



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ORTA KALİBRE TOP NAMLUSUNDA
YANMA OLAYININ MATEMATİKSEL
MODELLENMESİ

Doğuş ÜNSAL

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Doğuş ÜNSAL tarafından hazırlanan “Orta Kalibre Top Namlusunda Yanma Olayının Matematiksel Modellenmesi” adlı tez çalışması 24/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Aziz Hakan ALTUN
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Doğuş ÜNSAL

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ORTA KALİBRE TOP NAMLUSUNDA YANMA OLAYININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Doğuş ÜNSAL

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Sercan DOĞAN

2024, 165 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN
Doç. Dr. Aziz Hakan ALTUN
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

Namlu içerisindeki yanma odasında ateşleme esnasında toplar çok yüksek sıcaklıklara ve basınçlara milisaniyeler mertebesinde çıkmaktadırlar. Gerçekleşen yanma olayı namlunun içerisindeki basınç değerini ve çekirdek hızını direkt olarak etkilemektedir. Ayrıca, yanma olayının verimi mühimmat içerisindeki barutun fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu durumu etkileyen önemli parametrelerden biri barut taneciklerinin şeklidir. Bir diğer durum da aynı baruta sahip farklı dolum oranında olan mühimmatların kullanılması sonucunda, aynı namlu ve çekirdekte farklı sıcaklık, basınç ve hız değerlerine de ulaşılmaktadır. Dolayısıyla, yanma verimi, barut dolum miktarı ve barut içeriği, namlu içerisinde gerçekleşen artan sıcaklık ve basınç değerlerini etkilemektedir. Bu durumlara bağlı olarak tez çalışması kapsamında orta kalibre bir top namlusunda meydana gelen yanma olayı analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Seçilen silah ve mühimmat tiplerine göre namluda oluşan zamana bağlı basınç, hız ve sıcaklık değerleri Mathcad programı yardımıyla yanma denklemleri çözülerek elde edilmiştir. Seçilen mühimmatın barut ağırlığına ve verilen ilk namlu çıkış hız değerine göre hesaplanan değerler istenilen farklı bir namlu çıkış hızına göre tekrar hesaplanmıştır. Namlu içindeki zamana ve çekirdek konumuna bağlı sıcaklıklar belirlendikten sonra ilk olarak ortalama sıcaklığa göre Reynolds, Prandtl ve Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Daha sonrasında ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir. Bir atış döngüsü için ısı taşınım katsayısı ile namluya geçen ısı miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca namlu için kritik olan kendi kendine ateşleme zamanı Lawton denklemleri kullanarak analitik olarak belirlenmiştir. Bulunan değerlere bağlı olarak ANSYS programı yardımı ile namlu kesitinde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Analitik hesaplamalar literatürdeki sonuçlarla doğrulanmıştır. Mathcad yazılımı ile oluşturulan program yardımıyla barut tipi ve miktarı değiştirilerek farklı namlu çıkış hızları elde edilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: İç Balistik, Namlu Isıl Analizi, Orta Kalibre Top Namlusu, Yanma

ABSTRACT

MS THESIS

MATHEMATICAL MODELLING OF COMBUSTION PHENOMENON AT MEDIUM CALIBER CANNON BARREL

Doğuş ÜNSAL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Sercan DOĞAN

2024, 165 Pages

Jury

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Sercan DOĞAN
Assoc. Prof. Dr. Aziz Hakan ALTUN
Asst. Prof. Dr. Şükrü Ulaş ATMACA**

During ignition in the combustion chamber inside barrel, the cannons reach very high temperatures and pressures in milliseconds. The combustion process directly affects the pressure value inside the barrel and the core speed. Additionally, the efficiency of combustion varies depending on the physical and chemical properties of the gunpowder in the ammunition. One of the important parameters affecting this situation is the shape of the gunpowder particles. In another case, as a result of using ammunition with the same gunpowder and different filling rates, different temperature, pressure and velocity values are achieved in the same barrel and core. Therefore, combustion efficiency, gunpowder filling amount and gunpowder content affect the temperature and pressure values in the barrel. Depending on these situations, the combustion phenomenon occurring in a medium-caliber gun barrel was examined analytically and numerically within the scope of the thesis study. Depending on the selected weapon and ammunition types, time-dependent pressure, velocity and temperature values inside the barrel were obtained by solving combustion equations with the help of the Mathcad program. These values, calculated according to the gunpowder weight of the selected ammunition and the given initial muzzle velocity value, were recalculated according to a different desired muzzle velocity. After determining the temperatures depending on time and bullet core position inside the barrel, Reynolds, Prandtl and Nusselt numbers were first calculated according to the average temperature. Afterwards, the heat transfer coefficient was obtained. The heat transfer coefficient and the amount of heat passing into the barrel were calculated for a firing cycle. In addition, the self-ignition time, which is critical for the barrel, was determined analytically using Lawton equations. Depending on the values found, the temperature distribution in the barrel cross-section was obtained with the help of the ANSYS program. Analytical calculations have been validated with results in the literature. Different muzzle velocities can be obtained by changing the type and amount of gunpowder with the help of the program created with Mathcad software.

Keywords: Barrel Thermal Analysis, Combustion, Inner Ballistic, Medium Caliber Cannon Barrel

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım kapsamında benimle sabırlı ve özverili bir şekilde ilgilenen saygı değer hocam Dr. Öğr. Üyesi Sercan Doğan'a teşekkürlerimi sunarım. Kamu Üniversite Sanayi iş birliği kapsamında tez çalışma sürecimi destekleyen ve üyesi olmaktan gurur duyduğum Aselsan Konya Silah Sistemleri A.Ş. ailesine teşekkür ederim.

Eğitim yaşamım boyunca yanımda olan beni büyüten, okutan ve yetiştiren anneme içtenlikle teşekkürlerimi sunarken hayatın her anında olduğu gibi yüksek lisans süresince beni destekleyen, anlayış ve sabır gösteren sevgili eşim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Doğuş ÜNSAL
KONYA-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Silahlar, Mühimmatlar ve Sevk Barutlar	1
1.1.1. Silahlar	1
1.1.2. Mühimmatlar	7
1.1.3. Sevk barutları	18
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	69
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	87
5.1 Sonuçlar	87
5.2 Öneriler	87
KAYNAKLAR	89
EKLER	91
EK-1 HESAPLAMALAR	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P_o	Namlu İçi Ortalama Basınç [Pa]
m_p	Mermi Kütlesi [kg]
m_B	Barut Kütlesi [kg]
X_e	Namlu Uzunluğu [m]
A	Namlu Kesit Alanı [m ²]
V_o	Namlu Çıkış Hızı [m/s]
η_p	Katsayı Vallier-Heydenreich Tablosunda Kullanılan
P_m	Namlu İçi Maksimum Basınç Değeri [Pa]
X_1	Namlu İçi Maksimum Basınç Değerinin Olduğu Konum [m]
$\sum \eta$	Vallier-Heydenreich Tablosunda Kullanılan Katsayı
t_1	Namlu İçi Maksimum Basınç Değerinin Olduğu Zaman [s]
V_1	Namlu İçi Maksimum Basınç Değerinin Olduğu Hız [m/s]
t_e	Namlu İçinde Geçen Zaman [s]
P_e	Namlu ucu Basıncı [Pa]
π_η	Vallier-Heydenreich Tablosunda Kullanılan Katsayı
θ_η	Vallier-Heydenreich Tablosunda Kullanılan Katsayı
$\emptyset_\eta$	Vallier-Heydenreich Tablosunda Kullanılan Katsayı
Γ_η	Vallier-Heydenreich Tablosunda Kullanılan Katsayı
P_{max}	Namlu İçi Maksimum Basınç Değeri [Pa]
V_x	Namlu İçi Konuma Bağlı Hız [m/s]
t_x	Namlu İçi Konuma Bağlı Zaman [s]
R	Gaz Sabiti [(m ² .kg)/(mol.s ² .K)]
η	Barut Covolume Değeri [m ³ /kg]
p	Basınç [Pa]
T	Sıcaklık [K]
m_g	Barut Gazının Kütlesi [kg]
F_{barut}	Barutun Gücü [m ² /s ²]
T_0	Barutun Patlama Sıcaklığı [K]
MB	Katı Barutun Kütlesi [kg]

V_{yanma}	Yanma Odası Hacmi [m^3]
ρ_b	Barut Gazının Yoğunluğu [kg/m^3]
d_u	Gazların İç Enerji Değişimi [J/kg]
C_p	Sabit Basıncıta Özgöl Isı [$\text{J}/\text{kg.K}$]
C_v	Sabit Hacimde Özgöl Isı [$\text{J}/\text{kg.K}$]
γ	Özgöl Isılar Oranı
E_T	Barutun Enerjisi [J]
E_k	Mermi Kinetik Enerjisi [J]
E_h	Mermi Isı Enerjisi [J]
E_b	Silahın Hareket Enerjisi [J]
M_p	Mermi Kütlesi [kg]
V_m	Mermi Hızı [m/s]
θ	Barut Enerjisinin Namlu Isınma Enerjisine Oranı
m_e	Etkin Kütle [kg]
Z	Barut Yanma Oranı
P_{ort}	Ortalama Basıncı Değeri [Pa]
$V_{\text{hacim}(t)}$	Konuma Bağlı Hacim [m^3]
$v(t)$	Konuma Bağlı Hacim [m^3]
$z(t)$	Konuma Bağlı Yanma Oranı
ρ_b	Barut Yoğunluğu [kg/m^3]
M_B	Barut Kütlesi [kg]
$X(t)$	Zamana Bağlı Konum [m]
$P_{\text{ilkhareket}}$	Çekirdeğin Harekete Başladığı Andaki Basıncı [Pa]
m_{barut}	Çekirdeğin İlk Harekete Başlamadan Yanan Barut Miktarı [kg]
V_{hacim}	Yanma Odası Hacminden Katı barut hacminin Çıkarılması [m^3]
V_{c1}	Harekete Öncesi Yanan Barut Miktarına Göre Hesaplanan Hacim [m^3]
T_{alevsh}	Sabit Hacimde Alev Sıcaklığı [K]
Yanmahızı	Barut Yanma Hızı [m/s]
Yanmaoranı	Barut Yanma Oranı
P_{xx}	Namlu İçİ Düzeltilmiş Basıncı [Pa]
Δt_{xx}	Hesaplama Adımlar Arası Geçen Zaman [s]
ΔS	Her Bir Adımda Hesaplanan Barut Yanma Uzunluğu [m]
db	Yedi Delikli Silindirik Barut Tanesi Dış Çap [mm]

d_k	Yedi Delikli Silindirik Barut Tanesi İç Delik Çapı [mm]
t_{web}	Barut Yanma Ağ Uzunluğu [m]
Alan	Namlu Kesit Alanı [m ²]
R_m	Gaz Sabiti [(m ²)/(s ² .K)]
T_{gaz}	Barut Gazı Sıcaklığı [K]
ρ_{gaz}	Barut Gazı Yoğunluğu [kg/m ³]
R_{ideal}	Gaz Sabiti [(m ² .kg)/(mol.s ² .K)]
n_{mol}	Barut Gazının Kütle Bazında Mol Sayısı [mol/kg]
v	Barut Gazı Genleşme Hızı [m/s]
CK	Barut Gazı Genleşme Hızı Hesaplamasında Kullanılan Katsayı
n	Barut Gazı Genleşme Hızı Hesaplamasında Kullanılan Katsayı
Re	Reynolds Sayısı
μ	Dinamik Viskozite [kg/m.s]
D	Namlu İç Çap [m]
Pr	Prandtl Sayısı
$K_{ısı}$	Gaz Isı İletim Katsayısı [W/m.K]
Nu	Nusselt Sayısı
$H_{ısıtaşınım}$	Isı Taşınım Katsayısı [W/m ² .K]
H_{∞}	Birim Atışta Birim Alana Aktarılan Isı Akısı [W/m ²]
T_i	Namlu İlk Sıcaklığı [K]
T_{max}	En Yüksek Namlu İç Yüzey Sıcaklığı [K]
t_0	Zaman sabiti [s]
α	Namlu Malzemesi Isıl Yayılm Katsayısı [m ² /s]
m_r	Mühimmat Ağırlığı [kg]
d	Namlu İç Çap [m]
k	Namlu Malzemesi Isı İletim Katsayısı [W/m.K]
C_{pnamlu}	Namlu Malzemesi Öz ısı

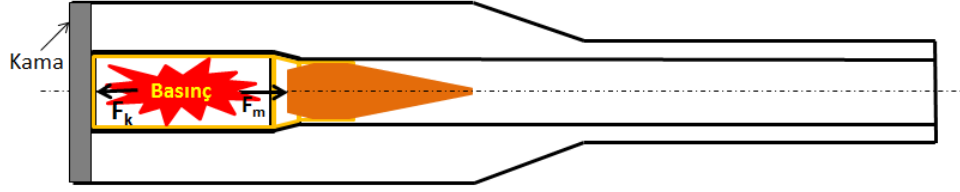
1. GİRİŞ

İnsanlar, tarih sayfasına çıktıkları ilk günden beri öncelikle vahşi hayvanlardan korunmak için ve daha sonraları birbirlerinden korunmak için silah yapmaya başlamışlardır. İlk silahlar bir yontma taştan yapılmış iken, zaman ilerledikçe insanlar çeşitli silahlar yapmaya başlamışlardır. Öncelikle silahlar mızraklardan ve oklardan doldurulmalı tüfeklere ve daha sonrasında makineli tüfeklere dönüşmüştür. Daha büyük ve dayanıklı surların yapılması, topraklarında gelişmesine sebep olmuştur. Top teknolojisi de orta çağdan beri hızla gelişmiştir ve gelişmeye devam etmektedir. Hava araçlarının yapılması uçaksavarlara ihtiyaç duyulmasına sebep olmuştur ve sonrasında uçaksavarlar tasarlanmaya başlamıştır. Bir yandan silah sistemleri gelişirken diğer yandan onları taşıyan araçlar ve doğrudan silah olarak da tasarlanan tanklar, obüsler, denizaltıları, bombardıman uçakları ve savaş uçakları insanlar tarafından sürekli geliştirilmiştir.

1.1. Silahlar, Mühimmatlar ve Sevk Barutlar

1.1.1. Silahlar

Ateşli silahlar mühimmatı dışarı belli bir hızda atan mekanizmalar ile çalışmaktadır. Tüm silah sistemlerinde, barutun kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesini sağlayan kapalı bir hazne (yanma odası) ve harekete başlayan mühimmatın hızlandığı yer olan silah namlusu bulunmaktadır (Şekil 1.1). Silah sistemlerinde bulunan bu iki alt sistem, iç balistik hesaplamaları açısından önem arz etmektedir. Mühimmat ise patlayıcı veya diğer kimyevi maddeleri içeren, personele, malzemeye veya askeri hedeflere zarar vermek için bir silaha yerleştirilerek atılan veya havadan bırakılan ekipmanlardır. Silahlar genel olarak küçük, orta ve büyük kalibre olmak üzere üç şekilde sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.2). Küçük kalibre silahların mühimmatı 5.56 mm ile 12.7 mm arasındaki çapa sahipken, orta kalibre silahların mühimmatı 12.7 mm ile 40.0 mm çap arasında değişmektedir. Son olarak büyük kalibre silahların mühimmatı ise 60.0 mm ve üstü çapa sahiptirler. Bu mühimmatlar tank, top, obüs, havan gibi ateşli silahlardan atılmaktadırlar.



Şekil 1.1. Namlu içi yanma olayı



Şekil 1.2. Küçük ve orta kalibre mühimmat

Orta kalibre silahlarda en çok 20 mm ile 30 mm arasındaki çaplara sahip olan orta kalibre toplar kullanılmaktadır. Ancak, 35 mm ve 40 mm kalibredeki toplar ise genellikle hava savunma sistemlerinde ve gemilerde kullanılmaktadır. Silah ateşleme yaptıktan sonra otomatik topların bazılarının kovan dışına alınması yanmış barut gazları ile sağlanır. Böylece, yanmış barut gazlarının enerjisinin bir kısmı çekirdeğin hareketini sağlarken, diğer bir kısmı da kovanın dışarı atılmasını sağlar. Bu tip silahların en sık kullanılanlarından biri Oerlikon üretimidir ve kalibresi 20 mm'dir (Şekil 1.3.). Ayrıca, 20 mm orta kalibre silah çeşitleri Çizelge 1.1.'de verilmiştir.



Şekil 1.3. 20 mm kalibre top atan Oerlikon üretimi silah

(https://en.wikipedia.org/wiki/Oerlikon_20_mm_cannon)

Çizelge 1.1. 20 mm kalibre silah çeşitleri
(https://en.wikipedia.org/wiki/Oerlikon_20_mm_cannon)

Tip	F	L	S	FFF	FFL	FFS
Kalibre	20 mm					
Hareket	API (Advanced Primer Ignition) Blowback					
Ağırlık [kg]	30	43	62	24	30	39
Uzunluk [mm]	1350	1820	2120	1350	1880	2120
Namlu Uzunluğu[mm]	800	1200	1400	760	1200	1400
Ateşleme Oranı [rpm]	450	350	280	520	500	470
Çıkış Hızı [m/s]	550-575	670-700	835-870	550-600	675-750	830
Kovan Tipi	20x70RB	20x101RB	20x110RB	20x72RB	20x101RB	20x110RB
Çekirdek Ağırlığı	127g					
Besleme Sistemi	Kutu Şarjör 15 Mühimmat			30, 45, 60, 75, 100 Mühimmatlı Variller veya 15 Mühimmatlı Kutu Şarjör		

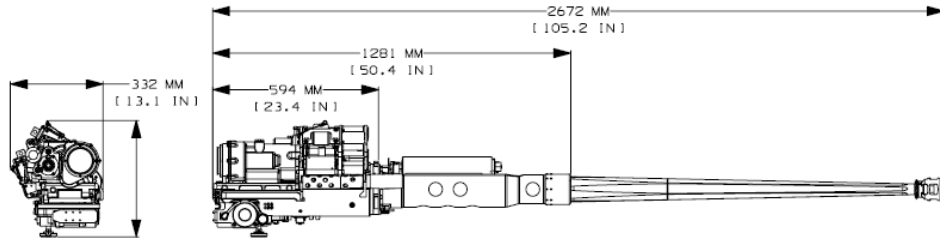
Otomatik orta kalibre topların diğer bir çeşidi ise besleme sisteminin zincirli ve elektrik tahrikli olanıdır. Bu silahlardan en sık kullanılanı Northrop Grumman firmasının üretimi olan Bushmaster serisi toplardır (Şekil 1.4.). Bu silahlarda mühimmat zincir mekanizması ile namlu içerisindeki yanma odasına sürülür ve ateşleme gerçekleşikten sonra mekanizma tarafından dışarı alınır. Bu durumda, yanmış barut gazları kovani dışarı atmak için kullanılmamaktadır ve dolayısıyla bu işlem için enerji harcanmamaktadır.



Şekil 1.4. Bushmaster Zincir mekanizmalı silah tipleri

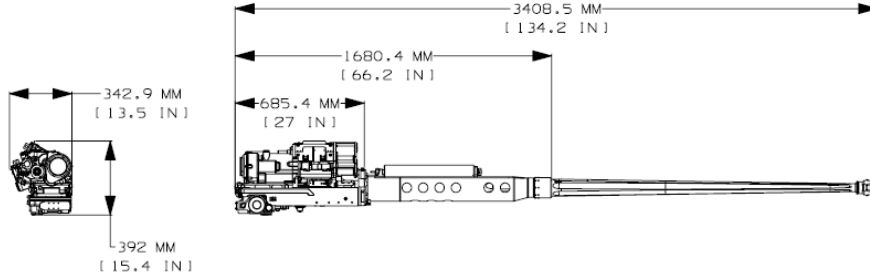
Çizelge 1.2. Zincir mekanizmalı Bushmaster silah özellikleri

Bushmaster Chain Gun			
Tip	M242	MK44	BushmasterIII
Kalibre [mm]	25	30	35
Namlu Ağırlığı [kg]	49	69	127
Toplam Silah Ağırlığı [kg]	120	156	231
Geri Tepme Kuvveti [kN]	45	36	63



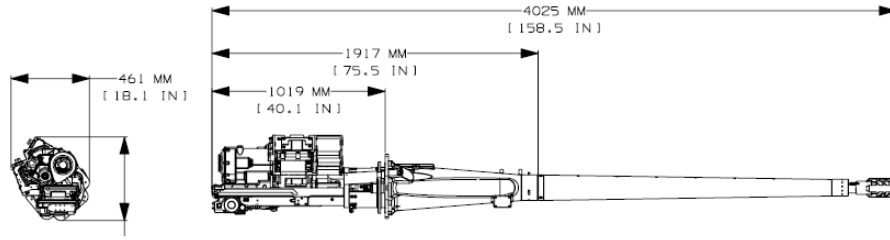
Şekil 1.5. Bushmaster MK242 25 mm

(cdn.northropgrumman.com/-/media/wp-content/uploads/M242-25mm-Bushmaster-Chain-Gun.pdf?v=1.0.0)



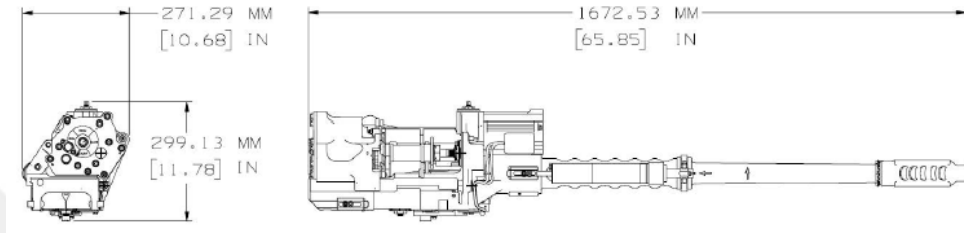
Şekil 1.6. Bushmaster MK44 30 mm

(cdn.northropgrumman.com/-/media/wp-content/uploads/Mk44-30mm-Bushmaster-Chain-Gun.pdf?v=1.0.0)



Şekil 1.7. Bushmaster III 35 mm

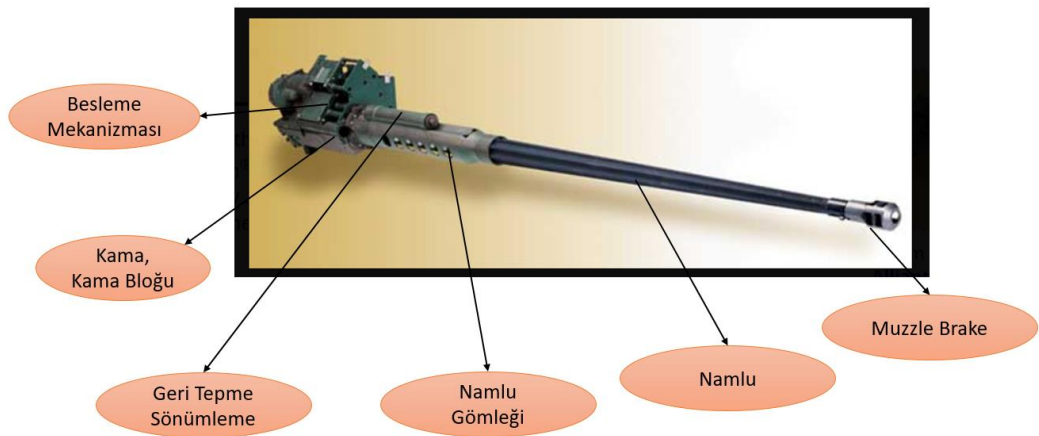
(cdn.northropgrumman.com/-/media/wp-content/uploads/bushmaster-iii-35-50mm-bushmaster-chain-gun.pdf)



Şekil 1.8. Bushmaster M230 30 mm Hava Araçları İçin Kısa Namlu

(cdn.northropgrumman.com/-/media/wp-content/uploads/M230-30mm-Bushmaster-Chain-Gun.pdf?v=1.0.0)

Bir silah genel olarak; besleme mekanizması, kama ve kama bloğu, geri tepme sönümler mekanizması, namlu gömleği, namlu, ağız freni (muzzle brake) gibi parçalardan oluşmaktadır (Şekil 1.5.).



Şekil 1.9. Ağır makineli bir silahın parçaları

Besleme mekanizması, mühimmatın kamaya beslenmesini sağladığı gibi aynı zamanda boş kovanın dışarıya atılmasını da sağlamaktadır Kama bloğuna sökölüp

takılabilen namlu monte edilmektedir. Namlunun kaplaması aşındığı veya zarar gördüğü zaman sadece namlu değiştirilerek silah yenilenebilir. Kama bloğu, sönümleme mekanizması ile namlu gömleğine bağlanmaktadır. Böylece, ateşleme yapıldığı anda namlu ve kama bloğunun geriye doğru hareket etmesine rağmen namlu gömleği sabit kalmaktadır. Kama ise mühimmatın namlu içinde yanma odasına doğru sürülmesini sağlamaktadır. Geri tepme sönümleme mekanizması, bir yay gibi çalışmaktadır ve amortisör görevi görmektedir. Ateşleme yapıldıktan sonra oluşan geri tepme kuvvetini sönümlemek için kullanılmaktadır. Sönümleme sertliğine göre bağlantı bölgesine uygulanan kuvvetler değişir ve konstrüksiyon tasarımı da bu duruma göre değişme zorunda kalmaktadır. Genelde sönümleme mekanizmalarında sönümlenen momentumun çoğu ısıya dönüştürülerek bertaraf edilmektedir ve böylece geri tepme mesafesi kısalmaktadır. Namlu gömleği ile kama bloğu arasında kurulan sönümleme mekanizması sayesinde sistemin komple hareketi engellenmektedir. Namlu gömleği, aynı zamanda namluya katılık sağlayarak doğal frekans modlarını değiştirmektedir. Namlu, mühimmatın istenilen hızlarda ve dönüşlerde çıkmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Namlu içi oluşturulan yiv setler sayesinde çekirdeğe yeterince jiroskobik etki verilerek atmosferde daha tutarlı ve daha düzgün hareket etmesini sağlanmaktadır. Namlu uzunluğu uygun değerlerde olursa, mühimmat istenilen hızlara ulaşmaktadır. Daha uzun veya daha kısa yapılması durumunda namlu içi yanma sona ermektedir ve kayıplardan dolayı hızlar düşmeye başlamaktadır. Namlunun çok kısa yapılması durumunda yanma işlemi tamamlanmadığı, için namlu ağzından alev çıkmaktadır ve mermi hızları düşük kalmaktadır. Namlu ağız baskısı özellikle ağır kalibrelerde namlu ağzına takılarak, merminin ateşlenmesinden dolayı oluşan yüksek basıncın yaratacağı şiddetli geri tepme gücünü ve namlu ağzından saliseler içinde çıkacak gazları daha önceden hesaplanmış yönlerle dağıtarak, bu gücü azaltmak için kullanılmaktadır.

Namlu ağız baskısının avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır

Avantajları:

- Geri tepme kuvvetini azaltır.
- Ateşlenen merminin transizyonel balistik değerlerini düzeltir.
- Namlu ucundaki ağırlığından dolayı atış sonrası şahlanmayı azaltır.

Dezavantajları:

- Patlama sesini 10-20 db. Arttırabilir. (>120 db. Rahatsız edicidir.)
- Gazların geriye doğru aktarıldığı modellerde atıcıya zarar verebilir ve namlu patlama riski oluşturabilir.

1.1.2. Mühimmatlar

Mühimmatlar silah kalibresine ve kullanım özelliklerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Teknoloji geliştikçe malzeme mühendisliği alanında hızla ilerlemeler kaydedilmekte gelişen zırhlara karşı mühimmatlarda gelişme göstermek zorunda kalmaktadır. Mühimmatlar kalibrelerine göre ayrılırken belirli bir kovan ölçülerine sahip olmalı ki aynı kalibre silahta farklı üreticileri farklı özelliklerdeki mühimmatlarını kullanılabilsin. 30 mm orta kalibre bir silah için farklı üreticilerin ürettiği ve farklı teknik özelliklere sahip mühimmatlar kullanılabilir. Örneğin kalibreleri aynı olsa bile aynı istenen menzile ve ilk hıza göre mühimmat özellikleri değişebilmektedir. Aşağıdaki tabloda aynı kalibreye sahip 30 mm mühimmatların ebatları 30x113 mm ve 30x173 mm olarak görülmektedir. 30x173 mm genelde kara araçlarındaki taret sistemlerinde kullanılırken 30x113 mm ise kısa namlulu otomatik toplarda hava araçlarında kullanılmaktadır.

Çizelge 1.3. Bazı Mühimmat çeşitleri (Wikipedia)

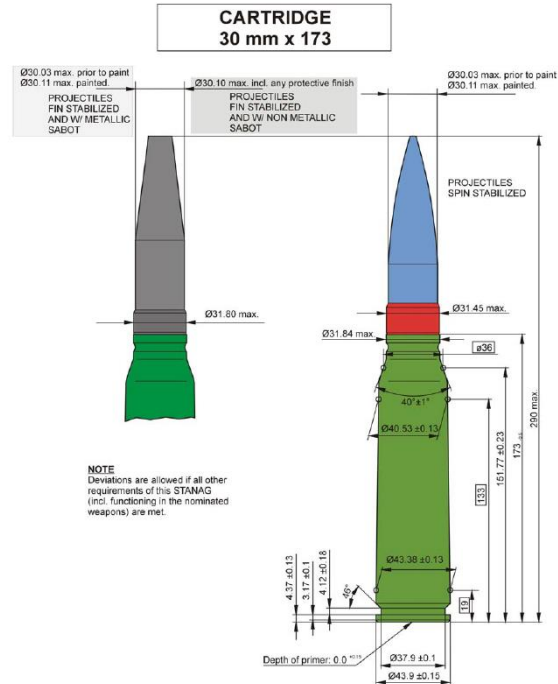
Kalibre	Mermi Çap x Kovan Uzunluğu	Tüm Mühimmat Çap x Uzunluk	Tüm Mühimmat Ağırlığı	Kullanılan Silahlar
25 mm	25x137 mm	38x223 mm	493 gr	KBA, M242 Bushmaster , M811
30 mm	30x113 mm	30x200 mm	339 gr	M230, M230LF
30 mm	30x173 mm	44x290 mm	670 gr	Mk44 Bushmaster , XM813, Denel GI30, MK30-2, Wotan , GAU-8A
40 mm SS	40x180 mm	44x290 mm	680 gr	Mk44S
35 mm	35x228 mm	55x387 mm	1.550 gr	Bushmaster III 35mm, Oerlikon KDE
50 mm SS	50x330 mm	55x387 mm	2.000 gr	Bushmaster III 50mm
40 mm CTA	40x255 mm	65x255 mm	2.200 gr	CTA
40 mm	40x365R	65x534 mm	2.400 gr	Bofors L70, Bushmaster IV

30x113 mm mühimmat 339 gr. olmasına karşın 30x173 mm mühimmat 670 gr. sahiptir. Bu durum, iki farklı mühimmatın menzili ve hedefte oluşturduğu etkiyi değiştirmektedir. NATO bu tür kullanımlar için mühimmatlara belirli standartlar getirmiştir. Bu standartlar kalibre ölçüsüne göre aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

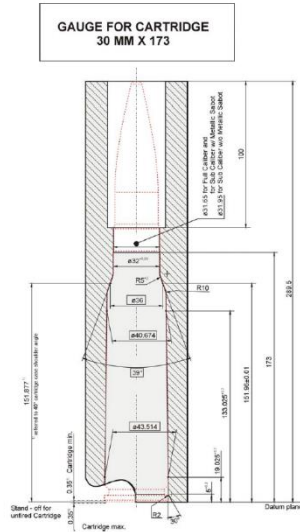
Çizelge 1.4. Mühimmatların Stanag Kodları

SİLAHLAR	KALİBRE	NATO	STANAG KODU
KÜÇÜK SİLAHLAR	9,0x19 mm	NATO	4090
	4,6x30 mm	NATO	4820
	5,7x28 mm	NATO	4509
	5,56x45 mm	NATO	4172
	7,62x51 mm	NATO	2310
	12,7x99 mm	NATO	4383
	40 mm El Bombası	NATO	
OTOMATİK ORTA KALİBRE TOPLAR	20x102 mm	NATO	3585
	25x137 mm	NATO	4173
	27x145 mm	NATO	3820
	30x173 mm	NATO	4624
TANK SİLAHLARI	105x617 mm R	NATO	4458
	120x570 mm R	NATO	4385
BÜYÜK KALİBRE TOPLAR	105 mm	NATO	4425
	155 mm	NATO	4425

Bununla beraber 30x170 mm Rarden ve 30x173 mm GAU-8 Avanger gibi üreticiler küçük farklarla mühimmat üretmişlerdir. 30 mm orta kalibre top için iç balistik hesaplarımızı yaparken; aşağıda diğer çeşitleri tablo halinde verilmiş olan General Dynamics üretimi 30 mm mühimmatlardan MK264 MPLD-T kodlu mühimmatın teknik özelliklerini kullanacağız. Üreticiler mühimmat özelliklerini verirken belirli silahlar için verirler ve barutun kimyasal özellikleri genellikle paylaşmazlar bundan dolayı yanma hesapları bu mühimmatın M2 barut olduğu kabul edilerek yapılacaktır.



Şekil 1.10. 30mmx173 Mühimmat Ölçüleri (STANAG4624)

ANNEXE C TO
STANAG 4624
(Edition 1)

Şekil 1.11. 30mmx173 Mühimmat Yanma Odası Ölçüleri (STANAG4624)

Çizelge 1.5. 30mmx173 Mühimmat General Dynamics

(www.gd-ots.com/wp-content/uploads/2017/11/30x173mm-Ammunition-Suite-MK44-Cannon-Version-3.pdf)

30x173mm Ammunition Family for MK44 Cannon				
	MK239 Target Practice, Tracer (TP-T)	MK264 Multipurpose Low Drag - Tracer (MPLD-T)	PGU-15A/B Target Practice (TP)	PGU-13D/B High Explosive Incendiary (HEI)
Caliber	30x173mm	30x173mm	30x173mm	30x173mm
Type	TP-T	MPLD-T Incendiary	TP	HEI
Cartridge Length	290mm	290mm	290mm	290mm
Cartridge Weight	670g	835g	670g	670g
Projectile Weight	365g	363g	363g	363g
Propellant Weight	153g	150g	147g	147g
Case Length	173mm	173mm	173mm	173mm
Case Material	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum
Primer	M36A2 Percussion	M36A2 Percussion	M36A2 Percussion	M36A2 Percussion
Fuze	N/A	Chemical	N/A	M505
Muzzle Velocity (typical)	1080 m/sec	1070 m/sec	1020 m/sec	1020 m/sec
Chamber Pressure	345 MPa	345 MPa	375 MPa	375 MPa
Dispersion	0.5 Milliradians	0.5 Milliradians	0.6 x 0.6	0.6 x 0.6
Rate of Fire	100/200 rounds/minute	100/200 rounds/minute	4,200 rounds/min (variable)	4,200 rounds/min (variable)
Effective firing range (naval)	5,100m	5,100m	1,220m	1,220m
Applicable to use in weapons	MK44	MK44	GAU-8 & MK44	GAU-8 & MK44
Packing	Per US Govt Approved TDP	Per US Govt Approved TDP	Per US Govt Approved TDP	Per US Govt Approved TDP
Can	Metal - M592	Metal - M592	Metal - M592	Metal - M592
Rounds/Can	30 rounds/can	30 rounds/can	30 rounds/can	30 rounds/can
Cans/Pallet	24 cans/pallet	24 cans/pallet	24 cans/pallet	24 cans/pallet
Rounds/Pallet	720 rounds/pallet	720 rounds/pallet	720 rounds/pallet	720 rounds/pallet
Pallets/Container	13 pallets/container*	13 pallets/container*	13 pallets/container*	13 pallets/container*
Manufacturing Year	New Production	New Production	New Production	New Production

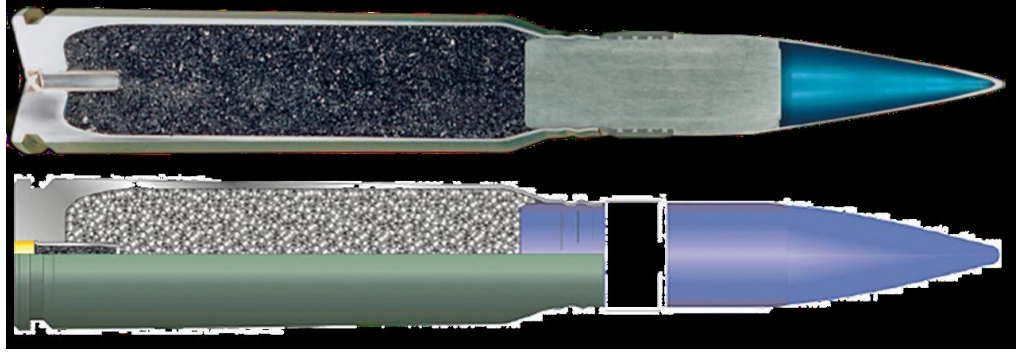
Çizelge 1.6. 30mmx173 Mühimmat General Dynamics
(www.gd-ots.com/wp-content/uploads/2021/02/30mmx173_AmmunitionSuite_202010.pdf)

Our Ammunition Suite for the MK44 Automatic Gun Systems Include:																											
MK239 <i>Target Practice - Tracer (TP-T)</i> Low-cost training ammunition in support of HEI and MP-T.  <table border="1"> <tr><td>Length</td><td>290mm</td></tr> <tr><td>Cartridge Mass</td><td>670gm</td></tr> <tr><td>Projectile Mass</td><td>365gm</td></tr> <tr><td>Muzzle Velocity</td><td>1070 m/sec</td></tr> <tr><td>Chamber Pressure</td><td>345 MPa</td></tr> <tr><td>Dispersion</td><td>0.5 Milliradian</td></tr> </table>	Length	290mm	Cartridge Mass	670gm	Projectile Mass	365gm	Muzzle Velocity	1070 m/sec	Chamber Pressure	345 MPa	Dispersion	0.5 Milliradian	MK317 <i>Target Practice Discarding Sabot - Tracer (TPDS-T)</i> Training ammunition ballistically matched with APFSDS-T (MK258).  <table border="1"> <tr><td>Length</td><td>290mm</td></tr> <tr><td>Cartridge Mass</td><td>445gm</td></tr> <tr><td>Projectile Mass</td><td>140gm</td></tr> <tr><td>Muzzle Velocity</td><td>1550 m/sec</td></tr> <tr><td>Chamber Pressure</td><td>460 MPa</td></tr> <tr><td>Dispersion</td><td>0.7 Milliradian</td></tr> </table>	Length	290mm	Cartridge Mass	445gm	Projectile Mass	140gm	Muzzle Velocity	1550 m/sec	Chamber Pressure	460 MPa	Dispersion	0.7 Milliradian		
Length	290mm																										
Cartridge Mass	670gm																										
Projectile Mass	365gm																										
Muzzle Velocity	1070 m/sec																										
Chamber Pressure	345 MPa																										
Dispersion	0.5 Milliradian																										
Length	290mm																										
Cartridge Mass	445gm																										
Projectile Mass	140gm																										
Muzzle Velocity	1550 m/sec																										
Chamber Pressure	460 MPa																										
Dispersion	0.7 Milliradian																										
MK264 <i>Multipurpose - Tracer (MP-T)</i> Light armor piercing capability with delayed explosive reaction. Available with and without self destruct.  <table border="1"> <tr><td>Length</td><td>290mm</td></tr> <tr><td>Cartridge Mass</td><td>835gm</td></tr> <tr><td>Projectile Mass</td><td>363gm</td></tr> <tr><td>Muzzle Velocity</td><td>1055 m/sec</td></tr> <tr><td>Chamber Pressure</td><td>345 MPa</td></tr> <tr><td>Fuze</td><td>Chemical</td></tr> <tr><td>Dispersion</td><td>0.5 Milliradian</td></tr> </table>	Length	290mm	Cartridge Mass	835gm	Projectile Mass	363gm	Muzzle Velocity	1055 m/sec	Chamber Pressure	345 MPa	Fuze	Chemical	Dispersion	0.5 Milliradian	MK258 <i>Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot - Tracer (APFSDS-T)</i> Armor piercing capability.  <table border="1"> <tr><td>Length</td><td>290mm</td></tr> <tr><td>Cartridge Mass</td><td>706gm</td></tr> <tr><td>Projectile Mass</td><td>230gm</td></tr> <tr><td>Muzzle Velocity</td><td>1430 m/sec</td></tr> <tr><td>Chamber Pressure</td><td>345 MPa</td></tr> <tr><td>Dispersion</td><td>0.4 Milliradian</td></tr> </table>	Length	290mm	Cartridge Mass	706gm	Projectile Mass	230gm	Muzzle Velocity	1430 m/sec	Chamber Pressure	345 MPa	Dispersion	0.4 Milliradian
Length	290mm																										
Cartridge Mass	835gm																										
Projectile Mass	363gm																										
Muzzle Velocity	1055 m/sec																										
Chamber Pressure	345 MPa																										
Fuze	Chemical																										
Dispersion	0.5 Milliradian																										
Length	290mm																										
Cartridge Mass	706gm																										
Projectile Mass	230gm																										
Muzzle Velocity	1430 m/sec																										
Chamber Pressure	345 MPa																										
Dispersion	0.4 Milliradian																										

Aşağıda mühimmatların çeşitleri kısaca anlatılmıştır. Bu çeşit mühimmatlar her üreticide olmadığı gibi her kalibrede de bulunmayabilir. Mühimmatlar çeşitlerine göre farklı renklere boyanarak anlaşılabilir.

Hedef Alıştırma mühimmatı, gerçek savaştan ziyade eğitim ve tatbikat oturumlarında kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmıştır (Yılmaz, 2023).

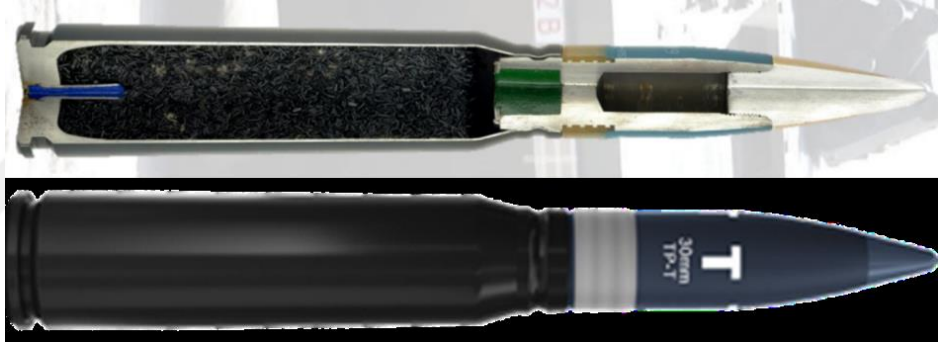
Bu, topçuların, patlayıcı mermi kullanma riski ve maliyeti olmadan, gerçek dünya senaryolarında kullanacakları aynı tür mühimmatı kullanarak pratik yapmalarına olanak tanır. Ayrıca kentsel alanlardaki yakın poligonlarda ve eğitim merkezlerinde de kullanılabilirler. Genellikle merminin rengi, bunun bir TP mermisi olduğunu belirtmek için mavidir.



Şekil 1.12. 30mm TP Mühimmat (Yılmaz, 2023)

Hedef Alıştırması/İzleyici (TP-T):

TP-T turu, eğitim sırasında turun yörüngesinin daha iyi gözlemlenmesine ve düzeltilmesine olanak tanıyan bir izleyici bileşeni içermesi dışında standart bir hedef alıştırma turudur.



Şekil 1.13. 30mm TP-T Mühimmat (Yılmaz, 2023)

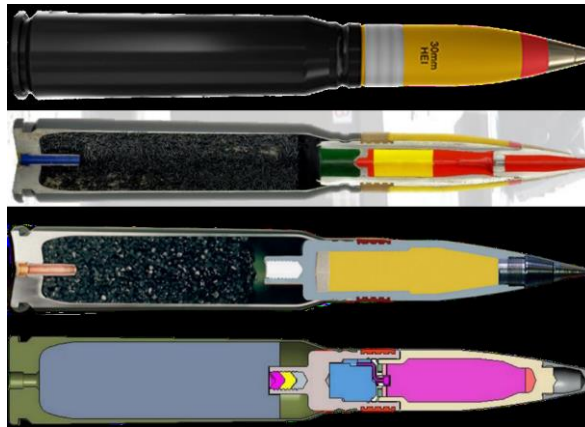
Özellikle gece operasyonları sırasında makineli tüfek silah istasyonlarında atış doğruluğunu artırmak için mermi yolunun gözlemlenmesi önemlidir.



Şekil 1.14. 30mm TP-T Mühimmat (Yılmaz, 2023)

Yüksek Patlayıcı (HE) (HIGH EXPLOSIVE), Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı (HEI) (HIGH EXPLOSIVE INCENDIARY):

Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı (HEI) mühimmat, çarpma anında patlayacak ve çarpma noktası çevresinde geniş bir alana zarar verecek şekilde tasarlanmış bir mermi türüdür. Mermi, patlayıcı kuvvet ve merminin parçalanması yoluyla hedefi yok etmek veya etkisiz hale getirmek için tasarlanmış patlayıcı bileşenin yanı sıra, yangına neden olan ve yüksek sıcaklıklarda yanabilen yangın çıkarıcı bir bileşen içerir. HEI mermileri tipik olarak anti-personel, anti-materyal ve parçalanma etkileri için kullanılır ve araçlar, binalar ve personel de dâhil olmak üzere çok çeşitli hedeflere karşı kullanılabilir. Merminin yangın çıkarıcı bileşeni, yangına neden olmak ve hedefin iç sistemlerine zarar vermek, onarımı ve kullanımı zorlaştırmak için tasarlanmıştır (Yılmaz, 2023).



Şekil 1.15. 30mm HE Mühimmat (Yılmaz, 2023)

Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı/İzleyici (HEI-T):

Mermiyi hedefe doğru hareket ederken takip etmek için iz bileşenli yüksek patlayıcı mermidir.

Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı/İzleyici-Kendini İmha Etme (HEI-T/SD):

İzleyicili yüksek patlayıcı mermidir ancak aynı zamanda hedefi vuramama durumunda kendi kendini imha etme yeteneğine de sahiptir.

İnert İzleyicili Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı (HEI/IT):

Yüksek patlayıcı yangın çıkarıcı mühimmatın geliştirilmiş çeşitlerinden biridir.

Zırh Delici Yangın Çıkarıcı (API):

Zırh Delici Yangın Çıkarıcı (API) mühimmatı, zırhı delmek ve ardından hedefte büyük miktarda yangın çıkarıcı etkiler yaratmak için tasarlanmış bir mermi türüdür. Mermi tipik olarak tungsten veya tükenmiş uranyum gibi yoğun bir metalden yapılır ve bir aracın veya diğer sertleştirilmiş hedefin zırhını delmesine olanak tanıyan sivri bir uca sahiptir. Merminin yangın çıkarıcı bileşeni, merminin zırhı delerek hedefi devre dışı bırakması veya yok etmesi amaçlanan kinetik enerjisine ek olarak yangınlara ve yüksek sıcaklıklarda yanmaya neden olacak şekilde tasarlanmıştır. API mermileri genellikle tanklar, sığınaklar ve tahkimatlar gibi ağır zırhlı hedeflere karşı kullanılır. Merminin yangın çıkarıcı bileşeni, yangına neden olmak ve hedefin iç sistemlerine zarar vermek, onarımı ve kullanımı zorlaştırmak için tasarlanmıştır.

Zırh Delici Yangın Çıkarıcı Seyreltilmiş Uranyum (API-DU): Seyreltilmiş uranyum içeren API mühimmatıdır.

Geliştirilmiş Yanal Etkili Delici (PELE):

PELE, izleyici dışında hiçbir enerjik malzeme içermeyen, sigortasız bir mühimmat fişegidir. Gelişmiş savaş etkinliğini, kullanım kolaylığı ve eğitim turunun güvenliği ile birleştiren "inert" bir kartuştur. Mermi, önemli ölçüde farklı yoğunluklara sahip iki parçadan oluşuyor ve HE savaş başlıklarıyla ilgili güvenlik kaygıları olmadan yüksek parçalanma ve delme performansı sağlıyor. Zırh önleme performansı HE mühimmatınıninkini aşar ve yüzey savaşçılarında patlayıcı depolama ihtiyacını ortadan kaldırır. Kartuşun hem savaş hem de eğitim mühimmatı olarak ikili kullanımı, idari yükün azalmasına ve lojistiğin basitleştirilmesine neden olur.

Kırılabilir Zırh Delici Boşaltıcı Sabot/İzleyici (FAPDS-T):

Kırılabilir Zırh Delici Boşaltıcı Sabot, hem sert hem de yumuşak hedeflerin imhası için geleneksel yüksek patlayıcı ve fitillere göre daha etkili ve güvenli bir alternatif olarak geliştirildi. FAPDS mühimmatı, bütünleşmiş bir tahrik bandına sahip plastik kalıplı

tungsten alaşımlı çekirdek kullanan alt kalibre teknolojisi üzerine inşa edilmiştir. Bu tasarım, çok yüksek namlu çıkış hızı, düz mermi yörüngesi ve kısa uçuş süresiyle sonuçlanır ve bunların hepsi isabet olasılığını artırır. Kırılgan tungsten çekirdek hedefe çarptığında, önce dış deriye nüfuz eder, ardından giderek parçalanır ve hedefin içinde derin hasara neden olan yüksek enerjili bir parça bulutu serbest bırakır. Balistik olarak eşleşen alt kalibreli tatbikat mühimmatları da eğitim amaçlı olarak mevcuttur. FAPDS mühimmatı, kısa bir mermi uçuş süresi hem sert hem de yumuşak hedefleri yok etme yeteneği, duyarsız mühimmat (HE yok) ve toksik maddelerin bulunmamasını sağlar.

Zırh Delici Kanatçıklarla Stabilize Atılan Sabot/Tracer (APFSDS-T):

Zırh Delici Kanatlarla Stabilize Atılan Sabot'un kısa biçimi olan APFSDS, modern askeri tank silahlarında, toplarda ve toplarda yaygın olarak kullanılan bir tür kinetik enerji mermisidir. Diğer büyük kalibreli silahlar. Bu tür mermi, genellikle tungsten veya seyreltilmiş uranyum gibi yüksek mukavemetli malzemelerden yapılmış, düşük kalibreli bir delici ile tasarlanmıştır ve hafif, kanatçıklarla stabilize edilmiş bir sabotun içine yerleştirilmiştir. Ateşlendikten sonra sabot, silah namlusundan çıktıktan hemen sonra deliciden ayrılır ve stabilize edici kanatçıklar sayesinde delicinin daha yüksek doğruluk ve hızla yörüngesini korumasını sağlar.

