

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

NAMLULARDA KENDİ KENDİNE ATEŞLEME SÜRESİNİN BELİRLENMESİ

DOĞAN BARAN

OCAK 2018

Makine Anabilim Dalında Doğan BARAN tarafından hazırlanan NAMLULARDA KENDİ KENDİNE ATEŞLEME SÜRESİNİN BELİRLENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Murat KÖKSAL

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Yahya DOĞU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Alper YONTAR

24/01/2018

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

NAMLULARDA KENDİ KENDİNE ATEŞLEME SÜRESİNİN BELİRLENMESİ

BARAN, Doğan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yahya DOĞU

Ocak 2018, 85 sayfa

Bu tez kapsamında, bir ağır silah namlusu olan obüs (howitzer) namlusunun kendi kendine ateşleme (cook-off) atış sayısı ve süresi, analitik ve sayısal yöntemlerle hesaplanmıştır. Tez kapsamında, silah sistemini ve bu sistemi kullanan mürettebatın güvenliğini tehlikeye atmadan, güvenli ve isabetli atış gerçekleştirebilmesi için kendi kendine ateşleme süresinin hesaplanması yapılmıştır. Kendi kendine ateşleme süresi, öncelikle basitleştirilmiş analitik bir yöntem olan toplam kütle yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ardından, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile Ansys yazılımında sayısal olarak yapılmıştır. Hesaplarda kullanılan iç balistik parametreleri olan namlu içi maksimum basınç ve mühimmat namlu çıkış hızı değerleri PRODAS iç balistik analiz programı ile hesaplanmıştır. Kendi kendine ateşleme süresinin ve atış sayısının hesaplanması için bir metodoloji oluşturulmuştur. Farklı atış rejimleri için hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. SEM hesaplamaları ile 1, 2, 3, 6, 10 ve 20 atış/dakika atış rejimleri için elde edilen kendi kendine ateşleme atış sayıları sırasıyla 57, 53, 50, 41, 29 ve 14'dür. Atış sıklığı arttıkça namlu iç yüzey sıcaklığı da artmaktadır. Bunun sonucunda kendi kendine ateşleme süresine karşılık gelen atış sayısı ciddi şekilde azalmaktadır. İncelenen bu atış rejimleri için kendi kendine ateşleme atış süreleri ise sırasıyla 3420 s, 1590 s, 1000 s, 410 s, 174 s ve 42 s olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Namlu kendi kendine ateşleme süresi, İç balistik

ABSTRACT

DETERMINATION OF COOK-OFF TIME IN BARRELS

BARAN, Doğan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

M.Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yahya DOĞU

January 2018, 85 pages

In this thesis, the number of shots and duration of cook-off for a heavy gun barrel (howitzer barrel) is calculated by using analytical and numerical methods. Within the scope of the thesis, the cook-off time is calculated so that the system could be safely operated and accurately shot without risking the gun system and the crew. The cook-off time is first calculated by using the lumped system approach which is a simplified analytical method. Then, it is done numerically in Ansys software with Finite Element Method (FEM). The maximum barrel internal pressure and ammunition barrel muzzle velocity, which are internal ballistic parameters used in the calculations, are calculated by using PRODAS software which is an internal ballistics analysis program. A methodology has been developed for the calculation of the cook-off time and the number of shots. Calculations are made for different rate of fires and the results are compared. By using FEM analyses, the number of cook-off shots for the rate of fires of 1, 2, 3, 6, 10 and 20 shots per minute are obtained as 57, 53, 50, 41, 29 and 14, respectively. The inner surface temperature of the barrel increases with increasing rate of fire. As a result, the number of shots corresponding to the cook-off time is significantly reduced. For these rate of fires, the cook-off times are determined as 3420 s, 1590 s, 1000 s, 410 s, 174 s and 42 s, respectively.

Key words: Barrel cook-off time, Internal ballistic

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince her türlü destek ve özverilerini esirgemeyen çok sevgili aileme, lisans ve yüksek lisans öğrenim hayatım boyunca mesleki, bilimsel ve sosyal açıdan gelişme katedebilmek için tecrübe ve fikirlerinden yararlandığım tez danışmanım sayın Prof. Dr. Yahya DOĞU'ya, tez çalışmam boyunca bilgi ve birikimlerinden yararlandığım, MKE Ağır Silah ve Çelik Fabrikasında birlikte çalıştığım mesai arkadaşlarıma ve MKE Genel Müdürlüğü çalışanı sayın Fizik Yüksek Mühendis Funda Yıldırım'a teşekkür ve şükranlarımı bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ	1
1.1. Literatür	3
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	11
2. OBÜS AĞIR SİLAHI ve NAMLUSU	12
2.1. Obüs Şeması ve Kısımları	14
2.2. Obüs Mühimmatı.....	22
2.3. Obüs Mühimmatı Sevk Barutu.....	25
3. İÇ BALİSTİK ANALİZİ	26
3.1. İç Balistik Hesaplamalar	29
3.2. İç Balistik Analiz Sonuçları	34
4. NAMLU KENDİ KENDİNE ATEŞLEME SÜRESİNİN ANALİTİK HESABI .	39
4.1. Isı Akısının Hesaplanması.....	43
4.2. Toplam Kütle Yaklaşımı ile Analitik Çözüm.....	48
5. NAMLU SEM MODELİ	55
6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER	59
6.1. SEM Modeli Doğrulaması.....	61
6.2. SEM Analizi Sonuçları.....	62
6.3. Farklı Atış Rejimleri için Kendi Kendine Ateşleme Atış Sayısı ve Süresi	74
7. GENEL DEĞERLENDİRMELER	79
8.KAYNAKLAR	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. PRODAS programı parametre değerleri	31
3.2. PRODAS programı iç balistik analizi sonuçları	32
4.1. Zaman sabiti hesabında kullanılan denklem sabitleri	44
4.2. ($T_{\max}-T_i$) değerinin hesaplamasında kullanılan sabitler.....	46
4.3. Birim atışta birim alana transfer edilen ısı hesabı için gerekli sabitleri.....	46
4.4. Biot sayısı hesabında kullanılan sabitler	48
4.5. Toplam kütle yaklaşımı hesabında kullanılan sabitler	53
5.1. Namlu malzemesinin termofiziksel özellikleri	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çekili obüs (M777/ABD).....	13
2.2. Kundağı motorlu obüs (M109A6 Paladin/ABD)	13
2.3. Obüs silah sistemi	14
2.4. Namlu ve yiv-setler	15
2.5. Kinetik enerjili mühimmat	16
2.6. Vidalı tip ve kayar tip kama ve kamapayı mekanizması.....	17
2.7. Hidropnömatik geri tepme ve irca sistemi	19
2.8. Gaz tahliye silindiri	20
2.9. Ağız baskısı.....	21
2.10. Keseli mühimmat şeması	22
2.11. M549 RAP mühimmatı	24
2.12. Askeri amaçlı sevk barutları ve obüs mühimmat.....	25
3.1. Namlu içi basınç ve hızın tipik olarak namlu boyunca değişimi	28
3.2. PRODAŞ programı “Setup” arayüzü	30
3.3. PRODAŞ programı “Gun Tube Definition” arayüzü.....	30
3.4. PRODAŞ programı iç balistik hesaplama akış şeması	33
3.5. Basınç zaman eğrileri.....	34
3.6. Basınç-konum zaman eğrileri	35
3.7. Hız-zaman eğrisi	36
3.8. Hız-konum eğrisi.....	36
3.9. Sıcaklık-zaman eğrisi	37
3.10. Sıcaklık-konum eğrisi	37
4.1. Analizi yapılan MKEK üretimi 39 kalibre 155 mm obüs namlusu	39
4.2. Analizde kullanılacak iki boyutlu namlu kesiti ve sınır şartları	40
4.3. Toplam kütle yaklaşımı ile namlu ısı analizini	49
5.1. SEM model geometrisi ve sınır şartları.....	55
5.2. Namlu iç yüzeyi ısı akışı sınır şartı	57
5.3. İki boyutlu geometrik model için oluşturulan sayısal ağ yapısı.....	58
6.1. Kendi kendine ateşleme süresinin farklı eleman sayılarına göre değişimi	59

6.2. Farklı eleman sayılarına göre 1. ve 41. atış sonunda oluşan maksimum sıcaklığın değişimi	60
6.3. Birinci atış periyodunda namlu iç-dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi	63
6.4. İlk 6 atışta namlu iç-dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi.....	63
6.5. Namlu iç-dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi.....	64
6.6. Kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi.....	66
6.7. Birinci atışın tamamlandığı 25. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı	67
6.8. İkinci atışın başlangıcı olan 10. s'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı	67
6.9. Altıncı atışın tamamlandığı 50,025. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı.	68
6.10. Yedinci atışın başlangıcı olan 60. s'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı	68
6.11. Kırk birinci atışın tamamlandığı 400,025. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı	69
6.12. Kırk ikinci atışın başlangıcı olan 410. s'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı	69
6.13. Atış sonlarında namlu sıcaklığının yarıçap boyunca değişimi.....	71
6.14. Atış başlangıçlarında namlu sıcaklığının yarıçap boyunca değişimi	72
6.15. Atış sonlarında ve başlangıçlarında namlu sıcaklığının yarıçap boyunca değişimi	72
6.16. Namlu iç-dış yüzey sıcaklığının atış başlangıçlarındaki değerlerinin zamana göre değişimi.....	73
6.17. Farklı rejimlerde kendi kendine ateşleme atış sayıları ve süreleri	76
6.18. Farklı atış rejimlerinde namlu iç-dış yüzey sıcaklığının atış başlangıçlarındaki değerlerinin zamana göre değişimi	77
6.19. Kendi kendine ateşleme atış süresi	78
6.20. Kendi kendine ateşleme atış sayısı.....	78

SİMGELER DİZİNİ

P_{\max}	Namlu içi maksimum basınç
V_m	Mühimmat namlu çıkış hızı
r	r_i 'den r_0 'a kadar değişen yarıçap
k	Isı iletim katsayısı
ρ	Yoğunluk
c_p	Özgül ısı
α	Isıl yayınım katsayısı
h_g	Namlu iç yüzeyi ile sıcak sevk barutu gazları arasındaki ısı taşınım katsayısı
h_∞	Namlu dış yüzeyi ile çevre arasındaki ısı taşınım katsayısı
T_g	Ortalama namlu kesitindeki gazların sıcaklığı
T_∞	Dış çevre sıcaklığı
T_{in}	Namlu iç yüzey sıcaklığı
T_0	Namlu dış yüzey sıcaklığı
q_{in}	Namlu iç yüzeyindeki taşınım ile oluşan ısı akısı
H_∞	Birim atışta birim alana transfer edilen ısı
T_{\max}	Maksimum namlu iç yüzey sıcaklığı
T_i	Namlu ilk sıcaklığı
t_0	Zaman sabiti
m_r	Mühimmat ağırlığı
d	Namlu iç çapı
D	Namlu dış çapı
T_f	Sevk barutu alev sıcaklığı
T_{\max}	Maksimum namlu yüzey sıcaklığı
m_p	Sevk barutu ağırlığı
$T_{\max}-T_i$	Sıcaklık sabiti
l_c	Karakteristik uzunluk
t_c	Kendi kendine ateşleme süresi
T_c	Sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı
T_g	Ortam sıcaklığı

m	Namlu kesit alanının birim derinliğinin kütlesi
A_i	Namlu iç çap yüzey alanı
A_0	Namlu dış çap yüzey alanı
R_f	Atış oranı
l	Namlu birim eleman uzunluğu

KISALTMALAR DİZİNİ

APFSDS	Armour-Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot
PRODAS	Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis System
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu

1.GİRİŞ

Barış için dahi olsa savunma sanayiinin gelişimine masum gözle bakılmak istenmesi veya zorunda kalınması insanlık tarihinin acı bir gerçeğidir. Bu gerçek herkes tarafından bilinse de ve dile getirecek cesur söylemler olsa da herkes yapılabilecek hiçbir şey yok tezi ile yola devam etmektedir. İnsanlık tarihinde, savunma sanayiinin ön planda oluşu günümüzdeki kadar açık ilan edilmemişti. Yakın gelecekte ise “savunma” kelimesinin de kasti olarak kullanılan bir kamuflej kelimesi olduğu ilan edilecektir. Masum gösterilen hâlihazırdaki durum ve zorunluluklar değerlendirmeleri ile insanlığa ya savun ya savaş ya köle ol ya da öl seçenekleri sunulmakta ve alternatif arama seçenekleri bir yana, düşünceleri dahi engellenmektedir. Bunları yapan da yine insanlığın ta kendisidir ve herkes bunu bir başkası yapıyormuş gibi kendini masum göstermektedir. Bu tez konusunu hiç çalışmamış olmayı yeğlemek şeklindeki bir masumiyet söylemini belirtmekten öte elimizden bir şey gelmemesi de, birçok insan gibi bizim de arkasına sığınmak zorunda kaldığımız çaresizliğimizin bir göstergesidir.

Bu tez kapsamında, atış esnasında namlularda meydana gelebilecek kendi kendine ateşleme (cook-off) olayının gerçekleşme süresinin belirlenmesine yönelik analitik ve sayısal tabanlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma bir ağır silah namlusu olan obüs (howitzer) namlusu için yapılmıştır. Atış esnasında namlu haznesindeki sevk barutunun yanması ile ortaya çıkan sıcak sevk barutu gazlarından namluya ısı transferi olur ve namlu ısınır. Bir sonraki atışa kadar namludan çevreye taşınım ve ışıyım yoluyla aktarılan ısı ile namlu soğur. Ancak, zaten çok sık gerçekleşen atışlar arasındaki namludan çevreye olan bu ısı aktarımı namlunun soğuması için yetersiz kalır ve atışlar devam ettikçe namlu giderek ısınır [1]. Yani, namludan çevreye olan ısı transferi, sıcak sevk barutu gazlarından gelen ısı transferinden daha az olduğu için namlunun sıcaklığı kademeli olarak artar. Seri atışlarla kademeli olarak artan namlu sıcaklığı, namlu içindeki sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşır. Bu durumda, bir sonraki mühimmat sıcak namluya sürüldüğünde, sıcak namlunun mühimmatı ve yanma odasındaki sevk barutunu ısıtması ile kendiliğinden erken ateşleme olabilir. Yani, bir sonraki mühimmat sıcak namluya sürüldüğünde, sevk barutu kontrolsüz bir şekilde kendi

kendine tutuşarak sistemin istekleri dışında erken ateşleme gerçekleşecektir. Bu durumda oluşan erken patlama, nişan almaya ve güvenli ateşleme oluşturmaya imkân vermeyeceğinden sisteme ve mürettebata zarar verir. Bu olaya, namluda kendi kendine ateşleme (cook-off) adı verilir. Dolayısıyla, seri atışlar sonucunda atış rejimine bağlı olarak namlunun kaç atış sonra yani ne kadar süre sonra kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşacağıının belirlenmesi ve buna göre atışların durdurulup namlunun soğutmaya alınması önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında, atış esnasında namlunun kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşma süresinin belirlenmesine yönelik analitik ve sayısal tabanlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kendiliğinden ateşleme sıcaklığına ulaşma süresi ve atış sayısı, atış rejimine ve namlu iç yüzey sıcaklığına göre analitik ve sayısal yöntemlerle belirlenmiştir. Analitik yöntem olarak namlu için geçerliliği sorgulu da olsa basitleştirilmiş bir yöntem olan toplam kütle yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal yöntem olarak ise Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılmıştır. SEM çözümünde Ansys yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca hesaplarda kullanılması gerekli iç balistik parametrelerinin belirlenmesi için ise PRODAS iç balistik analiz yazılımı kullanılmıştır.

1.1. Literatür

Namlu kendi kendine ateşleme süresinin ve atış sayısının hesaplanması ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

Moeller [2] 7,62 mm namlu iç çapına sahip M60 makineli tüfek namlusunda, namlu aşınmasının belirlenmesi için zamana bağlı namlu iç yüzey sıcaklığını hesaplamıştır. Atış esnasında, namlu iç-dış yüzeyinde ani bir şekilde artan ve azalan sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için, hızlı geribildirim özelliğe sahip krom-alüminyum ve demir-nikel ısılıçiftler kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, seri atışlarda, ilk atış sonunda, yivset başlangıç bölgesinde namlu iç yüzey sıcaklığının 760°C değerine ulaştığı, 100. atıştan sonra ise 815,5°C değerini geçtiği belirlenmiştir.

Russell [3], namlu iç yüzeyine uygulanan, ısı bariyer görevi gören, 10 µm kalınlığa sahip TiO₂, SiO₂ ve Mg₂SiO₄ üç farklı tip kaplamanın, aşınma azaltıcı eklenti ile birlikte namlu iç yüzey sıcaklığını kaplamasız namlulara göre yaklaşık %27 oranında azalttığını belirlemiştir. Yapılan çalışmanın temel çerçevesi, belirli bir eksenel pozisyonda, namlu içinde ısı taşınım katsayısının belirlenmesi olmuştur. Zamana bağlı ısı taşınım katsayısının belirlenmesi, namlu içinde iletim probleminin tersine (inverse) çözümüne dayanmaktadır. Bu çözümde, namlu iç yüzey sıcaklığının ölçülen değerlerinden yararlanılmıştır.

Hasenbein [4] ise, XM123E1 8. bölge barut kesesi kullanımı için XM199 155mm obüs silah namlusu üzerinde zamana bağlı sıcaklık değişimi ile kendi kendine ateşleme arasındaki bağıntıyı incelemiştir. Yapılan bu çalışma, 190,5-260°C sıcaklık değerleri arasında önceden üniform olarak ısıtılmış XM181 kısa tip obüs silah namlusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önceden 62,7°C sıcaklığa ısıtılmış sevk barutu kesesi, daha sonra XM181 obüs silah namlusu yanma odasına yerleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan 19 farklı testte, kendi kendine ateşleme olayı gerçekleşmiştir. Çalışmada, namlu iç yüzeyine yakın noktalarda ısılıçiftler ile sıcaklık ölçülmüş ve ateşlemenin gerçekleştiği süreler not edilmiştir. Bu yöntemle, kendi kendine ateşleme süresi, silah yanma odası iç yüzey sıcaklığının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. XM181 ve XM199 obüs silah namlularının teknik benzerliğinden dolayı, elde edilen sonuçlar XM199 obüs silah namlusu için de referans olarak kullanılmıştır.

Rocchio ve ark. [5] üç bazlı M30 sevk barutunun ısı kararlılığını saptamak için çalışmalar yapmıştır. İyi bir ısı etkileşim sağlamak için, içinde gerekli ısı gücü sağlayan düzenek bulunan bir test aparatı kullanılmıştır. Bu test aparatı içine yerleştirilen sevk barutu örneği, kontrollü bir şekilde, belli zaman aralıklarıyla ısıtılmıştır. Testler, 200°C ile 260°C sıcaklık değerleri arasında yapılmıştır. Çalışmada, ateşlemenin gerçekleştiği minimum ve maksimum zaman aralığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, sevk barutu temas yüzeyi ve temas basıncı değerleri de incelenmiştir. Daha sonra barutun kendi kendine ateşleme sıcaklığı Arrhenius korelasyonu ile hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda, korelasyon ile bulunan barutun kendi kendine ateşleme sıcaklığı ve süresi alt-üst sınır değerleri ile deneysel sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Nelson ve ark. [6] 155 mm bir obüs silah namlusunda namlu içinde oluşan ısı transferini Gough'un iki fazlı akış analizini de içeren iç balistik hesaplamalarla belirlemiştir. Namlu iç yüzeyinde barut gazları ile namlu iç yüzeyinde oluşan ısı taşınım katsayısı, türbülanslı boru içi akış bağıntılarıyla hesaplanmıştır. Namlu iç yüzeyinde geçici rejimde oluşan iletim ısı transferi, namlu yanma odası ile tüm namlu eksen boyunca incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda 1,3 J/mm² olarak hesaplanan transfer edilen ısı miktarı, çalışmanın sonunda numerik hesaplamalarla 1,5 J/mm² olarak hesaplanmıştır.

Gerber ve ark. [7], 120mm M256 tip tank namlusunda silindirik koordinatlarda radyal yönde tek boyutlu zamana bağlı ısı iletimini sonlu farklar yöntemi ile çözmüştür. Namlu iç yüzey sıcaklığı ve ısı taşınım katsayısı, bir balistik kod yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçların, deneysel çalışmalarla %20'den daha az bir farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Benzer şekilde, Conroy [8], M199 tip obüs namlusunda silindirik koordinatlarda radyal yönde tek boyutlu zamana bağlı ısı iletim problemi üzerinde çalışmıştır. Conroy çalışmasında ısı iletimi problemini bir iç balistik kod yardımıyla çözmüştür. Bu iç balistik kod ile iki fazlı iç balistik döngüyü modellemiştir. Namlu iç yüzeyine etki eden ısı akısını hesaplamak için türbülanslı rejimde kullanılan sınır tabaka denklemlerinden yararlanmıştır. Oluşturulan model ile dakikada 6 atış ile 12 atış yapılması durumunda 15 ile 30 atış sonunda oluşan sıcaklık profili incelenmiştir. Daha sonra 3 dakika boyunca dakikada 6 atışın yapıldığı deneysel çalışmalar ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Gerber ve ark. [9], 120mm M256 tip tank namlu malzemesinin ısı özelliklerinin (ısı iletim katsayısı, özgül ısı ve ısı yayılım katsayısı) sıcaklığa bağlı değişiminin namlu içinde oluşan ısı transferine etkisini incelemiştir. Çalışmada silindirik koordinatlarda radyal yönde tek boyutlu zamana bağlı ısı iletimi çözülmüştür. Yapılan çalışmada dakikada 7 atış yapıldığında 17 atışın sonunda, ısı özelliklerin sıcaklığa bağlı değişiminde, namlu iç yüzey sıcaklığının 1080 K civarında olduğu, ısı özelliklerin sabit alındığı durumda ise, namlu iç yüzey sıcaklığının 1040 K civarında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak ısı özelliklerin sıcaklığa bağlı değişiminin, namlu iç yüzey sıcaklığı üzerinde ciddi bir etki oluşturmadığı belirtilmiştir.

Lawton [10], 155mm'lik bir ağır silah namlusunda yivset başlangıç bölgesinde oluşan sıcaklık dağılımını ve ısı transfer miktarını hesaplamıştır. Çalışmada AS90 obüs ağır silah sisteminde her bir atış sonunda namlu iç yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımını ve ısı transfer mekanizması incelenmiştir. Namluda aşınma azaltıcı eklenti kullanmaksızın, bir mühimmat atışı gerçekleştirilmiş ve daha sonra yaklaşık 1 mikro saniyelik geri bildirim zamanına sahip erozyon tip bir ısı çifti ile ölçüm yapılmıştır. Oluşan ısı transfer miktarı sıcaklık-zaman eğrilerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, aşınma azaltıcı eklentinin 50 atış sonunda, namlu iç yüzey sıcaklığını 950°C'den 600°C'ye aşamalı olarak azalttığını ve her bir atış sonunda oluşan ısı transferini, 950 kJ/m²'den 600 kJ/m² mertebesine düşürdüğünü belirlemiştir. Lawton, bu ölçümleri, aşınma oranı ve kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşma süresini belirlemede ve namlu yorulma ömrünün artırılması konusunda yapılan çalışmalara referans olarak sunmuştur.

Witherell [11], yoğun seri atışlarda aktif soğutmalı 155mm XM297 obüs namlusunun ısı analizini yapmıştır. Atış esnasında namlu ve soğutucu sıvı sıcaklığının hesaplanması, aktif soğutmalı silah sistemlerine göre modifiye edilmiş FDHEAT namlu ısı transfer modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda aktif soğutma sistemleri için kullanılması gereken ideal radyatör boyutu hesaplanmıştır. Soğutmasız namlularda dakikada 10 atış yapıldığında, 27. atışın sonunda namlu iç yüzey sıcaklığının 400°C'nin üzerine çıktığı görülmüştür. Aktif soğutmalı namlularda ise, aynı atış oranı ile, 43. atışın sonunda namlu iç yüzey sıcaklığının 400°C'nin altında kaldığı görülmüştür.

Bass ve ark. [12], 155mm içten soğutmalı bir namluda ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarda içten soğutmalı namlu, dış yüzeyden elektrikli ısıtma ceketleri, iç yüzeyden ise elektrikli hazne ısıtıcı kullanarak, eksen boyunca mümkün olan en iyi üniform sıcaklık dağılımı sağlanarak ısıtılmıştır. Daha sonra bir ısı değiştirici yardımıyla, çeşitli soğutucu sıvı debileri kullanılarak optimum soğutma debileri belirlenmeye çalışılmıştır. Namlu ısıtma cihazları maksimum seviyede çalıştırılarak, daha önceden belirlenmiş optimum soğutma sıvısı debileri ile daha kapsamlı soğutma testleri gerçekleştirilmiştir. Son aşamada namlu üniform olarak 160°C sıcaklığa ısıtılmış, ardından ısıtma ceketleri sökülerek, namlunun soğuması için belirli bir süre beklenmiştir. Sonuç olarak, yapılan testlerin sonucunda, doğal soğutmanın zorlanmış içten soğutmaya göre ciddi oranda yavaş olduğu belirlenmiştir.

Chen ve ark. [13], 2 boyutlu namlu geometrisinde sonlu elemanlar metoduyla zamana bağlı ısı akısı ve sıcaklık hesaplaması yapmıştır. Silah yanma odası içerisinde oluşan belirsiz ısı akısının doğru bir şekilde tayini için 7,62 mm namlu iç çapına sahip bir namlunun dış çapından elde edilen sıcaklık ölçümlerinden yararlanılmıştır. Namlu iç yüzeyinde oluşan belirsiz ısı akısı, ters (inverse) tahmin yöntemi ile sonlu elemanlar metoduyla hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda 5 ms'lik iç balistik döngü içinde, ısı akısının değeri sayısal olarak 3,5 MW/m² olarak hesaplanırken, deneysel çalışmada bu ısı akısı değeri yaklaşık 4 MW/m² olarak hesaplanmıştır.

Wu ve ark. [14], dış çapında bir cekete sahip orta kısmında boydan boya soğutma kanalları olan 155 mm yivset çaplı bir namluda oluşan ısı transferini sonlu elemanlar metodu ile hesaplamışlardır. Referans olarak, doğal soğutmalı monoblok bir namlu seçilmiştir. Çalışmanın sonunda doğal soğutmanın, namlu dış yüzeyinde ısı taşınım katsayısının oldukça küçük olmasından dolayı (30 W/m²K) yetersiz olduğu görülmüştür. Zorlanmış ortadan soğutma sisteminde ise, seri atışlarda, namlu iç yüzeyinde ısı birikimi soğutucu akışkan yardımıyla minimum seviyeye indirilerek, namlu yanma odası sıcaklığını, sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığının altında tutulmuştur. Bu tür sistemlerde soğutma verimini ve basınç kaybını dengelemek için en uygun debinin (12-16 l/dk) seçilebileceği görülmüştür.

Gonzaga ve ark. [15], dıştan soğutmalı bir namluda zamana bağlı sıcaklık değişiminin analitik olarak belirlenmesi konusunda çalışmışlardır. Namlu iç yüzey

sıcaklığını analitik olarak hesaplanmış ve sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir program yardımıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda elde edilen sayısal sonuçlar, dıştan soğutmalı namlularda yapılan diğer sayısal çalışmalarla karşılaştırılmış ve namlu iç yüzey sıcaklıkları arasında yaklaşık %4 farkın olduğu belirtilmiştir.

Mishra ve ark. [1], 155 mm obüs namlusunda, atış sonrası namlu iç-dış yüzeyinde zamana bağlı sıcaklık değişimini hesaplamışlardır. Bir mühimmatın ateşlenmesi sonucu birim atışta namlu iç yüzeyine transfer edilen ısıyı hesaplayabilmek için ilk olarak bir balistik kod geliştirilmiştir. Ardından namlu sıcaklık değişimi bir SEM programı olan Ansys ile hesaplanmıştır. Doğal soğutmalı, dıştan soğutmalı ve içten soğutmalı üç farklı tip namluda, dakikada 10 atış yapılarak toplamda 40 atış durumu simule edilmiştir. 40 atışın sonunda namlu iç yüzey sıcaklığı, doğal soğutmalı namluda 423,09 K, dıştan soğutmalı namluda 405,23 K ve içten soğutmalı namluda ise 356,23 K olarak hesaplanmıştır.

