



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



YÜKSEK LİSANS

**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)
YÖNTEMİYLE NAMLU ANALİZİ**

Yavuz Fatih ÖZTÜRK

Makine Mühendisliği A.B.D.

Makine Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Erol UZAL

Haziran, 2014

İSTANBUL

Bu çalışma 18/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:



İmza
Prof. Dr. Erol UZAL (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



İmza
Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



İmza
Prof. Dr. Metin Orhan KAYA
İstanbul Teknik Üniversitesi
Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi



İmza
Prof. Dr. Serdar BARİŞ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



İmza
Prof. Dr. Recep BURKAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Tez konumu şekillendirip, çalışma boyunca beni motive ederek yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Erol UZAL' a saygılarımı sunarım.

Ayrıca tez çalışmam bu süreçte yardımlarını esirgemeyen, Dr. Şule KAPKIN ve Hüseyin YILDIZ başta olmak üzere tüm İ.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen değerli aileme ve zor zamanlarımda beni yalnız bırakmayan sevgili eşime en derin hürmetlerimi sunar, teşekkürü borç bilirim.

Haziran, 2014

Yavuz Fatih ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	viii
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	6
3. MALZEME VE YÖNTEM	9
3.1. GENEL TANIMLAR	9
3.1.1. Mermi ve Namlu	9
3.1.2. Geri tepme kuvveti	10
3.2. İÇ VE ORTA BALİSTİK PROBLEMİNİN FİZİĞİ	11
3.2.1. Merminin Hareket Denklemi	12
3.2.2. Temel Denklemler	12
3.2.2.1. Süreklilik Denklemi	13
3.2.2.2. Momentum Korunum Denklemi	13
3.2.2.3. Enerji Korunum Denklemi	14
3.3. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ	15
3.3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Giriş	16
3.3.1.1. Analizin hedeflerinin belirlenmesi	16
3.3.1.2. Bilgisayar ortamında çözüm modelinin oluşturulması	16
3.3.1.3. Çözüm için matematiksel sayısal ağın oluşturulması	17
3.3.1.4. Analiz için fiziksel tanımların yapılması	18
3.3.1.5. Analizin çözdürülmesi	18
3.3.1.4. Sonuçların incelenmesi	19
3.3.2 HAD Yazılımı İle Namlu Analizi	19

3.3.2.1. Kontrol Çözüm modeli	19
3.3.2.2. Kontrol Modeli İçin Sayısal Ağ Yapısı.....	20
3.3.2.3. Kontrol Modelinin HAD Yazılımı İle Çözümü	24
3.3.3 Geri Tepme Kuvvetini Azaltmaya Yönelik Hazırlanan Modeller	38
3.3.3.1. b1 Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları	40
3.3.3.2. b2 Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları	45
3.3.3.3. b3 Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları	50
3.3.3.4. c Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları	55
3.3.3.5. d Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları	60
4. BULGULAR	65
4.1. NO:1 KARŞILAŞTIRILMASI.....	66
4.2. NO:2 KARŞILAŞTIRILMASI.....	68
4.3. NO:3 KARŞILAŞTIRILMASI.....	70
4.4. NO:4 KARŞILAŞTIRILMASI.....	72
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1 : 13.yüzyıldan bir tabanca örneği.	1
Şekil 2 : Ateşli silahlar dışında kullanılan diğer silahlar.	2
Şekil 3 : 14. yüzyıl Çin tabancası ve 16. yüzyıl kuşatma silahları.	3
Şekil 4 : 19. yüzyıl İngiliz 16 Pounder topunda reküperatör.	4
Şekil 5 : M11 alev gizleyen modeli ve alev gizleyenin akışa etkisi.	4
Şekil 6 : Alev gizleyen yapısının atış esnasında namlu gazı dağılımına etkisi.	5
Şekil 7 : Bir merminin temel kısımları.	10
Şekil 8 : Bir namlu kesit görünüş ve yiv-set yapısı.	10
Şekil 9 : Problemin şeması ve eksen takımı.	12
Şekil 10 : HAD yazılımlarında kullanılan başlıca eleman tipleri.	17
Şekil 11 : Analizde kullanılan modelin genel görünüşü.	19
Şekil 12 : Eksenel simetrik çözüm modeli.	20
Şekil 13 : Analizde kullanılan modelin akış hacmi.	20
Şekil 14 : Analizde kullanılan sayısal ağın genel görünüşü.	21
Şekil 15 : Yanma odası ve namlu içinde sayısal ağ yapısı.	21
Şekil 16 : Mermi önünde sınır tabaka ağ yapısı.	21
Şekil 17 : Namlu çıkışında ağ yapısı.	21
Şekil 18 : Dinamik ağ bölgesi.	23
Şekil 19 : Hareketli ve durağan bölgeler arası ara yüz sınırı.	23
Şekil 20 : Fluent Çözdürücü ayarları.	24
Şekil 21 : Problemin çözüm koşulları.	25
Şekil 22 : Akışkanın malzeme özellikleri.	25
Şekil 23 : 100-5000 K arası havanın Cp değişimi.	26

Şekil 24 : Model üzerindeki sınır şartları.	26
Şekil 25 : Fluent içerisinde sayısal çözüm ayarları.	27
Şekil 26 : $t=0$ anında statik basınç dağılımı.	28
Şekil 27 : $t=0$ anında statik sıcaklık dağılımı.	29
Şekil 28 : $t=0$ anında yoğunluk dağılımı.	29
Şekil 29 : Analizin çalışma ayarları.	30
Şekil 30 : Son 27 zaman adımında iterasyonların yakınsama grafiği.	31
Şekil 31 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.	32
Şekil 32 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.	32
Şekil 33 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.	33
Şekil 34 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.	34
Şekil 35 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.	35
Şekil 36 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.	35
Şekil 37 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.	36
Şekil 38 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.	36
Şekil 39 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.	37
Şekil 40 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.	37
Şekil 41 : b1 modeli; 1 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 90^\circ$ MB.	38
Şekil 42 : b2 modeli; 1 adet $\bar{U} = 2$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 90^\circ$ MB.	38
Şekil 43 : b3 modeli; 1 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 120^\circ$ MB.	39
Şekil 44 : c modeli; 2 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 90^\circ$ MB.	39
Şekil 45 : d modeli; 3 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 90^\circ$ MB.	39
Şekil 46 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.	40
Şekil 47 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.	40
Şekil 48 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.	41
Şekil 49 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.	41
Şekil 50 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.	42
Şekil 51 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.	42

Şekil 52 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.	43
Şekil 53 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.	43
Şekil 54 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.	44
Şekil 55 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.	44
Şekil 56 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.	45
Şekil 57 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.	45
Şekil 58 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.	46
Şekil 59 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.	46
Şekil 60 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.	47
Şekil 61 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.	47
Şekil 62 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.	48
Şekil 63 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.	48
Şekil 64 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.	49
Şekil 65 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.	49
Şekil 66 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.	50
Şekil 67 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.	50
Şekil 68 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.	51
Şekil 69 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.	51
Şekil 70 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.	52
Şekil 71 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.	52
Şekil 72 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.	53
Şekil 73 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.	53
Şekil 74 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.	54
Şekil 75 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.	54
Şekil 76 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.	55
Şekil 77 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.	55
Şekil 78 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.	56
Şekil 79 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.	56

Şekil 80 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.	57
Şekil 81 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.	57
Şekil 82 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.	58
Şekil 83 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.	58
Şekil 84 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.	59
Şekil 85 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.	59
Şekil 86 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.	60
Şekil 87 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.	60
Şekil 88 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.	61
Şekil 89 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.	61
Şekil 90 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.	62
Şekil 91 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.	62
Şekil 92 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.	63
Şekil 93 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.	63
Şekil 94 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.	64
Şekil 95 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.	64
Şekil 96 : MD ile b1 modeli karşılaştırması - mermi çekirdeği hızı.....	66
Şekil 97 : MD ile b1 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.....	66
Şekil 98 : MD ile b1 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.....	67
Şekil 99 : MD, b1,c ve d modelleri karşılaştırması - mermi çekirdeği hızı.....	68
Şekil 100 : MD, b1,c ve d modelleri karşılaştırması - geri tepme kuvveti.	68
Şekil 101 : MD, b1,c ve d modelleri karşılaştırması - geri tepme kuvveti.	69
Şekil 102 : MD, b1 ve b2 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.	70
Şekil 103 : Zaman adımı 8700'de mermi çekirdeği pozisyonu.....	71
Şekil 104 : Zaman adımı 8800'de mermi çekirdeği pozisyonu.....	71
Şekil 105 : MD, b1 ve b3 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.	72
Şekil 106 : Mermi çekirdeği çıkışı sonrası, MB 'in oluşturduğu akış dağılımı.	72

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1 : Problemi yöneten temel denklemler.	15
Tablo 2 : Denklem sisteminin bilinmeyenleri.	15
Tablo 3 : Çözüm modelinin ölçüleri.	19
Tablo 4 : Sayısal ağdaki elemanların kalite dağılımı.	22
Tablo 5 : Örnek zaman adımlarında mermi çekirdeğinin fiziksel bilgileri.	34
Tablo 6 : Tasarım karşılaştırma tablosu.	65

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
t	: Zaman
p	: Basınç
ρ	: Yoğunluk
R	: Gaz sabiti
T	: Sıcaklık
M	: Mol kütlesi
S	: Yüzey alanı
x	: x eksen
y	: y eksen
z	: z eksen
m	: Kütle
a	: İvme
F	: Kuvvet
v	: Hız
Δ	: Delta
∇	: Diverjans
v_x	: Hızın x bileşeni
v_y	: Hızın y bileşeni
v_z	: Hızın z bileşeni
v_r	: Hızın radyal bileşeni
r	: Radyal eksen
τ	: Gerilme tansörü
g	: Yerçekimi
μ	: Viskozite
λ	: İkincil viskozite
k	: Isı iletim katsayısı
Φ	: Yitim fonksiyonu
E	: Entalpi
h	: İç enerji
c_p	: Sabit basınç ısı sığası
$\theta_{eaç}$: Eş açılı çarpıklık
$\theta_{eşit}$: Hücrenin ideal açısı
θ_{maks}	: Hücrenin maksimum açısı
θ_{min}	: Hücrenin minimum açısı
g	: Gram - Kütle
Δt	: Zaman adımı
\bar{U}	: Plaka kalınlığı
Ω	: Plaka çapı
β	: Plaka açısı

Kısaltmalar	Açıklama
CFD	: Computational Fluid Dynamics
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CAD	: Computer Aided Design
MB	: Alev Gizleyen
MD	: Mevcut Durum
b1	: Alternatif Tasarım - 1
b2	: Alternatif Tasarım - 2
b3	: Alternatif Tasarım - 3
c	: Alternatif Tasarım - 4
d	: Alternatif Tasarım - 5
AUSM	: Alternative Upstream Splitting Method
CFL	: Courant Friedrichs Levy Sayısı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) YÖNTEMİYLE

NAMLU ANALİZİ

Yavuz Fatih ÖZTÜRK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erol UZAL

İnsanoğlunun var oluşundan beri öncelikli hedefi kendini korumak olmuştur. Bu amaçla geliştirilen savunma ya da saldırı araçları silah olarak nitelendirilebilir. Günümüzde gerek bireylerin kendini koruması gerekse de orduların muharip güç ve kabiliyetlerinin artması için silahlanmaya önem verilmesi çoğunluk tarafından kabul gören bir gerçektir. Mevcut teknolojiler göz önüne alındığında barutun yanması prensibi ile çalışan ateşli silahların bu alanda geliştirilen araçların büyük bir bölümünü kapladığı görülmektedir.

Bu prensipteki ateşli silahların temel problemlerinden birisi geri tepme kuvvetidir. Öyle ki sadece bu kuvvetlerin etkisi ile silahı taşıyan sistemlerin taşınması, kullanılması ve bir silah için en önemli etkilerden biri olan etkin mesafesi gibi unsurlar bir birlerine bağlı olarak değişebilmektedir.

Bu amaçla, tarafımdan hazırlanan tez çalışmasında namlu tasarımının geri tepme kuvveti üzerinde ki etkileri, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) yazılımı olan Fluent paket programı kullanılarak incelenmiştir. Problemin fiziği çıkarıldıktan sonra, geri tepme kuvvetinin azaltılmasına yönelik hazırlanan modeller ile karşılaştırma analizleri yapılmıştır. Böylelikle ateşli silahlar üzerinde yapılabilecek AR-GE çalışmalarından bir kısmı raporlanarak tez çalışması sonlandırılmıştır.

Haziran 2014, 90 Sayfa.

Anahtar kelimeler : HAD, CFD, Ansys Fluent, Namlu, Balistik

SUMMARY

M.Sc. THESIS

BARREL ANALYSIS VIA COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Yavuz Fatih ÖZTÜRK

İstanbul University

Graduate School of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof.Dr. Erol UZAL

From the beginning of ages, self defence became the main objective of humankind. We named these tools as weapons those are designed for that purpose. Today it is obvious that researching on weaponry to obtain capabilities of not only self defence but also military power should be updated. After inspecting today's tools we will see that most of them developed on the basics of powder combustion.

One of the main problem for many weapons is the recoil force. So important that design parameters of weapon can dramatically change, such as weapon's carriage or drive type, effective range which is one of the most important criteria.

Because of these facts, this study examined the results of recoil force that is depending on barrel's design by using Fluent CFD code. After solving the base model, analysed few different designs which are modelled to reduce that recoil force. Findings reported by scalars, contour plots and graphs to obtain a R&D report for such case.

June 2014, 90 Pages.

Keywords: Ansys, Fluent, CFD, Interior Ballistics, Muzzle Brake

1. GİRİŞ

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Namlu Analizi çalışmasında, tüm ateşli silahlarda bulunan temel prensip incelenmiştir. *Ateşli silah*, bir yanıcı maddenin kimyasal reaksiyona girmesiyle oluşan gazın basıncından yararlanılarak, hedef alınan cisme karşı zarar vermek yahut etkisiz hale getirmek amacı taşıyan bir kütleyi harekete geçiren mekanizmadır. Hedefi etkisiz kılmak için atılan bu cisme dilimizde *mermi* diyebiliriz. *Namlu*, ateşli silahlarda hedefe atılan mermiye doğrultu kazandırmaya yönelik kılavuzluk yapan yapının ismidir.

Ateşli silahlarda 17.yy ortalarına kadar kullanılan ve bilinen tek yanıcı madde baruttur. Barut 9.yy 'da Çin'de icat edilmiştir ve içeriğinde sülfür, odun kömürü ve potasyum nitrat bulunmaktadır. Barut maddesi reaksiyona girdiğinde sülfür ve odun kömürü yanıcı madde olarak davranırken, potasyum nitrat ise bu reaksiyonda yakıcı madde rolü oynamaktadır. Bu tepkimenin sabit hacimde oluşmasıyla yüksek basınçta gaz elde edilmektedir. Barutun eğlence, gösteri gibi çeşitli alanlarda kullanılıyor olmasına karşılık ilk defa ateşli silahlarda kullanılması 13.yy 'ı bulmaktadır.

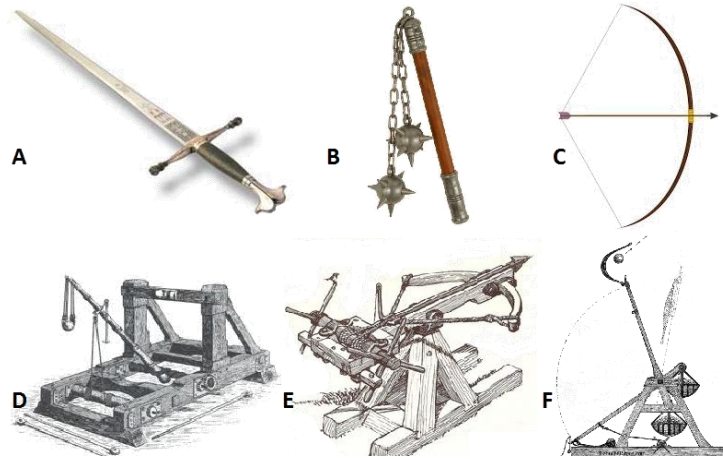
Şekil 1'de görülen tabanca, 1405 yılında Alman askeri mühendisi ve yazar Konrad Kyeser tarafından çizilmiştir. Çizimden de görüldüğü gibi bir mermi, namlu içerisinde yanma sonucu oluşan basınçlı gazın yardımıyla hedefine istikamet etmektedir.



Şekil 1 : 13.yüzyıldan bir tabanca örneği.

Ateşli silahların muharebelerde kullanılmasıyla birçok avantajı tecrübe edilmiştir. Ateşli silahlar savaş meydanlarında ilk defa bu teknolojiyi kullanan ordulara hem vuruş gücünü kattığı gibi hem de rakiplerine karşı psikolojik baskı kurmasını sağladı. Örneğin o dönemlere kadar patlama seslerine yabancı olan askerlerin ve meydanlarda kullanılan hayvanların yüksek seslerden dolayı, dönemin silahlarının vuruş gücünde çok ciddi katkısı olmasa bile, korktukları bilinmektedir. Bu nedenle icat edilen bu teknolojinin evrensel olarak tüm milletler tarafından önemi hissedilmiş ve üzerinde çalışmalar yaptırılmıştır.

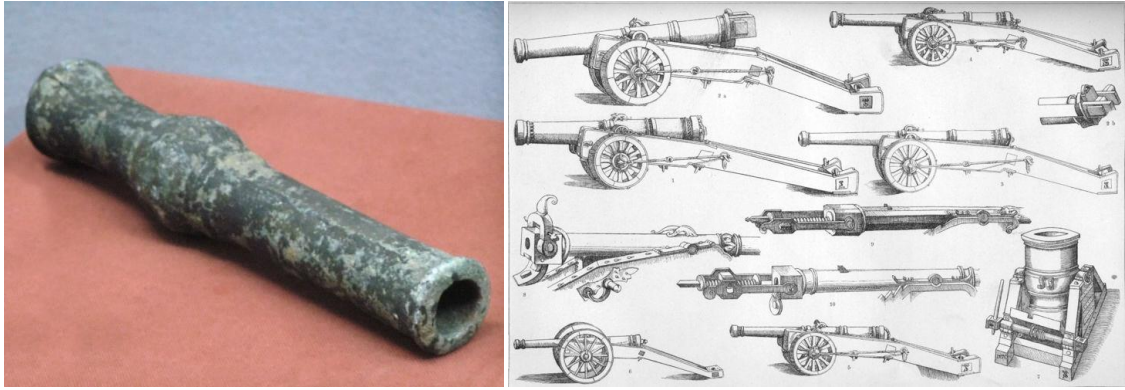
Ateşli silahların insanları etkileyen en büyük özelliği sahip olduğu yüksek potansiyel enerjydi. Bu potansiyel enerji, o döneme kadar sahip olunan kılıç, gürz gibi ataletle bağlı silahlara göre; ok ve yay, mancınık gibi yay ve büyük kütleli potansiyel enerjisinden yararlanan sistemlerine göre çok daha yüksekti. Şekil 2'de görülen silahların tümü mekanik olarak depolanan yahut insan gücüyle atalet kazandırılan aletlerden oluşmaktadır. Fakat ateşli silahlarda barutun kimyasında bulunan potansiyel enerjinin kullanımı en başta orduda insan sayısına olan ihtiyacı yumuşatmaktaydı. Bu nedenle barutun silahlarda etkin bir şekilde kullanılmaya başlanması dünya savaşları tarihinde milletlerin askeri güç dengelerini tamamen değiştirmiştir.



Şekil 2 : Ateşli silahlar dışında kullanılan diğer silahlar.

Şekil 2'de görülen; A-Kılıç, B-Gürz, C-Ok/Yay grubu bireysel asker silahı iken; alt sırada bulunan D-Mancınık; E-Ballista; F-Trebuchet grubu silahlar kuşatma amaçlıdır.

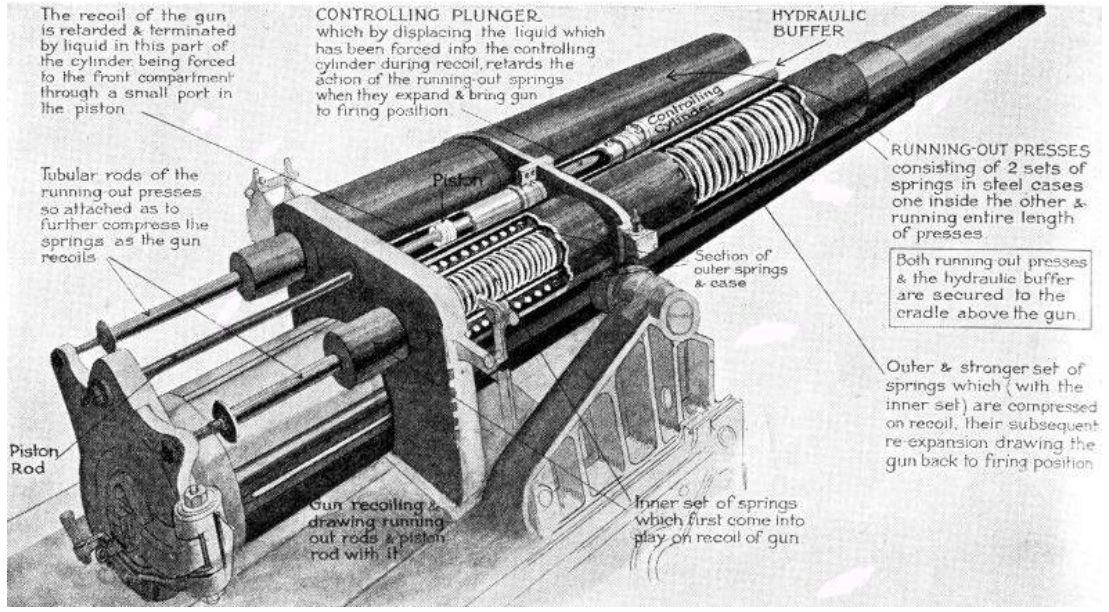
Milletler ateşli silahların kullanılmasında birçok avantaj sağlamasını tecrübe etmekle beraber, hızlı bir şekilde benimsenen ve yayılan bu teknolojinin geliştirilmesi gerektiğinin bilincine vardılar. Böylelikle kimya, mekanik, döküm teknikleri, metalürji gibi alanlarda çalışma yapmak zorunda kaldılar. Çünkü ortaya çıkan ilk ateşli silah örnekleri bireysel asker kullanımına, taşınmasına elverişli değildi. Şekil 3'te görülen silahlar bu duruma örnek gösterilebilir.



Şekil 3 : 14. yüzyıl Çin tabancası ve 16. yüzyıl kuşatma silahları.

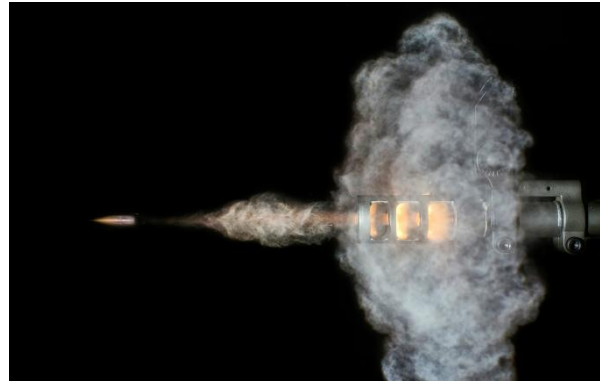
Kullanıma yönelik bu zorlukların en önemli nedenlerinden birisi, gerek yapısal gerekse de üretim kriterlerinden dolayı silah gövdelerinin ağır inşa edilmek durumunda olmasıydı. Malzeme ve üretim teknolojileri geliştikçe silahlar küçülmeye başladı. Ancak silahlardan alınmak istenilen yüksek yıkım etkisinden dolayı en önemli problemlerden birisi olan geri tepme kuvveti incelenmesi gereken bir problem olarak güncel kaldı. Bir ateşli silahta geri tepme kuvveti barutun yanmasına bağlı olarak ortaya çıkan gazın basıncından kaynaklanır.

Gelişen teknoloji ile geri tepme kuvvetini sönmüleme mekanizmaları geliştirilmiştir. İlk zamanlarda bu mekanizmaların çoğu, silah kaidelerinin geri tepme hareketlerini kontrollü bir şekilde gerçekleştirmesine yönelikti. Şekil 4'te görülen 19. yüzyıl İngiliz 16 Pounder topunda, geri tepme kuvvetlerini sönmülemek maksadıyla reküperatör denilen, yay ve hidrolik deşpot (dashpot) ikilisi kullanılmıştır.



Şekil 4 : 19. yüzyıl İngiliz 16 Pounder topunda reküperatör.

Bilim ve teknolojinin gelişmesiyle geri tepme kuvvetini sönmlemeye yönelik bulunan bir diğer çözüm de alev gizleyen (*muzzle brake*) ya da sönmleyici (*recoil compensator*) denilen namlu sonu tasarımıdır. Bu tasarımlarda basınçlı gazın hareketini yönlendirmek suretiyle geri tepme kuvvetini sönmlemek hedef alınmaktadır. Şekil 5'te bir alev gizleyen yapısı ve bu yapının bir tüfekte atış esnasında namlu gazına olan etkisi görölmektedir.



Şekil 5 : M11 alev gizleyen modeli ve alev gizleyenin akışa etkisi.

Alev gizleyen tasarımları küçük silahlarda olduğu gibi top sınıfında büyük silahlarda da kullanılmaktadır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da alev gizleyen yapısının top tışlarında ki namlu gazına olan etki görülmektedir.



Şekil 6 : Alev gizleyen yapısının atış esnasında namlu gazı dağılımına etkisi.

İleri bölümlerde çalışmanın amacı doğrultusunda geri tepme kuvvetlerinin fiziği anlatılacaktır. Örnek bir model hazırlanarak fişek patlaması sonucu merminin hareketi ve namlu çevresinde oluşan akışkan hareketi incelenecektir. Basıncılı namlu gazının mermi hareketi boyunca oluşturduğu geri tepme kuvveti incelenecektir.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatürde bu konu ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalardan bahsedilecektir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde mermiye olan momentum transferinin, gaz hareketinin fiziği anlatılacaktır. Bünye denklemleri ile tanımlanan problemin sayısal çözümü yapılacaktır. Geri tepme kuvvetlerinin oluşumu incelenecektir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde elde edilen veriler incelenecektir. Bu veriler tablolar, grafikler ve resimler ile görselleşecektir. Geri tepme kuvvetinin oluşumunu azaltmaya yönelik alternatif tasarımlar gösterilecektir. Yeni modellerin analiz sonuçları da yorumlanarak tasarım parametreleri belirlenecektir.

Çalışmanın son bölümünde elde edilen tüm veriler özetlenerek, namlu tasarımında önemli noktaların üzerinde durulacaktır.

2. GENEL KISIMLAR

Baer ve Frankle [1] 1962 yılında Amerikan Ordusunda topçu sınıfı için geliştirilen iç balistik hesaplamaları simülasyon programında, analitik denklemler nümerik olarak çözdürülmüştür ve bu çözümler 155mm'lik top için deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada enerjinin korunumu, hareket denklemleri ve yanma denklemleri çıkartılmıştır. İtici gaz, ideal gaz denklemi ile ifade edilmiş, mermi üzerine düşen kuvvet analitik olarak çıkartılmıştır. Elde edilen analitik denklemler, problem için yazılan FORAST kodu ile çözdürülmüştür.

Bohnsack [2] 2005 yılında modern zırhlı savaş araçları için geliştirilen topların gereksinimi olan hafiflik ve düşük geri tepme kuvveti kriterlerinden dolayı tasarlanan alev gizleyen yapıları üzerinde incelemeler yapılmıştır. Çalışmada namlu çıkışında oluşan basınç dağılımının alev gizleyeninde olduğu ve olmadığı namlular üzerine bıraktığı yükler analitik ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapısal olarak incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yung ve Zhang [3] 2010 yılında merminin namlu çıkış hızı ve stabiliyeti üzerine çalışmış. Ancak namlu çıkış hızının birçok araştırmacının incelediği gibi, namludan çıkış anından değil, daha sonra en yüksek değerine ulaştığını belirtmiştir. Ayrıca merminin daha namludan çıkmadan öncü şok oluşturduğunun üzerinde durmuş ve bu durumun çoklu atış sistemleri, yüksek kalibreli silah sistemleri üzerinde etkisinin daha da yüksek olduğunu vurgulamıştır. Bu nedenle çalışmada iç balistik hesaplamaları namlu çevresinde ki akışkan bölgesi modellenerek gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada sayısal yöntemlerin silah sistemlerinin aerodinamik yapılarının ve alev gizleyen tasarımlarının hesaplamalarında etkin rol oynadığı vurgulanmıştır.

Yung ve Zhang çalışmalarında itici gazı Noble-Abel modeli ile tanımlamıştır. Akışkan hareketlerinde türbülans özelliklerini Spalart-Allmaras modelini kullanarak hesaplara katmıştır. Sayısal yöntem için hazırladığı sayısal ağı hibrit ve aksi-simetrik olarak oluşturmuştur.

Cayzac ve Roquefort [4] 2010 yılında üniversite ve sanayi iş birliği içerisinde yaptıkları çalışmalarında, sayısal hesaplamalar için HAD kodu oluşturulmuştur. Çalışmada 120 mm'lik topa sahip bir tankın üç boyutlu modeli oluşturularak iç balistik, alev gizleyen aerodinamik performansı, şok oluşumu ve sabot mermisinin ayrılma hesaplamaları HAD yöntemiyle yapılmıştır. Namlu gazı Noble-Abel modeli ile tanımlanmıştır. Merminin namlu ile temasından kaynaklanan sürtünme kuvveti ve ısı iletimi hesaplara katılmıştır. Mermi namluyu terk ettikten sonra, namlu ve ortam gazları karıştırılamaz olarak modellenerek, Euler denklemleri ile çözdürülmüştür. Akışkanların viskoz etkileri ihmal edilmiştir. Sayısal ağ kartezyen mesh metodu kullanılarak oluşturulmuştur.

Cayzac ve Roquefort çalışmalarında, 3 boyutlu HAD çalışmalarının deneysel çalışmalarla yeterli tutarlılıkta olduklarını belirtmişlerdir. Ancak mermi yörüngesi üzerinde Richtmyer-Meshkov gibi pertürbasyon etkilerinin yeterli derecede görülebilmesi için geometri üzerinde yerel sayısal ağ iyileştirmelerinin olması ve akışkanların Euler denklemleri yerine Navier-Stokes denklemleri ile çözdürülmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Rehman [5] 2011 yılında yüksek kalibreli silahlarda oluşan yüksek ses değerlerinin askerlerin sağlığı ve birliklerin yerlerinin belirli olması üzerine yaptıkları çalışmada, bu silahlar için tasarlanan susturucu modellerini HAD yöntemiyle incelemişlerdir. Tasarlanan susturucunun performansı, susturucu olmayan haliyle karşılaştırılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmeden incelenmiştir. HAD yönteminin geçerliliği NATO G3 tüfeğinin DM41 mermisinin deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ile teyit edilmiştir.

Çalışmada sayısal ağ için Gambit ve HAD hesapları için Fluent yazılımı kullanılmıştır. Analiz modeli aksi-simetrik oluşturulup, Spalart-Allmaras türbülans modeli ve density-based çözdürücü ile gerçekleştirilmiştir. Akışkan ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda namlu susturucu tasarımının, oluşan şok dağılımında basıncı %90 ve sesi 20 dB mertebelerinde düşürdüğü tespit edilmiştir.