APFSDS mermileri öncelikle zırhlı hedeflere karşı kullanılmak üzere tasarlanmıştır, çünkü yüksek yoğunluklu delici zırhın içinden geçerek alttaki yapıya ciddi hasar verebilir. Ancak bu mermiler genellikle zırhsız araçlar veya piyadeler gibi daha yumuşak hedeflere karşı daha az etkilidir.



Şekil 1.16. 30mm SABOT-TRACER Mühimmat (Yılmaz, 2023)

Zırh Delici Kanatçıklarla Stabilize Edilmiş Sabot/Tracer-Yüzücü (AFSDS-T Yüzücü): Bu yeni mühimmat, küçük ve orta boy tekneler ve patlayıcı yüklenebilecek kişisel deniz taşıtları da dâhil olmak üzere farklı türdeki yüzey tehditlerine karşı oldukça

etkili olacak şekilde tasarlanmıştır. Ve batık hedeflerin yanı sıra. Ayrıca dalgaların arasından ateşlenebilme özelliğine sahiptir ve hedeflenen hedefi etkili bir şekilde vurabilmektedir. Mühimmat, kısa uçuş süresi, yüksek darbe enerjisi ve 4.000 metrenin üzerinde menzile kadar üstün delme kapasitesi sunan bir tungsten delici içeriyor.

Sabot/İzleyiciyi Atma Hedef Uygulaması (TPDS-T/APDS-T):

Bu, balistik olarak eşleşen APFSDS-T mermisinin düşük maliyetli eğitim mühimmatıdır. 1.200 metreye kadar Zırh Delici Kanat Stabilize Atmalı Sabot-Tracer (APFSDS-T) mermisine balistik eşleşme sunarak gerçekçi ve etkili bir eğitim sağlıyor. Bu mühimmat, maksimum 8.500 metre menzile sahip Hedef Tatbikat İzleyici (TP-T) mermisi ile aynı güvenlik standartlarına bağlı kalırken, kinetik enerji delicilere sahip özel eğitim alanlarına olan gereksinimi ortadan kaldırıyor. Dahası, geniş bir yelpazedeki zırhlı hedeflere karşı kısa menzilli savaş yeteneklerine sahiptir.

Yarı Zırh Delici Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı/İzleyici-Kendini Yok Edici (SAPHEI/SD- SAPHEI-T/SD):

Yarı Zırh Delici Yüksek Patlayıcı Yangın Çıkarıcı (SAPHEI) mühimmat, çeliği delebilecek güçlü bir burna sahiptir. Kartuşun gövdesinde, bir sigorta gecikmesinden sonra yüzeyden geçtiği anda parçalanmaya neden olan bir taban sigortası bulunmaktadır. HE veya HEI mühimmatına göre daha az patlayıcı madde ve daha az parça vardır, ancak daha fazla nüfuz vardır. Ayrıca hedefine ulaşamaması durumunda kendini imha etme yeteneğine de sahiptir.

Çok Amaçlı/İzleyici-Kendini İmha Etme (MP-T/SD)-Çok Amaçlı Düşük Sürtünmeli/İzlemeli-Kendini İmha Etme (MPLD-T/SD):

Çok Amaçlı-İzlemeli mermi, çeşitli hedefleri yok edebilen etkili bir 30 mm mühimmattır. 1070 m/s'lik namlu çıkış hızı. Mermi, mesafe boyunca hızını korumasını sağlayacak şekilde düşük sürtünmeli bir şekil ile tasarlanmıştır. Üstelik yüksek miktarda parçalanma içeren bir hedefi delebilir, bu da patlama ve yangın çıkarıcı etkilere neden olabilir. Kendini imha etme özelliği olan ve olmayan seçenekleri mevcuttur.

Programlanabilir Hava Patlamalı Mühimmat (PABM):

Araç içi bilgisayar, sensör ve uçuş yolunu, hedefi yüksek hassasiyetle vuracak şekilde ayarlamasını sağlayan bir yönlendirme sistemi ile donatılmıştır. PABM mermileri yerden veya hedeften belirli bir yükseklikte patlayarak hedefe zarar verebilecek birçok parça oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tür mühimmatın avantajı, bir siper veya bina gibi siperin arkasında veya kirli alanda saklanan hedeflere saldırabilmesi ve düşmanın saklanmasını veya siper almasını zorlaştırmasıdır. PABM ayrıca hedefin üzerinde belirli

bir yükseklikte patlayacak şekilde programlanabilir, böylece ikincil hasar riskini en aza indirirken parçaların hedefi vurması sağlanır. Bu tür mühimmat, geleneksel güdümsüz yüksek patlayıcı mermilere göre daha gelişmiş ve etkili bir alternatiftir.

Yüksek Patlayıcı Hava Patlaması/İzleyici (HEAB-T):

HEAB, Northrop Grumman Savunma Sistemlerinin bir ABM'sidir. Silahının hava patlaması modu tek atış, tam otomatik veya "İnci Dizisi" ateşleme dizisine ayarlanabilir ve topçu nokta patlama veya nokta patlama gecikmesi arasında seçim yapma seçeneğine sahiptir. Bu, silahın farklı modlarda ateş edecek şekilde yapılandırılabilmesi ve topçunun patlamanın zamanlamasını seçebileceği anlamına gelir.

Hava Patlamalı Mühimmat-Kinetik Enerji Zamanlı Fünye (ABM-KETF):

Rheinmetall Hava Patlamalı Mühimmat (ABM), yüksek patlayıcılar yerine kinetik enerji parçacıkları kullanan ve Kinetik Enerji Zamanlı Fünye (KETF) mühimmatı olarak anılan bir mühimmat türüdür. Mermiler, programlanabilir bir zaman fitili ve çok sayıda yoğun tungsten alt mermisi ile tasarlanmıştır. Programlanabilir sigorta, mermi ateşlendiğinde elektrik enerjisi üreten bir enerji toplama cihazı, bir programlama bobini, bir elektronik zamanlayıcı modülü, bir ateşleme zinciri ve küçük bir açma yükü içerir.

Mermi namluyu terk ederken elektronik zamanlayıcı modülü programlama bobini aracılığıyla programlanır. Ateşleme zinciri ve açma yükü, dönüşü stabilize edilmiş alt mermileri mermiden hedefin önünde önceden seçilmiş bir noktada standart bir dağıtım düzenine serbest bırakır. Mermi, uygun şekilde programlanmadığı veya hareketsiz hale geldiği takdirde kendi kendini imha edecek şekilde tasarlanmıştır, bu da hiçbir kusurun olmamasını sağlar.

Bu yeni mühimmat, küçük ve orta boy tekneler ve patlayıcı yüklü kişisel deniz araçlarının yanı sıra su altındaki hedefler de dahil olmak üzere farklı türdeki yüzey tehditlerine karşı oldukça etkili olacak şekilde tasarlandı. Ayrıca dalgaların arasından ateşlenebilme özelliğine sahiptir ve hedeflenen hedefi etkili bir şekilde vurabilmektedir. Mühimmat, kısa uçuş süresi, yüksek darbe enerjisi ve 4.000 metrenin üzerinde menzile kadar üstün delme kapasitesi sunan bir tungsten delici içeriyor.

KETF mühimmatı, savaş alanındaki çeşitli hedefleri etkili bir şekilde yok etmek için NATO onaylı AHEAD (Gelişmiş Vuruş Verimliliği ve İmha) teknolojisini kullanıyor. KETF mühimmatının Elektronik Zamanlayıcı Modülü, menzil altı faydalı yükün hassas bir şekilde serbest bırakılmasını sağlamak için mermi hızı değişimlerini telafi edecek şekilde namlu ağzında endüktif olarak programlanmıştır.

Yük, her biri 1,24 g ağırlığında, dönme stabilizasyonuna sahip ve özellikle uzun menzillerde isabet olasılığını artırmak için parçalardan oluşan bir koni oluşturan 162 silindirik tungsten alaşımlı alt mermiden oluşur.

KETF mühimmatının ölümcüllüğü, alt mermilerin serbest bırakıldığı mesafe ve ateşlenen mermi sayısı ayarlanarak değiştirilebilir. Bu ayarlara bilirlilik, KETF mühimmatını IFV'ler, ATGM sığınakları, sökülmüş birlikler ve helikopterler gibi tehditlere karşı etkili kılmaktadır.

KETF mühimmatı modern araç silahları, kara tabanlı hava savunması ve deniz uygulamaları için çok uygundur. Kartuş, toksik elementler içermeyen duyarsız bir mühimattır. Yaklaşık 4 km'de 1.100 m/s'lik namlu çıkış hızına ve 8,2 saniyelik kendi kendini imha süresine sahiptir. Fişek $\leq 0,5$ mil'lik düşük bir dağılıma ve 60 m'nin üzerinde namlu ağzı güvenlik mesafesine sahiptir.

Tracer'lı Plastik Kısa Menzilli Eğitim Mühimmatı (PSRTA-T):

Tracer'lı Plastik Kısa Menzilli Eğitim Mühimmatı (PSRTA-T), gerçekçi, kontrollü bir eğitim ortamı sunarak menzil kısıtlamalarını ele almak ve kursiyerlerin yeterliliğini artırmak için tasarlanmış yenilikçi bir eğitim aracıdır. Mühimmatın amacı, özellikle bu tür mühimmatlara izin verilmeyen eğitim alanlarında, tam menzilde kullanılan standart hizmet mühimmatına alternatif sağlamaktır. Dağıtımı sayesinde, kısıtlı poligonlarda, yerleşim alanlarında ve atış evlerinde daha sık ve esnek bir şekilde gerçekçi eğitim senaryoları gerçekleştirilebilir. Ayrıca mühimmatın içine eklenen izleme bileşeni görünürlüğü artırıyor ve merminin yörüngesinin daha kolay gözlemlenebilir olmasını sağlıyor. Sonuç olarak, bu teknolojik özellik kursiyerlerin ateşli silah kullanımını daha iyi anlamalarına yardımcı olur ve uygun ateşli silah kullanma becerilerini geliştirme şanslarını artırır.

Plastik Kurusıkı Mühimmat: Plastik Kurusıkı Mühimmat, hedefleri öldürmek veya yaralamak için tasarlanmayan, bunun yerine askeri güçler ve kolluk kuvvetleri tarafından eğitim tatbikatlarında kullanılması amaçlanan bir mühimmat türüdür. Bu tür mühimmat, yaralanma riskini en aza indirirken ve maliyetleri düşük tutarken gerçekçi bir eğitim deneyimi sağlamak üzere tasarlanmıştır. Plastik Kurusıkı Mühimmat, kursiyerlerin güvenli ve kontrollü bir ortamda ateşli silahları nasıl kullanacaklarını öğrenmelerine ve taktik manevralar yapmalarına olanak tanıyan kuvvete dayalı egzersizler ve ateşli silahlara alışma dâhil olmak üzere çeşitli eğitim amaçları için kullanılabilir.

1.1.3. Sevk barutları

Mermilere namlu ağızdaki ilk hızlarını sağlayan, roketlerin hareket etmesini sağlayan ve askeri alanlarda kullanılan bazı patlayıcılar kısaca özetlenecektir.

1.1.3.1. Sevk barutları

Genellikle itici barutlar, patlayıcı maddeler sınıfına dâhil edilir ve bu maddelerin reaksiyonları düşük hızlarda gerçekleşir. Bu nedenle itici barutların reaksiyon olayına patlama demek yerine yanma tepkimesi demek daha uygun olacaktır. Bu barutların yanma hızları 0,1 m/s ile 1 m/s aralığında değişmektedir. Yüksek hızlı patlayıcı maddelerin patlama hızları ise 2000 m/s'den 9000 m/s' ye kadar çıkmaktadır. Bu hızlar, açık havada ölçülmüş ve belirlenmiştir. İtici barutlar, kapalı alanlarda ve özel ateşleme mekanizmaları ile ateşlendiğinde yanma hızları artar. Kapalı alanlarda yanma başladıktan sonra basınç hızla yükselecektir.

Sevk barutlarının kimyasal denkleminde oksitleyici bulunduğu için dışardan bir kıvılcım ile ateşlendikten sonra oksijene ihtiyaç duymadan yanma gerçekleşebilir. Bu özelliğiyle diğer yakıtlardan daha az enerji açığa çıkarır.

Çizelge 1.7. Barut Isıl Değerleri (Öztürk, 1984)

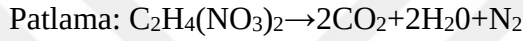
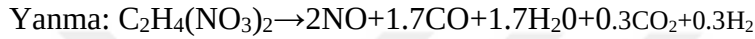
Barut	Isıl Değer	Yakıt	Isıl değer
Kara barut	685 Kcal/kg	Benzin	10026 Kcal/kg
Nitrogliserin	1478 Kcal/kg	Asetilen	12030 Kcal/kg

Sevk barutlarının bir diğer özelliği, hidrokarbon grubuna direkt olarak değil de azot aracılığıyla bağlanmasıdır. Bu nedenle, yanma sonucu oluşan enerji, hidrojen ve karbonun yanmasından kaynaklanan enerjinin 1/10 ile 1/35 arasında değişir. Daha önce sevk barutlarının yanma hızlarının basınca bağlı olduğundan bahsetmiştik. Basınca ek olarak, sevk barutlarının yanma hızları doğrudan yanma süresini etkilediğinden yanma süreleri değişmektedir.

- Barutun türüne
- Barut tanelerinin şekline büyüklüğüne

- Barutun saklama koşullarına örneğin sıcaklığına ve nemine
- Barutun yanma reaksiyonunun gerçekleştiği yerin durumuna
- Barutun yanmasını sağlayan maddenin alev gücüne bağlı olarak değişir

Sevk barutlarının ateşlenmesi sonucu oluşan barut gazı genellikle karbon, azot, hidrojen, kükürt ve oksijen bileşiklerinden meydana gelir. Bu gaz genellikle CO₂ ve H₂O' dan oluşur. Ancak, yanma veya patlama sonucunda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar farklılık gösterebilir. Örneğin Nitroglikol için yanma ve patlama denklemleri aşağıda verilmiş ve bu iki reaksiyon arasındaki fark açıkça görülebilmektedir.

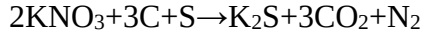


Kara baruttan başlayarak önemli ölçüde kullanılan sevk barutlarını ayrı ayrı ele alacağız.

1.1.3.1.1. Kara barut

Eski zamanlardan beri bilinen, ancak günümüzde kullanılmayan bir barut türüdür. Güherçile, karbon ve kükürdün bir karışımından oluşur. Yaklaşık olarak %75 oranında sodyum ve potasyum nitrat oksitleyici olarak, %15 oranında odun kömürü yani karbon çıkartıcı olarak ve %15 oranında da kükürt içerir. Askeri alanlarda kullanılan kara barutta genellikle oksitleyici olarak potasyum nitrat (KNO₃) tercih edilir. Nitroselülozlu barutların bulunmasına kadar kara barut, tekli sevk barutu ve patlayıcı olarak kullanılırdı. Kara barut 300 °C'nin üzerinde ani bir şekilde yanar ve yüksek sıcaklık oluşturur. Bu sıcaklık yaklaşık olarak 3000 ila 3800 °C civarındadır. Oluşan bu yüksek sıcaklık, silah namlusunun aşırı ısınmasına ve aşınmasına sebep olabilir. Kara barut tanecikleri genellikle küresel bir yapıdadır ve grafit ile cilalanmıştır. Neme karşı çok hassastır. Nemli ortamlarda rutubetlenir ve kullanılmaz hale gelir. Nem miktarı arttıkça ateşleme güçlüğü oluşur performansı düşer.

Uzun süre kullanılabilmesi için kuru olarak saklanması gerekir. Alevlenmesi hızlı olduğu için ateşleme sırasında patlama oluşabilir. Bu durum barutu tehlikeli hale getirebilir. Yanma tepkimesi:



Kimyasal denklemde tam olarak yanma meydana gelmez çıktılarda K_2CO_3 (Potasyum Karbonat) ve K_2SO_4 (Potasyum Sülfat) görülür ve bu bileşikler katı haldedir. Reaksiyonda kükürt katalizör görevi görerek reaksiyon sıcaklığını 340°C 'den 300°C 'ye düşürür.

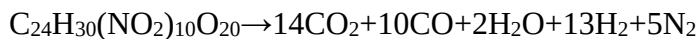
- Potasyum sülfat ve Potasyum karbona katı haldedir ve namluda birikme yapar
- Tepkime sonucu oluşan gaz miktarı az olduğu için namlu içi en yüksek basınç azdır ve merminin namlu ağzından çıkan hızı düşüktür. Mermi hızları en yüksek 365 m/sn. civarındadır.
- Tane büyüklüğü homojen değildir ve yanma hızı kontrolü zordur.
- Ağız alevi ve duman fazladır.
- Yanma hızı düşüktür.
- Nemlendiği için depolama zamanı azdır. Uzun süre depolanamaz.

Uzun süre depolanmak istediği zaman depolama maliyeti artar. Bundan dolayı sevk barutu olarak kullanılamaz aksine ateşleyici, geciktirme elemanı ve eğitim mermilerinde kullanılabilir.

1.1.3.1.2. Nitroselülozlu sevk barutları

Nitroselülozlu barutlar, kara barutun eksikliklerini gidermek amacıyla tasarlanmıştır. Pamuğun nitrik asite batırılmasıyla üretilen nitroselülozlu barutlar genellikle tek bileşenli barutlardır. Barutlar, tek bileşenli, çift bileşenli (esaslı) ve üç bileşenli olarak sınıflandırıldığında, "bileşen" kelimesi öncesindeki rakam, baruttaki ana bileşen sayısını ifade eder. Nitroselülozlu barutlar su altında yanabilirler. Detonasyon hızlarının düşürülmesi amacıyla nitroselülozlu barutlar, aseton ve benzeri çözücülerde çözülerek jelleştirilir. Bu sayede, barutlara istenilen şekil verilebilir. Bazı tuzlar, yanma hızını azaltmak için karbon ve depolama ömrünü uzatmak için difenilamin gibi maddeler, alev geciktirici olarak barut karışımlarında kullanılır.

Bu barutlar yandığı zaman atık bırakmazlar ve dumansızdırlar. Kısmen nem alabilirler, yanma denklemi ise aşağıdaki gibidir.



Dumansız barut, 1 kg'ı açık havada (1 atm. ve 0 °C'de) yandığında yaklaşık 900 litre gaz açığa çıkarır ve 1000 kcal ısı üretir. Yanma hızları 0,1 cm/sn ile 18 cm/sn arasında değişir. Kara barutta ise 1 kg barutun yanması sonucunda 300 cm³ gaz ve 700 kcal ısı oluşur. Nitroselülozlu yakıtlarla büyük çaplı silahlarla 600-700 m/sn'lik başlangıç hızlarına ulaşılabilir. Bu hızı artırmak için Nitrogliserinli barutlar geliştirilmiştir.

1.1.3.1.3. Nitrogliserinli sevk barutları

Nitrogliserin bazlı sevk barutları, gliserin ve nitrik asidin birleşmesinden oluşur. Nitrogliserin, C₃H₅N₃O₉ kapalı formülüne sahip, renksiz bir sıvıdır ve yüksek hızlı bir patlayıcı maddedir. Alfred Nobel tarafından 19. yüzyılda kullanılmak üzere geliştirilen nitrogliserin, sevk barutu olarak kullanılabilmesi için oksijen bakımından zenginleştirilerek yanma hızının düşürülmesi gerekmektedir. Nitrogliserin, nitroselülozla birleştirilip jelatinize edildiğinde, kırılğan olmayan ve yanma hızı düşük bir madde elde edilir. Bu karışım, çift bazlı nitrogliserinli ve nitroselülozlu sevk barutunu oluşturur. Yüksek enerji içeriği sebebiyle namluları aşındıran bu barut türü, ısı değeri daha düşük olan diglikollü sevk barutlarıyla değiştirilmiştir. Diglikollü sevk barutları, silahlar için daha uygun olup, ısı değerlerinin düşük olması sebebiyle soğuk barutlar olarak adlandırılır. Aşağıdaki tabloda, 1 kg barutun nitrogliserin yüzdelerine göre ısı değerleri gösterilmiştir. Geri kalan miktar, nitroselüloz ve diğer katkı maddelerinden oluşmaktadır.

Çizelge 1.8. Nitrogliserin Yüzdeleri ile 1 kg barutun ısı değerleri (Öztürk, 1984)

Sevk Barutunun Kullanıldığı Silahın Cinsi	Baruttaki Nitrogliserin yüzdesi	Yanma Sonucu Oluşan Isı (kcal)
Toplar	25-28	800-840
Obüsler ve Havanlar	40	1100-1250
Roketler	25-35	800-1000

1.1.3.1.4. Diglikollü sevk barutları

Namlu ömürlerini artırmak amacıyla, ısı değeri daha düşük barutlar geliştirilmiş ve diglikollü sevk barutları üretilmiştir. Silahlar için daha uygun olan bu barutlar "soğuk barutlar" olarak bilinmektedir. Bu tür barutlarda, nitrogliserin yerine %23-36 oranında

diglikoldinitrat kullanılmaktadır ve üretimi daha kolaydır. Ayrıca, saklama ömürleri uzundur ve büyük ile küçük çaplı toplarda namlu ağız alevini engellemek için tercih edilirler. Diglikollü barutlar, mermi çıkış hızını artırmaktadır. Bu tür barutlar, diglikoldinitratın nitrogliserine göre daha uçucu olması sebebiyle, sıcak hava koşullarında barut tanelerinde bozulma ve farklı yanma yüzeyleri oluşturabilir. Ayrıca, barut taneleri 40 °C'nin üzerinde yapışmaya meyilli olabilir. Obüs ve havanlarda kullanılan diglikoldinitrat miktarı genellikle %35-36 arasında ve ısı değeri 1030-1050 kcal/kg iken, toplarda kullanılan diglikoldinitrat miktarı %23-26 arasında ve ısı değeri 690-800 kcal/kg civarındadır.

1.1.3.1.5. Nitroguanidinli sevk barutları

Nitroguanidilli sevk barutları, soğuk barutlardan üç fazlı olanlar arasında yer alır ve genellikle toplarda kullanılır. Namlu ömrünü iki katına kadar uzatır. Bu barutların içeriğinde sırasıyla Nitroselüloz, Diglikoldinitrat ve Nitroguanidin bulunmaktadır. Bugün, Nitroguanidinli sevk barutları, orta ve büyük çaplı silahlarda kullanılmakta olup, namlu alevini ve aşınmayı azaltmada etkili sonuçlar vermektedir. Bu tip barutlarda duman miktarı biraz fazla olsa da, namlu alevini kolayca azaltmak mümkündür. Tablolarda Amerika Birleşik Devletleri ve bazı ülkelerin ürettiği barutlar ile kullanıldığı silahlar yer almaktadır.

Çizelge 1.9. Amerika Birleşik Devletleri Standart Top Barutları ve İçerikleri (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri							
	M1 %	M3 %	M4 %	M6 %	M10 %	M12 %	M14 %	M15 %
Nitroselüloz (12,60% Azotlu)	--	79	--	--	--	--	--	--
Nitroselüloz (13,15% Azotlu)	84,2	--	--	86,1	98	97,7	89,1	20
Nitroselüloz (13,25% Azotlu)	--	--	76	--	--	--	--	--
Dinitrotoluen	9,9	--	23	9,9	--	*	7,9	--
Trinitrotoluen	--	15	--	--	--	--	--	--
Nitrogliserin	--	--	--	--	--	--	--	19
Nitroguanidin	--	--	--	--	--	--	--	54,7
Dibütilfitalat	4,9	--	--	3	--	--	2	--
Triasetin	--	5	--	--	--	--	--	--
PotasyumSülfat	--	--	--	--	1	0,75	--	--
Kalay	--	--	--	--	--	0,75	--	--
Kriyolit	--	--	--	--	--	--	--	0,3
Difenilamin	1	1	1	1	1	0,8	1	--
Etil Santralit	--	--	--	--	--	--	--	6
Toplam	100	100	100	100	100	100	100	100
* SadeceYüzey Kaplama Amacı ile kullanılır								

Barut taneleri, grafitle cilalanıp dinitrotoluen ile kaplanarak döner tamburlarla işlenir. Kalay ve potasyum sülfat, namlu ağzı alevini azaltmaya yardımcı olur. Dinitrotoluen, barut toplarını neme karşı korurken ömürlerini uzatır. Grafitle kaplanmaları, mühimmat üretiminde barut toplarını dolduran makinelerin daha verimli çalışmasını sağlar. Grafit aynı zamanda statik elektriğe karşı koruma sağlayarak daha güvenli bir üretim yapılmasına yardımcı olur.

Çizelge 1.10. Hafif silah mühimmatı için tek bazlı ABD sevk barutları ve içerikleri (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri				
	IMR %	I %	II %	III %	IV %
Nitroselüloz (13,15% Azotlu)	97,4	--	--	--	--
Nitroselüloz (13,15-13,25% Azotlu)	--	99,3	98,3	--	--
Nitroselüloz (13,10% Min Azotlu)	--	--	--	99-99,60	--
Nitroselüloz (12,95% Azotlu)	--	--	--	--	98,95
Kalay	2	--	--	--	--
PotasyumSülfat	--	--	1	--	--
Difenilamin	0,6	0,7	0,7	0,40-1,0	1,05
Grafit	Cila için	Cila için	Cila için	Cila için	Cila için
Dinitrotoluen	6,75 Kaplama İçin	Kaplama için	Kaplama için	Kaplama için	4,0 Kaplama İçin
Toplam	100	100	100	100	100

Çizelge 1.11. Toplarda Kullanılan Çift Bazlı ABD Sevk Barutları ve İçerikleri (Öztürk, 1984)(İç Balistik, Ali Rıza Öztürk,1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri	
	M2 %	M3 %
Nitroselüloz (13,25% Azotlu)	77,45	81,95
Nitrogliserin	19,5	15
Baryumnitrat	1,4	1,4
Potasyumnitrat	0,75	0,75
Etil Santralit	0,6	0,6
Grafit	0,3	0,3
Toplam	100	100

ABD de standart top barutu olarak M2 ve M5 barutları kullanılmaktadır. Tane biçimleri genellikle silindirik tek delikli ve çok delikli olarak üretilmektedir.

Çizelge 1.12. ABD çift bazlı havan barutların içerikleri (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri	
	M8 %	M9 %
Nitroselüloz (13,25% Azotlu)	52,15	57,75
Nitrogliserin	43	40
Dietilfitilat	3	--
Potasyumnitrat	1,25	1,5
Difenilamin	--	0,75
Etil Santralit	0,6	--
Toplam	100	100

M8 ve M9, çift tabanlı havan barutu olarak da bilinir. Şekil olarak hem yuvarlak hem de dört köşeli olabilirler. Yuvarlak ve dört köşeli havan mühimmatının kuyruğuna takılarak sevk barutu olarak kullanılabilecekleri gibi, bir sıfır fişeginin içine yerleştirilerek sıfır barutu olarak da kullanılabilirler.

Çizelge 1.13. ABD hafif silahlarda kullanılan çift bazlı barutların içerikleri (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri		
	A %	B %	C %
Nitroselüloz (13,25% Azotlu)	74,7	76,55	84
Nitrogliserin	19,9	20,4	15
Nişasta	2,25	2,3	--
Baryumnitrat	1,5	--	--
Potasyumnitrat	0,9	--	--
Difenilamin	0,75	0,75	0,75
Grafit	--	--	0,25
Toplam	100	100	100

7.62 ve 12.7 mm çapındaki hafif silahlarda da bu barutlar kullanılır. Çift bazlı hafif silah barutlarının taneleri silindirik tek delikli veya pul şeklindedir ve dinitrotoluen veya santralit ile kaplanıp grafitle cilalanmıştır. 7.62 karabin fişeklerinde yer alan çift bazlı barut taneleri, 0.50 ila 0.76 mm çapındaki küre şeklinde standartlaştırılmıştır. Küre şeklindeki taneli barutlara "küre barutlar" denir. Çift bazlı küre barutların karışımı genellikle aşağıdaki tabloda görüldüğü gibidir.

Çizelge 1.14. Çift bazlı küre barutları içerikleri (Öztürk, 1984)

Çift Bazlı Küre Barutları	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri
Nitroselüloz (13,2% Azotlu)	89,3
Nitrogliserin	9
Sodyum Sülfat	0,15
Kalsiyum Karbonat	0,65
Difenilamin	0,9
Toplam	100

Çizelge 1.15. ABD roketlerde kullanılan çift bazlı barutlar (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri				
	M7 %	M13 %	T2 %	T5 %	T8 %
Nitroselüloz (13,15% Azotlu)	54,6	57,3	58	57,5	58
Nitrogliserin	35,5	40	30	39,2	22,5
Potasyumperklorat	7,8	--	--	--	--
PotasyumSülfat	--	1,5	1,5	1,5	--
Karbon Siyahı	1,2	*0,05	*0,02	0,05	--
Dinitrotoluen	--	--	2,5	--	2,5
Kurşun Sterat	--	--	--	*0,10	0,5
Triasetin	--	--	--	--	8,5
Difenilamin	--	0,2	--	--	--
Etil Santralit	0,9	1	8	1,75	8
Toplam	100	100	100	100	100
* Katkı maddesi olarak bulunur					

Çizelge 1.16. İngiliz sevk barutları ve oranları (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri		
	A %	B %	C %
Nitroselüloz	94,7	77,9	20
Nitrogliserin	--	14,85	19
Dinitrotoluen	4,1	--	--
Nitronaftalin	--	5,4	--
Kalay	0,5	--	--
Grafit	0,2	0,25	--
Kriyolit	--	--	0,3
Santralit	0,5	1,6	6
Nitroselülozdaki Azot Yüzdesi	13,10%	13%	13,15%
Toplam	100	100	100

II. Dünya Savaşı sırasında Almanlar farklı niteliklere sahip tek ve çift bazlı barutları üretmişlerdir. Deneylerinin sonucunda top namlularında Dietilenglikoldinitrat (DEGN) ve Trietilenglikoldinitrat (TEGN) gibi nitrogliserine alternatif ancak ısıl değeri

daha düşük olan maddeleri tercih etmişlerdir. Ancak nitrogliserinli Alman barutları da hala kullanılmaktadır. Tablolarda içerik yüzdeleri verilmiştir.

Çizelge 1.17. Nitrogliserinli Alman barutları (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri					
	37mm %	47mm %	80mm %	105mm %	150mm %	Havan %
Nitroselüloz	70,4	63,8	60	60	63,4	57,4
Nitrogliserin	27,3	30	39	38,8	33	41,6
Dinitrotoluen	--	--	--	0,4	--	--
PotasyumSülfat	0,6	--	--	--	--	--
Grafit	--	--	0,2	--	0,1	0,2
Santralit	1,5	6,2	0,8	--	--	--
Etilfenilüretan	--	--	--	--	1,5	--
Difenilüretan	--	--	--	--	1,8	--
Difenilüre	0,2	--	--	0,8	0,2	0,8
Toplam	100	100	100	100	100	100
Nitroselülozdaki azot %	11,90%	12,10%	13,10%	13,05%	12,00%	13,30%

Çizelge 1.18. DEGN ve TEGN Alman barutları (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri					
	A %	B %	C %	D %	E %	F %
Nitroselüloz	60,5*	67,65	62,3	61,5	43,5**	58
DEGN	26	29	26	34,8	18,6	
TEGN	--	--	--	--	--	25,1
Nitroguanidin	--	--	--	--	30	--
Dinitrotoluen	4	--	--	--	--	--
Nitronaftalin	2,5	--	--	--	--	--
Hidroselüloz	3	--	--	--	--	--
Palmiye Mumu	--	--	--	0,3	--	--
PotasyumSülfat	--	--	0,5	--	--	4
Grafit	0,1	0,1	0,3	--	0,1	0,1
Magnezyumoksit	0,15	0,25	--	--	0,3	0,8
Vazelin	--	--	3,5	--	--	--
Santralit	3,75	3	7,4	--	--	12
Difenilüre	--	--	--	0,2	--	--
Akardit	--	--	--	--	0,5	--
Etilfenilüretan	--	--	--	1,2	--	--
Difenilüretan	--	--	--	2	3,25	--
Metilfenilüretan	--	--	--	--	3,75	--
Toplam	100	100	100	100	100	100
Nitroselülozdaki azot %	12,00%	12,00%	12,00%	12,50%	12,00%	12,20%
* Üniversal Barut olara Bilinir ve Isıl değeri 780 cal/gr						
** Bu barutun ısı değeri ise 750 cal/gr						

Çizelge 1.19. Rus Barutlar ve İçerik Oranları (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri				
	76mm.A %	76mm.B %	76mm.C %	76mm Tüfek %	Anti tank Topları %
Nitroselüloz	98,9	99,3	98,7	96,9	64,4
Nitrogliserin					20,8
Dinitrotoluen					3,9
Grafit				0,3	0,3
Kafuru				0,8	
Vazelin					2,6
Santralit					1,3
Difenilüre					6,7
Difenilamin	1,1	0,7	1,3	2	
Toplam	100	100	100	100	100
Nitroselülozdaki azot %	12,00%	12,00%	12,00%	12,50%	12,00%

Çizelge 1.19. Bazı Moleküllerin Kimyasal Formülleri

Maddelerin Kimyasal Formülleri			
Nitroselüloz	$C_{24}H_{30}(NO_2)_{10}O_{20}$	Dietilfitilat	$C_{12}H_{14}O_4$
Dinitrotoluen	$C_7H_6N_2O_4$	Nişasta	$(C_6H_{10}O_5)_n$
Trinitrotoluen	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	Potasyumperklorat	$KClO_4$
Nitrogliserin	$C_3H_5N_3O_9$	Karbon Siyahı	C
Nitroguanidin	$CH_4N_4O_2$	Kurşun Sterat	$C_{36}H_{70}PbO_4$
Dibütilfitalat	$C_6H_4(CO_2C_4H_9)_2$	Nitronaftalin	$C_{10}H_7NO_2$
Triasetin	$C_3H_5(OCOCH_3)_3$	DEGN	$C_4H_8N_2O_7$
PotasyumSülfat	K_2SO_4	TEGN	$C_6H_{12}N_2O_8$
Kalay	Sn	Hidroselüloz	$C_{12}H_{22}O_{11}$
Kriyolit	Na_3AlF_6	Palmiye Mumu	$C_7H_5HgNO_3$
Difenilamin	$(C_6H_5)_2NH$	Magnezyumoksit	MgO
Etil Santralit	$C_{17}H_{20}N_2O$	Vazelin	$C_{15}H_{15}N$
Grafit	C	Akardit	$C_3H_{12}N_2O$
Nitroselüloz (13,25% N)	$C_{18}H_{21}N_{11}O_{38}$	Kafuru	$C_{10}H_{16}O$
Baryumnitrat	$Ba(NO_3)_2$	Sodyum Sülfat	Na_2SO_4
Potasyumnitrat	KNO_3	Kalsiyum Karbonat	$CaCO_3$

1.1.3.2. Barut tane geometrisinin yanmaya etkisi

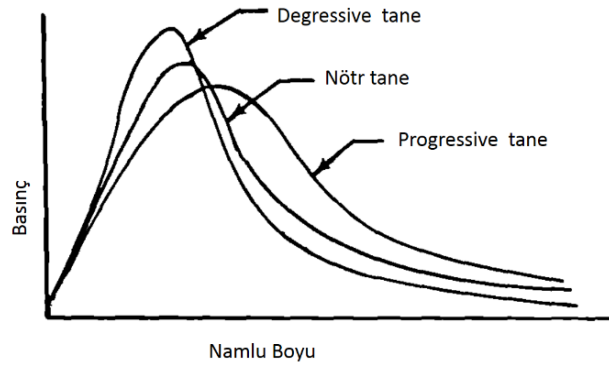
Yanma odasında meydana gelen yanma olayı, sadece barutun kimyasal bileşimine bağlı olmadan değişmez. Barutun fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir. Farklı tanecik

şekillerine göre yanma hızları değişir ve bu nedenle çekirdek hareketi farklılık gösterir. Tanecikler genellikle silindirik, küresel, disk ve delikli silindir şekillerinde tasarlanmıştır.



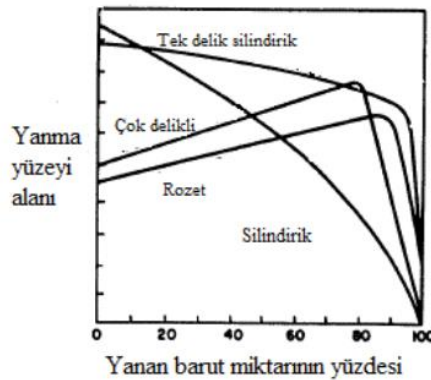
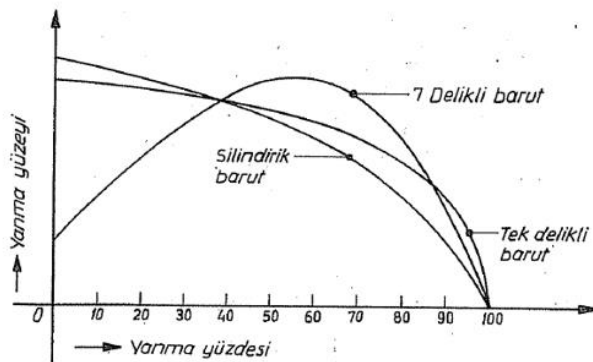
Şekil 1.17. Barut Tane Şekilleri (Öztürk, 1984)

Barut tanelerinin yanma yüzeylerinin durumuna göre;
 Küçülen yüzeyli,
 Sabit yüzeyli,
 Büyüyen yüzeyli olarak sınıflandırılmaktadır.

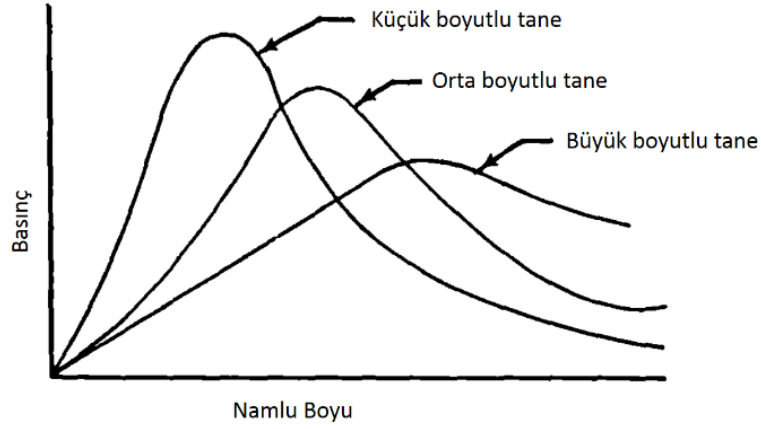


Şekil 1.18. Barut tanelerinin (Azalan, Sabit ve Büyüyen yüzeyli) Basınç- namlu Boyu Grafiğine Etkisi (Öztürk, 1984)

Taneleri silindir, küre ve küp şeklinde olan barutlar, küçülen yanma yüzeyine sahiptir. Merkezi delikli barutlar genellikle sabit yanma yüzeyine sahiptir. Çok delikli barutlar ise büyüyen yanma yüzeyine sahip olan barutlardır. Yanma yüzdesine göre silindirik tek delikli ve yedi delikli barutların yanma yüzeylerinin değişim grafikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 1.19. Farklı Barut Tane Geometrilerinin Yanma Miktarına Göre Yüzey Alanı (Öztürk, 1984)



Şekil 1.20. Barut Tane Boyutunun Etkisi (Öztürk, 1984)

1.1.3.3. Sevk barutlarının doldurma yoğunluklarının yanmalarına etkisi

Silahların hazinelerine bir kovan ya da bez kese içinde konulan sevk barutlarının miktarları ile içinde bulundukları (keseli barutlarda) iç hacmi ya da silahın hazne hacmi arasında bir bağlantı vardır. Bu bağlantıya doldurma yoğunluğu denir.

Sevk barutları, silahların hazinelerine kovan ya da bez kese içinde konulduklarında, dolguların miktarı ile kesedeki iç hacim veya silah haznesi arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkiye doldurma yoğunluğu adı verilir.

$$\text{Doldurma yoğunluğu} = (\text{Barut Miktarı}) / (\text{Barutun yanacağı yerin net hacmi}) \quad (1.1)$$

Dolayısıyla doldurma yoğunluğunun birimi kg/L'dir. Top ve obüslerde doldurma yoğunluğu 0,5 ile 0,6 arasında değişirken küçük kalibreli silahlarda bu değer 0,95'e kadar çıkabilir. Bu değerler genel bir ifade olup üreticilerin kendi tasarımlarına göre değişiklik gösterebilir. Doldurma yoğunluğu arttıkça ilk hız ve maksimum basınç artar; yani NATO Stanag kodlarına göre üretilen mühimmatın yanma hacmi nispeten sabit kalır. Ancak bu mühimmat çeşitlerine bakıldığında, farklı kovan ve barut ağırlıklarına sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle, çeşitli şekillerde, kimyasal özelliklerde ve farklı doldurma yoğunluklarıyla barutlar, istenilen görev özelliklerine göre üretilmektedir.

1.1.3.4. Sevk barutlarının doldurma yoğunluklarının yanmalarına etkisi

Bu özellikler, üreticiden üreticiye, farklı kalibreler için ve kullanım görevine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla her firmanın ürettiği mühimmatlar arasında barut özellikleri farklılık gösterebilir. Bu özellikler, firmaların kendilerine özgü tasarım ve Ar-Ge çalışmalarıyla belirlenmektedir. Bu bilgilere ulaşmak herhangi bir üretici için oldukça zor olabilir ve bazı firmalar, barutun özelliklerini açıklamayabilir. Hesaplarımızda, mühimmatımızın M2 baruttan oluştuğu varsayılmıştır. M2 barutundaki bileşenler yukarıdaki tablolarda belirtilmiştir.

Tezin amacı, orta kalibre toplarda kullanılan mühimmat ve barut çeşitlerine (küresel, silindirik vs.) göre namlu içi yanma olayının analitik olarak incelenmesidir. Yanma denklemlerinin kurulup çözülmesi sonucunda namlu boyunca sıcaklık, basınç ve hız değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada orta kalibre top namlusunun belirli mühimmatlara göre yanma denklemleri oluşturularak yanma olayı incelenmiştir. Bununla beraber hesaplanan değerler sonucunda namlu içi sıcaklık dağılımı çıkarılmıştır. Bu sıcaklık dağılımının hesaplanması ile namlu içindeki yanmış gaz bileşeninin namlu doğrultusundaki ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra yanmış barut gazının namlu iç yüzey sıcaklığını ne kadar arttırdığı tespit edilmiştir. Bir döngü için hesaplanan bu değerler seri atımlarda kullanılabilecektir ve belirli atım sayısı sonundaki namlunun iç yüzey sıcaklığı da hesaplanabilecektir. Literatürde de benzer çalışmalar yapılmıştır ve yapılan bazı çalışmalarla aşağıda özetlenmiştir.

Kooker ve Nelson (1977) yaptıkları çalışmada namlu içindeki basıncın zamana bağlı olarak değiştiği durum için sayısal bir model kullanarak sevk yakıtının yanma oranını hesaplamışlardır. Basınç ve zaman değerlerini 105 mm çapında bir namlu kullanılarak deneysel olarak elde etmişlerdir.

Bir başka çalışmada ise sevk yakıtının yanmasıyla ortaya çıkan yüksek sıcaklıktaki gazların namlu kesitinde oluşturduğu ısı transferi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Teorik çalışmada namlu içindeki akışın türbülanslı olduğu kabul edilerek iki iç balistik modeli kullanılmıştır. Çalışmada çapı 20 mm olan bir test silahı seçilmiş ve özel bir termokupl yardımıyla namlu sıcaklığı ölçülmüştür. Daha sonra nümerik ve analitik olarak bulunan sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır (Heiser ve ark., 1970)

Elbe (1975) yaptığı çalışmada, M16A1 tüfeğinin namlu dış sıcaklığını ve namlu sıcaklığının bağlı olduğu beş parametreyi incelemiştir. Bu parametrelerin namlu et kalınlığı, namlu uzunluğu, yanma oranı, yanma tipi ve mühimmatın tipi olduğunu ifade etmiştir.

Yang ve ark. (2008)'nin, içi krom kaplı 5.56 mm çapındaki bir tüfeğin namlusundaki zamana bağlı ısı transferi problemini çözmek için karma bir sayısal metot ve sonlu farklar metodu kullanmışlardır. Namludaki sıcaklığın zamana bağlı değişimini ve ısıl gerilimi sayısal olarak incelemişlerdir. Ayrıca namlu et kalınlığındaki radyal ve teğetsel yönde oluşan gerilmeleri hesaplamışlardır.

Cronemberger ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, 7.62 mm çapında bir tüfeğe etki eden iç balistik parametrelerini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında teorik olarak PRODAS, Vallier-Heydenreich ve Lumped Parameters

metotlarını esas almışlardır. Teorik çözümlemelerle zamana bağlı mermi konumu, hızı ve namlu iç basıncı elde edilmiştir. Deneysel olarak da mermi hızıyla birlikte basınç değerleri ölçülmüş ve teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların analiz edilmesiyle yöntemlerin uygunluğu tartışılmıştır.

Wu ve ark. (2008) çalışmalarında, 155 mm çapında bir namlunun ısı transfer analizini teorik ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Namlunun iç ve dış bölümünde sürekli atış esnasında oluşan sıcaklık değerlerini, doğal hava soğutmalı ve zorlanmış sıvı soğutmalı bir tasarımla hesaplayıp aralarındaki farklılıkları tartışmışlardır.

Benzer bir çalışmada, 155 mm çapında bir ağır silah namlusunu sıvı ile soğutmak için çalışma yapılmıştır. İlk önce bir model oluşturulmuştur ve daha sonra bir balistik kod yazılmıştır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak namlunun iç ve dış sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Farklı atış sayıları için namlunun sıvı soğutma yöntemi ile ne kadar soğutulduğu ortaya konmuştur (Mishra ve ark., 2010).

Gerber ve Bundy (1991), yaptıkları çalışmada 120 mm'lik bir tank namlusunun zamana bağlı olarak değişen gaz sıcaklığı, tek boyutlu ısı iletim katsayısı ve namlu iç sıcaklık değerlerini çoklu atış durumu için hesaplamıştır. Hesaplama yapılırken iç balistik kodu ve sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Deng ve ark. (2014) çalışmalarında, 9 mm'lik yiv setli namlu ve mermiyi lineer olmayan zamana bağlı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Yapılan çalışmada mermi için kinematik analiz, namlu için ise elastik ve plastik deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçek deneysel verilerden elde edilen sonuçlar sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak %2.56 hata payıyla doğrulanmıştır.

Güngör (2010) tarafından yapılan çalışmada, iç basınca maruz kalan iç, dış çapları ve sıcaklıkları ile iki ucu sabit kabul edilen çelikten üretilmiş namlu haznesinin yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Daha sonra çelik namlu haznesi üzerine izotropik metal matriks kompozitin sıkı geçme yöntemi kullanılarak monte edilmesi durumunda, çelikten üretilmiş namlu haznesi ile yaklaşık olarak aynı dayanımı gösterdiği çap değerini belirlemiştir. Optimizasyon çalışması yaparak bulduğu çap değeri için gerçekleştirilen hesaplama sonuçlarının, otofretaj için gerçekleştirilen hesaplama sonuçları ile benzer olduğunu belirtmiştir.

Öztörün (2013) ise çalışmasında kullanmak üzere bir ağır silah namlusu tasarlamıştır. Patlama esnasında namlu içerisinde oluşan basınç-zaman ve basınç-mesafe parametrelerini bir balistik analiz programı yardımıyla elde etmiş ve Vallier-Heydenreich

metodu ile doğrulamasını yapmıştır. Elde edilen verileri kullanarak sonlu elemanlar programı yardımıyla namlu içerisinde oluşan elastik gerilmeleri hesaplamıştır. Bulmuş olduğu gerilme değerlerini kullanarak namlu optimizasyonu yapmıştır. Sonuçların doğruluğu, testlerden elde edilen ölçümler ile kıyaslanmıştır. Ayrıca çalışmasında plastik şekil değiştirme analizi yaparak namluya uygulanan otofretaj işlemini de ele almıştır.

Chen (2010), belli bir basınç altında atım yatağının tasarımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında, LS-Dyna programını kullanarak zamana bağlı dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Kullanılan namlu malzemesi için hareket esnasında deformasyon olmadığını kabul etmiştir. Ağırlığın sistemdeki etkilerini incelemek için 3 ayrı ağırlıktaki mühimmatla testler gerçekleştirmiştir. Bu üç ayrı test için namlu tasarımında da değişikliğe giderek, 2. ve 3. testlerde namlu cidar kalınlığını artırmıştır. Namlu cidar kalınlığını artırarak deformasyon olmayacak şekilde Von Misses gerilmelerini hesaplamıştır.

Bir başka çalışmada, boyutları bilinen bir top namlusunun üzerine etkiyen gerilmeler hesaplanarak namlu eski ağırlığından daha hafif bir hale getirilmiştir. Hafifletme sırasında namluya etki eden basınç değerleri bir balistik programı kullanılarak bulunmuştur ve Heydenreich metoduyla da doğrulanmıştır. Bulunan değerler kullanılarak namluya etki eden gerilmeler bir sonlu elemanlar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Daha sonra namlu içi cidar kalınlığı, emniyet katsayısı ve otofretaj katkısı hesaba katılarak namlu optimizasyonu gerçekleştirilip elastik gerilme sınır değerine göre namluda hafifletme yapılmıştır (Gündüzer, 2011).

South ve Carter (2005), iki eksenli geçici şartlar için asimetric olarak 120 mm M256 top namlusunu modellemişlerdir. Bu modellemeyi istenen bir an ve mesafede iç ve dış yüzeylerinin sıcaklıklarını belirlemede kullanmışlardır ve sıcaklığı zamanın bir fonksiyonu olarak almışlardır.