Titica ve ark. [16], atış esnasında bir ağır silah namlusunda zamana bağlı ısı transferini sayısal olarak sonlu farklar yöntemi ile hesaplamışlardır. Namlu iç yüzeyine transfer edilen ısıyı hesaplayabilmek için gerekli olan ortalama barut gazları sıcaklığı ve ısı taşınım katsayısı, bir iç balistik kod ile belirlenmiştir. Ağır silah namlusunda peş peşe 6 atış yapıldığında sayısal olarak dış yüzey sıcaklığı 278,1 K, deneysel olarak ise 328 K hesaplanmıştır. İki sonuç arasında yaklaşık %15 oranında fark bulunmuştur.

Deng [17] çalışmasında, 9 mm bir tabanca namlusunda zamana bağlı ısı transfer miktarını hesaplamak için sonlu elemanlar yönteminden yararlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine girdi olarak kullanılan hazne basıncını hesaplamak için Vailler-Heydenreich yönteminden yararlanılmıştır. Tabanca namlusu üzerinde yapılan atış deneyleri yardımıyla sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar ile nümerik sonuçlar arasında maksimum %2,5 oranında farklılık oluşmuştur. Elde edilen bu sonuçlar nümerik çalışmanın tutarlı ve geçerli olduğunu göstermiştir.

Qu [18] dıştan soğutmalı bir ağır silah namlusunda oluşan ısı transferinin matematiksel modelini oluşturmak için, sonlu farklar metodundan yararlanmıştır. Çalışmada soğutucu sıvının buharlaşmasından kaynaklı etkiler de hesaba katılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, namlu iç yüzeyinde oluşan sıcaklık gradyanlarının oldukça büyük olduğu görülmüştür. Seri atışlarda dıştan soğutmanın atış sayısı arttıkça daha

da etkili olduğu görülmüştür. Yapılacak kontrollü atış planlamaları ile dıştan soğutmanın namlu kullanım ömrünü önemli ölçüde artıracakı belirtilmiştir.

Akçay ve Yükselen [19] bir makineli tüfek namlusunda oluşan sıcaklık dağılımını hesaplamışlardır. Namlunun et kalınlığındaki sıcaklık dağılımını tahmin edebilmek için gereken zamana bağlı ısı taşınım katsayısını iç balistik teorisini kullanarak hesaplamışlardır. Oluşturdukları diferansiyel denklemin çözümünde sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını seri atışları kapsayan balistik çevrimi de kapsayacak şekilde genişletip namlunun kendi kendine ateşleme sıcaklığını hesaplamışlardır. Sayısal çalışmada, M60 makineli tüfek namlusunda 150 atış yapıldığında, namlu maksimum iç yüzey sıcaklığı 880 K, maksimum dış yüzey sıcaklığı ise 356 K olarak hesaplanmıştır. Sonuçların genel olarak deneysel çalışma ile uyumlu olduğu görülmüştür; fakat ilk 5 atışta sonuçların deneysel çalışmadan %5 oranında farklılık gösterdiği belirlenmiştir. 125 adet seri atış yapıldığında ise, maksimum dış yüzey sıcaklığı sayısal olarak 441,6 K, deneysel olarak ise 517 K olarak hesaplanmıştır.

Hameed ve ark. [20] 7,62 mm mermi kovanlarında kendi kendine ateşleme olayını tetikleyen temas süresi/sıcaklık ilişkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan mermi kovanları endüstriyel olarak hâlihazırda kullanımda olan çift bazlı sevk barutu ile doldurulmuş ve bu mermiler sıcak bir namlu haznesine yüklenmiştir. Testler sonucunda, 151,4 °C ve 153,4 °C arasındaki sıcaklıklarda oluşan ısı transfer profilinde ilgili sevk barutunun kendi kendine ateşleme olayına maruz kaldığı belirlenmiştir ve bu olayın 300 saniyeden daha kısa bir sürede mühimmatın yanma odasına yüklenmesi sonucu ortaya çıktığı belirtilmiştir. Yapılan her bir deneyin tutarlı ve tekrarlanabilirlik özelliği gösterdiği raporlanmıştır.

Vikas ve ark. [21] 120 mm namlu iç çapına sahip bir namlunun kendi kendine ateşleme süresini hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Balistik parametreleri bilinen bir mühimmatın ateşlenmesi sonucu namlu iç yüzeyine transfer ettiği ısıyı analitik olarak hesaplamışlardır. Ardından kendi kendine ateşleme süresi sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda kendi kendine ateşleme süresi analitik olarak 507 s, SEM analiziyle ise 476,8 s olarak hesaplanmıştır.

Sun [22] çok kısa ısınma periyodu (birkaç milisaniye) ve uzun bir soğuma periyodunu içeren periyodik sınır şartlarına sahip içi boş silindirlerde oluşan zamana

bağlı sıcaklık değişimini incelemiştir. Çalışmada ilk olarak gaz sıcaklığı değişimi ve sıcak barut gazları ile namlu iç yüzeyi arasında oluşan ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan bu iki değer sınır şartı olarak namlu iç yüzeyine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, namlu iç yüzeyinin oldukça güçlü bir ısı etki altında kaldığını ve namlu iç yüzeyine çok yakın bölgelerde büyük sıcaklık gradyanlarının oluştuğunu gözlemlenmiştir. Çalışmada krom kaplama ve sulu soğutma sistemlerinin etkileri de incelenmiştir. Bu iki etkiden biri olan krom kaplamanın, 20 atış sonunda maksimum iç yüzey sıcaklığını, 1200 K'den 1120 K'e düşürdüğü, su soğutma yönteminin ise sürekli atışlar sonunda maksimum yüzey sıcaklığının artış eğilimini düşürdüğü belirlenmiştir.

Şentürk ve ark. [23] iç balistik problemin termo-mekanik eşleşme yöntemi ile çözümü konusunda termal analizler ve gerilim analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma, 7.62 mm namlu iç çapına sahip bir test namlusu ve G3 piyade tüfeğinde deneysel atışlar gerçekleştirerek iç balistik olayların çözümünü içermektedir. 3 boyutlu (3-B) zamana bağlı ısı transferi ve gerilim (mekanik/termal) analizleri, termo-mekanik eşleşme teorisine göre gerçekleştirilmiştir. Test namlusunda oluşan maksimum basınç ve namlu çıkış hızı verileri sırasıyla piezo-elektrik sensörler ve görüntüleme cihazı ile elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, namlu içinde oluşan basınç, mühimmatın namlu içerisindeki pozisyonu ve mühimmat hızı Vailler-Heydenreich metodu ile hesaplanmıştır. Basınç bilgisi, yanmış gazların namlu boyunca sıcaklığını belirlemek için kullanılan Noble-Abel denkleminde girdi olarak kullanılmıştır. Isı taşınım katsayısı, Vielle's yanma denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ansys programı, namlu içinde radyal ve aksenal yönde oluşan sıcaklık dağılımının elde edilmesinde kullanılmıştır. Namlu iç duvarında oluşan radyal sıcaklık dağılımı, namlu dış yüzeyinde, yaygın olarak kullanılan ısıölçerlere göre oldukça yeni ve daha kesin sonuçlar veren, bir FLIR termal görüntüleme cihazı ile bu cihazın sıcaklık ölçümleri okunarak doğrulanmıştır. Namlu ekseni boyunca basınç ve sıcaklık verileri radyal, teğetsel ve aksenal gerilmelerin elde edilebilmesi için yapılan gerilme analizlerine girdi oluşturmuştur. Çalışmanın sonunda sonlu elemanlar yöntemi (Ansys) ve analitik sonuçların birbirleri ile oldukça iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür.

Işık ve ark. [24] bir sevk barutunun kendi kendine ateşleme olayını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. 7,62 mm namlu çapına sahip bir piyade tüfeğinde

namlu içerisindeki sıcaklık dağılımı ve kendi kendine ateşleme süresini belirlemek için çeşitli atış testleri gerçekleştirilmiştir. Kendi kendine ateşlemenin başladığı yer olarak kabul edilen en fazla sıcaklığa sahip yer olan yanma odasının dış yüzeyi termal görüntüleme ile incelenmiştir. Sayısal analizde (Ansys 14.5) mermi kovani ile yanma odası birlikte modellenmiştir. Yanma odasının iç ve dış yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Çalışmada 180, 200 ve 220 adet seri atış yapılmıştır. 180 adet seri atışın sonunda sayısal ve deneysel çalışmada kendi kendine ateşleme olmamıştır. 200 atış yapıldığında deneysel olarak 18.8 s sonra, sayısal olarak ise 18.3 s sonunda kendi kendine ateşleme sıcaklığı olan 173°C'e ulaşılmıştır. 220 atış yapıldığında ise, yapıldığında deneysel olarak 5.1 s sonra, sayısal olarak ise 5 s sonunda kendi kendine ateşleme sıcaklığı olan 173°C'e ulaşılmıştır Sayısal analizin deneysel çalışma sonucu ile elde edilen kendi kendine ateşleme sonuçlarıyla oldukça uyumlu ve geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak sevk barutunun kendi kendine ateşleme süresini etkileyen çeşitli parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

Namluda kendi kendine ateşleme süresi kritik öneme sahip olduğundan her namlu geometrisi ve farklı atış rejimleri için ayrı ayrı belirlenmektedir. Bu sebeple konu hakkında birçok yayın olmasına rağmen, namludaki ısı transfer mekanizmasının karmaşık oluşundan dolayı araştırmalar devam etmektedir.

Bu tez kapsamında, bir obüs namlusunun farklı atış rejimleri için kendi kendine ateşleme süresinin ve atış sayısının hesaplanması için bir yöntem oluşturulmuş ve hesaplamalar analitik ve sayısal olarak yapılmıştır.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Namluda kendi kendine ateşleme süresinin ve atış sayısının namlu geometrisi ve farklı atış rejimleri için belirlenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar genel olarak analitik, sayısal ve deneysel olarak üç grupta toplanabilir.

Bu tez kapsamında, bir ağır silah namlusunda belirli balistik verilere sahip bir mühimmat için namlunun belli bir atış rejiminde kaç atış sonunda kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşacağı analitik ve sayısal yöntem ile hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalarda gerekli olan balistik veriler, bir iç balistik analiz programı (PRODAS) kullanılarak elde edilmiştir. İç balistik analizinde namlu içi maksimum basınç ve mühimmat namlu çıkış hızı hesaplanmıştır.

Analitik yöntem olarak toplam kütle yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal çözüm ise, SEM analizi “Ansys, Transient Thermal” yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Sonuç olarak ele alınan obüs ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresi ve atış sayısının hesaplanmasına yönelik bir metodoloji oluşturulmuş ve farklı atış rejimleri için hesaplar yapılmıştır.

2. OBÜS AĞIR SİLAHI ve NAMLUSU

Tez kapsamında, obüs ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresi ve atış sayısı analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Analitik ve sayısal hesaplamalara geçilmeden önce bu bölümde tez çalışmasına konu olan obüs ağır silah sistemi genel olarak açıklanmıştır. Ayrıca, obüste kullanılan mühimmat ve sevk barutu hakkında da bilgi verilmiştir.

Silahlar kalibre ismi verilen ve namlu uzunluğunun namlu çapına oranı olan sayı ile sınıflandırılır. Namlu iç çapı 15 mm'den büyük olan silahlar ağır silahlar olarak nitelendirilir. Ağır silah sınıfındaki silahlara örnek olarak obüsler, toplar, tanklar, roketler ve havanlar verilebilir [25].

Bu tez kapsamında kendi kendine ateşleme süresi hesaplanmış olan namlu bir obüs (howitzer) namlusudur. Obüsler, üst açılı gruplarında görerek veya görmeyerek çeşitli barut hakları ile atış yapabilen ağır silahlardır.

Obüsleri ve tankları birbirinden ayıran temel fark atış kabiliyetleridir. Tanklar operasyon sahasında düşman unsurlarını görerek atış yapacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun için temel donanımları (motor, süspansiyon sistemleri vs.) ve zırhları özel olarak tasarlanmıştır. Öyle ki; 12-13 MJ yüksek namlu çıkış enerjili mühimmatlara karşı koyabilmek için tank zırh teknolojileri giderek gelişmektedir [26]. Obüsler ise cephe gerisinden yüksek bir ateş gücü sağlayarak muhabere alanında oldukça önemli bir unsur olarak göze çarpmaktadır.

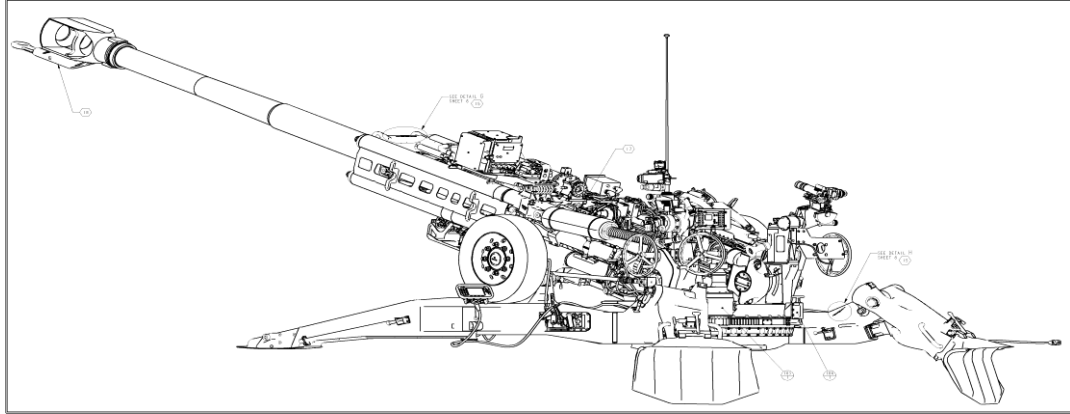
Obüsler en genel halde monte edildiği platforma yani taşınma ve hareket kabiliyetine göre aşağıdaki şekilde iki gruba ayrılır:

- çekili obüs
- kundağı motorlu obüs

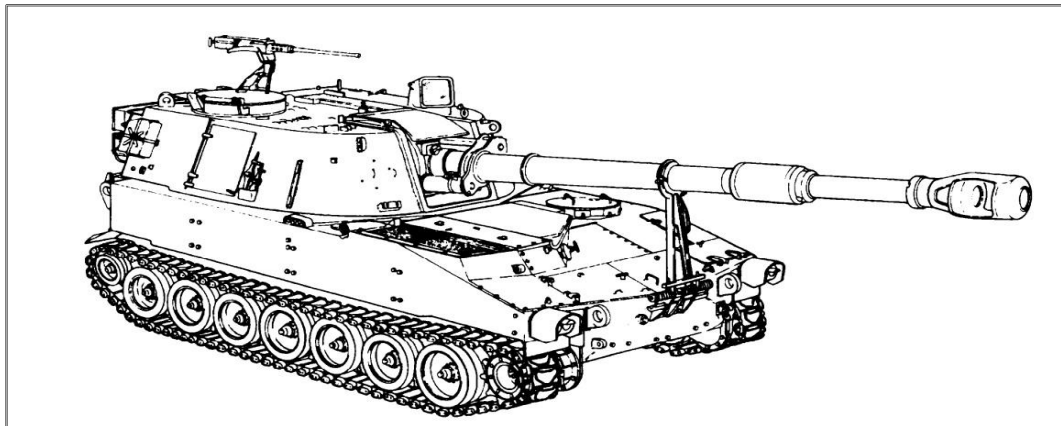
Şekil 2.1'de bir çekili obüs görülmektedir. Çekili obüsler operasyon sahasına bir araç arkasında transfer edilir. Bazı çekili obüs modelleri (T-155 Panter Çekili Obüs) yardımcı bir motor yardımıyla kısa mesafeleri kat etme özelliğine sahiptir. Genel anlamda manevra kabiliyetinin kısıtlılığı ve operasyon alanında mobilitesinin zorluğu sebebiyle çekili obüsler askeri unsurlar tarafından çok fazla tercih edilmemektedir.

Kundağı motorlu obüsler ise (Şekil 2.2) özellikle manevra kabiliyeti ve gelişmiş atış kontrol sistemleri sayesinde operasyon sahasında yüksek bir atış gücü sağlamaktadır. Mühimmat depolama özelliği ve personelin güvenliğini artıran zırh yapısı ile bu tür silahlar topçu birlikleri açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir.

Bu tez kapsamında 39 kalibre 154,94 mm namlu iç çapına sahip Makina ve Kimya Endüstri Kurumu yapımı L39 tip kundağı motorlu obüs silah sistemine ait namlunun kendi kendine ateşleme süresi analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Ağır silah namlularında kalibreden kasıt namlu boyunun namlu çapına oranıdır ($6037/154.94=39$). İlerleyen bölümlerde bu obüs silah sistemine ait parçalar tanıtılmıştır.



Şekil 2.1. Çekili obüs (M777/ABD) [27]



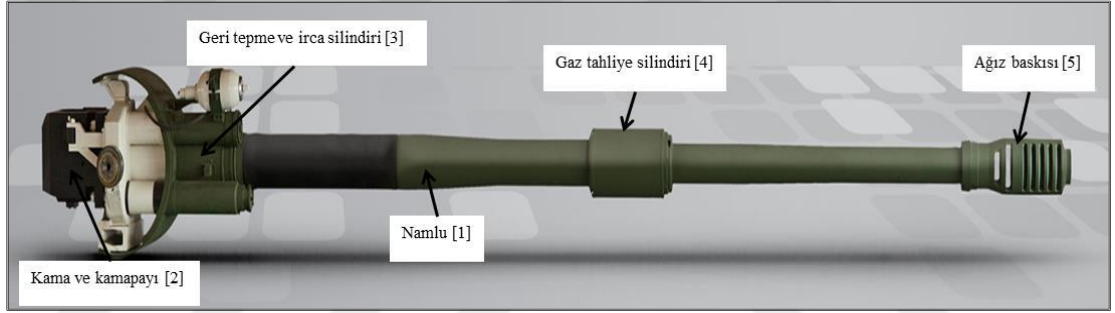
Şekil 2.2. Kundağı motorlu obüs (M109A6 Paladin/ABD) [28]

2.1. Obüs Şeması ve Kısımları

Şekil 2.3'te obüs ağır silah sistemine ait parçalar gösterilmiştir. Bu silah sistemi genel olarak

- 1) namlu,
- 2) kama ve kamapayı,
- 3) geri tepme ve irca silindiri,
- 4) gaz tahliye silindiri ve
- 5) ağız baskısı

olmak üzere 5 temel parçadan ve bunlarla ilişkili alt parçalardan oluşur.

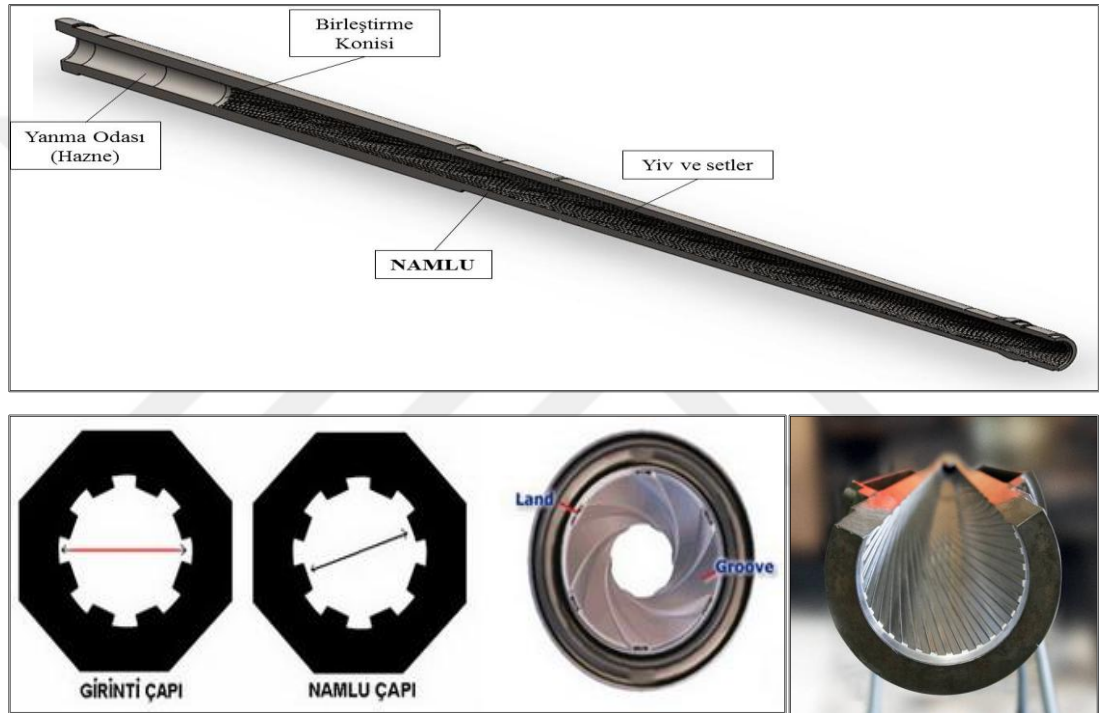


Şekil 2.3. Obüs silah sistemi [29]

2.1.1. Namlu

Namlu bir silah sisteminin en önemli parçasıdır. Tipik bir namlunun kesit görünümü Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Genel olarak namlu, mühimmatın hedefe belirli bir namlu çıkış hızıyla gönderilmesini sağlayan, kalın cidarlı bir silindir [30]. Namlularda, sevk barutu keselerinin veya kovanlı mühimmatların yerleştirildiği, sevk barutunun yanması sonucu oluşan yüksek basınca ve ısı gerilmelere maruz kalan yanma odası olarak adlandırılan bölge mevcuttur. Ayrıca namlularda, yanma odası ile namlu iç çap alanını birleştiren, mühimmata barut gazlarına karşı direnç oluşturup hareketini engelleyen, bu sayede basınç artışı ile istenilen namlu çıkış hızına ulaşılmasını sağlayan birleştirme konisi mevcuttur.

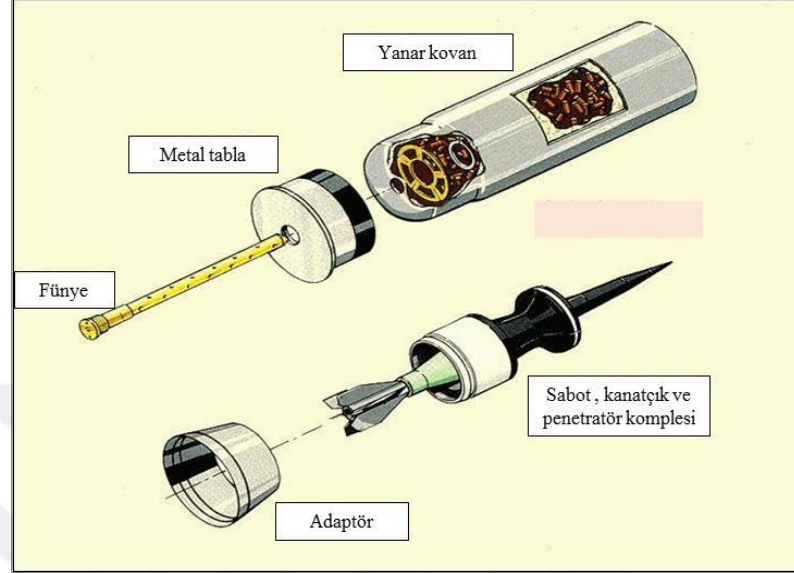
Namlular yivli ve yivsiz olmak üzere iki gruba ayrılır. Yivli namlularda yiv ve set olarak isimlendirilen belirli geometrik ölçülere sahip, spiral görünümlü oyuntu ve çıkıntılar mevcuttur (Şekil 2.4). Bu yapıların temel amacı namlu, içindeki mühimmatın dönüsel dengesini artırarak mühimmatın hedefe sapmadan ve isabetli bir şekilde gönderilmesini sağlamaktır. Silah namluları içerisinde bulunan yiv ve setler özel tezgâhlarda, her döngüsünde belirli bir miktarda talaş kaldıran yivset çakıları yardımıyla oluşturulur.



Şekil 2.4. Namlu ve yiv-setler

Diğer bir namlu çeşidi ise yivsiz namludur. Bu gruba giren namlularda kinetik ve kimyasal enerjili mühimmat kullanılır. Bu tür namlularda kullanılan mühimmatlarda dönüsel dengelyi sağlamak için kanatçıklı yapılar mevcuttur. Kinetik enerjili mühimmatların en yaygın olarak kullanılanı APFSDS (Armour-Piercing Fin-Stabilized Discarding Sabot) mühimmatlarıdır (Şekil 2.5) Bu mühimmatlarda kanatçıklarla dengelenen yüksek yoğunluklu delici çubuk (penetratör), bu delici

çubuğu namlu ağzına kadar ivmelendiren hafif alaşımlardan üretilen sabot, sevk barutu haznesi ve ateşleyici kısmı içeren metal tabla mevcuttur.



Şekil 2.5. Kinetik enerjili mühimmat [31]

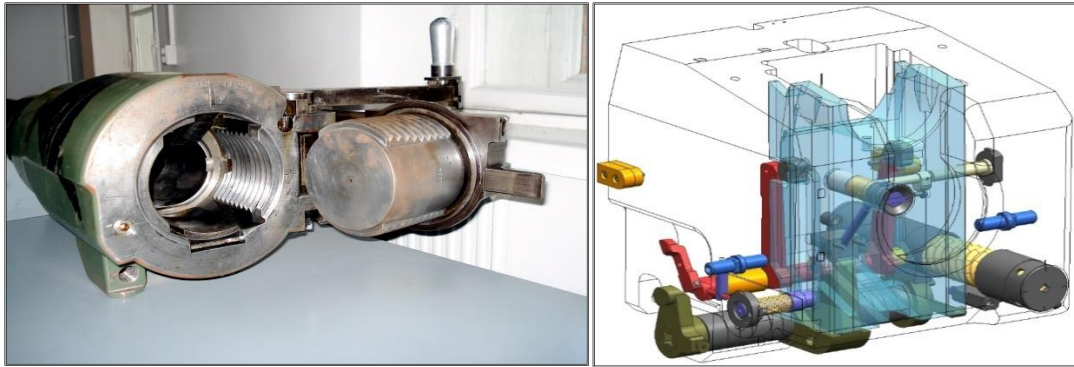
Ağır silah namlusu sıcak sevk barutu gazlarının etkisi altında ısıl, kimyasal ve mekanik yüklemelere maruz kalmaktadır. Sıcak sevk barutu gazlarına ciddi şekilde maruz kalan kaplamasız namlu çeliğinde, yüzeyin hemen altında ısıl olarak etkilenen bölge Heat Affected Zone şeklinde adlandırılan bir yapı oluşur. Bu bölgeler daha sonra çatlak oluşumuna neden olan “heat checking” [32] yapılarına dönüşür ve seri atışlarla birlikte bu iki yapı giderek ilerler. Buna ek olarak, sıcak sevk barutlarının namlu çeliğine etki etmesiyle birlikte gaz yıkaması olarak adlandırılan termokimyasal atış hasarları da oluşmaktadır [33].

Silah namluları üzerinde ciddi etkilere sahip bir başka olay ise yorulmadır. Bir malzemenin dinamik ve değişken yükler altında, statik dayanım limitinin (çekme mukavemetinin) altındaki yüklerde ilerlemeli hasara uğramasına yorulma denir [34]. Özellikle yüksek basınç ve sıcaklık değerine sahip sıcak sevk barutu gazlarının oluşturduğu yükler altında çalışan silah namlularında yorulma olayı önemli bir yer teşkil etmektedir.

Görüldüğü gibi namlu yapısal dayanımı doğrudan namlunun maruz kaldığı sıcaklık ve basınç yüklemelerine bağlıdır. Namlu yapısal dayanımının artırılmasına yönelik birçok uygulama (kaplama, yorulma ömür artırma yöntemleri) bulunmaktadır.

2.1.2. Kama ve kamapayı

Şekil 2.6’da gösterilen kama mekanizması, mühimmatın atış öncesi yanma odasına (hazneye) yerleştirilmesini sağlayan ve atış esnasında sevk barutunun yanması sonucu oluşan gazlara sızdırmazlık sağlayan parçadır. Bunun yanı sıra kama mekanizması ateşlemenin sağlanabilmesi için gerekli gücü ve karşı geri tepme esnasında atık kovanın veya dip tablasının dışarı atılmasını sağlar. Kama ayrıca ateşleme mekanizmasını da üzerinde barındırır. Genel anlamda kayar ve vidalı olmak üzere iki tip kama türü vardır. Kullanım açısından seri ve pratik olması nedeniyle kundağı motorlu obüslerde genellikle kayar tip kamalar tercih edilmektedir. Kamapayı ise içerisine yerleştirilen kamaya kılavuzluk eden, atış yüklerini destekleyen parçadır.



