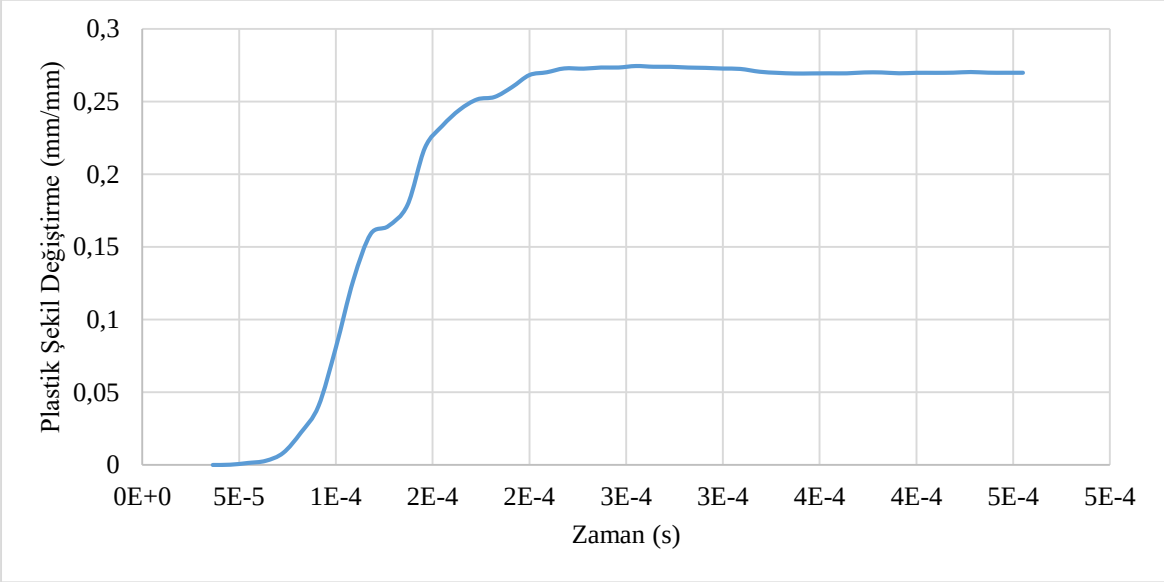
Şekil 4.23'te gösterilen namlu kesitinde oluşan eşdeğer gerilme incelendiğinde (t=146 µs) akma gerilemesinin (1010 MPa) çok küçük lokal bir bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 4.24'da görüldüğü üzere maksimum eşdeğer gerilme setlerin keskin köşe kısımlarında oluşmakta olup bu bölgenin etrafındaki gerilmeler akma gerilmesinin altındadır.



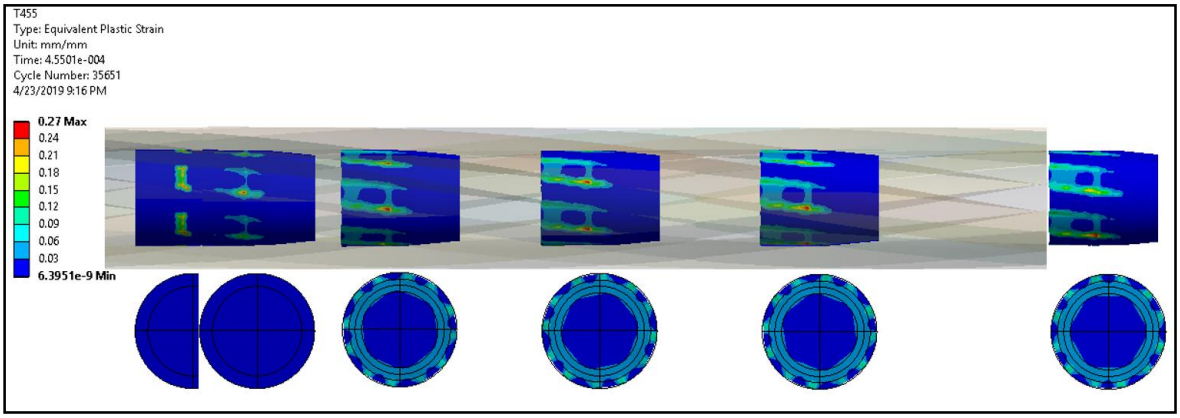
Şekil 4.24. Setlerde oluşan lokal gerilme bölgesi

Mermi üzerinde setlerin baskısı sonucunda mermi malzemesi plastik deformasyona uğramıştır. Mermide oluşan maksimum plastik deformasyon miktarı Şekil 4.25‘da

gösterildiği üzere %30'dur. Şekil 4.26'de merminin namlu içerisindeki hareketi sırasında oluşan plastik deformasyon gösterilmiştir. Plastik deformasyonun simetrik bir şekilde dağılması mermi ile namlu iç cidarının düzgün bir şekilde etkileşime girmesinin bir sonucudur.