Sönmez (2009) çalışmasında, Türkiye’de üretilen ve ağır silah sınıfına giren kundağı motorlu obüs namlusunu incelemiştir. Yaptığı incelemede atış esnasında namludaki en fazla gerilmenin olduğu namlu yanma odasına etki eden gerilmelerin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Farklı sevk yakıtlarının kullanıldığı atışlardan elde edilen anlık namlu iç basınç değerleri kullanılarak, farklı malzemelerden üretilen namluların yanma odalarına etki eden gerilme değerlerini ve yanma odalarındaki toplam deformasyon değerlerini bir sonlu elemanlar programı kullanarak zamana bağlı olarak elde etmiştir.

Baran (2018) yaptığı çalışmada, bir ağır silah namlusu olan obüs (howitzer) namlusunun kendi kendine ateşleme (cook-off) atış sayısını ve süresini, analitik ve sayısal yöntemlerle hesaplamıştır. Kendi kendine ateşleme süresini, öncelikle basitleştirilmiş analitik bir yöntem olan toplam kütle yaklaşımı ile hesaplamıştır. Daha sonra, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile ANSYS yazılımında sayısal olarak yapmıştır. Hesaplamalarında kullanılan iç balistik parametreleri, namlu içi en yüksek basınç ve mühimmat namlu çıkış hızı değerleri, PRODAS iç balistik analiz programını kullanarak elde etmiştir. Kendi kendine ateşleme süresinin ve atış sayısının hesaplanması için bir yöntem oluşturmuştur. Farklı atış rejimleri için hesaplamalar yapılmıştır ve sonuçları karşılaştırmıştır.

Degirmenci (2015) ise çalışmada, çift bazlı bir barutun termo-kimyasal hesaplamalarını yapmıştır ve reaksiyon sonucunda meydana gelen ürünlerin ortaya çıkardığı hacim ve sıcaklığı hesaplamıştır. Namlu içi basınç ve hız değerlerini bir iç balistik programı yardımıyla elde etmiştir. Çalışmasında namlu eksenine boyunca zamana bağlı ısı transfer katsayısını hesaplamıştır ve bir sonlu elemanlar programında analiz etmiştir.

Başka bir çalışmada, 7.62 mm çapındaki bir makineli tüfeğin sevk yakıtının yanması sonucu namluda ortaya çıkan iç ve dış sıcaklık değerleri sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Namlu malzemesinin ısı karakteristikleri non-lineer olarak göz önüne alınmıştır. Yapılan çalışma da makineli tüfeğin seri atış durumu incelendiği için tüfeğin kendi kendine ateşlemesi olarak tanımlanan cook-off sıcaklık değerleri de hesaplanmıştır (Akçay ve Yükselen, 2014).

Işık ve Göktaş (2017), 7.62 mm çapında hafif silah namlusunda kendi kendine ateşleme (Cook-off) zamanının deneysel ve sayısal olarak belirlenmesi konusunda çalışmıştır. Çalışmada 180, 200 ve 220 seri atımlar sonrası fişek kovana sürülmüştür ve fişegın kendi kendine ateşleme zamanı ölçülmüştür. Zaman ölçüldükten sonra termal kamera ile namlu yüzey sıcaklığı belirlenmiştir ve ölçülen bu sıcaklık değerleri karşılaştırılarak iterasyon sonucu sabit ısı akısı hesaplanmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programı kullanarak bu hesaplanan ısı akısı değeri ile 180, 200 ve 220 seri atışlar için analizler yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbirine oldukça yakın olarak elde edilmiştir ve kendi kendine ateşleme süresinin uzatılması için şarjör değişim süresi, bekleme zamanı, şarjördeki mühimmat miktarı, atım yatağı ve kovan kalınlıkları gibi parametreler değiştirilerek hesaplar tekrar yapılarak yorumlanmıştır.

Şentürk ve ark. (2016), namlu ölçüleri belli olan 7.62 mm çapındaki bir silah için mekanik gerilmelerin yanında termal gerilmeleri de incelemiştir. Ayrıca namlu içinde oluşan basınç ve sıcaklıkları da hesaplamıştır. Hesaplanan değerleri kullanarak ANSYS sonlu elemanlar programı ile seri atışlar için termo-mekanik gerilme analizleri de yapmıştır. Namlu dış sıcaklık değerini doğrulamak için termal kamera ve termo-mekanik gerilmeleri doğrulamak için ise analitik yöntem kullanmıştır. İlk olarak Vallier-Heydenreich metodu kullanarak iç balistik hesapları da yapılmıştır ve daha sonra barut özellikleri kullanılarak namlu içi sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Çalışmada, küresel tanecik yapısına sahip nitroselülozlu çift bazlı barut kullanılmıştır. Isı akısı ve ısı taşınım katsayısı hesaplandıktan sonra bu girdilerle analizler yapılmıştır. Namlu boyunca elde edilen sıcaklık verileri ile 20 atış sonunda oluşan termo-mekanik gerilmeler hesaplanmıştır ve bu analizler analitik olarak doğrulanmıştır.

Gezer (2016) çalışmasında 40 mm silah için yanma modeli oluşturmuştur. Bu yanma modeli için silindirik, silindirik tek delikli, çok delikli ve küresel şekildeki barut tane geometrisine bağlı biçim fonksiyonu oluşturmuştur ve bu matematiksel modeli literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Modelin hata oranını %4 olarak hesaplamıştır ve modeli bu şekilde doğrulamıştır. Daha sonra farklı barut taneleri için hesaplamalar yaparak sonuçları karşılaştırmıştır.

Keleş (2019), MPT76 (7.62 Kalibre) silahın menzilini arttırmak için namlu ucuna göre namlu freni tasarlamıştır. Çalışmasında, barutun yanmasının ardından, merminin ve akışkanın hareketleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Sonuçlar bilgisayar destekli sayısal analiz yazılımı olan ANSYS Fluent kullanılarak, bazı kabuller ve sınır şartlarında elde edilmiştir. Ayrıca farklı namlu freni modelleri namluya eklenerek, mermi çekirdeğinin hızı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Namlu freni genelde geri tepme kuvvetini azaltmak için kullanılmasına rağmen çalışmada mermi çekirdeğinin menzilini de arttırdığı tespit edilmiştir. Analizlerinde namlu freni olmayan namluda merminin namluyu terk etmesiyle, barut gazlarının namlu çıkış ucunda nozul etkisi yaptığı belirlenmiştir. Bu etkiyle oluşan itme kuvveti sonucunda, merminin stabilitesinin bozulduğu ve hedeften saptığı sonucu ortaya çıkmıştır.

Danış (2014) çalışmasında, katı yakıtlı konvansiyonel silahlar için iç balistik simülasyon programı geliştirmiştir. İç balistik hesaplamalarını sayısal olarak incelemiştir ve sıfır boyutlu ve bir boyutlu model olmak üzere iki sayısal model geliştirmiştir. Sıfır boyutlu model toplu parametre yaklaşımını baz almıştır. Namlu çıkış hızını bulmak için itici gaz taneciklerinin ateşlenmesiyle balistik parametrelerinin değişimi dikkate

alınmıştır. Tek boyutlu model de ise problem viskoz olmayan akış olarak modellenmiştir ve çözüm tekniği olarak Roe yaklaşık Reimann çözücüsü kullanılmıştır. Her iki modelde Noble-Abel durum denklemine dayalı ortak hacim ekleyerek gerçek gaz akışını simüle edebilmiştir. Sayısal modeller karşılaştırılınca tek boyutlu model sıfır boyutlu modele göre daha karmaşıktır ve birkaç dakika gibi daha uzun değerlendirme süresine sahiptir. Tek boyutlu modelin tepe değerleri için sıfır boyutlu modele göre çok daha yüksek basınç değerleri ön gördüğü ve bunun sonucunda daha yüksek hız değerlerine ulaşıldığı açıkça söylenmiştir.

Son olarak başka benzer bir çalışmada, 7.62 mm silah için namlu içerisinde oluşan karmaşık balistik olayları incelemiş ve namlu boyunca iç basınç dağılımı ile merminin hızı farlı barut ve mermi ağırlıkları için yeni bir yaklaşımla modellemiştir. Ayrıca namlu içerisinde bulunan gazların sıcaklığı ile namlu duvarı içinde oluşan sıcaklığın bulunabilmesi için gerekli olan iç taşınım katsayısını Noble-Abel denklemi ve Vielle yanma kanunu kullanılarak hesaplanmıştır. Geliştirilen modelin doğrulanması için 7.62 mm çapında namlu ile çok sayıda atışlı testler yapılmıştır. Genel olarak, deneysel veriler ile geliştirilen modelin sonuçlarının doğruluğunun çok yakın olduğu görülmüştür (Işık, 2016).

Literatürde yapılan çalışmalarda göz önüne alınarak tez kapsamında; seçilen bir mühimmat tipine göre namlu içi sıcaklık dağılımını verecek hesaplamalar yapılacaktır ve aynı zamanda barut dolum oranına göre aynı uzunluktaki namluda aynı çekirdeğe sahip mühimmatların kullanılması ile farklı sıcaklık ve basınç dağılımlarını veren bir hesaplama programı yazılacaktır. Buna bağlı olarak kritik öneme sahip ve genelde kabullere göre alınan namlu ağzı çekirdek hızının hesaplanması da tez çalışmasının özgün değeri olacaktır. Ayrıca, mühimmat çeşitlerine ve kullanılan barutlara göre hesaplanan sonuçlar namlu kaplama ömrü ve kaplama kalınlığı hesaplarında kullanılabileceği gibi namlu ucu Nozzle-Brake hesaplarına da yüksek oranda katkı sağlayacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Namlu içinde gerçekleşen yanma olayını incelemek için öncelikle namlu içi basınç dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Basınç dağılımını konuma ve zaman bağlı olarak elde etmenin en pratik yolu Vallier hesaplama metodudur. Tez çalışmasında da bu yöntem ile seçilen mühimmat tipine göre yanma prosesinin namlu boyunca teorik hesabı yapılmıştır. Zamana bağlı olarak elde edilen basınç ve konum değerleri yardımı ile barut yanma oranlarını belirlenmiştir. Ayrıca barut tanecik yapısı ve yanma ağ kalınlığını çıkarılmıştır. Daha sonra yanma oranı değerleri kullanılarak namlu boyunca sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Sıcaklık dağılımı ve hız değerlerine bağlı olarak ısı taşınım katsayısının bulunması için ihtiyaç duyulan Nusselt ve Reynolds sayıları hesaplanmıştır. Isı taşınım katsayıları da hesaplanarak namlu ve dış ortam arasındaki ısı kayıpları ve enerji geçişleri belirlenmiştir. Daha sonrasında, namlular için kritik öneme sahip olan kendi kendine ateşleme sıcaklığının hesaplanması için literatürde de yaygın olarak kullanılan Lawton yaklaşımı tercih edilmiştir. Yanma denkleminin çözümü ve hesaplama yöntemlerinde kullanılan denklemlerin hızlı çözülmesi için Mathcad programından faydalanılmıştır. Ayrıca kendi kendine ateşleme süresinin doğrulanması ve namlu için farklı kesitlerdeki sıcaklık dağılımlarının görselleştirilmesi için ANSYS programı kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında 30 mm kalibre top için General Dynamics üretimi olan MK264 (Multi Purpose Low Drag-Tracer) tipi mühimmat seçilmiştir. Mühimmat içeriği tam olarak bilinmediği için kimyasal olarak orta kalibre toplarda en sık kullanılan Çizelge 3.1’de özellikleri verilen M2 mühimmat değerleri kullanılmıştır.

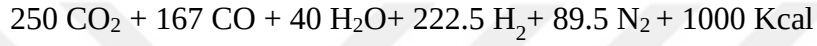
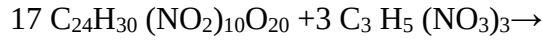
Çizelge 3.1. M2 mühimmat içeriği (Öztürk, 1984)

Barut Terkibindeki Maddeler	Barutun Cinsi Terkibinin Maddelerinin % Olarak Değeri
Nitroselüloz (13,25% Azotlu)	% 77,45
Nitrogliserin	% 19,50
Baryum nitrat	% 1,40
Potasyum nitrat	% 0,75
Etil Santralit	% 0,60
Grafit	% 0,30
Toplam	% 100,00

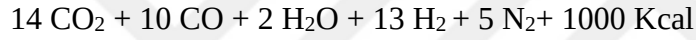
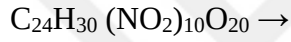
Çizelge 3.1’de de görüldüğü gibi M2 barutunun % 97’lik kısmı nitroselüloz ve nitrogliserinden oluşmaktadır. Bu yüzden namlu içi yanma olayında yapılan hesaplamalarda M2 barutunun % 80 nitroselüloz ve % 20 nitrogliserinden oluştuğu göz önüne alınmıştır ve diğer bileşenler hesaba katılmamıştır.

Barutun özelliklerine bağlı olarak namlu içi yanma hesaplarını yapabilmek için kimyasal yanma denklemine ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla bahsedilen oranlar için kimyasal yanma denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir.

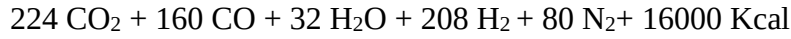
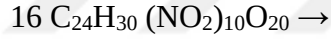
% 85 Nitroselülozlu ve % 15 Nitrogliserinli yakıtın denklemi (Öztürk, 1984):



Nitroselüloz Yanma Denklemi:



Denklemdaki bileşenlerin tamamı 16 ile çarpıldığında denklemin son hali aşağıdaki gibi olmaktadır.



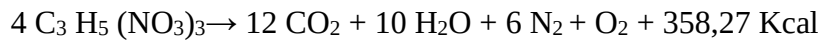
Denklem sonucunda elde edilen ısı değer hesabının detayları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler ile referans değerler birbirine çok yakın elde edilmiştir. 16 mol için yakıt ısı değeri 16673 Kcal olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yakıt ısı değeri 1 mol için yaklaşık 1042 Kcal olmaktadır. Bu değer, 1 mol $\text{C}_{24} \text{H}_{30} (\text{NO}_2)_{10}\text{O}_{20}$ için hesaplandığına göre; 1 mol nitroselüloz $1042/1098 = 0,94889$ Kcal/mol gram olarak hesaplanmıştır.

Bu değer (AMCP, 1973) Tablo 4-26’da (%13,25N) 1034 Kcal/mol gram olarak verilmiştir. Arada oluşan fark tablo değerinin (%13,25) azotlu nitroselüloza göre hesaplanmış olması ve nitroselülozdaki atom sayısı farklılıklarından ileri gelmektedir. Bu sonuçlar bize ısı değer hesaplama yaklaşımımızın kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.2. Nitroselüloz yanma denklemi hesaplamaları

$\text{C}_{24} \text{H}_{30} (\text{NO}_2)_{10} \text{O}_{20} \rightarrow$ $14 \text{ CO}_2 + 10 \text{ CO} + 2 \text{ H}_2 \text{ O} + 13 \text{ H}_2 + 5 \text{ N}_2 + 1000 \text{ Kcal}$											
Nitroselüloz $\text{C}_{24}\text{H}_{30}(\text{NO}_2)_{10}\text{O}_{20}$				→ →	→		CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	N ₂
C	O	H	N								
24	40	30	10				14	10	2	13	5
24	0	0	0	24	C	24	14	10	0	0	0
0	40	0	0	40	O	40	28	10	2	0	0
0	0	30	0	30	H	30	0	0	4	26	0
0	0	0	10	10	N	10	0	0	0	0	10
$16 \text{ C}_{24} \text{H}_{30} (\text{NO}_2)_{10} \text{O}_{20} \rightarrow$ $224 \text{ CO}_2 + 160 \text{ CO} + 32 \text{ H}_2 \text{ O} + 208 \text{ H}_2 + 80 \text{ N}_2 + 16000 \text{ Kcal}$											
16 Nitroselüloz Katsayısı 16											
Nitroselüloz $\text{C}_{24}\text{H}_{30}(\text{NO}_2)_{10}\text{O}_{20}$				→ →	→		CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	N ₂
C	O	H	N				14	10	2	13	5
24	40	30	10				224	160	32	208	80
384	0	0	0	384	C	384	224	160	0	0	0
0	640	0	0	640	O	640	448	160	32	0	0
0	0	480	0	480	H	480	0	0	64	416	0
0	0	0	160	160	N	160	0	0	0	0	160
Nitroselüloz ısı değeri		659,3	Isıl Değ.				94,39	26,43	57,81	0	0
Kcal		10549					21143	4229	1850	0	0
Top.		10549	Kcal	Top.			27222	Kcal			
$16 \text{ C}_{24} \text{H}_{30} (\text{NO}_2)_{10} \text{O}_{20} \rightarrow$ $224 \text{ CO}_2 + 160 \text{ CO} + 32 \text{ H}_2 \text{ O} + 208 \text{ H}_2 + 80 \text{ N}_2 + 16000 \text{ Kcal}$											
Yanma denklemi çözümü sonrası elde edilen ısı değeri										16673	Kcal

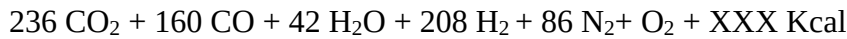
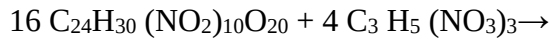
Nitrogliserin için yanma denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir:



Çizelge 3.3. Nitrogliserin yanma denklemi hesaplamaları

$C_3 H_5 (NO_3)_3 \rightarrow 3 CO_2 + (2,5) H_2 O + (1,5) N_2 + (0,25) O_2 + 358,27 \text{ Kcal}$											
Nitrogliserin $C_3H_5(NO_3)_3$				$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	CO₂	H₂O	N₂	O₂	
C	H	N	O								
3	5	3	9	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	3	2,5	1,5	0,25	0
3	0	0	0	3	C	3	3	0	0	0	0
0	0	0	9	9	O	9	6	2,5	0	0,5	0
0	5	0	0	5	H	5	0	5	0	0	0
0	0	3	0	3	N	3	0	0	3	0	0
$4 C_3 H_5 (NO_3)_3 \rightarrow 12 CO_2 + 10 H_2 O + 6 N_2 + O_2 + 358,27 \text{ Kcal}$											
4 Nitrogliserin Katsayısı 4											
Nitrogliserin $C_3H_5(NO_3)_3$				$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	CO₂	H₂O	N₂	O₂	
C	H	N	O				3	2,5	1,5	0,25	0
3	5	3	9	$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$	12	10	6	1	0
12	0	0	0	12	C	12	12	0	0	0	0
0	0	0	36	36	O	36	24	10	0	2	0
0	20	0	0	20	H	20	0	20	0	0	0
0	0	12	0	12	N	12	0	0	12	0	0
Nitrogliserin ısı değeri				370,237	Isıl Değ.		94,39	57,81	0	0	0
Kcal				1480,95			1133	578	0	0	0
Top.				1480,95	Kcal	Top.	1711	Kcal			
$4 C_3 H_5 (NO_3)_3 \rightarrow 12 CO_2 + 10 H_2 O + 6 N_2 + O_2 + XXX \text{ Kcal}$											
Yukarıdaki Yanma denkleminde Çıkan ısıların Hesaplanan değeri (XXX)										230	Kcal

% 80 nitroselülozlu ve % 20 nitrogliserinli yakıtın denklemi aşağıda verilmiştir:



Denklemdaki karbon atomlarından yola çıkılarak yaklaşık olarak mol sayıları belirlenmiştir. Tepkimenin ısı değeri de ayrıntılı bir şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.4. % 80 nitroselüloz % 20 nitrogliserin yanma denklemi hesaplamaları

$16 \text{ C}_{24} \text{ H}_{30} (\text{NO}_2)_{10} \text{O}_{20} + 4 \text{ C}_3 \text{ H}_5 (\text{NO}_3)_3 \rightarrow$ $236 \text{ CO}_2 + 160 \text{ CO} + 42 \text{ H}_2 \text{ O} + 208 \text{ H}_2 + 86 \text{ N}_2 + \text{O}_2 + \text{XXX Kcal}$										
Nitroselüloz Atom Sayıları					Nitrogliserin Atom Sayıları					
Mol Sayısı	$\text{C}_{24}\text{H}_{30}(\text{NO}_2)_{10}\text{O}_{20}$			Mol Sayısı	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{NO}_3)_3$			Top.		
16	C	24	384	4	C	3	12	396		
16	H	30	480	4	H	5	20	500		
16	N	10	160	4	N	3	12	172		
16	O	40	640	4	O	9	36	676		
236	CO ₂	160	CO	42	H ₂ O	208	H ₂	86	N ₂	1 O ₂
236	C	160	C	84	H	416	H	172	N	2 O
472	O	160	O	42	O					
TOP. C	396	TOP. H	500	TOP. N	172	TOP. O	676			
$16 \text{ C}_{24} \text{ H}_{30} (\text{NO}_2)_{10} \text{O}_{20} + 4 \text{ C}_3 \text{ H}_5 (\text{NO}_3)_3 \rightarrow$ $236 \text{ CO}_2 + 160 \text{ CO} + 42 \text{ H}_2 \text{ O} + 208 \text{ H}_2 + 86 \text{ N}_2 + \text{O}_2 + \text{XXX Kcal}$										
Nitroselüloz ısı değeri				659	16	10549				
Nitroselüloz ısı değeri				370	4	1481				
CO ₂ Birleşme Isısı				94	236	22276				
CO Birleşme Isısı				26	160	4229				
H ₂ O Birleşme Isısı				58	42	2428				
XXX Kcal						16903				
$\text{C}_{24}\text{H}_{30}(\text{NO}_2)_{10}\text{O}_{20}$				16	1098	17568				
$\text{C}_3\text{H}_5(\text{NO}_3)_3$				4	227	908				
Toplam Ağırlık Molekül Gram						18476				
Kal / Mol Gram (Kcal/kg)						915				

Çizelge 3.5. % 80 nitroselüloz ve % 20 nitrogliserinli M2 barut için mol sayısı hesaplamaları

%80 Nitroselüloz $C_{24}H_{30}(NO_2)_{10}O_{20}$			
	C	H	N
Mol Sayısı	24	30	10
Gram mol	12	1	14
Ağırlıklar	288	30	140
Nitroselülozun mol ağırlığı			1098
% 20 Nitrogliserin $C_3H_5(NO_3)_3$			
	C	H	N
Mol Sayısı	3	5	3
Mol gram	12	1	14
Ağırlıklar	36	5	42
Nitrogliserinin Mol Ağırlığı			227
M2 Barut Yaklaşık 4 mol Nitroselüloz 1 mol Nitrogliserin			
Nitroselüloz	16	Baruttaki Ağırlık	
Nitrogliserin	4	Baruttaki Ağırlık	
Toplam mol sayısına göre ağırlık			18476
M2 barut ağırlığı (Gram mol)	150	Oran	0,008
M2 barutun verilen ağırlığına göre mol sayısı			0,008
Nitroselülozun mol sayısı $C_{24}H_{30}(NO_2)_{10}O_{20}$			0,130
Nitrogliserin mol sayısı $C_3H_5(NO_3)_3$			0,032
Nitroselülozun Baruttaki Ağırlığı $C_{24}H_{30}(NO_2)_{10}O_{20}$			142,63
Nitrogliserin mol sayısı $C_3H_5(NO_3)_3$			7,37

Yapılan hesaplamalar sonucu % 80 nitroselülozlu ve % 20 nitrogliserinli barutun ısı değeri 915 Kcal/kg elde edilmiştir. M2 barutun ısı değeri 1080 Kcal/kg olarak alınmıştır. M2 barutun içerisinde sadece % 80 nitroselüloz ve % 20 nitrogliserin yoktur. Bunlara ek olarak farklı bileşiklerin olmuş olması onların hesaba katılmaması ve M2 barut tabloları oluştururken deneysel sonuçlar kullanılmış olmasıdır. Yukarıda uyguladığımız metot barut değerlerinin bilinmediği zaman analitik hesaplarda kullanılabilir. Fakat M2 barutumuzun tüm değerleri mevcut olduğu için M2 barutumuzun özelliklerini direk hesaplarda kullanabiliriz. Bu özellikler çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. M2 mühimmat özellikleri (AMCP, 1973)

ÖZELLİK	DEĞER	BİRİM
Sabit Hacimde Alev Sıcaklığı	3319	K
Barut Kuvveti	368	ft-lbs/lb*10 ⁻³
Okside Olmamış Karbon	0	0
Yanııcıların Oranı	47,2	%
Patlama Isısı	1080	cal/gm
Gaz Hacmi	0,039	moles/gm
Öz ısıların Oranı (C _p /C _v)	1,2238	
Sabit Basıncıta Alev Sıcaklığı	2712	K
Barut Yoğunluğu	0,0597	lbs/in ³
Ko-Hacim	27,91	in ³ / lb
Barut Yanma Oranı	29*10 ⁻⁵	(in/s)/(lbf/in ²)

Balistik hesaplarına geçmeden önce öncelikle balistik çeşitleri ile ilgili kısaca bilgi verelim. İç balistik ateşli silahların tetiği çekildikten sonra, mermi çekirdeğinin namluyu terk edinceye kadar geçen sürede, mermi kovanının, mermi çekirdeğinin durumunun incelenmesi, kapsül ve kapsülün ateşlenmesi, barut, barutun yanma hızı, yivler, yiv sayıları, mermi çekirdeğinin hızı, namlu boyutları gibi konuları inceler. Bir namlunun tasarımı iç balistik denklemlerin çözümü ile yapılmaktadır. Bu denklemler sevk barutunun yanması ile açığa çıkan enerji denklemleridir. Barut tarafından üretilen gazların etkisiyle hareket eden mühimmatın karakteristik davranışlarıyla ilgili uygulamalı mekanik dalı olarak da tanımlanabilir. Bilimsel uygulamalarının büyük bir çoğunluğu hala deneysel düzeydedir. İç balistik fiziksel ve kimyasal temeller üzerine kurulmuş bir daldır. Maalesef karmaşık, incelikli, anlaşılması güç bir daldır. Teorik sonuçlar incelenirken deneysel sonuçlarında göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Dış balistik: Mermi namluyu terk ettikten hemen sonra merminin hedefe çarpıncaya kadar geçen zaman içinde meydana gelen olaylarla, yani merminin yörüngesi ve bu yörünge üzerindeki hareketi ile ilgilenir. Hava direnci, yer çekimi etkisi, merminin düşüşü, yörüngesinden sapması, kendi etrafında dönmesi ve dengesi dış balistiğin konuları arasındadır.

Terminal (hedef) balistiği: Mermi çekirdeğinin hedefe çarptığı andan itibaren hedef içinde veya dışında merminin duruncaya kadar yaptığı delme gücü veya enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkiler ile ilgilenir.

Namlu içerisinde gerçekleşen olayları sıralayacak olursak. İlk olarak barut yanması sonucu kimyasal enerji ısı ve çekirdek hareketiyle kinetik enerjiye dönüşmektedir. Bu olaylar gerçekleşirken yanma olayı katı halde bulunan barutu gaz haline geçirmiş fakat çekirdek hareketi esnasında barut yanmaya devam etmiş katı haldeki barut kütlesi azalırken gaz halinde olan barut gazının kütlesi artmıştır. Yanma odasının hacmi çekirdek harekete başlayana kadar sabit hacimde olduğu için sabit hacimde bir yanma gerçekleşirken; çekirdek hareketinden sonra genişleyen bir hacimde yanma meydana gelmiştir. Yanma olayı barutu farklı özelliklerde bulunan gazlara dönüştürmüş ve bu gazlar ideal gaz gibi davranmış fakat hepsinin entalpi değeri farklı olduğu için hesaplanması gereken farklı termodinamik olayları da beraberinde getirmiştir. Ayrıca bununla beraber namlu içinde türbülanslı ve sıkıştırılabilir bir akış gerçekleşirken namlu iç cidarı ve gaz arasında bir ısı transferi oluşmuştur. Namlu bir taraftan ısınmaya başlarken diğer taraftan dış cidarından dış ortama ısı akışı olmaya başlayacaktır. Görüldüğü üzere namlu içinde gerçekleşen yanma olayı oldukça karmaşık bir yapı sergilerken gerçekleşen olayların çözümü için çözülmesi gereken denklem sayısını çoğaltmaktadır.

Namluda gerçekleşen bu kadar karmaşık olayları ayrı ayrı hesaplamak yerine deneye dayalı verilere dayanan ve belirli kat sayı tabloları ile namlu içerisinde olan basınç ve hız grafikleri hesaplanabilmektedir. Bu şekilde yapılan hesaplama yöntemi Vallier ve Heydenreich tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem mermi kütlesi, namlu çapı, namlu boyu, ilk hız, barut kütlesi ve piezometrik verimi bilinen bir silahta, gaz basıncının maksimum olduğu andaki mermi hızını, zamanını ve basıncını hesaplayabilmektedir. Ayrıca buna ek olarak namlu boyunca basınç ve hızda gösterilebilmektedir. Yanma olayı incelemeden önce genel kabul görmüş bu yöntemle kullanacağımız mühimmat ve namlu ölçülerine göre hesaplamalar yapılmıştır ve basınç-zaman, hız-zaman grafikleri çizdirilmiştir.

Namlu içi ortalama basınç değeri P_o Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır (Gündüzer, 2011).

$$P_o = \left[\frac{m_p + 0.5 \cdot m_B}{2 \cdot X_e \cdot A} \right] \times V_0^2 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de; P_o , m_p , m_B , X_e , A ve V_o sırasıyla namlu içi ortalama basınç değerini, mermi kütlesini, barut kütlesini, namlu uzunluğunu, namlu alanını ve namlu çıkış hızını göstermektedir.

$$\eta_p = \frac{P_o}{P_m} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de hesaplanan η_p değeri bir katsayıdır ve Vallier-Heydenreich tablosunda diğer katsayıları bulmak için kullanılır. η_p mevcut değerlerden biri değilse katsayıları bulmak için interpolasyon yapılır.

Çizelge 3.7. Vallier iç balistik hesaplamalarında kullanılan katsayılar

$\eta(p)$	$\Sigma(\eta)$	$\theta(\eta)$	$\emptyset(\eta)$	$\pi(\eta)$	$\Gamma(\eta)$
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2000	0,2620	0,1500	0,3220	0,2740	0,7440
0,2500	0,0313	0,1390	0,3240	0,2160	0,7250
0,3000	0,0402	0,1720	0,3330	0,2420	0,7620
0,3500	0,0500	0,2070	0,3430	0,2780	0,8000
0,4000	0,0608	0,2440	0,3540	0,3040	0,8360
0,4500	0,0729	0,2840	0,3660	0,3400	0,8730
0,5000	0,0875	0,3260	0,3800	0,3820	0,9100
0,5500	0,1320	0,5600	0,4350	0,5010	1,1160
0,6000	0,1600	0,6420	0,4570	0,5410	1,1800
0,6500	0,1920	0,7340	0,4820	0,5850	1,2490
0,7000	0,2310	0,8350	0,5110	0,6350	1,3220
0,7500	0,2830	0,9580	0,5460	0,6970	1,4060
0,8000	0,3600	1,1150	0,5920	0,7790	1,5070

$$X_1 = X_e \times \Sigma_\eta \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’te hesaplanan X_1 değeri gaz basıncının maksimum olduğu anda, merminin namlu içinde aldığı yoldur.

$$t_1 = \frac{2 \times X_e}{V_o} \times \theta_\eta \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’te hesaplanan t_1 değeri gaz basıncının en yüksek olduğu ana kadar geçen süredir.

$$V_1 = V_o \times \emptyset_\eta \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te hesaplanan V_I değeri gaz basıncının maksimum olduğu anda çekirdek hızıdır.

$$t_e = 2 \times \frac{X_e}{V_0} \times \Gamma_\eta \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da hesaplanan t_e değeri merminin namlu içerisinde geçirdiği toplam zamanı göstermektedir.

$$P_e = P_o \times \pi_\eta \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de hesaplanan P_e değeri merminin namlu ağzında çıktığı andaki basıncıdır.

Görüldüğü üzere Vallier-Heydenreich katsayıları sırasıyla bu değerleri hesaplamakta kullanılmıştır. Bu hesaplamalar yapıldıktan sonra Vallier-Heydenreich' in 2. katsayılarını kullanarak konuma göre değerler hesaplanmıştır ve grafikler çizdirilmiştir. Tablodaki x değeri anlık merminin içinde hareket ederken bulunduğu konumu göstermektedir. X_1 değeri ise yukarıda hesapladığımız gaz basıncının maksimum olduğu noktanın konumunu göstermektedir.

Çizelge 3.8. Vallier iç balistik hesaplamalarında kullanılan katsayılar

$\lambda=x/x_1$	$\psi(\lambda)$	$\phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$	$\lambda=x/x_1$	$\psi(\lambda)$	$\phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
0,000	0,000	0,000	0,000	7,000	0,338	2,363	2,163
0,250	0,741	0,392	0,610	8,000	0,284	2,445	2,309
0,500	0,912	0,635	0,780	9,000	0,248	2,509	2,451
0,750	0,980	0,834	0,903	10,000	0,220	2,566	2,589
1,000	1,000	1,000	1,000	11,000	0,199	2,615	2,725
1,250	0,989	1,140	1,081	12,000	0,181	2,659	2,858
1,500	0,965	1,262	1,154	13,000	0,164	2,702	2,988
1,750	0,932	1,366	1,219	14,000	0,150	2,740	3,116
2,000	0,898	1,468	1,282	15,000	0,137	2,777	3,253
2,500	0,823	1,632	1,394	16,000	0,125	2,811	3,390
3,000	0,747	1,763	1,495	17,000	0,117	2,837	3,502
3,500	0,675	1,875	1,589	18,000	0,109	2,862	3,618
4,000	0,604	1,983	1,682	19,000	0,102	2,887	3,740
4,500	0,546	2,068	1,769	20,000	0,096	2,910	3,861
5,000	0,495	2,140	1,851	25,000	0,073	3,003	4,455
6,000	0,403	2,269	2,012	30,000	0,058	3,075	5,031

X / X_1 değerinden hesaplayarak bulunan λ değerini kullanarak tablodan diğer katsayı değerlerine interpolasyon yaparak hesaplanmıştır.

Sırasıyla tablodan bulduğumuz $\psi(\lambda)$, $\phi(\lambda)$, $\delta(\lambda)$ katsayıları kullanarak P_x , V_x , t_x hesaplanır. P_x konuma bağlı basınç değeri, V_x konuma bağlı hız değeri, t_x konuma bağlı zaman değeridir.

$$P_x = P_{max} \times \psi(\lambda) \quad (3.8)$$

$$V_x = V_1 \times \phi(\lambda) \quad (3.9)$$

$$t_x = t_1 \times \delta(\lambda) \quad (3.10)$$

Yukarıda verilen denklemler doğrultusunda seçtiğimiz mühimmat ve namlu çiftine göre hesaplamalar Mathcad programında yapılmıştır. Bu hesaplamalar ekte verilmiştir. Çıkan sonuçların grafiklerini de (Basınç-konum, basınç-zaman, hız-zaman) sonuçlar kısmında verilmiştir. Ayrıca hesaplamalar da istediğimiz bir namlu çıkış hızına göre tekrar yapılmış ve hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda ayrıntıları ile ekte bulunmaktadır. Bu durumda istediğimiz hıza göre barut ağırlığı hesaplanmış daha sonra grafikler tekrar çizdirilmiştir. Bu hesaplamalar yapılırken ivmenin sabit olduğu düşünülmüş ve ortalama basınç hesaplanmış istenilen hıza göre namlu içi basınç zamanı

hesaplanmıştır. Daha sonra tekrar hesaplanan kat sayılar doğrultusunda (Basınç-konum, basınç-zaman, hız-zaman) grafikler tekrar çizdirilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

İlk olarak yanma sonucu oluşan gazların ideal gaz olduğu kabul edilerek namlu boyunca sıcaklık ve basınç biliniyorsa yanan barutun kütlesi hesaplanabilir. Fakat namlu içi sıcaklık dağılımı bilmediğimiz için öncelikle namlu içi sıcaklık dağılımını hesaplamamız gerekir. Bu hesapları yapabilmek için mühimmatımızın barutunun özelliklerine ihtiyacımız bulunmaktadır. Bu özellikler üreticiler tarafından verilmemektedir. Fakat biz genel M2 barut kullandığımız kabul ederek M2 barut özelliklerini kullanacağız. Barut tane şeklimizde küresel olacaktır. Küresel barut kullanmamızın sebebi yanma hızından yanan barut kütlesini rahatlıkla hesap edebileceğimizden kaynaklıdır. Yanma hızı yanma reaksiyonunun barut tanesi içerisinde ilerleme hızı olarak ifade edilir.

$$\frac{ds}{dt} = \beta \cdot P^n \quad (3.11)$$

Denklemden bulunan β ve η değeri barutun türüne göre değişen ve baruta ait yanma katsayılarıdır. Bu sayılar yukarıda bahsettiğimiz üzere barutun kimyasal ve tanecik yapısına göre çeşitlilik gösterir.

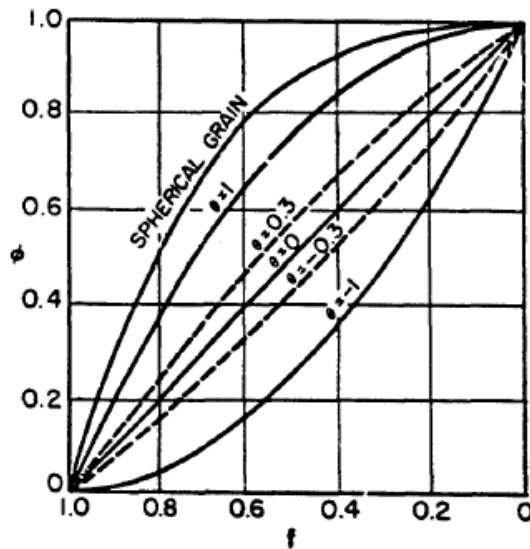


Figure 4-12. Relationship of form factor to rate of change of area of burning surface

Şekil 3.1. Orantı Sabiti ve Yanma Yüzdesi Arasındaki İlişki (AMCP, 1973)

Öncelikle, yanma sonucu oluşan gazların ideal gaz olduğu kabul edilmiştir. Bu denklem sayesinde namlu içerisinde namlu boyunca sıcaklık ve basınca bağlı olarak yanan barutun kütlesi hesaplanabilmektedir (Gezer, 2016).

$$P(v)=mRT \quad (3.12)$$

Denklem 3.11’de verilen Noble-Abel ideal gaz denkleminde; P , V_t , m_g , T_g , R ve η simgeleri sırasıyla namlu içi basınç değeri, toplam hacim, gaz kütlesi, gaz sıcaklığı, ideal gaz sabiti ve özellikli hacim olarak ifade edilmektedir. İdeal gaz yaklaşımında gaz moleküllerinin arasındaki mesafe çok büyük olduğu için moleküller arası çarpışma gazların iç enerjisini etkilemediği var sayılır.

$$\left[P + \frac{a}{v^2} \right] * (v - \eta) = RT \quad (3.13)$$

İç balistik olayın da yüksek sıcaklık, basınç ve küçük hacimden dolayı gazlar idealden uzaklaşmaktadır. Bu nedenle gazlar arası çekimi ihmal etmemek gerekir. Denklem 3.13 Van Der Walls denklemdir. Denklemden kullanılan simgeler; a/v^2 , η sırasıyla moleküller arası çekim kuvvetini ve gaz moleküllerinin kapladığı hacmi göstermektedir.

Van Der Walls denklemi ideal gaz davranışı ile sıkıştırılmaz akış arasında birleştiricidir. Fakat yanma olayında genel literatürde Nobel-Abel hal denklemi kullanılır.

$$p \times (v - m_g \eta) = m_g \times RT \quad (3.14)$$

Nobel-Abel denkleminde kullanılan simgeler; R , η , p , T , m_g sırasıyla gaz sabiti, gaz moleküllerinin kapladığı hacim, basınç, sıcaklık ve gazların kütlesini ifade etmektedir. Nobel-Abel hal denklemi Van Der Walls denkleminin gaz molekülleri arası çekim kuvvetinin iptal edilmiş halidir.

Barut enerjisi yanma odasındaki barutun yanması ile açığa çıkmaktadır. Bu yanma odasının basıncının sabit olduğu kabul edilir. Birim ağırlığındaki barutun yanması sonucu oluşan gazların patlama sıcaklığı T_0 olarak ifade edersek barutun gücü şu formülle bulunabilir.

$$F_{barut} = R \times T_0 \quad (3.15)$$

Sabit hacimde belirli miktarda barutun yakılması sonucu oluşan maksimum basıncın ölçülmesi sonucu tespit edilen değerler Nobel-Abel hal denklemiyle çözümlerse gaz moleküllerinin kapladığı hacmi ifade eden η (co-volume) değeri tespit edilir.

$$F_{barut} = \left(\frac{P_{max}}{M_B}\right)(V_{yanma} - M_B \times \eta) \quad (3.16)$$

Denklem 3.16’de kullanılan simgeler; F_{barut} , P_{max} , M_B , V_{yanma} sırasıyla; barutun gücü, maksimum basınç değeri, barut kütlesi ve yanma odası hacmini ifade etmektedir. Denklem 3.16, aşağıdaki şekilde de düzenlenebilir.

$$F_{barut} = P_{max} \times \left(\frac{V_{yanma}}{M_B} - \eta\right) \quad (3.17)$$

Veya

$$F_{barut} = P_{max} \times \left(\frac{1}{\rho_b} - \eta\right) \quad (3.18)$$

Bu denklemde ρ_b barutun yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu noktada yanma odasında tüm barutun yandığı kabul edilirse $m_g = M_B$ olur barut kütlesi gaz kütlesine eşit olmak zorundadır. Hacimde sabit olduğuna göre gaz yoğunluğu katı barut yoğunluğuna eşit olur.

$$F_{barut} = P_{max} \times \left(\frac{1}{\rho_g} - \eta\right) \quad (3.19)$$

Gaz yoğunluğunu belirlemek için T_0 sıcaklığında oluşan gazların oluşturduğu içi enerji merminin hareketine, silah geri tepmesine, barut gazlarının hareketine ve silahın ısınmasına kullanılmaktadır. Gazların iç enerji değişimi:

$$d_u = C_v \times dT \quad (3.20)$$

Denklem 3.20’ de verilen d_u iç enerji değişimini, C_v sabit hacimde barut gazlarının özgül ısılarını ifade etmektedir.

$$C_v = C_p \times (T_0 - T) \quad (3.21)$$

$$dh = C_p \times (T_0 - T) \quad (3.22)$$

$$u = C_v \times T \quad (3.23)$$

$$h = C_p \times T \quad (3.24)$$

C_p ve C_v özgül ısıları temsil etmektedir. Sabit hacim ve sabit basınçtaki özgül ısıların oranı:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad \text{ve} \quad C_p - C_v = R \quad (3.25)$$

$F_{barut} = R \times T_0$ Değeri Denklem 3.15'te verilmiştir. Bu denklemde R yerine $C_v(\gamma - 1)$ yazılırsa;

$$C_v \times T_0 = \frac{F_{barut}}{(\gamma - 1)} \quad (3.26)$$

Denklem 3.26'da $C_v T_0$ ifadesine barutun özgül enerjisi veya kimyasal potansiyel enerjisi denilmektedir.

Barut enerjisinin mermi hareketine, gazların ve silahın hareketine, ısı enerjisine gibi muhtelif enerjilere dönüşmektedir.

$$E_T = E_k + E_h + E_b \quad (3.27)$$

Patlama sonucu oluşan ısı:

$$E_T = M_B \times Z \times C_v \times (T_0 - T) \quad (3.28)$$

Denklem 3.28'de verilen simgeler; M_B, Z, T_0, T, C_v ; sırasıyla barut kütlesi, barutun yanma oranı, adiyabatik alev sıcaklığı, barutun sıcaklığı, sabit hacimde öz ısıdır. Denklem 3.28'de ve Denklem 3.26'da elde edilen değerler yerine konulduğunda Denklem 3.29 aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$E_T = M_B \times Z \times \frac{F_{barut}}{(\gamma - 1)} \times \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \quad (3.29)$$

Merminin hareketine harcanan enerji:

$$E_k = \frac{1}{2} \times M_p \times V_m^2 \quad (3.30)$$

Denklem 3.30'da kullanılan simgeler; M_p , V_m sırasıyla mermi kütlesini ve mermi hızını ifade etmektedir.

Namlunun ısınması için harcanan enerji:

$$E_h = \frac{1}{2} \times \theta \times m_e \times V_m^2 \quad (3.31)$$

Denklem 3.31'de kullanılan simgeler sırasıyla; θ , m_e , V_m sırasıyla, ısı transferi düzeltme katsayısı, m_e , etkin kütle ve V_m mermi hızıdır. Eğer ısı transferi yoksa θ sıfır olarak alınmaktadır. θ değeri orta kalibre silahlarda 0,17 olarak alınmaktadır. Küçük kalibrelerde daha yüksektir ve küçük kalibre silahlar atışlarda daha fazla ısınmaktadır. Yukarıdaki denklemleri yerleri koyup eşitlikleri yazarsak;

$$\frac{M_B \times Z \times F_{barut}}{(\gamma-1)} \times \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) = \frac{1}{2} \times M_p \times V_m^2 + \frac{1}{2} \times \theta \times m_e \times v_m^2 + \frac{1}{2} \times \left(\frac{M_B \times Z \times V_m^2}{3}\right) \quad (3.32)$$

Denklem düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \frac{M_B \times Z \times F_{barut}}{(\gamma-1)} \times \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) &= \frac{1}{2} \times M_p \times V_m^2 + \frac{1}{2} \times \theta \times m_e \times v_m^2 + \\ \frac{1}{6} \times (M_B \times Z \times V_m^2) & \\ (3.33) \end{aligned}$$

$$\frac{M_B \times Z \times F_{barut}}{(\gamma-1)} \times \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) = \frac{1}{2} \times \left[M_p + \frac{M_B \times Z}{3}\right] \times V_m^2 + \frac{1}{2} \times \theta \times m_e \times v_m^2 \quad (3.34)$$

Bu denklemlerdeki etkin kütle:

$$m_e = M_p + \frac{M_B \times Z(t)}{3} \quad (3.35)$$

Namlu içerisinde mermi ile barut gazları da beraber hareket ettiği için bu gazlarında hareketine enerji harcanmaktadır.

$$\frac{M_B \times Z \times F_{barut}}{(\gamma-1)} \times \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) = \frac{1}{2} \times m_e \times V_m^2 + \frac{1}{2} \times \theta \times m_e \times v_m^2 \quad (3.36)$$

$$\frac{M_B \times Z \times F_{barut}}{(\gamma-1)} \times \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) = (1 + \theta) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e \quad (3.37)$$

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{(\gamma-1) \times (\theta+1) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e}{M_B \times Z \times F_{barut}} \quad (3.38)$$

Bu ifade Nobel-Abel hal denkleminde kullanılmaktadır.

$$P_{ort} \times V_{hacim}(t) = M_B \times Z \times RT \quad (3.39)$$

Denklem 3.39’da kullanılan simgeler; P_{ort} , $V_{hacim}(t)$, M_B , Z , R , T sırasıyla çekirdek arkasındaki ortalama basınç, hacmin zamana bağlı değeri çünkü çekirdek hareket halinde iken hacim sürekli artmaktadır, yanma oranı, ideal gaz sabiti ve gaz sıcaklığıdır.

$$P_{ort} \times v(t) = M_B \times z(t) \times RT \times \frac{T_0}{T} \quad (3.40)$$

$$F_{barut} = R \times T_0 \quad (3.41)$$

$$P_{ort} \times V_{hacim}(t) = M_B \times Z \times \frac{T}{T_0} \times F_{barut} \quad (3.42)$$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{P_{ort} \times V_{hacim}(t)}{M_B \times Z \times F_{barut}} \quad (3.43)$$

3.42 ve 3.43 denklemler beraber çözülürse:

$$\begin{aligned} \frac{P_{ort} \times V_{hacim}(t)}{M_B \times Z \times F_{barut}} &= 1 - \frac{(\gamma-1) \times (1+\theta) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e}{M_B \times Z \times F_{barut}} \\ P_{ort} &= \frac{M_B \times Z \times F_{barut} - (\gamma-1) \times (1+\theta) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e}{V_{hacim}(t)} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Bu denklem, namlu içerisindeki ortalama basıncı veren denklemdir. $V_{hacim}(t)$ sürecin gerçekleştiği hacmi ifade etmektedir. Namlu içerisinde gerçekleşen harekete göre yazarsak; barut yanma odasında katı halde bulunmaktadır. Barut şekil ve yoğunluğuna

göre belirli bir hacim kaplamaktadır. Barutun katı haldeki yoğunluğu ρ_b , barut kütlesi M_B ve yanma odası hacmi V_{yanma} ;

$$V_{hacim(t)} = V_{yanma} - \frac{M_B}{\rho_b} \quad (3.45)$$

Barut yanmaya başladıktan sonra mermi hemen harekete geçmez ve bir süre hareketsiz kalır. Çünkü mermi çevresinde bulunan sevk çemberinin yiv setler tarafından ezilmesi gerekir. Bu değer genellikle 10 MPa ve 60 MPa arasında değişmektedir. Hatta kaynaklarda basıncın maksimum değerinin % 20' sine kadar çıkabilmektedir. Bu durumda barutun bir kısmı yanmakta bir kısmı katı halde bulunmaktadır.

$$V_{hacim(t)} = V_{yanma} - \left[\frac{M_B}{\rho_b} - \frac{M_B \times Z}{\rho_b} \right] \quad (3.46)$$

Gazların moleküler olarak kapladıkları hacim, Nobel-Abel denkleminde dikkate alınması gerektiği konusuna daha önce değinmiştik. Barutun gaz fazına geçen kısım barutun yanan kütesine kütle korunumu kanununa göre eşit olacağına göre;

$$M_B = m_g$$

$$V_{hacim(t)} = V_{yanma} - \left[\frac{M_B}{\rho_b} - \frac{M_B \times Z(t)}{\rho_b} \right] - M_B Z \eta \quad (3.47)$$

$$V_{hacim(t)} = V_{yanma} + \frac{M_B \times Z}{\rho_b} - \frac{M_B}{\rho_b} - M_B Z \eta \quad (3.48)$$

Bu denklem bize şunu anlatmaktadır. Yanma odasının ilk hacmi yanma odasının hacminden katı barutun hacminin düşülmesi ile bulunurken yanma başladıktan sonra bu hacme yanan barutun hacmi eklenir çünkü katı barutun hacmi azalmış olur. Bu toplamdan da gaz moleküllerinin kapladığı hacim düşülür. Denklem sadeleştirilirse.

$$V_{hacim(t)} = V_{yanma} - \frac{M_B}{\rho_b} - M_B Z \times \left[\frac{1}{\rho_b} - \eta \right] \quad (3.49)$$

Yani barutun yoğunluğu, co-volume değeri ve barut yanma oranının zamana göre değişimi biliniyor ise hacim hesaplanabilir. Mermi harekete başladıktan sonra ise yanma hacmi namlu ucuna kadar genişler. Bundan dolayı denkleme merminin $X(t)$ namlu içindeki konumuna göre hacim hesaplanarak eklenir.

$$V_{hacim}(t) = V_{yanma} - \frac{M_B}{\rho_b} - M_B Z \times \left[\frac{1}{\rho_b} - \eta \right] + [AX(t)] \quad (3.50)$$

Denklem 3.47'deki A simgesi namlu içi kesit alanını ifade ederken $X(t)$ simgesi ise çekirdeğin namlu içi konumunu göstermektedir. $V_{hacim(t)}$ değeri denklem 3.41'teki yerine yazılırsa:

$$P_{ort} = \frac{M_B \times Z \times F_{barut} - (\gamma - 1) \times (1 + \theta) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e}{V_{hacim}(t)} \quad (3.51)$$

$$P_{ort} = \frac{M_B \times Z \times F_{barut} - (\gamma - 1) \times (1 + \theta) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e}{[V_{yanma} - \frac{M_B}{\rho_b} - M_B Z \times \left[\frac{1}{\rho_b} - \eta \right] + [AX(t)]]} \quad (3.52)$$

Denklem 3.42, Vallier 'den hesapladığımız konum, zaman, basınç ve hız değerlerini kullanırken baruta ait özelliklerde ise M2 barut özelliklerini kullanacağız.