Şekil 2.6. Vidalı tip ve kayar tip kama ve kamapayı mekanizması

2.1.3. Geri tepme ve irca sistemi

Geri tepme sistemlerinin amacı çok kısa bir süre (5-25 milisaniye) içinde sevk barutunun yanması ile hazne içerisinde oluşan yüksek balistik kuvvetlerin, daha uzun bir zaman aralığında (0.2-0.5 saniye) ve şiddeti düşürülmüş bir kuvvet olarak araca iletilmesini sağlamaktır [25].

Silah sistemlerinde kullanılan geri tepme sistemleri kendi bünyesinde birçok alt parçaya sahiptir. Genel anlamda geri tepme sistemleri şu ana kısımlardan oluşur [25]:

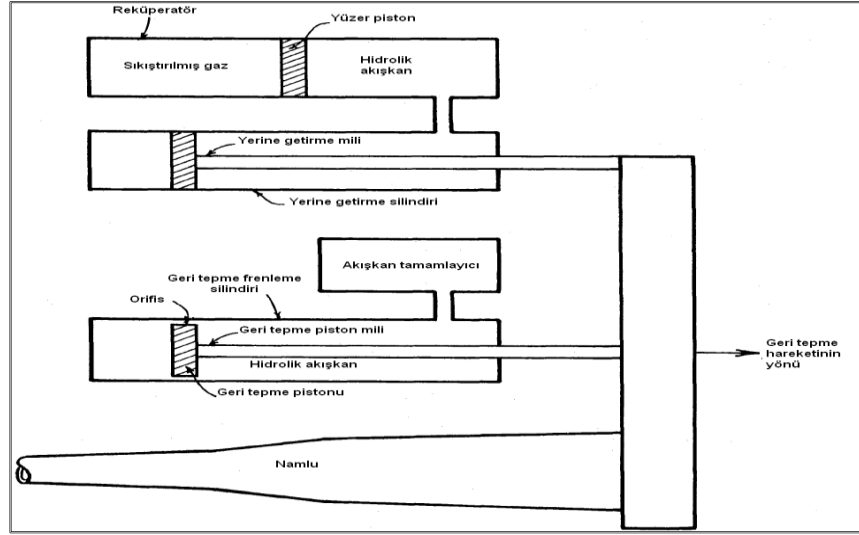
- Geri tepen parçaları durduran frenleme sistemi,
- Geri tepen parçaları tekrar atış pozisyonuna getiren sistem,
- Yerine getirmede yumuşak bir hareket sağlayan yastıklama sistemi

Geri tepme frenleme sistemi; içerisinde frenlemeyi sağlayan akışkan bulunan hidrolik silindir ve piston mekanizmalarından meydana gelir.

Yerine getirme sistemi; bir reküperatör ve yerine getirme silindir kompleksinden meydana gelir. Bu sistemde reküperatör silah sistemini tekrar atış pozisyonuna getirme görevi için enerji depolar. Pnömatik sistemlerde ise gazın sıkışması sonucu elde edilen enerji bu görev için kullanılır.

Yastıklama sistemi; genel anlamda yerine getirme görevi esnasında silah sistemlerinde oluşabilecek çarpmaları engellemek amacıyla tasarlanmıştır. Bu sistemin olmadığı uygulamalarda kayan yüzeyler ile conta ve keçelerde meydana gelen sürtünme kuvveti bu görevi görmektedir.

Kundağı motorlu ve çekili obüs sistemlerinde çoğunlukla hidropnömatik tip geri tepme ve irca sistemi kullanılır (Şekil 2.7). Bu tip geri tepme sistemlerinde hidrolik akışkan ve sıkıştırılmış gaz (çoğunlukla kuru azot gazı) kullanılır. Geri tepme esnasında reküperatörde sıkışan gaz frenlemeyi sağlar, yerine getirmede ise bu gaz genişleyerek geri tepen silah parçalarını atış pozisyonuna getirir [25,35].

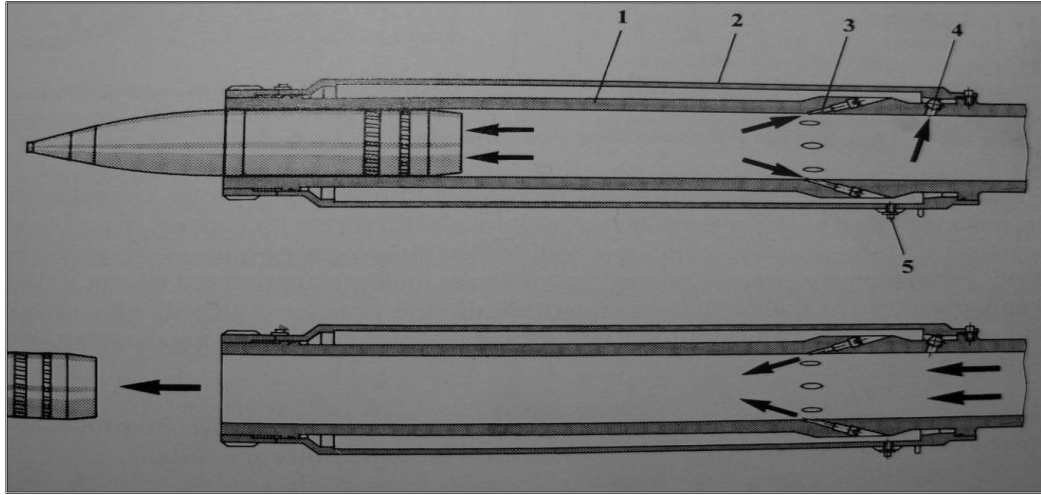


Şekil 2.7. Hidropnömatik geri tepme ve irca sistemi [35]

2.1.4. Gaz tahliye silindiri

Gaz tahliye silindiri, yarı-otomatik kama sistemine sahip kundağı motorlu obüslerde ve tanklarda kullanılan bir silah sistemi parçasıdır (Şekil 2.8). Gaz tahliye silindiri ateşlemeden sonra oluşan sevk barutu gazlarını tahliye ederek mürettebatın bu gazlardan etkilenmesinin önüne geçer.

Gaz tahliye silindirinin çalışma mekanizması şu şekildedir. Bir silah ateşlendiğinde ve mühimmat gaz tahliye silindiri üzerinde bulunan tahliye deliklerini geçtiğinde, sevk barutu gazlarının bir kısmı yüksek bir basınç oluşturarak gaz tahliye silindirine dolar. Mühimmat namluyu terk ettiğinde, basınç aniden düşer. Namlu içinde basıncın düşmesiyle gazlar, gaz tahliye silindiri içinde bulunan, namlu ağzına doğru eğimli olarak imal edilmiş delikler yardımıyla, gaz tahliye silindirinden namlu iç kısmına doğru yönelir. Bu esnada kama açılır ve temiz hava namlu içine dolar. Namlu içine giren bu temiz hava, gaz tahliye silindirinin bulunduğu kısımda, gaz tahliye deliklerinden namlu içine yönelen sevk barutu gazlarını namlu ağzına doğru yönelmesine yardımcı olur. Böylece sevk barutu gazları namlu uç kısmından tahliye edilmiş olur [36].

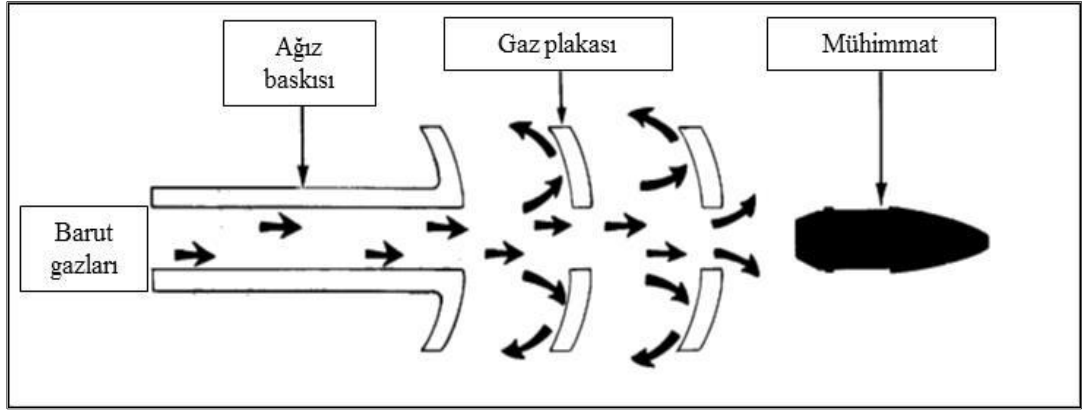


Şekil 2.8. Gaz tahliye silindiri

2.1.5. Ağız baskısı

Ağız baskısı namlu uç tarafına yerleştirilen, silindirik tasarıma sahip olan bir silah sistemi parçasıdır (Şekil 2.9). Ağız baskısı ortasından mühimmat geçecek büyüklükte merkezi bir deliğe ve gazların yönlendirilmesine sağlayan bir veya birkaç tane gaz plakasına sahiptir. Ağız baskısının temel görevi geri tepme kuvvetini azaltmaktır.

Mühimmat silah namlusunu terk ettiğinde, yüksek hıza sahip gazlar ağız baskısı üzerinde bulunan gaz plakalarına çarpar ve geriye doğru yönelir. Sevk barutu gazları gaz plakalarına çarptığında, namlu üzerinde geri tepme kuvvetine ters yönde bir etki oluşturur ve böylece geri tepme kuvveti azaltılmış olur [35,37]. Ağız baskısının geri tepme kuvvetini %10 ile %50 arasında azalttığı ve silahın bir sonraki atış için hassasiyetini, dolayısıyla atış isabet oranını artırdığı bilinmektedir [30].



Şekil 2.9. Ağız baskısı



2.2. Obüs Mühimmatı

Mühimmatlar sevk barutlarının namlu haznesine yerleştirilme biçimlerine göre sınıflandırılırlar ve

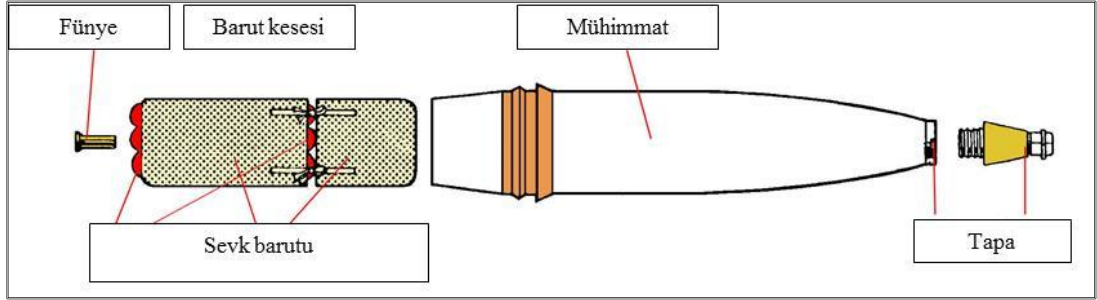
- kartuşlu,
- hartuçlu,
- sabit hartuçlu ve
- keseli

olmak üzere 4 ana gruba ayrılırlar [38].

Tez kapsamında çalışılan obüs namlusu, keseli mühimmatlar sınıfına girmektedir. Şekil 2.10’da keseli mühimmata ait bir şema gösterilmiştir. Bu tür mühimmatlarda kovan bulunmaz. Sevk barutu atış mesafesine göre tasarlanmış keseler içerisinde yerleştirilmiştir. Tam atım olarak ifade edilen mühimmat

- sevk barutu,
- fünye,
- mühimmat, ve
- tapa

parçalarından oluşur ve atıştan önce yanma odası içinde birleştirilir.



Şekil 2.10. Keseli mühimmat şeması [39]

Tez kapsamında PRODAS programında iç balistik hesaplamalarda kullanılan mühimmat türü M549 RAP (Rocket Assisted Projectile)’dir ve Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Bu M549 RAP mühimmatı, uzak hedefler (>30 km) için

tasarlanmış roket destekli, yüksek patlayıcı miktarına sahip bir mühimmat türüdür [40]. Roket mekanizması mühimmatın dip tarafına yerleştirilmiştir. Roket, silah ateşlendikten sonra hemen sonra piroteknik ateşleme ile 7 saniyelik bir gecikme ile aktif hale gelir. Bu gecikme zamanı, roket motoruna mühimmatı daha uzak mesafelere ulaştırma imkânı sağlar.

Şekil 2.11 gösterilen M549 RAP mühimmatı aşağıdaki ana kısımlardan oluşur:

Tapa: Mühimmat içindeki patlayıcı ve kimyasalları aktif hale getiren bir mekanizmadır. Kullanım amaçlarına göre zaman ayarlı, gecikmeli, çarpma ve elektronik olan sınıflandırılmıştır.

Ogive: Mühimmatın ön tarafında bulunan, mühimmata dış balistik kuvvetlere karşı burun direnci sağlayan eğimli kısımdır.

Gövde: Mühimmatın en büyük bölümünü oluşturur. Gövde patlayıcı maddenin bulunduğu bölümdür.

Sevk çemberi: Mühimmatın namlu içinde bulunan yiv ve setlere eşleşmesini sağlayan, sevk barutunun yanması sonucu açığa çıkan gazların mühimmatın ön kısmından dışarı kaçmasını engelleyerek sızdırmazlık görevi göre şerit metaldir. Sevk çemberi, mühimmat namlu içinde harekete geçmeden önce gerekli direnç kuvvetini sağlar. Sevk çemberi namlu içine darbeli bir şekilde yerleştirildiğinden, bakır, naylon gibi yumuşak malzemelerden imal edilir.

Dip: Sevk çemberinin arkasında bulunan konik bölümdür.



Şekil 2.11. M549 RAP mühimmatı [40]

2.3. Obüs Mühimmatı Sevk Barutu

Ateşli silahlarda enerji kaynağı olarak düşük yanma hızına sahip (≈ 0.3 mm/s) patlayıcılar kullanılması gerekmektedir. Aksi takdirde, ani patlama neticesinde oluşan yüksek basınç namlunun parçalanmasına neden olabilir. Bu durumdan dolayı ateşli silahlarda düşük yanma hızına sahip patlayıcılar (sevk barutları) kullanılır [38].

Sevk barutu, düşük yanma hızına sahip, tutuşma sıcaklığı 2000-3000°C arasında değişen, 1000 kcal/kg'a kadar enerji verebilen, 5000 kg/cm²'ye kadar namlu içi basıncı sağlayabilen maddelerdir [42,43]. Obüslerde mühimmatların ateşlenebilmesi için kullanılan sevk barutları, atış menziline göre çeşitli renk ve büyüklükte barut keseleri içerine yerleştirilmiştir. Sevk barutları mühimmat namluya yerleştirildikten sonra bir fünüye yardımıyla ateşlenir. Şekil 2.12'de askeri amaçlı sevk barutları ve bir obüs mühimmatı gösterilmiştir. Askeri amaçlı olarak M3 (yeşil kese), M3A1 (yeşil kese), M4 (beyaz kese), M4A1 (beyaz kese), M4A2 (beyaz kese), M119 (beyaz kese), M119A1 (beyaz kese), M119A2 (kırmızı kese), M203 (kırmızı kese) ve M203A1 (kırmızı kese) türü sevk barutları mevcuttur.



Şekil 2.12. Askeri amaçlı sevk barutları ve obüs mühimmatı [41]

3. İÇ BALİSTİK ANALİZİ

Tez kapsamındaki kendi kendine ateşleme süresi ve atış sayısının hesaplanabilmesi için namlu içindeki barut gazları ile namlu iç yüzeyi arasındaki ısı akısının bilinmesi gereklidir. Bu ısı akısı, özellikle barut gazı sıcaklığı, hızı ve basıncına bağlıdır. Namlu içindeki sıcaklık, hız ve basıncın hesaplanması ise iç balistiğin konusudur. Bu bölümde ısı akısının hesaplanmasında kullanılacak olan namlu içi maksimum basınç (P_{max}) ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) değerleri incelenen namlu ve mühimmat için PRODAS iç balistik programı kullanılarak hesaplanmıştır.

İç balistik, sevk barutunun ateşlendiği andan mühimmatın namluyu terk ettiği ana kadar namlu içinde gerçekleşen olayları inceleyen bilim dalıdır [44]. İç balistik, namlu tasarımına ve gaz basıncına bağlı olarak sevk barutunun yanması ve mühimmatın namlu içerisindeki hareketi esnasında oluşan birçok karmaşık kimyasal ve fiziksel olayla ilgilenir. Belirtilen bu olaylar neticesinde ulaşılmak istenen, namlu içinde bulunan mühimmata gerekli namlu çıkış hızı ve istenilen dönünün kazandırılmasıdır. İç balistik konusıyla ilgili birçok detaylı çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. Birçok yarı-ampirik denklem geliştirilmesine rağmen iç balistik ile ilgili tüm hesapların doğruluğu gelişmeye açık bir alan olarak kendini muhafaza etmektedir. Tüm iç balistik hesaplarının açık bir şekilde yapılabildiği açık bir kaynağa ulaşılamamıştır.

Namlu içinde oluşan iç balistik olaylar şu şekildedir. Sevk barutu ateşlendiğinde, çok hızlı bir yanma gerçekleşir. Yanma ile barutun kimyasal enerjisi ısı enerjisine dönüşür. Yüksek sıcaklık ve basınçta barut gazı açığa çıkar. Böylece, mühimmatın arkasında bulunan kapalı hacimdeki gaz sıcaklığı ve basıncı çok hızlı bir şekilde artar.

Basınç, mühimmatın bulunduğu sevk çemberinin yiv-setler üzerinde oluşturduğu direnci yenecek kadar artar ve mühimmat aniden hızlı bir şekilde ivmelenir. Basıncın sevk çemberi direncini yenip mühimmatı harekete geçirdiği andaki değerine, eşik basıncı (shot-start pressure) adı verilir.

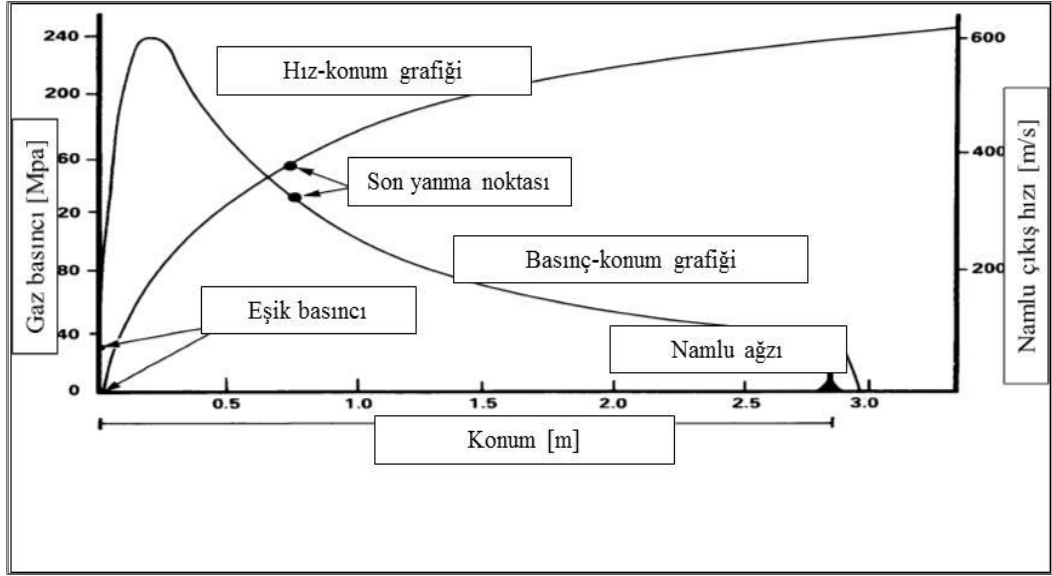
Mühimmat ileri doğru hareket ederken mühimmatın arkasındaki hacim artmaya başlar, bu durum yanan barutun oluşturduğu basıncın yükselme oranını

azaltır. Namlu içi basınç ve sıcaklığın namlu boyunca tipik değişimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Sıcak sevk barutu gazlarının oluşturduğu basınç artışı, mühimmatın arkasında artan hacim ile oluşan basınç düşüşü tarafından dengelendiğinde, maksimum basınç seviyesine ulaşılmış olur. Esasen mühimmat, basınç belli bir değere ulaşmadan önce çok kısa bir mesafe kat eder. Daha sonra basınç giderek azalmaya başlar. Mühimmat arkasındaki hacim artarken sıcak sevk barutu gazları da oluşmaya devam ettiğinden mühimmatın ilerleme hızı, hızlı bir şekilde artmaya devam eder.

Kısa bir süre sonra, sevk barutunun tamamen yandığı ve sıcak gaz oluşumun sona erdiği bir noktaya ulaşılır. Bu pozisyon son yanma noktası (all-burnt) olarak adlandırılır. İç hacimdeki artış, basınçta hızlı bir düşüşe neden olur. Fakat mühimmatın hızı azalan bir oranda artmaya devam eder.

Mühimmat namluyu tamamen terk ettiğinde, sıcak gazlar çok yüksek basınçla namlu ağzından tahliye edilir. Namlu ağzına yakın kısımda, akış halindeki gazlar mühimmattan daha fazla bir hıza sahiptir, bunun sonucunda bu gazlar mühimmatın önüne doğru yönelir. İzafi hız açısından, mühimmat geriye doğru hareket ediyormuş gibi gözlemlenir. Bu olay mühimmatın namluyu terk ettikten birkaç santimetre uzaklıkta mühimmatın tabanında şok dalgalarının oluşmasından dolayı açıkça gözlemlenir. Barut gazlarının akışından dolayı oluşan bu etki mühimmata ek bir kararlılık sağlar, bundan dolayı maksimum hıza namlu ağız kısmından ziyade namlu ağız kısmından biraz ötede ulaşılır. Sıcak sevk barutu gazları bu aşamadan sonra hızlı bir şekilde hızını kaybeder ve mühimmat oluşan bu gaz akışını namlu ağzından birkaç santimetre uzaklıktaki mesafede geride bırakarak yoluna devam eder. Bu olay ise orta balistiğin (terminal balistik) konusuna girmektedir. Bundan sonra, dış balistik olaylarda oluşan kuvvetler mühimmat üzerine etki etmeye başlar [37].

Tez kapsamında obüs ağır silah namlusu üzerindeki sıcaklık dağılımı incelenerek kendi kendine ateşleme süresi ve atış sayısı belirlenmiştir. İç balistik hesaplarından elde edilecek namlu içi maksimum basınç (P_{max}) ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) değerleri ısı akışı hesabında kullanılacaktır. İç balistik hesapları için PRODAS paket programı kullanılmıştır. Aşağıda PRODAS programı ile yapılan iç balistik hesapları hakkında bilgiler verilmiştir.



Şekil 3.1. Namlu içi basınç ve hızın tipik olarak namlu boyunca değişimi [42]

3.1. İç Balistik Hesaplamalar

Tez kapsamında iç balistik hesaplamalar PRODAS iç balistik analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. PRODAS (Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis System) iç balistik analizlerin gerçekleştirildiği bir programdır. PRODAS programı iç balistik hesaplamaları yaparken, arka planda 1962 yılında Baer ve Frankle'nin önerdiği Modifiye edilmiş Baer-Frankle kodunu kullandığı belirtilmektedir [45]. Bu programda namlu içinde sevk barutunun yanması ile harekete geçen mühimmatın hızı ve konumu hesaplanmaktadır. Bunlara ek olarak, iç balistik döngünün süresi, sevk barutu gazlarının yanması sonucu namlu içinde ve mühimmatın arkasında oluşan dip basıncı, oluşan barut gazlarının namlu eksenini boyunca sıcaklık değişimi ve yivsetlerin mühimmatın hareketi esnasında oluşturduğu direnç kuvvetine karşılık gelen direnç basıncı da PRODAS çıktılarında bulunmaktadır [42,46].

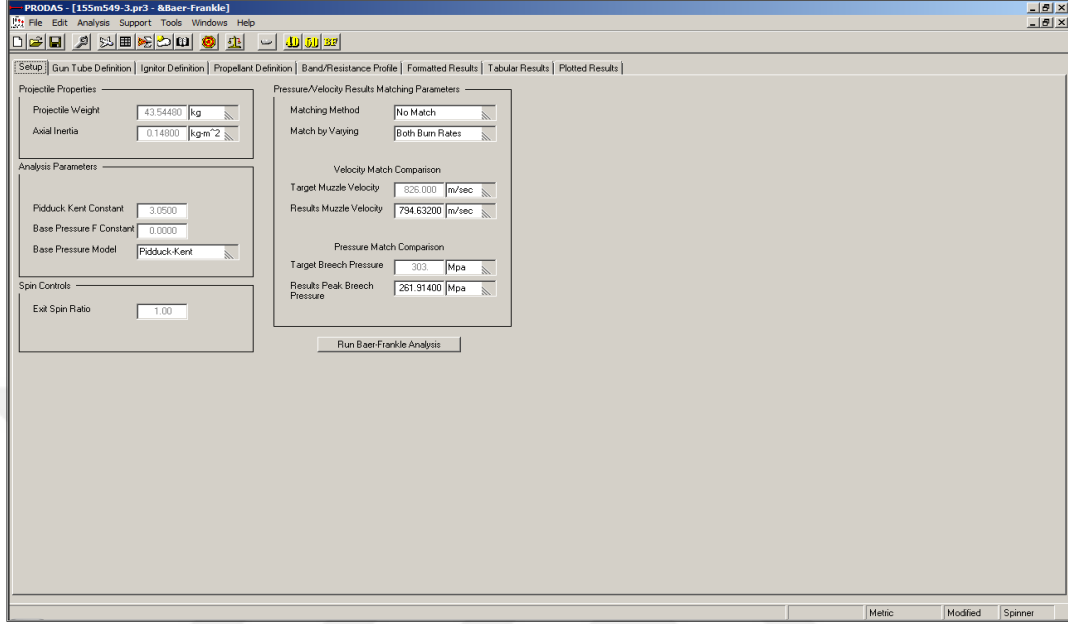
PRODAS programının arayüzü Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu programda ilk tanımlamalar "Setup" kısmında yapılmaktadır. Bu kısımda ilk olarak kullanılan M549 RAP ağır silah mühimmatı program kütüphanesinden seçilerek programa tanıtılmaktadır. Burada, mühimmatın tabanında oluşan dip basıncının hesabı için Pidduck-Kent sabiti ve namlu çıkışındaki dönü oranı tanımlı olarak kullanılmamaktadır. Ayrıca bu kısımda, sevk barutu olarak kullanılan M30'un referans değeri olan namlu içi maksimum basınç ve mühimmat namlu çıkış hızı değerleri görülmektedir. Bu kısımdaki değerler Çizelge 3.1'de listelenmiştir.

Ardından programın "Gun Tube Definition" kısmında 155 mm 39 kalibre obüs ağır silah namlusunun geometrik bilgileri tanımlanmıştır (Şekil 3.3). Bu bilgiler Çizelge 3.1'de listelenmiştir.