Yung ve Zhang [6] 2012 yılında döner çok namlulu silahlar üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Merminin hareketinin analitik denklemleri çıkartılmıştır. Akışkanın viskoz etkileri dahil edilmiş ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Akışkanın tek fazlı ve Nobel-Able denklemleri ile modellenmiştir. Analitik denklemler dördüncü dereceden Runge-Kutta metodu ile çözdürülmüştür. Bünye denklemlerinden basınç-hız ayrıklaştırması AUSM şeması ile yapılmıştır. Sayısal çözümde Courant-Friedrichs-Levy sayısı 10 alınmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

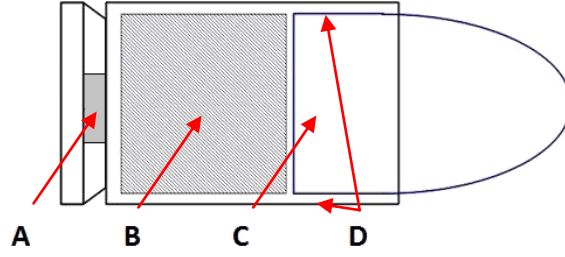
Çalışmanın bu bölümünden ateşli silahlarda bulunan namlu yapıları hakkında bilgi verilerek, merminin patlaması anlatılmış ve reaksiyon sonucu oluşan kuvvetlerin ve akışkan hareketlerinin detayları verilerek matematiksel denklemleri yazılmıştır. Daha sonra örnek bir model tanımlanmış olup, belirli kabuller çerçevesinde ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan Ansys Fluent kullanılarak çözümü yapılmıştır. Mevcut model sonuçları üzerinden incelenen tasarımın iç ve dış dinamikleri analiz edilip, geri tepme kuvvetini düşürmeye yönelik alev gizleyen (muzzle brake) tasarımları yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

3.1. GENEL TANIMLAR

3.1.1. Mermi ve Namlu

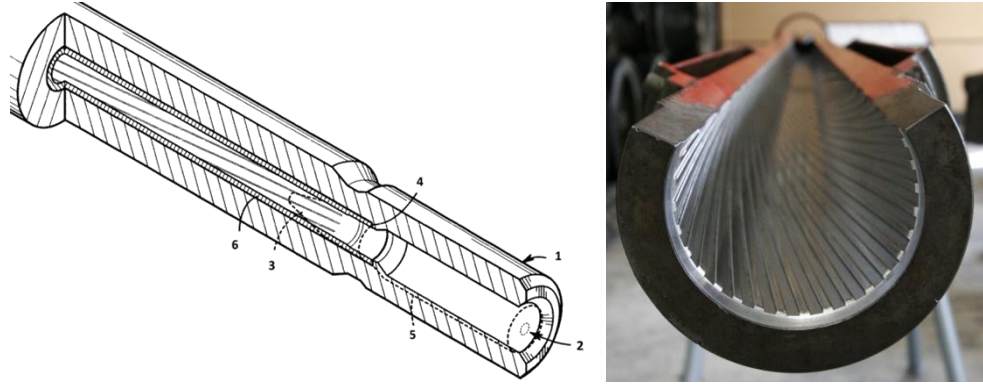
Ateşli silahlarda itici kuvvet, barutun yanması sonucu oluşan basınçlı gaz kaynaklıdır. Bu gazın itkisiyle mermi çekirdeği ivme kazanır ve kinetik enerji depolar. Çekirdeğin hız kazandığı zaman dilimi içerisinde, içinde yol aldığı silindirik yapıya da namlu denilir.

Şekil 7'de bir merminin kesitinde temel kısımlar gösterilmiştir. A bölgesinde bulunan fünyenin patlamasıyla oluşan kıvılcım ile B bölgesinde bulunan barut ateşlenir. Yanma sonucu oluşan basınçlı gazın itkisi ile C bölgesinde bulunan mermi çekirdeği, D bölgesi ile gösterilen kapsülden (kovan) ayrılarak serbest kalır ve namlu içerisinde hız kazanır.



Şekil 7 : Bir merminin temel kısımları.

Şekil 8'de bir namlu kesiti görülmektedir. *1 bölgesi* namlu gövdesi olup, *2 bölgesi* merminin yerleştiği kısımdır. *3 bölgesi* merminin çekirdeği olup, *4 bölgesi* de çekirdek - kapsül ayırım hattıdır. *5 bölgesi* barutun kapsül içerisindeki yanma odasıdır. Namlunun iç yüzeyi olarak gösterilen *6 bölgesi* yiv-set kısmıdır. Buradaki çıkıntılara set, oyuklara ise yiv denilir. Çekirdek bu kısımda ilerlerken helis profilin yardımıyla ekseninde açısal hız kazanır ve bu dönme hareketi çekirdeğe yörüngesinde kararlılık kazandırır. Yiv-set yapısı namlu içerisinde çekirdek üzerinde ezme yapacak şekilde çekirdek-kapsül ayrımından başlar.



Şekil 8 : Bir namlu kesit görüntü ve yiv-set yapısı.

3.1.2. Geri tepme kuvveti

İtici gazın potansiyel enerjisi çekirdeğe iletilirken aynı zamanda Newton'un üçüncü yasası gereği yanma odasında namlu doğrultusunda tepki kuvveti yaratır. Namlu tasarımlarda namlu uzunluğu, itici gazın çekirdeği ulaştırabileceği en yüksek hız ile

sınırlandırılır. Gerektiğinden daha uzun namlu, geri tepme ve merminin namlu içi sürtünme kuvveti değerlerini arttırarak sisteme olumsuz etki katar.

Çekirdeğin namluyu terk edene kadar gecen bu sürecin incelenmesine iç balistik problemi denilir. Merminin namludan çıkış anı ve itici gazın namludan dış ortama yayılışı etkilerinin incelenme konusu ise ara balistik problemidir. Merminin hedef istikametinde yol almasını ve dış ortam koşullarından etkilenmesini inceleyen problem şemasına ise dış balistik denilir.

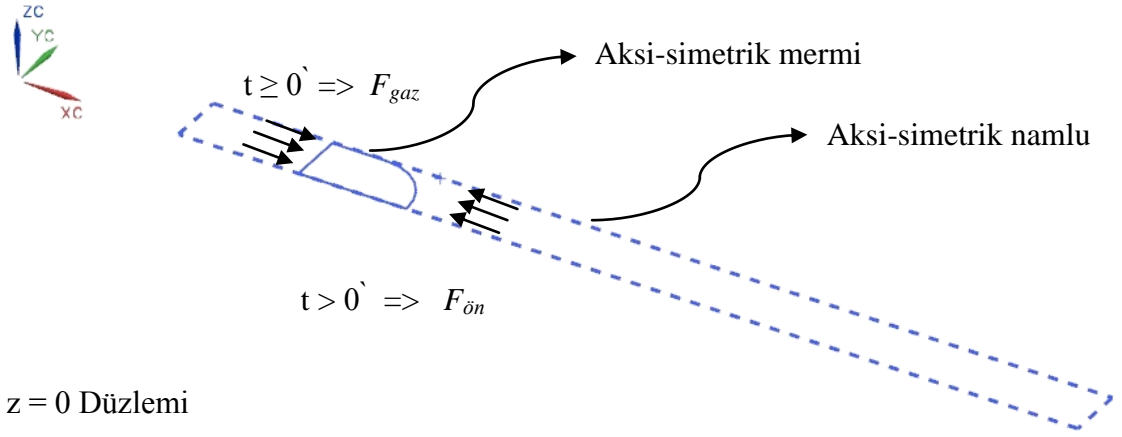
Çalışmada mermi patlamasına müteakip iç ve ara balistik problemleri incenmiş, dış balistik problemi üzerine durulmamıştır.

3.2. İÇ VE ORTA BALİSTİK PROBLEMİNİN FİZİĞİ

Çalışmada merminin iç balistik problemi belirli kabuller çerçevesinde tanımlanmıştır;

- Namlu ve çekirdek x eksenini etrafında aksi-simetrik, silindirik haldedir,
 - Barut $t = 0$ da tamamen yanmış ve itici gaz durağan haldedir,
 - Namludan ısı transferi ihmal edilmiştir,
 - Mermi çekirdeği ve namlu arası sürtünme yoktur,
 - Akışkanlar Newton tipidir,
 - Akışkanların viskoz özellikleri ihmal edilmiştir,
 - Akışkanlar gaz fazında homojen karışabilirlerdir,
 - İtici ve çevre gazları *sıkıştırılabilir ideal gaz* (3.1) yasasına bağlı hareket eder,
- $$p = \rho RT \quad (3.1)$$
- Yer çekimi ihmal edilmiştir,

Şekil 9'de problem için eksen takımı ve örnek model görülmektedir. $t=0$ anında namlu dibinde yanmış halde bulunan barut gazı mermi çekirdeğine kuvvet etkilemektedir. Mermi çekirdeği $t>0$ anından itibaren bu kuvvetin etkisi ile ivme kazanacaktır. Problemin yüksek hızlı cereyan etmesi ile mermi çekirdeği önünde bulunan dış ortam akışkanı sıkıştırılacak ve çekirdeğe direnç kuvveti uygulayacaktır. İtici gazın, mermi çekirdeğine enerji transferi namludan çıkıncaya kadar sürece ve çıkış anı sonrası itici gaz ve çevre akışkan karışıma uğrayacaktır.



Şekil 9 : Problemin şeması ve eksen takımı.

3.2.1. Merminin Hareket Denklemi

$t = 0$ da mermi çekirdeğine etkiyen kuvvet;

$$F_{gaz} = S p_{gaz} \quad (3.2)$$

Newton'un ikinci yasası denklemi;

$$F = m a \quad (3.3)$$

Mermi çekirdeği namlu içerisinde yüksek hızla hareket edeceğinden önündeki gazı sıkıştıracaktır. Bu sıkışan gazın direnç kuvveti $F_{ön}$ olarak tanımlanmıştır. Çekirdeğe etki eden net kuvvet F_{net} altında hareket denklemi (3.5) şu şekilde bulunur;

$$m_{ç} \frac{dv}{dt} = F_{net} \quad (3.4)$$

$$F_{net} = F_{gaz} - F_{ön} \quad (3.4)$$

$$m_{ç} \frac{dv}{dt} = S(p_{gaz} - p_{ön}) \quad (3.5)$$

3.2.2. Temel Denklemler

(3.5) denkleminde zamana bağlı basınç değişimi bilinmeyen terimdir. (3.1) ideal gaz yasası ile beraber Newton tipi, sıkıştırılabilir, viskoz olmayan ve zamana bağlı temel denklemler kullanılarak elde edilen basınç değerlerinden merminin hareket denklemi çözülebilir.

3.2.2.1. Süreklilik Denklemi

Newton tipi, zamana bağlı ve sıkıştırılabilir akışkan için süreklilik denkleminin genel hali (3.6)'da gösterilmiştir,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.6)$$

Hız vektörünün diverjansı alındığında (3.7) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

İki boyutlu aksi-simetrik kabulü ile (3.7) denklemi için silindirik koordinat dönüşümü uygulandığında (3.8) denklemi ile kütle korunum yasası ifade edilmiş olur.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (3.8)$$

3.2.2.2. Momentum Korunum Denklemi

Newton tipi, zamana bağlı ve sıkıştırılabilir akışkan için momentum korunum denkleminin genel hali (3.9)'da gösterilmiştir,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (3.9)$$

(3.9) denkleminde bulunan $(\bar{\tau})$ gerilme tansörü terimi (3.10) şeklinde ifade edilir,

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\rho \vec{v} + \rho \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.10)$$

Problem için ikincil viskozite katsayısı λ (3.11) denklemi ile ifade edilmiştir ve (3.10) gerilme tansörü denklemi birinci viskozite μ değeri kapsamına alınmıştır.

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (3.11)$$

Problemin viskoz (3.10) ve yer çekimi etkileri ihmal edildiğinden dolayı (3.9) denklemi (3.12) şeklinde yazılabilir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p \quad (3.12)$$

İki boyutlu aksi-simetrik kabulü ile (3.12) denkleminin silindirik koordinat dönüşümü uygulandığında (3.13) ve (3.14) denklemleri ile momentum korunum denklemi elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (3.14)$$

3.2.2.3. Enerji Korunum Denklemi

Enerji korunum denkleminin zamana bağlı genel gösterimi (3.15)'de verilmiştir.

$$\frac{d}{dt}(\rho E) + \nabla \cdot (v (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3.15)$$

Denkleminde görülen Φ yitim fonksiyonu olup White (1991) tarafından $\Phi(\mu, \lambda)$ şeklinde tanımlanmıştır. İçerisinde ısı üretimi olmayan ve viskoz etkileri ihmal edilen akışkan için enerji denklemi (3.16) şekline girer.

$$\frac{d}{dt}(\rho E) + \nabla \cdot (v (\rho E + p)) = 0 \quad (3.16)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.17)$$

$$h = \int_0^T c_p dT \quad (3.18)$$

3.3. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

Tablo 1'de problemi yöneten denklemler gösterilmiştir. Tablo 2'de ise bu denklem sisteminin bilinmeyenleri gösterilmiştir. Çalışmada problem sonlu farklar yöntemi ile çalışan Fluent yazılımı ile bilgisayar ortamında sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çözüm belirlenen sabit bir zaman adımı ile merminin namluyu yeteri kadar mesafede terk etmesine kadar sürdürülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde, yapılan HAD analizlerinin detayları verilecektir.

Tablo 1 : Problemi yöneten temel denklemler.

$$p = \rho RT \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3.13)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho E) + \nabla \cdot (v (\rho E + p)) = 0 \quad (3.17)$$

Tablo 2 : Denklem sisteminin bilinmeyenleri.

p	Basınç
ρ	Yoğunluk
T	Sıcaklık
v_r	Hızın radyal bileşeni
v_x	Hızın aksenal bileşeni
t	Zaman

3.3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Giriş

Akışın olduğu mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizinde iki temel yaklaşım vardır; deney yapma ve hesaplama. Deney yapma tipik olarak rüzgar tüneline ya da başka yerlerde test edilecek modellerin yapımını gerektirirken, hesaplama akışa air diferansiyel denklemlerin analitik veya sayısal olarak çözülmesini içerir. HAD, hesaplanacak bu diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülmesidir. Günümüzde bulunabilirliği ve performansı artan bilgisayar donanımları ile ticari olarak mühendislik sektörü hizmetinde yer alan birçok yazılım bulunmaktadır.

Bir HAD çalışmasında izlenilecek temel adımlar vardır. Bunlar;

- Analizin hedeflerinin belirlenmesi,
- Bilgisayar ortamında çözüm modelinin oluşturulması,
- Çözüm için sayısal ağ (mesh) oluşturulması,
- Analiz için fiziksel tanımların yapılması,
- Analizin çözdürülmesi,
- Sonuçların incelenmesi,

olarak sıralanabilir.

3.3.1.1. Analizin hedeflerinin belirlenmesi

Çalışmada öncelikle yapılacak analizin hedefi, kabulleri belirlenir. Daha sonraki aşamalarda tüm değişkenler ve kabuller bu çerçevede alınır. Özellikle tasarım iyileştirme çalışmalarında bu şema, kontrol grubu ve değişken grubu analizlerinin karşılaştırılabilmesi açısından önemlidir.

3.3.1.2. Bilgisayar ortamında çözüm modelinin oluşturulması

Çalışmada ikinci safhasında bilgisayar ortamında modelin oluşturulması gerekir. Bu işlem karmaşık modellerin süratle analize hazırlanması için CAD programlarının desteği ile verimli şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

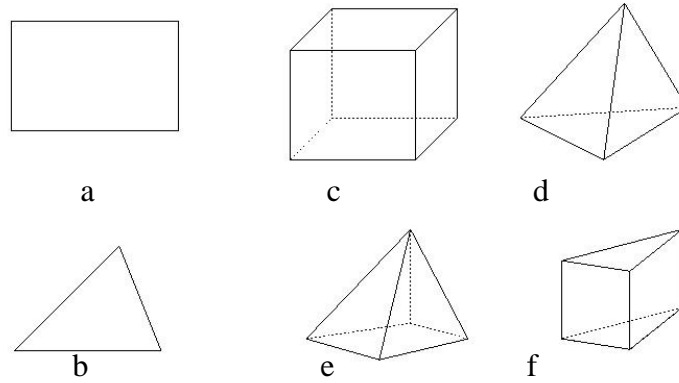
Ayrıca bu safhada analizi yapılacak modelin uygun bir şekilde modellenmesi gerekir. Analizdeki temel kabuller, geometrik olarak ihmal edilebilecek noktalar, sayısal ağ kalitesini arttırmaya yönelik işlemler göz önüne alınarak model oluşturulur.

Oluşturulan model temel olarak akış alanını çözeceği için akışkanın kapladığı bölgeleri temsil eder. Buna akış hacmi denilir. Ayrıca incelenen problemin doğası gereği katı bölgelerdeki sıcaklık gradyanları, termal gerilmeler vb. etkiler incelenmek isteniliyorsa katı bölgeler de modellenmelidir.

3.3.1.3. Çözüm için matematiksel sayısal ağın oluşturulması

HAD yazılımlarında temel mantık akışkan ve/veya katı modellerde kontrol hacimlerinin oluşturulması ile problemi yöneten denklemlerin bu hacimlerde çözdürülmesidir. Oluşturulan CAD modelin üzerinde sonlu sayıda kontrol hacimlerinin oluşturulmasına matematiksel sayısal ağın oluşturulması denilir. Oluşturulan sayısal ağ özellikleri ile analiz sonucunun hassasiyeti ve doğruluğu direkt olarak ilintilidir.

Sayısal ağ oluşturulurken temel olarak kare ve üçgen geometrik şekillerinden yararlanır. 2 boyutlu ortamda kullanılan bu geometrilerden yararlanılarak 3 boyutlu ortama da geçiş yapılabilir. Şekil 10'da HAD yazılımlarında sayısal ağ oluşturmak için kullanılan başlıca elemanlar görülmektedir. Bu elemanlardan 2 boyutlu modelleme için kare (a) ve üçgen (b) geometrileri kullanılır. 3 boyutlu sayısal ağ modellerinde ise küp (c), düzgün dört yüzlü (d), piramit (e), kama/prizma (f) geometrik elemanları kullanılır.



Şekil 10 : HAD yazılımlarında kullanılan başlıca eleman tipleri.

Oluşturulan sayısal ağ sayısı kontrol hacimlerini arttıracığından dolayı çözümün doğruluğunu etkileyecektir. Ancak sayısal ağ sayısını arttırmak belli bir noktadan sonra analiz sonrası elde edilen sonuçlarda değişiklik göstermeyecektir. Bunun nedeni sayısal ağ miktarının artmasına rağmen, hesaplama platformu olan bilgisayardaki kesme ve yuvarlama hatalarıdır. Ayrıca sayısal ağ miktarının artması çözümü yapılan denklem

matrisini de arttırmaktadır. Bu nedenle HAD çalışmalarında sayısal ağa duyarlılık denilen terime dikkat edilir. Buna göre, sayısal ağ miktarı farklı iki farklı analiz sonuçlarının istenilen toleransın altında olması koşuluyla çözümü hızlı olan model kabul edilir. Bu yöntem özellikle karşılaştırmalı tasarım geliştirme çalışmalarında yüksek işlevsellik sağlamaktadır.

Oluşturulan sayısal ağın çözüm hassasiyeti üzerine bir diğer etkisi de elemanların kalitesidir. Şekil 10'da görülen geometrik tanımların her birinin ideal durumdaki eleman kaliteleri bellidir. Buna göre, dörtgen elemanlar kare, üçgen elemanlar ise eşkenar üçgen olmak durumundadır. Oluşturulan elemanların ideal duruma göre bağıl farkları eleman kalitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu kalite ölçeklerinden birisi olan eleman çarpıklık oranının hesaplanması (3.19) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$\theta_{e\check{c}o} = maks \left[\frac{\theta_{maks} - \theta_{e\check{s}it}}{180^\circ - \theta_{e\check{s}it}}, \frac{\theta_{e\check{s}it} - \theta_{min}}{\theta_{e\check{s}it}} \right] \quad (3.19)$$

(3.19) denkleminde bulunan θ terimleri seçili geometrik model içerisindeki iç açılarıdır. Bu durumda en büyük ve en küçük açıların, geometrinin ideal iç açısıyla hesaplanan değişkenin kontrolü söz konusudur. İdeal iç açı yani $\theta_{e\check{s}it, kare}$ için 90° , üçgen için ise 60° 'dir.

3.3.1.4. Analiz için fiziksel tanımların yapılması

Çalışmada bulunan HAD analizinde diferansiyel denklem sistemleri, oluşturulan sayısal ağ ile sonlu hacimlerde sayısal olarak çözülecektir. Bu durumda, malzeme özellikleri, sınır ve ortam şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Çalışmanın bu aşamasında problemin fiziğine ait tüm tanımlamalar yapılacaktır.

3.3.1.5. Analizin çözdürülmesi

Problem sayısal analiz yazılımına uygun bir şekilde tanımlandıktan sonra bilgisayar ortamında çözdürülür. Çözümün doğruluğu ve hassasiyeti için probleme en uygun sayısal analiz metodu seçilir. Çözüm sırasında kullanılan denklemlerin yakınsamaları çeşitli monitörlerle kontrol edilir. Böylelikle problemin fiziğine en uygun sayısal ağ ve sayısal yöntemin tanımlanmış olduğuna kanaat getirilir.

3.3.1.4. Sonuçların incelenmesi

Problem çözümünü takiben sonuçlar incelenir. Bunun için çeşitli metotlar vardır;

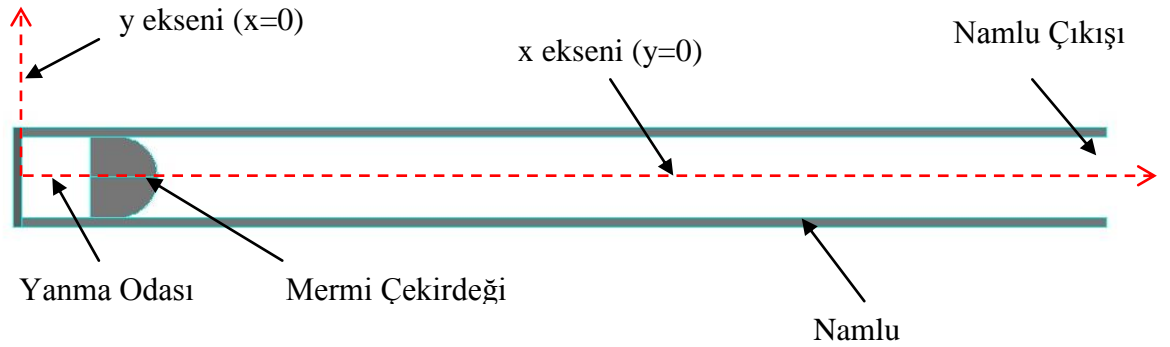
- Analiz monitörlerinden yakınsamanın kontrolü,
- Bulunan sayısal değerlerin problemin fiziğine aykırı olup olmadığı,
- Daha sık sayısal ağ ile elde edilen bir diğer sonucun ile karşılaştırılması.

3.3.2 HAD Yazılımı İle Namlu Analizi

Çalışmanın bu bölümünde örnek bir merminin patlaması sonrası namluda oluşan akışkanların hareketi incelenecektir.

3.3.2.1. Kontrol Çözüm modeli

Analiz çalışmasında çözdürülecek modelin CAD çizimi Ansys GAMBIT 2.4.6'da oluşturulmuştur. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de analizde kullanılacak olan ermi ve namlu modelinin iki boyutlu genel görünüşü görülmektedir.



Şekil 11 : Analizde kullanılan modelin genel görünüşü.

Çözdürülecek modelin ölçüleri Tablo 3' te verilmiştir.

Tablo 3 : Çözüm modelinin ölçüleri.

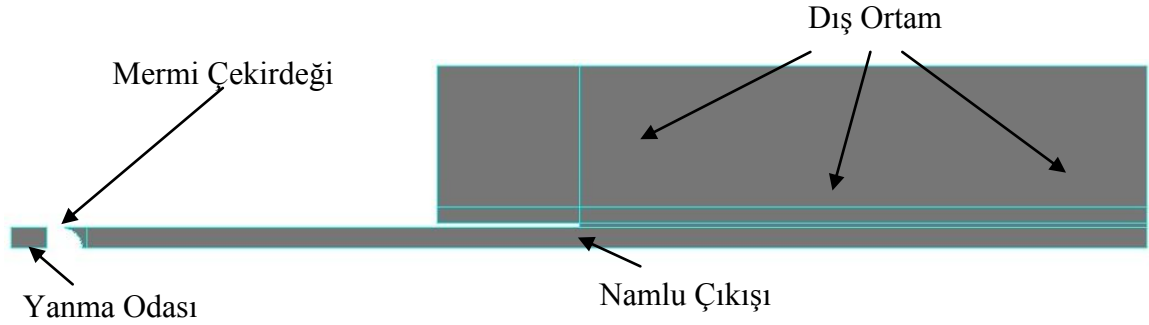
Namlu İç Çapı	9 mm
Namlu Dış Çapı	11 mm
Namlu Uzunluğu	120 mm
Yanma Odası Uzunluğu	7.5 mm
Toplam Mermi Uzunluğu	15 mm

Çözüm modeli global eksen takımında x eksenini etrafında aksene simetrik olduğundan, Şekil 12'de görüldüğü gibi modellenmiştir.



Şekil 12 : Aksene simetrik çözüm modeli.

CAD modelin hazırlanmasından sonraki aşama, sayısal ağı oluşturulması için akış hacminin çıkartılmasıdır. Çalışma için çıkartılan akış hacmi Şekil 13'de görülmektedir. Merminin namludan ayrılması ile namlu gazlarının dış ortama dağılması incelenecektir. Bu bölgede oluşan akışın yeterli şekilde incelemesi için akış hacmi geniş tutulmuştur.



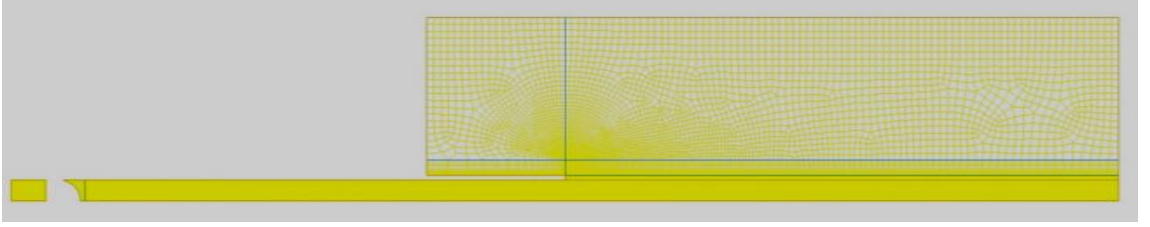
Şekil 13 : Analizde kullanılan modelin akış hacmi.

Çalışmada katı geometrilerde ısı transferi ihmal edildiğinden dolayı modellemeye alınmamıştır. Mermi çekirdeği yüzeyleri analiz şartlarında rijit olarak modellenecek ve kütle bilgisi girilecektir. Bu çözüm metodu için çekirdeğin modellenmesini ihtiyaç duyulmamaktadır.

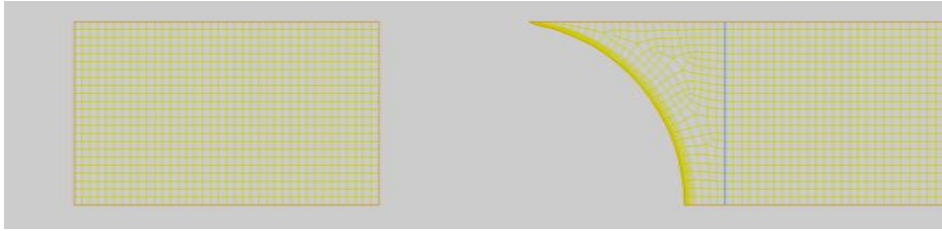
3.3.2.2. Kontrol Modeli İçin Sayısal Ağ Yapısı

Analiz için hazırlanan sayısal ağ Ansys GAMBIT 2.4.6'da oluşturulmuştur. Sayısal ağ hibrit şeması ile oluşturulmuştur. Bu teknikte yapılandırılmış-structured elemanlar ile yapılandırılmamış-unstructured elemanlar birlikte kullanılmaktadır. Değişimlerin kritik olduğu bölgede yapılandırılmış elemanlar kullanılmıştır. Bu bölgelerde eleman büyüklükleri küçük tutularak değişkenlerin gradyanların yakalaması amaçlanmıştır.

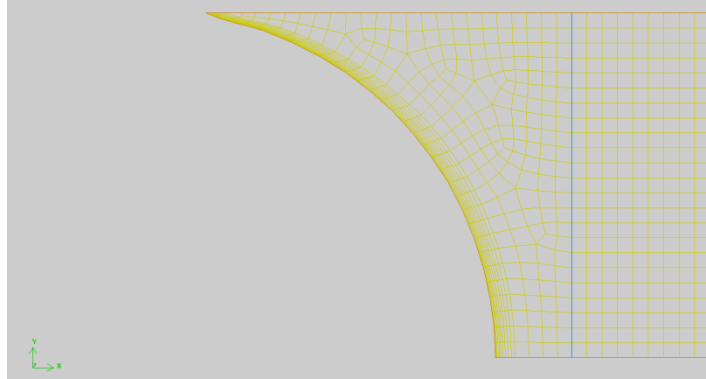
Şekil 14'de analizde kullanılan sayısal ağıın genel görünüşü görölmektedir. Sayısal ağı 19770 elemandan meydana gelmektedir.



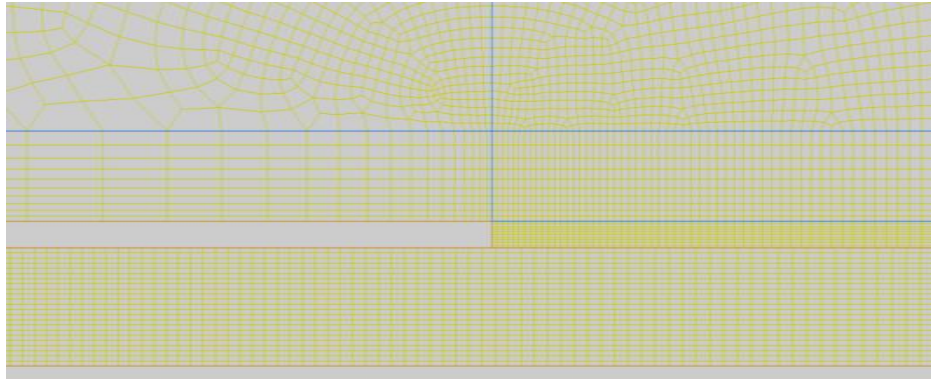
Şekil 14 : Analizde kullanılan sayısal ağıın genel görünüşü.



Şekil 15 : Yanma odası ve namlu içinde sayısal ağı yapısı.



Şekil 16 : Mermi önünde sınır tabaka ağı yapısı.



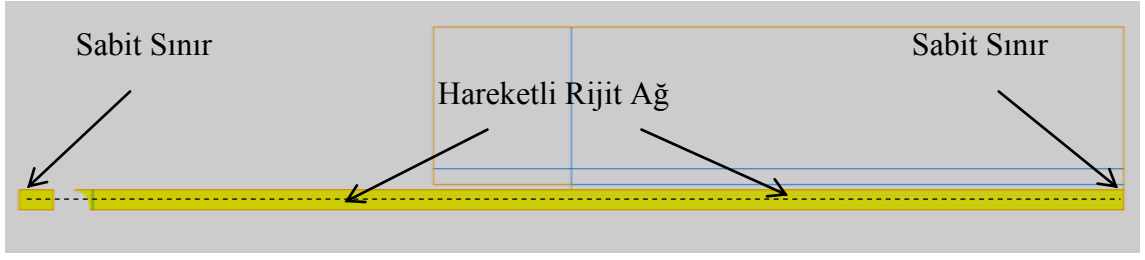
Şekil 17 : Namlu çıkışında ağı yapısı.

Sayısal ağın en yüksek çarpıklık oranı 0.808148'dir. HAD yazılımı olan Ansys Fluent dökümantasyonunda kaliteli çözüm için 0.85 çarpıklık oranının geçilmemesi belirtilmektedir. Ayrıca hesaplamada hücre bazlı hataların en aza indirgenmesi için en yüksek 0.97 çarpıklık oranının geçilmemesi istenilmektedir. Çözümde kullanılan sayısal ağdaki elemanlar kalite aralığı Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4 : Sayısal ağdaki elemanların kalite dağılımı.

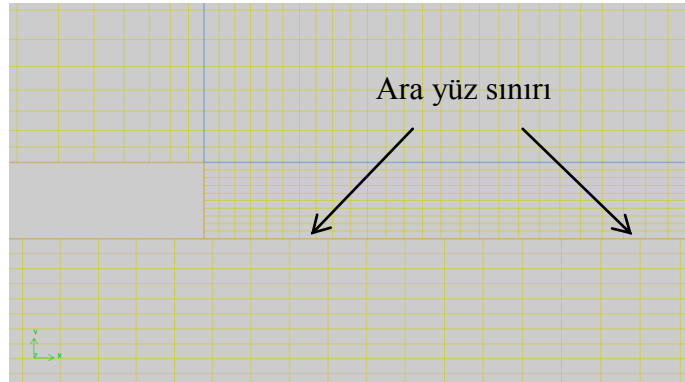
Aralık	Eleman Sayısı	%
0.0 - 0.2	19185	97.04
0.2 - 0.4	448	2.26
0.4 - 0.6	75	0.38
0.6 - 0.7	21	0.11
0.7 - 0.8	41	0.21
	19770	100

Çözümü yapılacak problemin doğası gereği mermi hareket edecektir. Bu durumda zamana bağlı olarak sayısal ağ değişecektir. Ansys Fluent içerisinde kullanılan bu yöntemde dinamik ağ-dynamic mesh denilmektedir. Mermi lineer bir yol izleyeceğinde dolayı, katman-layering dinamik mesh yapısı uygun görülmüştür. Bu yöntemde merminin yer değiştirmesine bağlı olarak yatay mesh kütleli hareket edecek, başlangıç ve son sınırlarından yeni elemanlar eklenecek ya da çıkartılacaktır. Şekil 18'de mermi hareketi ile yenilecek dinamik ağ bölgesi görülmektedir.