Çekirdek namlu ucunda iken M2 barutumuzun özelliklerini kullanarak namlu çıkış hızına ve mühimmat özelliklerimize göre Z değerimizi hesap edelim. Bu bize barutumuzun tamamının namlu içerisinde yanıp yanmadığını gösterecektir. Yukarıdaki 3.42 denkleminde Z “yanma oranı” bir tarafta yalnız bırakacak şekilde düzenlersek.

$$(P_{ort} V_{yanma}) - \left(P_{ort} \frac{M_B}{\rho_b} \right) - \left(P_{ort} M_B Z \left[\frac{1}{\rho_b} - \eta \right] \right) + (P_{ort} \times AX(t)) = M_B Z F_{barut} - (\gamma - 1)(1 + \theta) \frac{1}{2} V_m^2 m_e \quad (3.53)$$

Namlu ucundaki Z değerini hesaplamak için bilinenlere katsayı vererek denklem sadeleştirilir.

Örneğin:

$$A1 = P_{ort} V_{yanma} \quad (3.54)$$

Port değeri daha önce Vallier' den hesaplanmıştı.

$$A2 = P_{ort} \frac{M_B}{\rho_b} \quad (3.55)$$

M_B barut ağırlığımız ve ρ_b barut yoğunluğumuz; (yoğunluğumuz Standart M2 barut yoğunluğunu alacağız);

$$A3 = Port \times AX(t) \quad (3.56)$$

$$AX(t) = Alan \times Xe \quad (3.57)$$

$$A3 = Port \times Alan \times Xe \quad (3.58)$$

Namlu ucunda X(t) namlunun boyuna eşit olmaktadır. A Alan namlu için kesit alanımız;

$$A4 = Port \times \left(\frac{1}{\rho_b} - \eta\right) \times M_B \quad (3.59)$$

$$A5 = Fbarut \times M_B \quad (3.60)$$

$$A6 = (\gamma - 1)(\theta + 1) \times \frac{1}{2} V_0^2 \quad (3.61)$$

$$A7 = A6 \times M_p \quad (3.62)$$

$$A8 = \frac{M_B}{3} \quad (3.63)$$

$$Z = \frac{A1 - A2 + A3 + A7}{A5 + A4 - A8} \quad (3.64)$$

Namlu ucundaki değerler için hesaplanan Z değeri 2,189 dur. Bu değer bize gösteriyor ki barutumuzun tamamı namlu ucuna gelmeden yanmıştır. Namlu içi yanma süreci başladıktan fakat çekirdek hareketine başlamadan önce yanan barut miktarını hesaplırsak. Bunu hesaplayabilmek için bir basınç değeri tahmini kabul edilir. Maksimum basıncımızın 345 Mpa olduğunu biliyorsak; %10 civarı bir değer verirse 30 Mpa alabiliriz. Yukarıdaki denklemlerle yanan barut miktarını hesapladığımızda. Z değeri 0,027 değerine ulaşırız. Hesaplamaların ayrıntıları ekte gösterilmiştir. 30 Mpa'lık değer in doğruluğunu kanıtlamak içinde şu yöntemi kullanabiliriz.

$$m_{barut} = \frac{P_{ilkhareket} \times V_{hacim}}{(F_{barut} \times P_{ilkhareket} \times \eta)} \quad (3.65)$$

Denklem 3.65'te kullanılan simgeler; $P_{ilkhareket}$, V_{hacim} , m_{barut} sırasıyla çekirdeğin harekete başladığı andaki yanma odası içindeki basınç, yanma odası hacminden katı barut hacminin çıkarılması ile bulunan hacim, çekirdek harekete başlamadan yanan barut miktarıdır. Bu noktada hesaplanan yanan barut miktarına hacimsel bir artışa sebep

olurken yanan barut kütlesi gaza dönüşeceği için co-volume değeri kadar hacimsel artışın düşmesine sebep olacaktır. Bu doğrultuda son hacim hesaplanacak olursa.

$$V_{C1} = V_{hacim} - V_{katıbarut} + V_{yananbarut} - m_{barut} \times \eta \quad (3.66)$$

Hesaplanan hacim değeri 0,148 L'dir. Yanma odası son hacmini tersten hesaplanırsa

$$V_{C1} = \frac{T_{alevsh} \times R_{ideal} \times m_{barut} \times n_{mol}}{P_{ilkhareket}} \quad (3.67)$$

Denklem 3.56'da kullanılan simgeler sırasıyla; T_{alevsh} , R_{ideal} , n_{mol} sırasıyla; sabit hacimdeki alev sıcaklığı için M2 barut özellikleri kullanılmıştır ve değeri 3319.K'dir, gaz sabiti ve 1 kg M2 Barutun yanması sonucu ortaya çıkacak gazın mol sayısı ve değeri 40.7 mol/kg'dır. Hesaplanan hacim değeri 0,148 L olmaktadır. Bu iki değerin birbirine eşit olması tahmini olarak girdiğimiz 30 Mpa değerini doğrulamaktadır. Bu değeri hesaplarımızın devamında kullanabiliriz. Hesaplamaların ayrıntıları Ekte gösterilmiştir.

Namlu ucu verilerine göre Z değerini hesapladığımızda Z değeri 2,189 çıkmaktadır. Bu değer barutun tamamının namlunun içinde yandığı bize göstermektedir. Z değerinin 1'e ulaşması durumunda yanmamızın tamamlandığı anlamına gelir. Z değer grafiğini namlu boyunca hesaplanmış ve sonuçlar kısmında verilmiştir.

Barut yanma hızını basınç ve yanma oranından anlık hesaplayabiliriz. Çünkü namlu boyunca basınç grafiğimizi biliyoruz ve basınç grafiğimizde o basınca gelen yanma zamanımızı da biliyoruz.

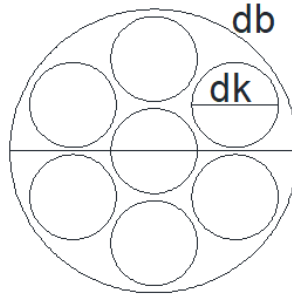
$$Y_{anmahızı} = Y_{anmaoranı} \times P_{xx} \quad (3.68)$$

$$\Delta S = Y_{anmaoranı} \times (P_{xx}) \times \Delta t_x \quad (3.69)$$

Denklemlerde kullanılan; yanma oranı, barutun özelliğine bağlı olarak verilmiş yanma oranıdır. Biz barutumuzun M2 olduğu kabul etmiştik. Bundan dolayı M2 barutunun yanma oranını kullanıyoruz. P_{xx} ; Namlu içindeki düzeltilmiş basınç dağılımıdır. Vallier' den gelen basınç grafiği ilk hareket esnasında kabul edilen 30Mpa göre yenilenmiştir. Vallier hesaplamalarında çekirdeğin harekete başladığı ilk an basınç sıfır olarak kabul edilir ve grafik bu şekilde oluşturulur. Oluşturduğumuz yeni basınç

grafiğinde sadece 30 Mpa altında kalan basınç değerleri 30 Mpa olarak kabul edilerek grafik tekrar oluşturulmuştur. Grafik sonuçlar kısmında verilmiştir.

$\Delta S1$ hesaplandıktan sonra (webthickness) barutumuzun ağ kalınlığını bulabiliriz. Bu da bize barut tane geometrisini tahmin etmemizi sağlayacaktır. Aşağıdaki şekilde genellikle toplarda kullanılan silindirik yedi delikli barutun tane geometrisi gösterilmiştir. Bu ölçüden yola çıkarak kullanacağımız küresel boyutta olan tane geometri ölçüsüne gidebiliriz.



Şekil 3.2. Yedi delikli silindirik barut tane geometrisi

Barutumuzun toplam çapının db değerinin 5 mm olduğu varsayılır. Bu noktada db ve dk değeri arasında aşağıdaki gibi bir bağlantı bulunmaktadır. Barutun toplam yanma zamanı hesap edilirken $\Delta S1$ değerinin ne kadar zamanda t_{web} değerine ulaştığı hesaplanır.

$$dk = db - 4 \times t_{web} \quad (3.70)$$

Toplam yanma zamanı hesaplanırken zaman 2 farklı durumda hesaplanarak doğrulanmaktadır. Birincisi Z oranının 1 olduğu noktadaki zaman değeri tablodan çekilir bu zaman değeri ekte belirtilen hesaplamalarda T_{zaman} değeridir. İkincisi ise barutun yanma hızına ve barut yanma uzunluğuna göre belirlenmiş T_{zaman} değeridir. Bu değerlerin verilen t_{web} değerine göre aynı çıkması gerekmektedir. Hesaplamaların kolaylıkla yapılabilmesi için barutumuz tane geometrisini küresel olarak kabul etmiştik. Çünkü balistik hesaplamalarında barut tane geometrisinden çok barutun yanma yüzey geometrisi önemlidir. Silindirik yedi delikli ve yanma alanı t_{web} kadar olan bir barut tanesi ile çapı t_{web} kadar olan barut tanesinin hesaplamalarda yanma zamanı aynı çıkacaktır. Bundan dolayı çekirdek harekete başlamadan önce yanan kısım hesaplamalara başlarken

kabul edeceğimiz çaptan düşölerek yeni bir çap hesaplanır. Küremizin çapı az da olsa bir miktar azalmıştır. Hesaplamalar yapılmış t_{web} değeri $4,84 \times 10^{-4}$ ve T_{zaman} değeri $1,876 \times 10^{-3}$ s olarak hesaplanmıştır.

Silindirik yedi delikli barut tane geometrimizin dış çapının 5 mm olduğu durumda dk değeri 3.064 mm çıkmaktadır. Toplam yanma zamanı ise harekete başladıktan sonra yanma zamanı ile hareket etmeden önceki yanma zamanlarının toplamı olacaktır. Hareketten önceki yanma oranı kullanarak hesaplanmış sabit hacimdeki yanma zamanı $\Delta t_{sabit hacim}$ isimlendirilmiş ve $6,968 \times 10^{-5}$ olarak bulunmuştur.

Silindirik yedi delikli barut tane geometrimizin dış çapının 5 mm olduğu durumda dk değeri 3.064 mm çıkmaktadır. Toplam yanma zamanı ise harekete başladıktan sonra yanma zamanı ile hareket etmeden önceki yanma zamanlarının toplamı olacaktır. Hareketten önceki yanma oranı kullanarak hesaplanmış sabit hacimdeki yanma zamanı $\Delta t_{sabit hacim}$ isimlendirilmiş ve $6,968 \times 10^{-5}$ olarak bulunmuştur.

$$P_{xx} * \left(V_{yanma} + Alan * X - M_B * \left(Z\eta + \frac{1-Z}{\rho_b} \right) \right) = M_B * Z * Rm * T_{gaz} \quad (3.71)$$

Denklem 3.59’da kullanılan simgeler; P_{xx} , V_{yanma} , $Alan$, M_B , Z , ρ_b , X , T_{gaz} ; sırasıyla namlu içi basınç, yanma odası hacmi, namlu içi kesit alanı, barut kütlesi, barutun yanma oranı, barut yoğunluğu, mermi çekirdeğinin namlu içinde bulunduğu konumu, namlu içi gaz sıcaklığıdır. Denklem 3.71 kullanarak namlu içindeki her bir milimetre için gaz sıcaklığı bulunmuştur. Hesaplamalar ekte verilmiştir. Grafiği sonuçlar kısmında verilmiştir.

Hesaplamalara göre ortalama sıcaklığımız 1960 K ve 1687°C derecedir. Bu ortalama sıcaklığı kullanarak tablolardan dinamik viskozite, Prandtl sayısı ve ısı iletim katsayısı belirlenir. Ayrıca ortalama sıcaklığa göre hesaplanan değerin yanında değişen sıcaklığa göre de değerler tablolardan otomatik olarak çekilmiş ve hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda ekte ayrıntıları ile gösterilmiştir.

$$\rho_{gaz} = \frac{M_B * Z}{V_{yanma} + Alan * X - \frac{M_B}{\rho_b} + \frac{M_B * Z}{\rho_b} - M_B * Z * \eta} \quad (3.72)$$

$$\rho_{gaz} = \frac{P_{xx}}{Rm * T_{gaz}} \quad (3.73)$$

Namlu içi gazın yoğunluğu yukarıdaki iki denklem kullanılarak da bulunabilir. Bu denklemlerde kullanılan simgeler Denklem 3.72 ve 3.73'te ρ_{gaz} , P_{xx} , M_B , Z , V_{yanma} , ρ_b , X , T_{gaz} , R_m 'dir. Sırasıyla bu simgeler namlu içi gazın yoğunluğu namlu içi basınç, barut kütlesi, barutun yanma oranı, yanma odası hacmi, barutun yoğunluğu, mermi çekirdeğinin namlu içinde bulunduğu konumu, namlu içi gaz sıcaklığıdır ve gaz sabitidir. Hesaplamalar ekte grafikler sonuçlar kısmında verilmiştir.

$$R_m = R_{ideal} \times n_{mol} \quad (3.74)$$

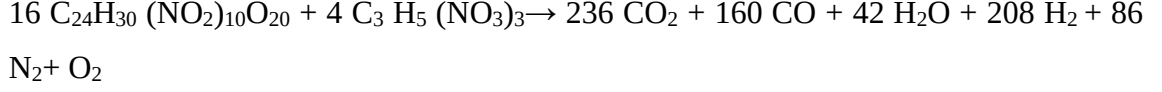
Denklem 3.74'te R_{ideal} ; gaz sabiti $8,315 \text{ (m}^2\text{.kg)/(mol*.s}^2\text{.K)}$ ve n_{mol} ; M2 barutumuzun yanması sonucu çıkan gazın mol sayısıdır. M2 barut için bu değer $40,7 \text{ mol/kg}$ 'dır. Hesaplamalar ekte barut gazı genleşme hız grafikleri sonuçlar kısmında verilmiştir. Reynolds sayısı hesaplayabilmek için gaz genleşme hızına ihtiyacımız bulunmaktadır (Şentürk, 2015).

$$v = CK \times T_{gaz} \times P^n \quad (3.75)$$

$$Reynolds = \frac{\rho_{gaz} \times v \times D}{\mu} \quad (3.76)$$

CK ve n katsayıları deneysel olarak bulunmuştur ve $0,00002 \leq CK \leq 0,00086$ $0,6 \leq n \leq 0,86$ değerleri arasındadır. CK değeri $0,000548$ alınmıştır. Sevk barutunun enerjisi arttıkça bu değer $0,00086$ yaklaşmaktadır. Bu kalibrede seçtiğimiz mühimmat için yeterlidir. Çünkü namlu içi maksimum basınç değeri daha yüksek olan mühimmatlarda vardır. O tip bir mühimmat seçtiğimizde bu kat sayı değerini $0,00086$ ya yaklaştırabilir. Basınç üssü n değeri ise $0,775$ seçilmiştir. Reynolds sayısını hesap edebilmek için oluşan gaz karışımının dinamik viskozitesinin değerinin belirlenmesi gerekir. Değerler ilgili tablolardan ortalama sıcaklık değerine göre seçilebileceği gibi her 1 mm için hesaplanmış T_{gaz} değeri de kullanılabilir. Daha sonra tablolardan interpolasyon yaparak bulunan değerlerin gaz karışımındaki oranlarına göre hesaba katılarak karışımın dinamik viskozitesi hesaplanır. Her 1 mm için hesaplanan sıcaklık değerinin 2520 değere sahip olduğu düşünülürse hesaplamalarımıza tablolardaki değerler girilerek hesaplama otomatik olarak yaptırılmıştır. Hem ortalama sıcaklığa göre hesap edilmiş Reynolds sayısı hem de 2520 farklı sıcaklık değerine göre hesaplanmış Reynolds sayısı grafikleri aşağıda verilmiştir. Aynı yöntemle Prandtl sayısı ve ısı iletim katsayısı hesaplanacaktır.

% 80 Nitroselülozlu ve % 20 Nitrogliserinli yakıtın denklemi:



$$\mu = \frac{236 \times \mu_{\text{CO}_2} + 160 \times \mu_{\text{CO}} + 42 \times \mu_{\text{H}_2\text{O}} + 208 \times \mu_{\text{H}_2} + 86 \mu_{\text{N}_2} + \mu_{\text{O}_2}}{733} \quad (3.77)$$

$$Pr = \frac{236 \times Pr_{\text{CO}_2} + 160 \times Pr_{\text{CO}} + 42 \times Pr_{\text{H}_2\text{O}} + 208 \times Pr_{\text{H}_2} + 86 Pr_{\text{N}_2} + Pr_{\text{O}_2}}{733} \quad (3.78)$$

$$K_{\text{ısı}} = \frac{236 \times k_{\text{CO}_2} + 160 \times k_{\text{CO}} + 42 \times k_{\text{H}_2\text{O}} + 208 \times k_{\text{H}_2} + 86 k_{\text{N}_2} + k_{\text{O}_2}}{733} \quad (3.79)$$

1687°C için yanma sonucu ortaya çıkan gaz karışımının dinamik viskozite μ_{ort} değeri $5.863 \cdot 10^{-5}$ (kg/m.s), Prandtl sayısı 0.81808655 ve K ısı iletim katsayısı 0.26691527 (W/m.K) değerlerini almaktadır.

Namlu ısı transfer denklemlerinin çözümü için namlu içinden birim alandan olan ısı akısının sınır şartı olarak bilinmesi gereklidir. 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 kadar ki zaman aralığına karşılık gelen balistik döngü boyunca maruz kalır. Isı akısının değeri taşınım ısı transferi mekanizmasını oluşturan ısı taşınım kat sayısına ve gaz sıcaklığı ile namlu iç yüzey sıcaklığı arasındaki farka bağlıdır (Şentürk, 2015).

Gazların ısı transfer katsayısını hesaplayabilmek için Denklem 3.80 kullanılmıştır.

$$Nu = \frac{H_{\text{ısıtaşınım}} \cdot D}{K_{\text{ısı}}} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad (3.80)$$

$$H_{\text{ısıtaşınım}} = \frac{0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \cdot K_{\text{ısı}}}{D} \quad (3.81)$$

Denklem 3.80 ve 3.81’da kullanılan simgeler; Re , Pr , D , $K_{\text{ısı}}$, $H_{\text{ısıtaşınım}}$, Reynolds sayısı, Prandtl sayısı, namlu iç çapı, ısı iletim katsayısı ve ısı taşınım katsayısıdır.

Bu değerler bulunduktan sonra namlu içinde bir balistik döngü için harcanan ısı enerjisini bulduktan sonra hesaplamalar başında kabul ettiğimiz θ (0,17) değeri karşılaştırılmıştır. Bu değerler sonuçlar kısmında verilmiş ve hesaplamalar ekte gösterilmiştir.

Silahlarda kendi kendine ateşleme mekanizması, mühimmatın namluya sürüldüğü anda daha önceden ısınmış olan namluda tetikleme yapmadan yanma işleminin ortamda sıcaklığa bağlı olarak doğrudan gerçekleşmesi olarak tanımlanmaktadır. Yeni nesil silahlarda genellikle ateşleme yapılmadığı zaman süresince mühimmat namlu içerisinde bulunmamaktadır. Fakat bazı durumlarda mühimmat patlamadan mermi içinde sıkışabilmektedir ve ısınmış olan namluda mühimmat kendi kendine ateşlenmektedir. Bu durum göz önüne alınarak kendi kendine ateşleme süresi çalışma kapsamında belirlenmiştir.

Namlu ile ilgili hesaplamalar yapıldıktan sonra toplam kütle yaklaşımı ile namlunun kendi kendine ateşleme sıcaklığına ne kadar sürede çıkacağı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Lawton (2001a)'un yaklaşımı kullanılmıştır. Lawton (2001a), namlu boyunca veya balistik döngü süresince namlu içindeki gaz sıcaklığı, gaz basıncı ve gaz hızının değişmediğini kabul ederek farklı bir yaklaşımla ısı akısının hesaplanması için yarı-deneye dayalı bir denklem çıkarmıştır. Bir balistik döngüde yani birim atışta birim alana transfer edilen ısı enerjisi Lawton (2001a) tarafından verilen Denklem 3.82 ile hesaplanmıştır.

$$H_{\infty} = k. (T_{max} - T_i) / 1,082. \sqrt{\frac{\pi}{\alpha} \cdot t_0} \quad (3.82)$$

Denklem 3.82'de, birim atışta birim alana transfer edilen ısı, namlu ilk sıcaklığı, en yüksek namlu iç yüzey sıcaklığı, zaman sabiti ve ısı yayılım katsayısı sırasıyla H_{∞} , T_i , T_{max} , t_0 ve α simgeleri ile verilmiştir. Zaman sabiti, namlu içinde oluşan sıcaklık dalgalanmasının yiv-set başlangıç bölgesinde ölçülmesiyle belirlenir ve Lawton (2001a) tarafından verilen aşağıdaki denklem hesaplanmıştır.

$$t_0 = (0,8. m_r. V_m) / (P_{max} \cdot d^2) \quad (3.83)$$

Denklem 3.83'te; mühimmat ağırlığı, m_r , mühimmat namlu çıkış hızı, V_m , namlu içi en yüksek basınç P_{max} , ve namlu iç çapı, d ile ifade edilmiştir. Mühimmat ağırlığı, sevk barutu ağırlığının ve çekirdek ağırlığının toplamı olarak alınmıştır.

Lawton (2001a) denkleminde ısı akısı hesabı için gerekli olan $(T_{max}-T_i)$ değeri Thornhill (Lawton, 2001b) tarafından önerilen yarı deneye dayalı Denklem 3.84 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{T_f - T_i}{T_{max} - T_i} = 1,7 + 670. (d^{2,22} / m_p^{0,86}) \quad (3.84)$$

Putti denkleme hız faktörünü de eklemiştir.

$$\frac{T_f - T_i}{T_{max} - T_i} = 1,7 + 670. \left(\frac{d^{2,22}}{m_p^{0,86}} \cdot \sqrt{900/V_m} \right) \quad (3.85)$$

Denklem 3.85'te, V_m ifadesi mühimmat namlu çıkış hızı olarak verilmiştir. Hesaplamalar yapılmış bu hesaplamalar ekte paylaşılmıştır.

$$t_{00} = \frac{m_{namlu} \times C_{p_{namlu}}}{h \times A_0} \quad (3.86)$$

Denklem 3.86' da kullanılan simgeler; t_{00} , m_{namlu} , $C_{p_{namlu}}$, h , A_0 sırasıyla toplam kütle yaklaşımında kullanılan zaman, namlu kütlesi, namlu malzemesi ısı iletim katsayısı, namlu dış yüzeyi ısı taşınım katsayısı ve namlu dış yüzey alanıdır.

$$\theta\theta = \frac{H_{\infty} \times A_i \times R_f}{h \times A_0} \quad (3.87)$$

Denklem 3.87' da kullanılan simgeler; $\theta\theta$, H_{∞} , A_i , R_f , h , A_0 sırasıyla sıcaklık, hesaplanan birim atışta birim alana transfer edilen ısı, birim atış zamanı, namlu içi alanı, namlu dış yüzeyi ısı transfer katsayısı ve namlu dış yüzey alanıdır.

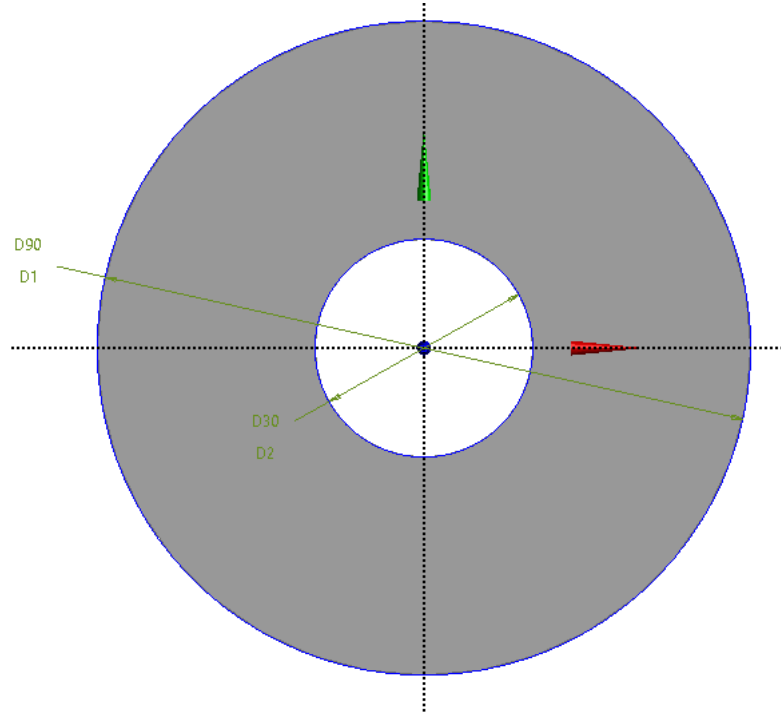
$$t_c = t_{00} \times (-\ln (1 - \left(\frac{T_k - T_i}{\theta\theta} \right))) \quad (3.88)$$

Hesaplanan t_c , değeri namlunun iç yüzeyinin barut tutuşma sıcaklığına ne kadar zaman da çıkacağıdır. Birimi saniyedir.

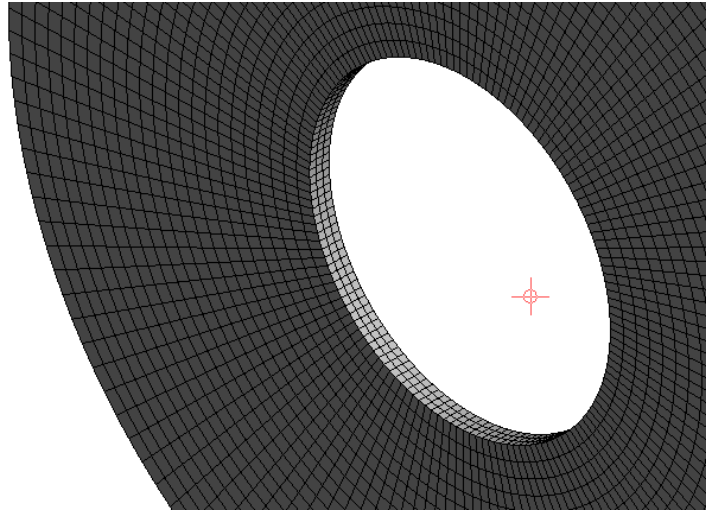
$$Isiakısı = \frac{H_{\infty}}{t_e} \quad (3.89)$$

Toplam kütle yaklaşımında hesaplanan ısı değerinin çekirdeğin namlu içindeki toplam zamana bölünmesi ile ortalama ısı akısı hesaplanır. Bulunan ısı akısına göre ANSYS yazılım programında namlu malzemesinin yapısal çelik olduğu düşünülerek transient termal analiz yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Analizlere ilk olarak iç

ap 30 mm dış çap 90 mm ve cidar kalınlığı 2 mm olacak şekilde model oluşturularak başlanılmıştır.



Şekil 3.4. Model-1

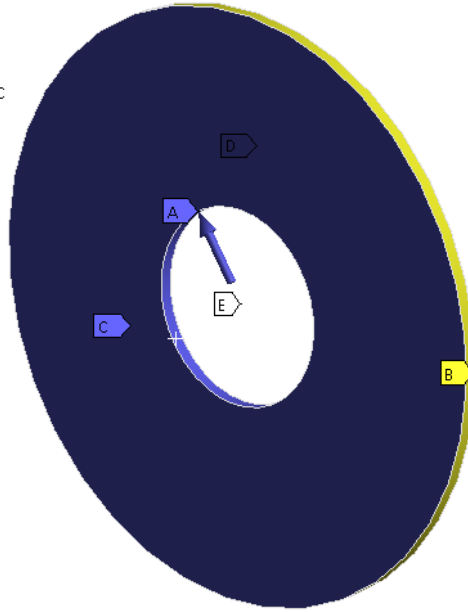


Şekil 3.5. Ağ yapısı Modeli

Aę yapısı oluşturulurken face meshing modülü kullanılmıştır ve element büyüklüğü 1 mm olarak belirlenmiştir. Aę elemanı olarak hex aę yapısı tercih edilmiştir. Malzeme standart yapısal elik olarak belirlenmiştir.

B: Transient Thermal
 Transient Thermal 4
 Time: 1,8 s
 3.06.2024 14:20

A Heat Flux: 0, W/mm²
B Convection: 20, °C, 6,5e-006 W/mm²·°C
C Heat Flow: 0, W
D Heat Flow 2: 0, W
E Temperature: 20, °C

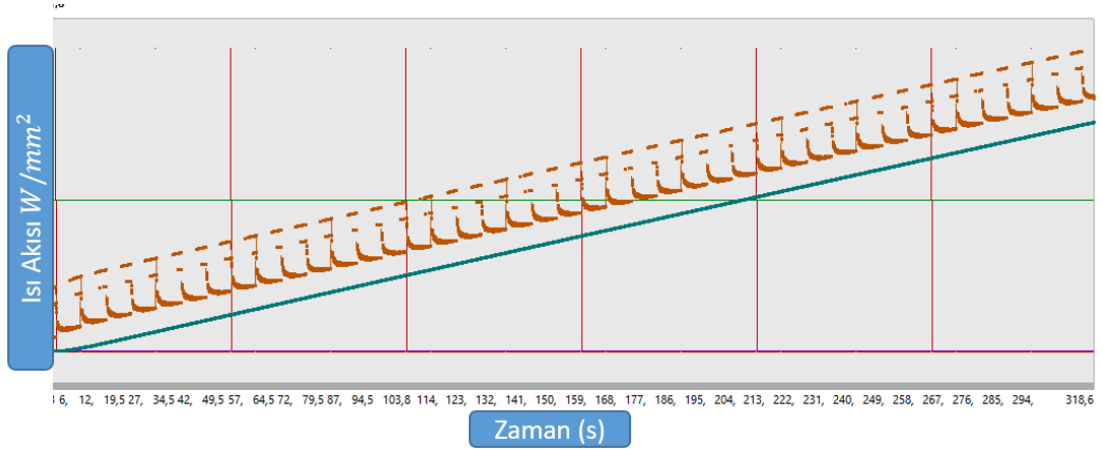


Şekil 3.6. Sınır şartları

Sınır koşulları belirlenirken yan yüzeyler mükemmel izole edilmiş olarak tanımlanmıştır. Ayrıca ısı akışı sadece radyal yönde içerden dışarı doğru olduğu kabul edilmiştir. Transient analizde zaman adımları belirlenirken her bir atış döngüsü için dakikada 200 atım yapan bir silahta bir döngü 0,3 s olarak girilmiştir. Alt adımların her biri 0,3 saniye olarak alınmıştır. Fakat her bir döngüde ısı akışı bu zamanlamanın hepsinde namlu içini etkilememektedir. Çünkü çekirdek namluyu 4 milisaniyede terk etmektedir. Isı akışının sadece 4 ms için girdi olarak verilmesi gerekmektedir.

Steps	Time [s]	Heat Flux [W/mm ²]	Step Controls
1	0,	11,771	Number Of Steps 1062,
2	4,e-003	11,771	Current Step Number 6,
3	5,e-003	0,	Step End Time 1,8 s
4	0,3	0,	Auto Time Stepping Program Controlled
5	0,30001	11,771	Initial Time Step 3,e-003 s
6	0,304	11,771	Minimum Time Step 3,e-004 s
7	0,305	0,	Maximum Time Step 3,e-002 s
8	0,6	0,	Time Integration On
9	0,60001	11,771	Solver Controls
10	0,604	11,771	Solver Type Program Controlled
11	0,605	0,	Radiosity Controls
12	0,9	0,	Nonlinear Controls
13	0,90001	11,771	Advanced
14	0,904	11,771	Output Controls
15	0,905	0,	Analysis Data Management
16	1,2	0,	Visibility

Şekil 3.7. Her bir adımda verilen ısı akışı zamanlaması ve zaman adımı ayarları



Şekil 3.8. Isı akısı zamanlaması (1062 Atım – 318.6 s)

Isı akısı olarak daha önce hesaplanan 11.771 W/mm^2 değeri girilmiştir ve zamana bağlı ısı analiz yapılmıştır. Şekil 3.9’da namlu yüzeyi boyunca verilen ısı taşınım katsayısı verilmiştir.

B: Transient Thermal

Convection

Time: 1,8 s

30.05.2024 16:31

Convection: 20, °C, $6,5\text{e-}006 \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$



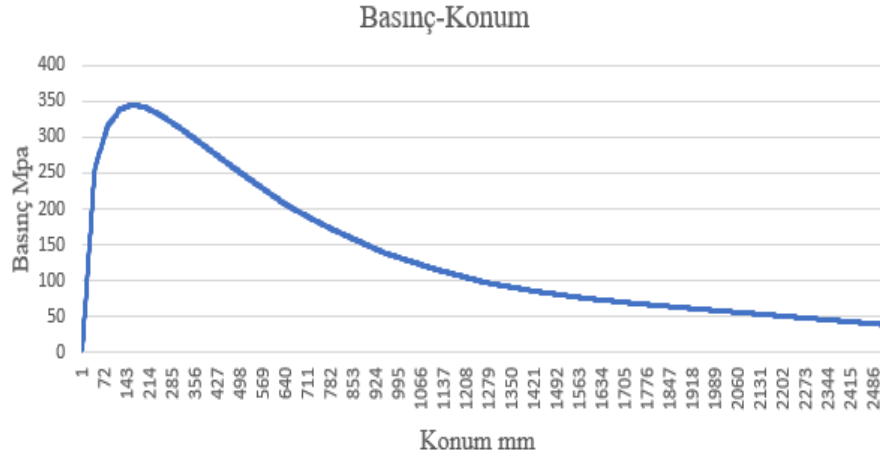
Şekil 3.9. Namlu yüzeyine verilen ısı taşınım katsayısı ($6.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Hesaplamalar, barut özellikleri ve seçilen namlu ölçülerine göre yapılmıştır ve Çizelge 4.1’de hesaplamalar için kullanılan başlangıç değerleri verilmiştir. Mathcad programında çözülen denklemler için parametrik bir program yazılmıştır. Öncelikle çözülen denklemler sonucunda; Şekil 4.1-4.7 arasında iki farklı hız değeri için basınç-konum, basınç-zaman, konum-zaman, hız-zaman grafikleri sunulmuştur. Barut enerjisinin dönüştüğü enerji oranları hesaplanmıştır ve literatür ile kıyaslanmıştır. Ayrıca çekirdeğin namlu ağzındaki kinetik enerjisine dönüşüm oranı literatürdeki orana yaklaşık %2 farkla yakın olduğu için istenilen bir hız değerine göre ihtiyaç yeni barut ağırlığı hesaplanmıştır. Daha sonra bu hız değerleri Mathcad programında parametrik olarak çalıştırılmıştır. Bunlar ilaveten ilk hız değerine göre ısı taşınım katsayısını bulabilmek için barut yanma oranı hesaplanmıştır. Yanma oranı belirlendikten sonra, barutun yanma süresi de elde edilmiştir ve bu değer farklı barut tanecik yapısı için tablodan interpolasyon yardımıyla farklı durumlar için bulunmuştur. Yanma süresi hesaplamalarına bağlı namlu içi sıcaklık dağılımı belirlenmiştir ve termodinamik tablolardan gerekli katsayılar otomatik olarak alınarak ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Isı taşınım katsayısı bulunması ile silahın bir atış döngüsü için namlunun ısınmasına harcanan enerjisi de bulunmuştur. Daha sonra Lawton’ un toplam kütle yaklaşımı ile bir atış döngüsü için ısı akısını hesap edilerek kendi kendine ateşleme zamanını belirlenmiştir. Son olarak ANSYS Transient thermal modülü yardımıyla bilinen ısı akısı değerlerine bağlı olarak ateşleme süreleri hesaplanmıştır ve analitik hesaplamalarla kıyaslanmıştır.

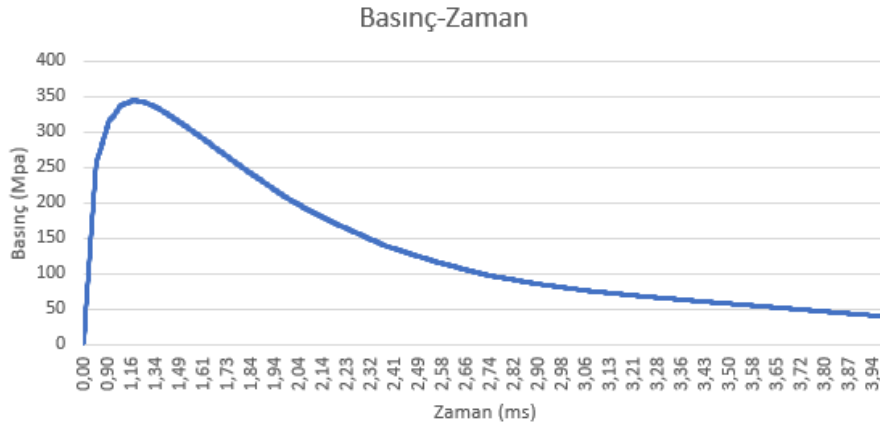
Çizelge 4.1 Namlu ve barut özellikleri

Mühimmat kütlesi	$M=0.835 \text{ kg}$
Mermi çekirdek kütlesi	$M_p=0.363 \text{ kg}$
Mermi barut kütlesi	$M_B=0.150 \text{ kg}$
Namlu yivli kısım uzunluğu	$X_e=2520 \text{ mm}$
Namlu içi maksimum gaz basıncı	$P_{\max}=345 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Namlu çıkış hızı	$V_0=1070 \text{ m/s}$
Namlu dış çap	$D_{n\text{dış}}=90 \text{ mm}$
Hesaplamalarda kullanılacak namlu çapı	$D_n=30 \text{ mm}$

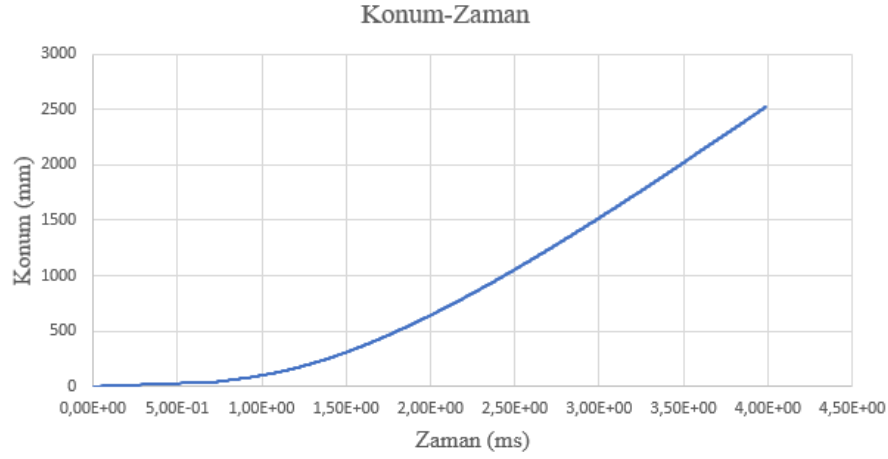


Şekil 4.1. Vallier hesaplama yöntemine göre elde edilen basınç-konum grafiği

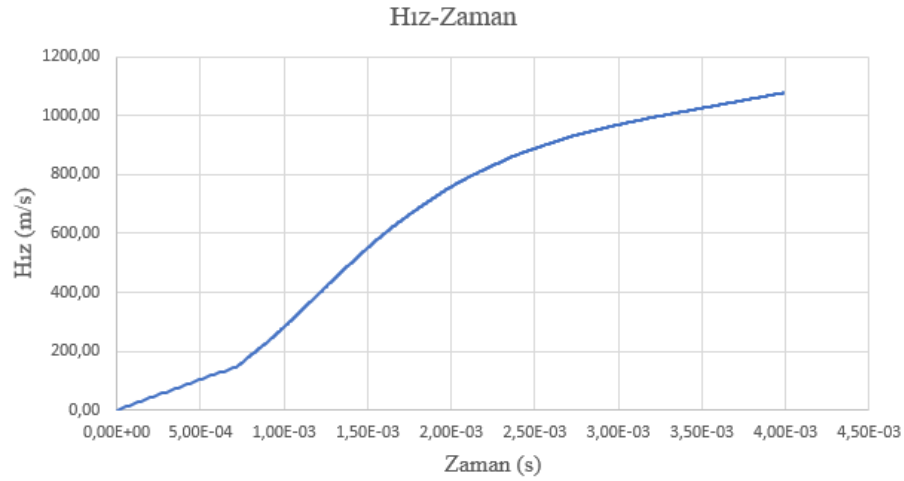
Şekil 4.1 ve 4.2’de basıncın zamana ve konuma bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafikte basınca ait en yüksek değer zamanı ve konumu beklenen hareket noktası değeri ile neredeyse aynı çıktığı görülmüştür. Bu durum barutun tanecik yapısının ve miktarının yeterli olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.2. Vallier hesaplama yöntemine göre elde edilen basınç-zaman grafiği



Şekil 4.3. Vallier hesaplama yöntemine göre elde edilen konum-zaman grafiği



Şekil 4.4. Vallier hesaplama yöntemine göre elde edilen hız-zaman grafiği

Şekil 4.3 ve 4.4'te verilen konum-zaman ve hız-zaman grafiği incelendiğinde; çekirdek harekete başladıktan sonra sabit ivmeli ve daha sonra azalan bir ivme ile hareket ettiği görülmektedir. Bu durum, yanmanın belirli bölgede tamamlandığı ve hacim artışına karşın basıncın düşmesiyle ivmeyi oluşturan basınç değerinin azalması sonucu ivmenin azalmasından kaynaklanmaktadır. Hesaplamalar öncelikle namlu ucunda çıkış hızı 1070 m/s alınarak yapılmıştır ve grafikte bu durumu sağlamıştır. Ancak, namlu çıkış hızı değiştirilmek istendiği durumda P_{ort} ve P_{max} değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. İhtiyaç duyulan bu basınç değerlerini hesaplamak için çekirdek hareketinin sabit ivmeli bir hareket olduğu ve çekirdek arkası ortalama basınç değerinin ivmeye sebep olduğu kabulünden yola çıkarak yapılması gerekmektedir.

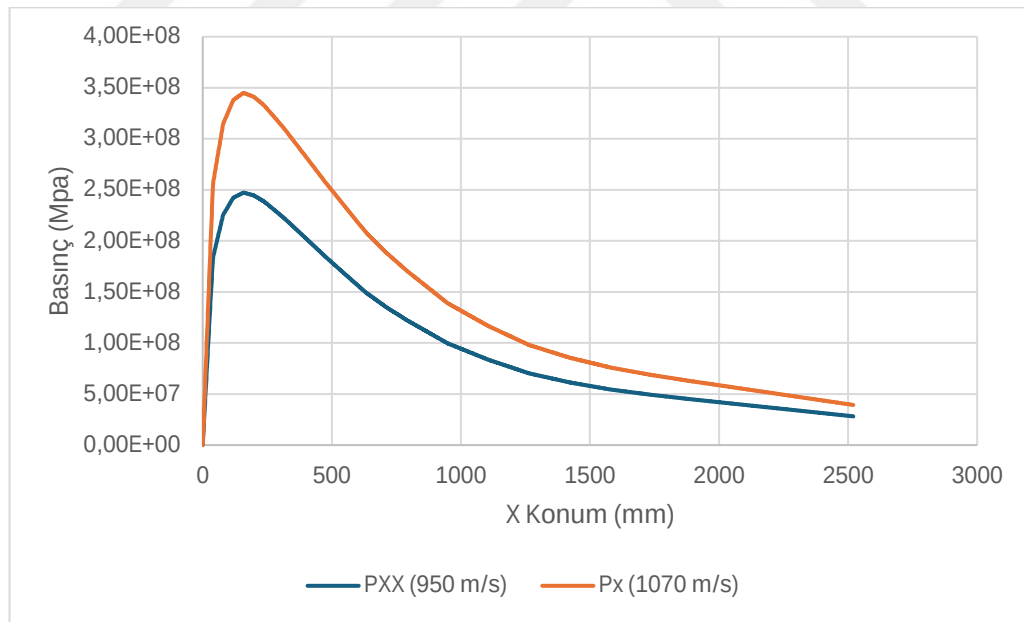
1070 m/s namlu çıkış hızına göre yapılan ilk hesaplamada, P_{ort} basınç değeri 140,8 MPa elde edilmiştir. Aynı hız için çekirdek hareketi sabit ivmeli olarak kabul edildiğinde

yapılan hesaplamalarda $P_{ort}=137,9$ MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu basınç değerine göre %2 oranında bir fark olmuştur ve doğru bir yaklaşım ile hesaplamaların yapıldığı kanıtlanmıştır.

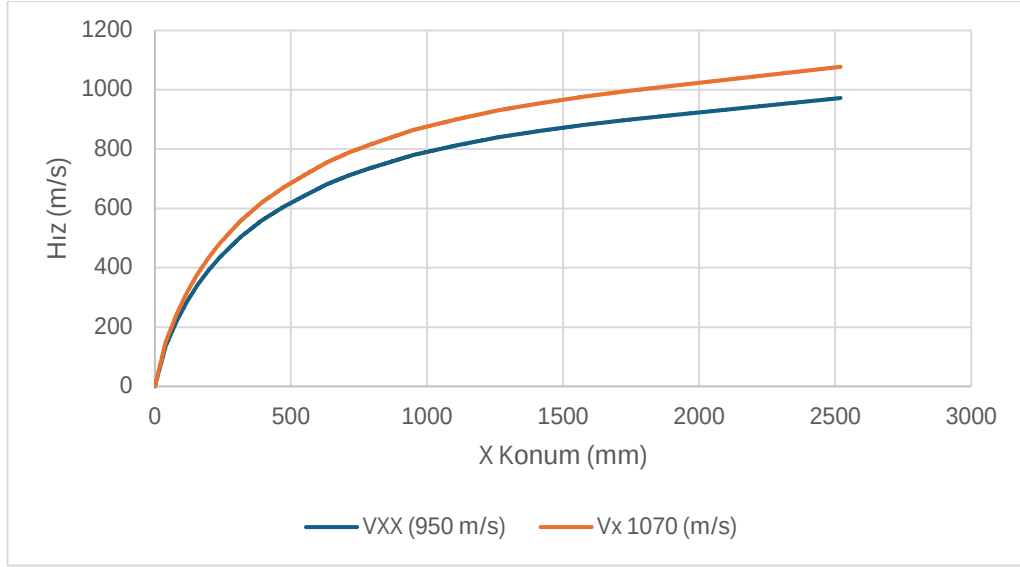
Ayrıca barut toplam barut enerjisinin yaklaşık %30,6'sı çekirdek hareket enerjisine dönüştüğü hesaplanmıştır. Bu değer literatürde Çizelge 4.2'de de görüldüğü gibi yaklaşık olarak %32,4 civarındadır. Bu değerler kullanılarak istenen hıza göre hesaplamalar tekrar yapılabilmektedir. İstenen hız değeri 950 m/s seçilerek hesaplamalar tekrar yapılmıştır.