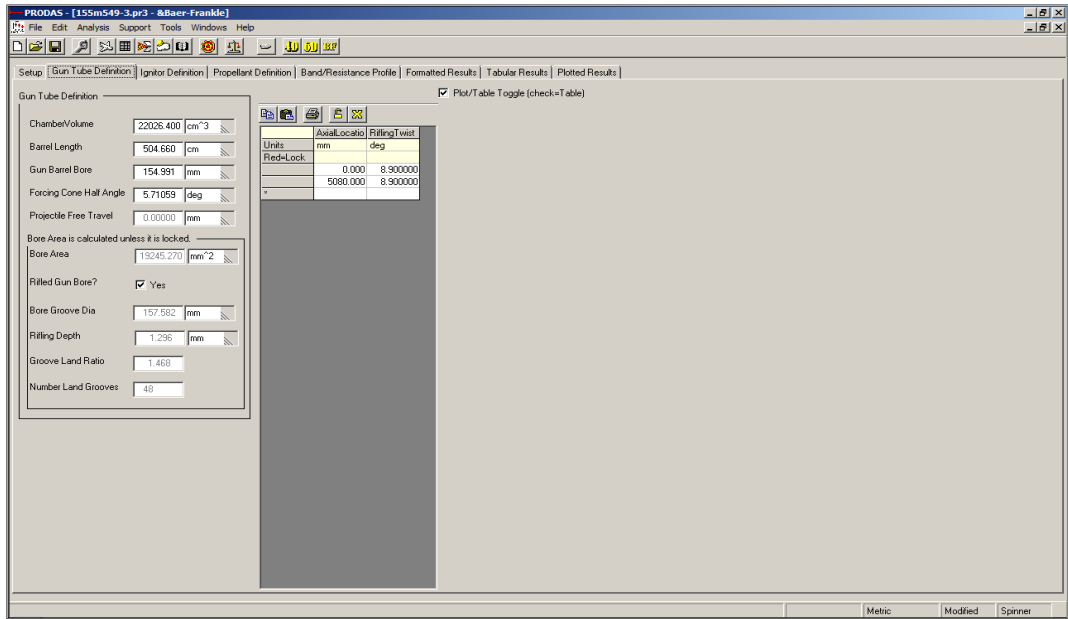
Programın "Ignitor" arayüzünde sevk barutunun yanması için tahrik görevi gören M82 ateşleyici, program kütüphanesinden seçilmiştir. Ateşleyicinin kimyasal ve fiziksel özellikleri program tarafından kütüphanesinden alınmıştır. M82 ateşleyiciye ait özellikler Çizelge 3.1'de listelenmiştir.

Son aşamada analiz kapsamında obüs ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresi hesabında kullanılan M30 sevk barutu, "Propellant Definition" arayüzünde program kütüphanesinden seçilmiş ve M30'a ait fiziksel ve kimyasal

özellikler program tarafından kütüphanesinden alınmıştır. M30 sevk barutuna ait özellikler Çizelge 3.1’de listelenmiştir.



Şekil 3.2. PRODAS programı “Setup” arayüzü



Şekil 3.3. PRODAS programı “Gun Tube Definition” arayüzü

Çizelge 3.1. PRODAŞ programı parametre değerleri

PRODAŞ Programı Parametreleri			
Setup			
1	M549 RAP mühimmat ağırlığı	kg	43,5448
2	Eksenel atalet	kg-m ²	0,148
3	Pidduck-Kent sabiti		3,05
4	Dip basıncı F sabiti		0
5	Mühimmat çıkış dönü oranı		1
6	Maksimum namlu çıkış hızı	m/s	826
7	Maksimum namlu iç basıncı	MPa	303
Gun Tube Definition			
1	Yanma odası hacmi	mm ³	22,026,000
2	Namlu yivset uzunluğu	mm	5046
3	Namlu set çapı	mm	154,99
4	Birleştirme konisi yarı açısı	°	5,71
5	Namlu iç çap alanı	mm ²	19245,27
6	Namlu yiv çapı	mm	157,582
7	Yiv derinliği	mm	1,296
8	Yiv-set oranı		1,468
9	Yiv ve set sayısı	adet	48
10	Yivset helis açısı	°	8,9
11	Namlu uzunluğu	mm	6037
12	Tapa ile beraber mühimmat uzunluğu	mm	874
Ignitor Definition			
1	M82 ateşleyici ağırlığı	kg	0,0862
2	Enerji miktarı	MJ/kg	0,8718
3	Gama		1,2
4	Alev sıcaklığı	K	2800
Propellant Definition			
1	M30 sevk barutu ağırlığı	kg	11,7934
2	Gecikme zamanı	s	0.01
3	Enerji miktarı	MJ/kg	1,09
4	Gama		1,25
5	Eşhacim (Colume)	cm ³ /g	1,0575
6	Alev sıcaklığı	K	3040,01
7	Yoğunluk	g/cm ³	1,6608
8	Yanma oranı eksponenti		0,67
9	İlk yanma oranı	cm/s/bar	0,0686
10	son yanma oranı	cm/s/bar	0,0686
11	Eğim		0
12	Hesaplanmış önleyici sabiti	cm/s/bar/cm	0
13	Sevk barutu tipi		7 delikli
14	Tane çapı	mm	9,5301
15	Tane uzunluğu	mm	8,89
16	Barut örgü kalınlığı	mm	2,0015
17	Delik sayısı	mm	7
18	Delik çapı	mm	0,508
19	Bant yoğunluğu	g/cm ³	8,304
20	Eşik basıncı	MPa	5,6399

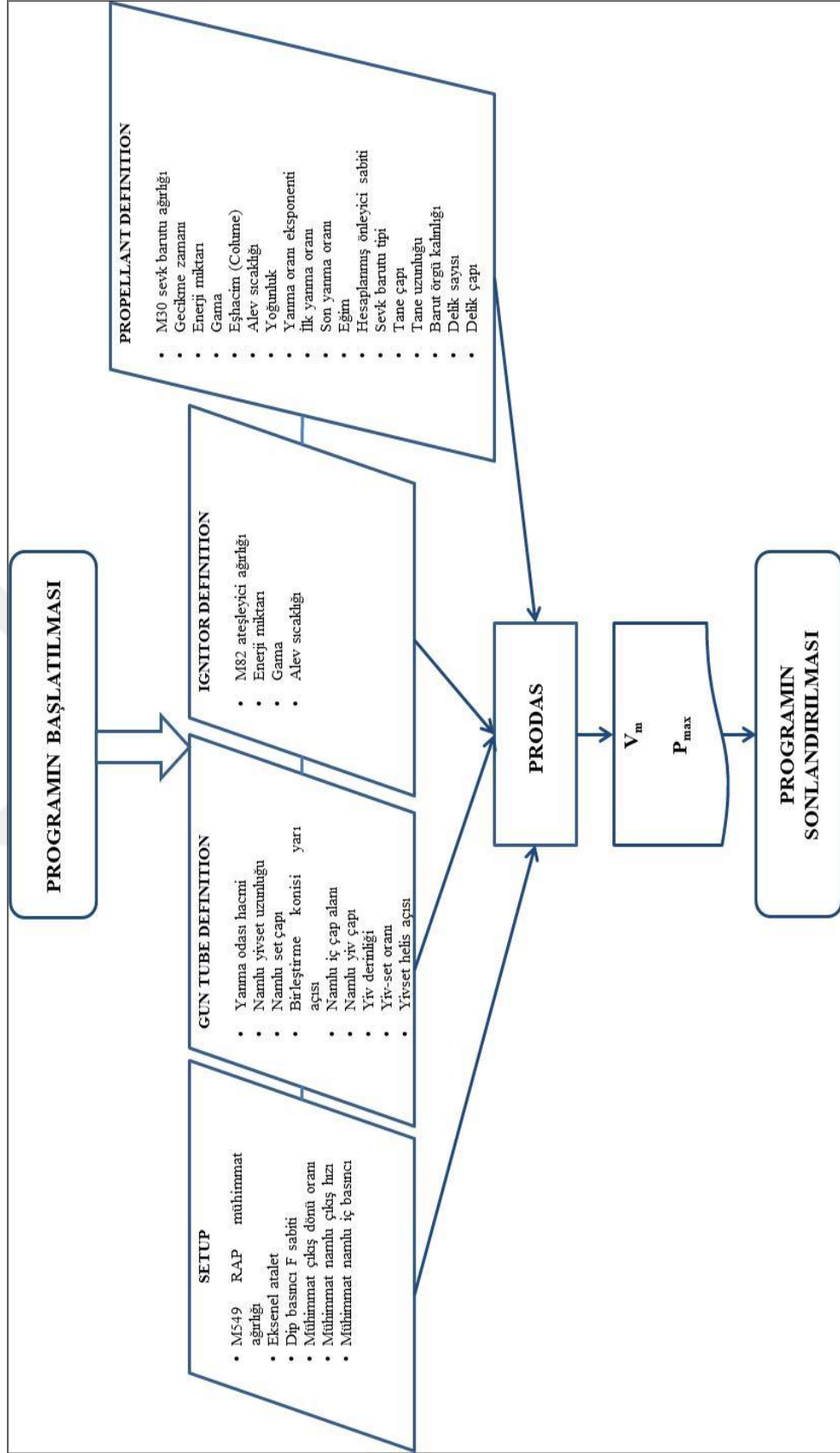
PRODAS programında incelenen namlu ile ilgili tüm parametreler tanımlandıktan sonra program çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. PRODAS programında “Formatted Results” arayüzünde, iç balistik analiz sonunda elde edilen sonuçlar okunmuştur. Sonuçlar Çizelge 3.2’te listelenmiştir.

Analiz sonunda, “Plotted Result” arayüzünde, basınç-zaman, basınç-konum, hız-zaman, hız-konum, sıcaklık-zaman ve sıcaklık-konum eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki bölümde verilmiştir.

Çizelge 3.2. PRODAS programı iç balistik analizi sonuçları

Parametre	Birim	Maks. basınca ulaşıldığı an	Namlu ağız
Zaman	ms	17,55	25,29
Mesafe	mm	491,73	5046,6
Hız	m/s	283,3	794,6
İvme	G.s	10102	3112
Kuruk(kama) basıncı	MPa	262	86
Mühimmat dip basıncı	MPa	231	76
Ortalama sıcaklık	K	2794	2080
Sevk barutu kütle kesri	1	0,469	0,986
Namlu çıkışındaki impuls	Ns	-	39796,3
Patlama esnasındaki impuls	Ns	-	7414,2
Toplam impuls	Ns	-	47210,6

Şekil 3.4’te tez kapsamında çalışılan obüs ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresinin hesaplamalarında kullanılan namlu içi maksimum basınç (P_{max}) ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) değerlerinin PRODAS programı yardımıyla hesaplanırken izlenen analiz adımları akış şeması olarak gösterilmiştir.



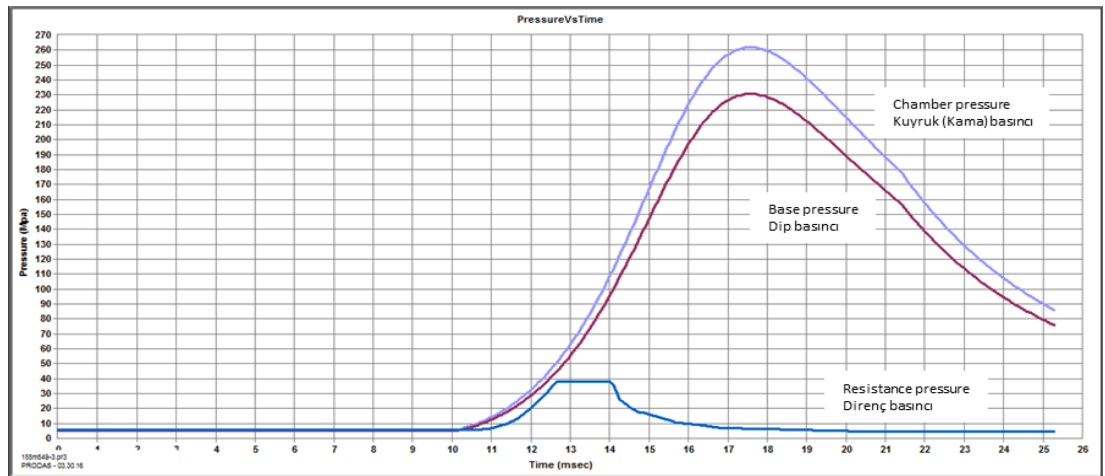
Şekil 3.4. PRODAS programı iç balistik hesaplama akış şeması

3.2. İç Balistik Analiz Sonuçları

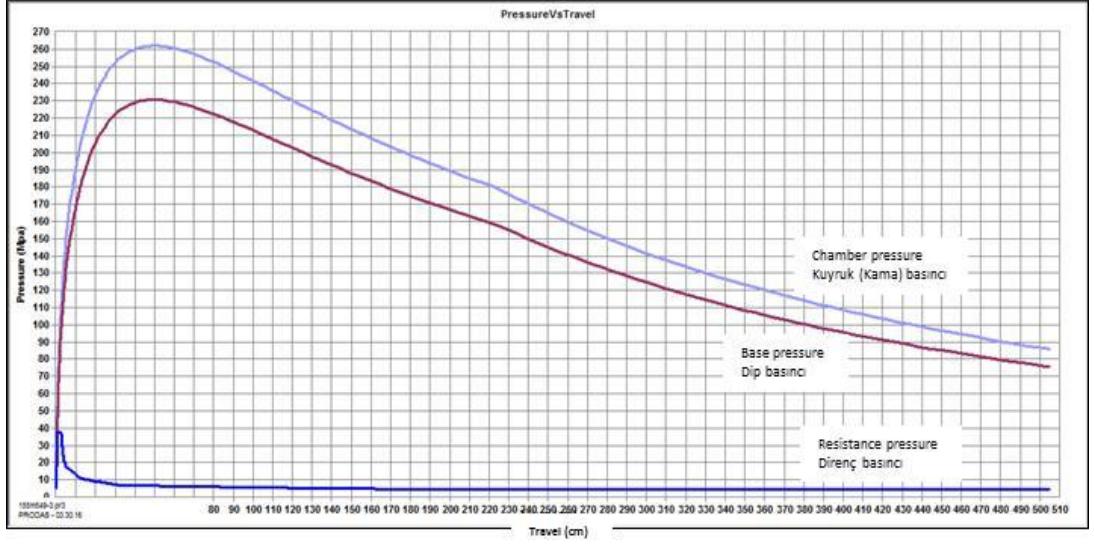
PRODAS iç balistik analiz programı ile Bölüm 3.1’de belirtilen program adımları takip edilerek yapılan analiz sonucunda basınç-zaman (Şekil 3.5), basınç-konum (Şekil 3.6), hız-zaman (Şekil 3.7), hız-konum (Şekil 3.8), sıcaklık-zaman (Şekil 3.9) ve sıcaklık-konum (Şekil 3.10) eğrileri elde edilmiştir.

PRODAS analizi sonucunda elde edilen basınç-zaman grafiğinde; kuyruk (kama) basıncı, mühimmat dip basıncı ve direnç basıncı değişimleri Şekil 3,5’te çizilmiştir. Isı akısı hesaplarında kullanılacak olan kuyruk basıncı; ilk 10,1 milisaniye süresinde 5,034 MPa mertebesinde sabit kalmakta, bundan sonraki süreçte ise sevk barutunun hızlı bir şekilde yanması ile hızla artmaktadır. Bu basınç 17,5 milisaniyede en yüksek değeri olan 262 MPa’ya ulaşmaktadır. Namlu içerisinde bulunan sevk barutunun tamamen yanmasından sonra, namlu içinde mühimmatın hareketi ile toplam hacmin artmasıyla, basınç azalmaya başlamıştır ve namlu ağzında bu basınç 85,9 MPa’ya düşmüştür. Burada, ısı akısı hesaplarında kullanılacak namlu içi maksimum basınç (P_{max}) değeri 262 MPa olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.6’da verilen basınç-konum eğrisi incelendiğinde, oluşan maksimum basınca namlu içerisinde yivset başlangıcından 491,7 mm mesafede ulaşıldığı görülmektedir. 5046,6 mm olan namlu ağzı mesafesinde ise basınç 85,9 MPa’ya düşmektedir.

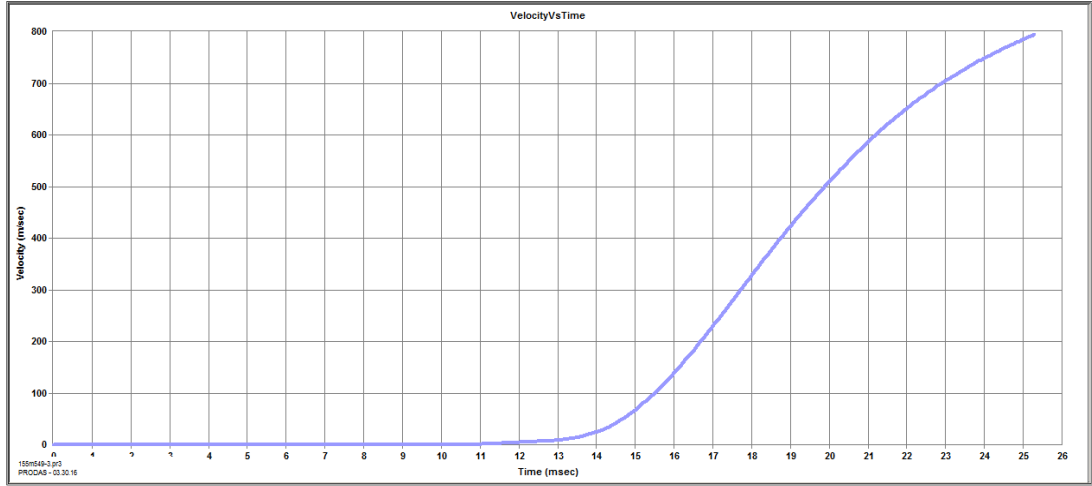


Şekil 3.5. Basınç-zaman eğrileri

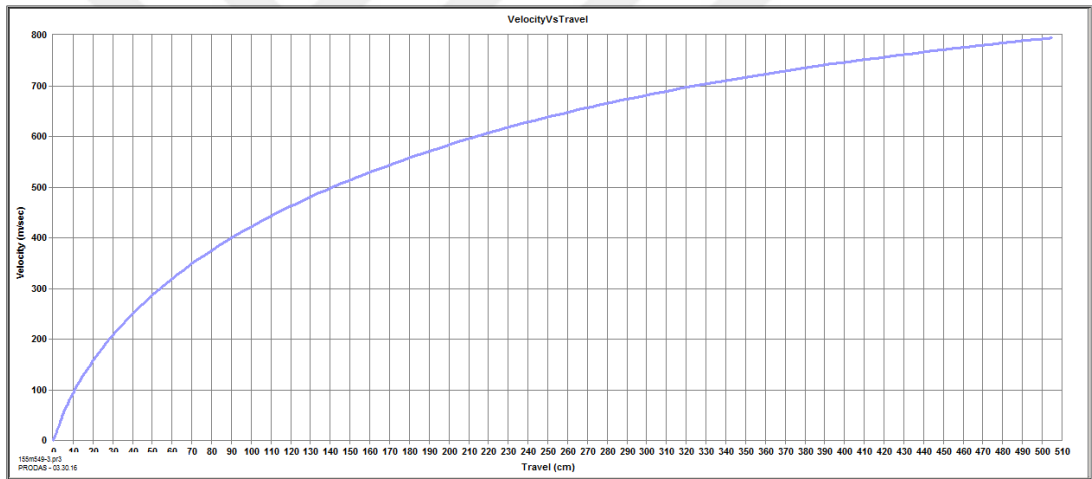


Şekil 3.6. Basınç-konum eğrileri

Namlu içindeki mühimmat için hız-zaman grafiği Şekil 3.7’de çizilmiştir. Mühimmatın ilk 10,2 ms’de namlu içinde hareketsiz kaldığı görülmektedir. Bu sürede sevk barutunun yanması sonucu yanma odasında basınç ve sıcaklık kademeli olarak artmaktadır. Namlu içindeki basınç mühimmat üzerinde bulunan sevk çemberinin yivsetlere uyguladığı direnç kuvvetini yendiği anda, mühimmat sevk çemberi yiv ve setleri üzerinden dönülü olarak harekete başlar. Namlu içinde 25 ms’lik iç balistik döngü sonunda mühimmat namlu çıkış hızı 794,6 m/s değerine ulaşır ve mühimmat namluyu terk eder ki bu hız ısı akısı hesaplarında mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) olarak kullanılmıştır. Şekil 3.8’de gösterine hız-konum eğrisi incelendiğinde, mühimmat hızı namlu çıkışına kadar yaklaşık parabolik olarak artmaktadır. Namlunun son yarısındaki hızdaki artış daha azdır.



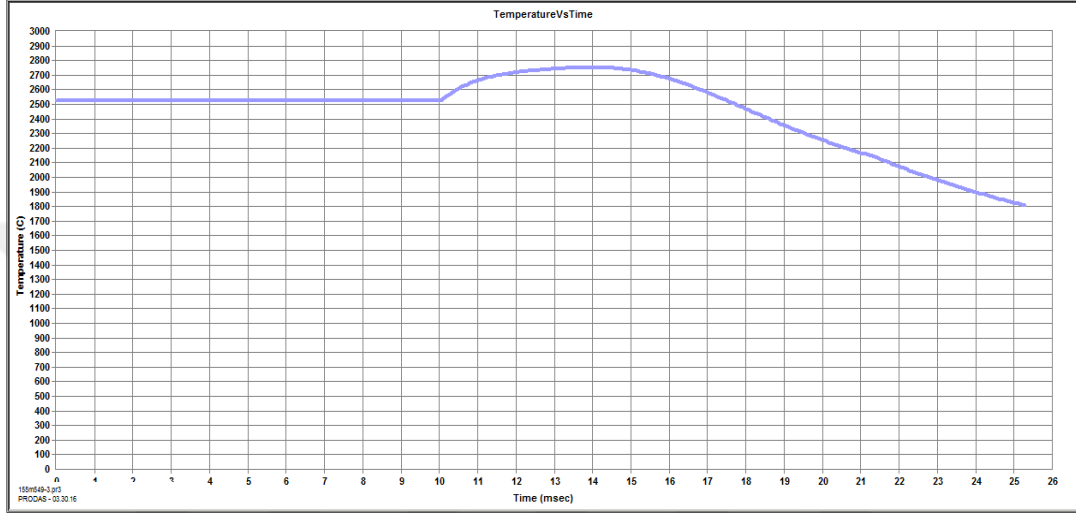
Şekil 3.7. Hız-zaman eğrisi



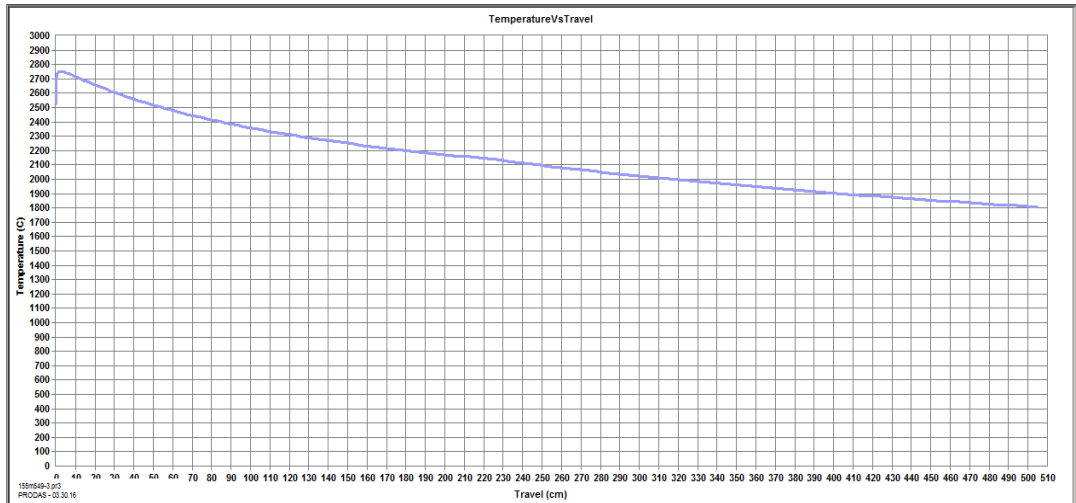
Şekil 3.8. Hız-konum eğrisi

Sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 3.9’da çizilmiştir. Namlu içinde barut gazı sıcaklığı sevk barutunun yanması ile 10,05 ms’de 2526,9 K’de sabit kalmaktadır. Sevk barutunun yanması ile artan sıcaklık ve dolayısıyla artan basınç mühimmatı harekete geçirdiğinde oluşan hacim genişlemesinin yanma hızına olumlu katkısı sıcaklığın bir miktar artmasına neden olmuştur. 14,1 ms sonunda sıcaklık maksimum değere (2752,1 K) ulaşmaktadır. Ardından, iç balistik döngü sonuna kadar azalmakta ve 1800 K’e düşmektedir.

Şekil 3.10’da sıcaklık-konum eğrisi çizilmiştir. Sevk barutunun yanması ile oluşan barut gazlarının sıcaklığı, namlu yivset başlangıç noktasından yaklaşık 6 mm mesafede 2752,1 K değerine ulaştığı görülmektedir. Sevk barutunun tamamen yanması sonucunda bu noktadan sonra sıcaklık namlu uç kısmına doğru azalmaktadır.



Şekil 3.9. Sıcaklık-zaman eğrisi



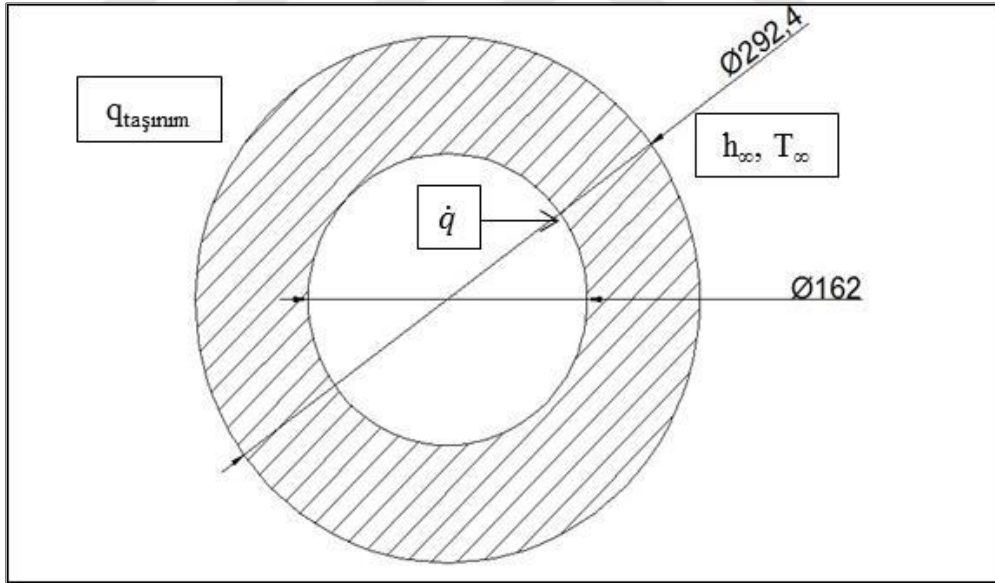
Şekil 3.10. Sıcaklık-konum eğrisi

Böylece, PRODAS programında yapılan iç balistik analizlerinden ısı akısı hesaplarında kullanılacak namlu içi maksimum basınç (P_{max}) değeri 262 MPa ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) 794,6 m/s olarak hesaplanmıştır. Devam eden bölümde namlu kendi kendine ateşleme süresi analitik olarak hesaplanmıştır.



sıcaklığın en yüksek olacağı kritik kesit yanma odasının ikinci yarısında olmaktadır [1] ki burası aynı zamanda sevk barutunun olduğu bölgedir ve kendi kendine ateşleme için kritik kesittir. Bundan dolayı, sıcaklığın radyal yönde tek boyutlu ve zamana bağlı olduğu kabulünün yapılabildiği bu kritik kesit, kendi kendine ateşleme süresinin hesabı için literatürde birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [1,13,14,16,19,21,22,47].

Şekil 4.1’de gösterilen inceleme yapılacak namlu için, kendi kendine ateşleme süresinin belirlenebilmesi için analizde kullanılacak kesit kama bölgesinden 898 mm mesafede bulunan bölge olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de gösterilen bu kesitte namlu iç çapı $\text{Ø}162$ mm, namlu dış çapı $\text{Ø}292,4$ mm’dir. Kendi kendine ateşleme esnasında, namlu yanma odası içinde bulunan sevk barutu bu bölgeden başlayarak ateşlenmeye başlar ve bu ateşleme olayı namlu arka yüzeyine doğru ilerler. Bu kritik yer aynı zamanda kendi kendine ateşleme pozisyonu olarak da tanımlanır [1].



Şekil 4.2. Analizde kullanılacak 2-boyutlu namlu kesiti ve sınır şartları

Burada, namlu sıcaklığının sadece radyal yönde ve zamana bağlı değiştiği kabulü, aksenal yöndeki ısı iletiminin radyal yöndeki iletme göre ihmal edildiği anlamını taşır ki bazı deneysel çalışmalar bu durumu desteklemektedir [1,10,21].