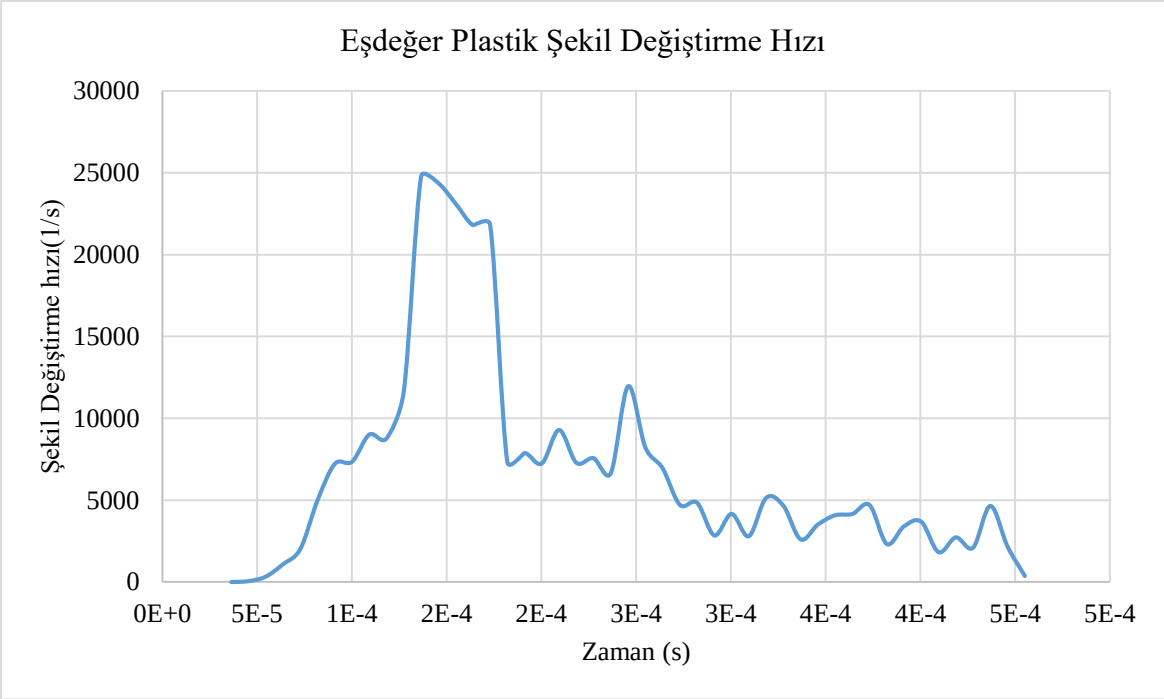


Şekil 4.25. Mermi üzerindeki eşdeğer plastik şekil değiştirmenin zamana göre değişimi



Şekil 4.26. Merminin namlu içerisindeki hareketi süresince oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme miktarı

Şekil 4.27'de gösterilen plastik şekil değiştirme hızının maksimum olduğu aralık plastik şekillendirme işinin ve gerilmenin en yüksek olduğu bölgeyi kapsamaktadır.



Şekil 4.27. Merminin namlu içerisindeki hareketi süresince oluşan plastik şekil değiştirme hızı (Strain Rate)

6. SONUÇLAR

Analiz çalışmaları sonucunda elde edilen veriler aşağıda özetlenmiştir;