Çizelge 4.2 Barut enerjisinin oranları (Öztürk, 1984)

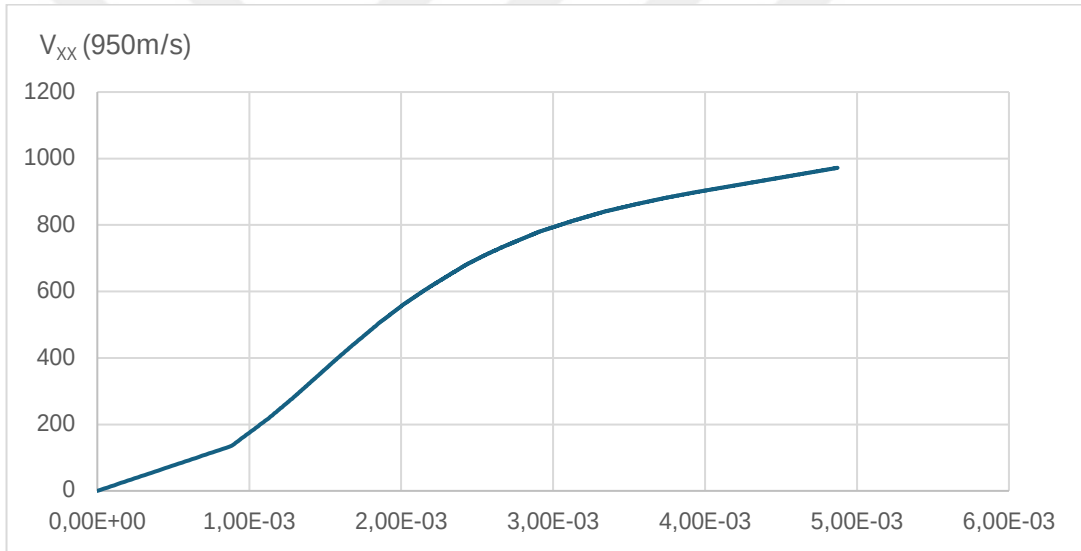
Merminin hareketi için harcanan enerji	%32,4
Merminin dönmesi için harcanan enerji	%0,14
Geri tepme için harcanan enerji	%0,16
Namluyu ısıtan enerji	%22,3
Mermiyi ısıtan enerji	%2
Kullanılmayan enerji	%43



Şekil 4.5. Vallier hesaplama yöntemine göre farklı hızlar için elde edilen basınç-konum grafiği

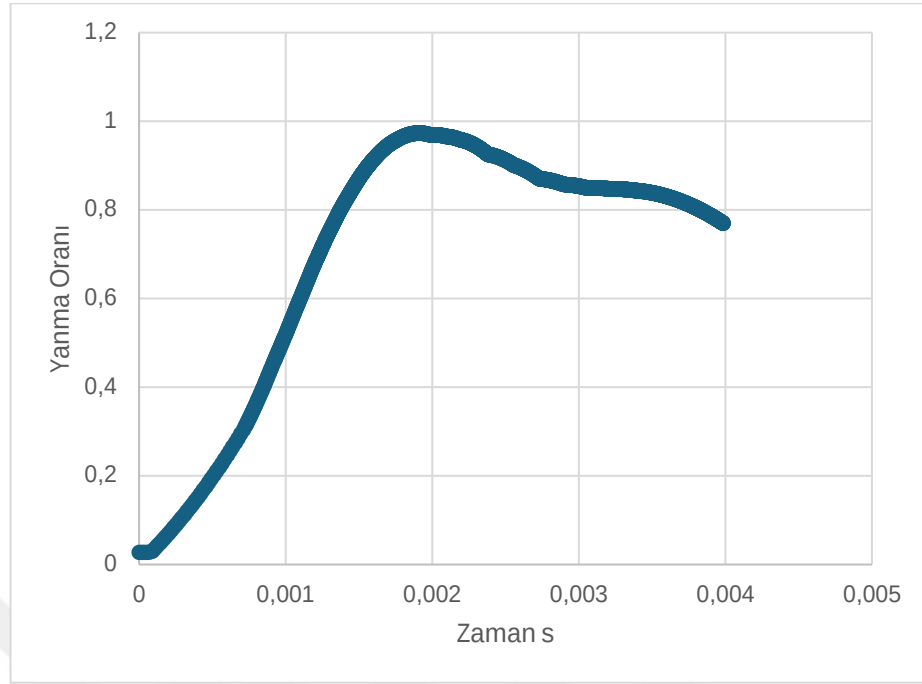


Şekil 4.6. Vallier hesaplama yöntemine göre farklı hızlar için elde edilen hız-konum grafiği



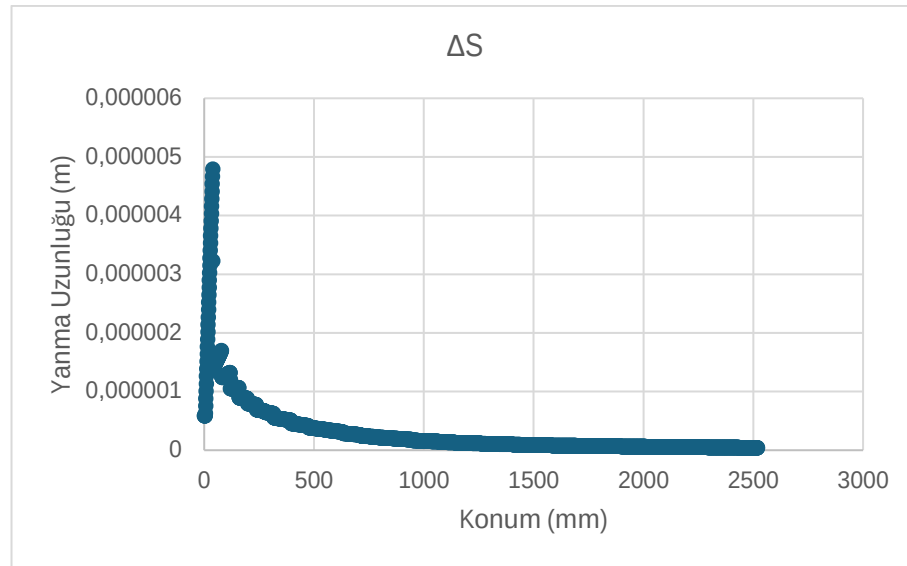
Şekil 4.7. Vallier hesaplama yöntemine göre elde edilen ve namlu çıkış hızı 950 m/s olarak alınmış Hız-zaman grafiği

Şekil 4.5 ve 4.6'da istenilen ilk hız değeri olan 950 m/s'ye göre namlu içi basınç ve hız dağılımları 1070 m/s ile hesaplanan dağılımlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 4.7'de 950 m/s ilk hıza sahip çekirdek hızına göre namlu içi ortalama yeni hız dağılımı gösterilmiştir. Hesaplamalar sonucunda barut ağırlığının 150 gramdan 118 grama düştüğünde, ortalama basınç değerinin 140.8 Mpa' dan 106.9 Mpa' a düştüğü ve namlu çıkış zamanının ise 3.985 milisaniyeden 4.872 milisaniyeye çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca kat sayılar tekrar hesaplanmıştır ve $P_{max}=247.3$ Mpa olduğunda, basıncın maksimum olduğu konumun $X_{max}=158$ milimetreden 173 milimetreye çıktığı; basıncın maksimum olduğu zamanının 1.182 milisaniyeden 1.446 milisaniyeye değiştiği hesaplanmıştır.



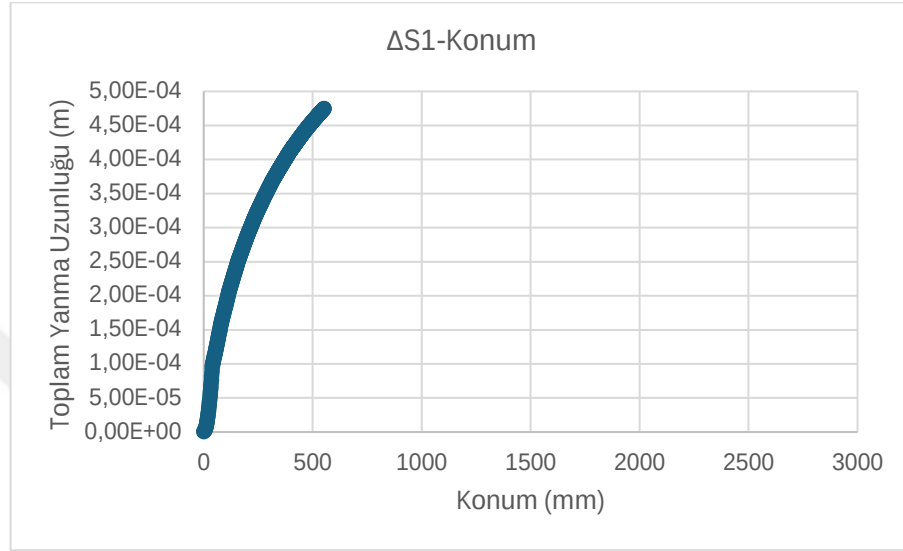
Şekil 4.8. Yanma oranının (Z) zamana bağlı değişimi

Şekil 4.8’de namlu çıkış hızımız olan 1070 m/s’ ye göre hesaplanan yanma oranının zaman bağlı değişimi verilmiştir. Grafikte Z oranının 1 ulaştığı noktadan sonra barut tamamen yandığı için daha sonrasında yapılan hesaplamalarda Z oranı sıfır alarak devam edilmiştir.

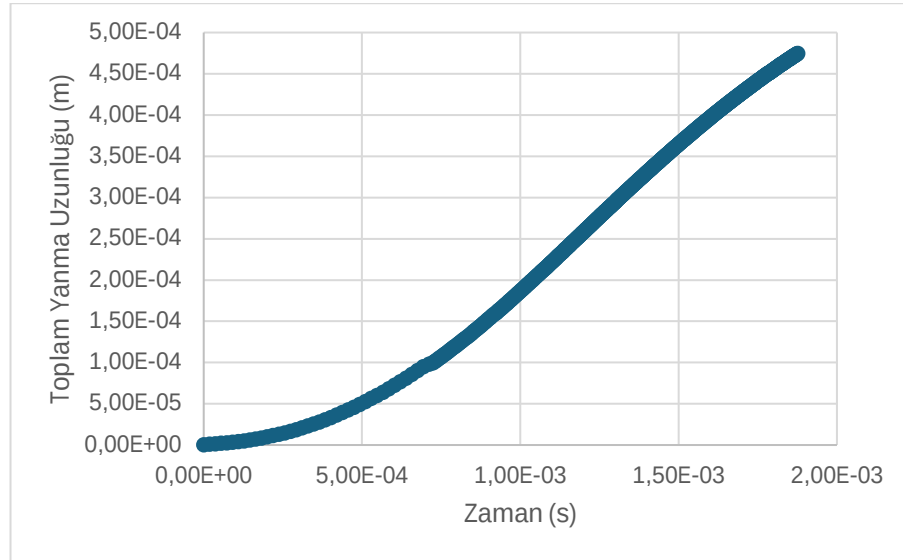


Şekil 4.9. Yanma uzunluğunun konuma bağlı olarak değişimi (ΔS ; belirli zaman aralıklarında yanan barut uzunluğunu göstermektedir.)

Şekil 4.9’da Δt_x ; her bir zaman adımı için geçen zamanı ifade etmektedir. Z oranı 1 olana kadar geçen zamanda her zaman adımı için ΔS ’ler ayrı ayrı hesaplanmıştır ve bu değerleri kullanarak ΔS_1 ’e gidilmiştir. ΔS_1 değerinin konum bağlı grafiği de Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Bu hesaplama yapılırken barut tanecik yapısı küresel olarak alınmıştır ve küre çapı 0,484 milimetredir.



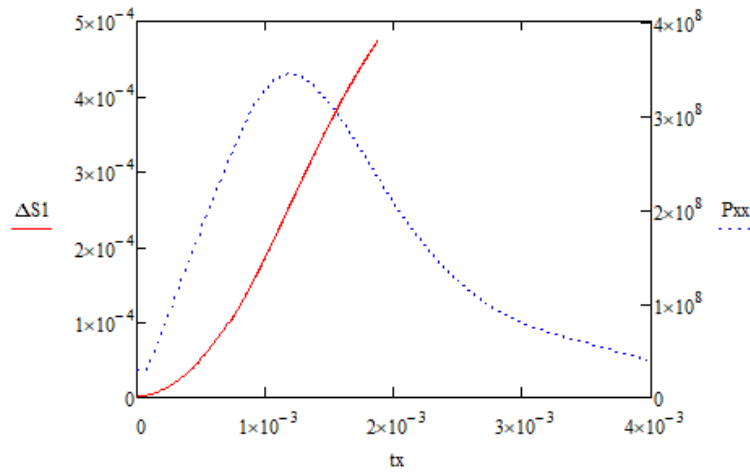
Şekil 4.10. Toplam yanma uzunluğunun konuma bağlı olarak değişimi



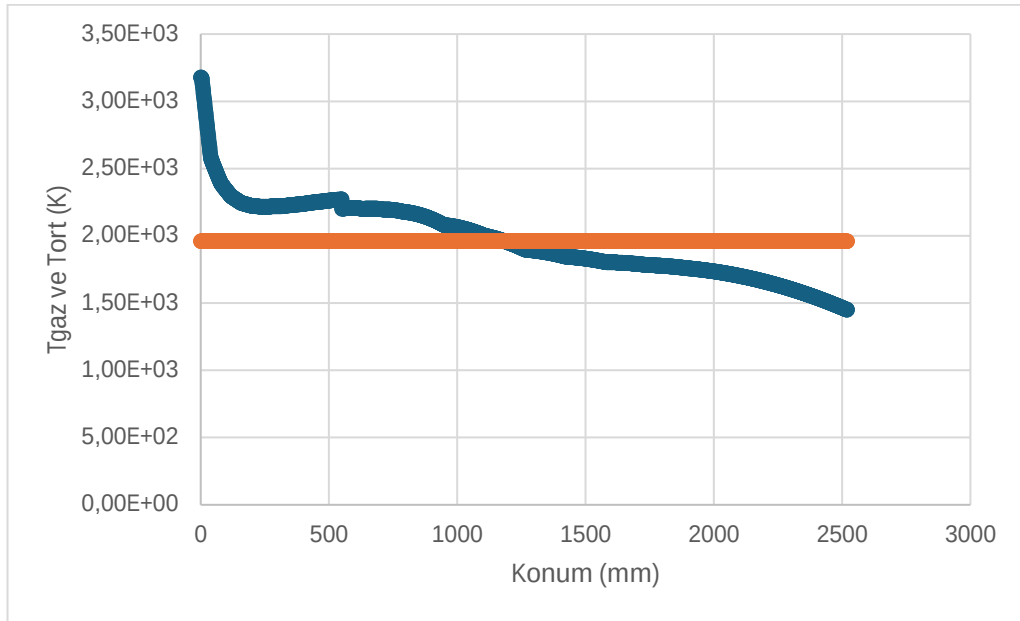
Şekil 4.11. Toplam yanma uzunluğunun zamana göre değişimi

Şekil 4.10 4.11 ve 4.12’ de bulunan grafikler, denklem çözümleri sonucu elde edilen yanma zamanının 2 milisaniyenin altında olduğunu göstermektedir. Hareket halindeki toplam yanma zamanı, Z’nin 1 olarak hesaplandığı nokta olacağı için Z

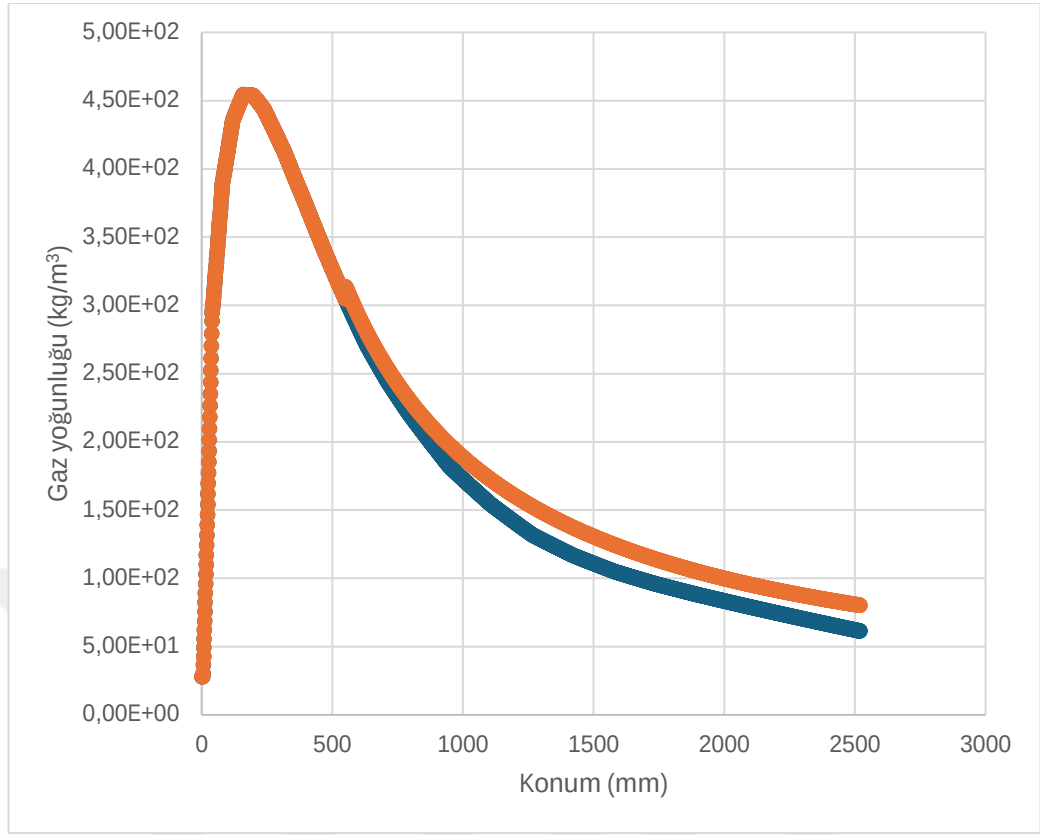
değerinin 1 olduğu konum 550 milimetredir. Bu da zaman tablosundan çekildiğinde tx_{550} değeri 1.876 milisaniye çıkmaktadır. Çekirdek harekete başlamadan önce gerçekleşen yanma zamanı $Z=0.027$ için $6,968 \times 10^{-2}$ milisaniyedir. Bu iki değer toplandığı zaman sonuç 1.945 milisaniye çıkmaktadır. Z değeri, namlunun her konumu için Denklem 3.52'ye göre hesaplandığında çıkan yanma zamanı 1.945 milisaniyedir. Hesaplanan yanma zamanının birbirine eşit olması durumu seçilen barut tane çapının doğru olduğunu göstermektedir.



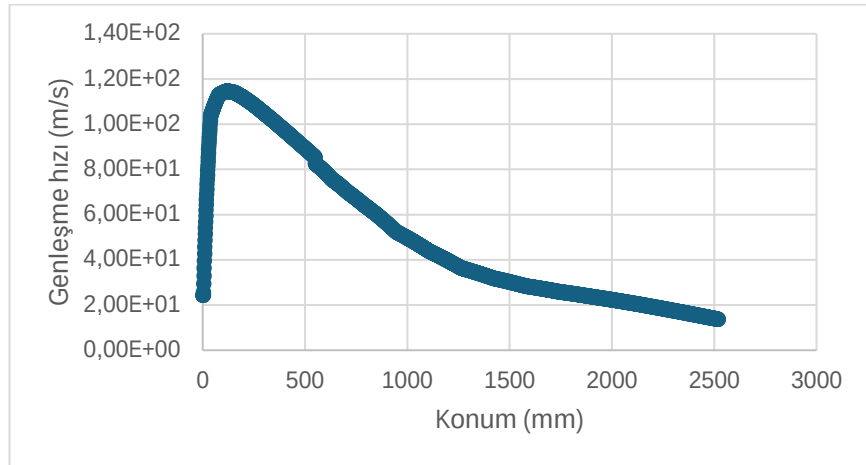
Şekil 4.12. Toplam yanma uzunluğunun ($\Delta S1$) zamana göre değişimi



Şekil 4.13. Namlu içi sıcaklık dağılımı (T_{gaz}) ve namlu içi ortalama sıcaklık (T_{ort})

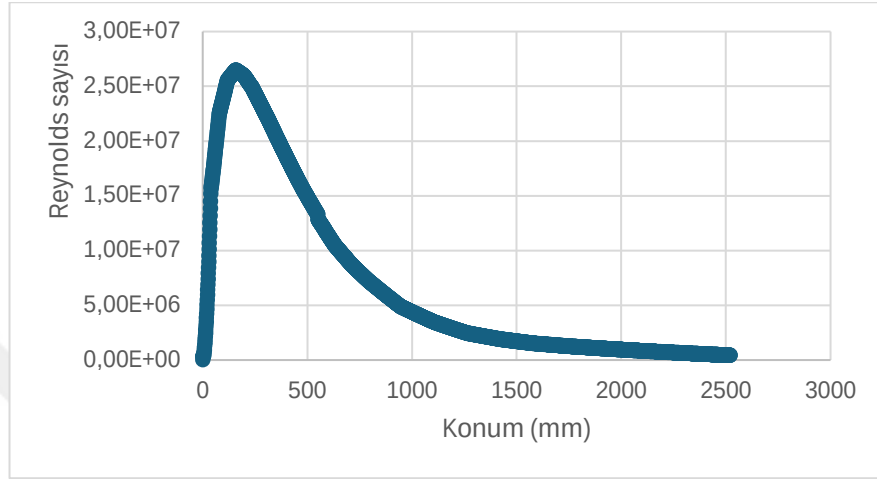


Şekil 4.14. İki farklı yöntemle hesaplanmış konuma bağlı gaz yoğunluğu

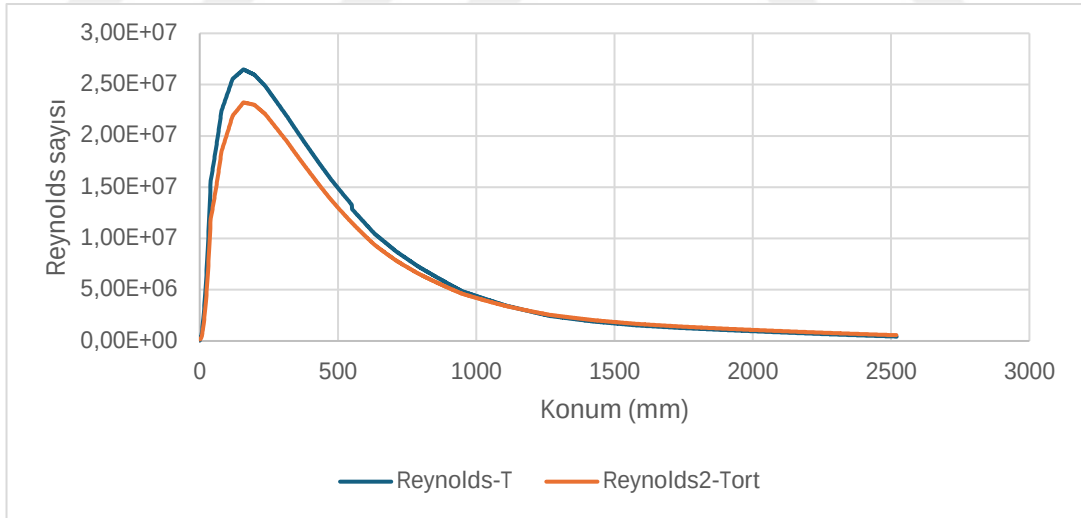


Şekil 4.15. Konuma bağlı barut genişleme hızı

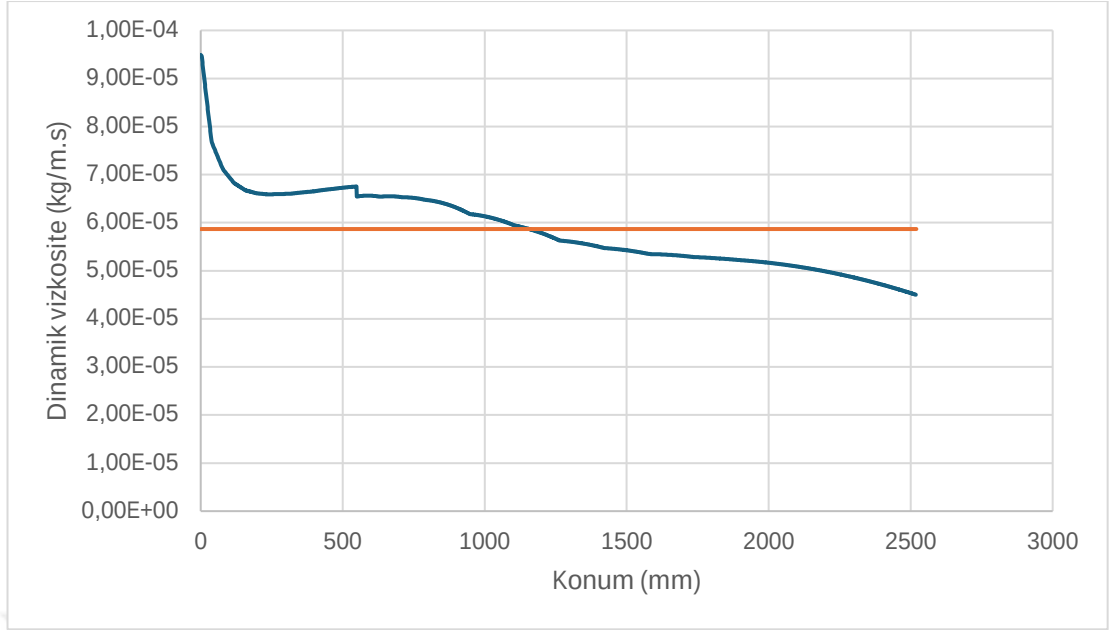
Şekil 4.13 namli içi konuma bağlı gaz sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil 4.14 ise iki farklı yöntemle hesaplanmış konuma bağlı gaz yoğunluğudur. Bu değerler kullanılarak gaz genişleme hızı (Şekil 4.15) ve konuma bağlı değişen sıcaklık değerine ve ortalama sıcaklık değerine göre hesaplanmış Reynolds sayısı Şekil 4.16 ve 4.17’ de gösterilmiştir.



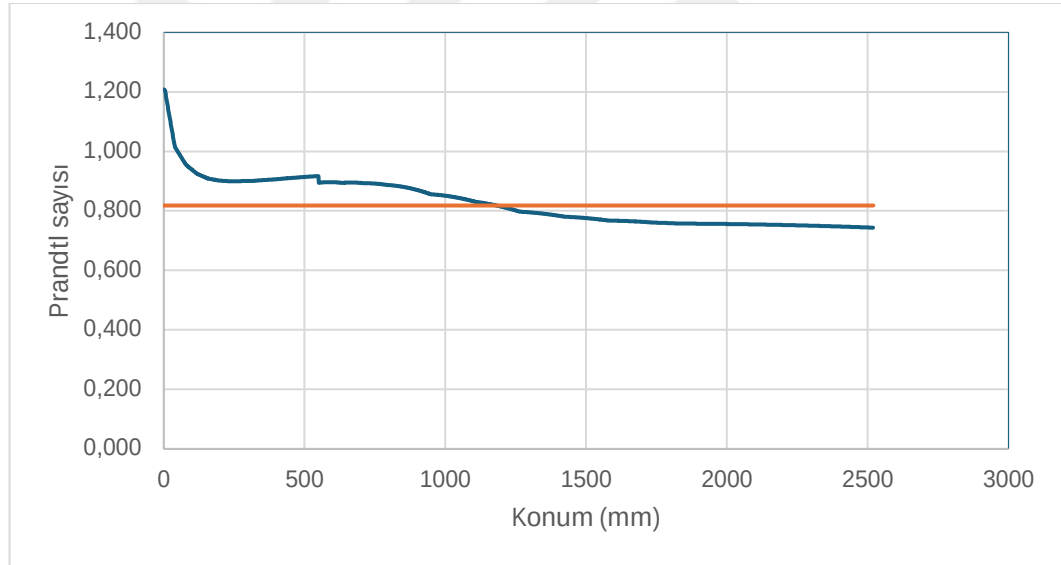
Şekil 4.16. Ortalama sıcaklığa göre hesaplanmış Reynolds sayısı



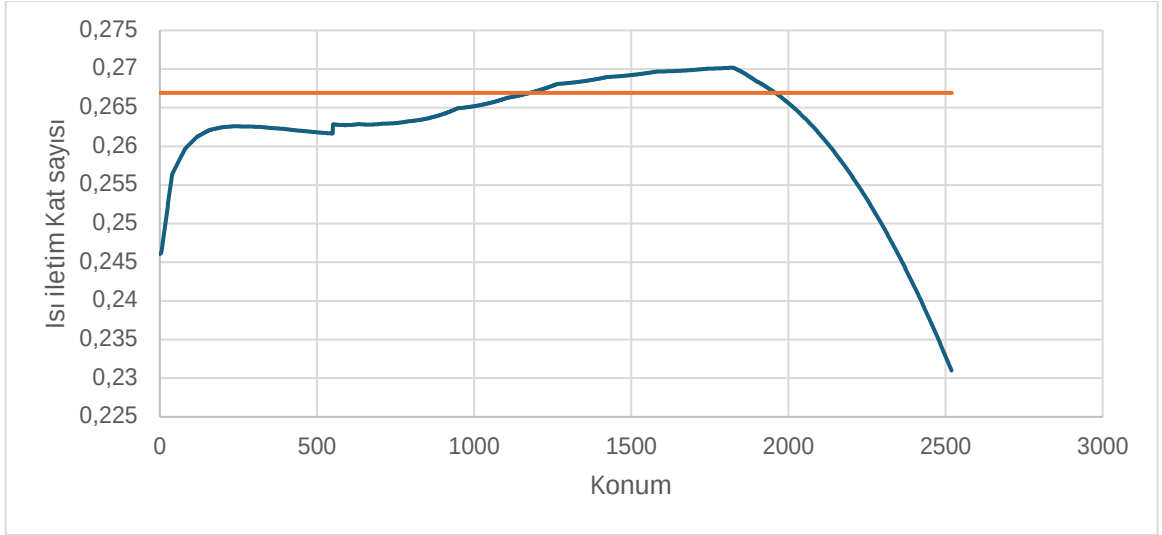
Şekil 4.17. Ortalama sıcaklığa ve değişen sıcaklığa göre hesaplanmış Reynolds sayısı



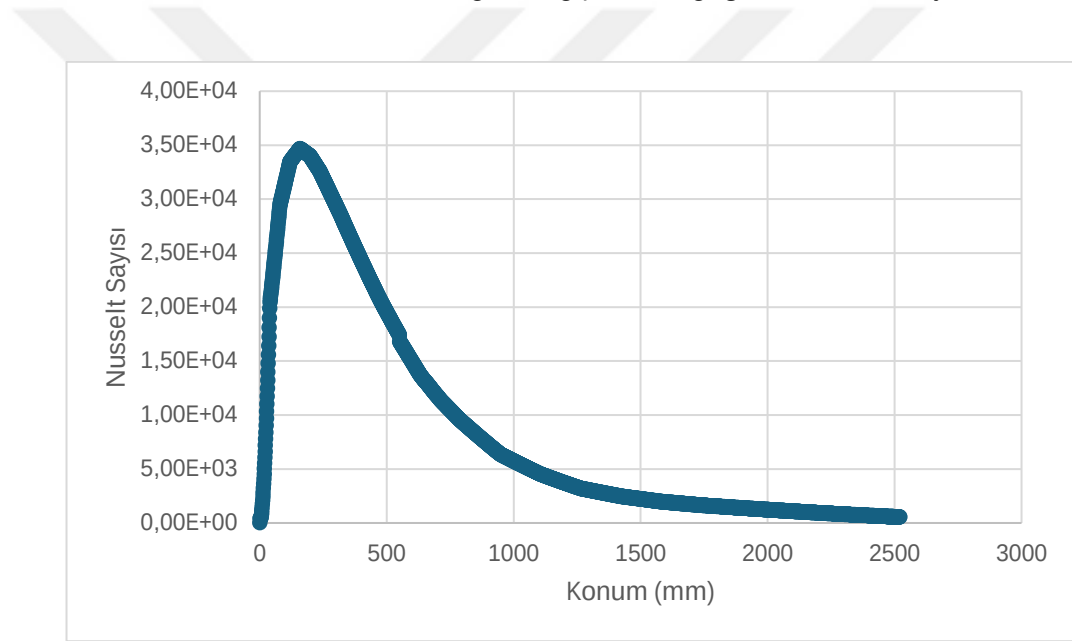
Şekil 4.18. Ortalama sıcaklığa ve değişen sıcaklığa göre dinamik viskozite



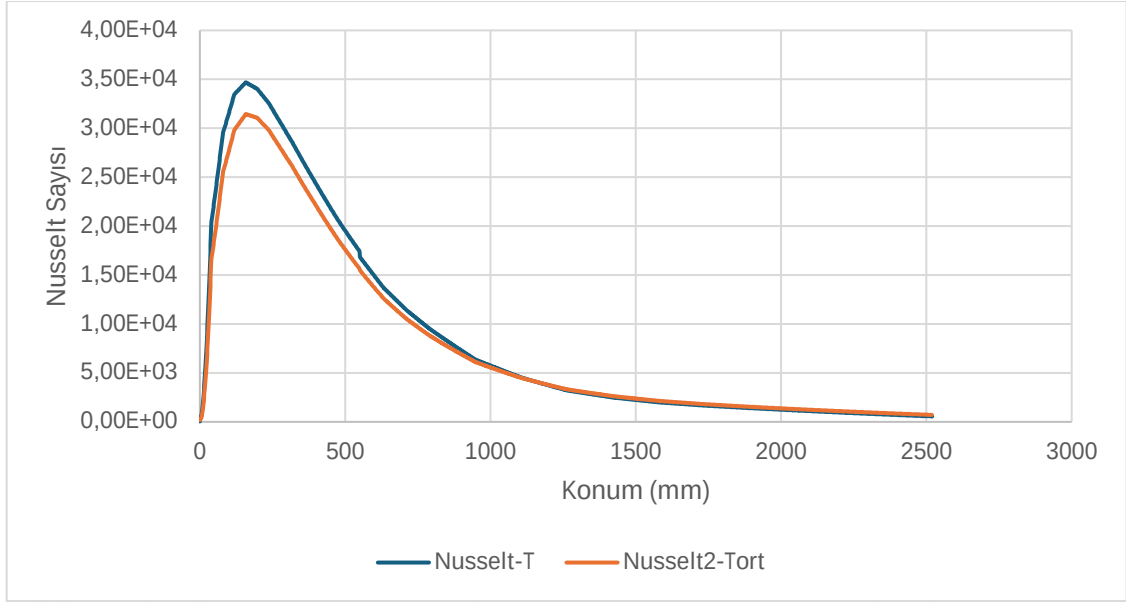
Şekil 4.19. Ortalama sıcaklığa ve değişen sıcaklığa göre Prandtl sayısı



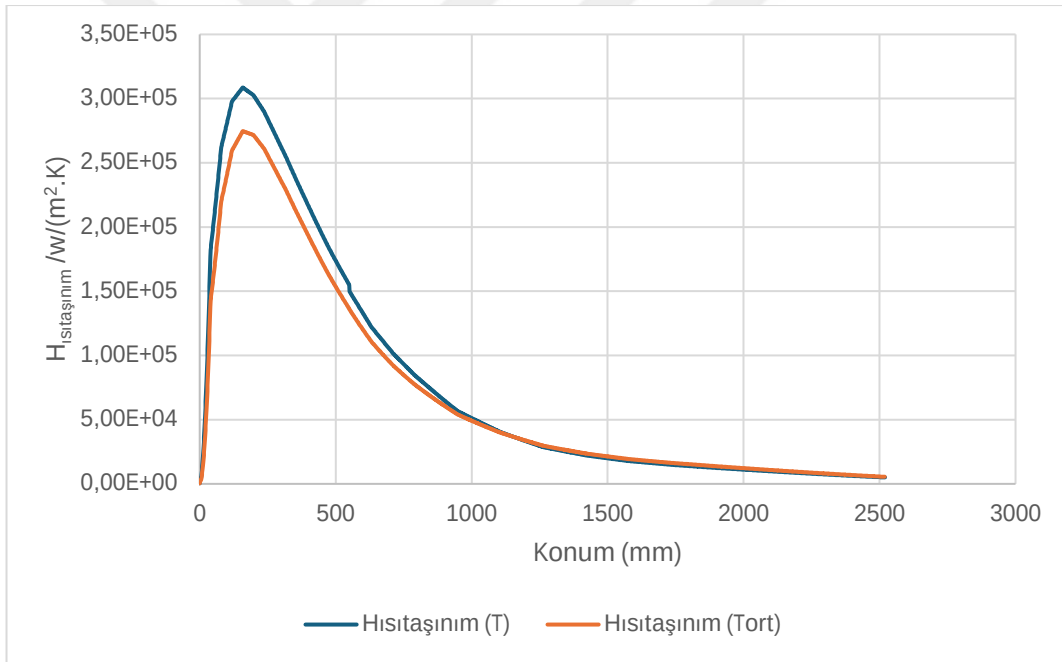
Şekil 4.20. Ortalama sıcaklığa ve değişen sıcaklığa göre ısı iletim katsayısı



Şekil 4.21. Ortalama sıcaklığa göre Nusselt sayısı



Şekil 4.22. Ortalama sıcaklığa ve değişen sıcaklığa göre Nusselt sayısı



Şekil 4.23. Ortalama ve değişen sıcaklığa göre ısı taşınım katsayısı

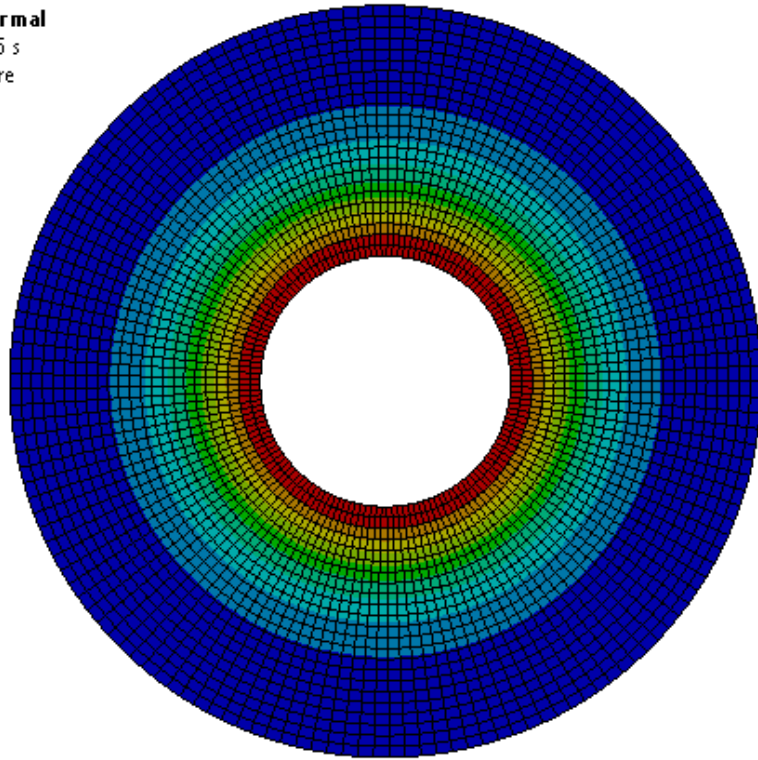
Şekil 4.18'den 4.22'ye kadar sırasıyla hesaplanan dinamik viskozite, Prandtl sayısı, ısı iletim katsayısı, Nusselt sayısı ve değişen sıcaklığa göre Nusselt sayısı grafikleri namı ile içi konuma bağlı gösterilmiştir. Değişen sıcaklığa ve ortalama sıcaklığa göre ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı iletim katsayısı Şekil 4.23' de gösterilmiştir. Hesaplamalar sonucunda çıkan değerlerin ortalamaları ile yapılan ısı transferi hesaplamalarında ortalama sıcaklığa göre enerji miktarı 1.221×10^5 joule olarak

elde edilmiştir. Değişen sıcaklığa göre hesaplanmış ısı taşınım katsayısı ile yapılan hesaplamalarda ise enerji değeri 1.113×10^5 joule olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, toplam barut enerjisi 6.785×10^5 joule olarak elde edilmiştir. Hesaplanan enerji değerleri barut enerjisine oranlandığında ısı kayıpları ortalama sıcaklığa göre %0.18, değişen sıcaklığa göre %0.164 olarak elde edilmektedir. Hesaplamalara başlarken namlu ısınmasına harcanacak enerji katsayısı $\theta=0.17$ olarak kabul edilmiştir. Bu değer küçük kalibre silahlarda 0.22, daha büyük, orta ve küçük kalibre silahlarda genellikle yakın ya da daha düşüktür. Bu durumda elde edilen oranın literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Tüm yapılan hesaplamalar sonrasında ANSYS Transient termal modülü ile ısı transferi hesaplamaları sayısal olarak çözülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi ile zamana bağlı olarak yapılan analiz sonuçları doğrultusunda değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

B: Transient Thermal
 Temperature - 7.5 s
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 7,5 s
 3.06.2024 14:36

36,011 Max
 34,336
 32,66
 30,985
 29,31
 27,634
 25,959
 24,284
 22,608
20,933 Min

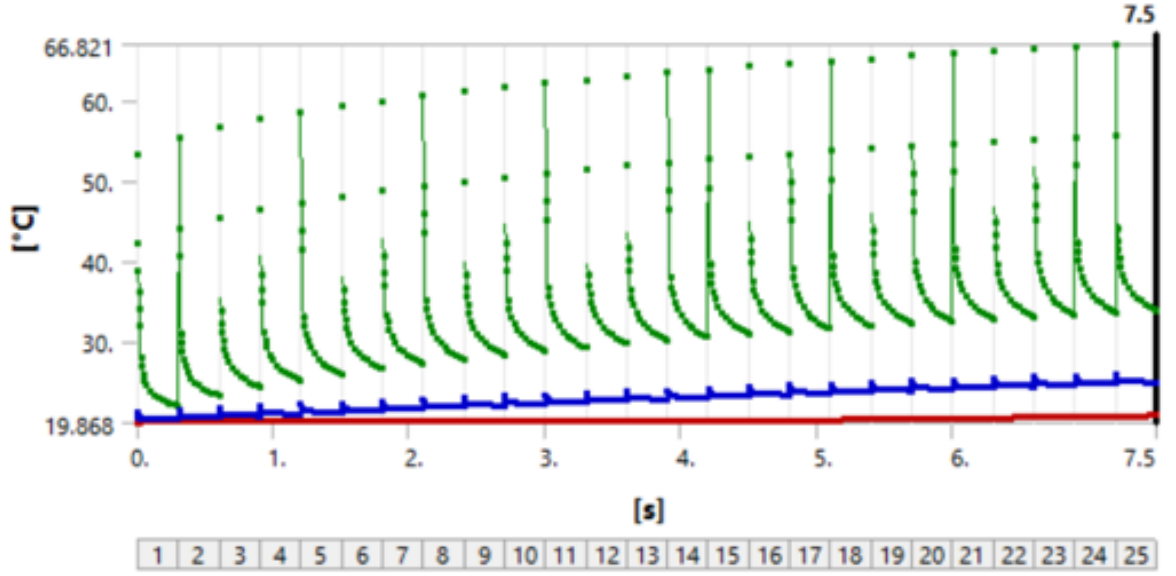


n n

Şekil 4.24. 7,5 Saniye sonra anlık namlu sıcaklık dağılımı

Şekil 4.24'te 7.5 s için yapılan analiz sonucunda namlu kesitinde sıcaklık dağılımı verilmiştir. Bu durum 25 atış sonrası çıkan sonuçları yansıttığı değerlendirildiğinde; namlunun dış sıcaklığı 20.933°C civarında iken namlu içi yüzey sıcaklığı 36.011°C olmaktadır. Yapılan analizlerde 7.5 s sonra namlu içi sıcaklığının 36.011°C olduğu

görülse de bu durum anlık olarak değerlendirilmektedir. Çünkü atış yapma işleminin durması halinde hızlı bir soğuma olacağı aşikardır.



Şekil 4.25. Zamana bağlı namlu sıcaklık değişimi (25 Atış)

Şekil 4.25’de 25 atış yapılması durumunda zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi verilmiştir. Isı akısı değeri ateşleme döngüsü içerisinde verildiğinde ani bir sıcaklık artışı olmasına rağmen atış döngüsü içerisinde diğer ateşlemeye kadar geçen sürede namlunun soğuduğu görülmektedir. Bu durumun analitik denklemler ile hesaplanması zor olsa da sonlu elamanlar analiz programı yardımı ile kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Namlu içi belirli sıcaklığa yükselse de başlangıç sıcaklığına kadar soğuma olmamaktadır. Bu durumda namlunun her atışta yavaş yavaş ısındığı görülmektedir.