Şekil 18 : Dinamik ağ bölgesi.

Zamana bağlı olarak hareketli ağ yapısının, dış ortamda bulunan durağan ağ yapısı arasında veri transferini sağlamak amacıyla ara yüz-interface denilen tanımlama kullanılmıştır. Böylelikle ağın bir tarafındaki sayısal değerler, karşı komşuda bulunan noktalar üzerine interpolate edilerek transfer edilir. Bu yöntem kullanılırken karşılıklı komşu yüzlerdeki eleman büyüklüklerinin benzer olmasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde gradyenlerin yüksek olduğu bölgelerde sayısal değerler tutarsızlık gösterebilir.



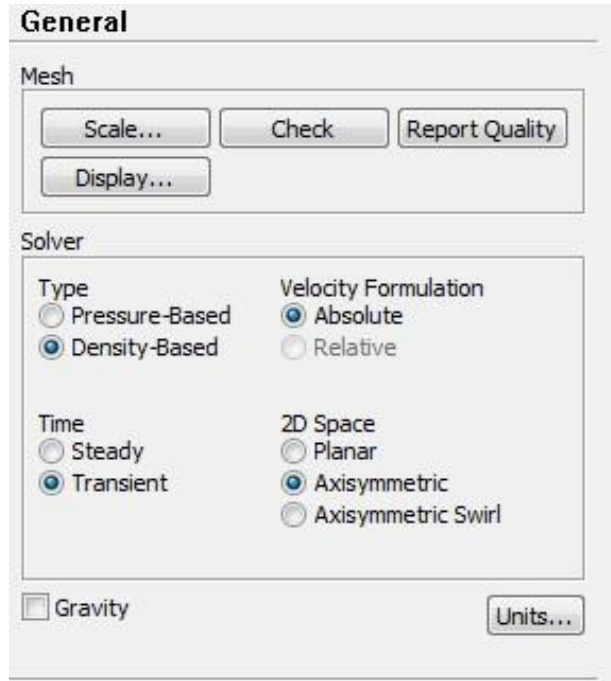
Şekil 19 : Hareketli ve durağan bölgeler arası ara yüz sınırı.

Analiz için hazırlanan sayısal ağda, kritik bölgelerde sık elemanlar kullanılmıştır. Bu kritere dikkat edilerek en düşük eleman büyüklüğü mermi üzerinde 0.2 mm, namlu çıkış ağzında 0.1 mm olacak şekilde tanımlanmıştır. Dış ortama doğru elemanlar 1.05 oranında 1.5 mm 'ye kadar büyüyecek şekilde tanımlanmıştır.

3.3.2.3. Kontrol Modelinin HAD Yazılımı İle Çözümü

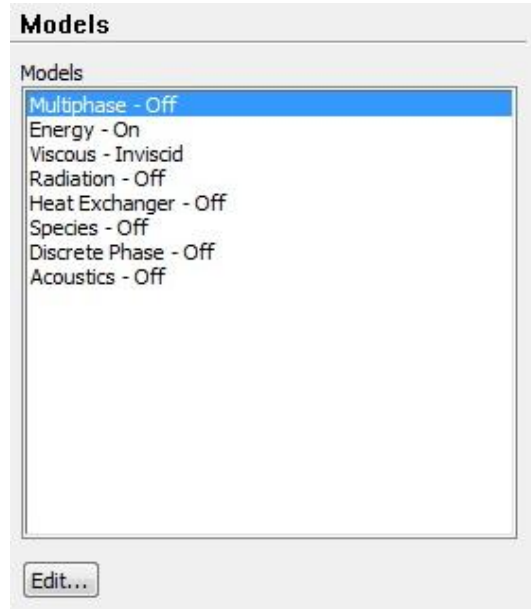
3.3.2.3.1. Genel Ayarlar, Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartları

Bu başlıkta çalışmada incelenilen namlu modelinin HAD çözümünün yapılması belirtilecektir. Sayısal çözüm Ansys Fluent 14.5.7 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Analiz yazılımında model 2 boyutlu aksi-simetrik, yüksek çözüm hassasiyeti için de double precision olarak tanımlanmıştır. Şekil 20'de yazılım içerisinde tanımlanan genel çözdürücü ayarları verilmiştir. Analiz zamana bağlı çözülmüştür ve yoğunluk değişimi ile hız büyüklüklerinin yüksek olması nedeniyle sayısal olarak daha stabil çözüm sağlayan density-based çözdürücü kullanılmıştır.

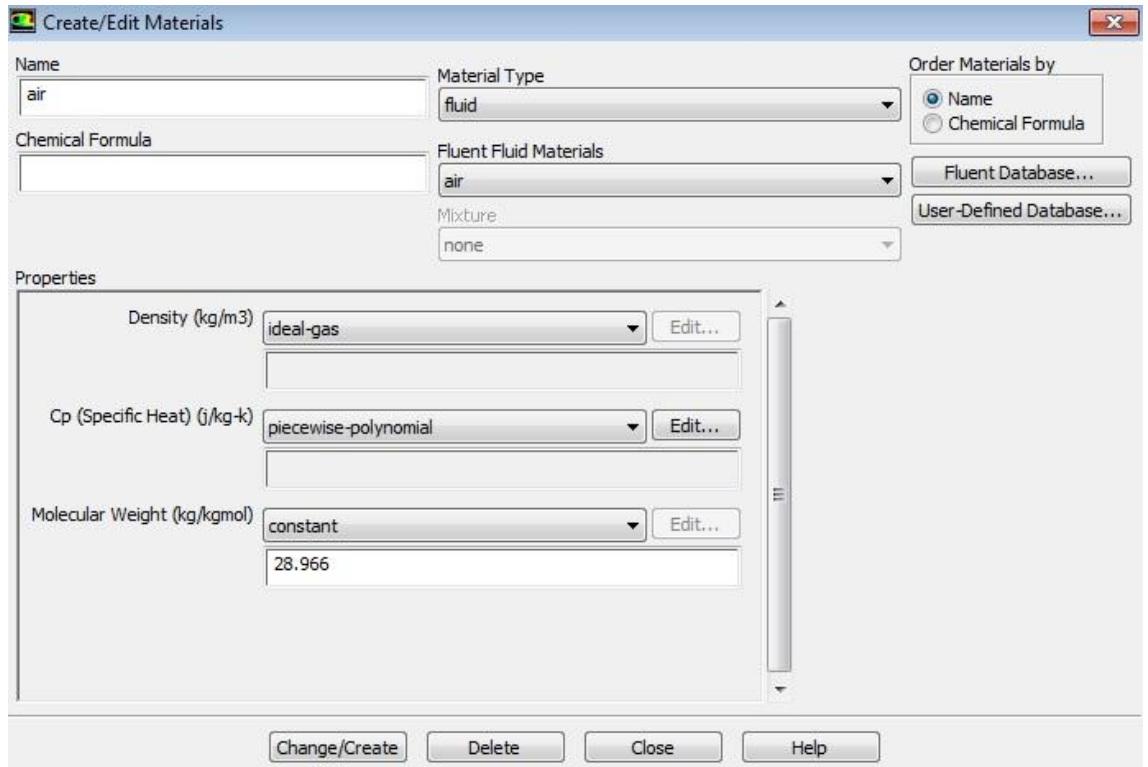


Şekil 20 : Fluent Çözdürücü ayarları.

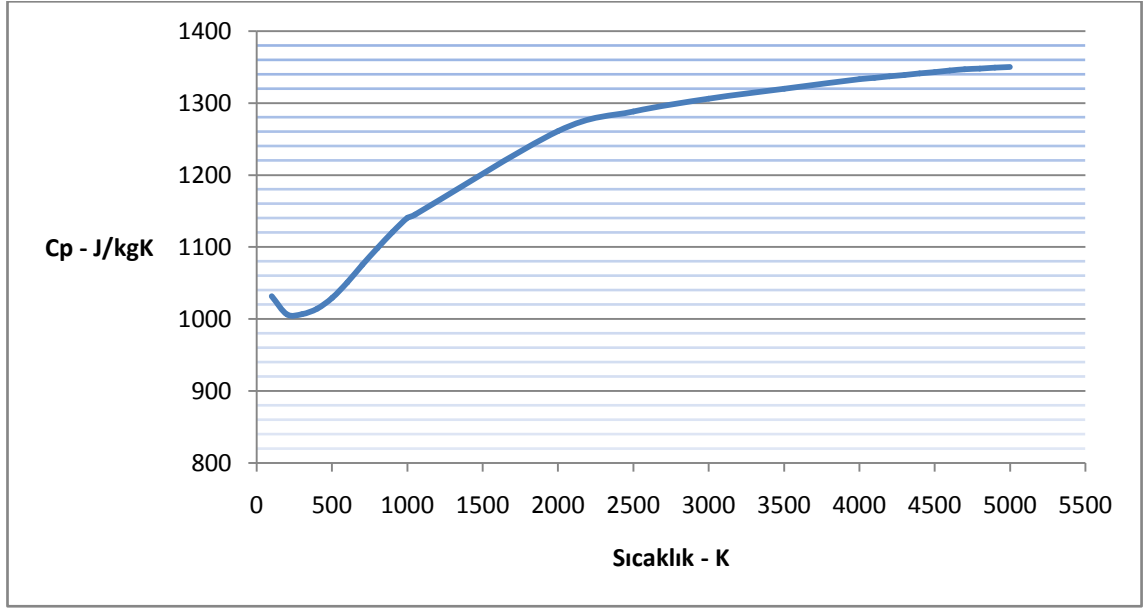
Yapılan kabuller çerçevesinde viskoz etkiler ihmal edilmiştir. Akışkan ideal gaz olarak kabul edildiğinden dolayı enerji denklemi çözüme dahil edilmiştir. Şekil 21'de yazılımda problemin tanımıyla ilgili olan fiziki şartlar görülmektedir. Problemden itici gaz ve dış ortam akışkanı tek fazlı ve homojen olarak karışabilir modellenmiştir. Şekil 22'de akışkanın özellikleri hava olarak tanımlanmıştır. Akışkanın ısı sığası sıcaklığa bağlı **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de ki gibi sıcaklığa bağlı değişebilir olarak tanımlanmıştır.



Şekil 21 : Problemin çözüm koşulları.

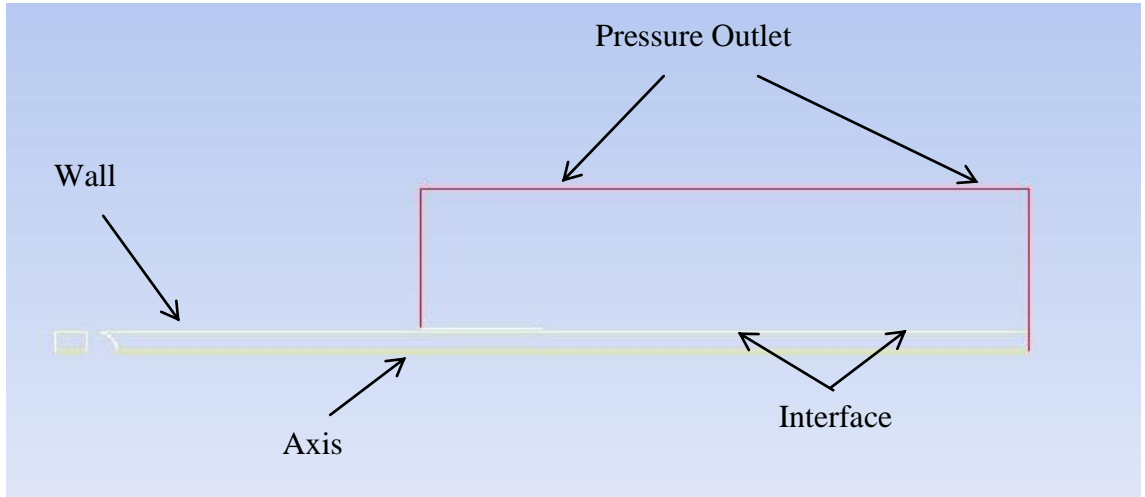


Şekil 22 : Akışkanın malzeme özellikleri.



Şekil 23 : 100-5000 K arası havanın Cp değişimi.

Şekil 24'te model üzerinde sınır şartları gösterilmiştir. Bu sınır şartlarından axis, eksenel simetrik referans çizgisidir. Interface hattı hareketli sayısal ağ ile durağan sayısal ağın veri geçişini sağladığı çizgidir. Akışkanın geçemediği duvar sınırları wall olarak tanımlanmıştır. Dış ortamın atmosfere açıldığı kabulü ile Pressure Outlet 1 atm mutlak basınç değerinde tanımlanmıştır.

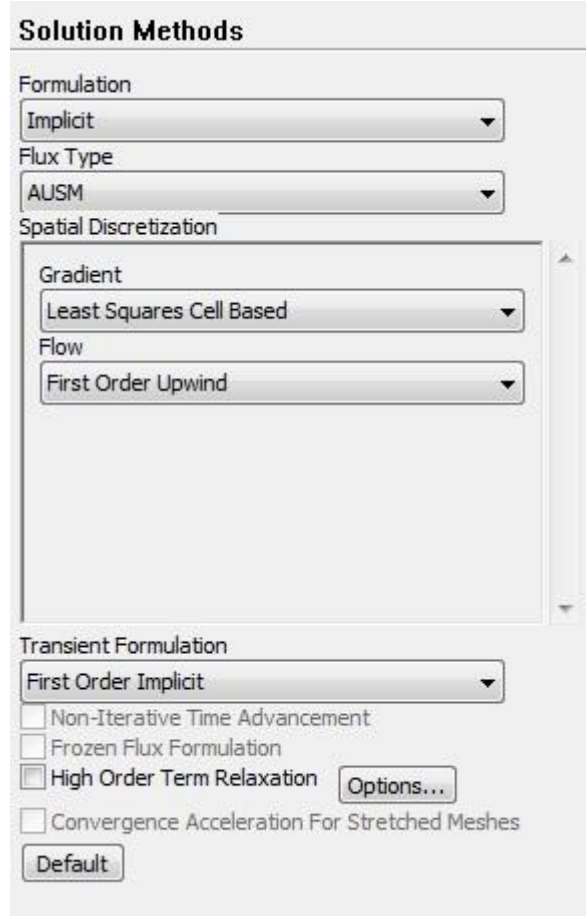


Şekil 24 : Model üzerindeki sınır şartları.

3.3.2.3.2. Sayısal Çözüm Ayarları

Yazılımda malzeme özellikleri ve sınır şartları tanımından sonra sayısal çözümün ayarları probleme uygun bir şekilde girilmelidir.

Sayısal çözümü yapılacak modelde yüksek hız ve basınç gradyanlarının olması beklenmektedir. Bu durumda namlu çıkışında şok oluşması ön görülebilir. Çözüm yoğunluk-bazlı kapalı yöntem (density-based implicit solver) ile gerçekleştirilmiştir. Şok oluşum problemlerinde daha kararlı hesaplama yapan Advection Upstream Splitting Method - AUSM kullanılmıştır. Denklemlerin ayrıklaştırılmasında First Order Upwind kullanılmıştır. Değişkenlerin yüksek gradyende değiştiği bölgelerde yapılandırılmış - structured ağ yapısı kullanıldığından dolayı Second Order Upwind metoduna gerek duyulmamıştır. Programdaki sayısal çözüm ayarları Şekil 25'te gösterilmiştir.

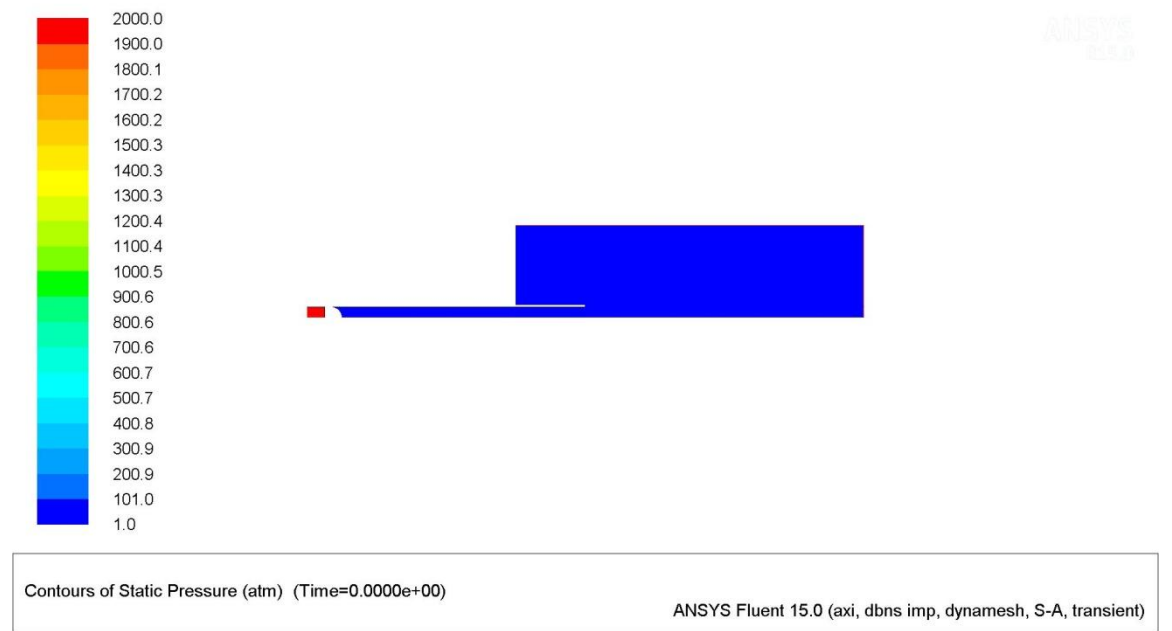


Şekil 25 : Fluent içerisinde sayısal çözüm ayarları.

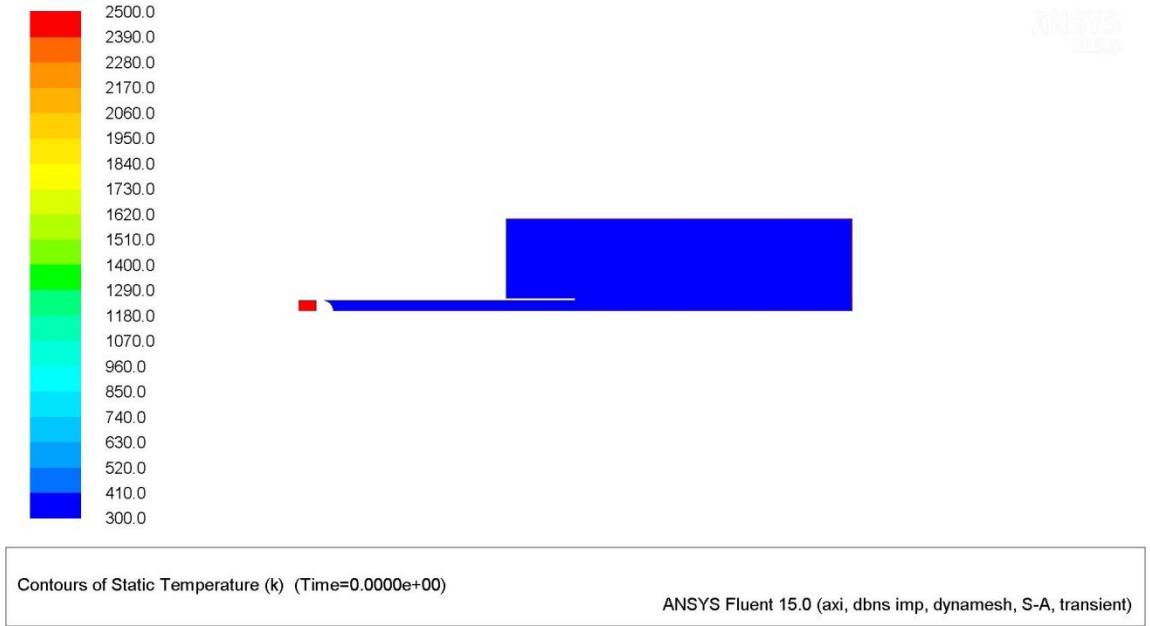
3.3.2.3.3. Başlangıç Koşulları ve Çözüm

Sayısal çözümlerde, çözüm modeline oluşturulmuş sınır şartları ve sayısal analiz ayarları tanımlandıktan sonraki aşamalar, başlangıç koşulları ile çözüme başlamaktır. Çalışmada $t=0$ anında itici gazın basıncı ve sıcaklığı belli iken mermi çekirdeğinin durağan halde olduğu kabul edilmiştir. Başlangıç koşulları olarak, literatür araştırmasında tabancalar için makul kabul edilebilecek ölçekte olduğuna karar verilen 2000 atm gaz basıncı ve 2500 K gaz sıcaklığı kullanılmıştır. Silahın ateşleme yapacağı dış ortamın ise 1 atm basıncında ve 300 K sıcaklığında olacağı kabul edilmiştir. Hareket edecek mermi çekirdeğinin kütlesi 3.2897 g alınmıştır.

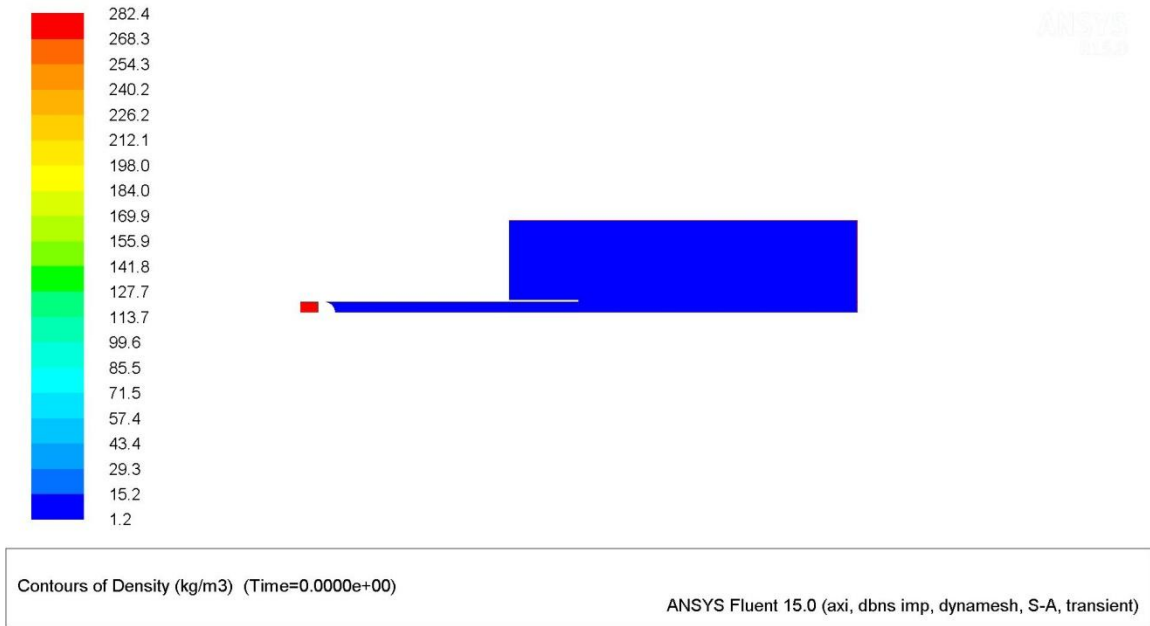
$t=0$ anında modeldeki statik basınç, sıcaklık ve yoğunluk dağılımları, sırasıyla Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28'de gösterilmiştir. Bu göstergelerde kırmızı renklendirmeler yüksek değeri, mavi renkler düşük değeri ifade etmektedir.



Şekil 26 : $t=0$ anında statik basınç dağılımı.



Şekil 27 : t=0 anında statik sıcaklık dağılımı.



Şekil 28 : t=0 anında yoğunluk dağılımı.

Başlangıç koşullarının tanımlanmasından sonra, analiz süresi tanımlanarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı analizde, düzgün yakınsama kriterlerini yakalamak için zaman adımı $\Delta t = 5 \cdot 10^{-8}$ s seçilmiş ve 70000 zaman adımı analiz sürdürülmüştür. Yazılımın analizi çalıştırma ayarları Şekil 29'da gösterilmiştir.

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed Time Step Size (s): 5e-08

Settings... Number of Time Steps: 70000

Options

Extrapolate Variables
 Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options...
Time Sampled (s): 0

Max Iterations/Time Step: 40 Reporting Interval: 10

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals...

Calculate

Help

Şekil 29 : Analizin çalışma ayarları.

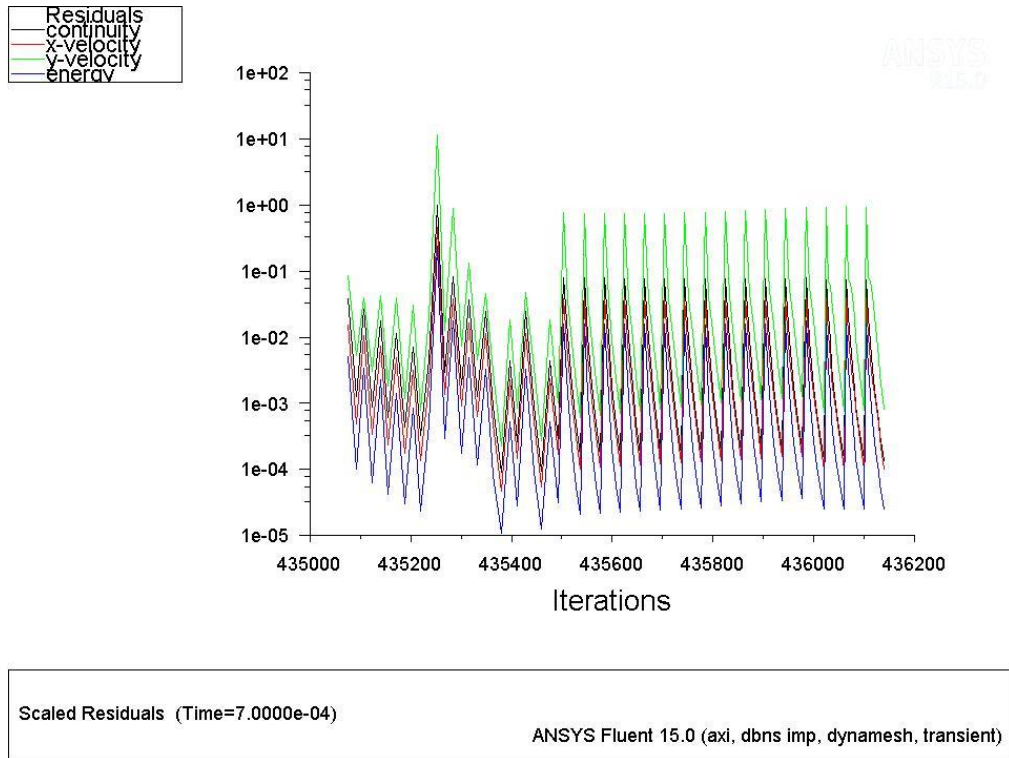
Çalışmada incelenen bir modelin analizi 8 gb belleğe sahip, 2.8 GHz'de çalışan 4 CPU'lu masaüstü bilgisayarda 120 saat kadar sürmektedir. Analiz boyunca her 100 zaman adımında otomatik kayıt dosyaları alınmış ve tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerin dosya boyutları 9 gb'ı bulmuştur.

3.3.2.3.3. Sayısal Çözüm Sonuçları

Bu başlıkta kontrol modelinin çözüm sonuçları verilecektir. Sonuçların incelenmesinde daha çok tepki kuvveti, mermi ve akışkanların hızı ve ortamdaki basınç dağılımları üzerinde durulmuştur.

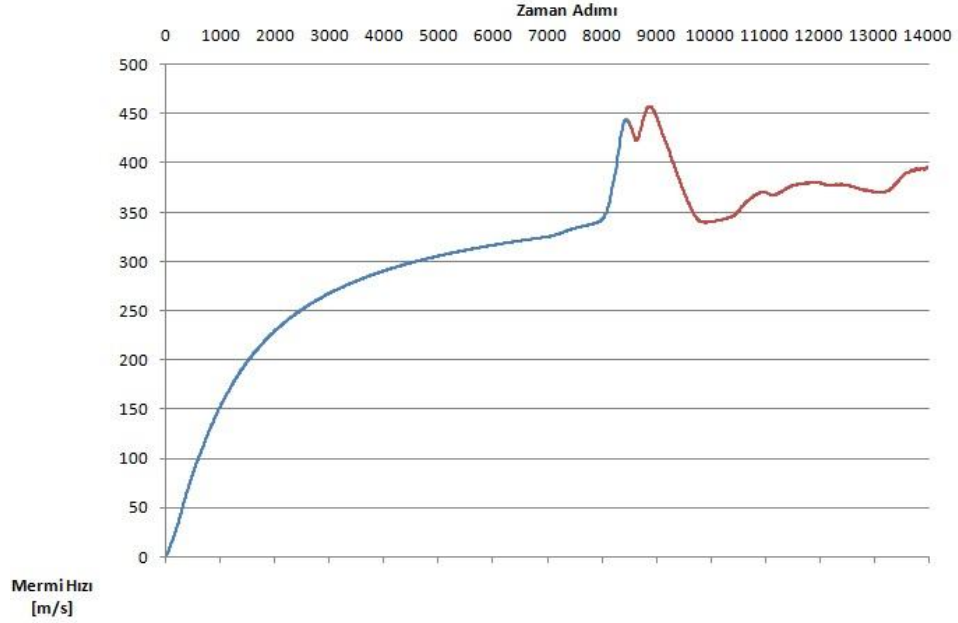
Sayısal çözümün zamana bağlı olması nedeniyle sonuçlar seçilmiş referans zaman dilimlerinde gösterilecektir. Böylelikle model üzerinde değişiklik yapılan diğer analizler ile karşılaştırma durum noktaları oluşturulacaktır.

Şekil 30'da merminin çekirdeğinin $t=0.0007$ anına gelişi ile sonlandırılmış analizin son 27 zaman adımının kalıntı-residual hata grafiği görülmektedir. Analizde bu aşamaya kadar 70000 zaman adımı yaklaşık 436000 iterasyonda çözülmüştür. Çözülen denklemlerin yakınsama değerleri, tavsiye edilen kriterler olan süreklilik ve momentum için 10^{-3} , enerji için ise 10^{-6} mertebelerini aşmıştır.

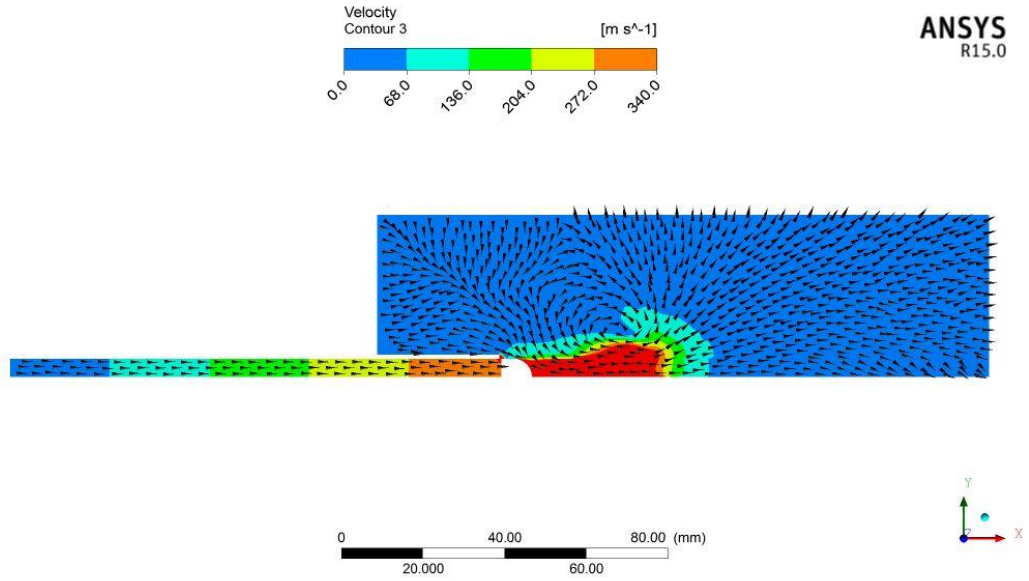


Şekil 30 : Son 27 zaman adımında iterasyonların yakınsama grafiği.