- Yapılan analiz çalışmaları sonucunda elde edilen namlu çıkış hızı deneysel değerle doğrulanmış olup aradaki fark %1,82'dir. Dolayısıyla pahalı deney düzeneklerine ihtiyaç duymadan namlu tasarımlarının yapılması ve iyileştirmelerinin doğrulanması için sonlu elemanlar paket programlarının kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.
- Merminin ilk ateşleme anındaki iç balistik enerjisinin büyük bir kısmı setler arasına sıkışan merminin plastik deformasyonu için harcanmaktadır.
- Mermi ile namlu iç cidarının gerçekçi bir biçimde etkileşime girmesinin bir sonucu olarak merminin plastik deformasyonu simetrik bir dağılım sergilemektedir.
- Maksimum gerilmenin mermi çekirdeğinin şekil değiştirmesi sırasında oluştuğu görülmüş olup, mermi ateşlendikten 146 µs sonra namludaki gerilme (1141,6 MPa) en yüksek değere ulaşmıştır.
- Deneylerde elde edilmesi zor ya da mümkün olmayan verilerin (namlu kalınlığı boyunca oluşan gerilme, şekil değiştirme miktarı, şekil değiştirme hızı, merminin çekirdeğinin namlu içerisindeki zamana bağlı hızı ve konumu vb.) elde edilmesi ve bu verilere bağlı olarak tasarım iyileştirilmesi mümkün olacaktır.
- Bu çalışma kapsamında barutun yanması sonucu açığa çıkan ısının namlu ve mermiye iletimi ihmal edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda barutun yanması doğrudan modellenerek ısının etkisi incelenebilir aynı zamanda herhangi bir ampirik ifadeye gerek kalmadan barutun yanması sonucunda oluşan basınç sisteme doğrudan etki ettirilebilir.
- Bu çalışmadaki explicit analizle elde edilen veriler, "data mapping" yöntemi ile statik analiz (implicit analiz) tabanlı yorulma analizlerinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Akçay, M., Yükselen, A. M. (2014). Unsteady thermal studies of gun barrels during the interior ballistic cycle with non-homogenous gun barrel material thermal characteristics. *Journal of Thermal Science and Technology,* 34(2), 75-81.

Ansys. (2018). *Theoretical Manual*. Version 19.2. Ansys Incorporation.

Aubram, D., Rackwitz, F., Wriggers, P., Savidis , S. A. (2015). An ALE method for penetration into sand utilizing optimization-based mesh motion. *Computers and Geotechnics,* 65, 241-249.

Belytschko, T., Liu, W. K., Moran, B. (2000). *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Chichester: John Wiley, 77-130.

Benson, D. (1992). Computational methods in lagrangian and eulerian hydrocodes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* 99, 235-394.

Brian, J. H. (2008). *Handbook of firearms and ballistics examining and ınterpreting forensic evidence*. Oxford: John Wiley & Sons, 1-99.

Callister, W., & Rethwisch, D. (2014). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. Ankara: Nobel.

Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM journal of Research and Development,* 11(2), 215-234.

Cronemberger, P. O., Lima, E. P. (2014). Theoretical and experimental study of the interior ballistics of a rifle 7.62. *Thermal Engineering,* 13(2), 20-27.

Danış, F. (2014, Şubat). *Development of Interıor Ballıstıc Sımulatıon Software*. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ. Ankara.

DeGarmao, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A. (1997). *Materials and processes in manufacturing*. Hoboken: Prentice Hall, 20-40.

Değirmenci, E. (2015). Semi-empirical prediction of internal pressure distribution and muzzle velocity in the rifled barrel of a light weapon. *Measurement,* 70, 123-128.

Değirmenci, E., Dirikolu, H. (2012). A thermochemical approach for the determination of convection heat transfer coefficients in a gun barrel. *Applied Thermal Engineering,* 37, 275-279.

Deng, S., Sun, H. K., Chiu, C.-J. (2012). Rifles ın-bore finite element transient analysis. International Conference on Mechanical, *Production and Materials Engineering*. Bangkok, 58-62.

Dijkstra, J., Broere, W., Heeres, O. M. (2011). Numerical simulation of pile installation. *Computers and Geotechnics,* 5(38), 612-622.

Fedaravicius, A., Ragulskis, M., Slizys, E. (2005). Dynamic synthesis of the recoil imitation system of weapons. *Mechanics*, 51(1), 44-48.

Gough, P. S. (2001). *Interior ballistics modelling: Extensions to the one-dimensional XKTC code and analytical studies of pressure gradient for lumped parameter codes*. Maryland: U.S. Army Research Laboratory, 15-125.

Gündüzer, O. (2011). *Namlu cidarı boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-35.

Huang, C. J. (1993). *Transient stress and failure analysis of 105 mm gun barrel caused by projectile premature.* Master Thesis, Lehigh University Applied Science, Bethlehem, 14-21.

İnternet: Aurubis-stolberg.com: http://www.webcitation.org/77nPHomm6, Son Erişim Tarihi: 21.04.2019.

İnternet: Azom.com. (2019, 04 21). http://www.webcitation.org/77nPZKX7y, Son Erişim Tarihi: 21.04.2019.

Jedlicka, L., Komenda, J., Beer, S. (2012). Analysis of ballistic characteristics of pistol cartridge. *Advances in Military Technology*, 7(1), 32-40.