Referans kaynaklarda [37,42] sevk barutunun yanması sonucu oluşan ısı enerjisinin yaklaşık %2'sinin, sevk çemberi ve namlu iç yüzeyi arasında sürtünmeden kaynaklı enerji kaybını karşılamak için kullanıldığı belirtilmektedir. Bu nedenle tez kapsamında sevk çemberi ile mühimmat arasında sürtünmeden kaynaklanan ısınma ihmal edilmiştir [1,7,8,9,10]. Namlu yanma odasına yerleştirilen sevk barutu kesesi elyaftan yapılmıştır ve ısı transferine herhangi bir etkisi olmayacak kadar ince olduğundan ihmal edilmiştir.

Şekil 4.2'de gösterilen silindirik koordinatlarda radyal yönde tek boyutlu ve zamana bağlı ısı iletimi problemi için namlu ısı özelliklerinin (k , ρ , c_p) sabit alınması durumunda geçerli ısı iletimi denklemi aşağıdaki hali alır.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4.1)$$

Burada; r ; r_i namlu iç yarıçapından r_o namlu dış yarıçapına kadar değişen yarıçap, k ; ısı iletim katsayısı, ρ ; yoğunluk, c_p ; özgül ısı, ve α ; ısı yayılım katsayısıdır.

Şekil 4.2'de gösterilen geometri için iç ve dış yüzeylerdeki sınır şartları ve başlangıç şartı aşağıda yazılmıştır.

$$t=0 \quad \text{için} \quad T=T_i=293 \text{ K} \quad (4.2)$$

$$r=r_i \quad \text{için} \quad -k \frac{\partial T}{\partial r} = h_g (T_g - T_{in}) = q_{in} \quad (4.3)$$

$$r=r_o \quad \text{için} \quad -k \frac{\partial T}{\partial r} = h_\infty (T_o - T_\infty) \quad (4.4)$$

Burada;

h_g : Namlu iç yüzeyi ile sıcak sevk barut gazları arasındaki ısı taşınım katsayısı, $W/(m^2K)$

h_∞ : Namlu dış yüzeyi ile çevre arasındaki ısı taşınım katsayısı, $W/(m^2K)$

T_g : Ortalama namlu kesitindeki gazların sıcaklığı, K

T_{∞} : Dış çevre sıcaklığı, K

T_{in} : Namlu iç yüzey sıcaklığı, K

T_o : Namlu dış yüzey sıcaklığı, K

q_{in} : Namlu iç yüzeyindeki taşınım ile oluşan ısı akısı, W/m^2

olarak tanımlanmıştır.

Namlu iç yüzeyindeki sınır şartı olarak denklem 4.3'de yazıldığı gibi taşınım ile ısı geçişi veya eşdeğeri olan ısı akısı kullanılabilir. Taşınım sınır şartı kullanılması durumunda barut gazı sıcaklığının ve namlu iç yüzey sıcaklığının bilinmesi yanında ısı taşınım katsayısını da bilinmesi gerekir. Isı akısının bilinmesi de bu denklemlerin çözümünde kullanılabilir. Gerek taşınım ve gerekse ısı akısının belirlenmesi ile ilgili birçok analitik ve deneysel çalışma bulunmaktadır [1,10,48,49,50]. Bu tez çalışmasında ısı akısı sınır şartı tanımlaması kullanılmıştır. Isı akısının değeri literatürde verilen yarı-ampirik denklemler ile incelenen namluya ait parametreler kullanılarak hesaplanmış ve kullanılmıştır.

Namlu üzerindeki radyal yöndeki zamana bağlı sıcaklık dağılımını temsil eden bu kısmi türevli diferansiyel denklemin ilgili sınır şartları altında kapalı formda analitik bir çözümü elde edilememektedir. Bu tez kapsamında, uygulama kolaylığı açısından bu diferansiyel denklem SEM ile Ansys programında çözülmüştür.

Ayrıca, toplam kütle yaklaşımı ile de aşağıda açıklandığı gibi analitik çözüm elde edilmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Toplam kütle yaklaşımının kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Öncelikle, bu analitik hesaplarda ve SEM modelinde sınır şartı olarak kullanılacak olan ısı akısı takip eden alt bölümde hesaplanmıştır.

4.1. Isı Akısının Hesaplanması

Yukarıda verilen namlu ısı transferi denklemlerinin (denklem 4.1-4) çözümü için namlu içinden birim alandan olan ısı akısının bir sınır şartı olarak bilinmesi gerekir. Bu ısı akısı, ateşleme ile sevk barutunun yanması ile oluşan sıcak gazlar ile namlu iç yüzeyi arasındaki taşınım ısı transferi ile gerçekleşen ısı akısıdır. Namlu iç yüzeyi bu ısı akısına ateşlemeden itibaren mühimmat namluyu terk edene kadarki zaman aralığına karşılık gelen balistik döngü boyunca maruz kalır. Isı akısının değeri taşınım ısı transferi mekanizmasını oluşturan ısı taşınım katsayısına ve gaz sıcaklığı ile namlu iç yüzey sıcaklığı arasındaki farka bağlıdır. Namlu boyunca veya balistik döngü süresince namlu içindeki gazın sıcaklığı ve basıncı değişmektedir. Ayrıca, gazın özellikle hızı da değişmektedir. Dolayısıyla, ısı taşınım katsayısının ve bunun oluşturduğu ısı akısının hesaplanması milisaniyeler mertebesinde çok kısa sürede değişen birçok parametreye bağlıdır. Bu ısı akısının hesaplanması için Lawton tarafından verilen yarı-ampirik denklem yaygın olarak kullanılmaktadır [48]. Bir balistik döngüde yani birim atışta birim alana transfer edilen ısı enerjisi Lawton tarafından verilen aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$H_{\infty} = k \frac{(T_{\max} - T_i)}{1,082} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} t_0 \quad (4.5)$$

Burada;

H_{∞} : Birim atışta birim alana transfer edilen ısı, J/m^2

k : Isı iletim katsayısı, W/mK

T_{\max} : Maksimum namlu iç yüzey sıcaklığı, K

T_i : Namlu ilk sıcaklığı, K

t_0 : Zaman sabiti

α : Isıl yayılım katsayısı, m^2/s

Burada t_0 zaman sabitidir. Zaman sabiti, namlu içinde oluşan sıcaklık dalgalanmasının yivset başlangıç bölgesinde ölçülmesiyle belirlenir ve Lawton tarafından aşağıdaki denklem ile hesaplanabileceği verilmiştir [48].

$$t_0 = \frac{0,8 \times m_r \times V_m}{P_{\max} \times d^2} \quad (4.6)$$

Burada;

m_r : Mühimmat ağırlığı, kg

V_m : Mühimmat namlu çıkış hızı (ilk hız), m/s

P_{\max} : Namlu içi maksimum basınç, Pa

d : Namlu iç çapı, m

Zaman sabitini hesaplamak için kullanılan değerler Çizelge 4.1’de listelenmiştir. Buradaki namlu içi maksimum basınç (P_{\max}) ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) iç balistik hesaplarının yapıldığı PRODAS programında hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Zaman sabiti hesabında kullanılan denklemlerin sabitleri

Sembol	Parametre	Değer
m_r	Mühimmat ağırlığı, kg	43,5448
V_m	Mühimmat namlu çıkış hızı, m/s	794,6
P_{\max}	Namlu içi maksimum basınç, Pa	262×10^6
d	Namlu iç çapı, m	0,162

Çizelge 4.1’deki değerler ile zaman sabiti aşağıda hesaplanmıştır.

$$t_0 = \frac{0,8 \times m_r \times V_m}{P_{\max} \times d^2} = \frac{0,8 \times 43,5448 \times 794,6}{262 \times 10^6 \times (0,162^2)} = 4,0257 \times 10^{-3} [s]$$

Denklemler 4.5 ile verilen ısının hesaplanabilmesi için ($T_{\max} - T_i$) sıcaklık farkına gerek vardır. Bu sıcaklık farkının hesabı için Thornhill tarafından önerilen aşağıdaki yarı ampirik denklem kullanılmaktadır [48,50].

$$\frac{T_f - T_i}{T_{\max} - T_i} = 1,7 + 670 \frac{d^{2,22}}{m_p^{0,86}} \quad (4.7)$$

Burada;

- T_f : Sevk barutu alev sıcaklığı, K
- T_{\max} : Maksimum namlu iç yüzey sıcaklığı, K
- T_i : Namlu ilk sıcaklığı, K
- d : Namlu iç çapı, m
- m_p : Sevk barutu ağırlığı, kg

Denklem (4.7)'den elde edilen sonuçlar ile deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerlerinin hemen hemen örtüştüğü görülmüştür [50]. Bu denklemin gerçek namlu iç yüzey sıcaklığını ifade etme konusunda oldukça tutarlı olduğu söylenebilir. Silah namlularında toplam ısı transferi hesaplamalarında mühimmat namlu çıkış hızının da (V_m) denkleme dahil edilmesi gerekliliği Putti tarafından ortaya konmuştur ve denklem aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir [50].

$$\frac{T_f - T_i}{T_{\max} - T_i} = 1,7 + 670 \frac{d^{2,22}}{m_p^{0,86}} \sqrt{\frac{900}{V_m}} \quad (4.8)$$

Burada;

- T_f : Sevk barutu tutuşma sıcaklığı, K
- T_{\max} : Maksimum namlu iç yüzey sıcaklığı, K
- T_i : Namlu ilk sıcaklığı, (K
- d : Namlu iç çapı, m
- m_p : Sevk barutu ağırlığı, kg
- V_m : Mühimmat namlu çıkış hızı, m/s

Bu sıcaklık farkını hesaplamak için kullanılan değerler Çizelge 4.2'de listelenmiştir. Buradaki mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) iç balistik hesaplarının yapıldığı PRODAS programında hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. ($T_{\max}-T_i$) değerinin hesaplamasında kullanılan sabitler

Sembol	Parametre	Değer
T_f	Sevk barutu tutuşma sıcaklığı, K	3040,01
T_i	Namlu ilk sıcaklığı, K	293,15
d	Namlu iç çapı, m	0,162
m_p	Sevk barutu ağırlığı, kg	11,7934
V_m	Namlu çıkış hızı, m/s	794,6

Çizelge 4.2'deki değerler ile ($T_{\max}-T_i$) sıcaklık farkı aşağıda hesaplanmıştır.

$$\frac{T_f - T_i}{T_{\max} - T_i} = 1,7 + 670 \frac{d^{2,22}}{m_p^{0,86}} \sqrt{\frac{900}{V_m}}$$
$$\frac{3040,01 - 293,15}{T_{\max} - T_i} = 1,7 + 670 \frac{(0,162)^{2,22}}{(11,7934)^{0,86}} \sqrt{\frac{900}{794,6}}$$
$$T_{\max} - T_i = 857,889 [K]$$

Sonuç olarak; denklem (4.5) ile verilen birim atışta birim alana transfer edilen ısıyı hesaplayabilmek için Çizelge 4.3'te belirtilen değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Birim atışta birim alana transfer edilen ısı hesabı için gerekli sabitler

Sembol	Parametre	Değer
k	Isı iletim katsayısı, W/mK	35
$T_{\max}-T_i$	Sıcaklık sabiti, K	857,889
t_0	Zaman sabiti, s	$4,0257 \times 10^{-3}$
α	Isıl yayınım katsayısı, m^2/s	9×10^{-6}

Çizelge 4.3'deki değerler kullanılarak birim atışta birim alana transfer edilen ısı aşağıda hesaplanmıştır.

$$H_{\infty} = k \frac{(T_{\max} - T_i)}{1,082} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha} t_0} = \frac{35 \times (857,889)}{1,082} \sqrt{\frac{\pi \times 4,0257 \times 10^{-3}}{9 \times 10^{-6}}} = 1.040.273,6 \text{ [J/m}^2\text{]}$$

Bu ısı enerjisi, atış esnasında namlu birim alanından namluya transfer edilen enerji miktarıdır. Bu değer benzer büyüklükteki namlular için literatürde de hesaplanmıştır. Nelson ve ark. [6] 155 mm bir obüs namlusu için deneysel olarak bu ısı enerjisini 1,3 J/mm² ve sayısal olarak 1,5 J/mm² olarak belirlemiştir. Ayrıca, Lawton [10] 155 mm'lik bir ağır silah namlusu için bu ısı enerjisini 0,95 J/mm² olarak belirlemiştir. Hesaplanan 1,04 J/mm² değeri literatürdeki değerler ile uyumludur.

Sevk barutunun yanması sonucu ortaya çıkan ısı akısı (\dot{q}_{in}) namlu iç yüzeyine sınır şartı olarak uygulanacaktır. Bu tez kapsamında incelenen ilgili obüs namlusu, nominal olarak 60 saniyede 6 atış yapabilmektedir. Yani, 10 saniyede 1 atış gerçekleşmektedir. PRODAS programında yapılan iç balistik analizinde, mühimmatın namlu içindeki hareketini 25ms'de tamamladığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, namlu iç yüzeyi 0,025 s boyunca ısı akısına maruz kalmakta ve bir sonraki atışa kadar geriye kalan 9,975 s boyunca ısı akısı olmamaktadır. O halde, namlu iç yüzeyindeki 0,025 s boyunca sınır şartı olarak uygulanacak ısı akısı;

$$q_{in} = \frac{H_{\infty}}{0,025} = \frac{1.040.273,552}{0,025} = 41.610.942,08 \text{ [W / m}^2\text{]}$$

olarak hesaplanır.

Bu ısı akısı değeri aşağıdaki toplam kütle yaklaşımı analitik hesabında ve SEM modelinde sınır şartı olarak kullanılmıştır.

4.2. Toplam Kütle Yaklaşımı ile Analitik Çözüm

Toplam kütle yaklaşımında, herhangi bir zamanda tüm namlu et kalınlığında sıcaklığın aynı olduğu ve sadece zamana göre değiştiği $[T(t)]$ kabul edilmektedir. Bu kabulün geçerliliği için Biot sayısının 0,1'den küçük olması gerekir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, namlu gerçekte iç yüzeyde çok yüksek bir ısı taşınım katsayısına maruz kalırken dış yüzeyde oldukça düşük doğal taşınım olmaktadır. İç yüzeydeki ısı taşınımını etkin olduğundan Biot sayısı hesabında iç yüzeydeki ısı taşınım katsayısının kullanılması daha doğru olur. Bununla birlikte, toplam kütle yaklaşımının vereceği sonuçları görmek açısından bu analitik yöntem kullanılarak kendi kendine ateşleme süresi aşağıda hesaplanmıştır. Literatürde bazı çalışmalarda da namlu için toplam kütle yaklaşımının kullanıldığı görülmüştür [10,21]. Aşağıda toplam kütle yaklaşımı ile analitik çözüm elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmış ve toplam kütle yaklaşımının kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Öncelikle; Biot sayısı namlu dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı kullanılarak aşağıda hesaplanmıştır. Biot sayısı hesaplanırken Çizelge 4.4'deki değerler kullanılmıştır. Namlu dış yüzeyindeki doğal ısı taşınım katsayısı $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir.

Çizelge 4.4. Biot sayısı hesabında kullanılan sabitler

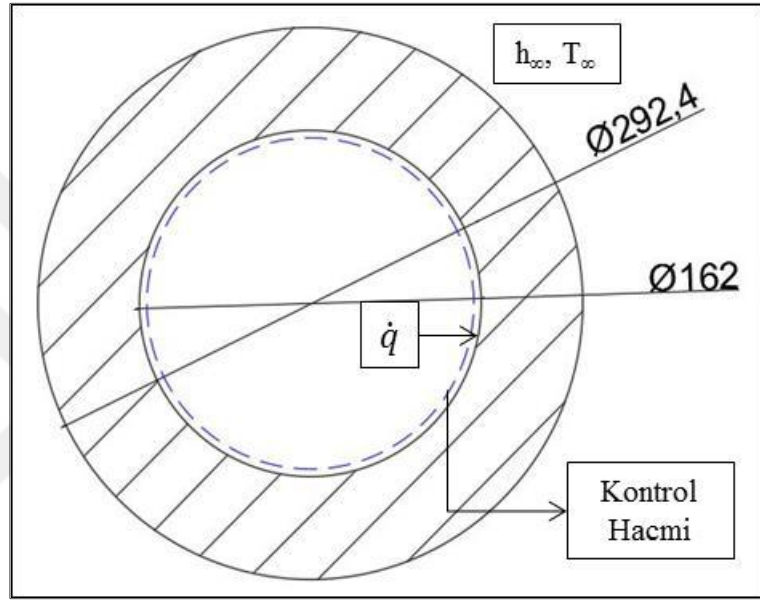
Sembol	Parametre	Değer
h	Namlu dış yüzey ısı taşınım katsayısı, $\text{W/m}^2\text{K}$	6,5
L_c	Karakteristik uzunluk, m	0,050661
k	Isı İletim katsayısı, W/mK	35

Çizelge 4.4'te verilen sabitler kullanılarak Biot sayısı hesaplanırsa:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{6,5 \times 0,050661}{35} = 9,4 \times 10^{-3} < 0,1$$

elde edilir ki bu değer 0,1'den çok küçük olduğu için toplam kütle yaklaşımı geçerlidir denilebilir.

Ancak, namlu iç yüzeyindeki yüksek sıcaklıktaki ve hızdaki gazlardan daha yüksek bir ısı taşınım katsayısı oluşur ki değeri 100000-500000 W/m²K mertebelerinde verilmiştir [3,7,9,50]. Bu değerlere göre Biot sayısı oldukça yüksek olacağından toplam kütle yaklaşımının geçerli olmayacağı görülmektedir.



Şekil 4.3. Toplam kütle yaklaşımı ile namlu ısı analizi

Toplam kütle yaklaşımı literatürde bazı çalışmalarda [21,48] kullanıldığı için bu çalışmada da analitik çözüm yöntemi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.3'de gösterilen tüm namlu kesitini içine alan kontrol hacmi için zamana bağlı enerji dengesi yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir [21].

$$E_g - E_c + E_u = E_d$$

$$qA_i - h_\infty A_0 (T - T_\infty) = mc_p \frac{dT}{dt}$$

Burada; $\theta = T - T_\infty$ dönüşümü yapılır, denklemin her iki tarafı da mc_p 'ye bölünür ve düzenlenerek yazılırsa denklem aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{h_\infty A_0}{mc_p} \theta - \frac{qA_i}{mc_p} = 0 \quad (4.9)$$

Zaman sabiti olarak $t_0 = \frac{mc_p}{h_\infty A_0}$ tanımlaması ve $\theta_\infty = \frac{qA_i}{h_\infty A_0} = \frac{H_\infty R_f A_i}{h_\infty A_0}$

tanımlaması kullanılarak denklem yeniden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{qA_i}{mc_p} = \frac{qA_i}{t_0 h_\infty A_0} = \frac{1}{t_0} \left(\frac{qA_i}{h_\infty A_0} \right) = \frac{\theta_\infty}{t_0} = \frac{\theta_\infty}{mc_p} = \frac{\theta_\infty h_\infty A_0}{mc_p}$$

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{t_0} = \frac{\theta_\infty}{t_0} \quad (4.10)$$

Bu diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde analitik olarak çözülebilir.

Homojen kısmın çözümü:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\theta}{t_0}$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{1}{t_0} dt$$

$$\ln \theta = -\frac{1}{t_0} t + \ln c$$

$$\ln \theta - \ln c = \ln \frac{\theta}{c} = -\frac{t}{t_0}$$

$$\frac{\theta}{c} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad \theta = ce^{-\frac{t}{t_0}}$$

Homojen olmayan kısmın çözümü:

$$\theta_i = a$$

$$0 + \frac{a}{t_0} = \frac{\theta_\infty}{t_0}$$

$$\theta_i = a = \theta_\infty$$

Genel çözüm: Bu çözümlerin toplamı genel çözümü verir.

$$\theta = ce^{-\frac{t}{t_0}} + \theta_\infty \quad (4.11)$$

Başlangıç şartı uygulanarak integrasyon sabiti belirlenir.

$$t=0, \quad T = T_i, \quad \theta_i = T_i - T_\infty$$

$$\theta_i = ce^{-\frac{0}{t_0}} + \theta_\infty \Rightarrow c = \theta_i - \theta_\infty$$

Integrasyon sabiti çözüm denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki analitik çözüm elde edilir.

$$\theta = (\theta_i - \theta_\infty)e^{-\frac{t}{t_0}} + \theta_\infty \quad (4.12)$$

Denklem aşağıdaki şekilde de düzenlenebilir.

$$\frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_i - \theta_\infty} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (4.13)$$

Bu denklem namlu kesitindeki sıcaklığın zamana göre değişimini veren denklemdir.

Namlunun başlangıç sıcaklığından belli bir sıcaklığa ulaşması için gerekli olan süre hesaplanmak istenirse bu denklem kullanılabilir. Bu amaçla denklemde her iki tarafın doğal logaritması alınırsa denklem aşağıdaki hali alır.

$$\frac{t}{t_0} = -\ln\left(\frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_i - \theta_\infty}\right) \quad (4.14)$$

Namlunun atış başlamadan önce başlangıçtaki sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu dikkate alınırsa ($T_i = T_\infty \Rightarrow \theta_i = 0$) denklem aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{t}{t_0} = -\ln\left(1 - \frac{\theta}{\theta_\infty}\right) \quad (4.15)$$

Namlunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı olan (T_c)'ye ulaşana kadar geçen kendi kendine ateşleme süresi (t_c) ise aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$\frac{t_c}{t_0} = -\ln\left(1 - \frac{\theta_c}{\theta_\infty}\right) \quad (4.16)$$

Burada;

t_c : Kendi kendine ateşleme süresi, s

T_c : Sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı, K

T_∞ : Ortam sıcaklığı, K

$$\theta_c = T_c - T_\infty$$

m : Namlu kesit alanının birim derinliğinin kütlesi, kg

c_p : Namlu özgül ısısı, J/(kgK)

h_∞ : Namlu dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı, W/(m²K)

A_i : Namlu iç çap yüzey alanı, m²

A_0 : Namlu dış çap yüzey alanı, m²

R_f : Atış oranı (atış/saniye)

Denklem 4.16 ile verilen kendi kendine ateşleme süresini (t_c) hesaplamak için Çizelge 4.5'teki sabitler kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Toplam kütle yaklaşımı hesabında kullanılan sabitler

Sembol	Parametre	Değer
T_c	Sevk barutu kendi kendine ateşleme sıcaklığı, °C	187
A_i	Namlu iç çap yüzey alanı, m ²	0,010179
A_0	Namlu dış çap yüzey alanı, m ²	0,018372
H_∞	Birim atışta birim alana transfer edilen enerji, J/m ²	1040273,552
D	Namlu dış çapı, m	0,2924
d	Namlu iç çapı, m	0,162
h_∞	Namlu dış yüzey ısı taşınım katsayısı, W/m ² K	6,5
c_p	Özgül ısı, J/kgK	490
l	Namlu birim eleman uzunluğu, m	0,02
ρ	Yoğunluk, kg/m ³	7860
t_0	Zaman sabiti, s	30018,14

Denklem 4.16 ile verilen t_0 aşağıda hesaplanmıştır.

$$t_0 = \frac{mc_p}{h_\infty A_0} = \frac{7860 \times \pi \times (0,2924^2 - 0,162^2) / 4 \times 0,02 \times 490}{6,5 \times \pi \times 0,2924 \times 0,02}$$

$t_0=30018,14$ [s]

Denklem 4.16 ile verilen θ_∞ aşağıda hesaplanmıştır.

$$\theta_\infty = \frac{H_\infty \times A_i \times R_f}{h_\infty \times A_0} = \frac{1040273,552 \times \pi \times 0,162 \times 0,02 \times (6/60)}{6,5 \times \pi \times 0,2924 \times 0,02}$$

$\theta_\infty=8866,88$ [K]

Denklem 4.16 ile verilen kendi kendine ateşleme süresi aşağıda hesaplanmıştır.

$$\frac{t_c}{t_0} = -\ln\left(1 - \frac{\theta_c}{\theta_\infty}\right) \Rightarrow \frac{t_c}{30018,14} = -\ln\left(1 - \frac{187 - 20}{8866,88}\right)$$

$t_c=570$ [s]

Toplam kütle yaklaşımı ile kendi kendine ateşleme süresi 570 s (9,5 dk) olarak hesaplanmıştır. Bu süre 10 saniyede bir atış yapıldığına göre toplam 57 atışa karşılık gelmektedir ki beklenenin üzerinde bir süre ve atış sayıdır. Bu karşılaştırmalar aşağıda sonuēlar kısmında Bölüm 6.2'de yapılmıştır. Toplam kütle yaklaşımı gerēekteki durumu yansıtılmaktan biraz uzaktır.



malzemesi klasik namlu çeliği olan 35NiCrMoV 12-5'dir ve özellikleri aşağıda Çizelge 5.1'de listelenmiştir.

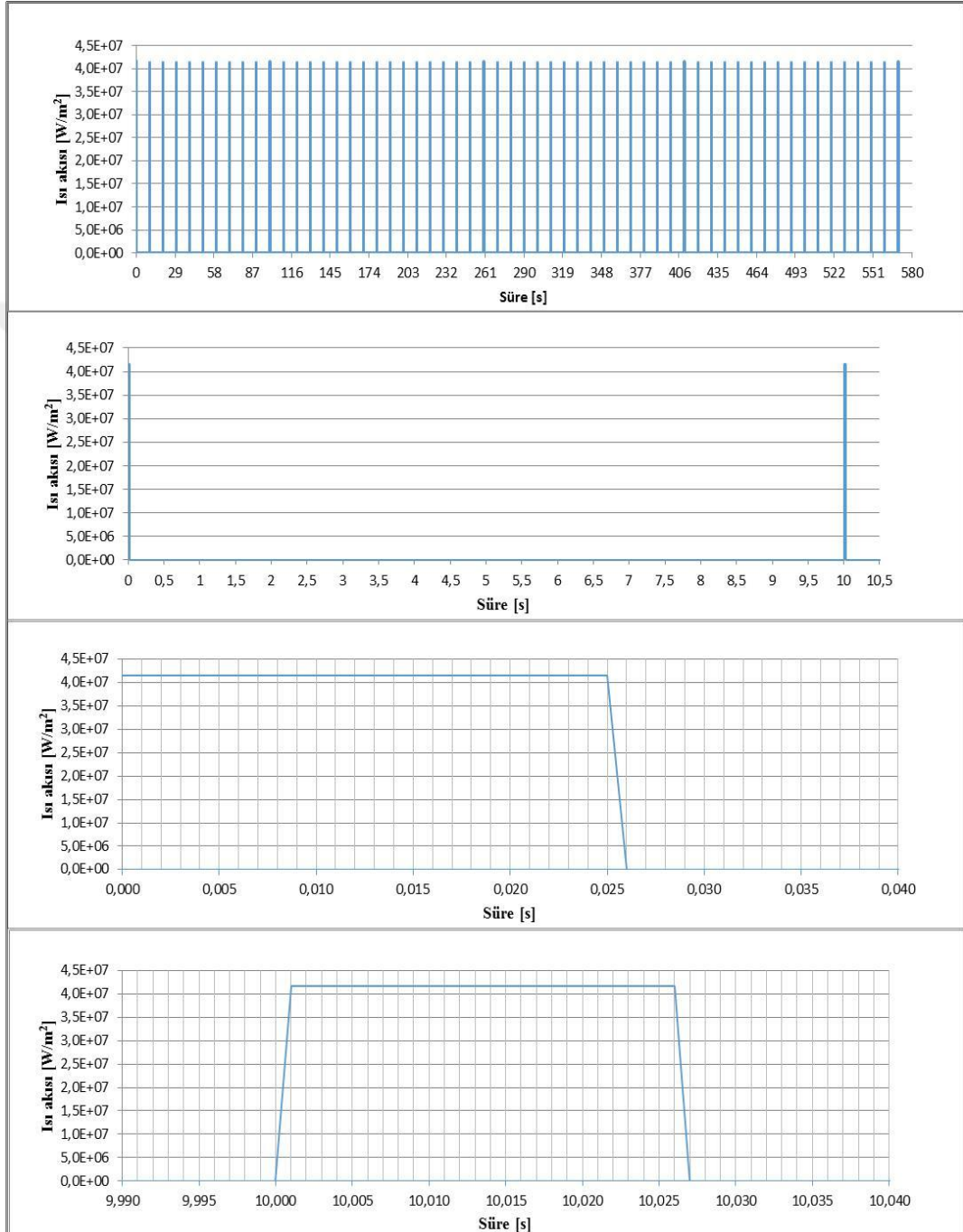
Çizelge 5.1 Namlu malzemesinin termofiziksel özellikleri

Sembol	Parametre	Değer
ρ	Yoğunluk, kg/m^3	7,85
k	Isı iletim katsayısı, W/mK	35
α	Isıl yayılım katsayısı, m^2/s	9×10^{-6}

2-B zamana bağlı namlu SEM modelinde kullanılan sınır şartları Şekil 5.1'de gösterilmiştir ve aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

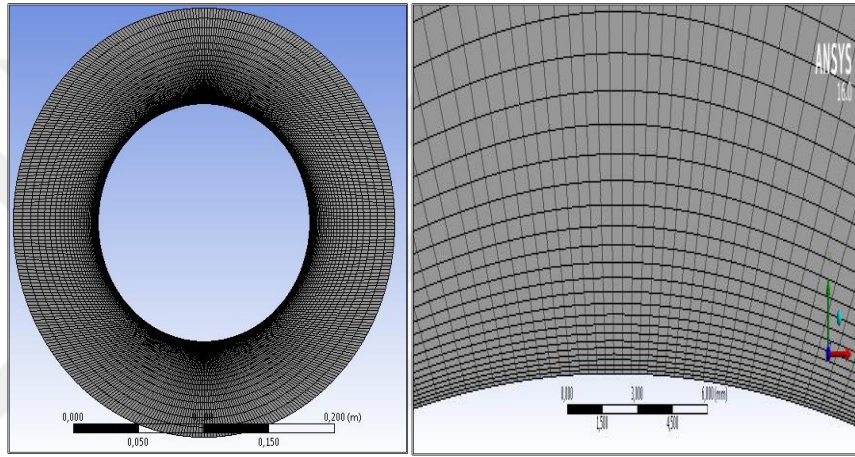
- 1) Zamana bağlı analizde, ilk sıcaklık (initial temperature) olarak 20°C tanımlanmıştır.
- 2) Dış yüzeyde ortama ısı taşınım şartları tanımlanmıştır. Dış yüzeyde ısı taşınım katsayısı $6.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve dış ortam sıcaklığı 20°C olarak alınmıştır.
- 3) Seri atışlar esnasında namlu iç yüzeyi, var ve yok şeklindeki periyodik ısı akısına maruz kalmaktadır. Yukarıda Bölüm 4.1'de hesaplanan ısı akısı iç yüzeyden periyodik sınır şartı olarak tanımlanmıştır. İncelenen namluda nominal atış rejimi olarak 6 atış/dk dikkate alınmıştır. İncelenen namluda 10 saniyede 1 atış yapılması senaryosu söz konusudur. Her bir atış süresi yani ateşlemeden itibaren mühimmatın namluyu terk ettiği süre ise 0,025 saniyedir ki bu süre zarfında namlu iç yüzeyi ısı akısına maruz kalmaktadır ve geriye kalan 9,975 saniye boyunca ısı akısı uygulaması bulunmamaktadır. Her bir atış için 0,025 saniye süresinde oluşan ısı akısı denklem 5.10 ile $41.610.942,08 \text{ W/m}^2$ olarak hesaplanmıştır ki bu değer iç yüzeye periyodik ısı akısı olarak tanımlanmıştır. SEM modelinde tanımlanan bu ısı akısının zamana göre değişimi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Tez kapsamında incelenen ilgili silah namlusunda kullanılan M30 sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı 187°C 'dir [5]. Atış sonunda iç yüzeydeki sıcaklığın bu değere ulaştığı süre SEM analizinde hesaplanmıştır.