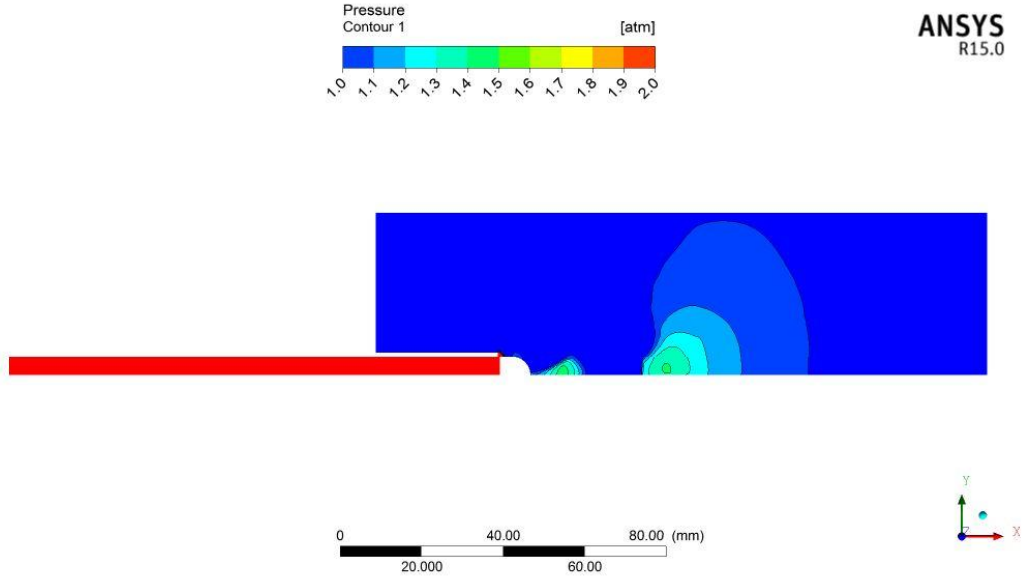
Şekil 31, hareket kazanan mermi çekirdeğinin ön kısmında bulunan akışkanın zamana bağlı hız değişimi görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, zaman adımının yaklaşık 8500 olduğu ($t = 4.25 \cdot 10^{-4}$ s) durumunda mermi namludan ayrılmakta ve akışkan kararsız hale gelmektedir. Şekil üzerinde, namlu içi kısım mavi renkle gösterilmişken, namludan çıktıktan sonra ki durum kırmızı rengiyle gösterilmiştir.



Şekil 31 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.



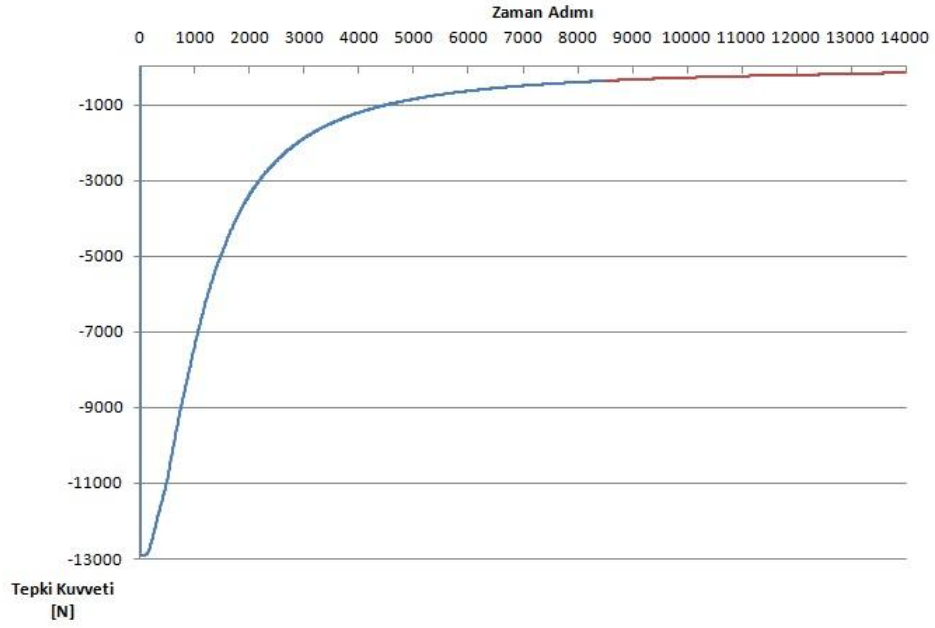
Şekil 32 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.



Şekil 33 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.

Şekil 32'de merminin namludan çıkışı esnasında oluşan hız dağılımı görülmektedir. Merminin önünde sürüklediği hava hızının, ses hızından yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 33'de ise benzer şekilde, namlu önünde oluşan basınç dağılımı görülmektedir.

Şekil 34'te namlu modeline -x yönünde etki eden eksensel kuvvetin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Merminin çıkmış olmasına rağmen geri tepme kuvvetinin halen devam ettiği görülmektedir.

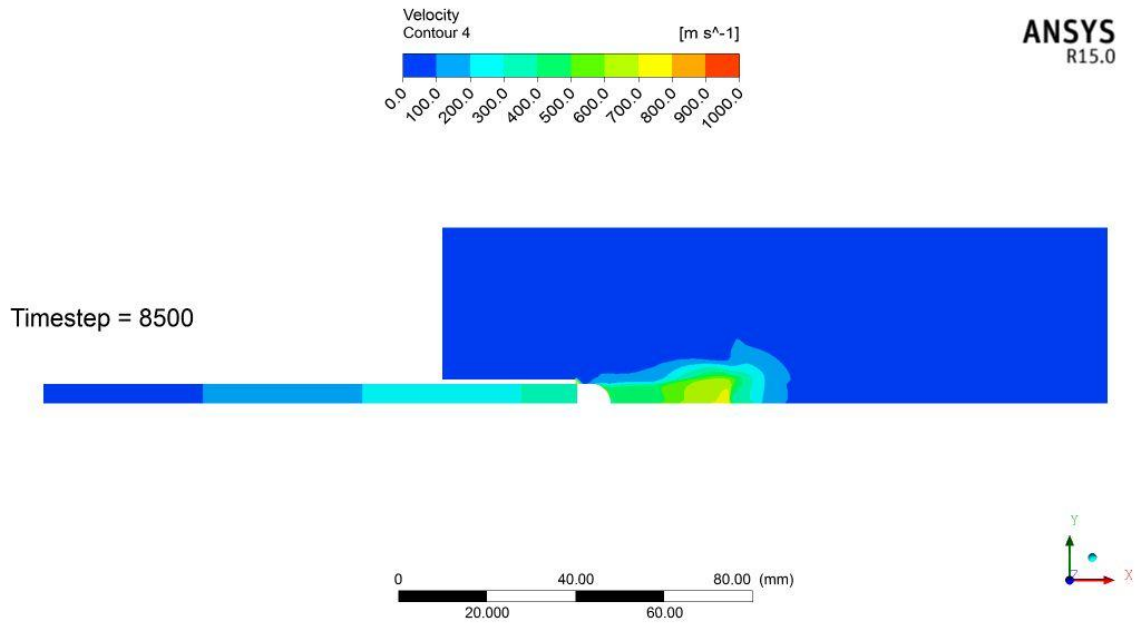


Şekil 34 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.

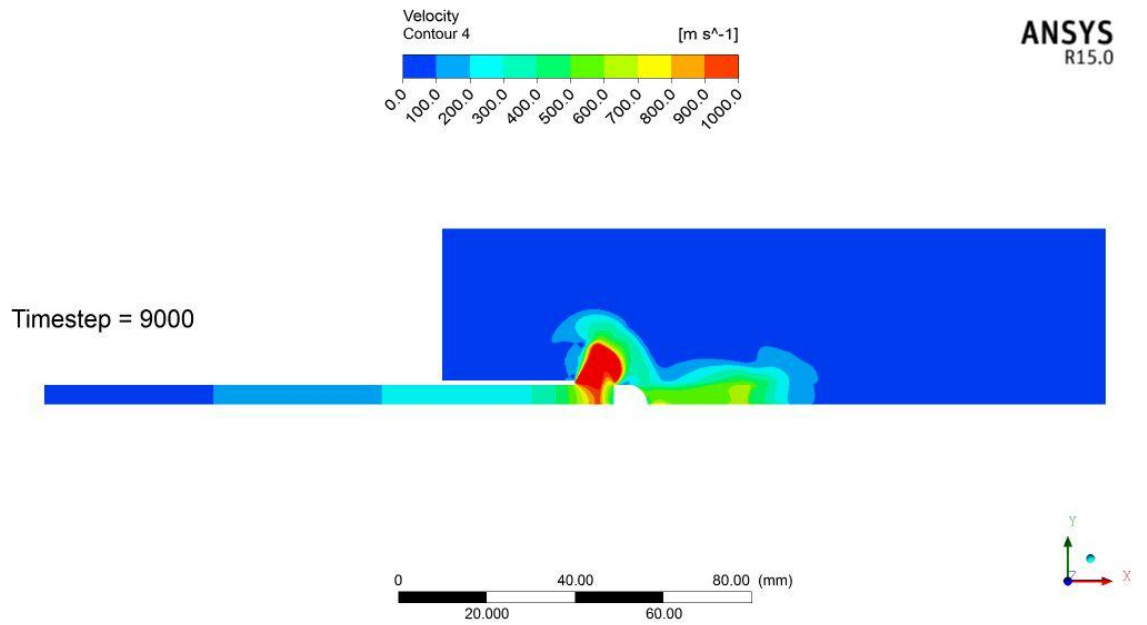
Zamana bağlı analizde elde edilen verilen çokluğundan dolayı sayısal sonuçlar örneklemeler ile alınmıştır. Bu örneklemeler, çalışmanın namlu çıkışındaki akışkanın hareketini incelediğinden dolayı bu bölgelerde alınmıştır. Tablo 5'de örneklemeler ve o zaman diliminde sahip oldukları fiziksel değerler gösterilmiştir. Şekil 35 ve Şekil 40 arası, örneklemelerin hız dağılımları 0-1000 m/s ölçeğinde gösterilmiştir.

Tablo 5 : Örnek zaman adımlarında mermi çekirdeğinin fiziksel bilgileri.

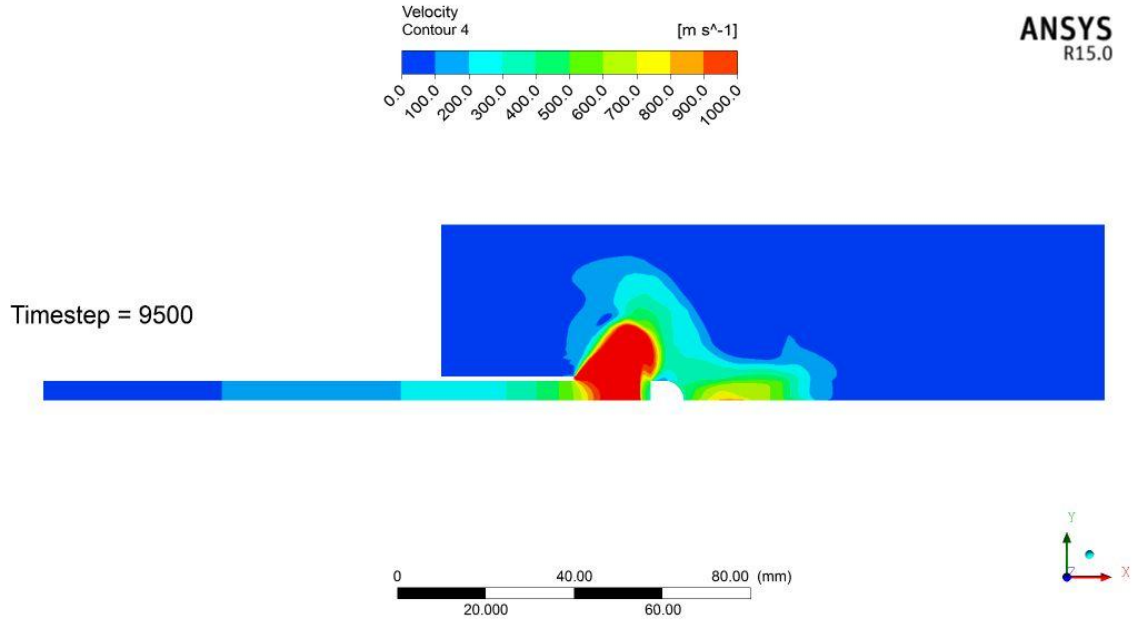
Zaman Adımı	Zaman [s]	Akışkan Hızı [m/s]	Çekirdek Pozisyonu [mm]
8500	0.000425	441	120
9000	0.00045	447	128.84
9500	0.000475	372	137.28
10000	0.0005	340	145.71
10500	0.000525	351	154.15
11000	0.00055	370.4	162.6



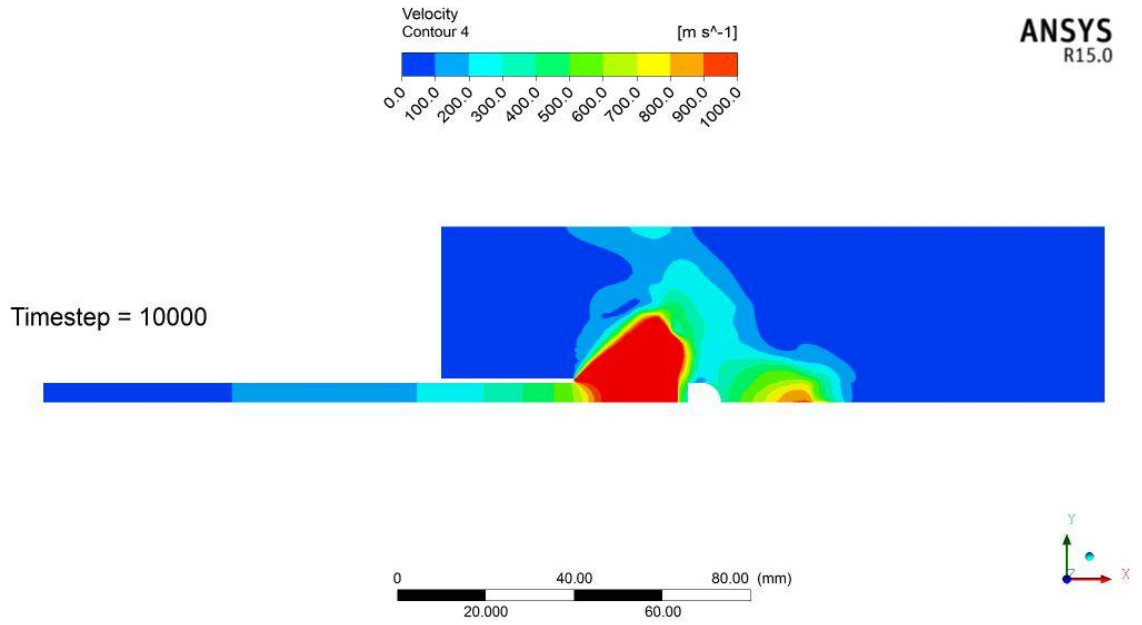
Şekil 35 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.



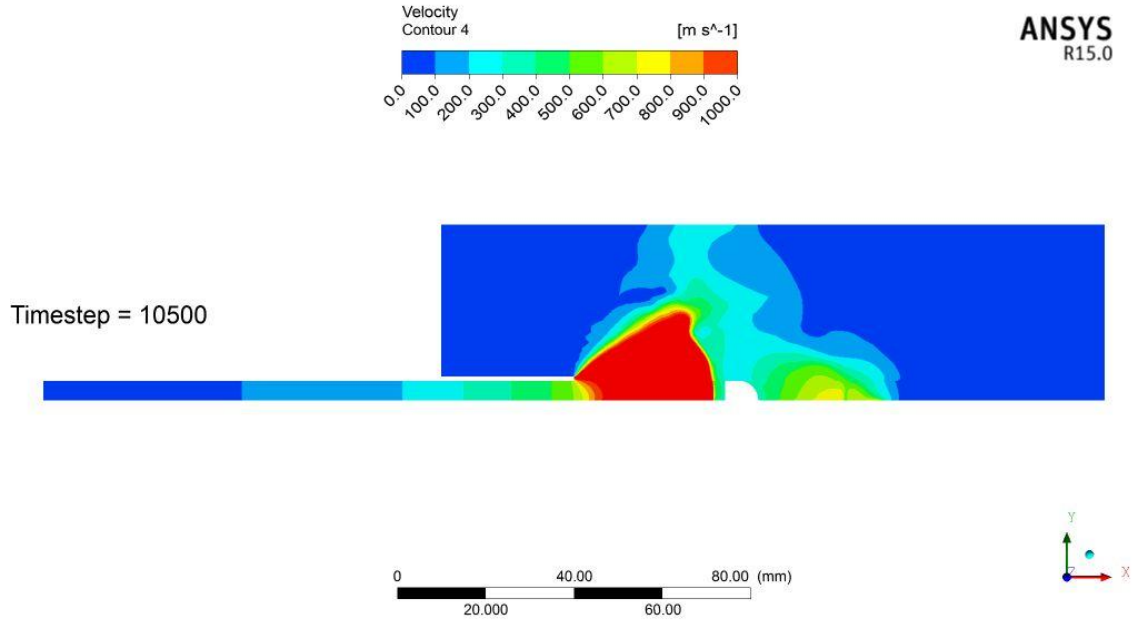
Şekil 36 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.



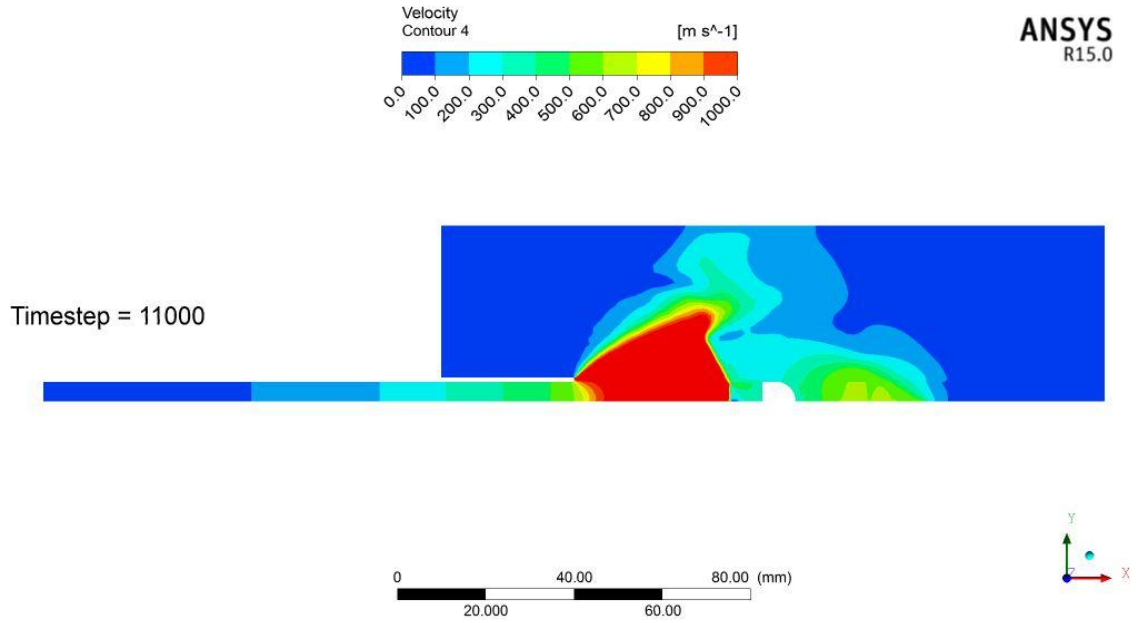
Şekil 37 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.



Şekil 38 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.



Şekil 39 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.



Şekil 40 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.

3.3.3 Geri Tepme Kuvvetini Azaltmaya Yönelik Hazırlanan Modeller

Şekil 34'te namlusunda alev gizleyen (MB) yapısı olmayan bir silahın ateşleme sonrasındaki geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Ateşli silahlarda oluşan geri tepme kuvveti, mermi çekirdeğine iletilen momentum ile doğru orantılıdır. Ancak Şekil 34'te görüldüğü üzere namludan merminin ayrılmasına rağmen kuvvet tesirini sürdürmektedir. Bunun nedeni, hız konturlarından da görülebileceği gibi, namlunun basınçlı gazı tahliye ederken nozül etkisi göstermesidir.

MB yapılarının temel amacı, bu nozül etkisini azaltmaktır. Bu görevi, namluya paralel eksensel kuvveti, radyal doğrultuya çevirerek yapmaktadır. Mermi çekirdeği namluyu terk ettiğinde Şekil 9'da gösterilen eksen takımına göre, -x yönünde geri tepme kuvveti oluşturacaktır. Bu kuvvet bir yapı ile, silindirik koordinatlarda radyal doğrultuya dönüştürüldüğünde geri tepme kuvvetinin azalması beklenilmektedir.

Bu amaç ile 5 adet alternatif MB yapısı oluşturulmuş ve CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kontrol grubu olan mevcut durum modeli ile kıyaslanarak modellerin geri tepme kuvvetini düşürmeye yönelik performansları incelenmiştir.



Şekil 41 : b1 modeli; 1 adet $U = 1 \text{ mm}$, $\Omega = 18 \text{ mm}$, $\beta = 90^\circ$ MB



Şekil 42 : b2 modeli; 1 adet $U = 2 \text{ mm}$, $\Omega = 18 \text{ mm}$, $\beta = 90^\circ$ MB



Şekil 43 : b3 modeli; 1 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 120^\circ$ MB



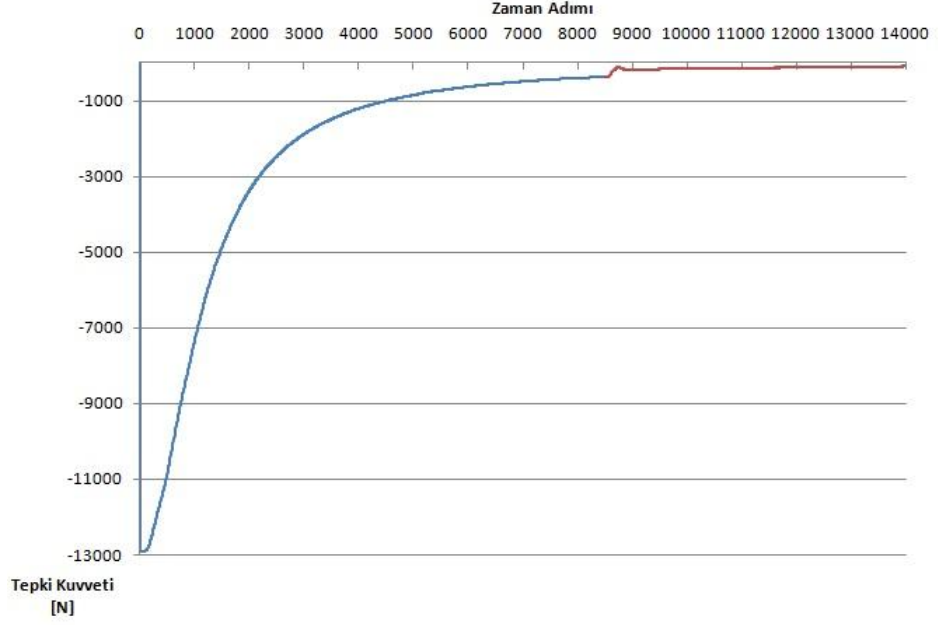
Şekil 44 : c modeli; 2 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 90^\circ$ MB



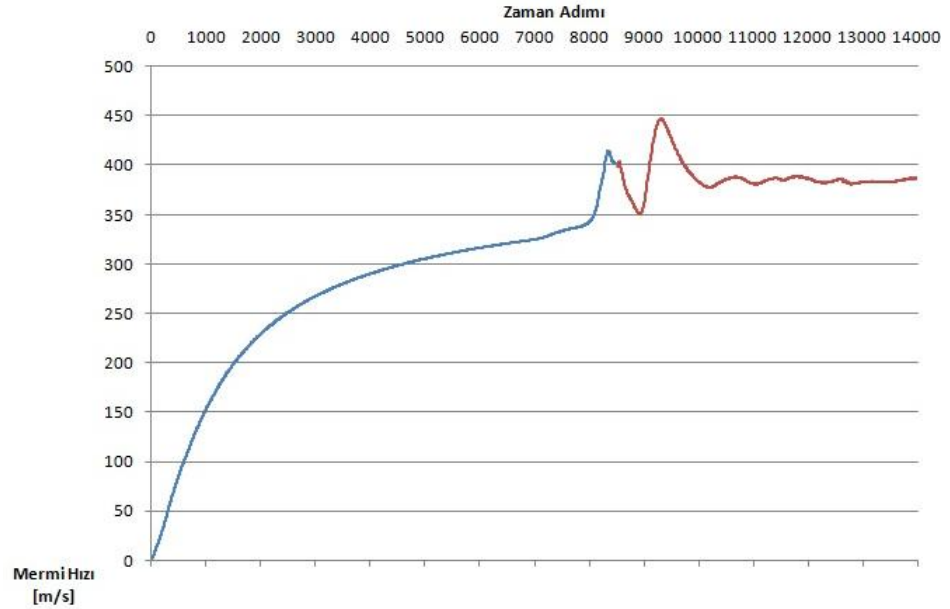
Şekil 45 : d modeli; 3 adet $\bar{U} = 1$ mm, $\Omega = 18$ mm, $\beta = 90^\circ$ MB

Hazırlanan 5 model Şekil 41 ve Şekil 45 arasında gösterilmiştir. Model aksisimetrik olduğundan dolayı, ana b1 geometrisinin ortası mermi çekirdeği çapında delinmiş tek dairesel plaka olduğu görülmektedir. Şekil 42'de görülen b2 modelinde, plaka kalınlığı artırılarak radyal akışa daha fazla zaman tanınması düşünülmüştür. Şekil 43'de görülen b3 modelinde ise, radyal akışa yön verilmesi düşünülmüştür. Şekil 44 ve Şekil 45'de görülen modellerde plaka sayısının artmasının, geri tepme kuvveti üzerine etkileri incelenmiştir.

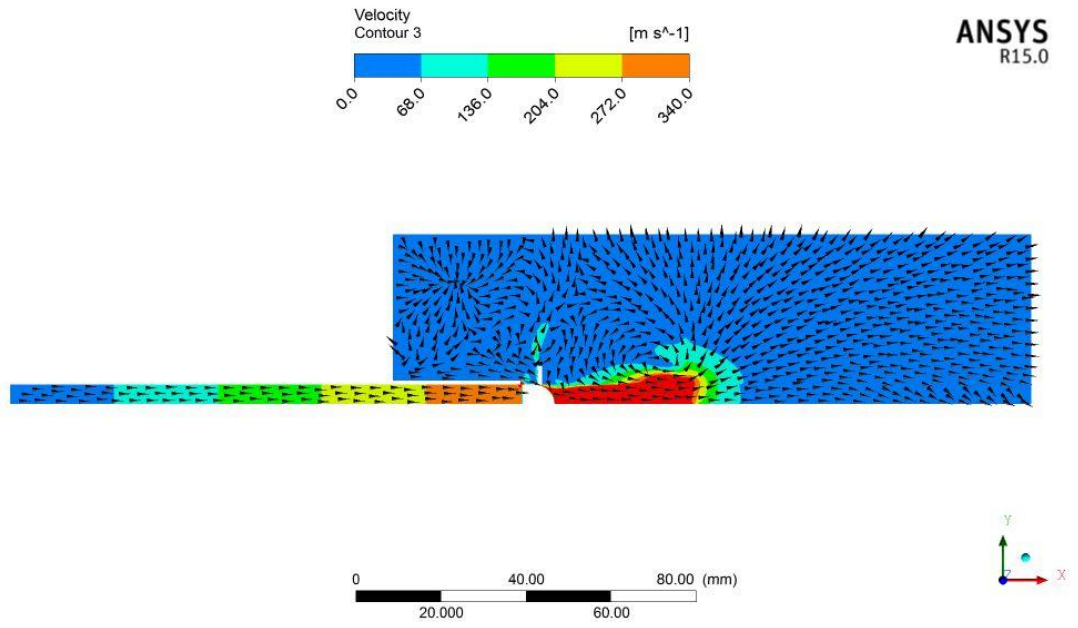
3.3.3.1. b1 Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları



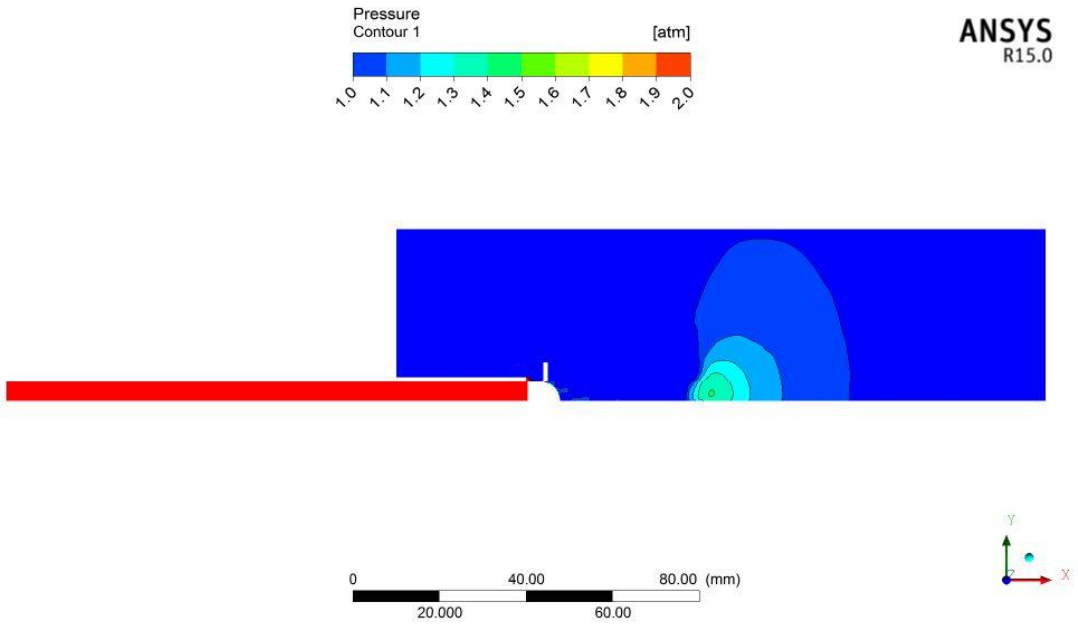
Şekil 46 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.



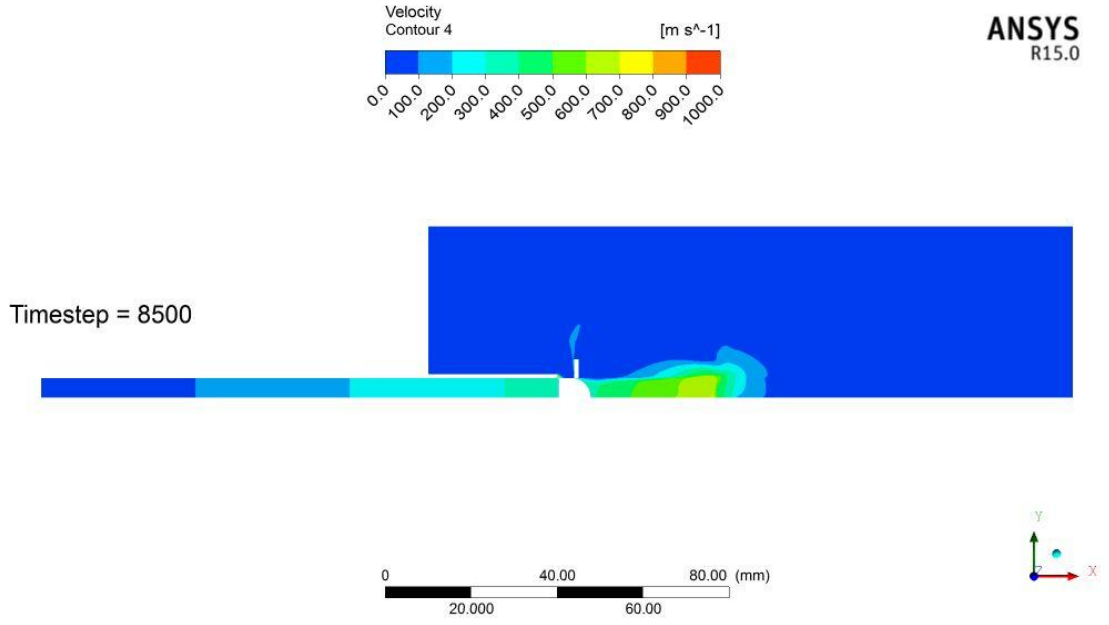
Şekil 47 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği..