Kürüm, H. ve Cebeci, M., (1995), " Sonlu Elemanlar Yönteminde en Az Bellek ve Çalışma Zamanı İçin Yeni bir Yöntem", Fırat Üniversitesi, *Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Elazığ.

Morphy, C. C., Fisher, E. B. (1981). *The role of carburization in gun barrel erosion and cracking.* Maryland: Technical Library AD-A102625, 1-136.

Moss, G. M., Leeming, D. W., Farrar, C. L. (1995). *Military ballistics*. London: Brassey's, 10-25.

Nelson, C. W., Ward, J. R. (1981). *Calculation of heat transfer to the gun barrel*. Memorandum Report, Maryland*:* 2-71.

Oerlinkon-Buhrle, A. G. (1981). *Oerlinkon pocket-book.* Zurich: Oerlinkon-Buhrle AG, 3-27.

Özcan, B., Kurt, A., Şeker, Ü., Seyis, M. (2018). *Tabanca namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile iç balistiğe bağlı mukavemet analizi*. 3rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE2018), Ankara, 107-114.

Özcan, H. (2012). *32 crmov çeliğinin aşınma direncini arttırmak için yeni bir ısıl işlem metodunun geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-22.

Öztürk, A. R. (1984). *İç balistik*. Ankara: MKE Yayınevi, 2, 20-140.

Öztürk, Y. F. (1999). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle namlu analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-28.

Piticari, I.-L., Pirlot, M., Sava, A. C., & Vanhove, A. (2015). The influence of muzzle devices over bending vibrations of an automatic rifle barrel. *Technical Sciences*, 20(3), 381-387.

Sönmez, U. (2009, Haziran). *Obüs Namlusu Yanma Odasında Atış Esnasında Ortaya Çıkan Gerilmelerin Matematiksel Modellenmesi ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.

Stiavnicky, M., Lisy, P. (2013). Influence of barrel vibration on the barrel muzzle position at the moment when bullet exits barrel. *Advances in Military Technology*, 8(1), 89-102.

Tawfik, M. (2008). Dynamics and stability of stepped gun barrels with moving bullets. *El-Shorouk: Advances in Acoustics and Vibration*, 1-7.

U., S. (2009, Haziran). *Obüs namlusu yanma odasında atış esnasında ortaya çıkan gerilmelerin matematiksel modellenmesi ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 3-55.

Yıldırım, F. (2013). *Büyük kalibre mühimmatta kullanılan barutların geometrik şeklinin değişiminin, namlu iç basıncı ve namlu çıkış hızı üzerindeki etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-35.

Zhang, Y., Jia, Z. (2011). *Dynamics simulation of floating automatic rifle*. 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: ÖZCAN, Burak
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 19.10.1989, Ankara
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0538 358 5895
e-mail	: ozcan.burak@outlook.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/ İmalat Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/ Endüstriyel Tasarım Mühendisliği	2018
Lisans	Erciyes Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2013
Lise	Çubuk Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	EnginSoft Turkey Mühendislik	Yapısal Analiz Müdürü
2016-2018	Armada Yazilim (Dassault Systemes)	Simülasyon Uzmanı
2014-2016	Albert Genau	Arge Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Akkurt, A., Özcan, B. Yağmur, S., Şeker, U., Korkut, İ. (2017). *GGG50 dökme demirin işlenebilirliğinin deneysel olarak araştırılması,* 1st International Turkish World Engineering and Science Congress. Antalya.

2. Özcan, B., Akkurt, A., Yağmur, S., Şeker, U., Korkut, İ. (2017). *GG30 dökme demirin işlenebilirliğinin deneysel olarak araştırılması,* 1st International Turkish World Engineering and Science Congress. Antalya.

3. Özcan, B., Kurt, A., Şeker, Ü., ve Seyis, M. (2018). Tabanca namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile iç balistiğe bağlı mukavemet analizi. *3rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE2018),* Antalya.

4. Özcan, B., Yağmur, S., Korkut, İ., Şeker, U., Akkurt, A. (2018). The analysis of SGI materials' cutting parameters with finite element method. *3rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE2018),* Antalya.

5. Özcan, B., Akkurt, A. (2018). Kesme kuvvetinin gri dökme demir malzemelerin işlenebilirlik özelliklerine etkilerinin deneysel olarak araştırılması. *3rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE2018),* Antalya.

6. Aydoğan, B.B., Akkurt, A., Özcan, B. (2018). AISI1020 Çeliğinin ezme parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *3rd International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE2018),* Antalya.

Hobiler

Gömülü sistemler, Yabancı Dizi, Yüzme

GAZİ GELECEKTİR...