Şekil 5.2. Namlu iç yüzeyi ısı akısı sınır şartı

Ağ yapısının (mesh) oluşturulmasında geçici rejimdeki ısı transferi ve anlık ısı akısının uygulandığı sınır şartı dikkate alınmıştır. Namlu içindeki mühimmat ateşlendiğinde ısı transferinin oldukça önemli bir kısmı birkaç milisaniye içinde gerçekleşmektedir. Bu sebeple namlu iç yüzeyi yakınlarında oldukça dik sıcaklık gradyanları oluşmaktadır. 2-B geometrik model için ağ oluşturulurken iç çaptaki bu bölgede daha yoğun bir ağ yapısı kullanılmıştır. Diğer bölgelerde ise nispeten daha seyrek ağ yapısı kullanılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Ağ yapısı 36.990 düğüm noktası (nodes) ve 12.150 eleman (element) içermektedir.



Şekil 5.3. İki boyutlu geometrik model için oluşturulan sayısal ağ yapısı

6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER

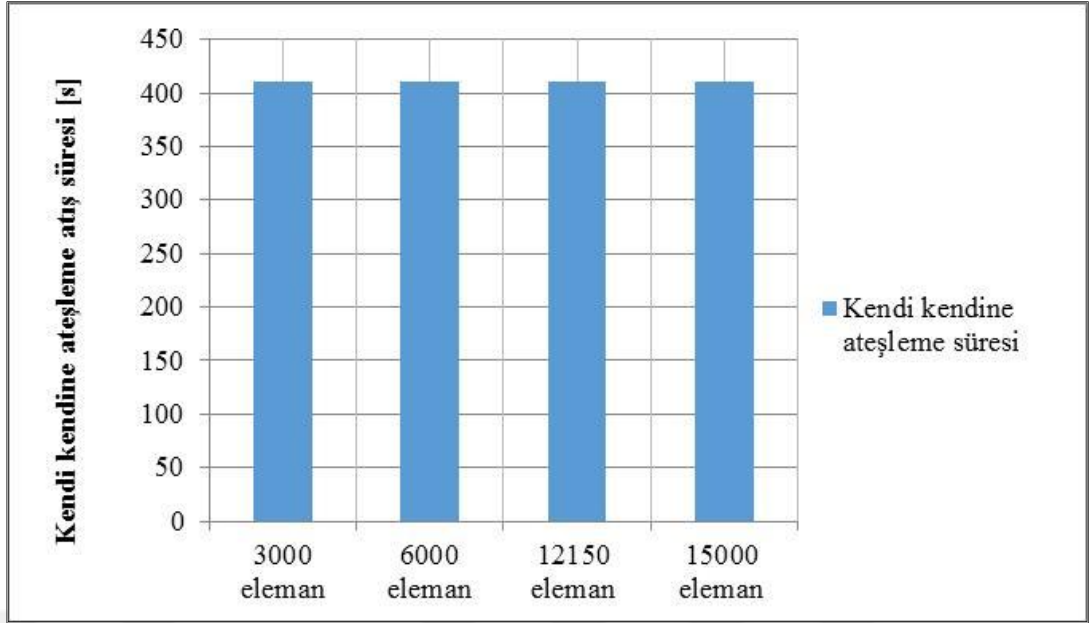
Tez kapsamında bir ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresi toplam kütle yaklaşımı ile analitik olarak ve SEM analizi ile sayısal olarak hesaplanmıştır.

Her iki hesaplamada iç yüzeyden sınır şartı olarak ısı akısı tanımlanmıştır. Bu ısı akısı namlu içindeki sevk barutu gazı ile namlu iç yüzeyi arasında gerçekleşmektedir ve yarı-ampirik denklemler ile Bölüm 4.1’de hesaplanmıştır. Isı akısı hesabında kullanılan bazı iç balistik değerleri ise (namlu içi maksimum basınç (P_{max}) ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m)) Bölüm 4’de detayları açıklanan PRODAS programında hesaplanmıştır.

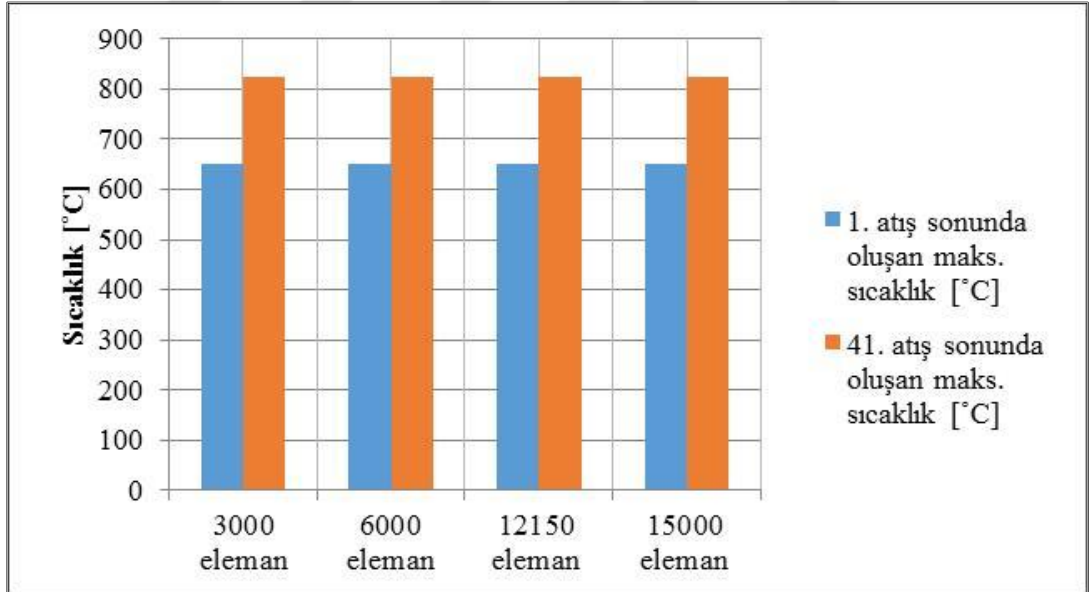
Tez kapsamında yapılan SEM analiz sonuçlarının sayısal ağ sayısından bağımsız olduğunu göstermek için analizler farklı eleman sayıları ile tekrarlanmıştır. Oluşturulan SEM analizindeki eleman sayıları sırasıyla 3000, 6000, 12150 ve 15000’dir. Farklı eleman sayılarına göre elde edilen kendi kendine ateşleme süreleri ve 1. ve 41. atış sonunda oluşan maksimum sıcaklık değerleri Şekil 6.1 ve 6.2’de sırasıyla gösterilmiştir.

Şekil 6.1 incelendiğinde değişen eleman sayısına bağlı olarak kendi kendine ateşleme süresinin değişmediği görülmektedir. Şekil 6.2’de ise farklı eleman sayısına göre iç yüzey sıcaklığının, maksimum 0,5°C kadar değiştiği görülmektedir. Bu iki grafik göz önüne alındığında değişen eleman sayısının sonuçlara kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir. SEM analizlerinde kullanılan ağ sayısı 12150 olarak alınmıştır.

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesinden önce, tez kapsamında kendi kendine ateşleme süresinin belirlenmesi için oluşturulan SEM modelinin doğrulaması aşağıdaki alt bölümde yapılmıştır.



Şekil 6.1. Kendi kendine ateşleme süresinin farklı eleman sayılarına göre değişimi



Şekil 6.2. Farklı eleman sayılarına göre 1. ve 41. atış sonunda oluşan maksimum sıcaklığın değişimi

6.1. SEM Modeli Doğrulaması

Tez kapsamında oluşturulan SEM modelinin doğrulanması için literatür taraması yapılmıştır. Literatürdeki yayınlardaki analizlerin tekrarlanabilmesi için geometri, sınır şartları, namlu özellikleri ve balistik döngü bilgilerine gerek vardır. Ancak, yayınlarda bu bilgilerin tamamı verilmemektedir. Yapılan literatür taramasında 2015 yılında Vikas ve ark. [21] tarafından yapılan yayında bu bilgilerin tamamı verildiği için bu yayın tez kapsamındaki SEM modelinin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Tez kapsamında oluşturulan SEM modelinin doğrulanması amacıyla Vikas ve ark. tarafından yapılan SEM modeli tekrarlanmıştır.

Vikas ve ark., iç-dış çapı Ø120-200 mm olan bir ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresini Ansys'de oluşturduğu SEM modeli ile hesaplamıştır. Namlu iç yüzeyinde yarı-ampirik denklemlerle hesaplanan ısı akısı uygulanırken dış yüzeyde ise ısı taşınımı tanımlanmıştır. Birim atışta birim namlu içi yüzeyine transfer edilen ısı enerji 656834 J/m^2 olarak hesaplanmıştır. Modelde, 60 saniyede 6 atış senaryosu kullanılmıştır. Dolayısıyla, 60 saniyede 6 atış yapılan atış senaryosu için birim alana transfer edilen ısı akısı $65683,4 \text{ W/m}^2$ olarak tanımlanmıştır. Kullanılan barutun kendi kendine ateşleme sıcaklığı 180°C 'dir. SEM analizi ile namlu iç yüzey sıcaklığının kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşma süresi 477 s olarak hesaplanmıştır.

Bu tezde kullanılan SEM modelinin doğrulanması amacıyla, Vikas ve ark. tarafından kullanılan tüm parametreler kullanılarak yapılan SEM modelinde bu süre 481 s olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardaki %0,8 hata oldukça düşüktür ve bu durum SEM modelini doğrulamaktadır.

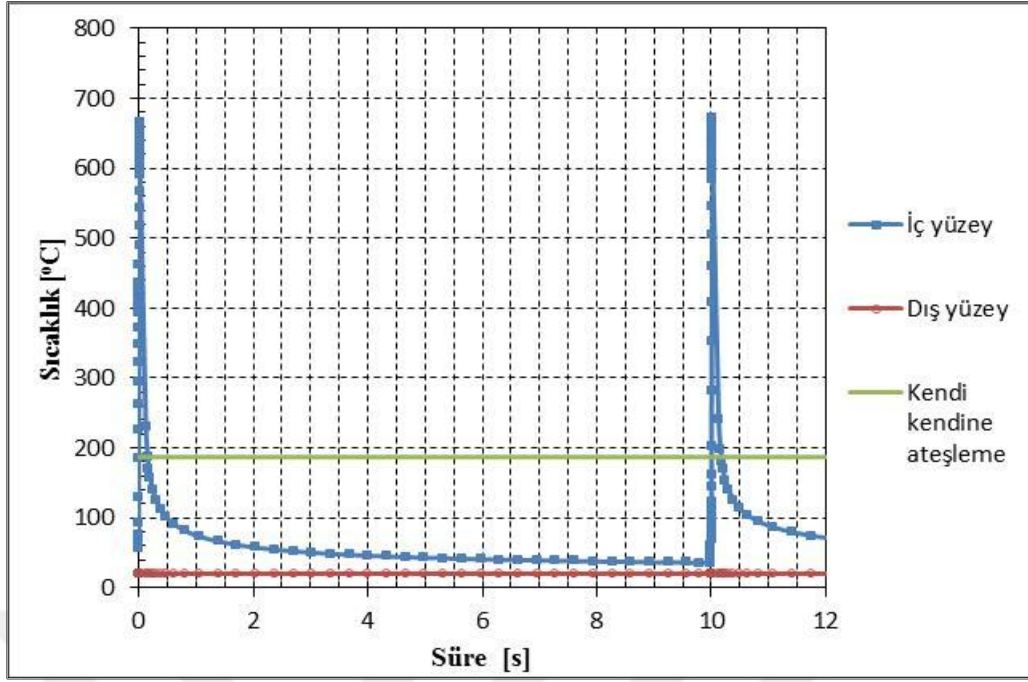
6.2. SEM Analizi Sonuçları

SEM analizi, dikkate alınan obüs ağır silah namlusu için yapılmış ve namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Tekrarlı atışlarla namludaki ısınma hesaplanmıştır. Namlu sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi; ilk atış, 6. atış ve 57. atış için yapılmıştır.

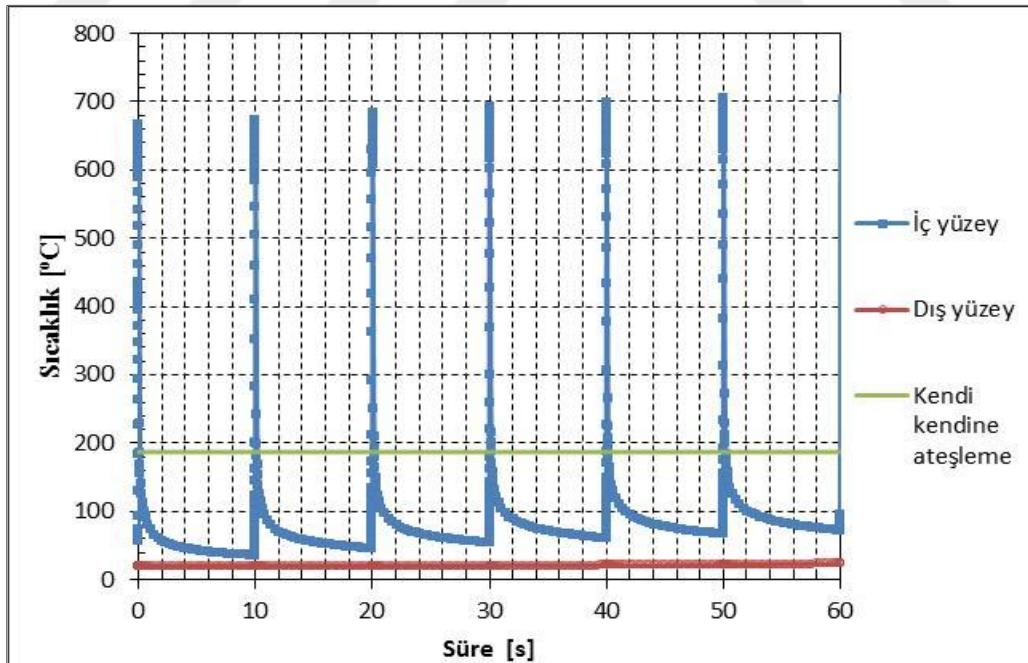
Bu amaçla ilk olarak, ilk atış süresi olan 10 saniyedeki namlu iç-dış yüzeylerindeki sıcaklığın zamana göre değişimi Şekil 6.3'te çizilmiştir. Atışın gerçekleştiği ilk 25 ms sonunda namlu iç yüzey sıcaklığı ani olarak $650,8^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmakta ve atış tamamlandıktan sonra yine ani olarak soğumaktadır. Sıcaklık artışı iç yüzeyde ince bir tabakada gerçekleşmektedir. Bir sonraki atış başlangıcı olan 10. saniyeye kadar geçen sürede; namlu iç yüzeyinde oluşan sıcaklık artışı namlu et kalınlığı boyunca ilerlemekte ve iç yüzey soğumaktadır. 10. saniyede iç yüzey sıcaklığı $34,9^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Namlu dış yüzey sıcaklığı ise 10 saniye boyunca oldukça yavaş artarak $20,001^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır.

İkinci olarak, 60 saniye süresinde yapılan 6 atış için namlu iç-dış yüzeylerindeki sıcaklığın zamana göre değişimi Şekil 6.4'te çizilmiştir. Namlu iç yüzey sıcaklığı, uygulanan darbeleri ısı akışı ile darbeleri olarak yükselip alçalmaktadır. 6. atışta namlu iç yüzey sıcaklığı 704°C 'ye ulaşmakta ve 7. atış başlangıcında $71,9^{\circ}\text{C}$ olmaktadır. Namlu dış yüzey sıcaklığı ise yavaş doğrusal artışla $23,4^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır.

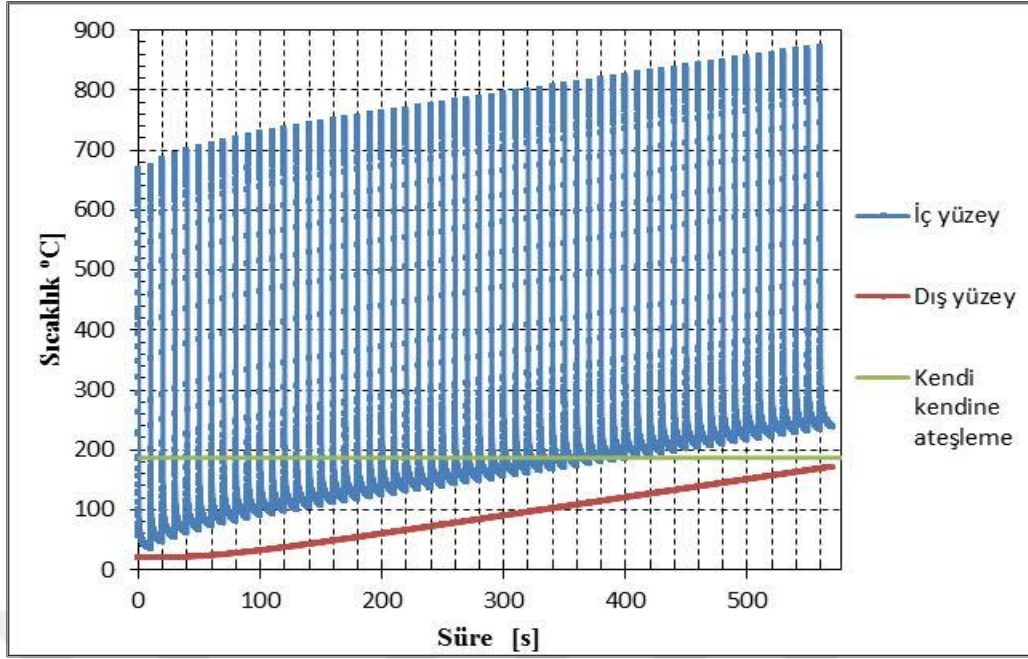
Üçüncü ve son olarak, tüm analiz boyunca (57 atış) elde edilen namlu iç-dış yüzeylerindeki sıcaklığın zamana göre değişimi Şekil 6.5'te çizilmiştir. Tez kapsamında incelenen ilgili silah namlusunda kullanılan M30 sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı 187°C 'dir. SEM analizi, namlu iç yüzey sıcaklığının kendi kendine ateşleme sıcaklığı olan 187°C 'ye ulaşmaya kadar devam ettirilmiştir. Namlu iç yüzey sıcaklığının atış başlangıcındaki değeri, kendi kendine ateşleme sıcaklığına eşit olduğu atış sayısı ve süresi belirlenmiştir. SEM analizinde, 41. atışın tamamlandığı 410. saniyede namlu iç yüzeyinde ulaşılan en yüksek sıcaklık $823,1^{\circ}\text{C}$ ve en düşük sıcaklık ise $188,6^{\circ}\text{C}$ olarak okunmuştur. Yani, 41. atıştan sonraki 42. atış için mühimmat namluya yerleştirilirse, sevk barutu kendi kendine ateşlenebilir. Namlu dış yüzey sıcaklığı ise 41. atışın sonunda $122,8^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmıştır.



Şekil 6.3. Birinci atış periyodunda namlu iç-dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.4. İlk 6 atışta namlu iç-dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.5. Namlu iç-dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi

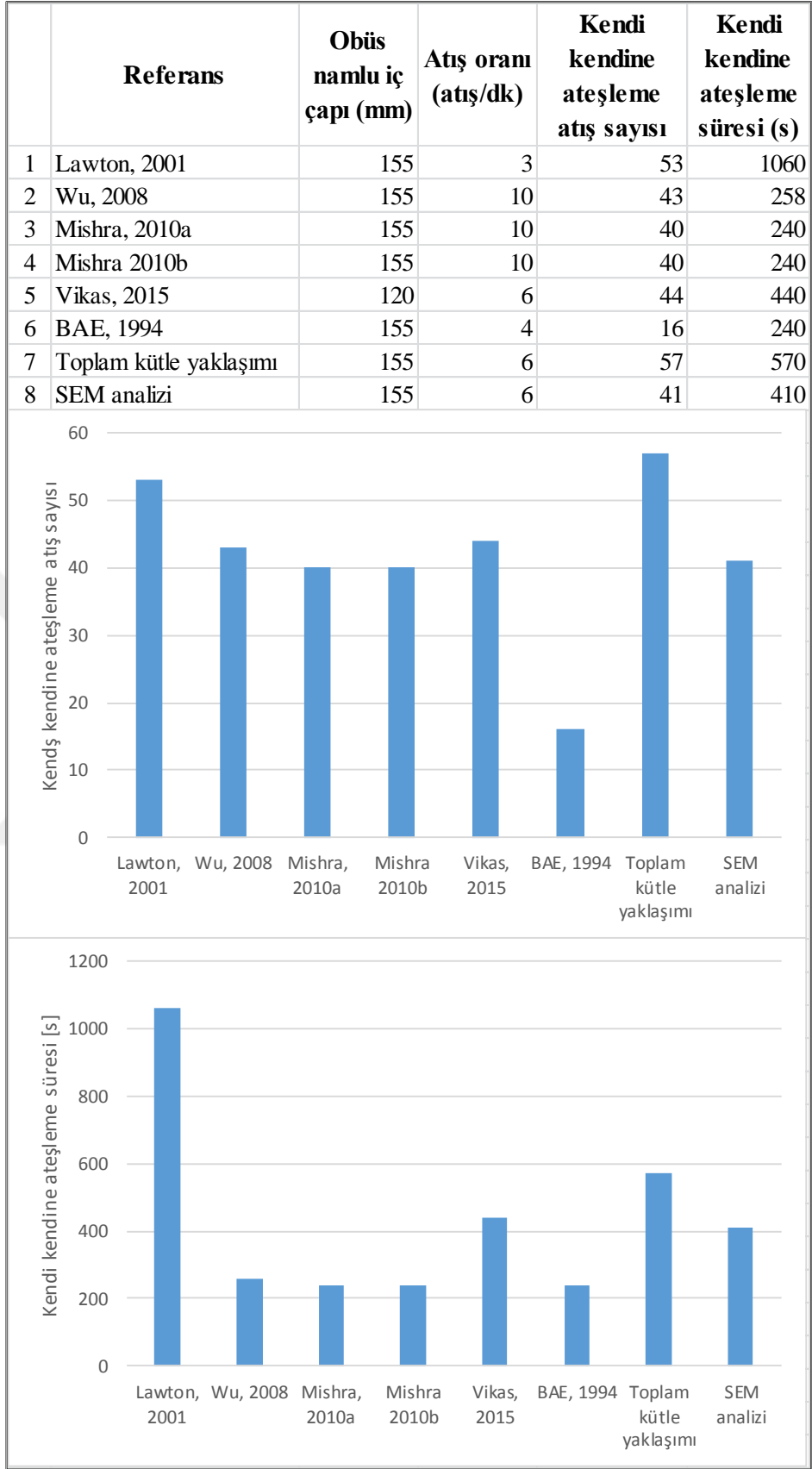
Bölüm 4.2'de toplam kütle yaklaşımı kullanılarak analitik olarak kendi kendine ateşleme süresi 570 s ve atış sayısı 57 atış olarak hesaplanmıştır. SEM analizleri ile ise kendi kendine ateşleme süresi 410 s ve atış sayısı 41 atış olarak hesaplanmıştır. Aralarında çok ciddi fark bulunmaktadır.

SEM analizinde denklem 4.1 ile verilen namlu malzemesinde oluşan silindirik koordinatlarda radyal yönde tek boyutlu ve zamana bağlı ısı iletimi denklemi çözülmüştür. Toplam kütle yaklaşımında ise namlu malzemesi içindeki anlık sıcaklık dağılımı ihmal edilerek çözüm yapılmıştır. Biot sayısı hesabında namlu dış yüzeyindeki düşük ısı taşınım katsayısının alınması uygun değildir. Çünkü, aksine, namlu iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı çok büyüktür. Bu sebeple toplam kütle yaklaşımı geçerli değildir.

Tez çalışmasında kullanılan 155 mm 39 kalibre Obüs ağır silah namlusuna yönelik genel teknik bilgi dokümanlarında [51,52] maksimum barut hakkı ile müsaade edilen atış sayısı dakikada 4 ve 6 atış şeklinde bilgiye ulaşılmıştır. Dokümanlardan birisinde [51] ise dakikada 4 atış ile 4. dakikanın sonunda kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşılacağı söylenmektedir ki bu da kendi kendine ateşleme atış sayısının 16, süresinin ise 240 s olması anlamındadır.

Diğer taraftan benzer namlu ile ilgili yapılan diğer çalışmalar [1,10,14,21,51,53] incelenmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi Şekil 6,6'da listelenmiş ve karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. BAE dokümanı haricindeki çalışmalarda kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir seviyelerdedir. Şöyle ki, Vikas'ın çalışmasındaki 120 mm iç çaplı namlu için 6,8 kg mühimmat ağırlığı ve 6 atış/dk atış oranı ile atış yapıldığında hesaplanan kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi 44 atış ve 440 s şeklindedir. Mevcut çalışmadaki 155 mm iç çaplı namluda 11,7 kg barut hakkı ve 43,5 kg mühimmat ağırlığında aynı atış oranı için bu değerler 41 atış ve 410 s olarak hesaplanmıştır. Kullanılan namlu iç çapı, barut hakkı ve mühimmat ağırlığı farklılığının açıklayabileceği şekilde sonuçlar uyumlu bulunmuştur.