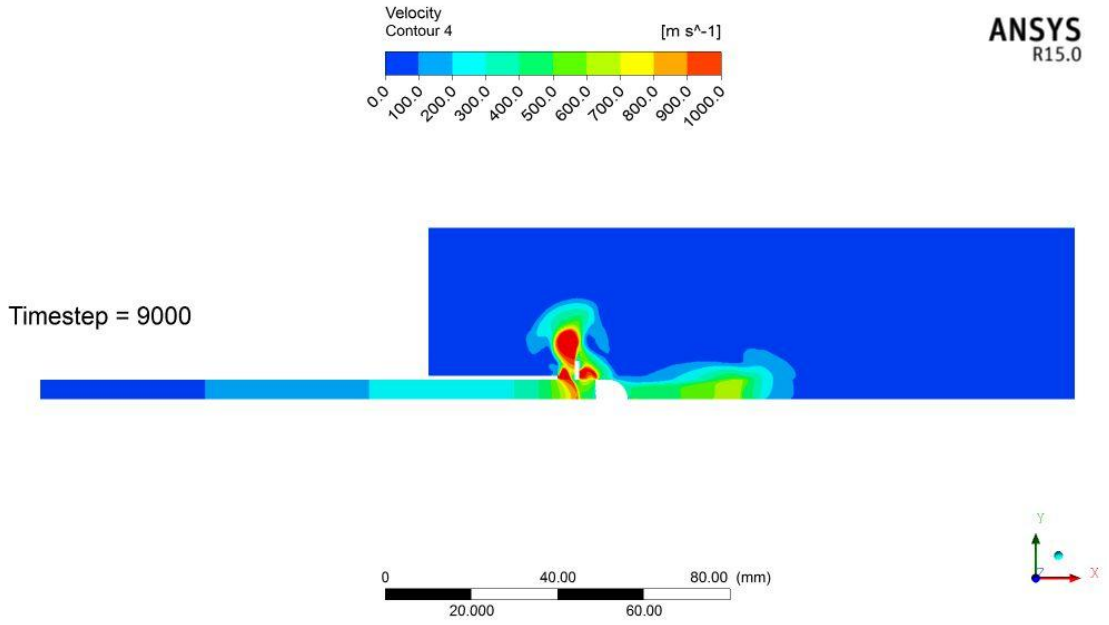
Şekil 48 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.



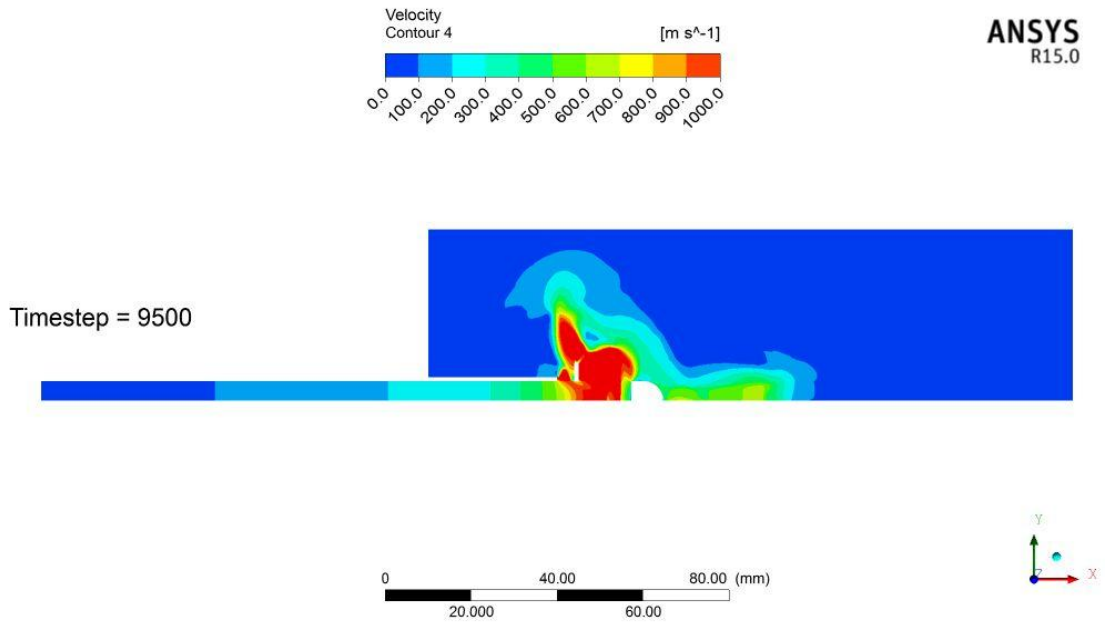
Şekil 49 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.



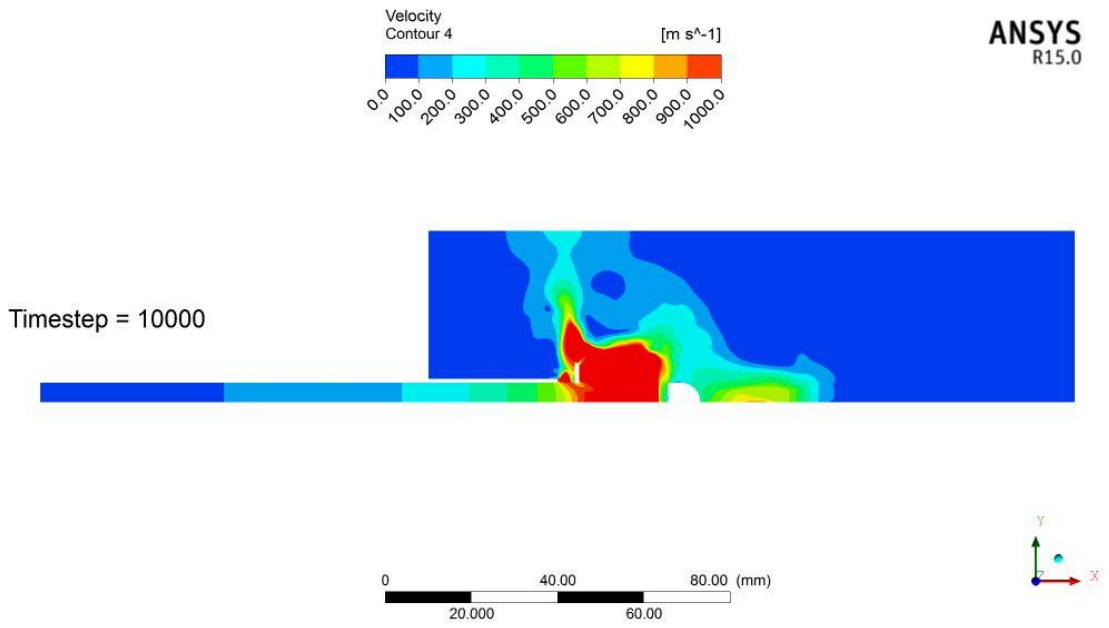
Şekil 50 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.



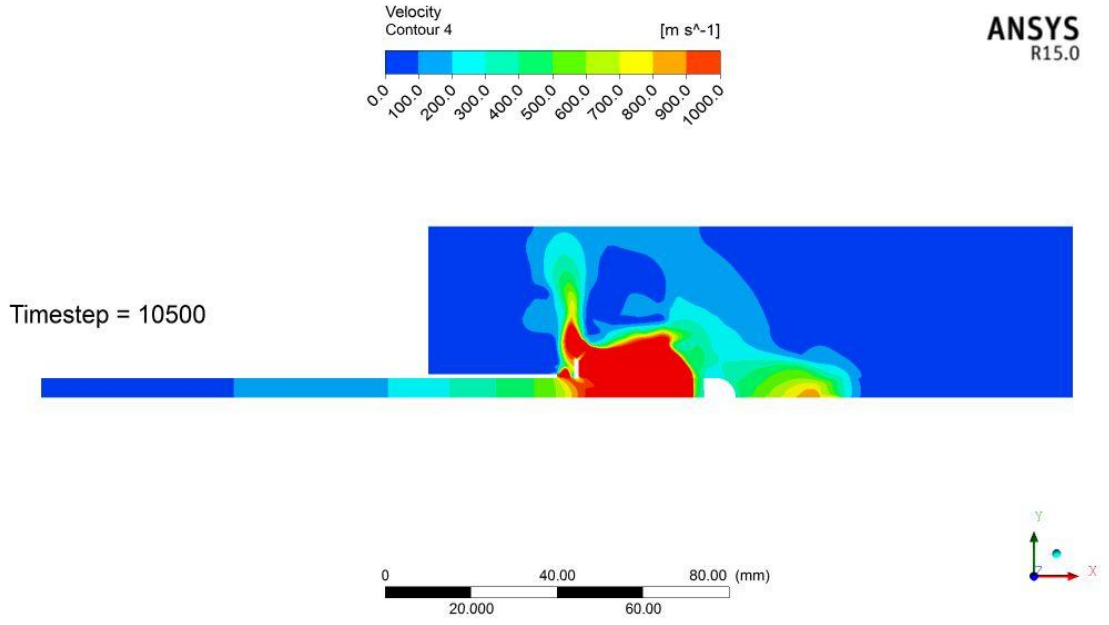
Şekil 51 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.



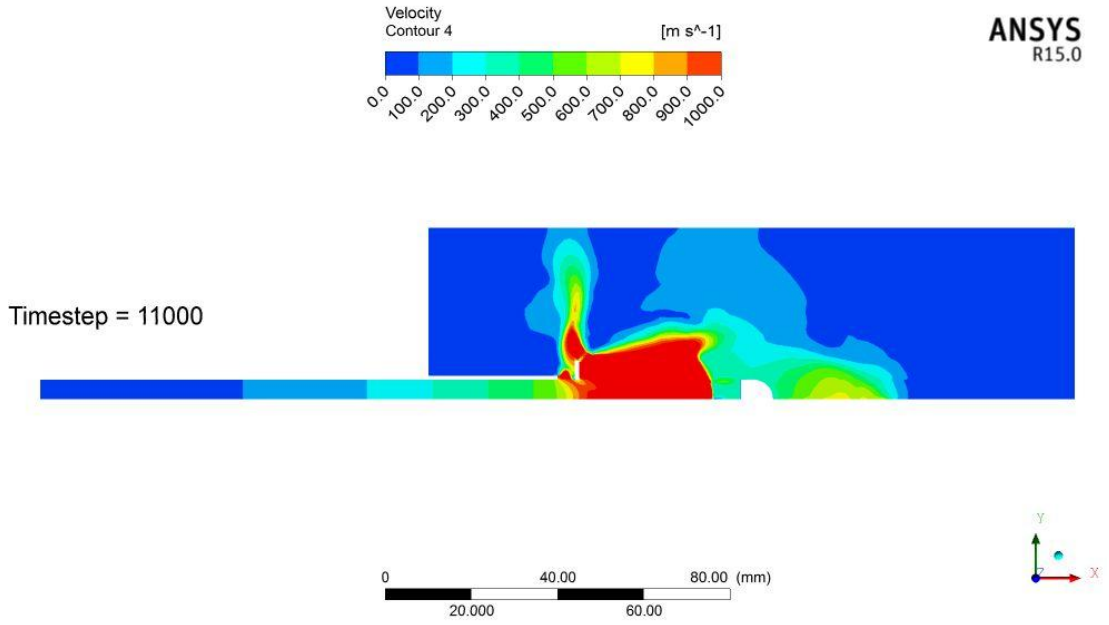
Şekil 52 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.



Şekil 53 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.

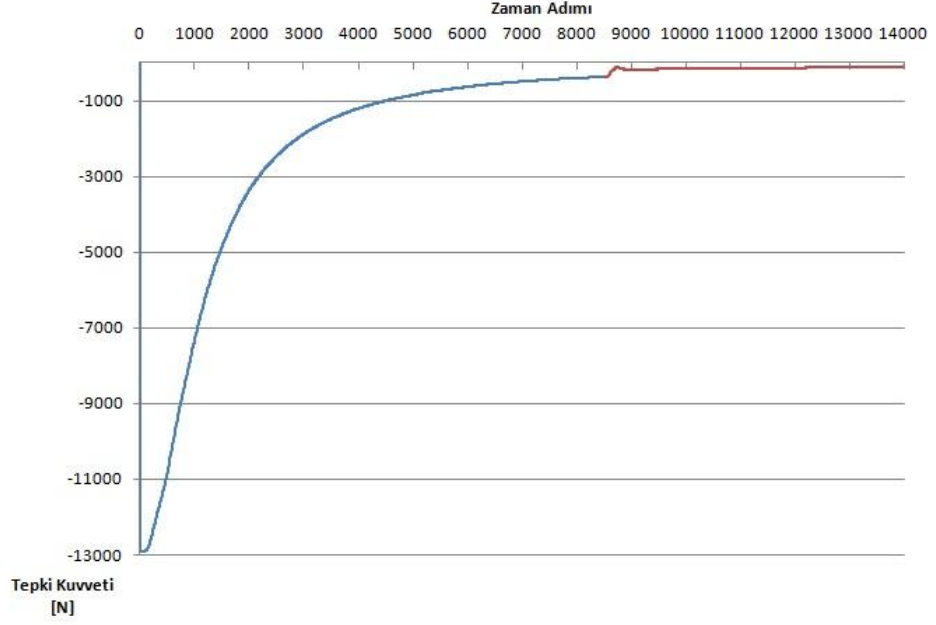


Şekil 54 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.

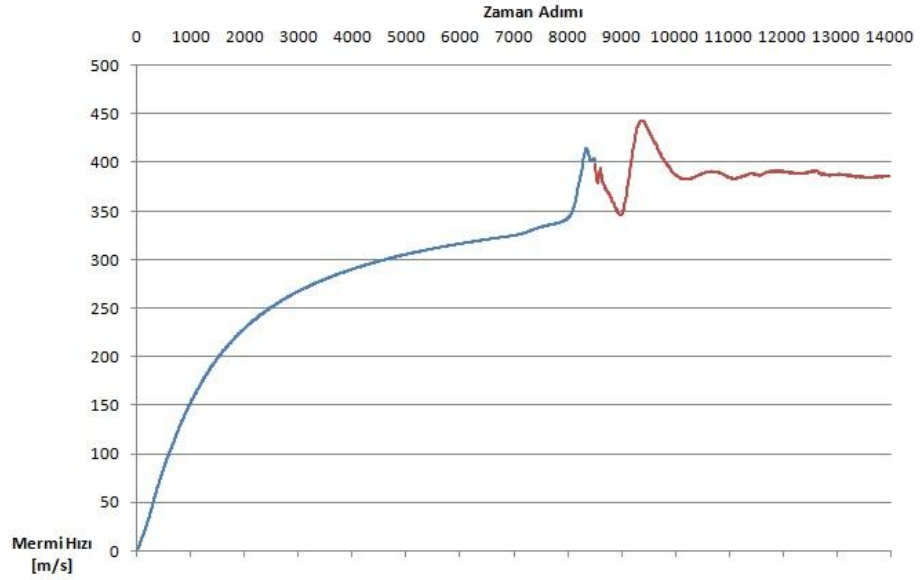


Şekil 55 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.

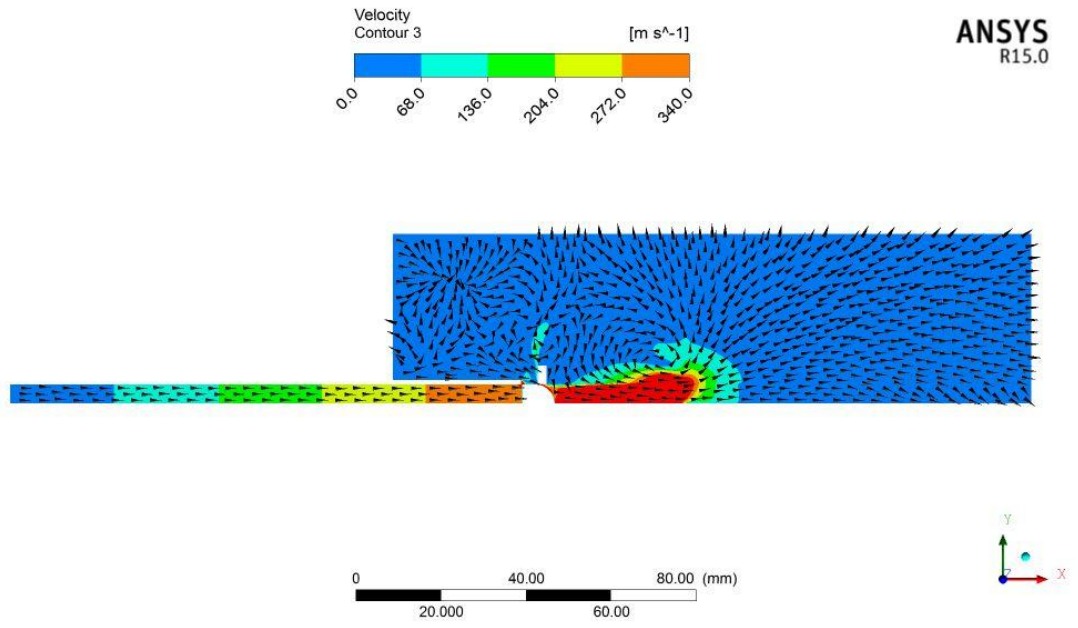
3.3.3.2. b2 Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları



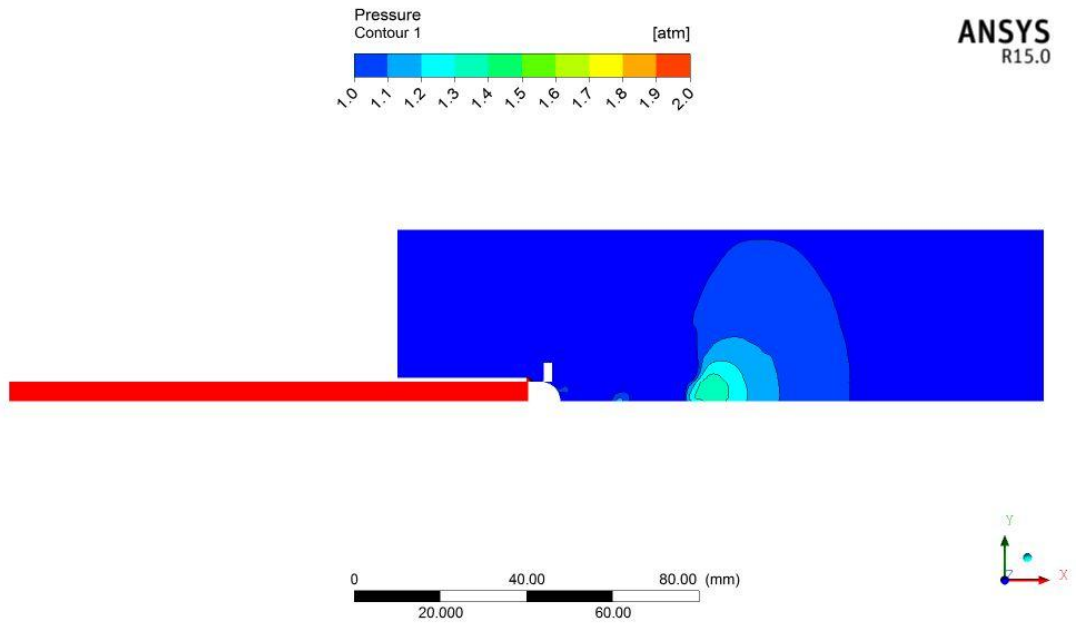
Şekil 56 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.



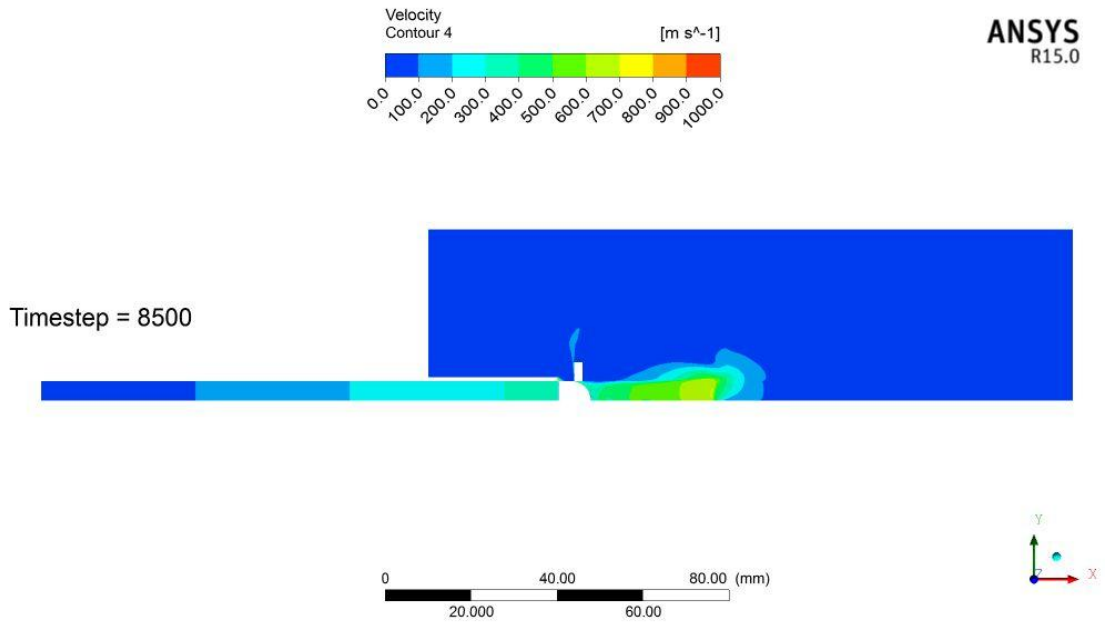
Şekil 57 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.



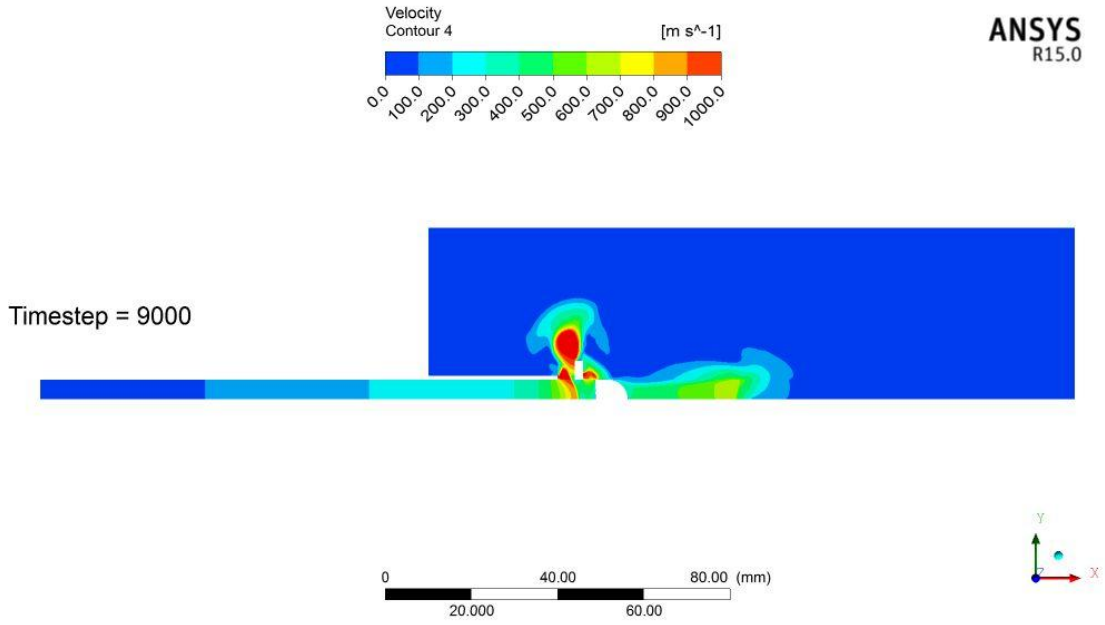
Şekil 58 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.



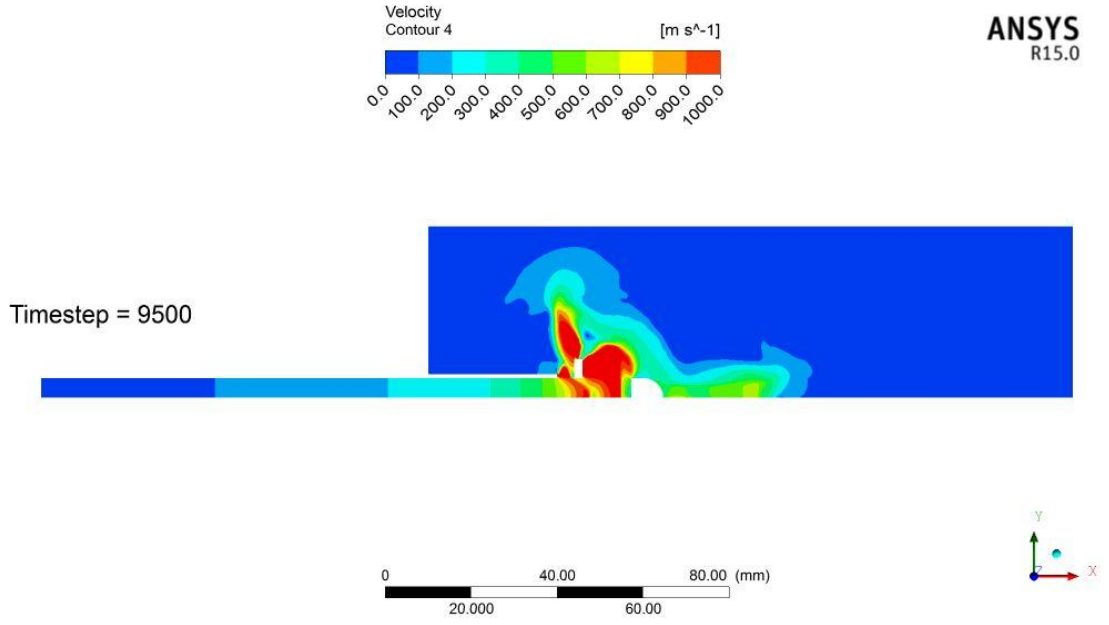
Şekil 59 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.



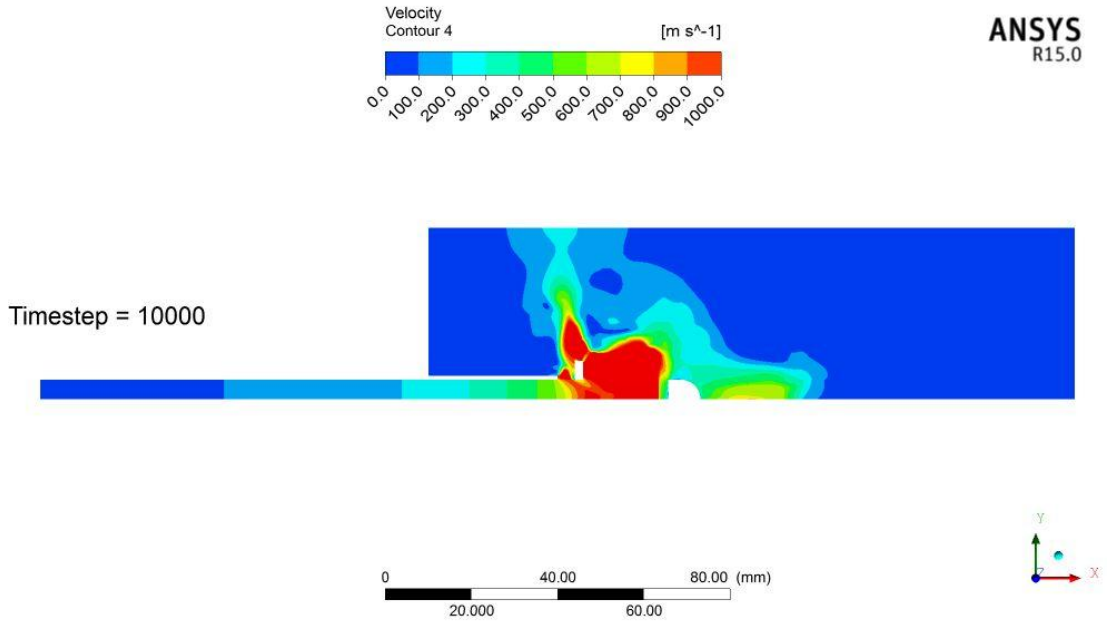
Şekil 60 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.



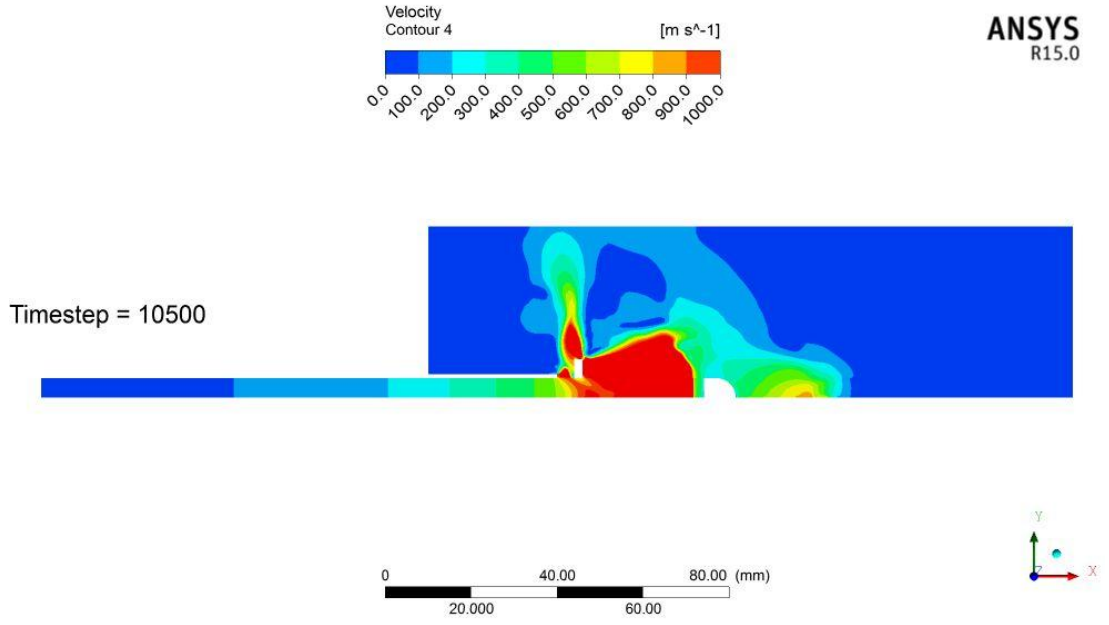
Şekil 61 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.



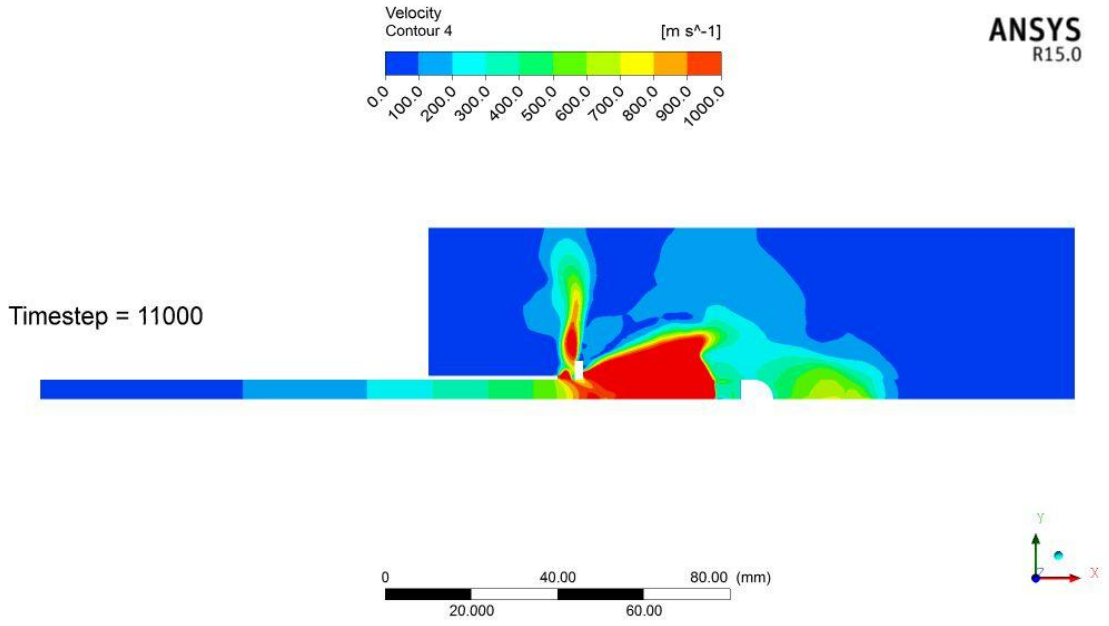
Şekil 62 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.



Şekil 63 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.