B: Transient Thermal

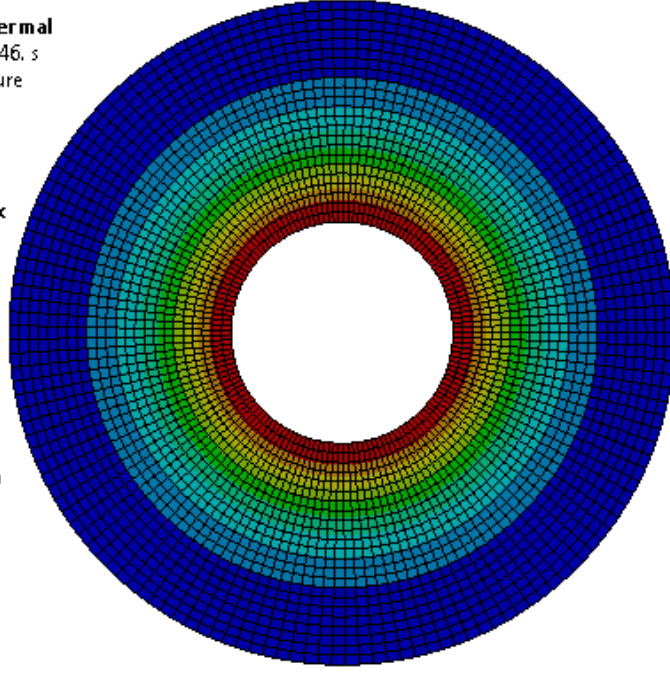
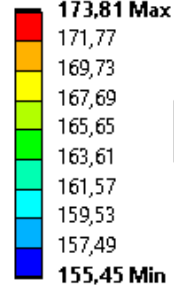
Temperature - 246. s

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 246 s

3.06.2024 14:49



Şekil 4.26. 246 Saniye sonra namlu anlık sıcaklık dağılımı

B: Transient Thermal

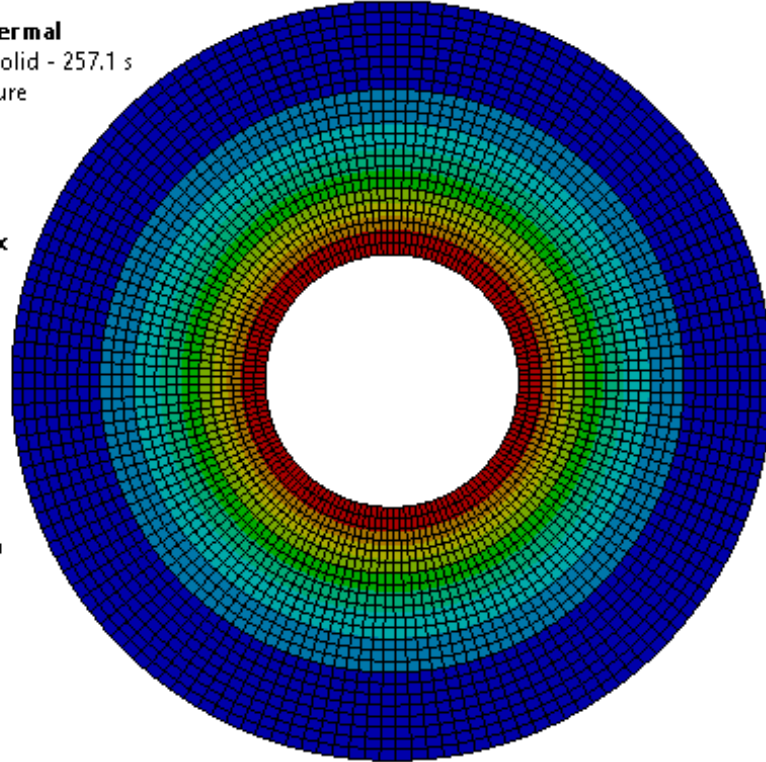
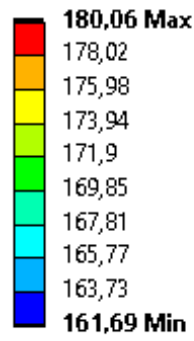
Temperature - Solid - 257.1 s

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 257,1 s

3.06.2024 14:51



Şekil 4.27. 257 Saniye sonra namlu anlık sıcaklık dağılımı

B: Transient Thermal

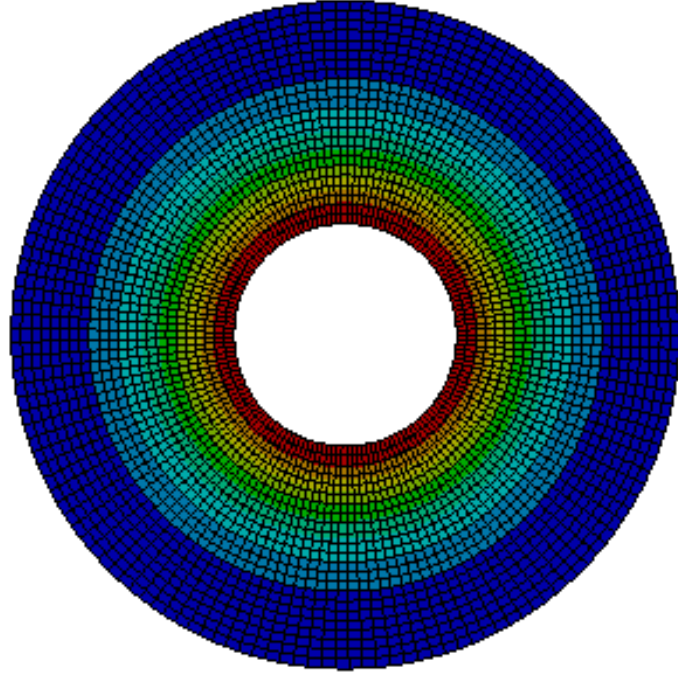
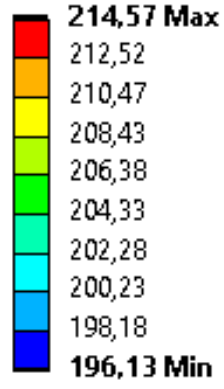
Temperature - 318,6 s

Type: Temperature

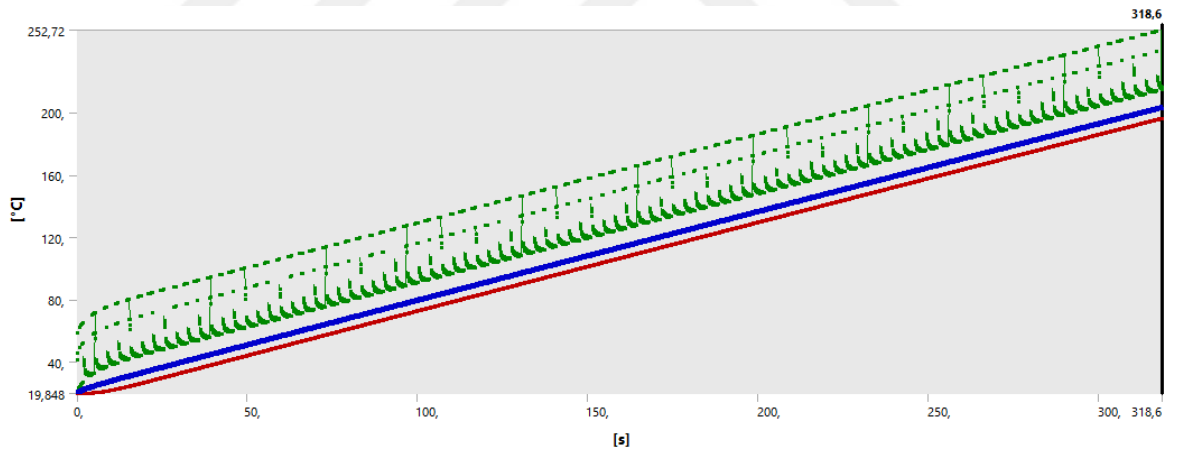
Unit: °C

Time: 318,6 s

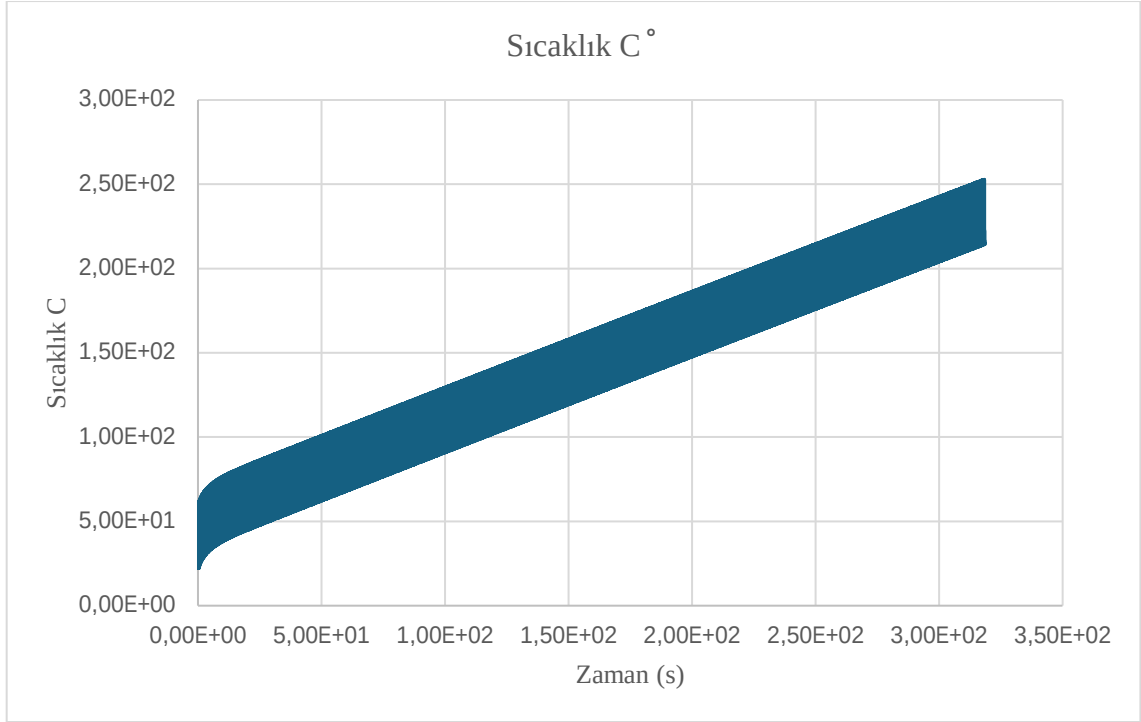
3.06.2024 14:51



Şekil 4.28. 318 Saniye sonra namlu anlık sıcaklık dağılımı



Şekil 4.29. Zamana bağlı namlu sıcaklık değişimi (318 s-1062 Atış)



Şekil 4.30. Zamana bağlı namlu sıcaklık değişimi (318 s-1062 Atış)

Şekil 4.28’de yaklaşık 1062 atışa denk gelen 318 s sonrasında namlu içi sıcaklığı dağılımı verilmiştir. Grafik incelendiğinde; 318 s sonra namlu iç sıcaklığı 214,57°C dereceye çıkmaktadır. Daha öncesinde barutun kendi kendine ateşleme sıcaklığı 180°C olduğu kabul edilmişti ve Lawton ‘un toplam kütle yaklaşımı ile hesaplanan kendi kendine ateşleme zamanı namlu malzemesini çelik olarak kabul edersek 210 saniye elde edilmişti. Analiz sonuçlarında ise namlu için sıcaklığının 180°C’ye gelmesi için geçen süre Şekil 4.28’de görüldüğü üzere 257 s olarak hesaplanmıştır. İki hesaplama yöntemleri arasındaki fark, yan yüzeylerin tam izole olması ve Lawton denklemlerinin de gerçek duruma göre bir yaklaşım sonucunu vermesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumdaki sıcaklık dağılımının tam olarak belirlenmesi için gerçek ortam şartlarında testlerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca ısı dağılımı incelenecek olursa iç sıcaklık artışı zamanla daha az olmaktadır. Çünkü namlu dışı sıcaklık arttıkça atmosfer sıcaklığı sabit kaldığı için her geçen zamanda namlu üzerinden atmosfere verilen ısı enerjisi artmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında Vallier hesaplama yöntemi kullanılarak namlu içi yanma sonrası zamana bağlı basınç, hız, sıcaklık ve konum değerleri hesaplanmıştır. Daha sonrasında elde edilen bilgilere bağlı olarak istenilen basınç ve namlu çıkış hızı şartları için gerekli olan barut tane geometrisi belirlenmiştir. Kullanılan denklemler için farklı girdilere bağlı olarak istenilen giriş değerleri otomatik hesaplanacak şekilde bir program yazılmıştır. Sonuç olarak namlu çıkış hızının değiştirilmesi ile barut ağırlığı tahmin edilmektedir. Ayrıca yeni girdiler için basınç, hız ve konum zaman bağlı olarak yeniden hesaplanmaktadır. Namlu boyunca elde edilen sıcaklık değerler için Nusselt sayısı ve dolayısıyla ısı transfer katsayı belirlenmiştir. Isı transfer katsayısına bağlı olarak namlunun ısınması için harcanan enerji bulunmuştur ve literatür ile bu değerler kıyaslanarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmalara ilaveten uzun namluya sahip silahlar için önem arz eden kendi kendine ateşleme zamanı Lawton 'un toplam kütle yaklaşımından hesaplanmıştır. Son olarak, M2 barutunun yanma denklemi oluşturularak M2 barutu için hesaplanan enerji değerleri AMCP' deki tablo değerleriyle karşılaştırılmıştır. Orta kalibre namlularda farklı çalışma şartlarında istenilen namlu çıkış hızlarının elde edilmesi için tahmin edilmesi zor olan barut tane geometrisi ve barut miktarını belirleyecek bir program yazılmıştır. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar literatürde kıyaslama amaçlı kullanılacak niteliktedir.

5.2 Öneriler

Tez çalışmasında, barut tane ölçüleri yanma zamanına göre Vallier denklemlerinden elde edilen basınç ve zaman değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. İstenilen atım sayısı, namlu ömrü, hedef mesafesi ve kalınlığı için hesaplamaları sürekli yenilemek yerine yerine bir optimizasyon çalışması yapılarak en iyi tasarım girdileri elde edilebilir. Girdiler belirlendikten sonra balistik hesapları ile namlu çıkış hızı hesaplanır ve böylece iç balistik ve yanma denklemlerine geçilebilir. En iyi sonuç veren barut tanecik yapılarından optimum barut ağırlığı da belirlenebilir. Daha sonra bu değerlere bağlı olarak namlu içi sıcaklık değerleri bulunur ve namlu kaplama çeşidi

belirlenmesine katkı sağlanabilir ve namlu ömrü hesaplanabilir. Bu çalışmalar neticesinde silah imalatı için büyük oranda ekonomik bir kazanım sağlanacaktır.

Bunlara ek olarak test sonuçları, barut özellikleri bilinen (alev sıcaklığı, tutuşma sıcaklığı, kimyasal yapısı vs.) ve tanecik yapısı incelenmiş herhangi bir kalibrede mühimmat ile hesaplamalar yapılarak atışlı testlerle sonuçlar doğrulanarak raporlanabilir.



KAYNAKLAR

- Akcaay, M. ve Yükselen, M. A., 2014, Unsteady thermal studies of gun barrels during the interior ballistic cycle with non-homogenous gun barrel material thermal characteristics, *J. Therm. Sci. Technol.*, 34 (2), 75-81.
- AMCP, -. 1973, SERIES, MILITARY PYROTECHNICS, ENGINEERING DESIGN HANDBOOK.
- Baran, D., 2018, Namlularda kendi kendine ateşleme süresinin belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Chen, M. M., 2010, High fidelity in-bore pressure modeling, *Proceedings.*
- Cronemberger, P., Lima Jr, E., Gois, J. ve Caldeira, A., 2014, Theoretical and experimental study of the interior ballistics of a rifle 7.62, *Revista de Engenharia Térmica*, 13 (2), 20-27.
- Danış, F., 2014, Development of interior ballistic simulation software, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 93.
- Degirmenci, E., 2015, Effects of grain size and temperature of double base solid propellants on internal ballistics performance, *Fuel*, 146, 95-102.
- Deng, S., Sun, H., Chiu, C.-J. ve Chen, K.-C., 2014, Transient finite element for in-bore analysis of 9 mm pistols, *Applied Mathematical Modelling*, 38 (9-10), 2673-2688.
- Elbe, R. E., 1975, External barrel temperature of the M16A1 rifle, *AD~ 4019649*
- Gerber, N. ve Bundy, M. L., 1991, Heating of a tank gun barrel: Numerical study, *AD-A241*, 136.
- Gezer, H. A., 2016, Barut tane geometrisinin silah iç balistiğine etkisinin incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi (Turkey).*
- Gündüzer, O., 2011, Namlu Cıdarı Boyutlandırılmasına İç Balistik Davranışın Etkisi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 149.
- Güngör, O., 2010, Metal matriks kompozit sarılmış namlu haznesi yapısal analizi ve çap optimizasyonu, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü* 82.
- Heiser, R., Seiler, F., Zimmermann, K. ve Zettler, G., 1970, Computational Methods and Measurements of Heat Transfer to the Barrel of a Hot Gas Accelerator Under High Pressure, *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 4.
- Işık, H., 2016, Namlu içerisindeki balistik parametrelerin modellenmesi, *Journal of Defense Sciences/Savunma Bilimleri Dergisi*, 15 (2).
- Işık, H. ve Göktaş, F., 2017, Cook-off analysis of a propellant in a 7.62 mm barrel by experimental and numerical methods, *Applied Thermal Engineering*, 112, 484-496.
- Keleş, O. E., 2019, Bir silahın menzilin artırılmasının analitik ve nümerik yöntemlerle araştırılması, *Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Kooker, D. E. ve Nelson, C. W., 1977, Numerical solution of three solid propellant combustion models during a gun pressure transient, *AD-A035250, BRL Report* (1953).
- Lawton, B., 2001a, Temperature and Heat Transfer at the Commencement of Rifling of a 155 mm Gun, *19th Internal Ballistics Symposium.*
- Lawton, B., 2001b, Thermo-chemical erosion in gun barrels, *Wear*, 251 (1-12), 827-838.
- Mishra, A., Hameed, A. ve Lawton, B., 2010, Transient thermal analyses of midwall cooling and external cooling methods for a gun barrel.
- Öztörün, D., 2013, Bir ağır silah namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile elastik-plastik gerilme analizi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*

- Öztürk, A. R., 1984, İç balistik, Ankara, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, MKE Kurumu Gn. Müdürlüğü, Özel yayınları, p.
- South, J. T. ve Carter, R. H., 2005, Thermal Analysis of an M256 120-mm Cannon, Army Research Laboratory, p.
- Sönmez, U., 2009, Obüs namlusu yanma odasında atış esnasında ortaya çıkan gerilmelerin matematiksel modellenmesi ve analizi, *Sakarya Üniversitesi (Turkey)*.
- STANAG4624, NATO Standardization Agreement (STANAG) on 30x173mm autocannon ammunition, STANAG 4624. . NATO STANAG.
- Şentürk, A., 2015, Namlu iç balistiği ve termo - mekanik analizi, Kara Harp Okulu Komutanlığı / Savunma Bilimleri Enstitüsü / Teknoloji Yönetimi Ana Bilim Dalı, 105.
- Şentürk, A., Işık, H. ve Evci, C., 2016, Thermo-mechanically coupled thermal and stress analysis of interior ballistics problem, *International Journal of Thermal Sciences*, 104, 39-53.
- Wu, B., Chen, G. ve Xia, W., 2008, Heat transfer in a 155 mm compound gun barrel with full length integral midwall cooling channels, *Applied Thermal Engineering*, 28 (8-9), 881-888.
- Yang, Y.-C., Lee, H.-L., Hsu, J.-C. ve Chu, S.-S., 2008, Thermal stresses in multilayer gun barrel with interlayer thermal contact resistance, *Journal of thermal stresses*, 31 (7), 624-637.
- Yılmaz, M. M., 2023, Investigation of Case-Chamber Interactions and Wall Thickness for A Gun Barrel, ANKARA YILDIRIM BEYAZIT UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES, 184.

EKLER

EK-1 HESAPLAMALAR

30 mm Orta Kalibre Top Balistik Hesapları MK264 (MPLD-T) Mühimmat ile

30x173mm Ammunition Family for MK44 Cannon				
				
Caliber	30x173mm	30x173mm	30x173mm	30x173mm
Type	TP-T	MPLD-T Incendiary	TP	HEI
Cartridge Length	290mm	290mm	290mm	290mm
Cartridge Weight	670g	835g	670g	670g
Projectile Weight	365g	363g	363g	363g
Propellant Weight	153g	150g	147g	147g
Case Length	173mm	173mm	173mm	173mm
Case Material	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum
Primer	M36A2 Percussion	M36A2 Percussion	M36A2 Percussion	M36A2 Percussion
Fuze	N/A	Chemical	N/A	M505
Muzzle Velocity (typical)	1080 m/sec	1070 m/sec	1020 m/sec	1020 m/sec
Chamber Pressure	345 MPa	345 MPa	375 MPa	375 MPa
Dispersion	0.5 Milliradians	0.5 Milliradians	0.6 x 0.6	0.6 x 0.6
Rate of Fire	100/200 rounds/minute	100/200 rounds/minute	4,200 rounds/min (variable)	4,200 rounds/min (variable)
Effective firing range (naval)	5,100m	5,100m	1,220m	1,220m
Applicable to use in weapons	MK44	MK44	GAU-8 & MK44	GAU-8 & MK44
Packing	Per US Govt. Approved TDP	Per US Govt. Approved TDP	Per US Govt. Approved TDP	Per US Govt. Approved TDP
Can	Metal - M592	Metal - M592	Metal - M592	Metal - M592
Rounds/Can	30 rounds/can	30 rounds/can	30 rounds/can	30 rounds/can
Cans/Pallet	24 cans/pallet	24 cans/pallet	24 cans/pallet	24 cans/pallet
Rounds/Pallet	720 rounds/pallet	720 rounds/pallet	720 rounds/pallet	720 rounds/pallet
Pallets/Container	13 pallets/container*	13 pallets/container*	13 pallets/container*	13 pallets/container*
Manufacturing Year	New Production	New Production	New Production	New Production

Kullanılacak mühimmat General Dynamicsin MK264 mühimmatının özelliklerine sahip bir mühimmat olduğu kabul edilecektir.Namlu ise MK44 namlu ölçüleri baz alınacaktır.

V0 ilk hız

Xe Namlu Boyu

Dn Namlu Çapı

Pmax namlu içerisinde ki maksimum basınç

Na namlu alanı

Bu değerler biliniyorsa namlu eksenini boyunca değişen gaz basıncı,memi hızı ve memi hareket denklemi zamana göre hesaplanabilir.

$M := 0.835 \cdot \text{kg}$	Mühimmat Kütlesi	
$M_p := 0.363 \cdot \text{kg}$	Mp Mermi Çekirdek Kütlesi	
$M_B := 0.150 \cdot \text{kg}$	MB Mermi Barut Kütlesi	
$X_e := 2520 \cdot \text{mm}$	Namlu yivli Kısım Uzunluğu	
$P_{\max} := 345 \cdot 10^6 \cdot \text{Pa}$	Namlu içi Maksimum Gaz Basıncı	
$V_0 := 1070 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Namlu çıkış Hızı	
$D_{\text{ndts}} := 90 \cdot \text{mm}$	Namlu dış Çap	
$D_n := 30 \cdot \text{mm}$	Hesaplamalarda kullanılacak namlu çapı	
$D_{\text{nyiv}} := 31.2 \cdot \text{mm}$	Namlu yiv çapı	Namlu Çapı set çapı ve yiv çapı olarak değişir ve alanı hesap ederken Yiv çapı Alınır

$$\text{Alan} := \frac{D_n^2}{4} \cdot \pi = 7.069 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{Port} := \left(\frac{M_p + 0.5 \cdot M_B}{2 \cdot X_e \cdot \text{Alan}} \right) \cdot V_0^2 = 1.408 \times 10^8 \cdot \text{Pa} \quad \eta_p := \frac{\text{Port}}{P_{\max}} = 0.408$$

$\eta(p)$	$\Sigma(\eta)$	$\theta(\eta)$	$\emptyset(\eta)$	$\pi(\eta)$	$\Gamma(\eta)$
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2000	0,2620	0,1500	0,3220	0,2740	0,7440
0,2500	0,0313	0,1390	0,3240	0,2160	0,7250
0,3000	0,0402	0,1720	0,3330	0,2420	0,7620
0,3500	0,0500	0,2070	0,3430	0,2780	0,8000
0,4000	0,0608	0,2440	0,3540	0,3040	0,8360
0,4500	0,0729	0,2840	0,3660	0,3400	0,8730
0,5000	0,0875	0,3260	0,3800	0,3820	0,9100
0,5500	0,1320	0,5600	0,4350	0,5010	1,1160
0,6000	0,1600	0,6420	0,4570	0,5410	1,1800
0,6500	0,1920	0,7340	0,4820	0,5850	1,2490
0,7000	0,2310	0,8350	0,5110	0,6350	1,3220
0,7500	0,2830	0,9580	0,5460	0,6970	1,4060
0,8000	0,3600	1,1150	0,5920	0,7790	1,5070

$$\Sigma\eta := \begin{cases} 0.0262 - \left[\frac{(0.20 - \eta_p) \cdot (0.0313 - 0.0262)}{(0.25 - 0.20)} \right] & \text{if } \eta_p < 0.2 \\ \frac{(\eta_p - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.0313 - 0.0262) + 0.0262 & \text{if } 0.2 \leq \eta_p < 0.25 \\ \frac{(\eta_p - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.0402 - 0.0313) + 0.0313 & \text{if } 0.25 \leq \eta_p < 0.30 \\ \frac{(\eta_p - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.050 - 0.0402) + 0.0402 & \text{if } 0.30 \leq \eta_p < 0.35 \\ \frac{(\eta_p - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.0608 - 0.050) + 0.050 & \text{if } 0.35 \leq \eta_p < 0.40 \\ \frac{(\eta_p - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.0729 - 0.0608) + 0.0608 & \text{if } 0.40 \leq \eta_p < 0.45 \\ \frac{(\eta_p - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.0875 - 0.0729) + 0.0729 & \text{if } 0.45 \leq \eta_p < 0.50 \\ \frac{(\eta_p - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.132 - 0.0875) + 0.0875 & \text{if } 0.50 \leq \eta_p < 0.55 \\ \frac{(\eta_p - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.160 - 0.132) + 0.132 & \text{if } 0.55 \leq \eta_p < 0.60 \\ \frac{(\eta_p - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.192 - 0.160) + 0.160 & \text{if } 0.60 \leq \eta_p < 0.65 \\ \frac{(\eta_p - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.231 - 0.192) + 0.192 & \text{if } 0.65 \leq \eta_p < 0.70 \\ \frac{(\eta_p - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.283 - 0.231) + 0.231 & \text{if } 0.70 \leq \eta_p < 0.75 \\ \frac{(\eta_p - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.36 - 0.283) + 0.283 & \text{if } 0.75 \leq \eta_p < 0.80 \\ \frac{(\eta_p - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.36 - 0.283) + 0.36 & \text{if } 0.80 \leq \eta_p \end{cases}$$

$$\theta_{\eta} := \begin{cases} 0.15 - \left[\frac{(0.20 - \eta_p) \cdot (0.139 - 0.15)}{(0.25 - 0.20)} \right] & \text{if } \eta_p < 0.2 \\ \frac{(\eta_p - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.139 - 0.15) + 0.15 & \text{if } 0.2 \leq \eta_p < 0.25 \\ \frac{(\eta_p - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.172 - 0.139) + 0.139 & \text{if } 0.25 \leq \eta_p < 0.30 \\ \frac{(\eta_p - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.207 - 0.172) + 0.172 & \text{if } 0.30 \leq \eta_p < 0.35 \\ \frac{(\eta_p - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.244 - 0.207) + 0.207 & \text{if } 0.35 \leq \eta_p < 0.40 \\ \frac{(\eta_p - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.288 - 0.244) + 0.244 & \text{if } 0.40 \leq \eta_p < 0.45 \\ \frac{(\eta_p - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.326 - 0.288) + 0.288 & \text{if } 0.45 \leq \eta_p < 0.50 \\ \frac{(\eta_p - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.560 - 0.326) + 0.326 & \text{if } 0.50 \leq \eta_p < 0.55 \\ \frac{(\eta_p - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.642 - 0.560) + 0.560 & \text{if } 0.55 \leq \eta_p < 0.60 \\ \frac{(\eta_p - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.734 - 0.642) + 0.642 & \text{if } 0.60 \leq \eta_p < 0.65 \\ \frac{(\eta_p - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.835 - 0.734) + 0.734 & \text{if } 0.65 \leq \eta_p < 0.70 \\ \frac{(\eta_p - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.958 - 0.835) + 0.835 & \text{if } 0.70 \leq \eta_p < 0.75 \\ \frac{(\eta_p - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (1.115 - 0.958) + 0.958 & \text{if } 0.75 \leq \eta_p < 0.80 \\ \frac{(\eta_p - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (1.115 - 0.958) + 1.115 & \text{if } 0.80 \leq \eta_p \end{cases}$$

$$\phi\eta := \begin{cases} 0.322 - \left[\frac{(0.20 - \eta p) \cdot (0.324 - 0.322)}{(0.25 - 0.20)} \right] & \text{if } \eta p < 0.2 \\ \frac{(\eta p - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.324 - 0.322) + 0.322 & \text{if } 0.2 \leq \eta p < 0.25 \\ \frac{(\eta p - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.333 - 0.324) + 0.324 & \text{if } 0.25 \leq \eta p < 0.30 \\ \frac{(\eta p - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.343 - 0.333) + 0.333 & \text{if } 0.30 \leq \eta p < 0.35 \\ \frac{(\eta p - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.354 - 0.343) + 0.343 & \text{if } 0.35 \leq \eta p < 0.40 \\ \frac{(\eta p - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.366 - 0.354) + 0.354 & \text{if } 0.40 \leq \eta p < 0.45 \\ \frac{(\eta p - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.38 - 0.366) + 0.366 & \text{if } 0.45 \leq \eta p < 0.50 \\ \frac{(\eta p - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.435 - 0.380) + 0.380 & \text{if } 0.50 \leq \eta p < 0.55 \\ \frac{(\eta p - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.457 - 0.435) + 0.435 & \text{if } 0.55 \leq \eta p < 0.60 \\ \frac{(\eta p - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.482 - 0.457) + 0.457 & \text{if } 0.60 \leq \eta p < 0.65 \\ \frac{(\eta p - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.511 - 0.482) + 0.482 & \text{if } 0.65 \leq \eta p < 0.70 \\ \frac{(\eta p - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.546 - 0.511) + 0.511 & \text{if } 0.70 \leq \eta p < 0.75 \\ \frac{(\eta p - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.592 - 0.546) + 0.546 & \text{if } 0.75 \leq \eta p < 0.80 \\ \frac{(\eta p - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.592 - 0.546) + 0.592 & \text{if } 0.80 \leq \eta p \end{cases}$$

$$\pi_{\eta} := \begin{cases} 0.274 - \left[\frac{(0.20 - \eta p) \cdot (0.216 - 0.274)}{(0.25 - 0.20)} \right] & \text{if } \eta p < 0.2 \\ \frac{(\eta p - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.216 - 0.274) + 0.274 & \text{if } 0.2 \leq \eta p < 0.25 \\ \frac{(\eta p - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.242 - 0.216) + 0.216 & \text{if } 0.25 \leq \eta p < 0.30 \\ \frac{(\eta p - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.278 - 0.242) + 0.242 & \text{if } 0.30 \leq \eta p < 0.35 \\ \frac{(\eta p - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.304 - 0.278) + 0.278 & \text{if } 0.35 \leq \eta p < 0.40 \\ \frac{(\eta p - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.340 - 0.304) + 0.304 & \text{if } 0.40 \leq \eta p < 0.45 \\ \frac{(\eta p - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.382 - 0.340) + 0.340 & \text{if } 0.45 \leq \eta p < 0.50 \\ \frac{(\eta p - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.501 - 0.382) + 0.382 & \text{if } 0.50 \leq \eta p < 0.55 \\ \frac{(\eta p - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.541 - 0.501) + 0.501 & \text{if } 0.55 \leq \eta p < 0.60 \\ \frac{(\eta p - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.585 - 0.541) + 0.541 & \text{if } 0.60 \leq \eta p < 0.65 \\ \frac{(\eta p - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.635 - 0.585) + 0.585 & \text{if } 0.65 \leq \eta p < 0.70 \\ \frac{(\eta p - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.697 - 0.635) + 0.635 & \text{if } 0.70 \leq \eta p < 0.75 \\ \frac{(\eta p - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.779 - 0.697) + 0.697 & \text{if } 0.75 \leq \eta p < 0.80 \\ \frac{(\eta p - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.779 - 0.697) + 0.779 & \text{if } 0.80 \leq \eta p \end{cases}$$

$$T\eta := \begin{cases} 0.744 - \left[\frac{(0.20 - \eta p) \cdot (0.725 - 0.744)}{(0.25 - 0.20)} \right] & \text{if } \eta p < 0.2 \\ \frac{(\eta p - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.725 - 0.744) + 0.744 & \text{if } 0.2 \leq \eta p < 0.25 \\ \frac{(\eta p - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.762 - 0.725) + 0.725 & \text{if } 0.25 \leq \eta p < 0.30 \\ \frac{(\eta p - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.80 - 0.762) + 0.762 & \text{if } 0.30 \leq \eta p < 0.35 \\ \frac{(\eta p - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.836 - 0.80) + 0.80 & \text{if } 0.35 \leq \eta p < 0.40 \\ \frac{(\eta p - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.873 - 0.836) + 0.836 & \text{if } 0.40 \leq \eta p < 0.45 \\ \frac{(\eta p - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.910 - 0.873) + 0.873 & \text{if } 0.45 \leq \eta p < 0.50 \\ \frac{(\eta p - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (1.116 - 0.910) + 0.910 & \text{if } 0.50 \leq \eta p < 0.55 \\ \frac{(\eta p - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (1.180 - 1.116) + 1.116 & \text{if } 0.55 \leq \eta p < 0.60 \\ \frac{(\eta p - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (1.249 - 1.180) + 1.180 & \text{if } 0.60 \leq \eta p < 0.65 \\ \frac{(\eta p - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (1.322 - 1.249) + 1.249 & \text{if } 0.65 \leq \eta p < 0.70 \\ \frac{(\eta p - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (1.406 - 1.322) + 1.322 & \text{if } 0.70 \leq \eta p < 0.75 \\ \frac{(\eta p - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (1.507 - 1.406) + 1.406 & \text{if } 0.75 \leq \eta p < 0.80 \\ \frac{(\eta p - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (1.507 - 1.406) + 1.507 & \text{if } 0.80 \leq \eta p \end{cases}$$

$$\phi\eta = 0.356 \quad \pi\eta = 0.31 \quad T\eta = 0.842$$

$$\Sigma\eta = 0.063 \quad \theta\eta = 0.251$$

Xmax gaz basıncının maksimum olduğu anda merminin namlu içinde almış olduğu yol.

$$X_{\max} := X_e - \Sigma\eta = 0.158 \text{ m}$$

t1 Gaz basıncının maksimum olduğu anda ilk hareketten itibaren geçen zaman denklemi
 $t1 = (2 \cdot X_e / V_0) \cdot \theta\eta$

$$t1 := \frac{2 \cdot X_e}{V_0} \cdot \theta\eta = 1.182 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Gaz basıncının maksimum olduğu anda merminin hızı V1 $V1 = V_0 \cdot \phi\eta$

$$V1 := V0 \cdot \phi\eta = 380.834 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Namlu ağızındaki gaz basınç denklemi $Pe = Port \cdot \pi\eta$

$$Pe := Port \cdot \pi\eta = 4.36 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Namlu içinde toplam mermi yolu için geçen zaman ise
 $te = 2 \cdot Xe \cdot T\eta / V\zeta$

$$te := 2 \cdot \frac{Xe}{V0} \cdot T\eta = 3.966 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$\lambda = x/x_1$	$\psi(\lambda)$	$\phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$		$\lambda = x/x_1$	$\psi(\lambda)$	$\phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
0,000	0,000	0,000	0,000		7,000	0,338	2,363	2,163
0,250	0,741	0,392	0,610		8,000	0,284	2,445	2,309
0,500	0,912	0,635	0,780		9,000	0,248	2,509	2,451
0,750	0,980	0,834	0,903		10,000	0,220	2,566	2,589
1,000	1,000	1,000	1,000		11,000	0,199	2,615	2,725
1,250	0,989	1,140	1,081		12,000	0,181	2,659	2,858
1,500	0,965	1,262	1,154		13,000	0,164	2,702	2,988
1,750	0,932	1,366	1,219		14,000	0,150	2,740	3,116
2,000	0,898	1,468	1,282		15,000	0,137	2,777	3,253
2,500	0,823	1,632	1,394		16,000	0,125	2,811	3,390
3,000	0,747	1,763	1,495		17,000	0,117	2,837	3,502
3,500	0,675	1,875	1,589		18,000	0,109	2,862	3,618
4,000	0,604	1,983	1,682		19,000	0,102	2,887	3,740
4,500	0,546	2,068	1,769		20,000	0,096	2,910	3,861
5,000	0,495	2,140	1,851		25,000	0,073	3,003	4,455
6,000	0,403	2,269	2,012		30,000	0,058	3,075	5,031

Namlunun mermi konumuna göre basınç, hız, zaman değerlerini bulmak için vallier-haydenrich Talo2 değerlerini kullanınız. Bu noktada namluyu belirli ölçülerde aralıklara bölerek sadece herhangi bir konumda olan basıncı değil aynı zamanda namluyu kaç eşit parçaya bölersek her birim bölüm için değerleri bularak grafikleri daha ayrıntılı çizdirebiliriz. Bu noktada Sayıcı isminde atadığımız değişken namluyu kaç eşit parçaya böldüğümüzü göstermektedir. Namlu uzunluğumuz 2520 mm olduğuna göre 2520 eşit parçaya bölersek namluyu her milimetre için hesapları yapmış oluruz.

$$a := 1 \text{ mm} \quad X_{\max} = 0.158 \text{ m} \quad \text{Sayıcı} := Xe \cdot \frac{1}{\text{mm}} = 2.52 \times 10^3$$

$X :=$

for $i \in 0.. \text{Sayı1}$
$C_i \leftarrow i \cdot a$
C

$\lambda := \frac{X}{X_{\max}} =$

	0
0	0
1	$6.325 \cdot 10^{-3}$
2	...

$X =$

	0
0	0
1	$1 \cdot 10^{-3}$
2	...

 m

$\psi\lambda :=$

$W \leftarrow 0$
for $i \in 0.. \text{Sayı1}$
$W \leftarrow \frac{0.741 \cdot \lambda_i}{0.25}$ if $\lambda_i \leq 0.25$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 0.25)}{(0.50 - 0.25)} \cdot (0.912 - 0.741) + 0.741$ if $0.25 \leq \lambda_i < 0.50$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 0.50)}{(0.75 - 0.50)} \cdot (0.980 - 0.912) + 0.912$ if $0.50 \leq \lambda_i < 0.75$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 0.75)}{(1.00 - 0.75)} \cdot (1 - 0.980) + 0.980$ if $0.75 \leq \lambda_i < 1$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 1.00)}{(1.25 - 1.00)} \cdot (0.989 - 1.00) + 1.00$ if $1 \leq \lambda_i < 1.25$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 1.25)}{(1.50 - 1.25)} \cdot (0.965 - 0.989) + 0.989$ if $1.25 \leq \lambda_i < 1.50$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 1.50)}{(1.75 - 1.50)} \cdot (0.932 - 0.965) + 0.965$ if $1.50 \leq \lambda_i < 1.75$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 1.75)}{(2.00 - 1.75)} \cdot (0.898 - 0.932) + 0.932$ if $1.75 \leq \lambda_i < 2$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 2.00)}{(2.50 - 2.00)} \cdot (0.823 - 0.898) + 0.898$ if $2 \leq \lambda_i < 2.5$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 2.50)}{(3 - 2.5)} \cdot (0.747 - 0.823) + 0.823$ if $2.5 \leq \lambda_i < 3$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 3)}{(3.50 - 3)} \cdot (0.675 - 0.747) + 0.747$ if $3 \leq \lambda_i < 3.5$
$W \leftarrow \frac{(\lambda_i - 3.50)}{(4 - 3.50)} \cdot (0.604 - 0.675) + 0.675$ if $3.5 \leq \lambda_i < 4$

$$\begin{aligned}
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 4)}{(4.50 - 4)} \cdot (0.546 - 0.604) + 0.604 \quad \text{if } 4 \leq \lambda_1 < 4.5 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 4.50)}{(5.0 - 4.50)} \cdot (0.495 - 0.546) + 0.546 \quad \text{if } 4.5 \leq \lambda_1 < 5 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 5)}{(6 - 5)} \cdot (0.403 - 0.495) + 0.495 \quad \text{if } 5 \leq \lambda_1 < 6 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 6)}{(7 - 6)} \cdot (0.338 - 0.403) + 0.403 \quad \text{if } 6 \leq \lambda_1 < 7 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 7)}{(8 - 7)} \cdot (0.284 - 0.338) + 0.338 \quad \text{if } 7 \leq \lambda_1 < 8 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 8)}{(9 - 8)} \cdot (0.248 - 0.284) + 0.284 \quad \text{if } 8 \leq \lambda_1 < 9 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 9)}{(10 - 9)} \cdot (0.220 - 0.248) + 0.248 \quad \text{if } 9 \leq \lambda_1 < 10 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 10)}{(11 - 10)} \cdot (0.199 - 0.220) + 0.220 \quad \text{if } 10 \leq \lambda_1 < 11 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 11)}{(12 - 11)} \cdot (0.181 - 0.199) + 0.199 \quad \text{if } 11 \leq \lambda_1 < 12 \\
W &\leftarrow \frac{(\lambda_1 - 12)}{(13 - 12)} \cdot (0.164 - 0.181) + 0.181 \quad \text{if } 12 \leq \lambda_1 < 13 \\
W &\leftarrow (\lambda_1 - 13) \cdot (0.164 - 0.181) + 0.164 \quad \text{if } 13 \leq \lambda_1 \\
C_i &\leftarrow W
\end{aligned}$$

C

```

 $\delta\lambda :=$  |  $W \leftarrow 0$ 
          | for  $i \in 0 \dots \text{Sayıci}$ 
          |    $W \leftarrow \frac{0.610 \cdot \lambda_1}{0.25}$  if  $\lambda_1 \leq 0.25$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 0.25)}{(0.50 - 0.25)} \cdot (0.780 - 0.610) + 0.610$  if  $0.25 \leq \lambda_1 < 0.50$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 0.50)}{(0.75 - 0.50)} \cdot (0.903 - 0.780) + 0.780$  if  $0.50 \leq \lambda_1 < 0.75$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 0.75)}{(1.00 - 0.75)} \cdot (1 - 0.903) + 0.903$  if  $0.75 \leq \lambda_1 < 1$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 1.00)}{(1.25 - 1.00)} \cdot (1.081 - 1.00) + 1.00$  if  $1 \leq \lambda_1 < 1.25$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 1.25)}{(1.50 - 1.25)} \cdot (1.154 - 1.081) + 1.081$  if  $1.25 \leq \lambda_1 < 1.50$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 1.50)}{(1.75 - 1.50)} \cdot (1.219 - 1.154) + 1.154$  if  $1.50 \leq \lambda_1 < 1.75$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 1.75)}{(2.00 - 1.75)} \cdot (1.282 - 1.219) + 1.219$  if  $1.75 \leq \lambda_1 < 2$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 2.00)}{(2.50 - 2.00)} \cdot (1.394 - 1.282) + 1.282$  if  $2 \leq \lambda_1 < 2.5$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 2.50)}{(3 - 2.5)} \cdot (1.495 - 1.394) + 1.394$  if  $2.5 \leq \lambda_1 < 3$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 3)}{(3.50 - 3)} \cdot (1.589 - 1.495) + 1.495$  if  $3 \leq \lambda_1 < 3.5$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 3.50)}{(4 - 3.50)} \cdot (1.682 - 1.589) + 1.589$  if  $3.5 \leq \lambda_1 < 4$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 4)}{(4.50 - 4)} \cdot (1.769 - 1.682) + 1.682$  if  $4 \leq \lambda_1 < 4.5$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 4.50)}{(5.0 - 4.50)} \cdot (1.851 - 1.769) + 1.769$  if  $4.5 \leq \lambda_1 < 5$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 5)}{(6 - 5)} \cdot (2.012 - 1.851) + 1.851$  if  $5 \leq \lambda_1 < 6$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 6)}{(7 - 6)} \cdot (2.163 - 2.012) + 2.012$  if  $6 \leq \lambda_1 < 7$ 
          |    $W \leftarrow \frac{(\lambda_1 - 7)}{(8 - 7)} \cdot (2.309 - 2.163) + 2.163$  if  $7 \leq \lambda_1 < 8$ 
          |    $(\lambda_i - 8)$ 

```

```

W ←  $\frac{\lambda_i - 8}{(9 - 8)} \cdot (2.451 - 2.309) + 2.309$  if  $8 \leq \lambda_i < 9$ 
W ←  $\frac{(\lambda_i - 9)}{(10 - 9)} \cdot (2.589 - 2.451) + 2.451$  if  $9 \leq \lambda_i < 10$ 
W ←  $\frac{(\lambda_i - 10)}{(11 - 10)} \cdot (2.725 - 2.589) + 2.589$  if  $10 \leq \lambda_i < 11$ 
W ←  $\frac{(\lambda_i - 11)}{(12 - 11)} \cdot (2.858 - 2.725) + 2.725$  if  $11 \leq \lambda_i < 12$ 
W ←  $\frac{(\lambda_i - 12)}{(13 - 12)} \cdot (2.988 - 2.858) + 2.858$  if  $12 \leq \lambda_i < 13$ 
W ←  $(\lambda_i - 13) \cdot (2.988 - 2.858) + 2.988$  if  $13 \leq \lambda_i$ 
Ci ← W
C

```

```

φλ := W ← 0
for i ∈ 0 .. Sayıci
    W ←  $\frac{0.392 \cdot \lambda_i}{0.25}$  if  $\lambda_i \leq 0.25$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 0.25)}{(0.50 - 0.25)} \cdot (0.635 - 0.392) + 0.392$  if  $0.25 \leq \lambda_i < 0.50$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 0.50)}{(0.75 - 0.50)} \cdot (0.834 - 0.635) + 0.635$  if  $0.50 \leq \lambda_i < 0.75$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 0.75)}{(1.00 - 0.75)} \cdot (1 - 0.834) + 0.834$  if  $0.75 \leq \lambda_i < 1$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 1.00)}{(1.25 - 1.00)} \cdot (1.14 - 1.00) + 1.00$  if  $1 \leq \lambda_i < 1.25$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 1.25)}{(1.50 - 1.25)} \cdot (1.262 - 1.14) + 1.14$  if  $1.25 \leq \lambda_i < 1.50$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 1.50)}{(1.75 - 1.50)} \cdot (1.366 - 1.262) + 1.262$  if  $1.50 \leq \lambda_i < 1.75$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 1.75)}{(2.00 - 1.75)} \cdot (1.468 - 1.366) + 1.366$  if  $1.75 \leq \lambda_i < 2$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 2.00)}{(2.50 - 2.00)} \cdot (1.632 - 1.468) + 1.468$  if  $2 \leq \lambda_i < 2.5$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 2.50)}{(3 - 2.5)} \cdot (1.763 - 1.632) + 1.632$  if  $2.5 \leq \lambda_i < 3$ 
    W ←  $\frac{(\lambda_i - 3)}{(3.5 - 3)} \cdot (1.875 - 1.763) + 1.763$  if  $3 \leq \lambda_i < 3.5$ 

```

$$\begin{aligned}
 & \dots (3.50 - 3) \dots \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 3.50)}{(4 - 3.50)} \cdot (1.983 - 1.875) + 1.875 \quad \text{if } 3.5 \leq \lambda_i < 4 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 4)}{(4.50 - 4)} \cdot (2.068 - 1.983) + 1.983 \quad \text{if } 4 \leq \lambda_i < 4.5 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 4.50)}{(5.0 - 4.50)} \cdot (2.14 - 2.068) + 2.068 \quad \text{if } 4.5 \leq \lambda_i < 5 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 5)}{(6 - 5)} \cdot (2.269 - 2.14) + 2.14 \quad \text{if } 5 \leq \lambda_i < 6 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 6)}{(7 - 6)} \cdot (2.363 - 2.269) + 2.269 \quad \text{if } 6 \leq \lambda_i < 7 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 7)}{(8 - 7)} \cdot (2.445 - 2.363) + 2.363 \quad \text{if } 7 \leq \lambda_i < 8 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 8)}{(9 - 8)} \cdot (2.509 - 2.445) + 2.445 \quad \text{if } 8 \leq \lambda_i < 9 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 9)}{(10 - 9)} \cdot (2.566 - 2.509) + 2.509 \quad \text{if } 9 \leq \lambda_i < 10 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 10)}{(11 - 10)} \cdot (2.615 - 2.566) + 2.566 \quad \text{if } 10 \leq \lambda_i < 11 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 11)}{(12 - 11)} \cdot (2.659 - 2.615) + 2.615 \quad \text{if } 11 \leq \lambda_i < 12 \\
 W & \leftarrow \frac{(\lambda_i - 12)}{(13 - 12)} \cdot (2.702 - 2.659) + 2.659 \quad \text{if } 12 \leq \lambda_i < 13 \\
 W & \leftarrow (\lambda_i - 13) \cdot (2.702 - 2.659) + 2.702 \quad \text{if } 13 \leq \lambda_i \\
 C_i & \leftarrow W
 \end{aligned}$$

C

 $\psi\lambda =$

	0
0	0
1	0.019
2	0.037
3	0.056
4	0.075
5	0.094
6	0.112
7	...

 $\phi\lambda =$

	0
0	0
1	$9.918 \cdot 10^{-3}$
2	0.02
3	0.03
4	0.04
5	0.05
6	0.06
7	...

 $\delta\lambda =$

	0
0	0
1	0.015
2	0.031
3	0.046
4	0.062
5	0.077
6	0.093
7	...

$$t_1 = 1.182 \times 10^{-3} \text{ s} \quad \text{Basıncın maksimum olduğu zaman}$$

$$P_x := P_{\max} \cdot \psi \lambda = \quad \text{Pa}$$

	0
0	0
1	$6.468 \cdot 10^6$
2	$1.294 \cdot 10^7$
3	...

X konumuna göre namlu içi anlık basınç

$$V_x := V_1 \cdot \phi \lambda = \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

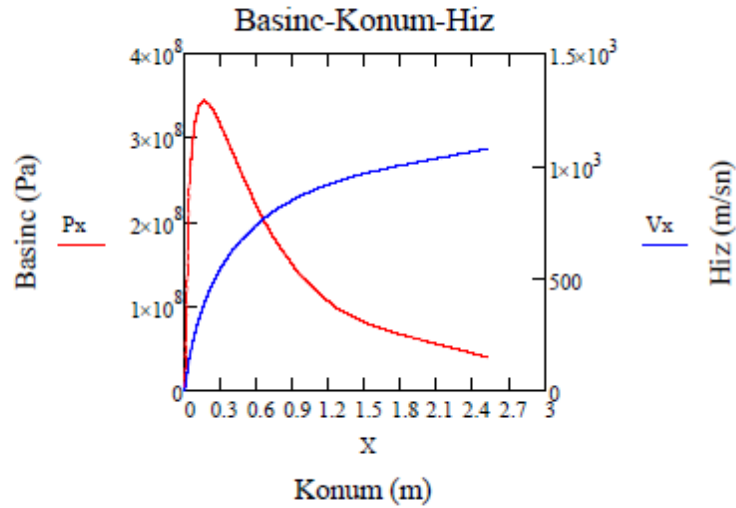
	0
0	0
1	3.777
2	7.554
3	...

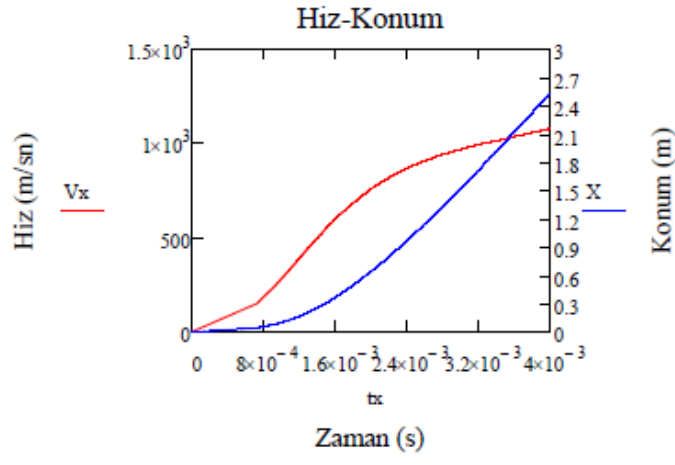
X konumuna göre namlu içi anlık hız

$$t_x := t_1 \cdot \delta \lambda = \quad \text{s}$$

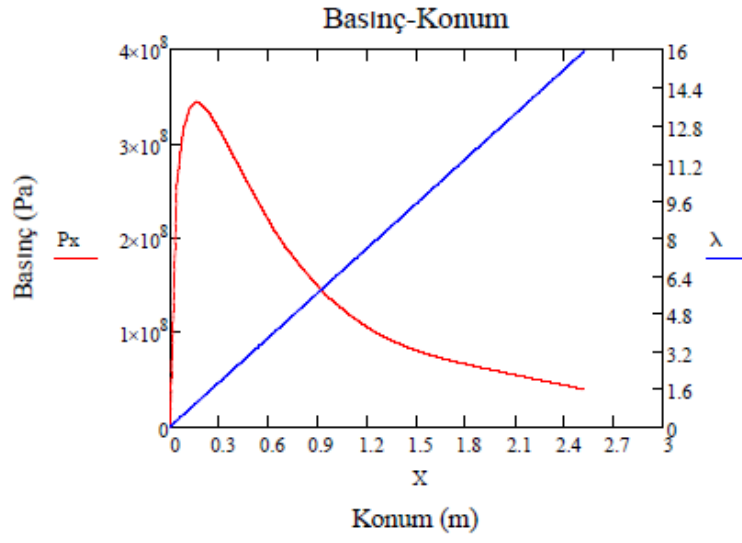
	0
0	0
1	$1.825 \cdot 10^{-5}$
2	$3.65 \cdot 10^{-5}$
3	$5.475 \cdot 10^{-5}$
4	...

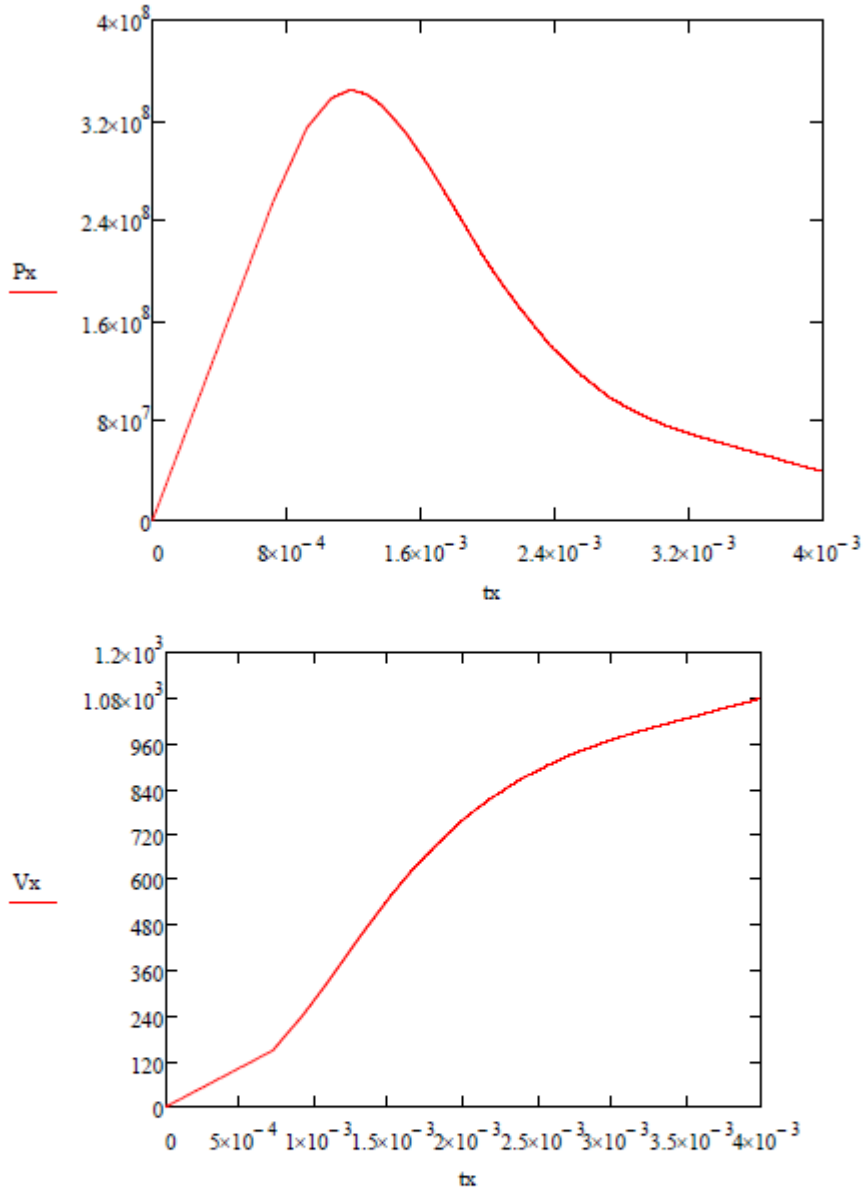
Maksimum basınca göre hesaplanan P_x ve V_x değerlerinin zamana değeri t_x





$$\max(t_x) = 3.985 \times 10^{-3} \text{ s}$$





Yukarıdaki hız grafiğimizi inceleyecek olursak çekirdek hızlanması sabit ivmeli hareket gibi düşünebiliriz. Bu noktada ortalama basıncımızı hesap edelim.

$$a_{ivmesabit} := \frac{V_0}{(\max(tx) - 0)} = 2.685 \times 10^5 \frac{m}{s^2}$$

$$Port2 := \frac{a_{ivmesabit} \cdot M_p}{Alan} = 1.379 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$Port = 1.408 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Sonuçlara baktığımız zaman Valilerde hesaplanan Port basıncı ile ivmeyi sabit kabul ettiğimiz hızlanmada hesapladığımız Port2 değeri birbirine oldukça yakındır.