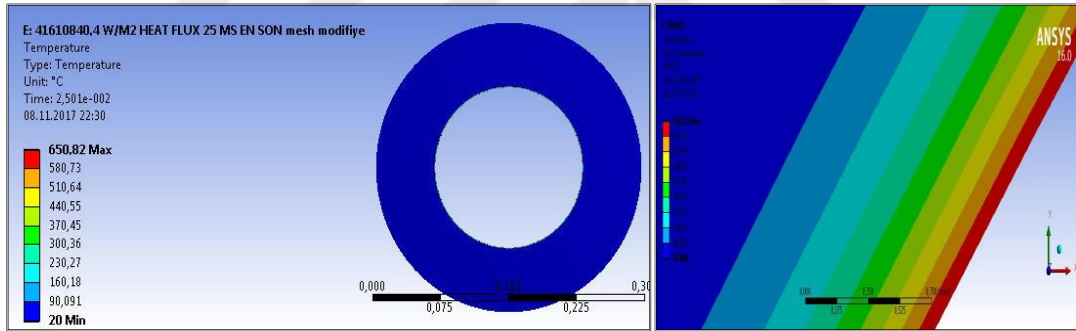
Şekil 6.6'da verilen diğer benzeri çalışmalardaki değerlerde farklılık olmasına rağmen belli bir aralıkta toplandığı görülmektedir. Bu durum, SEM analizinin ve SEM analizinde kullanılan sınır şartlarının ve özellikle de ısı akısının değerinin doğru hesaplandığını da belli seviyede teyit etmektedir.



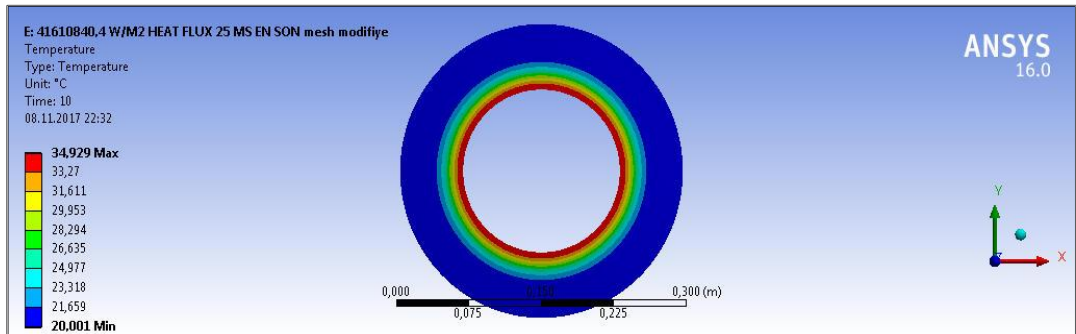
Şekil 6.6. Kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi

SEM analizinden elde edilen namlu üzerindeki sıcaklık dağılımları 1. atış, 6. atış ve kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşılan 41. atış için Şekil 6.7-12'de sırayla gösterilmiştir.

Bu amaçla ilk olarak, birinci atışın tamamlandığı 25. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımının görüntüsü alınmış ve Şekil 6,7'de gösterilmiştir. Atışın gerçekleştiği 25 ms süresince namlu iç yüzeyindeki ısı akısı namlu iç yüzeyinde ince bir tabakayı bölgesel olarak ısıtmaktadır. Bu ince tabakadaki sıcaklık dağılımı Şekil 6,7'de sağ taraftaki şekilde büyütülerek gösterilmiştir. 25. ms'de iç yüzey sıcaklığı 650,8°C'ye ulaşmaktadır. Bir sonraki atışın gerçekleşeceği 10. saniyeye kadar, sıcaklık namlu kalınlığına yayılmakta ve sıcaklık düşmektedir. Namlu dış yüzeyinden de dış ortama soğutma olmaktadır. Bir sonraki atış başlangıcı olan 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı Şekil 6.8'te gösterilmiştir. Bu 10. saniye anında, namlu iç yüzey sıcaklığı 34,9°C'ye inmiş, dış yüzey sıcaklığı ise çok yavaş artışla 20,001°C olmuştur.

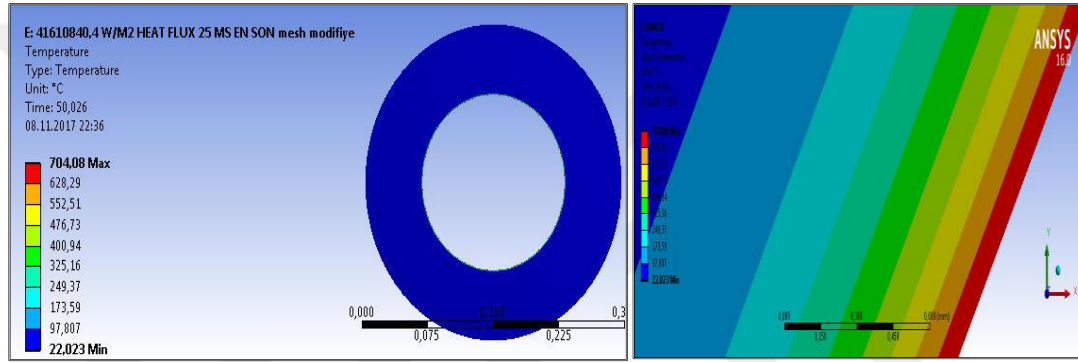


Şekil 6.7. Birinci atışın tamamlandığı 25. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı

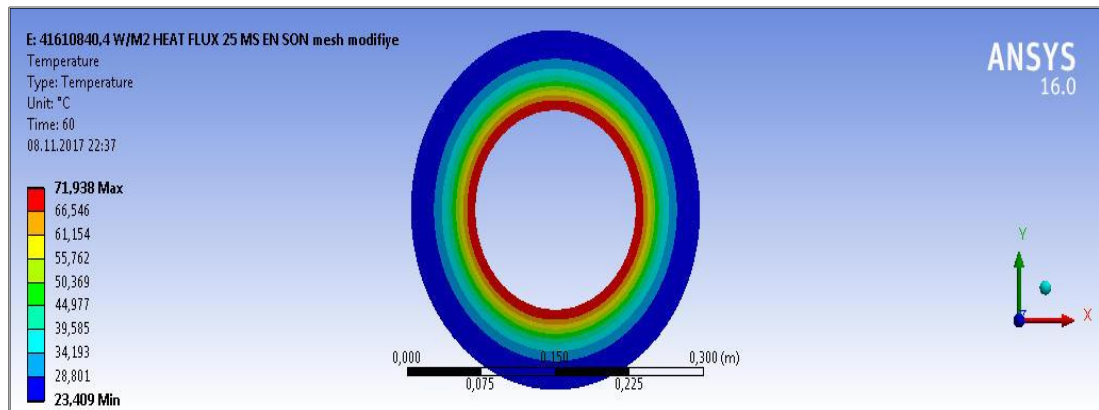


Şekil 6.8. İkinci atışın başlangıcı olan 10. s'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı

Ayrıca, periyodik atışlar açısından değerlendirilen ilk 1. dk sonundaki sıcaklık dağılımı da incelemeye alınmıştır. İncelenen namludaki atış oranı 6 atış/dk'dır. İlk atış 0-25ms aralığına gerçekleşmekte ve 10s aralıklarla atış tekrar etmektedir. 6. atış 50-50,025 s aralığında olmaktadır. 6. atışın tamamlandığı 50,025. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımının görüntüsü alınmış ve Şekil 6,9'da gösterilmiştir. Benzer şekilde namlu içindeki darbeli ısı akısı iç yüzey sıcaklığını 704°C'ye çıkarmıştır. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi, 7. atış başlangıcına kadar yani 60. saniyeye kadar soğuma gerçekleşmekte ve iç yüzey sıcaklığı 71,9°C olmaktadır. Bu esnadaki dış yüzey sıcaklığı ise 23,4°C olmuştur.



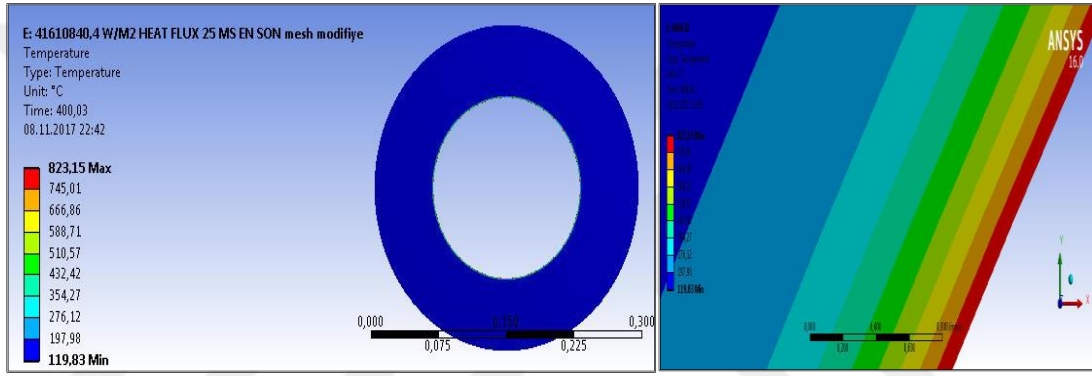
Şekil 6.9. Altıncı atışın tamamlandığı 50,025. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı



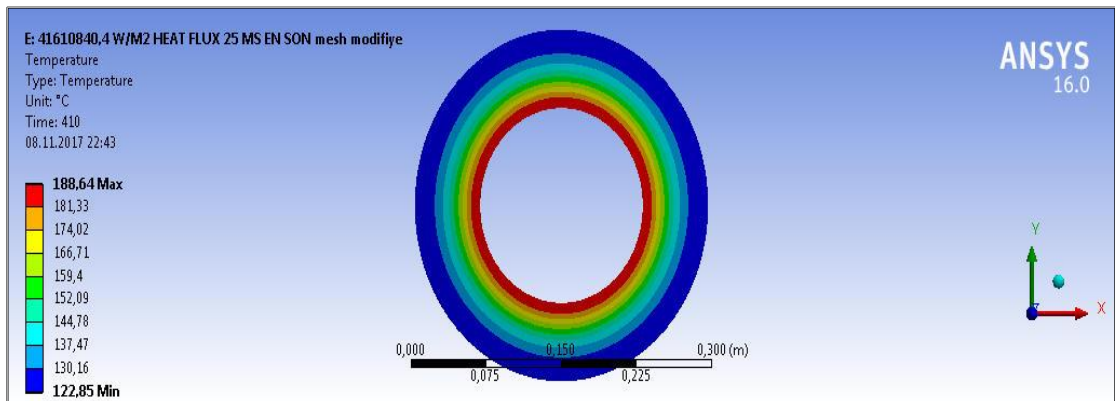
Şekil 6.10. Yedinci atışın başlangıcı olan 60. s'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı

Son olarak kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşıldığı andaki sıcaklık dağılımı incelenmiştir. 41. atışın tamamlandığı 400,025. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımının görüntüsü alınmış ve Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Bu anda iç yüzey sıcaklığı 823,1°C'ye çıkmıştır. Şekil 6.12'de gösterildiği gibi, 42. atış başlangıcına kadar yani 410. saniyeye kadar soğuma gerçekleşmekte ve iç yüzey sıcaklığı 188,6°C olmaktadır. Bu esnadaki dış yüzey sıcaklığı ise 122,8°C olmuştur.

Görüldüğü gibi 41. atış tamamlanıp 42. atışın başlayacağı anda yani 410. saniyede namlu iç yüzey sıcaklığı 188,6°C ulaşmıştır ki bu değer 187°C olan kendi kendine ateşleme sıcaklığından yüksektir.



Şekil 6.11. Kırk birinci atışın tamamlandığı 400,025. ms'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 6.12. Kırk ikinci atışın başlangıcı olan 410. s'deki namlu üzerindeki sıcaklık dağılımı

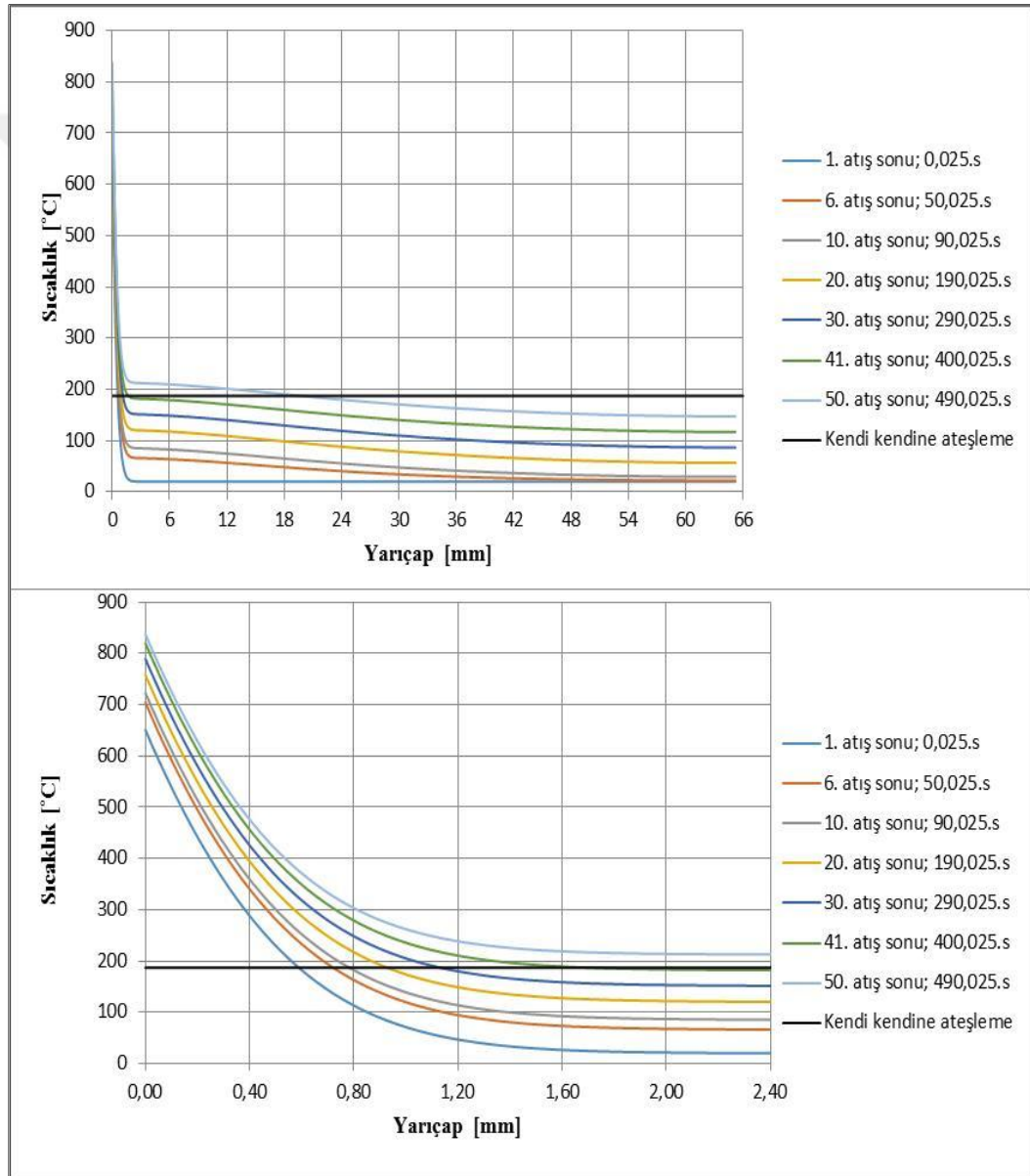
Görüldüğü gibi, atış yapıldığında namlu içinde sevk barutunun yanması ile oluşan ısı enerji, namlu yarıçapı boyunca çok kısa bir mesafeye transfer edilmektedir. Burada oluşan ısı transferi mekanizması sanki-kararlı (steady-like) ısı transferi olarak adlandırılır [1,14,15,48,53,54]. Sevk barutunun yanması ile namlu iç yüzeyinde 600-1200°C'ne kadar ani sıcaklık yükselişi meydana gelir. Bu ani sıcaklık yükselişi neticesinde oluşan ısı enerjisi namlu iç yarıçapında 1-1,5 mm gibi çok ince bir tabakada depolanır, ardından ani olarak oluşan soğumada ısı iletimi ile namlu dış yüzeyine doğru transfer edilir. Mishra [1] tarafından, ısıl sınır tabaka metodu kullanılarak, herhangi bir [t] süresinde ısının namlu iç yarıçapından, dış yarıçapa doğru nüfuz ettiği derinliğin $\sqrt{12\alpha t}$ denklemiyle hesaplanabileceği verilmiştir.

Tez kapsamında incelenen namlunun ısı yayılım katsayısı $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 'dir. İlk atışın gerçekleştiği 0,025 s sonunda, ısının nüfuz ettiği derinlik bu denklem kullanılarak 1,643 mm olarak hesaplanmıştır. Bu andaki SEM analizi sıcaklık dağılımında; namlu iç yüzeyindeki sıcaklık 650,8°C'den dış yüzeyine doğru 20°C'ye düşmektedir. Bu derinlikteki yani 1,643 mm'deki sıcaklık 25,5°C olarak okunmuştur. Bu sıcaklık 20°C'ye yakın bir değerdir ve Mishra tarafından verilen yaklaşık çözüm ile uyumludur.

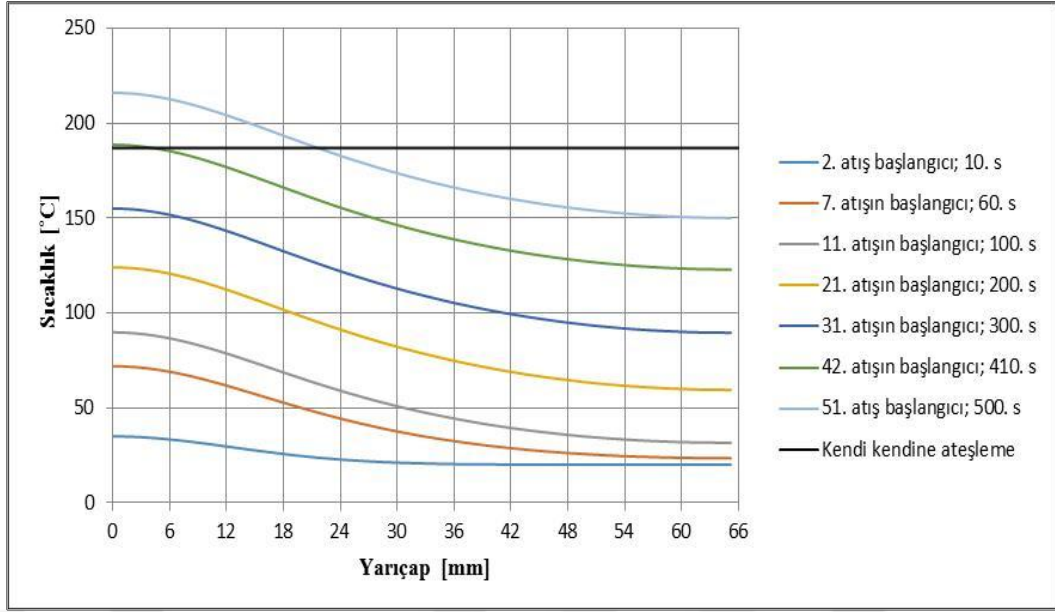
Ayrıca namlu et kalınlığı üzerindeki sıcaklık dağılımı detaylı incelenen atış zamanları için Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te çizilmiştir. Şekil 6.13 atışların tamamlandığı anları içermektedir ([1. atış sonu; 0,025. s]; [6. atış sonu; 50,025. s]; [41. atış sonu; 400,025. s]). Şekil 6.14'te ise atış başlangıcındaki sıcaklık dağılımları çizilmiştir ([2. atış başlangıcı; 10. s]; [7. atış başlangıcı; 60. s]; [42. atış başlangıcı; 410. s]).

Şekil 6.13'te görüldüğü gibi, sıcaklık değişimi namlu iç yüzeyindeki ince bir tabakada olmaktadır. Bu ince tabakada ani düşen sıcaklık daha sonra yarıçap boyunca yaklaşık doğrusal azalmaktadır. Sıcaklığın ani düştüğü tabakada, 1. atıştan sonra namlu iç yüzeyinde sıcaklık 650,8°C'ye kadar çıkmıştır. Namlu iç yüzeyinden 2,017 mm derinliğe kadar sıcaklık 21,3°C'ye düşmüştür ve daha sonra yaklaşık doğrusal olarak yarıçap boyunca azalmıştır. 6. atış sonunda ise, namlu iç yüzey sıcaklığı 705°C'ye yükselmiş, yine aynı 2,017 mm derinlikte 67,6°C'ye düşmüştür. Namlu, kendi kendine ateşleme sıcaklığına 41. atış sonunda ulaşmıştır. Devam eden seri atışlarda, 41. atışın sonunda, namlu iç yüzey sıcaklığı 823,1°C'ye yükselmiştir. Yine, 2,017 mm derinlikte sıcaklık 186,5°C'ye düşmüştür.

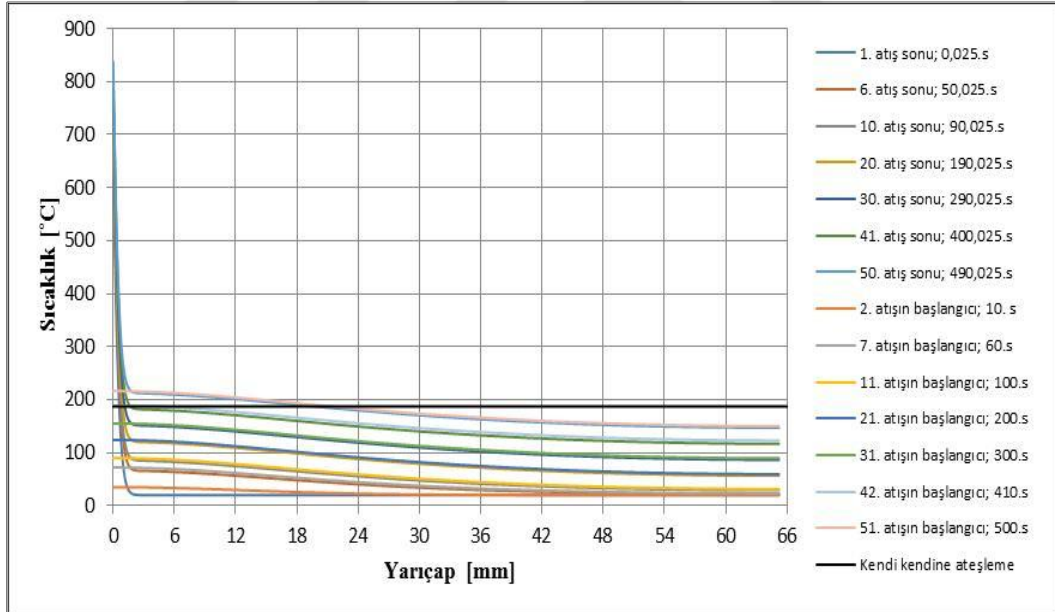
Şekil 6.14'te incelenen atış başlangıçlarındaki sıcaklık dağılımları çizilmiştir. 2. atışın başlangıcı olan 10. saniyede namlu iç yüzey sıcaklığı ilk sıcaklık olan 20°C'nin üzerine çıkarak 34,9°C olmuştur. Bu esnada dış yüzey sıcaklığı ise 20,001°C olmuştur. Devam eden atışlarda, 7. atış başlangıcında iç yüzeyde sıcaklık 71,9°C'ye çıkmıştır. Dış yüzeyde ise 23,4°C'ye ulaşmıştır. Kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşılan 42. atış başlangıcında ise iç yüzey sıcaklığı 188,6°C'ye ulaşmıştır. Bu esnadaki dış yüzey sıcaklığı 122,8°C'ye ulaşmıştır.



Şekil 6.13. Atış sonlarında namlu sıcaklığının yarıçap boyunca değişimi



Şekil 6.14. Atış başlangıçlarında namli sıcaklığının yarıçap boyunca değişimi



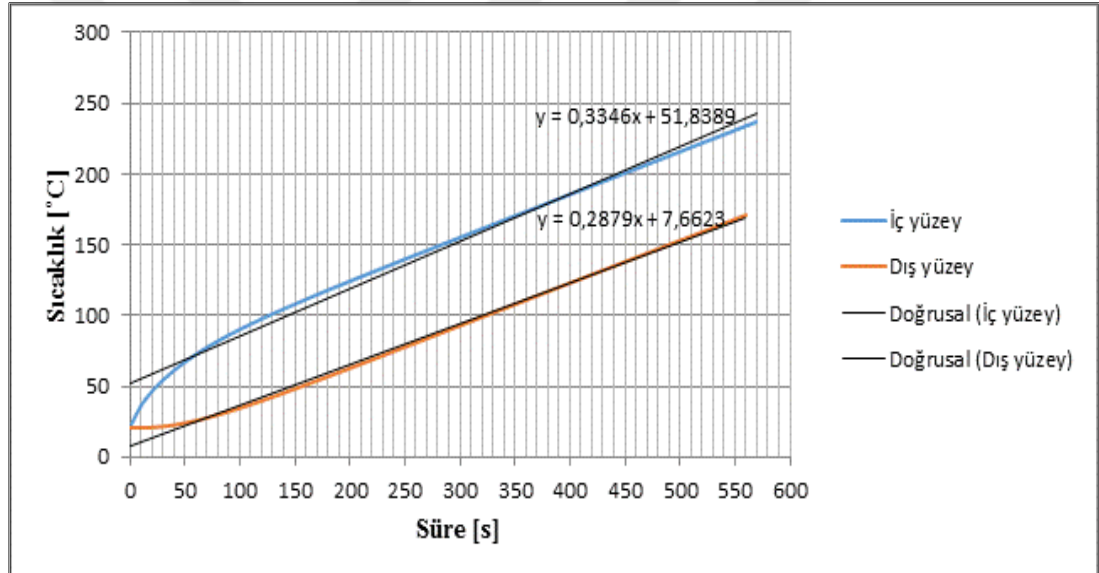
Şekil 6.15. Atış sonlarında ve başlangıçlarında namli sıcaklığının yarıçap boyunca değişimi

Şekil 6.16’da namlu iç-dış yüzey sıcaklıklarının kendi kendine ateşleme sıcaklığının alındığı atış başlangıcındaki değerlerinin zamana göre değişimi çizilmiştir. Yaklaşık doğrusal olan bu değişim için aşağıdaki denklemler uydurulmuştur.

$$T_{iç} = 0,3346t + 51,8389 \quad (6.1)$$

$$T_{dış} = 0,2879t + 7,6623 \quad (6.2)$$

Böylece, devam eden seri atışlarda namlu iç-dış yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi için genel bir denklem elde edilmiştir.



Şekil 6.16. Namlu iç-dış yüzey sıcaklığının atış başlangıçlarındaki değerlerinin zamana göre değişimi

6.3. Farklı Atış Rejimleri için Kendi Kendine Ateşleme Atış Sayısı ve Süresi

Bölüm 6.2’de incelenen obüs namlusu için kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi nominal atış rejimi olarak bilinen 6 atış/dakika için hesaplandı ve karşılaştırmalar yapıldı. Bu nominal atış rejimine ilaveten namlunun farklı atış rejimleri için kendi kendine ateşleme atış sayıları ve süreleri de hesaplandı. Bu amaçla, 6 atış/dakika nominal atış rejimine ilaveten 1, 2, 3, 10 ve 20 atış/dakika atış rejimleri seçildi. Dakikada 20 atış yapılması, mühimmat yükleme ve boşaltmaları için pek mümkün olmayacak bir atış rejimi olmasına rağmen kendi kendine ateşleme gidişatını gözlemlemek açısından dikkate alınmıştır.

Tüm bu atış rejimleri için (1, 2, 3, 6, 10, 20 atış/dakika) toplam kütle yaklaşımı ve SEM analizi ile elde edilen kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi Şekil 6.17’de listelenmiş ve grafiklenmiştir.