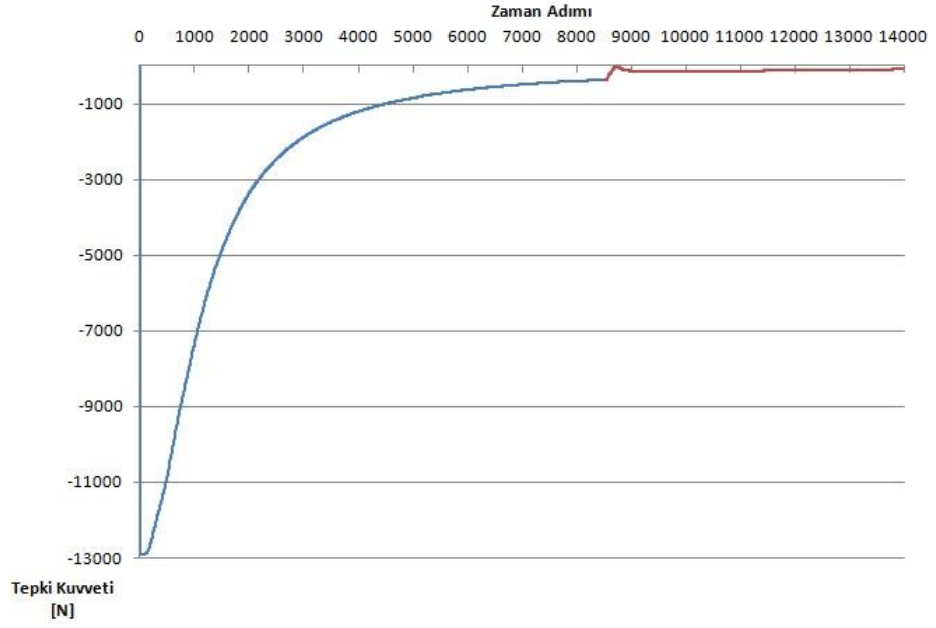


Şekil 64 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.

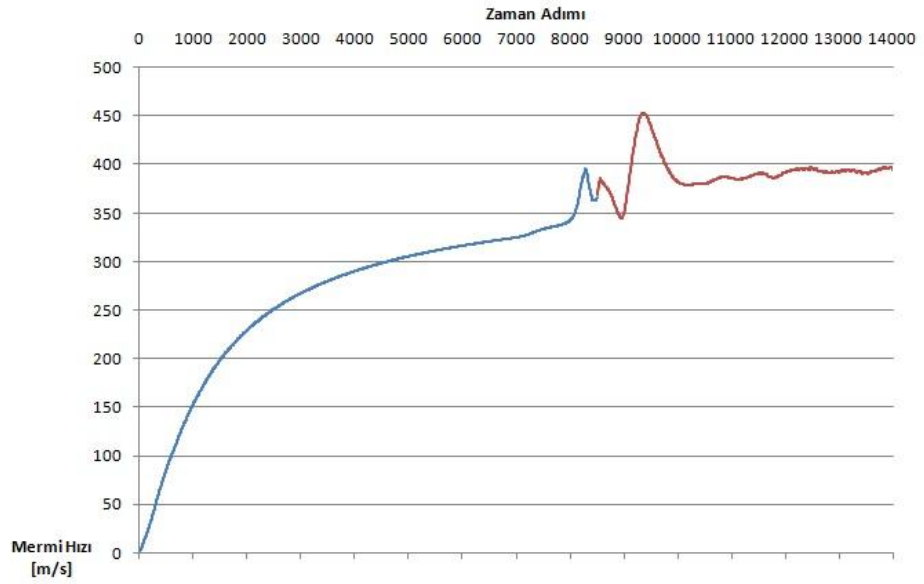


Şekil 65 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.

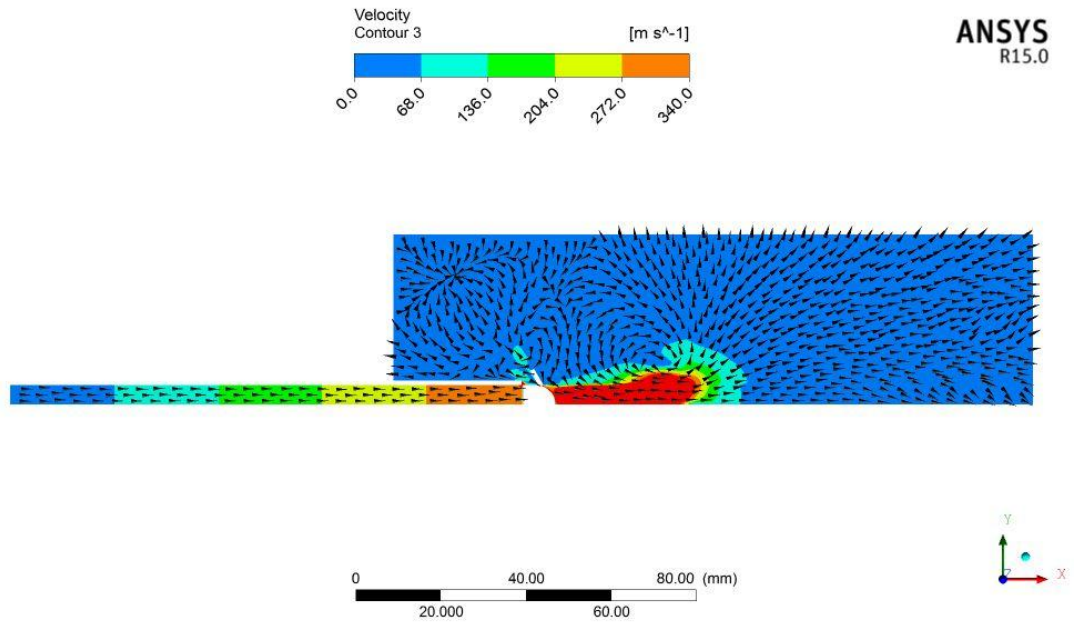
3.3.3.3. b3 Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları



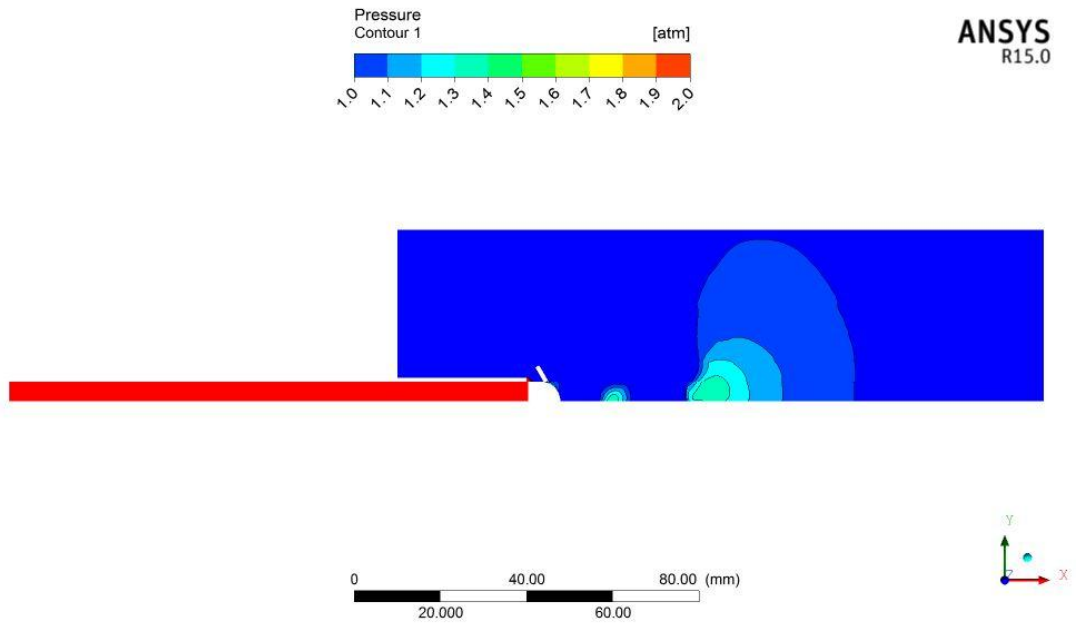
Şekil 66 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.



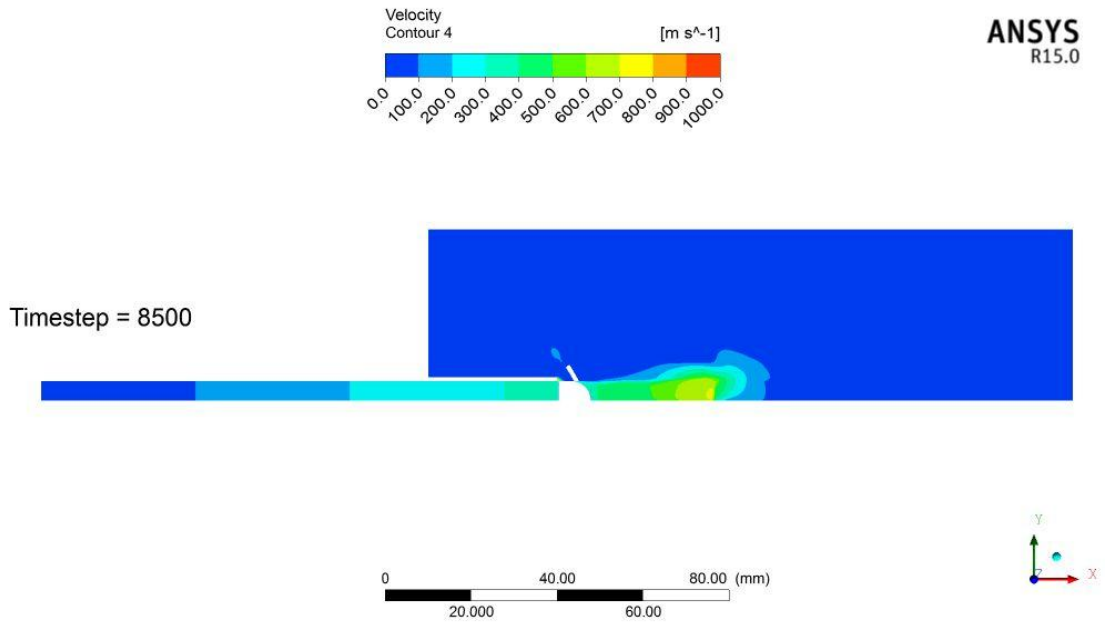
Şekil 67 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.



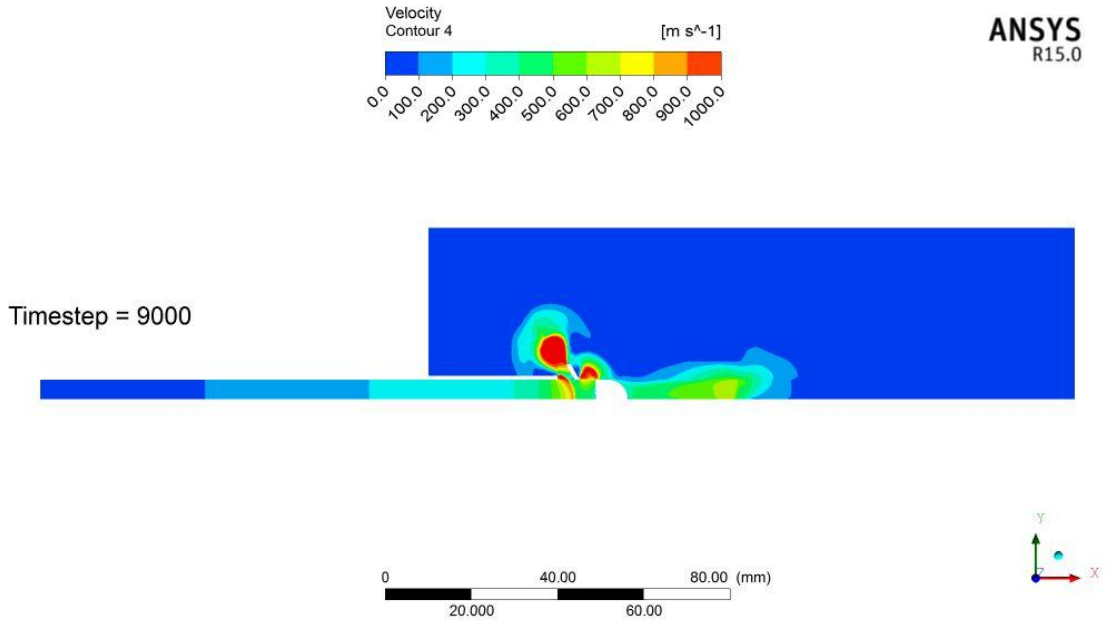
Şekil 68 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.



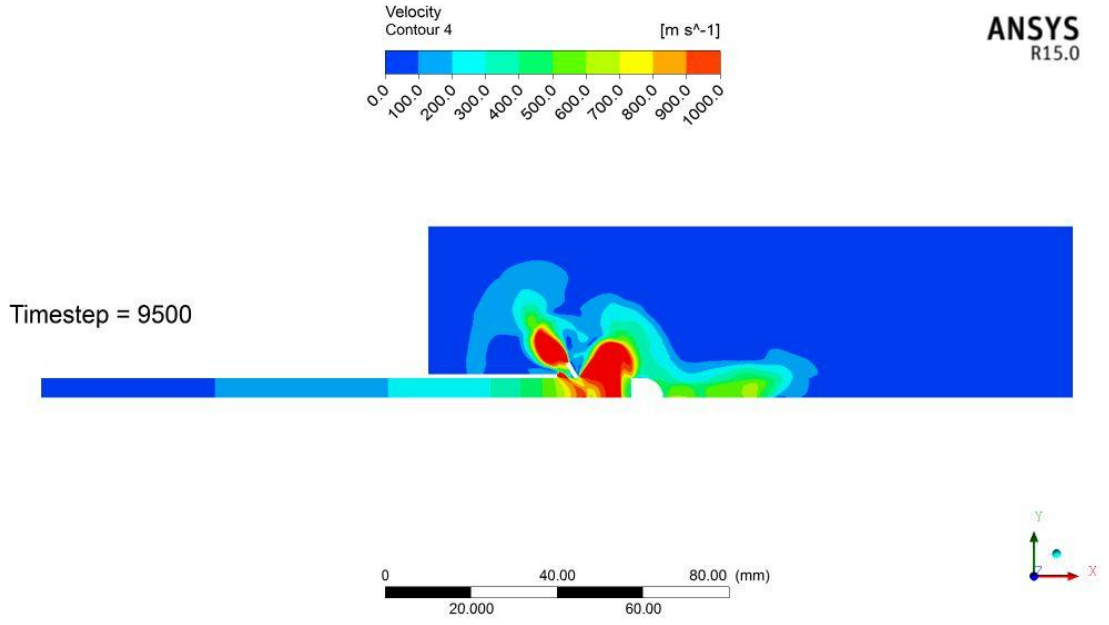
Şekil 69 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.



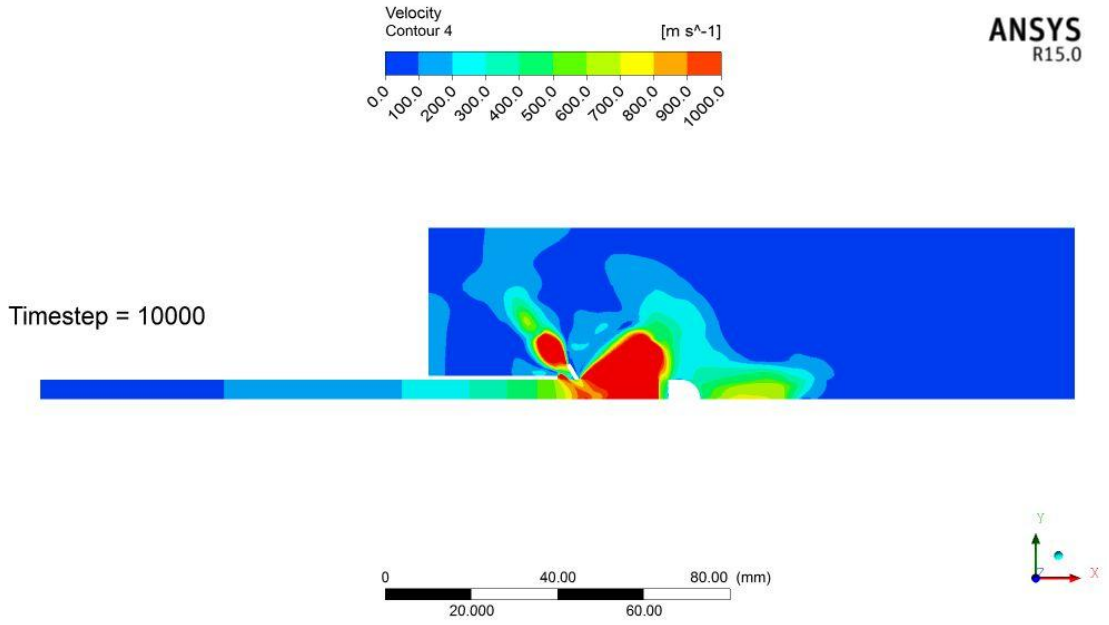
Şekil 70 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.



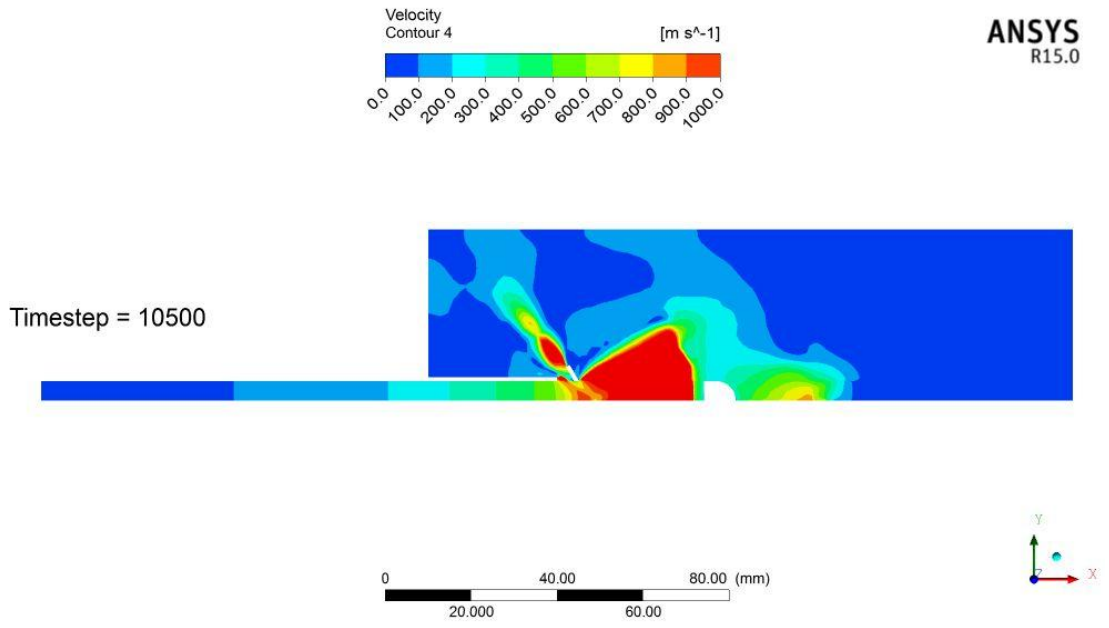
Şekil 71 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.



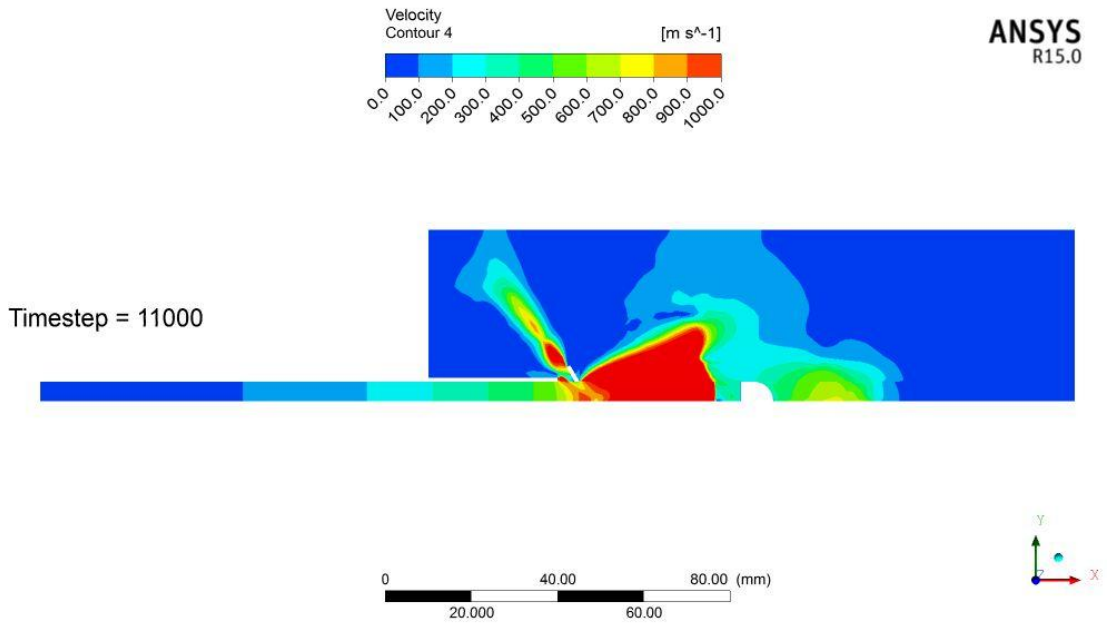
Şekil 72 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.



Şekil 73 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.

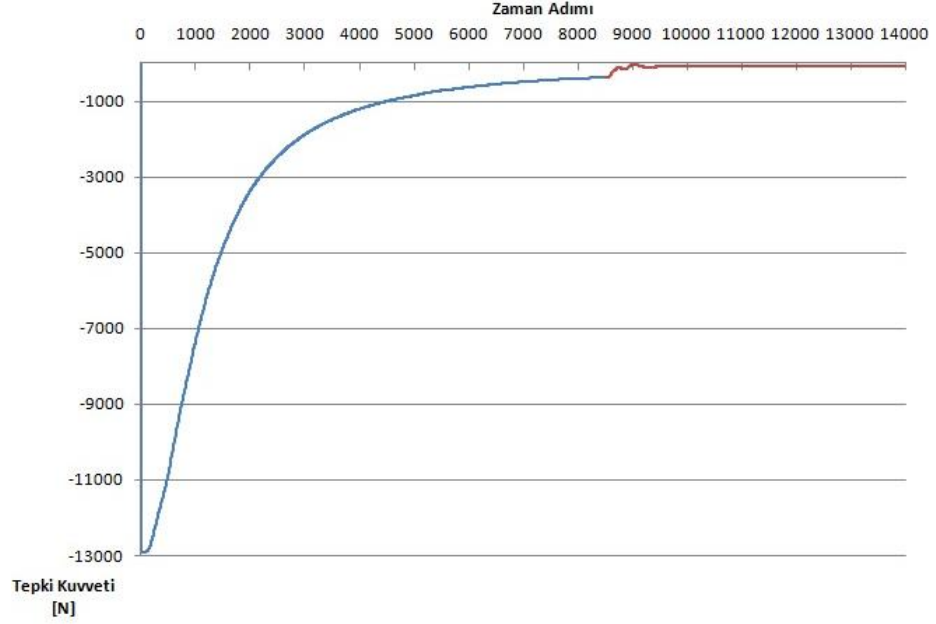


Şekil 74 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.

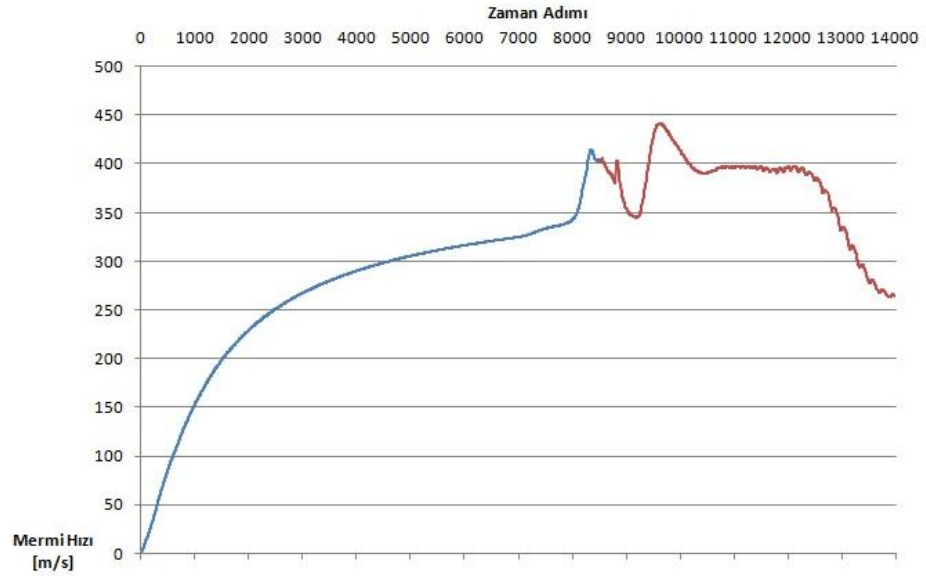


Şekil 75 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.

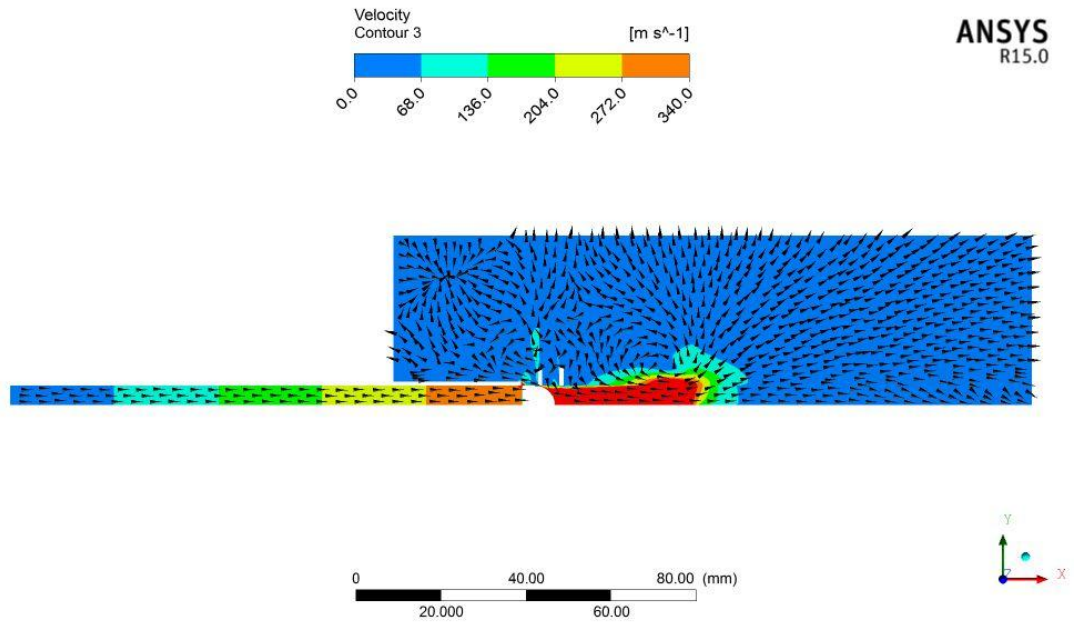
3.3.3.4. c Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları



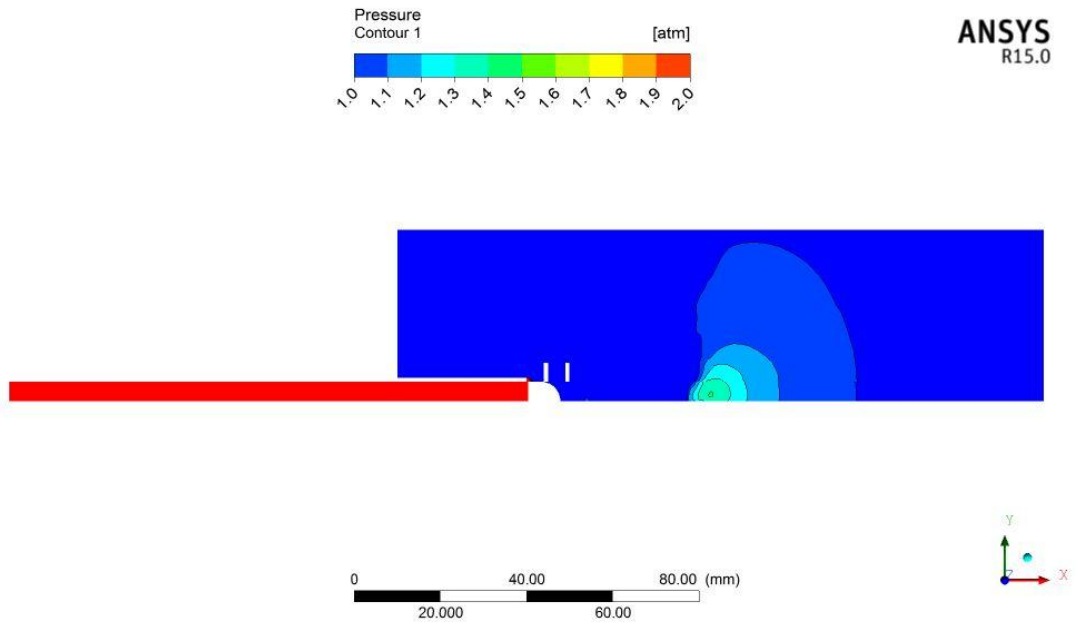
Şekil 76 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.



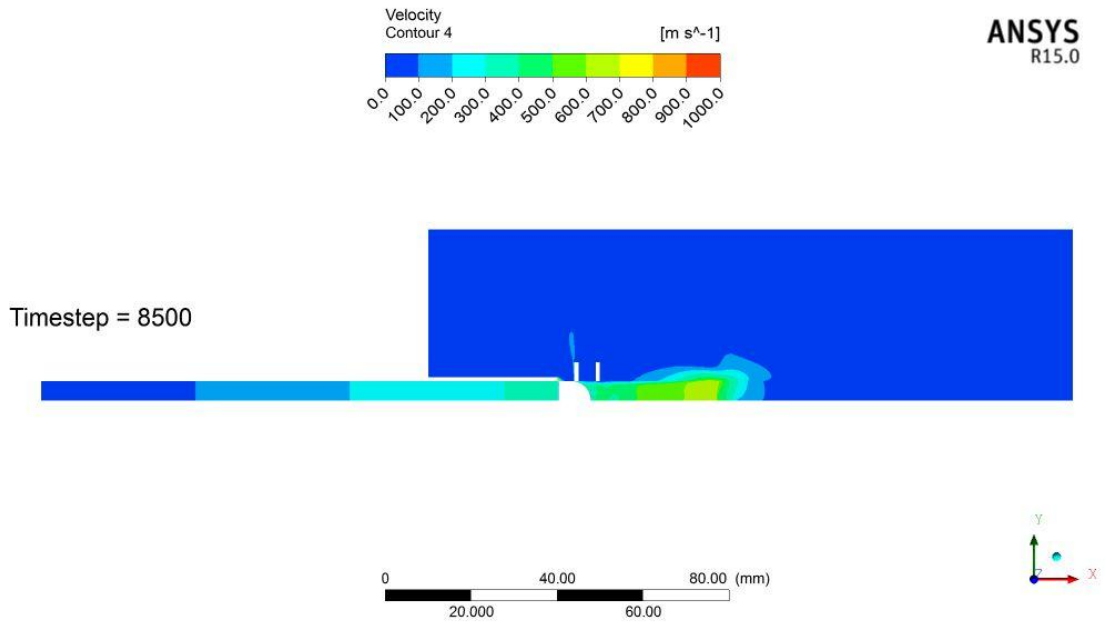
Şekil 77 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.



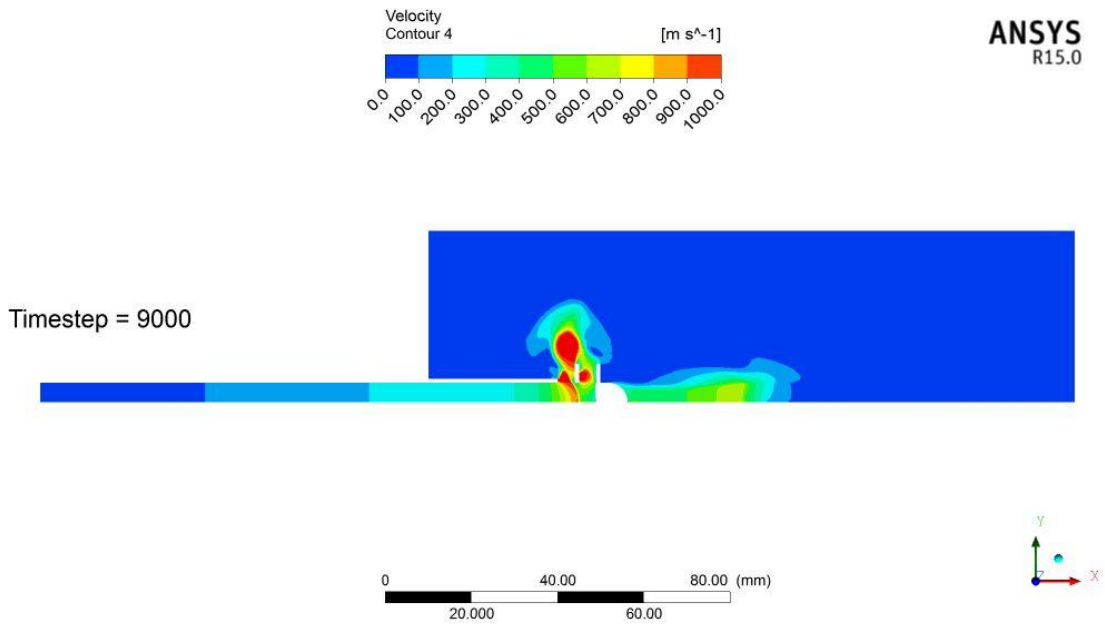
Şekil 78 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.