Özgül Şarj (L_{sp}) namıu ağzındaki mermi enerjisinin her bir ton metresi için, gram olarak lüzumlu barut miktarıdır.

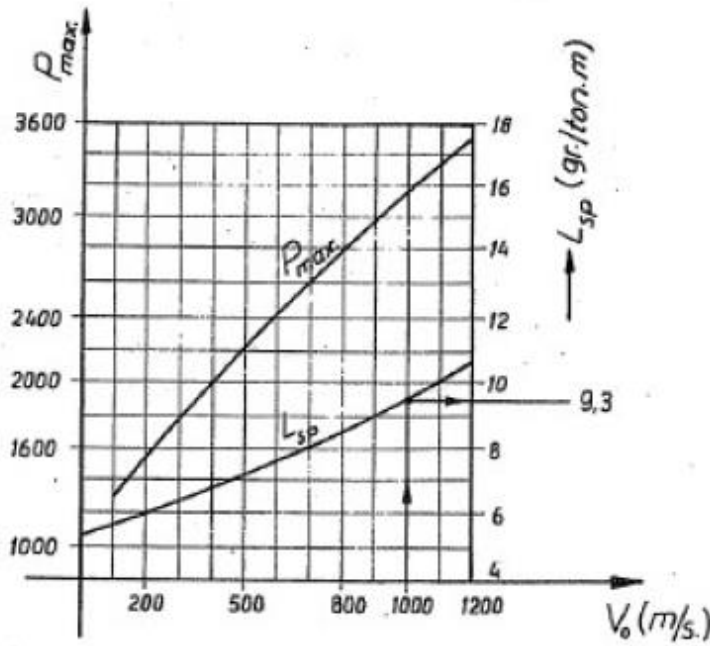
$$\text{Özgül Şarj (Barut Hakkı)} L_{sp} = (MB \cdot 2 \cdot g) / (M_p \cdot (V_0)^2 \cdot (V_0))$$

Memnin namıu ucundaki hareket Enerjisi: E_m

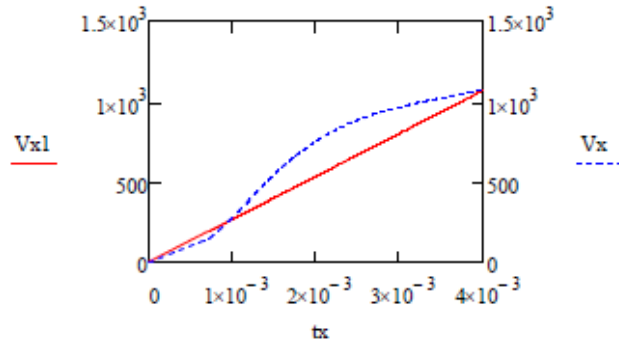
$$E_m := \frac{1}{2} \cdot V_0^2 \cdot M_p = 2.078 \times 10^5 \text{ J} \quad MB = 0.15 \text{ kg} \quad M_p = 0.363 \text{ kg} \quad MB1 := 0.195 \text{ kg}$$

$$L_{sp} := \frac{2 \cdot MB \cdot 9.81}{\frac{M_p}{1000^2} \cdot \left(\frac{V_0 \cdot s}{m}\right) \cdot \left(\frac{V_0 \cdot s}{m}\right)} = 7.081 \quad L_{sp1} := \frac{2 \cdot MB1 \cdot 9.81}{\frac{M_p}{1000^2} \cdot \left(\frac{V_0 \cdot s}{m}\right) \cdot \left(\frac{V_0 \cdot s}{m}\right)} = 9.206$$

Özgül şarj farkı bize gösteriyor ki gelişen teknoloji nedeni ile barut verimlilikleri artmıştır.



$$V_{x1} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(\text{Sayıcl} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow (tx_{i+1} - tx_i) \cdot aivmesabit + W \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{cases}$$



Grafiksel farklılıklar bize gösteriyorki sabit ivmeli hareket olarak aldığımızda ivme ve zaman dilimlerinin belirli zamandan sonra birbirine uymadığı görülüyor. Fakat grafik karşılaştırmasından şu yorumu yapabiliriz yanma devam ettiği sürecin büyük bir kısmında hareket sabit ivmeli gibi davranmaktadır.

Hesaplamamızı biraz farklılaştırsak örneğin Port basıncı bildiğimize göre sabit ivmeyi buna göre hesap edip uzunluktan bir değer çekerek hız ve zaman grafiği çizdirirsek M2 barut yanma hızının doğruluğunu kontrol edebiliriz.

$$t := Xe \frac{2}{V0} = 4.71 \times 10^{-3} \text{ s} \quad \max(tx) = 3.985 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$aivmesabit2 := \frac{V0}{t} = 2.272 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$aivmesabit = 2.685 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

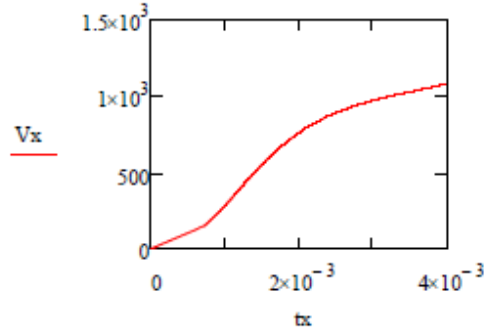
$$X_{\text{toplamlam}} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(\text{Sayıcl} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow (tx_{i+1} - tx_i) \cdot \left(\frac{V_{x_{i+1}} + V_{x_i}}{2} \right) + W \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{cases}$$

$$X_{\text{toplamlam}}_{(\text{Sayıcl}-1)} = 2.542 \text{ m} \quad \frac{X_{\text{toplamlam}}_{(\text{Sayıcl}-1)}}{Xe} = 1.009$$

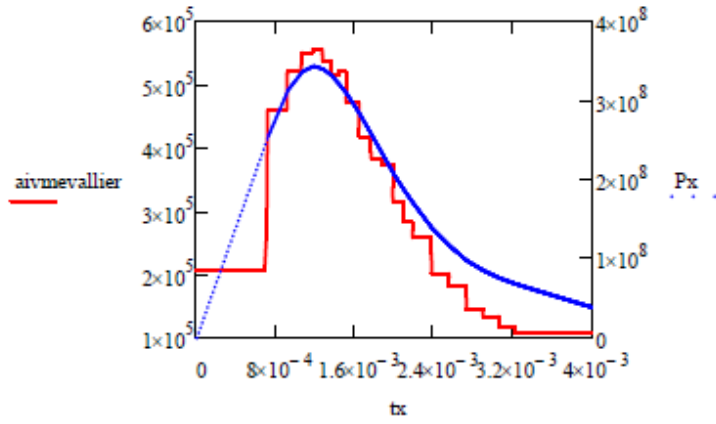
Valllerden gelen hız ve zaman değerlerine göre toplam namlu boyu hesaplanmış ve çıkan sonuçla elimizdeki namlu boyunu karşılaştırdığımız zaman %0.1 lik bir fark çıkmaktadır. Hesaplama yöntemi oldukça tutarlıdır.

$$\frac{\max(X_{\text{toplaml}})}{\max(t_x)} = 637.913 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{ortalama hız değeri}$$

$$a_{\text{ortlamaivme}} := \frac{\max(X_{\text{toplaml}}) \cdot 2}{\max(t_x)^2} = 3.201 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



$$\text{aivmevallier} := \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Sayıcl} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \left[\frac{V_{x_{i+1}} - V_{x_i}}{(t_{x_{i+1}} - t_{x_i})} \right] \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array}$$



$$\text{aivmevalliertoplaml} := \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Sayıcl} - 2) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow (t_{x_{i+1}} - t_{x_i}) \cdot \left(\frac{\text{aivmevallier}_{i+1} + \text{aivmevallier}_i}{2} \right) + W \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array}$$

$$\text{aivmevallierort} := \frac{\max(\text{aivmevalliertoplaml})}{\max(t_x)} = 2.707 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$aivmesabit = 2.685 \times 10^5 \frac{m}{s^2}$$

$$aivmesabit2 = 2.272 \times 10^5 \frac{m}{s^2}$$

aivmesabit2 değeri vallier tablosundan hesaplanan değer ile birbirine çok yakındır. Bundan dolayı yanma hızı hesabında kullanılabilir.

ACMP 706-247 Tablo 4-23 Göre M2 Barut Özellikleri:

Alev Sıcaklığı:3319 K Sabit hacimde (isochoric Falem temperature)

Kuvvet: 368 ft-lbs/lb*10⁻³ Force

Unoxidized Carbon % oksideolmamış Karbo yüzdesi: 0

Combustibles % Yanıcılar yüzdesi 47,2

Heat of explosion Patlamada açığa çıkan ısı1080 cal/gm

Tepkime sonrasiaçığa çıkan gaz molekülü sayısı:0.039 moles/gm

Ratio of specific heat özısıoranı=Cp/Cv sabit basınçtaki özısının sabit hacimdeki özısıya oranı1,2238

Alev sıcaklığı:2712 K sabit basınç altında (isobaric flame temperature)

Density yoğunluk:0.0597 lbs/in³

Co volume Gaz sıkıştırılma oranı: 27.91 in³/lb

Talevsh := 3319 K Talevsh T alev sıcaklığı sabit hacim

Talevsb := 2712 K Talevsb T alev sıcaklığı sabit basınç

$$\gamma := \frac{Talevsh}{Talevsb} = 1.224 \quad Patm := 101325 \cdot Pa = 1.013 \times 10^5 Pa$$

$$\eta := 27.91 \cdot \frac{in^3}{lb} = 1.008 \times 10^{-3} \frac{m^3}{kg} \quad (Co volume)$$

$$nmol := 0.0407 \cdot \frac{mol}{gm} \quad Q_{ISI} := 1080 \cdot \frac{cal}{gm}$$

$$F_{\text{barut}} := 368 \cdot 1.356 \cdot \text{N} \cdot \frac{\text{m}}{0.4535923 \cdot \text{kg} \cdot 10^{-3}} = 1.1 \times 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$d_{\text{barut}} := 0.0597 \cdot \frac{(0.4535923 \cdot \text{kg})}{(2.54^3 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^3)} = 1.652 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad v_{\text{obarut}} := \frac{1}{d_{\text{barut}}} = 6.051 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{Burningrate} := 29 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\left(\frac{\text{in}}{\text{s}}\right)}{\left(\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}\right)} = 1.068 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{kg}} \quad \text{ACMP 706-247 Sayfa 4-105 tablo 4-24}$$

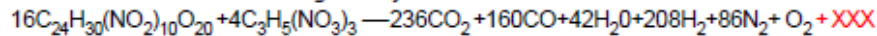
$$\text{Rideal} := 1.986 \cdot \text{cal} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{Rideal2} := 8.3145 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad \text{Rideal} = 8.315 \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{mol} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^2}$$

$$C_v := \text{Rideal2} \cdot \frac{\text{nmol}}{(\gamma - 1)} = 1.512 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2}$$

$$C_p := C_v \cdot \gamma = 1.85 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2} \quad \text{ACMP 706-247 Sayfa 4-88 formül 4-58}$$

$$\text{Talevsh1} := \frac{F_{\text{barut}}}{C_v \cdot (\gamma - 1)} = 3.251 \times 10^3 \text{ K} \quad \text{Değerleri yerine koyduğumuz zaman tablo değerlerini karşılamaktadır.}$$

%80 Nitroselükozlu ve %20 Nitrogliserinli yakıtın denklemi:



Kcal/kg Denklem Carbon atomlarından yola çıkarak yaklaşık olarak mol sayıları belirlenmiştir.

$$\text{Molgaz} := (236 + 160 + 42 + 208 + 86 + 1) \cdot \text{mol} = 733 \text{ mol}$$

$$\text{Molbarut} := 20 \cdot \text{mol}$$

$$V_{\text{barut1}} := \text{Molbarut} \cdot 22.4 \cdot \frac{1}{\text{mol}} = 448 \text{ L}$$

$$V_{\text{barut2}} := \frac{(273 + 20)}{(273 + 0)} \cdot V_{\text{barut1}} = 480.821 \text{ L}$$

$$V_{\text{gaz1}} := \frac{V_{\text{barut2}} \cdot \text{Molgaz}}{\text{Molbarut}} = 1.762 \times 10^4 \text{ L}$$

Aynı işlemleri elimizdeki barutun miktarına göre revize edebiliriz.

$$\text{Anitroselüloz} := 16 \cdot \text{mol} \cdot [24 \cdot 12 + 30 \cdot 1 + 10 \cdot (14 + 16 \cdot 2) + 20 \cdot 16] \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}} = 17.568 \text{ kg}$$

$$\text{Anitrogliserin} := 4 \cdot \text{mol} \cdot \left[3 \cdot 12 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}} + 5 \cdot 1 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}} + 3 \cdot \left(14 \cdot 1 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}} + 3 \cdot 16 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \right) \right] = 0.908 \text{ kg}$$

$$\text{Barutağırlık} := \text{Anitroselüloz} + \text{Anitrogliserin} = 18.476 \text{ kg}$$

Burada yaptığımız hesaplarımız karşılaştırsak: 18476 gram barutumuz yandığı zaman 733 mol gaz oluşmaktadır.

18476 gram barutun yanması ile 733 mol gaz oluşursa.

$$\text{Port-Burningrate} = 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Mgmol} := \frac{\text{Molgaz}}{\text{Barutağırlık}} = 39.673 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \quad \text{nmol} := \frac{\text{MB}}{\text{Barutağırlık}} \cdot \text{Molgaz} = 5.951 \text{ mol}$$

$$\text{Rm} := \text{nmol} \cdot \text{Rideal} = 338.42 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2} \quad \text{Reaksiyon sonucu çıkan gazların gaz sabitesi}$$

$$\text{Cv2} := \text{Rideal2} \cdot \frac{\text{Mgmol}}{(\gamma - 1)} = 1.474 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2} \quad \text{Cv} = 1.512 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2}$$

$$\text{Cp2} := \text{Cv2} \cdot \gamma = 1.804 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2} \quad \text{Cp} = 1.85 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}^2}$$

$$\text{Talevsh2} := \frac{\text{Fbarut}}{\text{Cv2} \cdot (\gamma - 1)} = 3.335 \times 10^3 \text{ K}$$

$$\text{Talevsh} = 3.319 \times 10^3 \text{ K}$$

Denklemden elde ettiğimiz sonuçlarla tablo değerini karşılaştırdığımız zaman çok az bir fark görünmektedir. Oksijen atom sayısı çok az olduğu için hesaba katılmadı.

$$\gamma_{\text{CO2}} := 1.289 \quad \gamma_{\text{CO}} := 1.4 \quad \gamma_{\text{H2O}} := 1.3270 \quad \gamma_{\text{H2}} := 1.405 \quad \gamma_{\text{N2}} := 1.40$$

γ Değerleri Fundamentals of Thermodynamics Sontang-Bornakke 8th edition page:760 Table A.5 ideal gas properties T:25⁰ P:100 kPa

$$\gamma_1 := \frac{236 \cdot \gamma_{\text{CO2}} + 160 \cdot \gamma_{\text{CO}} + 42 \cdot \gamma_{\text{H2O}} + 208 \cdot \gamma_{\text{H2}} + 86 \cdot \gamma_{\text{N2}}}{(236 + 160 + 42 + 208 + 86)} \quad \gamma_1 = 1.361 \quad \gamma = 1.224$$

Özısılar oranı verilmediği zaman kimyasa denklem biliniyorsa. Bu yaklaşım tarzı ile barutun özısı oranı bulunabilir.

Yanma anında barut kütlesinin tamamen gaz dönüştüğü kabul edilir.

$$V_{yanma} := 240 \cdot \text{cm}^3 \quad \text{Yanma Odası Hacmi}$$

$$V_{barut} := \frac{MB}{d_{barut}} = 0.091 \text{ L}$$

$$V_{gazolusan} := MB \cdot \eta = 0.151 \text{ L}$$

$$\Delta 0 := MB \cdot \frac{1}{V_{yanma}} = 625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tablo değeri: 0.02372 lb/in³ 656.567 kg/m³ örnek soru Acmp 747-206 sayfa 4-74 Doldurma yoğunluğu top ve obüslerde 0,50-0,60 arasında değişirken hafif silahlarda bu değer %95 kadar çıkabilmektedir.

$$\Delta 01 := \frac{\Delta 0 \cdot 10^3 \cdot \text{m}^3}{10^6 \cdot \text{kg}} = 0.625$$

0.625
gram/cm³

Yanma başlangıç hacmi ve doldurma yoğunluğu

Yanma başlangıç hacmi mermi harekete geçmeden evvel sevk barutunun bulunduğu yerin net hacmidir. Bu hacim lüzumlu sevk barutu miktarına göre tesbit edilir. Yanma başlangıç hacminin tesbitinde doldurma yoğunluğundan (Δ) yararlanılır.

$$\Delta = \frac{\text{Sevk barutu ağırlığı (L)}}{\text{Yanma ilk hacmi (V}_0\text{)}} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$V_0 = \frac{L}{\Delta}$$

Küçük çaplı silâhlarda Nitroselülozlu barutlar için $\Delta = 0,90 \div 0,95$ alınabilir.

$$V_{gaz} := V_{yanma} - V_{barut} = 0.149 \text{ L}$$

$$V_{yanma} = 0.24 \text{ L}$$

$$\theta := 0.17$$

θ değeri namlunun ısınmasına harcanan enerji orta kalibre silâhlarda 0.17 değeri alınır. Bu düzeltme faktörü küçük kalibre silâhlarda yüksek büyük kalibre silâhlarda daha küçük bir değer alınır. Eğer hesaplamalar doğru yapılır ve ortak denklemler çözdürülebilirse seçtiğimiz kalibrede bu değeri hesaplamış da oluruz.

$$P_{ort} = \frac{M_B \times z(t) \times Fbarut - (\gamma - 1) \times (1 + \theta) \times \frac{1}{2} \times V_m^2 \times m_e}{[Vyanma - \frac{M_B}{\rho_b} - M_B z(t) \times \left[\frac{1}{\rho_b} - \eta \right] + [AX(t)]]}$$

Vm çekirdek hızını ifade etmektedir.

$$\rho_b := dbarut = 1.652 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad Port = 1.408 \times 10^8 \text{ Pa} \quad Xe = 2.52 \text{ m}$$

$$A1 := Port \cdot Vyanma = 3.378 \times 10^4 \text{ J}$$

$$A2 := Port \cdot \frac{MB}{\rho_b} = 1.278 \times 10^4 \text{ J}$$

$$A3 := Alan \cdot Xe \cdot Port = 2.507 \times 10^5 \text{ J}$$

$$A4 := Port \cdot \left(\frac{1}{\rho_b} - \eta \right) \cdot MB = -8.512 \times 10^3 \text{ J}$$

$$A5 := Fbarut \cdot MB = 1.65 \times 10^5 \text{ J}$$

$$A6 := (\gamma - 1) \cdot (1 + \theta) \cdot \frac{1}{2} \cdot V0^2 = 1.499 \times 10^5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$Mp = 0.363 \text{ kg}$$

$$A7 := A6 \cdot Mp = 5.442 \times 10^4 \text{ J}$$

$$A8 := A6 \cdot \frac{MB}{3} = 7.495 \times 10^3 \text{ J}$$

$$Znamlucucu := \frac{A1 - A2 + A3 + A7}{A5 + A4 - A8} = 2.189$$

$$Me := Mp + \frac{MB}{3} = 0.413 \text{ kg}$$

Namlu içerisindeki sıcaklık dağılımını bulabilmek için öncelikle çekirdek harekete başlamadan önce ne kadar barut yandığını buluruz. Çekirdek harekete başlamadan önce yanma olayı sabit hacimde olmakta ve hesaplarda ona göre yapılmalıdır.

Yanma odası hacmi:

$$Vyanma = 0.24 \text{ L}$$

İlk etapta yanma odası hacminden kovan hacmi düşülmeden hesaplar yapılacaktır.

$$MB = 0.15 \text{ kg} \quad d_{\text{barut}} = 1.652 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad V_{\text{katıbarut}} := \frac{MB}{d_{\text{barut}}} = 0.091 \text{ L}$$

$$V_c := V_{\text{yanma}} - V_{\text{katıbarut}} = 0.149 \text{ L}$$

Bu noktada çekirdek ilk harekete başladığı andaki basıncı kabul etmemiz gerekmektedir.

Pilkhareket := 30 MPa Çekirdek ilk harekete başladığı an kabul edilen basınç değeri.

$$\eta = 1.008 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$m_{\text{barut}} := \frac{\text{Pilkhareket} \cdot V_c}{(\text{Fbarut} + \text{Pilkhareket} \cdot \eta)} = 3.96 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad Z_{11} := \frac{m_{\text{barut}}}{MB} = 0.026$$

$$V_{\text{yananbarut}} := \frac{m_{\text{barut}}}{d_{\text{barut}}} = 2.397 \times 10^{-3} \text{ L}$$

$$V_{c1} := V_{\text{yanma}} - V_{\text{katıbarut}} + V_{\text{yananbarut}} - m_{\text{barut}} \cdot \eta = 0.148 \text{ L}$$

$$M_{\text{gmol}} = 39.673 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \quad m_{\text{barut}} \cdot M_{\text{gmol}} = 0.157 \text{ mol} \quad n_{\text{mol}} = 40.7 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{tersten}} := \frac{\text{Talevsh-Rideal2} \cdot m_{\text{barut}} \cdot n_{\text{mol}}}{\text{Pilkhareket}} = 0.148 \text{ L} \quad \text{Rideal2} = 8.315 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{mol} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^2}$$

İşlemler yapıldığı zaman anlaşılıyor ki çekirdeğin ilk harekete başladığı andaki basınç değerini 30 Mpa alabiliriz.

Yanma başladıktan fakat çekirdek hareket etmeden önce yanan barut miktarını hesaplırsak

$$\text{Pilkort} := \text{Pilkhareket} \quad X_{\text{ilk}} := X_0 \quad V_{\text{ilk}} := V_{x_0} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A_{11} := \text{Pilkort} \cdot V_{\text{yanma}} = 7.2 \times 10^3 \text{ J}$$

$$A_{55} := \text{Fbarut} \cdot MB = 1.65 \times 10^5 \text{ J}$$

$$A_{22} := \text{Pilkort} \cdot \frac{MB}{\rho_b} = 2.723 \times 10^3 \text{ J}$$

$$A_{66} := (\gamma - 1) \cdot (1 + \theta) \cdot \frac{1}{2} \cdot V_{\text{ilk}}^2 = 0 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$A_{33} := \text{Alan} \cdot X_{\text{ilk}} \cdot \text{Port} = 0 \text{ J}$$

$$A_{77} := A_{66} \cdot M_p = 0 \text{ J}$$

$$A_{44} := \text{Pilkort} \cdot \left(\frac{1}{\rho_b} - \eta \right) \cdot MB = -1.814 \times 10^3 \text{ J}$$

$$A_{88} := A_{66} \cdot \frac{MB}{3} = 0 \text{ J}$$

$$Z1 := \frac{A11 - A22 + A33 + A77}{A55 + A44 - A88} = 0.027$$

Memri harekete başlamadan önce barutumuz sadece %2.7 yanmaktadır. Harekete başlayıp mermi namlı ucundan çıkana barutumuzun tamamının yandığını daha önce hesaplamıştık.

Merminin namlı ucundaki hareket Enerjisi: Em

$$Em = 2.078 \times 10^5 \text{ J}$$

Barut toplam enerjisi: Ebarut

$$Ebarut := MB \cdot Q_{Is1} = 6.783 \times 10^5 \text{ J}$$

$$\frac{Em}{Ebarut} = 0.306 \quad Z1 = 0.027$$

Barut enerjisinin %30.6 sı merminin hareketine aktarılmaktadır. Fakat mermi harekete başlamadan önce arutumuzun %2.7 yandığına göre hesaplamamızı düzeltilsek. Bu oran %31.5 çıkmaktadır. Bu sonuçta aşağıdaki tablo değerini doğrulamaktadır.

$$\frac{Em}{Ebarut \cdot (1 - Z1)} = 0.315$$

Aynı namlı aynı çekirdek ile istenen hız değerine ne kadar barut ile ulaşılır.

$$\text{İstenen hız} \quad V_{istenen} := 950 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad Em1 := \frac{1}{2} \cdot Mp \cdot V_{istenen}^2 = 1.638 \times 10^5 \text{ J}$$

$$MB_{istenenhızgöre} := Em1 \cdot \frac{Ebarut}{Em \cdot Q_{Is1}} = 0.118 \text{ kg}$$

Bu noktadan sonra bu değeri valier hesaplarına girdi olarak veriz ve Port basıncı hesaplarız.

$$Port_{istenenhızgöre} := \left(\frac{Mp + 0.5 \cdot MB_{istenenhızgöre}}{2 \cdot Xe \cdot Alan} \right) \cdot V_{istenen}^2 = 1.069 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Bu durumda maksimum basıncı ve maksimum hızı bilmiyoruz Maksimum basıncı nasıl bulabiliriz yada tahmin edebiliriz. Daha önce verilen barut yoğunluğuna göre imeler aynı aynı hesap edilmiş ve Port basıncı çok yakın çıkmıştır. Bu yaklaşımdan yola çıkarak tmax zamanı hesap edersek tekrar bir valier tablosuna grafiği çizdirebilir.

$$a_{ivmesabitistenenhızgöre} := \frac{Port_{istenenhızgöre} \cdot Alan}{Mp} = 2.082 \times 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{teistenenhızagöre} := \frac{\text{Vistenen}}{(\text{aivmesabitistenenhızagöre})} = 4.562 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$\text{T}\eta\text{istenen} := \frac{\text{Vistenen} \cdot \text{teistenenhızagöre}}{2 \cdot \text{Xe}} = 0.86$$

T η istenenhıza göre değerini bildüğimize göre η pistenenhızagöre değerini Vallier tablosundan çekebiliriz.

$$\eta\text{pistenenhızagöre} := \begin{cases} \frac{(0.25 - 0) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0)}{(0.725 - 0)} + 0 & \text{if } (\text{T}\eta\text{istenen} \leq 0.725) \\ \frac{(0.3 - 0.25) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0.725)}{(0.762 - 0.725)} + 0.25 & \text{if } 0.725 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 0.762 \\ \frac{(0.35 - 0.30) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0.762)}{(0.8 - 0.762)} + 0.3 & \text{if } 0.762 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 0.8 \\ \frac{(0.40 - 0.35) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0.8)}{(0.8360 - 0.8)} + 0.35 & \text{if } 0.80 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 0.836 \\ \frac{(0.45 - 0.40) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0.836)}{(0.873 - 0.836)} + 0.4 & \text{if } 0.836 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 0.873 \\ \frac{(0.5 - 0.45) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0.873)}{(0.91 - 0.873)} + 0.45 & \text{if } 0.873 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 0.91 \\ \frac{(0.55 - 0.5) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 0.91)}{(1.116 - 0.91)} + 0.5 & \text{if } 0.91 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 1.116 \\ \frac{(0.6 - 0.55) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 1.116)}{(1.18 - 1.116)} + 0.55 & \text{if } 1.116 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 1.18 \\ \frac{(0.65 - 0.6) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 1.18)}{(1.249 - 1.18)} + 0.6 & \text{if } 1.18 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 1.249 \\ \frac{(0.7 - 0.65) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 1.249)}{(1.322 - 1.249)} + 0.65 & \text{if } 1.249 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 1.322 \\ \frac{(0.75 - 0.7) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 1.322)}{(1.406 - 1.322)} + 0.7 & \text{if } 1.322 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 1.406 \\ \frac{(0.8 - 0.75) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 1.406)}{(1.507 - 1.406)} + 0.75 & \text{if } 1.406 \leq \text{T}\eta\text{istenen} < 1.507 \\ \frac{(0.8 - 0.75) \cdot (\text{T}\eta\text{istenen} - 1.507)}{(1.507 - 1.406)} + 0.8 & \text{if } 1.507 \leq \text{T}\eta\text{istenen} \end{cases}$$

$$\eta\text{p1} := \eta\text{pistenenhızagöre} = 0.432$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma \eta_{\text{istenen hız göre}} := & \left[\begin{array}{l} 0.0262 - \left[\frac{(0.20 - \eta_{p1}) \cdot (0.0313 - 0.0262)}{(0.25 - 0.20)} \right] \text{ if } \eta_{p1} < 0.2 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.0313 - 0.0262) + 0.0262 \text{ if } 0.2 \leq \eta_{p1} < 0.25 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.0402 - 0.0313) + 0.0313 \text{ if } 0.25 \leq \eta_{p1} < 0.30 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.050 - 0.0402) + 0.0402 \text{ if } 0.30 \leq \eta_{p1} < 0.35 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.0608 - 0.050) + 0.050 \text{ if } 0.35 \leq \eta_{p1} < 0.40 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.0729 - 0.0608) + 0.0608 \text{ if } 0.40 \leq \eta_{p1} < 0.45 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.0875 - 0.0729) + 0.0729 \text{ if } 0.45 \leq \eta_{p1} < 0.50 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.132 - 0.0875) + 0.0875 \text{ if } 0.50 \leq \eta_{p1} < 0.55 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.160 - 0.132) + 0.132 \text{ if } 0.55 \leq \eta_{p1} < 0.60 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.192 - 0.160) + 0.160 \text{ if } 0.60 \leq \eta_{p1} < 0.65 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.231 - 0.192) + 0.192 \text{ if } 0.65 \leq \eta_{p1} < 0.70 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.283 - 0.231) + 0.231 \text{ if } 0.70 \leq \eta_{p1} < 0.75 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.36 - 0.283) + 0.283 \text{ if } 0.75 \leq \eta_{p1} < 0.80 \\ \frac{(\eta_{p1} - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.36 - 0.283) + 0.36 \text{ if } 0.80 \leq \eta_{p1} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Örnekten hızgöre} := & \left| \begin{aligned} & 0.15 - \left[\frac{(0.20 - \eta p1) \cdot (0.139 - 0.15)}{(0.25 - 0.20)} \right] \text{ if } \eta p1 < 0.2 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.139 - 0.15) + 0.15 \text{ if } 0.2 \leq \eta p1 < 0.25 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.172 - 0.139) + 0.139 \text{ if } 0.25 \leq \eta p1 < 0.30 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.207 - 0.172) + 0.172 \text{ if } 0.30 \leq \eta p1 < 0.35 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.244 - 0.207) + 0.207 \text{ if } 0.35 \leq \eta p1 < 0.40 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.288 - 0.244) + 0.244 \text{ if } 0.40 \leq \eta p1 < 0.45 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.326 - 0.288) + 0.288 \text{ if } 0.45 \leq \eta p1 < 0.50 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.560 - 0.326) + 0.326 \text{ if } 0.50 \leq \eta p1 < 0.55 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.642 - 0.560) + 0.560 \text{ if } 0.55 \leq \eta p1 < 0.60 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.734 - 0.642) + 0.642 \text{ if } 0.60 \leq \eta p1 < 0.65 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.835 - 0.734) + 0.734 \text{ if } 0.65 \leq \eta p1 < 0.70 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.958 - 0.835) + 0.835 \text{ if } 0.70 \leq \eta p1 < 0.75 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (1.115 - 0.958) + 0.958 \text{ if } 0.75 \leq \eta p1 < 0.80 \\ & \frac{(\eta p1 - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (1.115 - 0.958) + 1.115 \text{ if } 0.80 \leq \eta p1 \end{aligned} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{\eta \text{ istenen hız göre}} := & \left[\frac{(0.20 - \eta_{p1}) \cdot (0.324 - 0.322)}{(0.25 - 0.20)} \right] \text{ if } \eta_{p1} < 0.2 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.324 - 0.322) + 0.322 \text{ if } 0.2 \leq \eta_{p1} < 0.25 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.333 - 0.324) + 0.324 \text{ if } 0.25 \leq \eta_{p1} < 0.30 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.343 - 0.333) + 0.333 \text{ if } 0.30 \leq \eta_{p1} < 0.35 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.354 - 0.343) + 0.343 \text{ if } 0.35 \leq \eta_{p1} < 0.40 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.366 - 0.354) + 0.354 \text{ if } 0.40 \leq \eta_{p1} < 0.45 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.38 - 0.366) + 0.366 \text{ if } 0.45 \leq \eta_{p1} < 0.50 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.435 - 0.380) + 0.380 \text{ if } 0.50 \leq \eta_{p1} < 0.55 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.457 - 0.435) + 0.435 \text{ if } 0.55 \leq \eta_{p1} < 0.60 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.482 - 0.457) + 0.457 \text{ if } 0.60 \leq \eta_{p1} < 0.65 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.511 - 0.482) + 0.482 \text{ if } 0.65 \leq \eta_{p1} < 0.70 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.546 - 0.511) + 0.511 \text{ if } 0.70 \leq \eta_{p1} < 0.75 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.592 - 0.546) + 0.546 \text{ if } 0.75 \leq \eta_{p1} < 0.80 \\
& \frac{(\eta_{p1} - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.592 - 0.546) + 0.592 \text{ if } 0.80 \leq \eta_{p1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \pi_{\eta \text{ istenen hız göre}} := & \left. \begin{aligned}
 & 0.274 - \left[\frac{(0.20 - \eta_{p1}) \cdot (0.216 - 0.274)}{(0.25 - 0.20)} \right] \text{ if } \eta_{p1} < 0.2 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.2)}{(0.25 - 0.20)} \cdot (0.216 - 0.274) + 0.274 \text{ if } 0.2 \leq \eta_{p1} < 0.25 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.25)}{(0.30 - 0.25)} \cdot (0.242 - 0.216) + 0.216 \text{ if } 0.25 \leq \eta_{p1} < 0.30 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.30)}{(0.35 - 0.30)} \cdot (0.278 - 0.242) + 0.242 \text{ if } 0.30 \leq \eta_{p1} < 0.35 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.35)}{(0.40 - 0.35)} \cdot (0.304 - 0.278) + 0.278 \text{ if } 0.35 \leq \eta_{p1} < 0.40 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.40)}{(0.45 - 0.40)} \cdot (0.340 - 0.304) + 0.304 \text{ if } 0.40 \leq \eta_{p1} < 0.45 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.45)}{(0.50 - 0.45)} \cdot (0.382 - 0.340) + 0.340 \text{ if } 0.45 \leq \eta_{p1} < 0.50 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.50)}{(0.55 - 0.50)} \cdot (0.501 - 0.382) + 0.382 \text{ if } 0.50 \leq \eta_{p1} < 0.55 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.55)}{(0.60 - 0.55)} \cdot (0.541 - 0.501) + 0.501 \text{ if } 0.55 \leq \eta_{p1} < 0.60 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.60)}{(0.65 - 0.60)} \cdot (0.585 - 0.541) + 0.541 \text{ if } 0.60 \leq \eta_{p1} < 0.65 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.65)}{(0.70 - 0.65)} \cdot (0.635 - 0.585) + 0.585 \text{ if } 0.65 \leq \eta_{p1} < 0.70 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.70)}{(0.75 - 0.70)} \cdot (0.697 - 0.635) + 0.635 \text{ if } 0.70 \leq \eta_{p1} < 0.75 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.75)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.779 - 0.697) + 0.697 \text{ if } 0.75 \leq \eta_{p1} < 0.80 \\
 & \frac{(\eta_{p1} - 0.80)}{(0.80 - 0.75)} \cdot (0.779 - 0.697) + 0.779 \text{ if } 0.80 \leq \eta_{p1}
 \end{aligned} \right|
 \end{aligned}$$

$\eta(p)$	$\Sigma(\eta)$	$\theta(\eta)$	$\varnothing(\eta)$	$\pi(\eta)$	$\Gamma(\eta)$
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2000	0,2620	0,1500	0,3220	0,2740	0,7440
0,2500	0,0313	0,1390	0,3240	0,2160	0,7250
0,3000	0,0402	0,1720	0,3330	0,2420	0,7620
0,3500	0,0500	0,2070	0,3430	0,2780	0,8000
0,4000	0,0608	0,2440	0,3540	0,3040	0,8360
0,4500	0,0729	0,2840	0,3660	0,3400	0,8730
0,5000	0,0875	0,3260	0,3800	0,3820	0,9100
0,5500	0,1320	0,5600	0,4350	0,5010	1,1160
0,6000	0,1600	0,6420	0,4570	0,5410	1,1800
0,6500	0,1920	0,7340	0,4820	0,5850	1,2490
0,7000	0,2310	0,8350	0,5110	0,6350	1,3220
0,7500	0,2830	0,9580	0,5460	0,6970	1,4060
0,8000	0,3600	1,1150	0,5920	0,7790	1,5070

$$\eta_{\text{pistenenhızagöre}} = 0.432 \quad \text{Portistenenhızagöre} = 1.069 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{maxistenenhızagöre}} := \frac{\text{Portistenenhızagöre}}{\eta_{\text{pistenenhızagöre}}} = 2.473 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$V_{\text{istenen}} = 950 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad M_{\text{Bistenenhızagöre}} = 0.118 \text{ kg}$$

Yeni barut kütleline göre hesaplanan Maksimum basınç değeri 247.3 MPa dir.

$$\Sigma_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 0.069 \quad \theta_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 0.272 \quad \phi_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 0.362$$

$$\pi_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 0.327$$

Xmax gaz basıncının maksimum olduğu anda merminin namı içinde almış olduğu yol.

$$X_{\text{maxistenenhızagöre}} := X_e \cdot \Sigma_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 0.173 \text{ m} \quad X_{\text{max}} = 0.158 \text{ m}$$

t1 Gaz basıncının maksimum olduğu anda ilk hareketten itibaren geçen zaman denklemi

$$t1 = (2 \cdot X_e / V_0) \cdot \theta_{\eta}$$

$$t_{1\text{istenenhızagöre}} := \frac{2 \cdot X_e}{V_{\text{istenen}}} \cdot \theta_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 1.446 \times 10^{-3} \text{ s} \quad t1 = 1.182 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Gaz basıncının maksimum olduğu anda merminin hızı V1 $V1 = V_0 \cdot \phi_{\eta}$

$$V_{1\text{istenenhızagöre}} := V_{\text{istenen}} \cdot \phi_{\eta_{\text{istenenhızagöre}}} = 343.677 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad V1 = 380.834 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Namlu ağızındaki gaz basınç denklemi $P_e = P_{ort} \cdot \eta_{\eta}$

$$P_{eistenenhızagöre} := P_{ortistenenhızagöre} \cdot \eta_{\eta istenenhızagöre} = 3.5 \times 10^7 \text{ Pa} \quad P_e = 4.36 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Namlu içinde toplam memi yolu için geçen zaman ise $t_e = 2 \cdot X_e \cdot T_{\eta} / V_{\eta}$

$$t_{eistenenhızagöre} = 4.562 \times 10^{-3} \text{ s} \quad t_{ee} := \frac{2 \cdot X_e \cdot 0.86}{V_{istenen}} = 4.563 \times 10^{-3} \text{ s} \quad t_e = 3.966 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$P_{xistenenhızagöre} := P_{maxistenenhızagöre} \cdot \psi_{\lambda} =$ Pa

	0
0	0
1	$4.637 \cdot 10^6$
2	$9.274 \cdot 10^6$
3	$1.391 \cdot 10^7$
4	...

X konumuna göre namlu içi anlık basınç

$V_{xistenenhızagöre} := V_{listenenhızagöre} \cdot \phi_{\lambda} =$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

	0
0	0
1	3.409
2	6.817
3	...

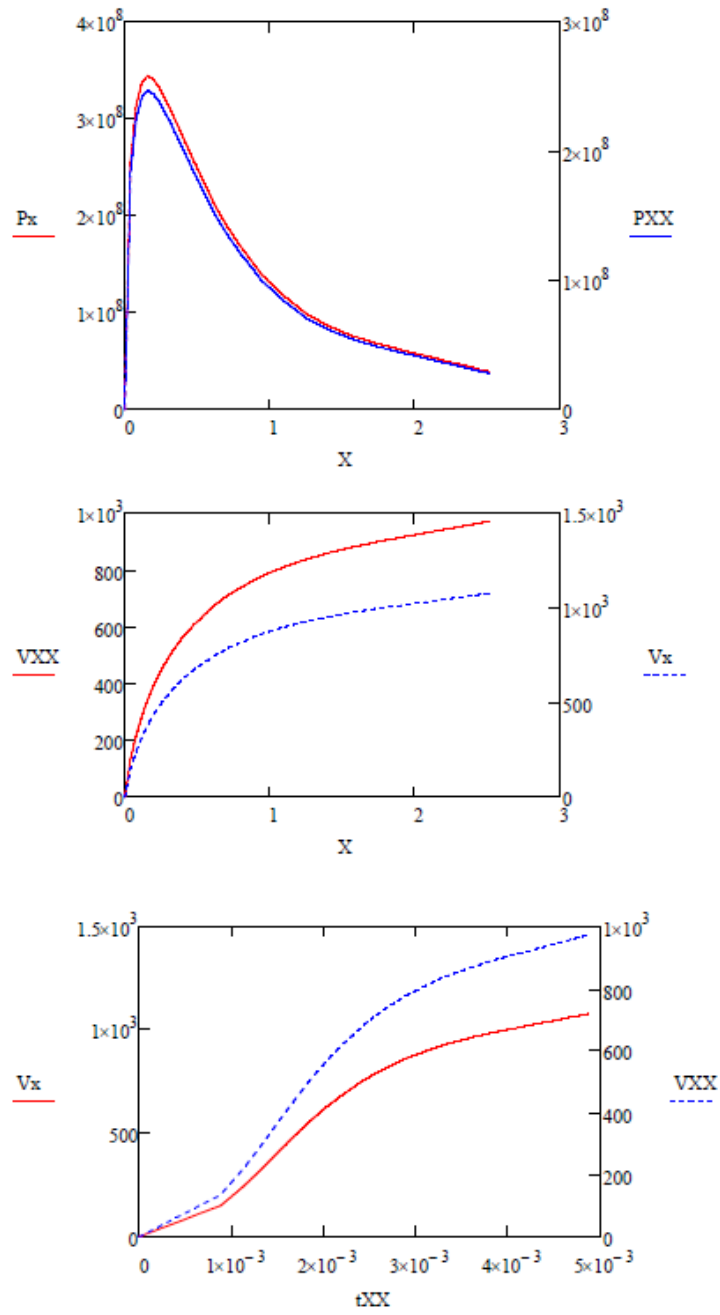
X konumuna göre namlu içi anlık hız

$t_{xistenenhızagöre} := t_{listenenhızagöre} \cdot \delta_{\lambda} =$ s

	0
0	0
1	$2.231 \cdot 10^{-5}$
2	$4.462 \cdot 10^{-5}$
3	...

Maksimum basınca göre hesaplanan P_x ve V_x değerlerinin zamana değeri t_x

$$P_{XX} := P_{xistenenhızagöre} \quad V_{XX} := V_{xistenenhızagöre} \quad t_{XX} := t_{xistenenhızagöre}$$



$$A_{111} := \text{Pilkort-Vyanma} = 7.2 \times 10^3 \text{ J} \quad A_{555} := \text{Fbarut-MBistenehızagöre} = 1.301 \times 10^5 \text{ J}$$

$$A222 := \text{Pilkort} \cdot \frac{MB_{\text{Bistenenhızgöre}}}{\rho b} = 2.147 \times 10^3 \text{ J} \quad A666 := (\gamma - 1) \cdot (1 + \theta) \cdot \frac{1}{2} \cdot V_{\text{ilk}}^2 = 0 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

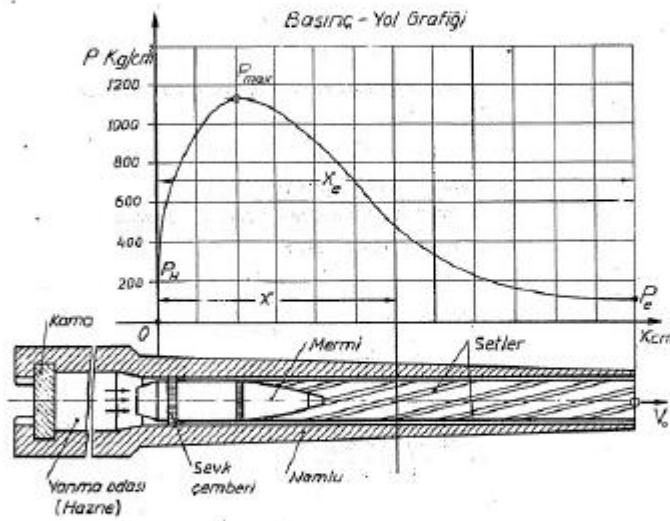
$$A333 := \text{Alan} \cdot X_{\text{ilk}} \cdot \text{Portistenenhızgöre} = 0 \text{ J}$$

$$A777 := A66 \cdot M_p = 0 \text{ J}$$

$$A444 := \text{Pilkort} \cdot \left(\frac{1}{\rho b} - \eta \right) \cdot MB_{\text{Bistenenhızgöre}} = -1.43 \times 10^3 \text{ J}$$

$$A888 := A66 \cdot \frac{MB}{3} = 0 \text{ J}$$

$$Z111 := \frac{A111 - A222 + A333 + A777}{A555 + A444 - A888} = 0.039$$

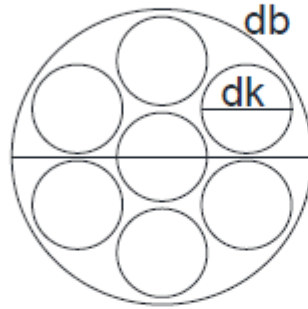


Şekilde görüldüğü gibi mermirin harekete geçebilmesi için basıncın bir P_H değerine yükselmesi gerekir. Burada mermi sevk çemberinin, sevk çemberi yoksa mermi gövdesinin (Hafif silâh mermilerinde) namlu içindeki setler tarafından ezilmesi sonucu doğacak direnci yenmek için gerekli olan basınctır. Kovanlı ve terkipli mermilerde ayrıca mermi kovandan ayrılması içinde bir kuvvet gerekir. Anılan dirençler P_H basıncının oluşturduğu kuvvet tarafından yenildiği anda mermi harekete başlar. Mermi hareket halinde iken basınç P_{max} değerine ulaşır. Sonra tedricen azalarak bir P_e değerinde iken mermi namlu ağzını V_0 ilk hızını almış olarak terk eder. Basınç diyagramını X eksenine zamanı V eksenine basınç almak suretiyle de verilebilir. Bunlar iç balistik bölümünde tekrar incelenecektir.

1- Merminin hareketi için harcanan enerji	% 32,4
2- Merminin dönmesi için harcanan enerji	% 0,14
3- Geri tepme için harcanan enerji	% 0,16
4- Namluyu ısıtan enerji	% 22,3
5- Mermiyi ısıtan enerji	% 2
6- Kullanılmıyan enerji	% 43

Ali Rıza Öztürk İç Balistik
Sayfa-74

M2 barutun silindirik ve 7 delikli olduğu düşünülürse (Web Thickness) et kalınlığı hesaplanabilir.



$$db := 5 \text{ mm}$$

Verilen dış çapa göre iç çap hesaplanabilir. Barutweb barutun yanacağı tweb kalınlığını ifade eder ve barut her yöne doğru yanar. Geometride $4.657 dk = db$

$$tweb := 0.484 \text{ mm} \quad dk := db - 4 \cdot tweb = 3.064 \times 10^{-3} \text{ m}$$

5 mm dış çapı olan silindirik 7 delikli barutun yanma uzunluğu 0.484 mm çıkmaktadır. Küresel barut olarak düşünürsek barut çapımız 0.484 mm olacaktır.

$$Taneçapı := 0.484 \text{ mm}$$

$$R1 := \frac{Taneçapı}{2} = 2.42 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$R2 := \sqrt[3]{(1 - Z1) \cdot R1^3} = 2.398 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Çekirdek harekete başladığı an barut yarıçapı $2.229 \times 10^{-4} \text{ m}$ düşmektedir. Bundan sonra basınç değerini kademe kademe artırarak barutun ne zaman biteceğine karar verebiliriz.