Toplam kütle yaklaşımı hesaplaması ile; dakikada 1, 2, 3, 6, 10 ve 20 atış yapılması durumunda kendi kendine ateşleme atış sayısı sırasıyla 60, 58, 58, 57, 57 ve 57 ve kendi kendine ateşleme süresi ise sırasıyla 3600 s, 1740 s, 1160 s, 570 s, 342 s ve 171 s olarak elde edilmiştir. Toplam kütle yaklaşımı çözümü, namlu kalınlığında zamana bağlı olarak sıcaklığın her noktada eşit olduğu kabulüne dayanır. Tez kapsamında ilk sıcaklığı (T_i) 20°C olan obüs namlusunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı olan 187°C’ye ulaşabilmesi için $Q = mc_p \Delta T$ denklemi ile hesaplanabilen belli bir ısı enerjisi gereklidir. Seri atışlarla birlikte 25 ms’lik balistik döngü içinde namluya aktarılan ısı enerjisi, namlu sıcaklığını kademeli olarak artıracaktır. Sonuçta kendi kendine ateşleme sıcaklığına ulaşılan atış sayısı sabit kalsa da, kendi kendine ateşleme süresi atış oranına göre değişiklik gösterecektir. Ayrıca çevreye, namlu dış yüzeyinde taşınım sınır şartından dolayı bir miktar ısı kaybı olacaktır. Bunun sonucunda, farklı atış rejimleri için toplam kütle yaklaşımı hesabında kendi kendine ateşleme atış sayısı çok az da olsa değişecektir. Tüm atış rejimlerinde toplam kütle yaklaşımı ile hesaplanan atış sayısının 57-60 civarında sabit kalması bu şekilde açıklanabilir.

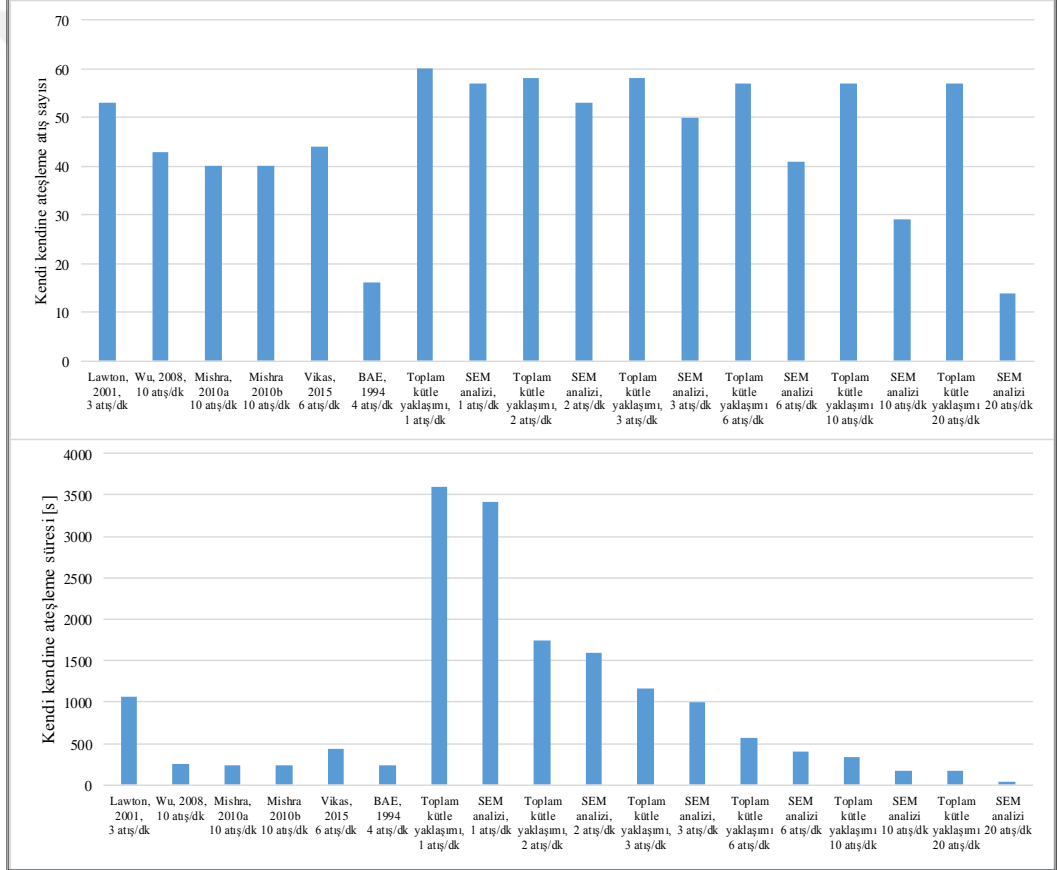
SEM analizinde ise namlu kalınlığınca sıcaklığın değişimi dikkate alınmaktadır. Namlu içinde sevk barutunun yanması ile oluşan ısı enerjisi, namlu iç cidarında ince bir tabakaya etki edip zamanla namlu dış yüzeyine doğru

ilerleyecektir. Atış oranı ve sayısına göre, namlu iç-dış yüzeyindeki sıcaklıklar farklı olacaktır. Sonuç olarak SEM analizi ile elde edilen sonuçlar toplam kütle yaklaşımına göre farklılık gösterecektir. SEM analizi daha gerçekçi bir durumu temsil etmektedir.

SEM analizi hesaplaması ile 1, 2, 3, 6, 10 ve 20 atış/dakika atış rejimleri için elde edilen kendi kendine ateşleme atış sayıları sırasıyla 57, 53, 50, 41, 29 ve 14'dür. Atış sıklığının arttığı durumlarda toplam kütle yaklaşımı ve SEM analizi ile bulunan kendi kendine ateşleme atış sayıları arasında fark giderek artmıştır. Atış sıklığı arttıkça namlu iç yüzey sıcaklığı da artmaktadır. Bunun sonucunda kendi kendine ateşleme süresine karşılık gelen atış sayısı ciddi şekilde azalmaktadır. SEM analizi ile bulunan kendi kendine ateşleme atış süreleri ise sırasıyla 3420 s, 1590 s, 1000 s, 410 s, 174 s ve 42 s'dir. Kendi kendine ateşleme atış sayısına benzer şekilde atış sıklığı arttıkça kendi kendine ateşleme süreleri önemli ölçüde azalmıştır.

En düşük atış sıklığı olan dakikada 1 atış için, ağır silah namlusu yaklaşık 1 saatte kendi kendine ateşleme olayına maruz kalmaktadır.

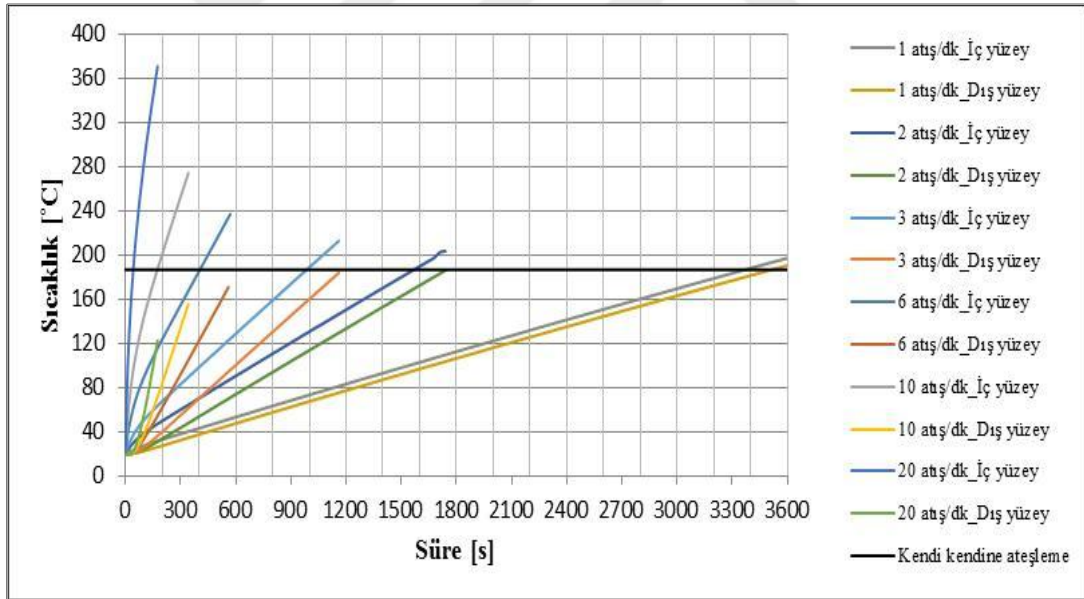
	Referans	Obüs namlu iç çapı (mm)	Atış oranı (atış/dk)	Kendi kendine ateşleme atış sayısı	Kendi kendine ateşleme süresi (s)	
1	Lawton, 2001,	3 atış/dk	155	3	53	1060
2	Wu, 2008,	10 atış/dk	155	10	43	258
3	Mishra, 2010a	10 atış/dk	155	10	40	240
4	Mishra 2010b	10 atış/dk	155	10	40	240
5	Vikas, 2015	6 atış/dk	120	6	44	440
6	BAE, 1994	4 atış/dk	155	4	16	240
7	Toplam kütle yaklaşımı,	1 atış/dk	155	1	60	3600
8	SEM analizi,	1 atış/dk	155	1	57	3420
9	Toplam kütle yaklaşımı,	2 atış/dk	155	2	58	1740
10	SEM analizi,	2 atış/dk	155	2	53	1590
11	Toplam kütle yaklaşımı,	3 atış/dk	155	3	58	1160
12	SEM analizi,	3 atış/dk	155	3	50	1000
13	Toplam kütle yaklaşımı	6 atış/dk	155	6	57	570
14	SEM analizi	6 atış/dk	155	6	41	410
15	Toplam kütle yaklaşımı	10 atış/dk	155	10	57	342
16	SEM analizi	10 atış/dk	155	10	29	174
17	Toplam kütle yaklaşımı	20 atış/dk	155	20	57	171
18	SEM analizi	20 atış/dk	155	20	14	42



Şekil 6.17. Farklı atış rejimlerinde kendi kendine ateşleme atış sayıları ve süreleri

Şekil 6.18’te incelenen tüm atış rejimleri için atış başlangıçlarında namlu iç-dış yüzey sıcaklıkları çizilmiştir. Namlu iç ve dış yüzey sıcaklıklarının değeri, başlangıçta 20°C’dir.

Dakikada 1 atış yapıldığında 61. atış başlangıcında namlu iç yüzey sıcaklığı sevk barutunun kendi kendine ateşleme sıcaklığı olan 187°C’nin üzerine çıkararak 189,2°C olmuştur. Bu esnada dış yüzey sıcaklığı ise yaklaşık doğrusal olarak 160,5°C’ye çıkmıştır. Benzer şekilde 2 atış/dk atış rejimi için 54. atış başlangıcında iç yüzey 189,14°C, dış yüzey 171,9°C’ye, 3 atış/dk atış rejimi için 51. atış başlangıcında iç yüzey 189,3°C, dış yüzey sıcaklığı 160,5°C’ye, 6 atış/dk atış rejimi için 42. atış başlangıcında iç yüzey 188,6°C’ye, dış yüzey 122,8°C’ye, 10 atış/dk atış rejimi için 30. atış başlangıcında iç yüzey 187,5°C, dış yüzey 72°C’ye çıkmaktadır. Son olarak 20 atış/dk atış rejimi için 15. atış başlangıcında iç yüzey 187,5°C’ye, dış yüzey ise 22,9°C’ye ulaşmaktadır.



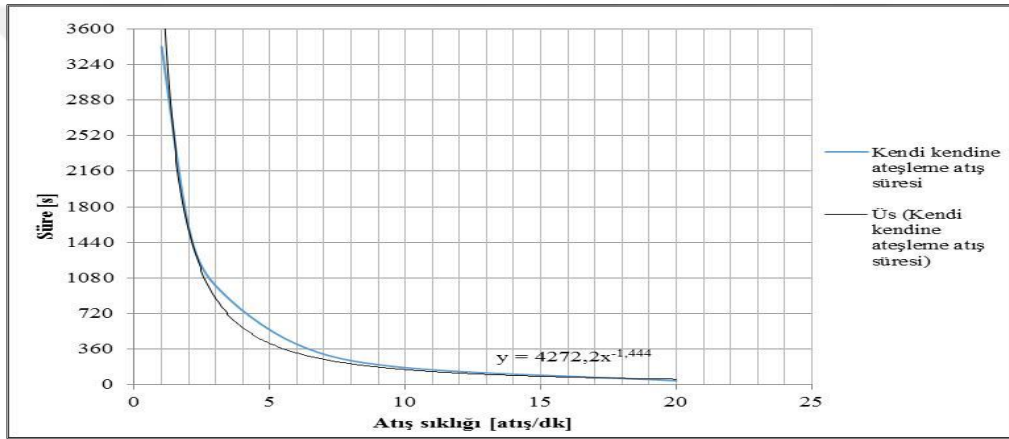
Şekil 6.18. Farklı atış rejimlerinde namlu iç-dış yüzey sıcaklığının atış başlangıçlarındaki değerlerinin zamana göre değişimi

Sadece SEM analizi ile edilen kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi Şekil 6.19 ve 6.20’de çizilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi, atış sıklığı ile kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi arasında üstel bir değişim elde edilmiştir. Bu üstel değişimi veren denklemler aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

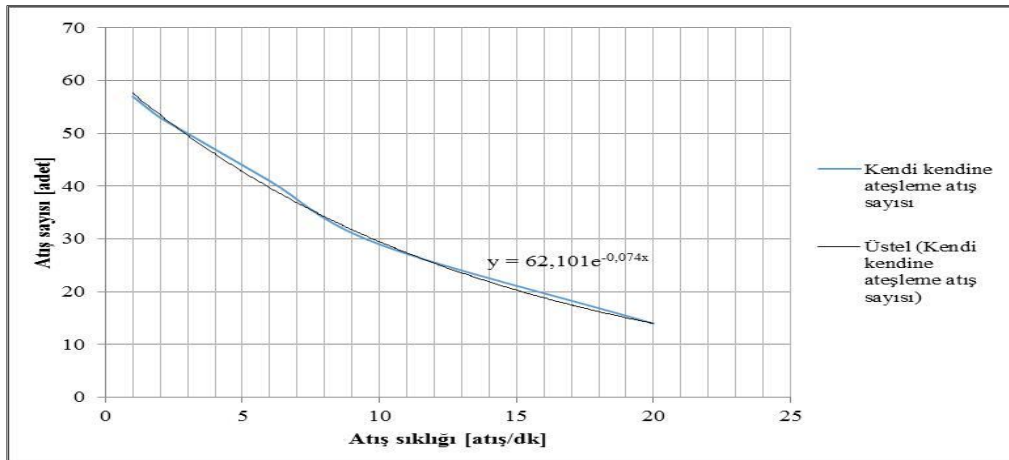
$$t_{cook-off} = 4272,2n_{rejim}^{-1,444} \quad (6.3)$$

$$n_{cook-off} = 62,101e^{-0,074n_{rejim}} \quad (6.4)$$

Bu denklemler incelenen namlu ve mühimmat özellikleri için geçerlidir.



Şekil 6.19. Kendi kendine ateşleme atış süresi



Şekil 6.20. Kendi kendine ateşleme atış sayısı

7. GENEL DEĞERLENDİRMELER

Tez kapsamında bir ağır silah namlusu olan obüs namlusunun kendi kendine ateşleme süresi analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Analitik hesaplamada toplam kütle yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal hesaplamada ise SEM modeli “Ansys Transient Thermal” modülünde oluşturulmuştur. Namlu iç yüzeyindeki ısı akısı yarı-ampirik denklemler ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan namlu içi maksimum basınç (P_{max}) ve mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) PRODAS iç balistik programında hesaplanmıştır.

Genel değerlendirmeler aşağıda listelenmiştir.

- 1) Hesaplamalar öncelikle obüs namlusunun nominal atış rejimi olarak bilinene 6 atış/dakika atış rejimi için yapılmıştır.
- 2) Tez kapsamında, obüs ağır silah namlusunun kendi kendine ateşleme süresinin analitik hesaplamaları, namlu şartları için her ne kadar geçerlilik oranı düşük bir yaklaşım olduğu bilirse de toplam kütle yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Burada, toplam kütle yaklaşımı kullanılarak çabuk ve hızlı bir hesaplama ile sadece mertebe belirlemesi yapılabilir. İlk sıcaklık değeri (T_i) 20°C'den, 187°C kendi kendine ateşleme sıcaklığına kadar namlu dış yüzeyinden çevreye taşınım ile ısı geçişi 1085,5 W/m² iken ışınlam ile çevreye ısı geçişi ise 19,8 W/m²'dir. Toplam kütle yaklaşımı hesaplamalarında oluşan bir miktar sapmanın nedeni bu durumdur.
- 3) İncelenen namlu için kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi 57. atış ve 570 s olarak hesaplanmıştır ki bu değerler SEM analizi ile hesaplanan 41. atış ve 410 s'den yüksek değerlerdir.
- 4) Tez kapsamında, asıl hesaplar SEM analizi ile Ansys programında yapılmıştır. SEM analizinde namlunun en kritik radyal kesiti, silindirik koordinatlarda zamana bağlı olarak modellenmiştir. Modelde, namlu iç yüzeyine ısı akısı sınır şartı ve namlu dış yüzeyine taşınım sınır şartı uygulanmıştır. Namlu iç yüzeyindeki ısı akısı literatürde verilen yarı-ampirik bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Isı akısı hesabı için gerekli olan bazı iç balistik değerleri (namlu içi maksimum basınç (P_{max}) ve

mühimmat namlu çıkış hızı (V_m) PRODAS programı ile hesaplanmıştır. Namlu iç yüzeyine etki eden ısı akısının değeri $41,6 \text{ MW/m}^2$ 'dir. Sevk barutu gazlarından namlu yüzeyine taşınım ile transfer edilen ısının değerini belirleyebilmek için, ısı taşınım katsayısı (h_g) ve ortalama barut gazlarının sıcaklığı (T_g) hesaplanmalıdır. Namlu iç yüzeyinde ısıtım sınır şartı ise barut gazları hızının çok düşük olduğu kama bölgesi hariç, iç bölgelerde ihmal edilmektedir [1]. SEM modeli ile kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresi 41. atış ve 410 s olarak hesaplanmıştır. Bu değer benzeri namlular için literatürdeki değerler ile karşılaştırıldığında uyumlu rakamlar olduğu görülmüştür. Bu uyumluluk, tez kapsamında kullanılan kendi kendine ateşleme atış sayısı ve süresinin hesaplanmasında kullanılan tüm metodoloji ve hesapların doğruluğunu teyit eder mahiyettedir.

- 5) Nominal atış rejimine ilaveten namlunun farklı atış rejimleri için kendi kendine ateşleme atış sayıları süreleri de hesaplandı. Bu amaçla, 1, 2, 3, 6, 10 ve 20 atış/dakika atış rejimleri dikkate alındı. Artan atış sıklığı ile azalan kendi kendine ateşleme atış sayısının ve süresinin değerleri belirlendi
- 6) Böylece, namlu kendi kendine ateşleme sıcaklığının hesaplanması için bir hesap yöntemi oluşturulmuştur.

8.KAYNAKLAR

- [1] Mishra A., Hameed A., and Lawton B., “A Novel Scheme for Computing Gun Barrel Temperature History and Its Experimental Validation.”, Journal of Pressure Vessel Technology, v.132, 1-6, 2010
- [2] Moeller C.E., “Measurement of Transient Bore Surface Temperatures in 7.62 mm Gun Tubes”, Midwest Research Institute, Rapor No: R-RR-T-I-81-73. 79 s., 1973
- [3] Russell L.H., “Simplified Analysis of the Bore Surface Heat Transfer Reduction in Gun Barrels as Achieved by Using Wear-Reducing Additives”, Naval Surface Weapons Center, Rapor No: TR-3378. 25 s.,” 1976
- [4] Hasenbein R.G., “The Effects Temperature on Time to Propellant Cook-off”, Benet Weapons Laboratory, Rapor No: WVT-TR-76014. 35 s., 1976
- [5] Rocchio J.J., and Wires R.A., “A Study of the Thermal Initiation Cook-off of M30 Propellants”, U.S Army Armament Research And Development Command Ballistic Research Laboratory, Rapor No: ARBRL-MR-02847. 39 s., 1978
- [6] Nelson C.W., and Ward J.R., “Calculation Of Heat Transfer To The Gun Barrel Wall”, U.S Army Armament Research and Development Command Ballistic Research Laboratory, Rapor No: ARBRL-MR-03094. 14 s., 1981
- [7] Gerber N., and Bundy M.L., “Heating of a Tank Gun Barrel: Numerical Study”, U.S Army Ballistic Research Laboratory, Rapor No: BRL-MR-3932, 41 s., 1991
- [8] Conroy P.J., “Gun Tube Heating”, U.S Army Ballistic Research Laboratory, Rapor No: BRL-TR-3300. 32 s., 1991
- [9] Gerber N., and Bundy M.L., “Effect of Variable Thermal Properties on Gun Tube Heating”, U.S Army Ballistic Research Laboratory, Rapor No: BRI-MR-3984. 49 s., 1992

- [10] Lawton B., "Temperature and Heat Transfer at the Commencement of Rifling a 155 mm Gun", 19th International Symposium of Ballistics, May 2001, Switzerland, s. 307-314, 2001
- [11] Witherell M.D., "A Thermal Performance Study of the 155mm XM297 Actively Cooled Barrel", Armament Research, Development and Engineering Center, Rapor No: ARAEW-TR-060220, 10 s., 2006
- [12] Bass M., and Swardt R.R., "Laboratory Heat Transfer Experiments on a 155 mm Compound Gun Tube With Full Length Integral Midwall Cooling Channels", Journal of Pressure Vessel Technology, v.128, 279-284, 2006
- [13] Chen T., and Liu C., "Inverse Estimation of the Time-varied Heat Flux and Temperature on 2-D Gun Barrel Using Input Estimation Method with Finite-element Scheme", Defence Science Journal, v.58(1), 57-76, 2008
- [14] Wu B., Chen G., and Xia W., "Heat Transfer in a 155 mm Compound Gun Barrel with Full Length Integral Midwall Cooling Channels", Applied Thermal Engineering, v.28, 881-888, 2008
- [15] Gonzaga R.N, Guedes R.O.C., and Neto F.S., "Analytical Determination of the Transient Temperature Distribution in Gun Barrels Subjected to External Cooling", 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, December 2010, Uberlandia-Brazil
- [16] Titiã V., Cristian B., and Florin-Radu S., "Theoretical and Experimental Study of the Unsteady Heat Transfer in the Barrel Wall of the Armament System", AFASES 2011 International Conference, May 2011, Brasov-Romania, s. 832-838, 2011
- [17] Deng S., Sun H.K., Chiu C-J., and Chen K-C., "Transient Finite Element for Bore-in Analysis of 9 mm Pistols", Applied Mathematical Modelling, v.38, 2673-2688, 2014
- [18] Qu P., Li Q., and Yang S., "Thermal Analyses and Experimental Validation of External Cooling Method for a Gun Barrel", Journal of Information & Computational Science, v.11(13), 4759-4767, 2014

- [19] Akçay M., and Yükselen M.A., “Unsteady Thermal Studies of Gun Barrels During the Interior Ballistic Cycle with Non-Homogenous Gun Barrel Material Thermal Characteristic”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, v.34(2), 75-81, 2014
- [20] Hameed A., Azavedo M., and Pitcher P., “Experimental Investigation of a Cook-Off Temperature in a Hot Barrel”, *Defence Technology*, v.10, 86-91, 2014
- [21] Vikas S., and Kumar M., “Cook-Off Study of a 120 mm Gun Barrel Using Finite Element Method”, *International Journal of Research in Aeronautical And Mechanical Engineering*, s.78-87, 2015
- [22] Sun Y., and Zhang X., “Transient Heat Transfer of a Hollow Cylinder Subjected to Periodic Boundary Conditions”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, v.137, 1-9, 2015
- [23] Şentürk A., Işık H., and Evcı C., “Thermo-mechanically Coupled Thermal and Stress Analysis of Interior Ballistics Problem”, *International Journal of Thermal Sciences*, v.104, 39-53, 2016
- [24] Işık H., Göktaş F., “Cook-Off Analysis of a Propellant in a 7.62 mm Barrel by Experimental and Numerical Method”, *Applied Thermal Engineering*, v.112, 484-496, 2017
- [25] Tuncer D.G. ve Alli H., “Ağır Silahların Geri Tepme Mekanizmalarının Tasarımında İç Balistik Modelin Oluşturulması ve Kama Kuvvetinin Hesaplanması”, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Kasım 2010, Balıkesir, s. 413-426, 2010
- [26] Department of Defense, Developing Science and Technologies List, “Section 9: Ground Combat Systems Technology”, 2003
- [27] Anonim, <https://tr.pinterest.com/pin/551691023078534096/>, 2018
- [28] Anonim, <http://www.inetres.com/gp/military/cv/artly/M109.html>, 2018
- [29] Anonim, <http://www.mkek.gov.tr/tr/product.aspx?id=52&source=Products&pid=919>, 2018
- [30] Öztörün D., “Bir Ağır Silah Namlusunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elastik-Plastik Gerilme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013

- [31] Anonim, <https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/m829a1.htm>, 2018
- [32] Önem O.U., “Effect of Temperature on Fatigue Properties of Din 35 NiCrMoV 12 5 Steel”, M.Sc. Thesis, The Middle East Technical University, Ankara, 2003
- [33] Akçay M., “Balistik”, Fen Edebiyat Fakültesi Ofset Tesisleri, Erzurum, 1993
- [34] Saatçi G.E., and Tahralı N., “Birlikimli Hasar Teorileri ve Yorulma Çatlağına Göre Ömür Değerlendirmeleri”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, v.2(1), 33-39, 2003
- [35] Taşkıran E., “Ağır Silahlardaki Geri Tepme Mekanizmalarının Dinamiği Üzerine”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010
- [36] Woodley C.R., “Modelling of Fume Extractors”, 19th International Symposium of Ballistics, May 2001, Interlaken-Switzerland, s. 273-280, 2001
- [37] Öztürk A.R., “İç Balistik (Genişletilmiş İkinci Basım)”, Makine ve Kimya Endüstri Kurumu Genel Müdürlüğü Özel Yayınları, Ankara, 1984
- [38] Sönmez U., “Obüs Namlusu Yanma Odasında Atış Esnasında Ortaya Geçen Gerilmelerin Matematiksel Modellenmesi ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2009
- [39] Anonim, <http://nigelef.tripod.com/ammo.htm>, 2018
- [40] Anonim, <https://www.gd-ots.com/munitions/artillery/155mm-m549a1/>, 2017
- [41] Anonim, <http://leavenworthmodelersclub.org/member-articles/modeling-artillery-and-mortar-systems/>, 2018
- [42] Yıldırım F., “Büyük Kalibre Mühimmatta Kullanılan Barutların Geometrik Şeklinin Değişiminin, Namlu İç Basıncı ve Namlu Çıkış Hızı Üzerindeki Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2013
- [43] Akçay M., “Balistik”, Ankara, s.118-123, 157, 160-162, 176-187, 2010
- [44] Carlucci D., and Jacobson S., “Theory and Design of Guns and Ammunition”, CRC Press, Boca Raton, 2007
- [45] Anonim, <http://www.prodass.com/XQ/ASP/P.40604/QX/webPageXML4.htm>, 2017

- [46] Cronemberger P.O., Lima Júnior E.P., Gois J.A.M., and Caldeira A.B., “Theoretical and Experimental Study of the Interior Ballistics of a Rifle 7.62”, *Thermal Engineering*, v.13(2), 20-27, 2014
- [47] Hwang Y., and Deng S., “Applying Neural Networks to the Solution of the Inverse Heat Conduction Problem in a Gun Barrel”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, v.130, 2008
- [48] Lawton B., “Thermo-Chemical Erosion in Gun Barrels”, *Wear*, v.251, 827-838, 2001
- [49] Putti A., and Chopade M.R., “Analysis of Heat Transfer Coefficient Inside Gun Barrel”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, v.5, 460-463, 2016
- [50] Putti A., Chopade M.R., and Chaudhari H.E., “A Review on Gun Barrel Erosion”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, v.4, 231-235, 2016
- [51] Department of the Army Technical Manual, TM 9-2350-311-10, 1994
- [52] Anonim, <http://www.mkek.gov.tr/tr/products.aspx?id=52&source=Products>, 2017
- [53] Mishra A., Hameed A., and Lawton B., “Transient Thermal Analyses of Midwall Cooling and External Cooling Methods for a Gun Barrel”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, v.132, 1-6, 2010
- [54] Johnston I.A., “Understanding and Predicting Gun Barrel Erosion”, Defence Science and Technology Organisation, Edinburg, South Australia, Australia, 2005