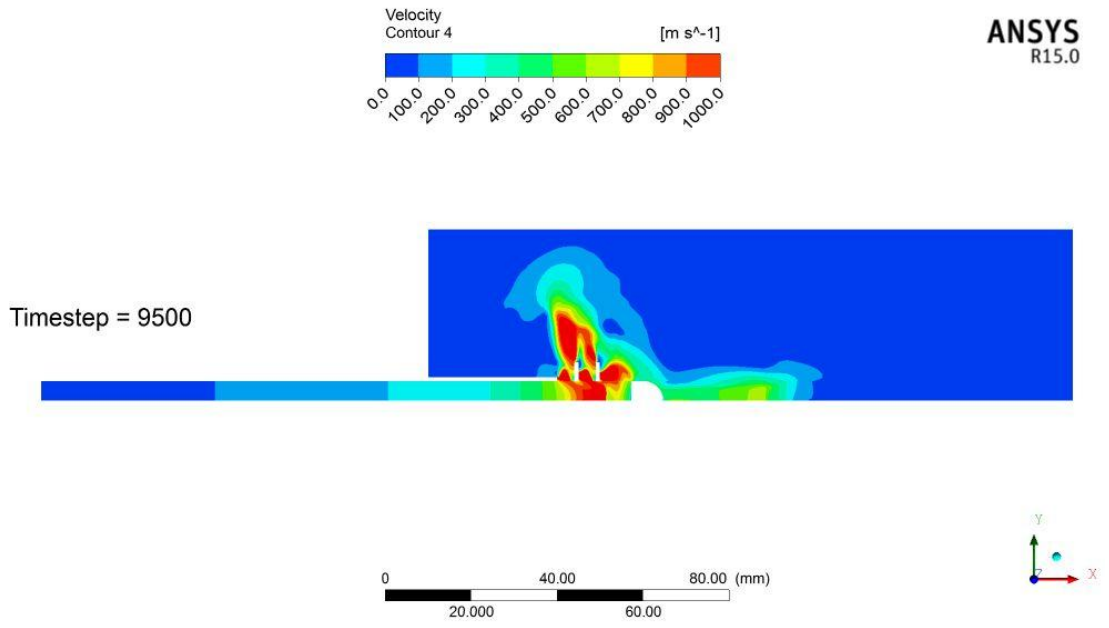
Şekil 79 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.



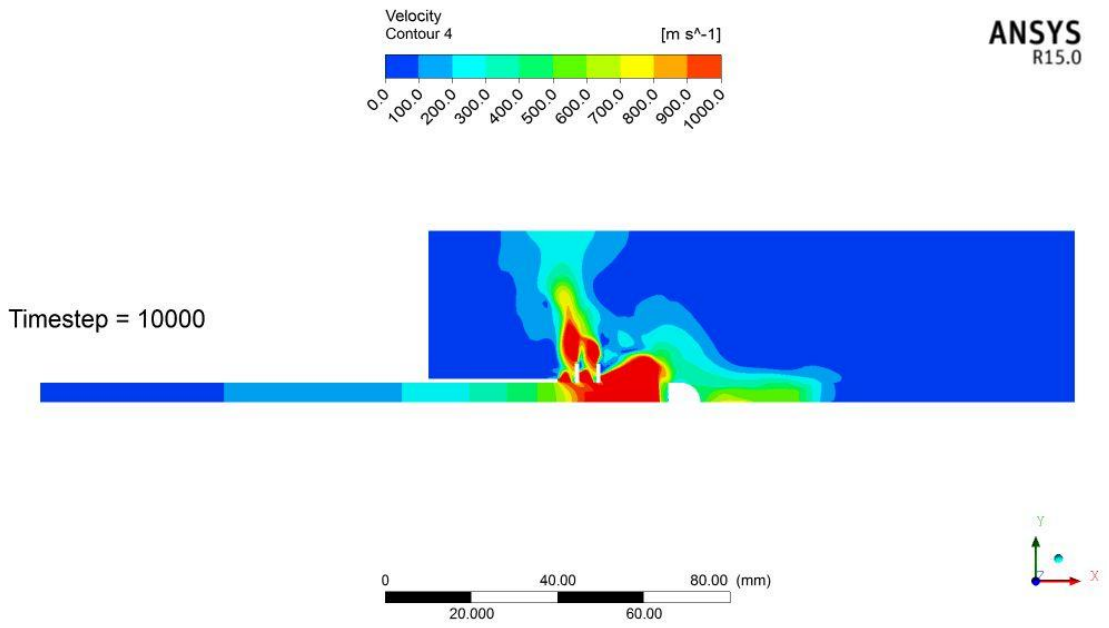
Şekil 80 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.



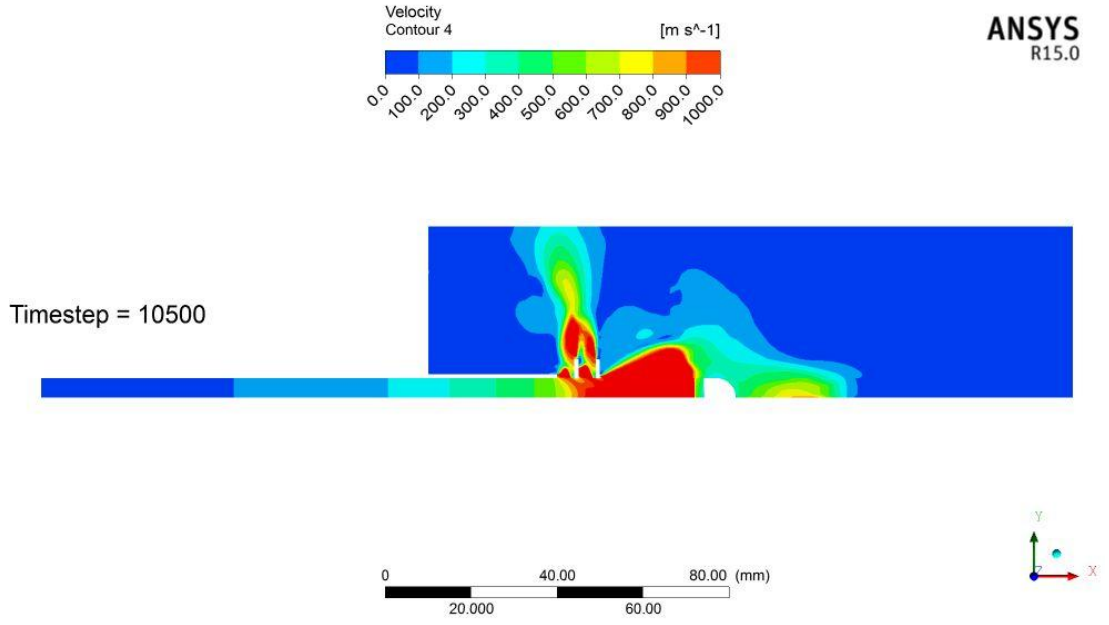
Şekil 81 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.



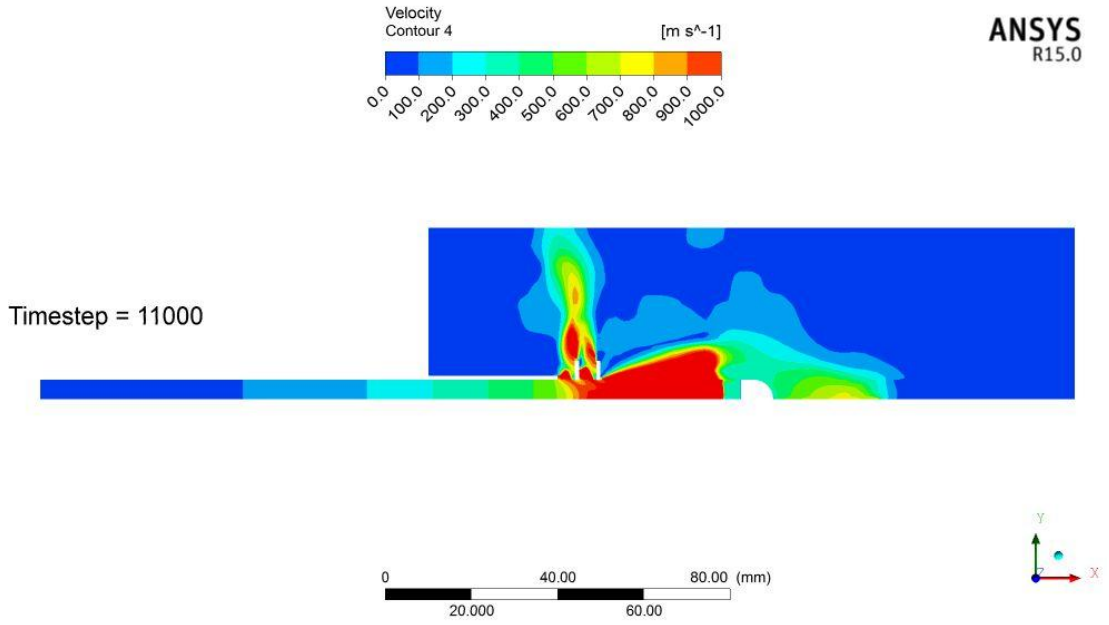
Şekil 82 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.



Şekil 83 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.

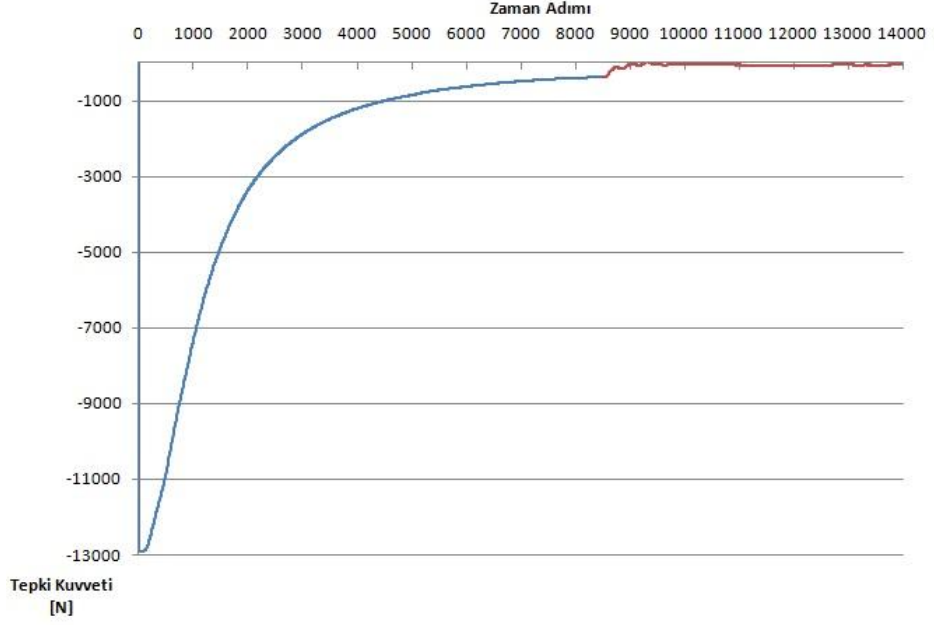


Şekil 84 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.

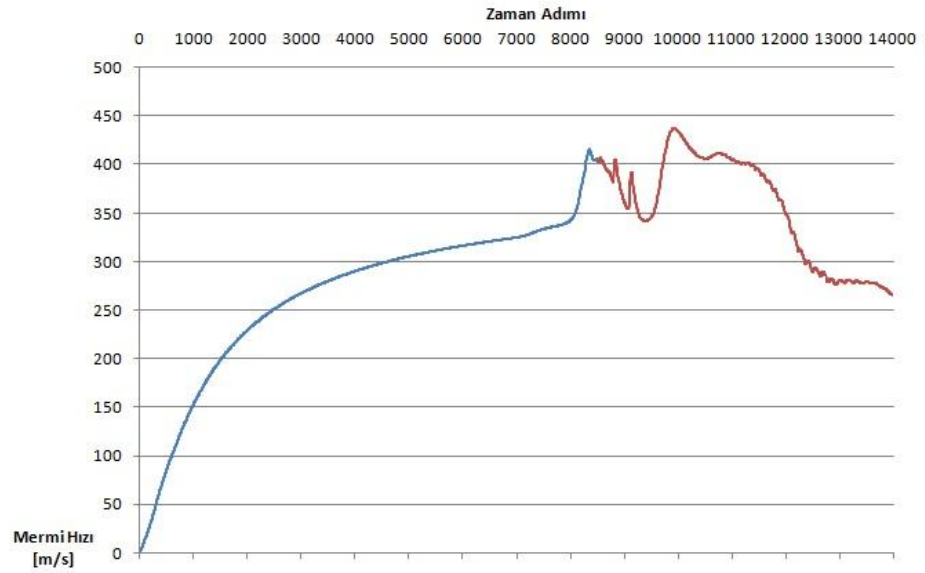


Şekil 85 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.

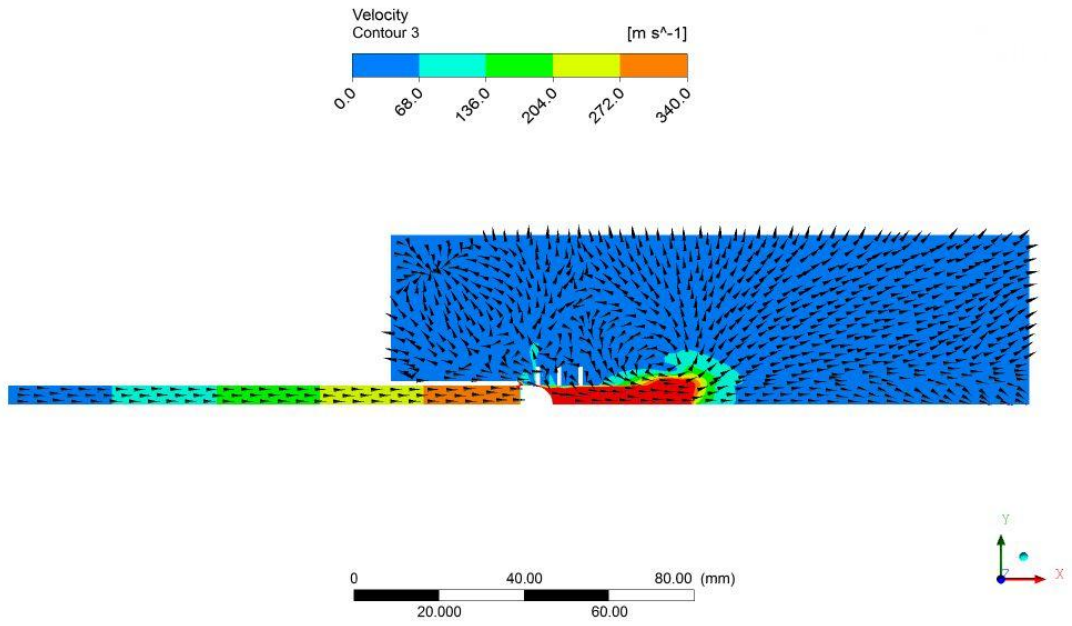
3.3.3.5. d Modelinin Sayısal Çözüm Sonuçları



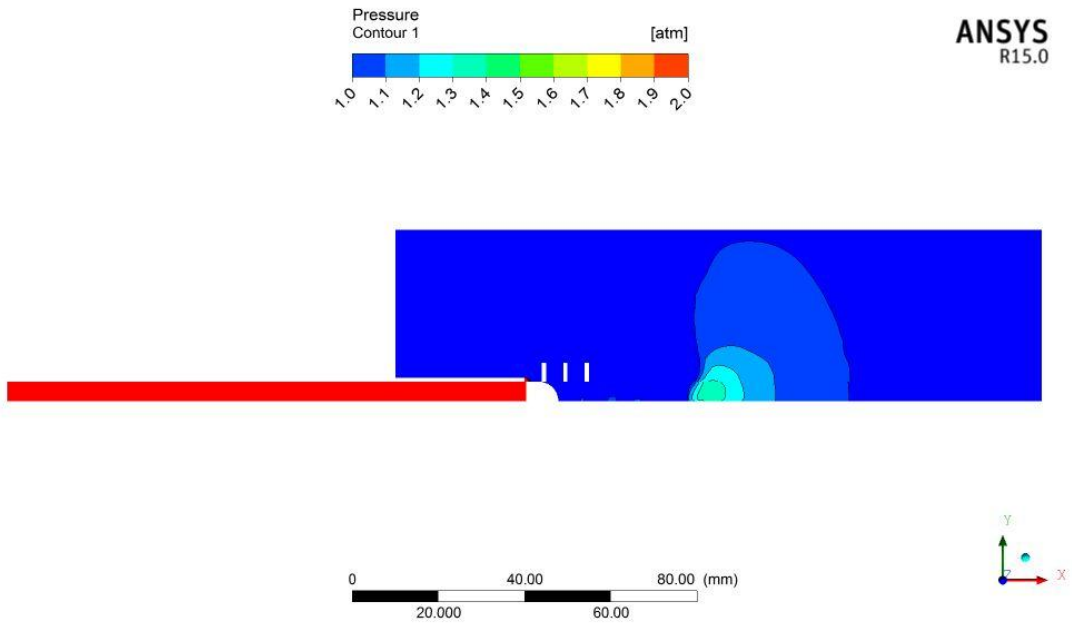
Şekil 86 : Geri tepme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği.



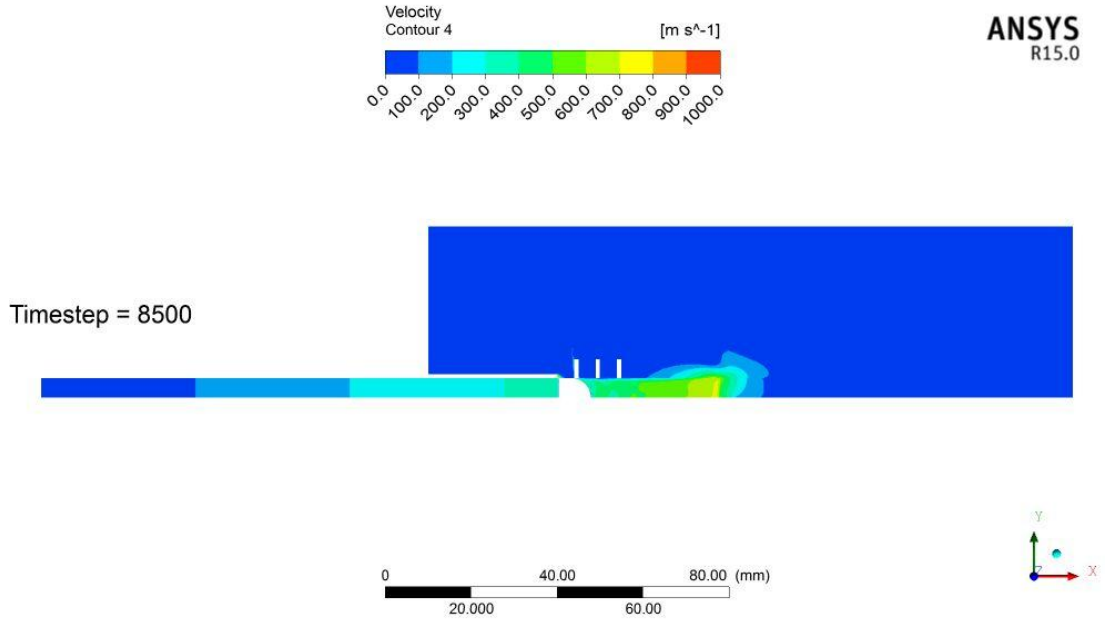
Şekil 87 : Mermi önündeki akışkan hızının zamana bağlı değişim grafiği.



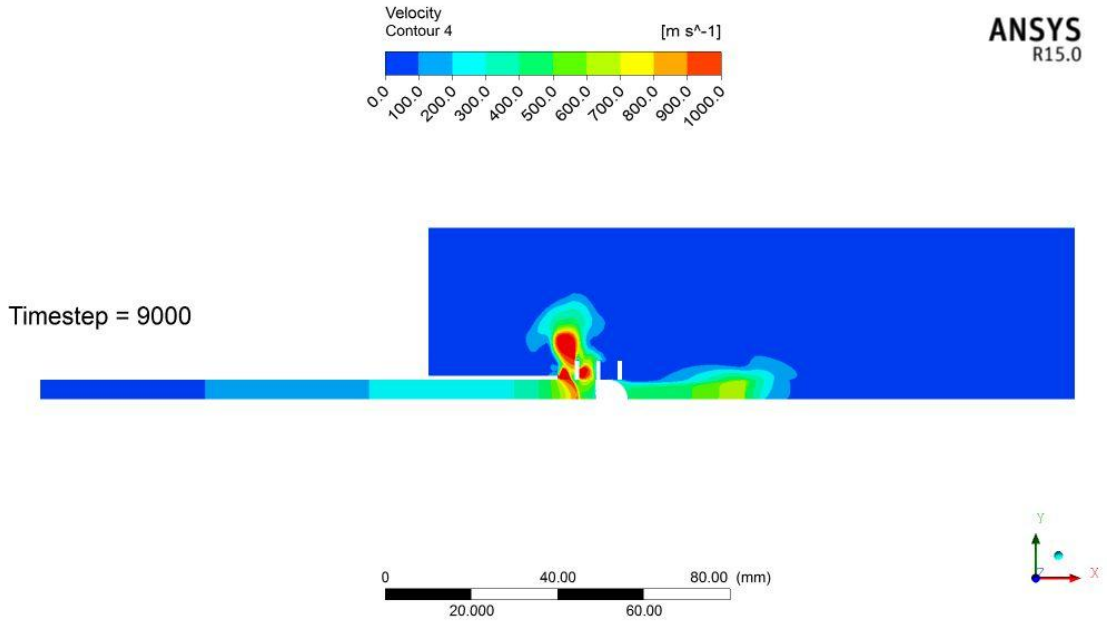
Şekil 88 : Merminin çıkış anında ki hız dağılımı ve akım vektörleri.



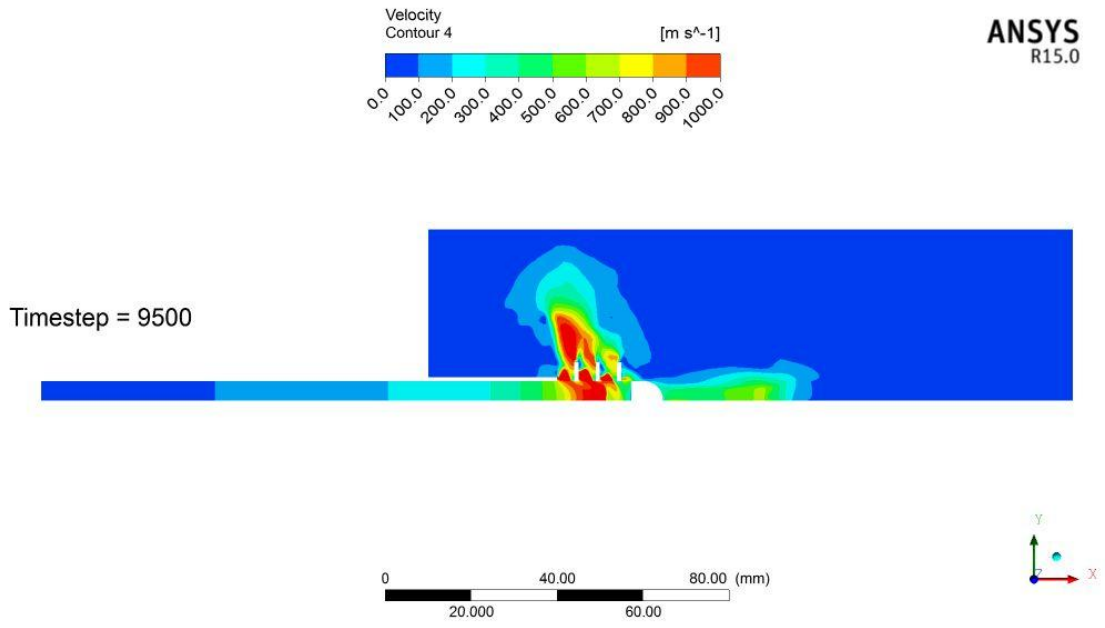
Şekil 89 : Merminin çıkış anında namlu önünde oluşan basınç dağılımı.



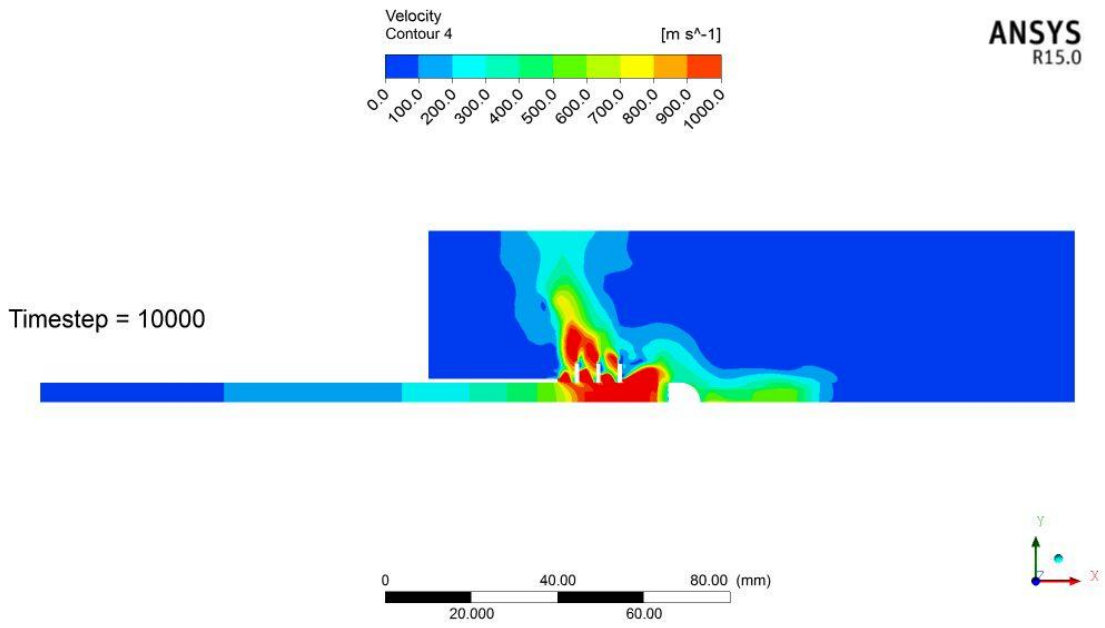
Şekil 90 : Zaman adımı 8500'de hız dağılımı.



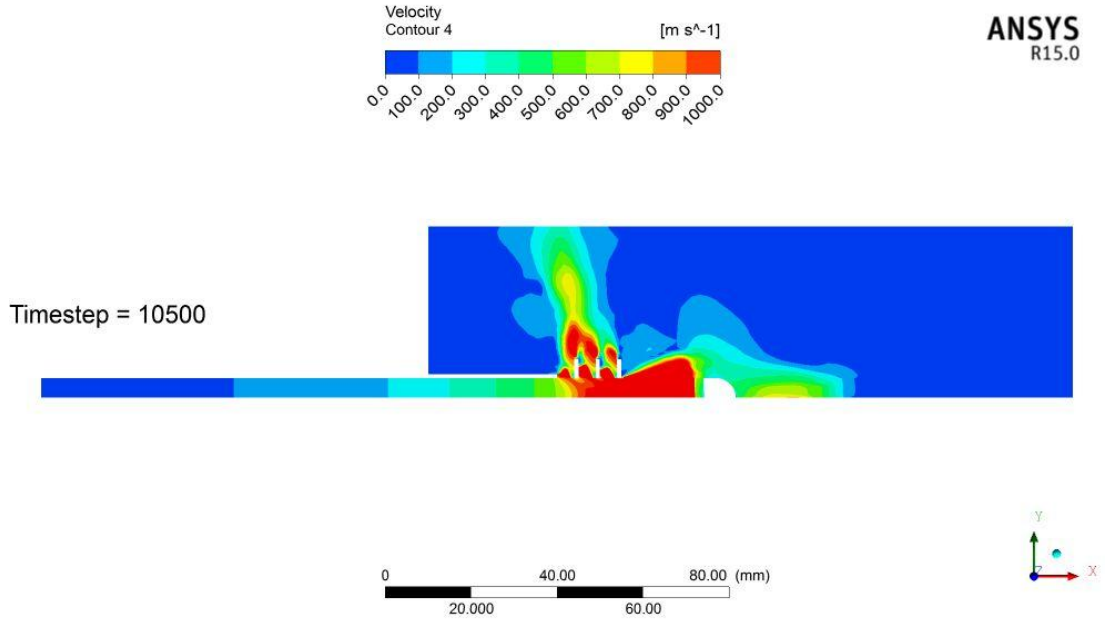
Şekil 91 : Zaman adımı 9000'de hız dağılımı.



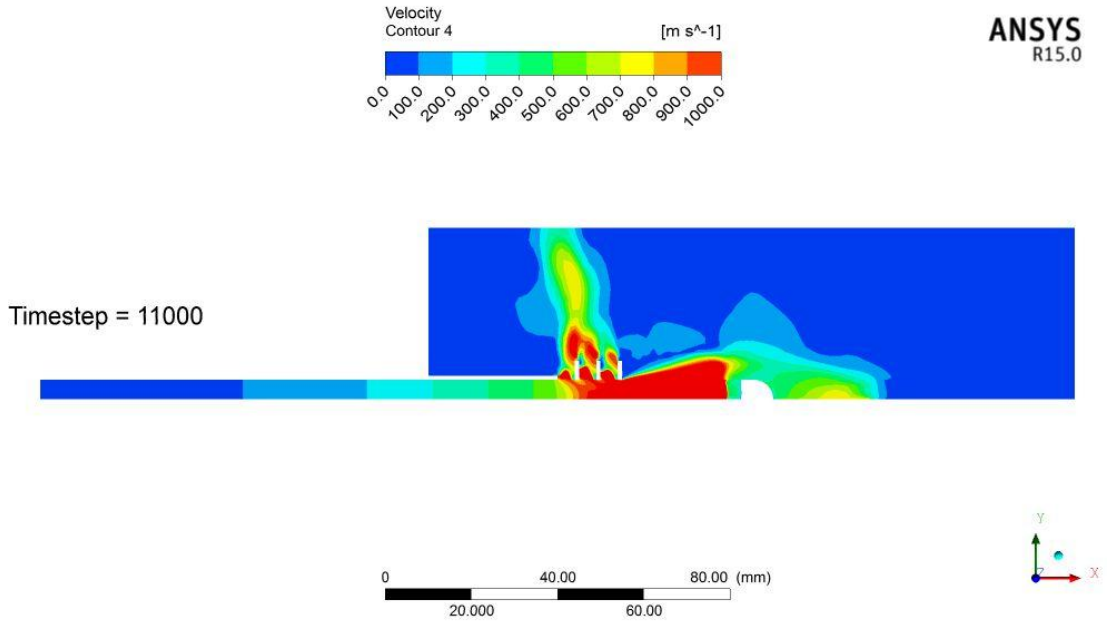
Şekil 92 : Zaman adımı 9500'de hız dağılımı.



Şekil 93 : Zaman adımı 10000'de hız dağılımı.



Şekil 94 : Zaman adımı 10500'de hız dağılımı.



Şekil 95 : Zaman adımı 11000'de hız dağılımı.

4. BULGULAR

Bu çalışmada barutun patlaması ardından merminin hareketi, geri tepme kuvvetinin oluşumu ve bölgedeki akışkan hareketleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Problemi yöneten analitik denklemler çıkartılarak, sonuçlar bilgisayar destekli sayısal analiz yazılımı kullanılarak belli kabuller ve sınır şartları altında elde edilmiştir.

Çalışmanın amacı merminin zamana bağlı hareketi ve namlu gazlarının dış ortama dağılmasını modellemektir. Geri tepme kuvvetini oluşturan bu durum incelenerek, mekanizmaya düşecek kuvveti azaltacak tasarımlar oluşturulmuş ve analiz edilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünü oluşturan mermi çekirdeğinin ve namlu gazlarının hareketinin incelenmesinde, mermi çekirdeğinin hareketi esnasında önündeki gazları sıkıştırdığı ve namlu içi gazların merminin namluyu terk etmesiyle nozül etkisi yaparak yayıldığı görülmüştür.

Geri tepme kuvvetinin azaltılmasına yönelik oluşturulan tasarımların analiz sonuçları ile çalışmanın ikinci bölümü oluşturulmuştur. Bu bölümde mevcut durum (MD) ile oluşturulan b1, b2, b3, c ve d alternatif tasarımları sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma temel olarak geri tepme kuvveti ve mermi çekirdeği hızları kıyaslanarak oluşturulmuştur. Bu modellerin sonuçları arası karşılaştırma Tablo 6'da verilmiştir.

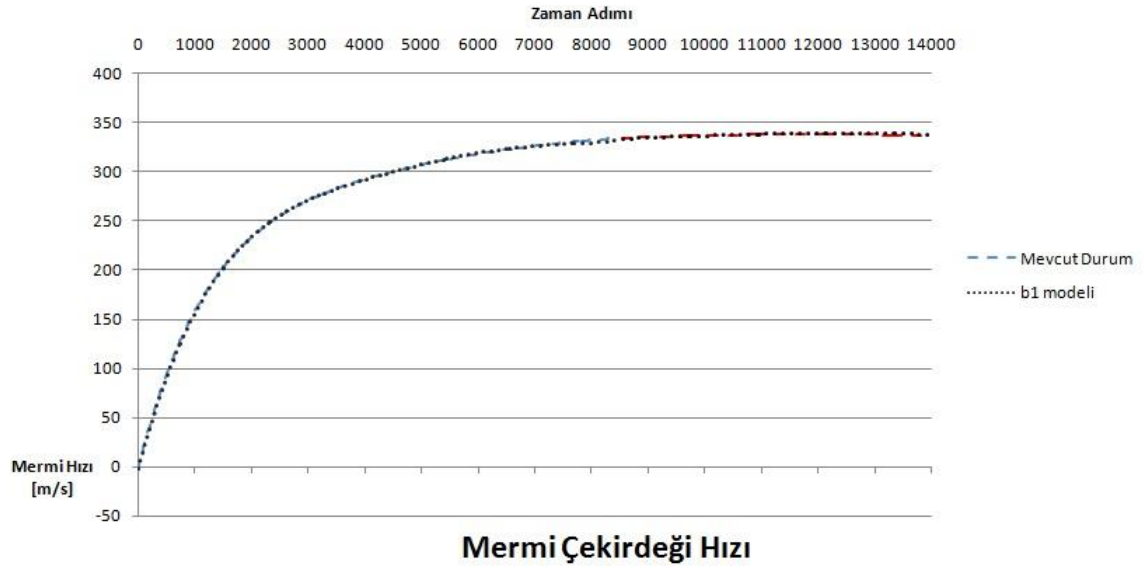
Tablo 6 : Tasarım karşılaştırma tablosu.

Karşılaştırma No	Modeller	Amaç
No: 1	MD ~ b1	MB var-yok etkisi
No: 2	MD ~ b1 ~ c ~ d	MB plaka sayısı etkisi
No: 3	MD ~ b1 ~ b2	MB plaka kalınlığı etkisi
No: 4	MD ~ b1 ~ b3	MB plaka eğimi etkisi

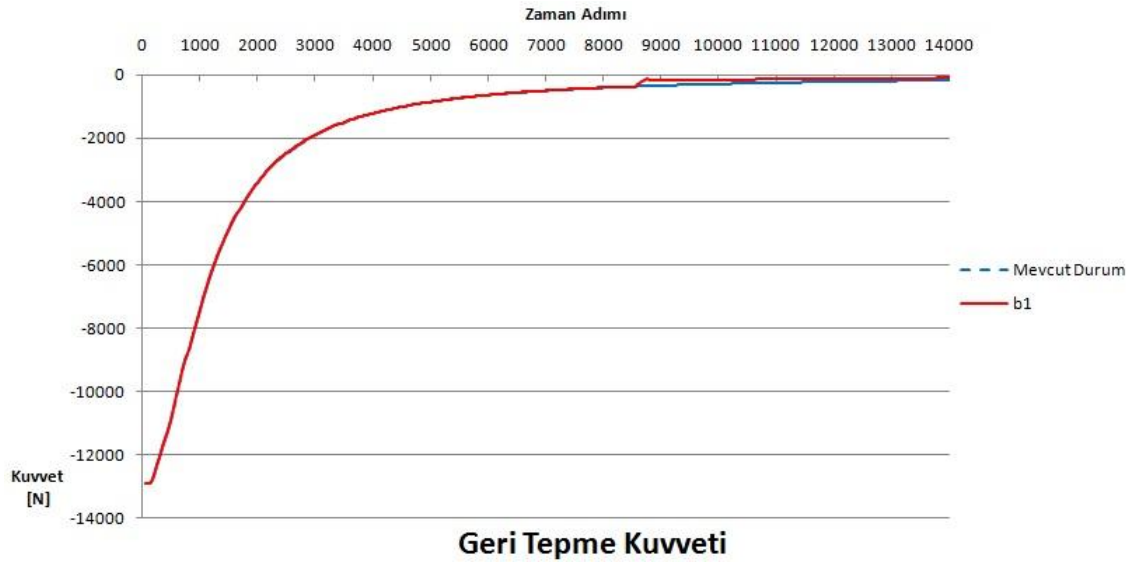
4.1. NO:1 KARŞILAŞTIRILMASI

No:1 karşılaştırılması ile MB yapılarının mermi hızı ve geri tepme kuvvetlerinin üzerine etkileri incelenmiştir.

Şekil 96'da mermi çekirdeklerinin hızlarının karşılaştırılması görülmektedir. Zaman adımı 8500 civarındaki renk değişimleri mermilerin namluyu terk ettiğini göstermektedir. Her iki modelde de hızlanma değerleri benzer görülmektedir.



Şekil 96 : MD ile b1 modeli karşılaştırması - mermi çekirdeği hızı.



Şekil 97 : MD ile b1 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.

Şekil 97 ve Şekil 98'de modellerin oluşturduğu geri tepme kuvvetleri gösterilmiştir. Şekil 97'de görüleceği üzere, geri tepme kuvveti oluşumu mermi namluyu terk edene kadar benzer özelliktedir. Merminin namluyu terk etmesiyle, MB yapısının kuvveti bir miktar sönümlendiği görülmüştür. Bu kısmın daha detaylı gösterimi Şekil 98'de verilmiştir.



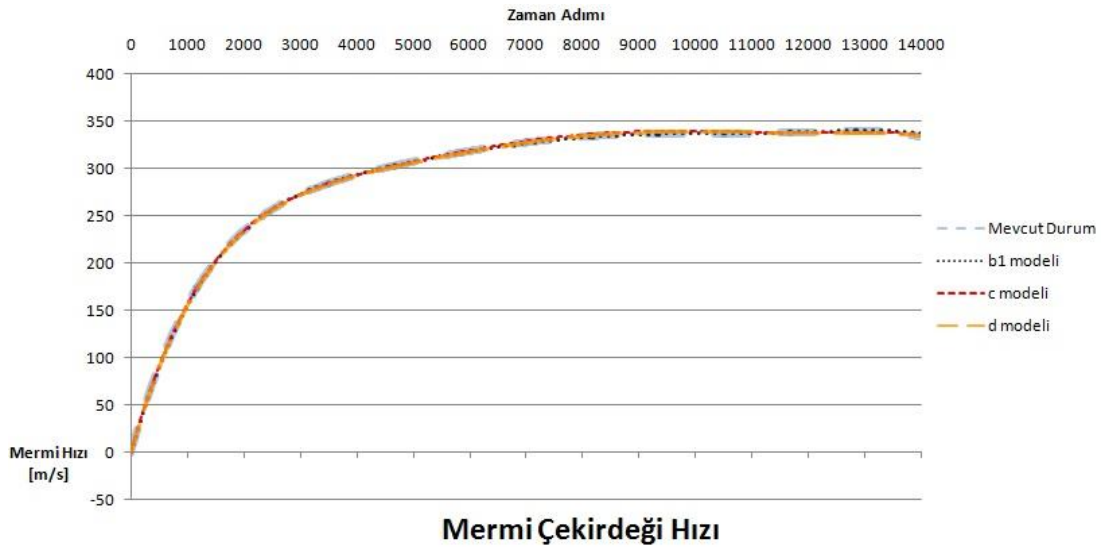
Şekil 98 : MD ile b1 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.

Bu değerler çerçevesinde, MB yapılarının mermi çekirdek hızlarına ciddi olumsuz etkiler vermeden geri tepme kuvvetini azalttığını belirtebiliriz. Çekirdek hızlarını sabit kabul edersek, Şekil 98'de modeller arasında bulunan farkın, momentumun aksenal bileşeninden radyal bileşenine geçmiş hali olduğunu belirtebiliriz.

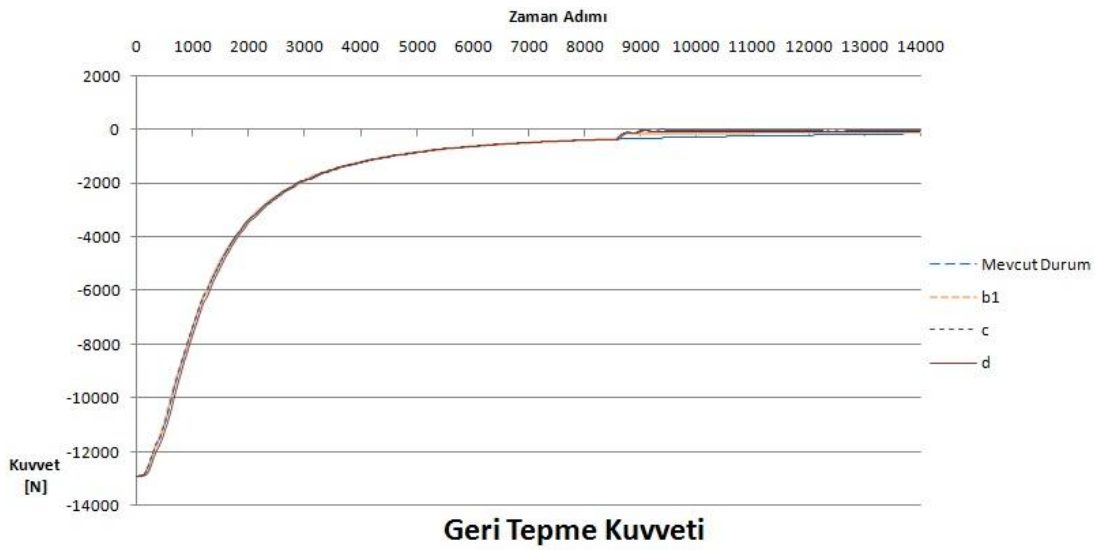
4.2. NO:2 KARŞILAŞTIRILMASI

No:2 karşılaştırılması ile MB plaka sayısının mermi hızı ve geri tepme kuvvetlerinin üzerine etkileri incelenmiştir. Analiz için oluşturulan b1, c ve d modellerinde MB yapısı sırasıyla 1, 2 ve 3 plakadan oluşmaktaydı.

Şekil 99'da mermi çekirdeklerinin hızlarının karşılaştırılması görülmektedir. MD ve MB modellerinin arasında, mermi çekirdek hızı kıyaslanması açısından ciddi fark olmadığı görülmektedir.

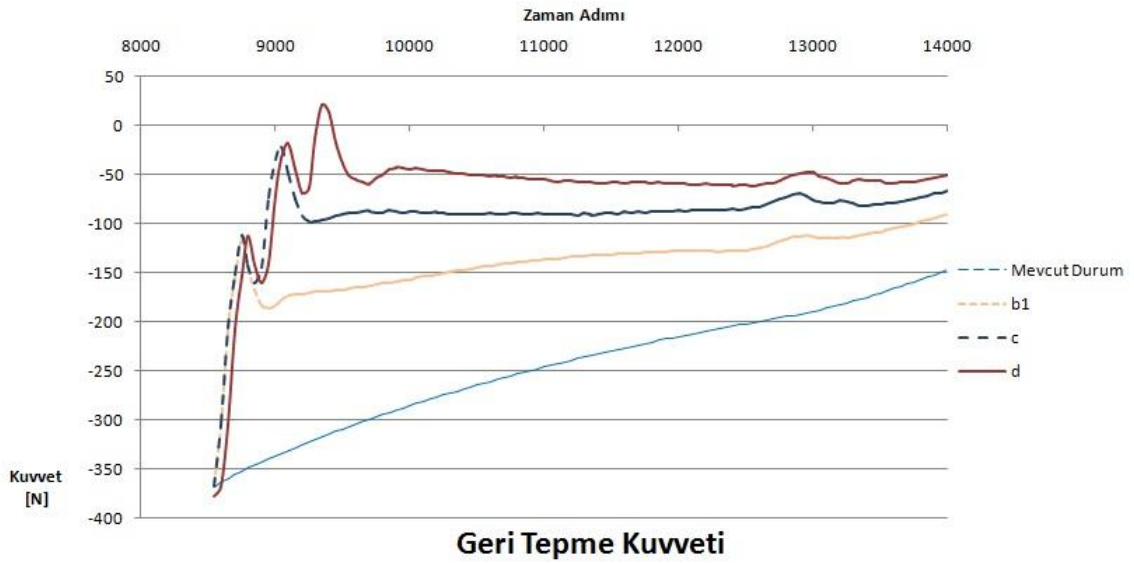


Şekil 99 : MD, b1,c ve d modelleri karşılaştırması - mermi çekirdeği hızı.



Şekil 100 : MD, b1,c ve d modelleri karşılaştırması - geri tepme kuvveti.

Şekil 100 ve Şekil 101 modellerin oluşturduğu geri tepme kuvvetleri gösterilmiştir. Şekil 100'de görüleceği üzere, geri tepme kuvveti oluşumu mermi namluyu terk edene kadar benzer özelliktedir. Merminin namluyu terk etmesiyle, MB yapılarının oluşan kuvveti bir miktar azalttığı görülmektedir. Bu kısmın daha detaylı gösterimi Şekil 101'de verilmiştir.



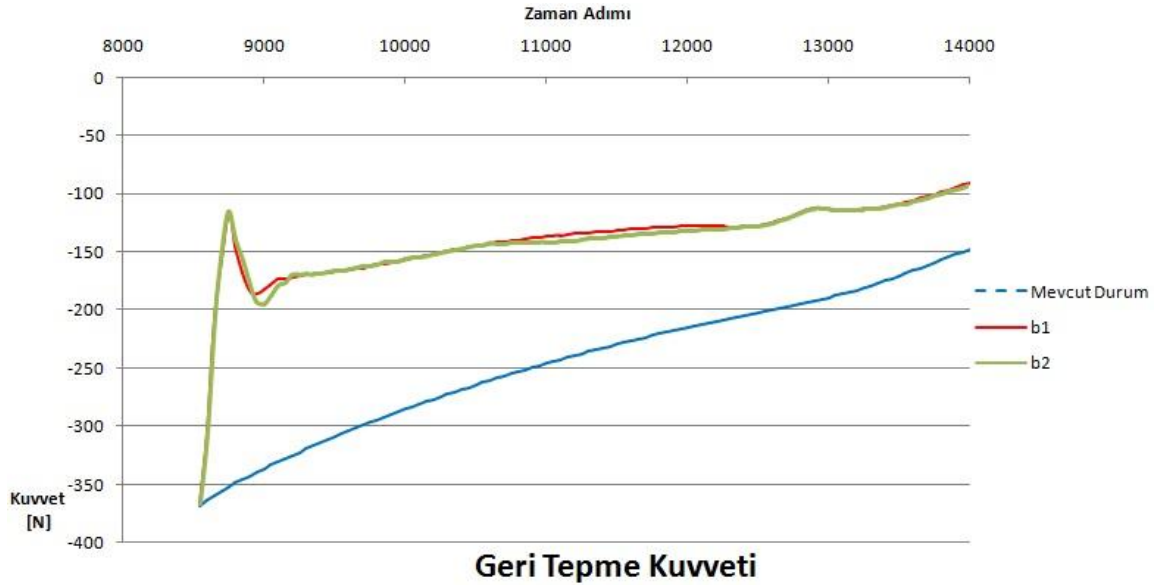
Şekil 101 : MD, b1,c ve d modelleri karşılaştırması - geri tepme kuvveti.

Bu değerler çerçevesinde, MB sayısını arttırmanın mermi çekirdek hızlarına ciddi olumsuz etkiler vermeden geri tepme kuvvetini azalttığını belirtebiliriz. Çekirdek hızlarını sabit kabul edersek, Şekil 101'de modeller arasında bulunan farkın, momentumun aksenal bileşeninden radyal bileşenine geçmiş hali olduğunu belirtebiliriz.

4.3. NO:3 KARŞILAŞTIRILMASI

No:3 karşılaştırılması ile MB yapısında plaka kalınlığının geri tepme kuvvetlerinin üzerine etkileri incelenmiştir. Plaka kalınlığını arttırmadaki temel amaç, mermi çekirdeğinin plaka kesitinden geçtiği zaman dilimini arttırarak daha fazla akışkanın MB yapısı ile radyal doğrultuda tahliye etmektir.

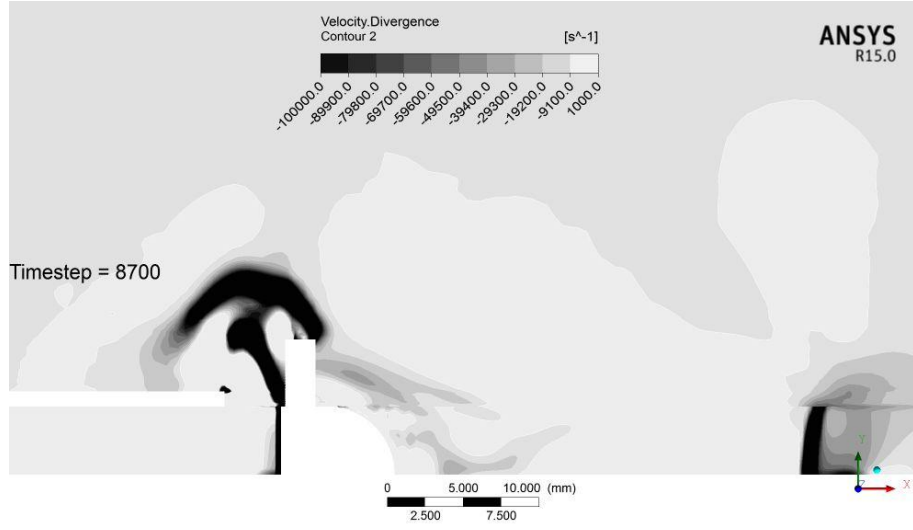
Şekil 102'de modellerde mermi çıkışı sonucunda oluşan geri tepme kuvvetleri gösterilmiştir. Merminin namluyu terk etmesiyle, MB yapısının kuvveti bir miktar sönümlendiği görülmüştür.



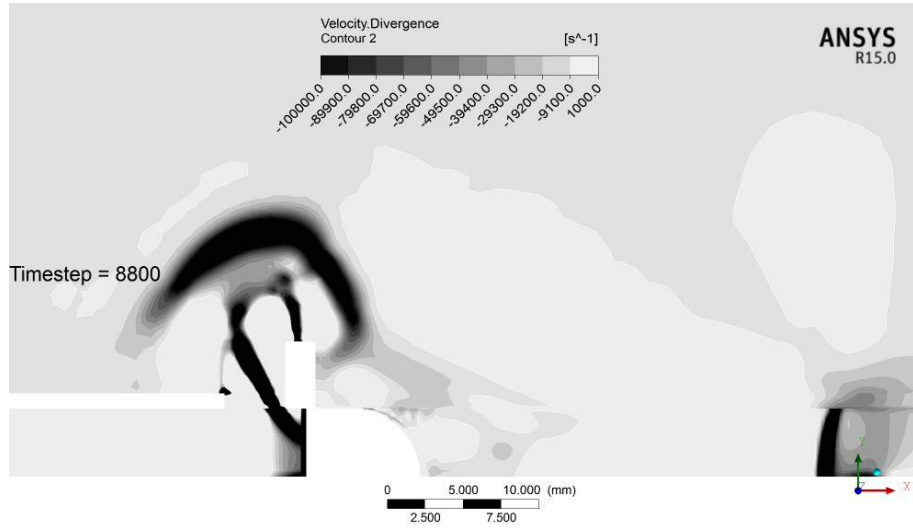
Şekil 102 : MD, b1 ve b2 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.

MB yapısının geri tepme kuvvetini azalttığını belirtebiliriz. Çekirdek hızlarında yüksek değişimler olmadığından sabit kabul edilirse, Şekil 98'de modeller arasında bulunan farkın, momentumun aksenal bileşeninden radyal bileşenine geçmiş hali olduğunu belirtebiliriz.

Analiz sonucunda, zaman adımı 8730 anında ($t=4.375 \cdot 10^{-4}$ s) geri tepme kuvveti en düşük değerine zıpladığı görülmüştür. Bu bölgeye en yakın kayıt dosyası 8700-8800 zaman adımlarındadır. Bu noktalara ait mermi çekirdeği pozisyonu Şekil 103 ve Şekil 104'te gösterilmiştir.



Şekil 103 : Zaman adımı 8700'de mermi çekirdeği pozisyonu.

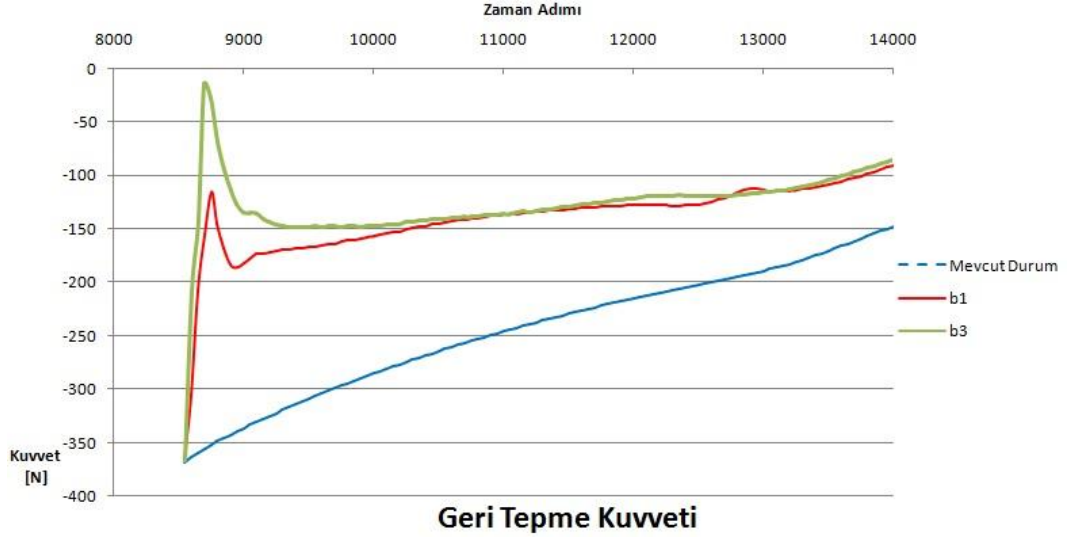


Şekil 104 : Zaman adımı 8800'de mermi çekirdeği pozisyonu.

Geri tepme kuvvetinin en düşük değeri, b1 ve b2 modellerinde benzer olduğu görülmüştür. Ancak Şekil 102'de daha ileri zaman adımlarında, plaka kalınlığı 2 mm olan b2 modelinde geri tepme kuvvetinin, plaka kalınlığı 1 mm olan b1 modelinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum da, plaka kalınlığını arttırmanın olumlu bir katkısı olmayacağı yorumlanmıştır.

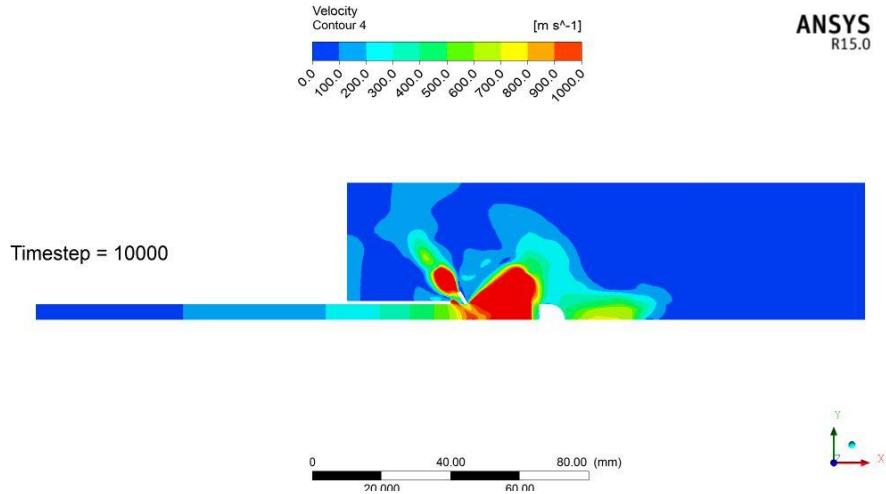
4.4. NO:4 KARŞILAŞTIRILMASI

No:4 karşılaştırılması ile MB plakası eğiminin geri tepme kuvvetlerinin üzerine etkileri incelenmiştir. Şekil 105'te b1 ve b3 modellerinde, MD modeli ile beraber zamana bağlı geri tepme kuvveti değişimini göstermektedir.



Şekil 105 : MD, b1 ve b3 modeli karşılaştırması - geri tepme kuvveti.

No:4 karşılaştırmasında, MB açısının artmasının, geri tepme kuvvetinin azaltılmasındaki rolü görülmüştür. Şekil 106'da da görüldüğü gibi, MB 'den tahliye edilen akışkan -x yönünde bileşene sahip olmaktadır. Böylelikle namlu çeperinde geri tepme kuvveti etki ederken, MB duvarlarında sönümleyici kuvvetin oluşmaktadır.



Şekil 106 : Mermi çekirdeği çıkışı sonrası, MB 'in oluşturduğu akış dağılımı.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmada bir namluda, barut patlaması sonrası oluşan basınç ve sıcaklık değerleri altında, mermi çekirdeğinin ve ortamda bulunan akışkanların hareketi incelenmiştir. Çalışma için gerekli literatür araştırması yapılmış olup, benzer problemlerdeki uygulamalar incelenmiştir.

Ateşli silahlarda önemli bir unsur olan geri tepme kuvvetleri tanımlanmış olup, problemin analitik tanımı yapıldıktan sonra belirli kabul ve sınır şartları altında çözüm yapılmıştır. Bu kabul ve sınır şartları, literatür taraması ile oluşturulmuştur.

Çalışmada çözüm kolaylığı açısından viskoz etkiler Cayzac-Roqueford [1] çalışmasındaki gibi ihmal edilmiştir. Ancak aynı çalışmada yazarlar, Euler denklemlerinden elde edilen sonuçların, Navier-Stokes çözümü ile karşılaştırılmasını vurgulamışlardır. Ayrıca malzeme olarak tek fazda havanın özellikleri alınmıştır. Literatürde Rehman [5] ve Baer-Frankle [1] çalışmalarında malzemenin bu şekilde modellendiği görülmüştür. Sayısal ağ ve çözüm metotlarında, Ansys Fluent yazılımı ile araştırma gerçekleştirmiş olan Yung-Zhang [2,6] çalışmalarından yararlanılmıştır.

Mermi çekirdeğinin hareketinde temel hedef momentum transferidir. Bu transferin süresi, itici gazın fiziki değerlerine ve namlu boyuna bağlı olarak değişmektedir. Uygulamada namlu boyları merminin kazanabileceği en yüksek hıza yani depolayabileceği en büyük kinetik enerjiye göre oluşturulmaktadır. Ancak bu durumda bile namlu içerisindeki akışkanın basıncı, dış ortamdan çok yüksek olmaktadır. Çalışmada bu gazın dış ortama yayılışı incelenmiş olup, namlu uçlarına geometrik modeller verip geri tepme kuvvetleri azaltılmaya çalışılmıştır.

Geri tepme kuvvetleri iki aşamada inceleyebilir, mermi çekirdeğinin namlu içinde ve namlu dışında olduğu zaman dilimleri. Mermi çekirdeğinin namlu içinde olduğu durumlara karşı, analizlerde görüldüğü üzere sadece MB yapısı ile müdahale edilememektedir. Mermi çekirdeğinin namludan çıkışı sonrası değişik tasarımlarla geri tepme kuvveti üzerine etki kurulabilmektedir.

Çalışmada MB yapılarının karşılaştırılması ile ortaya çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Çekirdek çıkışı öncesi namlu içerisindeki akışkan sıkışarak ön basınç dalgası meydana getirmektedir. Mermi çekirdeğinin ortalama hızı ses altı olduğu durumlarda bu dalga hedef için sesli ikaz niteliği taşıyabilir.
- Mermi çekirdeğinin namludan çıkışı esnasında, namlu duvarı çevresinde yüksek basınç gradyenleri tespit edilmiştir. Bu da, hali hazırda yüksek kalibreli silahlar için bilinen namlu çatlamasının nedeni sayılmaktadır. Ayrıca bu durum uygulamada namlu ucuna MB ekleyerek çözülmektedir.
- Namlu ucuna eklenmiş MB yapıları geri tepme kuvvetini düşürmede etkili olduğunu göstermiştir. MB tasarımında temel husus plaka açılarının ve sayılarının olduğu karşılaştırma analizlerinde tespit edilmiştir. Plaka kalınlıklarının çok ciddi bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- Yüksek dereceli MB plaka açılarında, silahın arka kısmına akışın yönlendirilerek basınç bölgesi oluşturduğu görülmüştür. Bu durumda yüksek kalibreli silahlarda mürettebata düşecek ses yükünün artacağı görülecektir.
- Mermi ön bölgesi hızlarının karşılaştırılmalarından görüleceği üzere, MB yapısının yüksek performansta çalıştığı durumlarda, mermi çekirdeğinin karşılaştığı akışkanın hızı düşmektedir. Bu durumun çekirdek ile hava arasındaki bağıl farkı arttıracığından, sürtünme etkilerini yükselteceği düşünülmektedir.
- Namlu ucuna eklenmiş MB yapılarının, çekirdeğin hızına olumlu ya da olumsuz ciddi etkilerinin olmadığı görülmüştür.
- HAD analizi yapılmış namlunun zamana bağlı basınç değişimi tespit edildiğinden, mukavemet açısından namlu et kalınlığında tasarım iyileştirmesi yapılabilecektir. Böylelikle daha hafif ve moment kolu kısa silahlar tasarlanabilecektir.

Elde edilen sonuçlar, mermi patlaması sonrası namlu ve çevresindeki dinamiklerin yorumlanmasına ışık tutmaktadır. Çalışmada genel olarak akışkanlar incelenmiş olsa bile, zamana bağlı olarak kuvvet, hız bileşenleri gibi değerlerin elde edilmesiyle tasarımları mekanik olarak inceleyecek yapısal çalışmalara başlangıç noktası oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. Baer, P., 1962, Simulation Of Interior Ballistic Performance Of Guns By Digital Computer Program, U.S. Armed Services Technical Information Agency.
- [2]. Bohnsack, E., 2005, Dynamical Loading of the Muzzle Area of a Gun Barrel including a Muzzle Brake, Journal of Pressure Vessel Technology.
- [3]. Yung, W., 2010, Aerodynamic Analysis of Projectile in Gun System Firing Process, Journal of Applied Mechanics.
- [4]. Cayzac, R., 2010, Computational Fluid Dynamics and Experimental Validations of the Direct Coupling Between Interior, Intermediate and Exterior Ballistics Using Euler Equations, Journal of Applied Mechanics.
- [5]. Rehman, H., 2011, CFD Analysis of Sound Pressure in Tank Gun Muzzle Silencer, Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [6]. Yung, W., 2012, Numerical Simulation and Analysis of the Muzzle Flow During the Revolving Barrel Gun Firing, Journal of Applied Mechanics.
- [7]. Çengel, Y., Cimbala, J., 2007, Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları,
- [8]. Ansys Workbench 15.0 Documentation, 2013.
- [9]. Warlow, T., 2004, Firearms, the Law and Forensic Ballistics 2nd Edition, CRC Press, Florida.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Yavuz Fatih ÖZTÜRK
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	1986 - Sivas
Telefon	+90 505 7751327
E-mail	yavuzfoz@yahoo.com

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Lisans	İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü	2008
Lise	Üsküdar Çağrıbey Anadolu Lisesi	2004