Basıncı kademe kademe arttırmak için bir ilk değer girmemiz gereklidir.

$$P_{ilkort} = 3 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$V_{yanmahızısabithacım} := P_{ilkort} \cdot \text{Burningrate} = 0.032 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad P_{max} \cdot \text{Burningrate} = 0.369 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t_{sabithacım} := \frac{(R_1 - R_2)}{V_{yanmahızısabithacım}} = 6.968 \times 10^{-5} \text{ s}$$

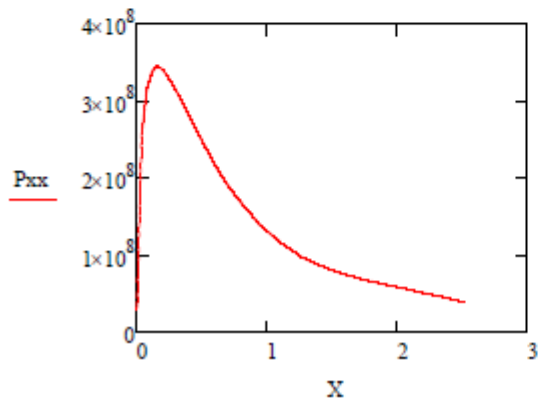
$$Z_1 = 0.027$$

$$R_3 := \sqrt[3]{(1 - Z_1) \cdot R_2^3} = 2.376 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$D_3 := 2 \cdot R_3 = 4.751 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$P_{xx} :=$

$W \leftarrow 0$
for $i \in 0 \dots \text{Sayıctı}$
$W \leftarrow P_{khareket}$ if $P_{x_i} \leq P_{khareket}$
$W \leftarrow P_{x_i}$ if $P_{x_i} > P_{khareket} \vee i > 100$
$C_i \leftarrow W$
C

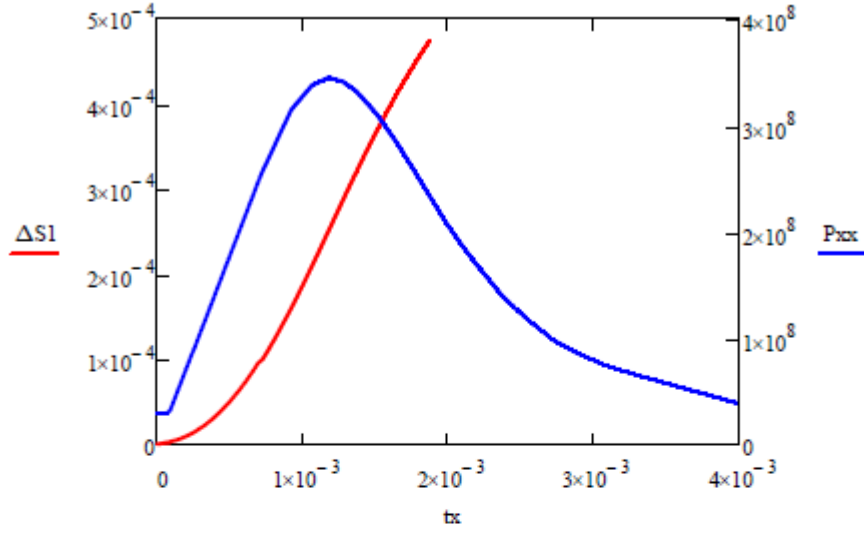


$$\begin{aligned}
\text{Yanmahızı} &:= \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{Sayıcı} \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 + (\text{Burningrate} \cdot \text{Pxx}_i) \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right. \\
\Delta S &:= \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Sayıcı} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 + (\text{Burningrate} \cdot \text{Pxx}_i) \cdot (\text{tx}_{i+1} - \text{tx}_i) \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right. \\
\text{Toplam} \Delta S &:= \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Sayıcı} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \sum_{j=0}^i \Delta S_j \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right. \\
\Delta S1 &:= \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Sayıcı} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \sum_{j=0}^i \Delta S_j \\ \text{break if } D3 < \sum_{j=0}^i \Delta S_j \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right. \\
\text{Tzaman} &:= \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Sayıcı} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \sum_{j=0}^i \Delta S_j \\ \text{break if } D3 < \sum_{j=0}^i \Delta S_j \\ C \leftarrow \text{tx}_i \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.
\end{aligned}$$

$$\Delta S1 =$$

	0
0	$5.849 \cdot 10^{-7}$
1	$1.17 \cdot 10^{-6}$
2	$1.755 \cdot 10^{-6}$
3	$2.34 \cdot 10^{-6}$
4	$2.925 \cdot 10^{-6}$
5	...

m



$$T_{\text{zaman}} = 1.876 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$\Delta t_{\text{sabithacim}} = 6.968 \times 10^{-5} \text{ s}$$

$$t_{\text{toplam}} := T_{\text{zaman}} + \Delta t_{\text{sabithacim}} = 1.945 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$V_{\text{yanmahızısabithacim1}} := \text{Pilkort} \cdot \text{Burningrate} = 0.032 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad P_{\text{max}} \cdot \text{Burningrate} = 0.369 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t_{\text{toplam2}} := \frac{\frac{D3}{(P_{\text{max}} \cdot \text{Burningrate} + \text{Pilkort} \cdot \text{Burningrate})}}{2} + \Delta t_{\text{sabithacim}} = 2.441 \times 10^{-3} \text{ s}$$

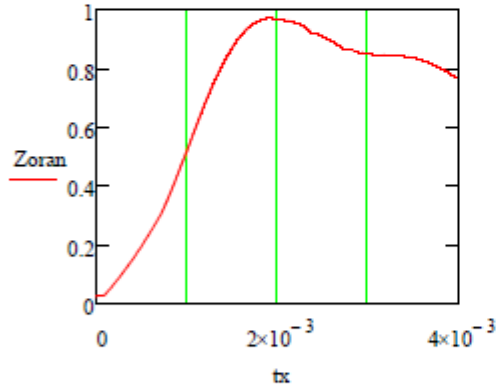
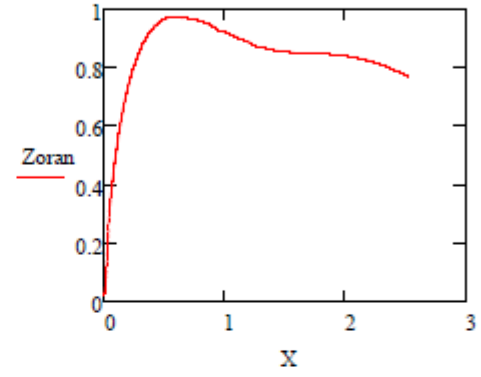
Zaman farkı Port basınç değerinden gelmektedir.

```

Zoran :=
  W ← 0
  for i ∈ 0.. Sayıcı
    W ← 
$$\frac{P_{xx_1} \cdot V_{yanma} - P_{xx_1} \cdot \frac{MB}{\rho b} + P_{xx_1} \cdot Alan \cdot X_1 + (\gamma - 1) \cdot (1 + \theta) \cdot \frac{1}{2} \cdot V_{x_1} \cdot V_{x_1} \cdot Mp}{MB \cdot Fbarut + P_{xx_1} \cdot MB \cdot \left( \frac{1}{\rho b} - \eta \right) + (\gamma - 1) \cdot (1 + \theta) \cdot \frac{1}{2} \cdot V_{x_1} \cdot V_{x_1} \cdot \frac{MB}{3}}$$

    Ci ← W
  C

```



```

Zt :=
  W ← 0
  for i ∈ 0.. Sayıcı
    A ← (1 - Z1) if (1 - Z1) < max(Zoran)
    A ← max(Zoran) if max(Zoran) ≤ (1 - Z1)
    break if Zorani ≥ A
    W ← i
    Ci ← W
  C

```

Z1 = 0.027

max(Zt) = 550

$$tx_{\max(Zt)+1} = 1.876 \times 10^{-3} s$$

$$tx_{\max(Zt)+1} + \Delta tsabithacim = 1.945 \times 10^{-3} s$$

$$Tzaman = 1.876 \times 10^{-3} s$$

$$ttoplam = 1.945 \times 10^{-3} s$$

$$\Delta tsabithacim = 6.968 \times 10^{-5} s$$

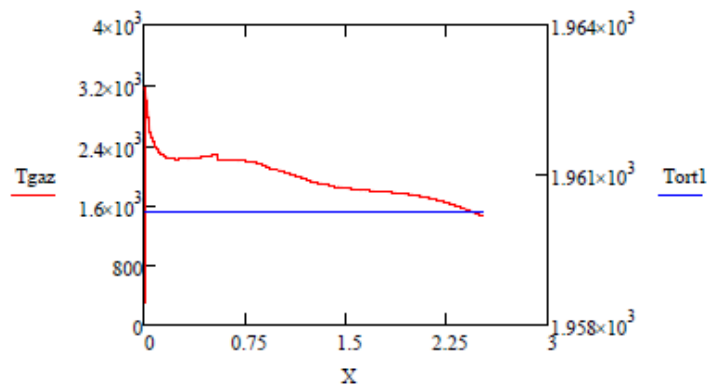
$$T_{gaz} := \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ P_0 \leftarrow Patm \\ \text{for } i \in 0.. Sayıcl \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 300 \cdot K \text{ if } i = 0 \\ \\ W \leftarrow \frac{P_{xx_i} \left[Vyanma + Alan \cdot X_i - MB \cdot \left(Zoran_i \cdot \eta + \frac{1 - Zoran_i}{\rho b} \right) \right]}{MB \cdot Rm \cdot Zoran_i} \text{ if } 0 < i \leq \max(Zt) \\ \\ W \leftarrow \frac{P_{xx_i} \left[Vyanma + Alan \cdot X_i - MB \cdot \left[1 \cdot \eta + \left(\frac{1 - 1}{\rho b} \right) \right] \right]}{MB \cdot Rm \cdot 1} \text{ if } i > \max(Zt) \\ \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$$

$$T_{gaztoplamlam} := \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. Sayıcl - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \frac{(T_{gaz_{i+1}} + T_{gaz_i})}{2} \cdot (X_{i+1} - X_i) \\ \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$$

$$Tort := \sum_{j=0}^{(Sayıcl-1)} \frac{T_{gaztoplamlam_j}}{(Xe)} = 1.96 \times 10^3 K$$

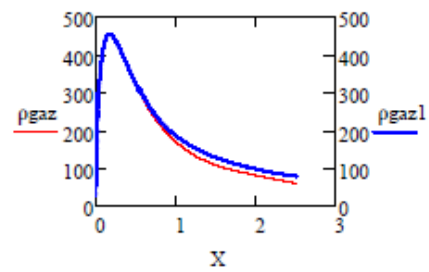
$$Talevsb = 2.712 \times 10^3 K$$

$$Tortl := \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. Sayıcl \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow Tort \\ \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$$



$$\rho_{\text{gaz}} := \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{Sayıcı} \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \left(\frac{\text{MB} \cdot \text{Zoran}_i}{\text{Vyanma} + \text{Alan} \cdot X_i - \frac{\text{MB}}{\rho_b} + \frac{\text{MB} \cdot \text{Zoran}_i}{\rho_b} - \text{MB} \cdot \text{Zoran}_i \cdot \eta} \right) \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array}$$

$$\rho_{\text{gaz1}} := \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{Sayıcı} \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \left(\frac{P_{xx_i}}{R_m \cdot T_{\text{gaz}_i}} \right) \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array}$$



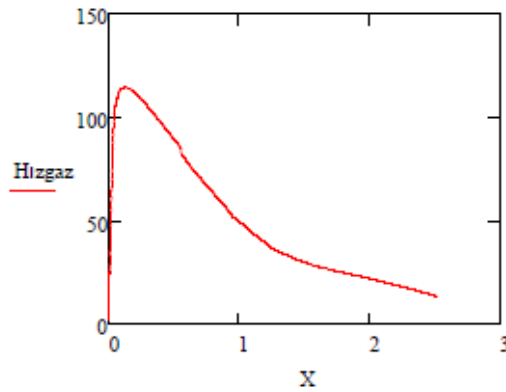
Gaz genişleme hızı: $V_{\text{gaz}} = CK \cdot T \cdot P^n$ şeklinde ifade edilir. K genişleme sabiti

$$CK := 0.000548$$

```

Hızgaz :=
  W ← 0
  for i ∈ 0.. Sayı1
    W ←  $\left[ CK \cdot \frac{T_{\text{gaz}_1}}{K} \cdot \left( \frac{P_{xx_1}}{\text{MPa}} \right)^{0.775} \right] \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ 
    Ci ← W
  C

```



Reynolds Sayısı $Re = (\rho_{\text{gaz}} \cdot v \cdot D) / \mu$ μ dinamik viskozite bu değerleri hesaplayabilmek için belirli sıcaklıkta tablo değerinden çıkan değerler ile mol sayılarına göre oranlayıp her noktadaki dinamik viskoziteleri hesaplamak gerekir.

Kullanacağımız formüller:

* $vg = C \cdot T \cdot P^n$ gazın genleşme hızı

* $Re = \rho \cdot vg \cdot d / \mu$ Reynolds sayısı

* $Nu_D = 0.023 \cdot Re \cdot D^{0.8} \cdot Pr^{0.3}$ Nusselts Sayısı

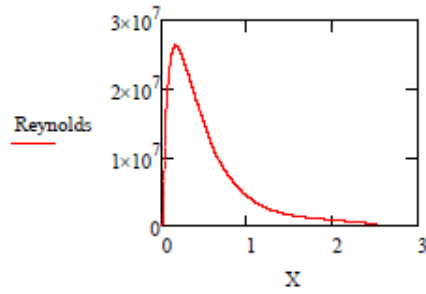
$T_{\text{ortC}} := \left(\frac{T_{\text{ort}}}{K} - 273.15 \right) \cdot C = 1.687 \times 10^3 \text{ C}$ $T_{\text{ort}} = 1.96 \times 10^3 \text{ K}$

$\mu_{\text{ort}} := 0.00005863 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = 5.863 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

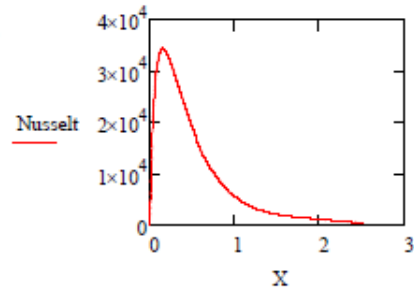
$Pr := 0.81808655$ Prandtl sayısı Nusselt sayısını hesap etmekte kullanacağız. Ortalama Sıcaklık değerine göre tablolardan çekildi

$$K_{\text{ısı}} := 0.26691527 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Isı iletim katsayısı tablolardan çekildi}$$

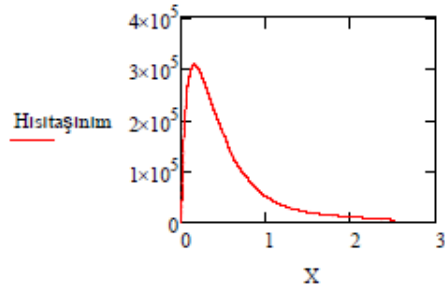
$$\text{Reynolds} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{Sayıcı} \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \frac{\rho_{\text{gaz}_1} \cdot \text{Hız}_{\text{gaz}_1} \cdot D_n}{\mu_{\text{ort}}} \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{cases}$$



$$\text{Nusselt} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{Sayıcı} \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0.023 \cdot \text{Reynolds}_i \cdot \left(\frac{D_n}{m} \right)^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.3} \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{cases}$$



$$\text{Hısıtışım} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{Sayıcı} \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \frac{K_{\text{ısı}} \cdot \text{Nusselt}_i}{D_n} \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{cases}$$



Namluyu istediğimiz sayıda kısımlara bölerek her bölüm için ortalama sıcaklığı hesap ederek katsayıları hesaplarız

Nabölüm := 2520 Namluyu bölmek istediğimiz bölüm sayısı

$$\text{Buzunluk} := \frac{Xe}{\text{Nabölüm}} = 1 \times 10^{-3} \text{ m} \quad \text{Herbölümün uzunluğu için}$$

$$\text{floor}\left(\frac{\text{Buzunluk} \cdot 1000}{m}\right) = 1$$

```

Tort2 :=
  W ← 0
  for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
    A ← floor(Buzunluk · 1000 / m) · i + floor(Buzunluk · 1000 / m)
    (A-1)
    ∑ (Tgazk)
    k = (0 + floor(Buzunluk · 1000 / m) · i)
    W ← (∑ (Tgazk) / floor(Buzunluk · 1000 / m))
    Ci ← W
  C

```

$$\text{Tort3} := \frac{\text{Tort2}}{K} - 273.15$$

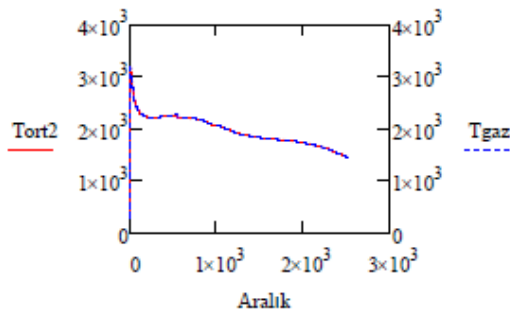
```

Aralık :=
  W ← 0
  for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
    W ← i
    Ci ← W
  C

```

Tort2 = K

	0
0	300
1	3.179 · 10 ³
2	3.177 · 10 ³
3	3.175 · 10 ³
4	3.172 · 10 ³
5	3.163 · 10 ³
6	3.145 · 10 ³
7	3.128 · 10 ³
8	...



PrCO2 := W ← 0

for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.7520 - 0.7661) + 0.7661 \quad \text{if } 0 \leq Tort3_i < 50$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.7464 - 0.7520) + 0.7520 \quad \text{if } 50 \leq Tort3_i < 100$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (0.7445 - 0.7464) + 0.7464 \quad \text{if } 100 \leq Tort3_i < 150$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (0.7442 - 0.7445) + 0.7445 \quad \text{if } 150 \leq Tort3_i < 200$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.7450 - 0.7442) + 0.7442 \quad \text{if } 200 \leq Tort3_i < 300$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.7458 - 0.7450) + 0.7450 \quad \text{if } 300 \leq Tort3_i < 400$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.7460 - 0.7458) + 0.7458 \quad \text{if } 400 \leq Tort3_i < 500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.7455 - 0.7460) + 0.7460 \quad \text{if } 500 \leq Tort3_i < 1000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.7745 - 0.7455) + 0.7455 \quad \text{if } 1000 \leq Tort3_i < 1500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (0.8815 - 0.7745) + 0.7745 \quad \text{if } 1500 \leq Tort3_i < 2000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (0.8815 - 0.7745) + 0.8815 \quad \text{if } 2000 \leq Tort3_i$$

$$C_i \leftarrow W$$

C

TABLO A-10 Çengel Fluid Mechanics Sayfa:895				Not: İdeal gazlar için cp, k, μ ve Pr özellikleri basıncıdan bağımsızdır.			
Karbon dioksit CO ₂							
Temp	Density	Specific Heat	Thermal Cond.	Thermal Diffus.	Dynamic Viscosity	Kinematic viscosity	Prandtl number
°C	ρ kg/m ³	Cp J/kg·K	k W/m·K	α m ² /s	μ kg/m·s	ν m ² /s	
-50	2,4035	746	0,01051	5,86E-06	0,0000113	4,70E-06	0,8019
0	1,9635	811	0,01456	9,14E-06	0,0000138	7,00E-06	0,7661
50	1,6597	866,6	0,01858	1,29E-05	0,0000161	9,71E-06	0,752
100	1,4373	914,8	0,02257	1,72E-05	0,0000184	1,28E-05	0,7464
150	1,2675	957,4	0,02652	2,19E-05	0,0000206	1,63E-05	0,7445
200	1,1336	995,2	0,03044	2,70E-05	0,0000228	2,01E-05	0,7442
300	0,9358	1060	0,03814	3,85E-05	0,0000268	2,87E-05	0,745
400	0,7968	1112	0,04565	5,15E-05	0,0000306	3,84E-05	0,7458
500	0,6937	1156	0,05293	6,60E-05	0,0000342	4,92E-05	0,746
1000	0,4213	1292	0,08491	1,56E-04	0,0000490	1,16E-04	0,7455
1500	0,3025	1356	0,10688	2,61E-04	0,0000611	2,02E-04	0,7745
2000	0,2359	1387	0,11522	3,52E-04	0,0000732	3,10E-04	0,8815

PrCO := W ← 0

for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.7328 - 0.7499) + 0.7499 \quad \text{if } 0 \leq Tort3_i < 50$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.7239 - 0.7328) + 0.7328 \quad \text{if } 50 \leq Tort3_i < 100$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (0.7191 - 0.7239) + 0.7239 \quad \text{if } 100 \leq Tort3_i < 150$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (0.7164 - 0.7191) + 0.7191 \quad \text{if } 150 \leq Tort3_i < 200$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.7134 - 0.7164) + 0.7164 \quad \text{if } 200 \leq Tort3_i < 300$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.7111 - 0.7134) + 0.7134 \quad \text{if } 300 \leq Tort3_i < 400$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.7087 - 0.7111) + 0.7111 \quad \text{if } 400 \leq Tort3_i < 500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.7080 - 0.7087) + 0.7087 \quad \text{if } 500 \leq Tort3_i < 1000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.7733 - 0.7080) + 0.7080 \quad \text{if } 1000 \leq Tort3_i < 1500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (0.9302 - 0.7733) + 0.7733 \quad \text{if } 1500 \leq Tort3_i < 2000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (0.9302 - 0.7733) + 0.9302 \quad \text{if } 2000 \leq Tort3_i$$

C_i ← W

C

Karbonmonoksit CO							
Temp	Density	Specific Heat	Thermal Cond.	Thermal Diffus.	Dynamic Viscosity	Kinematic viscosity	Prandtl number
°C	ρ kg/m³	Cp J/kg*K	k W/m*K	α m²/s	μ kg/m*s	ν m²/s	
-50	1,5297	1081	0,01901	1,15E-05	0,000014	9,01E-06	0,784
0	1,2497	1048	0,02278	1,74E-05	0,000016	1,30E-05	0,7499
50	1,0563	1039	0,02641	2,41E-05	0,000019	1,76E-05	0,7328
100	0,9148	1041	0,02992	3,14E-05	0,000021	2,27E-05	0,7239
150	0,8067	1049	0,0333	3,94E-05	0,000023	2,83E-05	0,7191
200	0,7214	1060	0,03656	4,78E-05	0,000025	3,43E-05	0,7164
300	0,5956	1085	0,04277	6,62E-05	0,000028	4,72E-05	0,7134
400	0,5071	1111	0,0486	8,63E-05	0,000031	6,14E-05	0,7111
500	0,4415	1135	0,05412	1,08E-04	0,000034	7,65E-05	0,7087
1000	0,2681	1226	0,07894	2,40E-04	0,000046	1,70E-04	0,708
1500	0,1925	1279	0,10458	4,25E-04	0,000063	3,28E-04	0,7733
2000	0,1502	1309	0,13833	7,03E-04	0,000098	6,54E-04	0,9302

PrH2O := W ← 0

for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.9944 - 1.0033) + 1.0033 \quad \text{if } 0 \leq Tort3_i < 50$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.983 - 0.9944) + 0.9944 \quad \text{if } 50 \leq Tort3_i < 100$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (0.9712 - 0.983) + 0.983 \quad \text{if } 100 \leq Tort3_i < 150$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (0.9599 - 0.9712) + 0.9712 \quad \text{if } 150 \leq Tort3_i < 200$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.9401 - 0.9599) + 0.9599 \quad \text{if } 200 \leq Tort3_i < 300$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.924 - 0.9401) + 0.9401 \quad \text{if } 300 \leq Tort3_i < 400$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.9108 - 0.924) + 0.924 \quad \text{if } 400 \leq Tort3_i < 500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.8639 - 0.9108) + 0.9108 \quad \text{if } 500 \leq Tort3_i < 1000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.8233 - 0.8639) + 0.8639 \quad \text{if } 1000 \leq Tort3_i < 1500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (0.7833 - 0.8233) + 0.8233 \quad \text{if } 1500 \leq Tort3_i < 2000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (0.7833 - 0.8233) + 0.7833 \quad \text{if } 2000 \leq Tort3_i$$

C_i ← W

C

Subuhari H ₂ O							
Temp	Density	Specific Heat	Thermal Cond.	Thermal Diffus.	Dynamic Viscosity	Kinematic viscosity	Prandtl number
°C	ρ kg/m ³	Cp J/kg*K	k W/m*K	α m ² /s	μ kg/m*s	ν m ² /s	
-50	0,9839	1892	0,01353	7,27E-06	0,000007	7,31E-06	1,0047
0	0,8038	1874	0,01673	1,11E-05	0,000009	1,11E-05	1,0033
50	0,6794	1874	0,02032	1,60E-05	0,000011	1,59E-05	0,9944
100	0,5884	1887	0,02429	2,19E-05	0,000013	2,15E-05	0,983
150	0,5189	1908	0,02861	2,89E-05	0,000015	2,81E-05	0,9712
200	0,464	1935	0,03326	3,71E-05	0,000017	3,56E-05	0,9599
300	0,3831	1997	0,04345	5,68E-05	0,000020	5,34E-05	0,9401
400	0,3262	2066	0,05467	8,11E-05	0,000024	7,50E-05	0,924
500	0,284	2137	0,06677	1,10E-04	0,000028	1,00E-04	0,9108
1000	0,1725	2471	0,13623	3,20E-04	0,000048	2,76E-04	0,8639
1500	0,1238	2736	0,21301	6,29E-04	0,000064	5,18E-04	0,8233
2000	0,0966	2928	0,29183	1,03E-03	0,000078	8,08E-04	0,7833

PrH2 :=

W ← 0

for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.7191 - 0.7071) + 0.7071 \quad \text{if } 0 \leq Tort3_i < 50$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.7196 - 0.7191) + 0.7191 \quad \text{if } 50 \leq Tort3_i < 100$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (0.7174 - 0.7196) + 0.7196 \quad \text{if } 100 \leq Tort3_i < 150$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (0.7155 - 0.7174) + 0.7174 \quad \text{if } 150 \leq Tort3_i < 200$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.7149 - 0.7155) + 0.7155 \quad \text{if } 200 \leq Tort3_i < 300$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.7179 - 0.7149) + 0.7149 \quad \text{if } 300 \leq Tort3_i < 400$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.7224 - 0.7179) + 0.7179 \quad \text{if } 400 \leq Tort3_i < 500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.7345 - 0.7224) + 0.7224 \quad \text{if } 500 \leq Tort3_i < 1000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.7795 - 0.7345) + 0.7345 \quad \text{if } 1000 \leq Tort3_i < 1500$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (1.1717 - 0.7795) + 0.7795 \quad \text{if } 1500 \leq Tort3_i < 2000$$

$$W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (1.1717 - 0.7795) + 1.1717 \quad \text{if } 2000 \leq Tort3_i$$

$$C_i \leftarrow W$$

C

Hidrojen H ₂							
Temp	Density	Specific Heat	Thermal Cond.	Thermal Diffus.	Dynamic Viscosity	Kinematic viscosity	Prandtl number
°C	ρ kg/m ³	Cp J/kg*K	k W/m*K	α m ² /s	μ kg/m*s	ν m ² /s	
-50	0,1101	12635	0,1404	1,01E-04	7,293E-06	6,62E-05	0,6562
0	0,08995	13920	0,1652	1,32E-04	8,391E-06	9,33E-05	0,7071
50	0,07603	14349	0,1881	1,72E-04	9,427E-06	1,24E-04	0,7191
100	0,06584	14473	0,2095	2,20E-04	1,041E-05	1,58E-04	0,7196
150	0,05806	14492	0,2296	2,73E-04	1,136E-05	1,96E-04	0,7174
200	0,05193	14482	0,2486	3,31E-04	1,228E-05	2,37E-04	0,7155
300	0,04287	14481	0,2843	4,58E-04	1,403E-05	3,27E-04	0,7149
400	0,0365	14540	0,318	5,99E-04	1,570E-05	4,30E-04	0,7179
500	0,03178	14653	0,3509	7,54E-04	1,730E-05	5,44E-04	0,7224
1000	0,0193	15577	0,5206	1,73E-03	2,455E-05	1,27E-03	0,7345
1500	0,01386	16553	0,6581	2,87E-03	3,099E-05	2,24E-03	0,7795
2000	0,01081	17400	0,548	2,91E-03	3,690E-05	3,41E-03	1,1717

```

PrN2 := W ← 0
for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.7114 - 0.7121) + 0.7121$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.7056 - 0.7114) + 0.7114$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (0.7025 - 0.7056) + 0.7056$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
  W ← 0.7025 if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.7078 - 0.7025) + 0.7025$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.7153 - 0.7078) + 0.7078$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.7215 - 0.7153) + 0.7153$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.7022 - 0.7215) + 0.7215$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.5969 - 0.7022) + 0.7022$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (0.4483 - 0.5969) + 0.5969$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (0.4483 - 0.5969) + 0.4483$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
  Ci ← W
C

```

Nitrojen N ₂							
Temp	Density	Specific Heat	Thermal Cond.	Thermal Diffus.	Dynamic Viscosity	Kinematic c	Prandtl number
°C	ρ kg/m ³	Cp J/kg·K	k W/m·K	α m ² /s	μ kg/m·s	ν m ² /s	
-50	1,5299	957,3	0,02001	1,366E-05	1,390E-05	9,09E-06	0,6655
0	1,2498	1035	0,02384	1,843E-05	1,640E-05	1,31E-05	0,7121
50	1,0564	1042	0,02746	2,494E-05	1,874E-05	1,77E-05	0,7114
100	0,9149	1041	0,0309	3,244E-05	2,094E-05	2,29E-05	0,7056
150	0,8068	1043	0,03416	4,058E-05	2,300E-05	2,85E-05	0,7025
200	0,7215	1050	0,03727	4,921E-05	2,494E-05	3,46E-05	0,7025
300	0,5956	1070	0,04309	6,758E-05	2,849E-05	4,78E-05	0,7078
400	0,5072	1095	0,04848	8,727E-05	3,166E-05	6,24E-05	0,7153
500	0,4416	1120	0,05358	1,083E-04	3,451E-05	7,82E-05	0,7215
1000	0,2681	1213	0,07938	2,440E-04	4,594E-05	0,000171	0,7022
1500	0,1925	1266	0,11793	4,839E-04	5,562E-05	0,000289	0,5969
2000	0,1502	1297	0,1859	9,543E-04	6,426E-05	0,000428	0,4483

```

PrO2 := W ← 0
        for i ∈ 0..(Nabölim - 1)
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.7053 - 0.7198) + 0.7198$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.7019 - 0.7053) + 0.7053$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
            W ← 0.7019 if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.7025 - 0.7019) + 0.7019$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.703 - 0.7025) + 0.7025$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.7023 - 0.703) + 0.703$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.7010 - 0.7023) + 0.7023$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.6986 - 0.7010) + 0.7010$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.6985 - 0.6986) + 0.6986$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (0.6873 - 0.6985) + 0.6985$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
            W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (0.6873 - 0.6985) + 0.6873$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
            C_i ← W
        C

```

Oksijen O ₂							
Temp	Density	Specific Heat	Thermal Cond.	Thermal Diffus.	Dynamic Viscosity	Kinematic viscosity	Prandtl number
°C	ρ kg/m ³	Cp J/kg*K	k W/m*K	α m ² /s	μ kg/m*s	ν m ² /s	
-50	1,7475	984,4	0,02067	1,20E-05	1,616E-05	9,25E-06	0,7694
0	1,4277	928,7	0,02472	1,87E-05	1,916E-05	1,34E-05	0,7198
50	1,2068	921,7	0,02867	2,58E-05	2,194E-05	1,82E-05	0,7053
100	1,0451	931,8	0,03254	3,34E-05	2,451E-05	2,35E-05	0,7019
150	0,9216	947,6	0,03637	4,16E-05	2,694E-05	2,92E-05	0,7019
200	0,8242	964,7	0,04014	5,05E-05	2,923E-05	3,55E-05	0,7025
300	0,6804	997,1	0,04751	7,00E-05	3,350E-05	4,92E-05	0,703
400	0,5793	1025	0,05463	9,20E-05	3,744E-05	6,46E-05	0,7023
500	0,5044	1048	0,06148	1,16E-04	4,114E-05	8,16E-05	0,701
1000	0,3063	1121	0,09198	2,68E-04	5,732E-05	1,87E-04	0,6986
1500	0,2199	1165	0,11901	4,64E-04	7,133E-05	3,24E-04	0,6985
2000	0,1716	1201	0,14705	7,14E-04	8,417E-05	4,91E-04	0,6873

```

Pr1 := | W ← 0
      | for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
      |   | W ←  $\frac{236 \cdot \text{PrCO}_2_i + 160 \cdot \text{PrCO}_i + 42 \cdot \text{PrH}_2\text{O}_i + 208 \cdot \text{PrH}_2_i + 86 \cdot \text{PrN}_2_i + 1 \cdot \text{PrO}_2_i}{(236 + 160 + 42 + 208 + 86 + 1)}$ 
      |   | Ci ← W
      | C

```

```

μCO2 := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Naböläm - 1)
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (1.612 \cdot 10^{-5} - 1.375 \cdot 10^{-5}) + 1.375 \cdot 10^{-5}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 50) \cdot 10^{-5}}{(50)} \cdot (1.84 - 1.612) + 1.612 \cdot 10^{-5}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 100) \cdot 10^{-5}}{(50)} \cdot (2.063 - 1.84) + 1.84 \cdot 10^{-5}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 150) \cdot 10^{-5}}{(50)} \cdot (2.276 - 2.063) + 2.063 \cdot 10^{-5}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 200) \cdot 10^{-5}}{(100)} \cdot (2.682 - 2.276) + 2.276 \cdot 10^{-5}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 300) \cdot 10^{-5}}{(100)} \cdot (3.061 - 2.682) + 2.682 \cdot 10^{-5}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 400) \cdot 10^{-5}}{(100)} \cdot (3.416 - 3.061) + 3.061 \cdot 10^{-5}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (4.90 - 3.416) + 3.416 \cdot 10^{-5}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (6.11 - 4.90) + 4.90 \cdot 10^{-5}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (7.32 - 6.11) + 6.11 \cdot 10^{-5}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (7.32 \cdot 10^{-5} - 6.106 \cdot 10^{-5}) + 7.32 \cdot 10^{-5}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   Ci ← W
        | C

```

```

μCO := W ← 0
      for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (1.863 \cdot 10^{-5} - 1.629 \cdot 10^{-5}) + 1.629 \cdot 10^{-5}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (2.080 \cdot 10^{-5} - 1.863 \cdot 10^{-5}) + 1.863 \cdot 10^{-5}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (2.283 \cdot 10^{-5} - 2.080 \cdot 10^{-5}) + 2.080 \cdot 10^{-5}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (2.472 \cdot 10^{-5} - 2.283 \cdot 10^{-5}) + 2.283 \cdot 10^{-5}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (2.812 \cdot 10^{-5} - 2.472 \cdot 10^{-5}) + 2.472 \cdot 10^{-5}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (3.11 \cdot 10^{-5} - 2.812 \cdot 10^{-5}) + 2.812 \cdot 10^{-5}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (3.379 \cdot 10^{-5} - 3.11 \cdot 10^{-5}) + 3.11 \cdot 10^{-5}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (4.557 - 3.379) + 3.379 \cdot 10^{-5}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (6.321 - 4.557) + 4.557 \cdot 10^{-5}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (9.826 - 6.321) + 6.321 \cdot 10^{-5}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (9.826 \cdot 10^{-5} - 6.321 \cdot 10^{-5}) + 9.826 \cdot 10^{-5}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
      | C_i ← W
      C

```

```

μH2 := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölum - 1)
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (9.427 \cdot 10^{-6} - 8.391 \cdot 10^{-6}) + 8.391 \cdot 10^{-6}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (1.041 \cdot 10^{-5} - 9.427 \cdot 10^{-6}) + 9.427 \cdot 10^{-6}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (1.136 \cdot 10^{-5} - 1.041 \cdot 10^{-5}) + 1.041 \cdot 10^{-5}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (1.228 \cdot 10^{-5} - 1.136 \cdot 10^{-5}) + 1.136 \cdot 10^{-5}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (1.403 \cdot 10^{-5} - 1.228 \cdot 10^{-5}) + 1.228 \cdot 10^{-5}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (1.57 \cdot 10^{-5} - 1.403 \cdot 10^{-5}) + 1.403 \cdot 10^{-5}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (1.73 \cdot 10^{-5} - 1.57 \cdot 10^{-5}) + 1.57 \cdot 10^{-5}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (2.455 \cdot 10^{-5} - 1.73 \cdot 10^{-5}) + 1.73 \cdot 10^{-5}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (3.099 - 2.455) + 2.455 \cdot 10^{-5}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (3.690 - 3.099) + 3.099 \cdot 10^{-5}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (3.690 \cdot 10^{-5} - 3.099 \cdot 10^{-5}) + 3.690 \cdot 10^{-5}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   Ci ← W
        | C

```

```

μN2 := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölum - 1)
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (1.874 \cdot 10^{-5} - 1.64 \cdot 10^{-5}) + 1.64 \cdot 10^{-5}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (2.094 \cdot 10^{-5} - 1.874 \cdot 10^{-5}) + 1.874 \cdot 10^{-5}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (2.3 \cdot 10^{-5} - 2.094 \cdot 10^{-5}) + 2.094 \cdot 10^{-5}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (2.494 \cdot 10^{-5} - 2.3 \cdot 10^{-5}) + 2.3 \cdot 10^{-5}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (2.849 \cdot 10^{-5} - 2.494 \cdot 10^{-5}) + 2.494 \cdot 10^{-5}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (3.166 \cdot 10^{-5} - 2.849 \cdot 10^{-5}) + 2.849 \cdot 10^{-5}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (3.451 \cdot 10^{-5} - 3.166 \cdot 10^{-5}) + 3.166 \cdot 10^{-5}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (4.594 - 3.451) + 3.451 \cdot 10^{-5}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (5.562 - 4.594) + 4.594 \cdot 10^{-5}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (6.426 - 5.562) + 5.562 \cdot 10^{-5}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (6.426 \cdot 10^{-5} - 5.562 \cdot 10^{-5}) + 6.426 \cdot 10^{-5}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   Ci ← W
        | C

```

```

μO2 := W ← 0
      for i ∈ 0..(Naböküm - 1)
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (2.194 \cdot 10^{-5} - 1.916 \cdot 10^{-5}) + 1.916 \cdot 10^{-5}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (2.451 \cdot 10^{-5} - 2.194 \cdot 10^{-5}) + 2.194 \cdot 10^{-5}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (2.694 \cdot 10^{-5} - 2.451 \cdot 10^{-5}) + 2.451 \cdot 10^{-5}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (2.923 \cdot 10^{-5} - 2.694 \cdot 10^{-5}) + 2.694 \cdot 10^{-5}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (3.35 \cdot 10^{-5} - 2.923 \cdot 10^{-5}) + 2.923 \cdot 10^{-5}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (3.744 \cdot 10^{-5} - 3.35 \cdot 10^{-5}) + 3.35 \cdot 10^{-5}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (4.114 \cdot 10^{-5} - 3.744 \cdot 10^{-5}) + 3.744 \cdot 10^{-5}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (5.732 - 4.114) + 4.114 \cdot 10^{-5}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (7.133 - 5.732) + 5.732 \cdot 10^{-5}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (8.417 - 7.133) + 7.133 \cdot 10^{-5}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
      |
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (8.417 \cdot 10^{-5} - 7.133 \cdot 10^{-5}) + 8.417 \cdot 10^{-5}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
      |
      | C_i ← W
      |
C

```

```

μH2O := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölim - 1)
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (1.08 \cdot 10^{-5} - 8.956 \cdot 10^{-6}) + 8.956 \cdot 10^{-6}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (1.265 \cdot 10^{-5} - 1.08 \cdot 10^{-5}) + 1.08 \cdot 10^{-5}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 100) \cdot 10^{-5}}{(50)} \cdot (1.456 - 1.265) + 1.265 \cdot 10^{-5}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 150) \cdot 10^{-5}}{(50)} \cdot (1.65 - 1.456) + 1.456 \cdot 10^{-5}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 200) \cdot 10^{-5}}{(100)} \cdot (2.045 - 1.65) + 1.65 \cdot 10^{-5}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 300) \cdot 10^{-5}}{(100)} \cdot (2.446 - 2.045) + 2.045 \cdot 10^{-5}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 400) \cdot 10^{-5}}{(100)} \cdot (2.847 - 2.446) + 2.446 \cdot 10^{-5}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (4.762 - 2.847) + 2.847 \cdot 10^{-5}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (6.41 - 4.762) + 4.762 \cdot 10^{-5}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-5}}{(500)} \cdot (7.808 - 6.41) + 6.41 \cdot 10^{-5}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (7.808 \cdot 10^{-5} - 6.41 \cdot 10^{-5}) + 7.808 \cdot 10^{-5}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   Ci ← W
        | C

μ1 := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölim - 1)
        |   W ←  $\frac{236 \cdot \mu CO2_i + 160 \cdot \mu CO_i + 42 \cdot \mu H2O_i + 208 \cdot \mu H2_i + 86 \cdot \mu N2_i + 1 \cdot \mu O2_i}{(236 + 160 + 42 + 208 + 86 + 1)}$ 
        |   Ci ← W  $\frac{kg}{m \cdot s}$ 
        | C

```

```

kCO2 := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (1.858 \cdot 10^{-2} - 1.456 \cdot 10^{-2}) + 1.456 \cdot 10^{-2}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (2.257 \cdot 10^{-2} - 1.858 \cdot 10^{-2}) + 1.858 \cdot 10^{-2}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 100) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (2.652 - 2.257) + 2.257 \cdot 10^{-2}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 150) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (3.044 - 2.652) + 2.652 \cdot 10^{-2}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 200) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (3.814 - 3.044) + 3.044 \cdot 10^{-2}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 300) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (4.565 - 3.814) + 3.814 \cdot 10^{-2}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 400) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (5.293 - 4.565) + 4.565 \cdot 10^{-2}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (8.491 - 5.293) + 5.293 \cdot 10^{-2}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (10.69 - 8.491) + 8.491 \cdot 10^{-2}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (11.52 - 10.69) + 10.69 \cdot 10^{-2}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (11.52 - 10.69) + 11.52 \cdot 10^{-2}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   Ci ← W
        | C

```

```

kCO := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (2.641 \cdot 10^{-2} - 2.278 \cdot 10^{-2}) + 2.278 \cdot 10^{-2}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (2.992 \cdot 10^{-2} - 2.641 \cdot 10^{-2}) + 2.641 \cdot 10^{-2}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (3.33 \cdot 10^{-2} - 2.992 \cdot 10^{-2}) + 2.992 \cdot 10^{-2}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (3.656 \cdot 10^{-2} - 3.33 \cdot 10^{-2}) + 3.33 \cdot 10^{-2}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 200) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (4.277 - 3.656) + 3.656 \cdot 10^{-2}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (4.86 \cdot 10^{-2} - 4.277 \cdot 10^{-2}) + 4.277 \cdot 10^{-2}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (5.412 \cdot 10^{-2} - 4.86 \cdot 10^{-2}) + 4.86 \cdot 10^{-2}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (7.894 - 5.412) + 5.412 \cdot 10^{-2}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (10.46 - 7.894) + 7.894 \cdot 10^{-2}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (13.83 - 10.46) + 10.46 \cdot 10^{-2}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   | W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (13.83 \cdot 10^{-2} - 10.458 \cdot 10^{-2}) + 13.83 \cdot 10^{-2}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   | Ci ← W
        | C

```

```

kH2 := | W ← 0
        | for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (0.1881 - 0.1652) + 0.1652$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (0.2095 - 0.1881) + 0.1881$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (0.2296 - 0.2095) + 0.2095$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (0.2486 - 0.2296) + 0.2296$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (0.2843 - 0.2486) + 0.2486$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (0.3180 - 0.2843) + 0.2843$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (0.3509 - 0.3180) + 0.3180$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 500)}{(500)} \cdot (0.5206 - 0.3509) + 0.3509$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1000)}{(500)} \cdot (0.6581 - 0.5206) + 0.5206$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 1500)}{(500)} \cdot (0.548 - 0.6581) + 0.6581$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
        |   |
        |   |  $W \leftarrow \frac{(Tort3_i - 2000)}{(500)} \cdot (0.548 - 0.6581) + 0.548$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
        |   |
        |   |  $C_i \leftarrow W$ 
        | C

```

```

kN2 := W ← 0
for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (2.746 \cdot 10^{-2} - 2.384 \cdot 10^{-2}) + 2.384 \cdot 10^{-2}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (3.09 \cdot 10^{-2} - 2.746 \cdot 10^{-2}) + 2.746 \cdot 10^{-2}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (3.416 \cdot 10^{-2} - 3.09 \cdot 10^{-2}) + 3.09 \cdot 10^{-2}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 150) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (3.727 - 3.416) + 3.416 \cdot 10^{-2}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 200) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (4.309 - 3.727) + 3.727 \cdot 10^{-2}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 300) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (4.848 - 4.309) + 4.309 \cdot 10^{-2}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 400) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (5.358 - 4.848) + 4.848 \cdot 10^{-2}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (7.938 - 5.358) + 5.358 \cdot 10^{-2}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (11.79 - 7.938) + 7.938 \cdot 10^{-2}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (18.59 - 11.79) + 11.79 \cdot 10^{-2}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
  W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (18.59 - 11.79) + 18.59 \cdot 10^{-2}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
  C_i ← W

```

C

```

kO2 := W ← 0
      for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 0)}{(50)} \cdot (2.867 \cdot 10^{-2} - 2.472 \cdot 10^{-2}) + 2.472 \cdot 10^{-2}$  if  $0 \leq Tort3_i < 50$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 50)}{(50)} \cdot (3.254 \cdot 10^{-2} - 2.867 \cdot 10^{-2}) + 2.867 \cdot 10^{-2}$  if  $50 \leq Tort3_i < 100$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 100)}{(50)} \cdot (3.637 \cdot 10^{-2} - 3.254 \cdot 10^{-2}) + 3.254 \cdot 10^{-2}$  if  $100 \leq Tort3_i < 150$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 150)}{(50)} \cdot (4.014 \cdot 10^{-2} - 3.637 \cdot 10^{-2}) + 3.637 \cdot 10^{-2}$  if  $150 \leq Tort3_i < 200$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 200)}{(100)} \cdot (4.751 \cdot 10^{-2} - 4.014 \cdot 10^{-2}) + 4.014 \cdot 10^{-2}$  if  $200 \leq Tort3_i < 300$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 300)}{(100)} \cdot (5.463 \cdot 10^{-2} - 4.751 \cdot 10^{-2}) + 4.751 \cdot 10^{-2}$  if  $300 \leq Tort3_i < 400$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 400)}{(100)} \cdot (6.148 \cdot 10^{-2} - 5.463 \cdot 10^{-2}) + 5.463 \cdot 10^{-2}$  if  $400 \leq Tort3_i < 500$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (9.198 - 6.148) + 6.148 \cdot 10^{-2}$  if  $500 \leq Tort3_i < 1000$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (11.90 - 9.198) + 9.198 \cdot 10^{-2}$  if  $1000 \leq Tort3_i < 1500$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 1500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (14.71 - 11.90) + 11.90 \cdot 10^{-2}$  if  $1500 \leq Tort3_i < 2000$ 
      | W ←  $\frac{(Tort3_i - 2000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (14.71 - 11.90) + 14.71 \cdot 10^{-2}$  if  $2000 \leq Tort3_i$ 
      | C_i ← W
      C

```

```

kH2O := W ← 0
for i ∈ 0..(Nabölim - 1)
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 0) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (2.032 - 1.673) + 1.673 \cdot 10^{-2}$  if  $0 \leq \text{Tort3}_i < 50$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 50) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (2.429 - 2.032) + 2.032 \cdot 10^{-2}$  if  $50 \leq \text{Tort3}_i < 100$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 100) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (2.861 - 2.429) + 2.429 \cdot 10^{-2}$  if  $100 \leq \text{Tort3}_i < 150$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 150) \cdot 10^{-2}}{(50)} \cdot (3.326 - 2.861) + 2.861 \cdot 10^{-2}$  if  $150 \leq \text{Tort3}_i < 200$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 200) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (4.345 - 3.326) + 3.326 \cdot 10^{-2}$  if  $200 \leq \text{Tort3}_i < 300$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 300) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (5.467 - 4.345) + 4.345 \cdot 10^{-2}$  if  $300 \leq \text{Tort3}_i < 400$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 400) \cdot 10^{-2}}{(100)} \cdot (6.677 - 5.467) + 5.467 \cdot 10^{-2}$  if  $400 \leq \text{Tort3}_i < 500$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (13.623 - 6.677) + 6.677 \cdot 10^{-2}$  if  $500 \leq \text{Tort3}_i < 1000$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 1000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (21.30 - 13.62) + 13.62 \cdot 10^{-2}$  if  $1000 \leq \text{Tort3}_i < 1500$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 1500) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (29.18 - 21.30) + 21.30 \cdot 10^{-2}$  if  $1500 \leq \text{Tort3}_i < 2000$ 
  W ←  $\frac{(\text{Tort3}_i - 2000) \cdot 10^{-2}}{(500)} \cdot (29.18 - 21.30) + 29.18 \cdot 10^{-2}$  if  $2000 \leq \text{Tort3}_i$ 
  Ci ← W
C

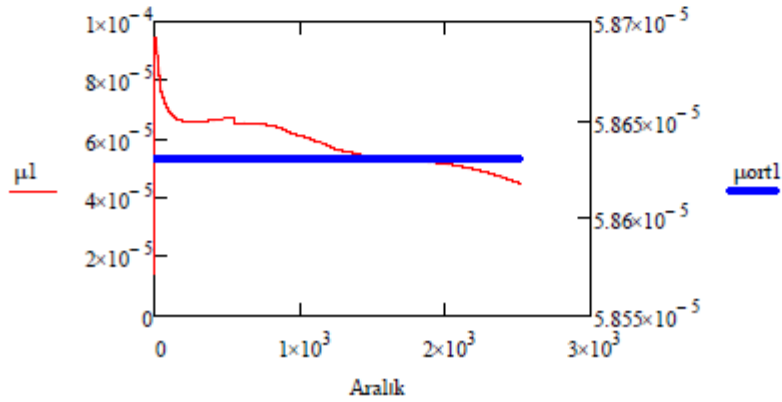
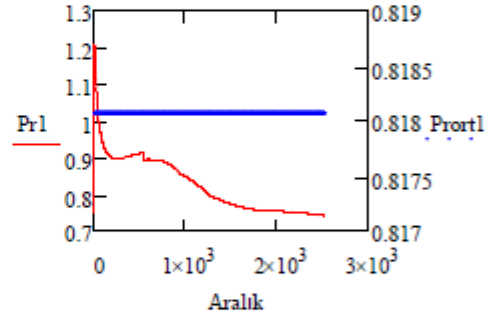
```

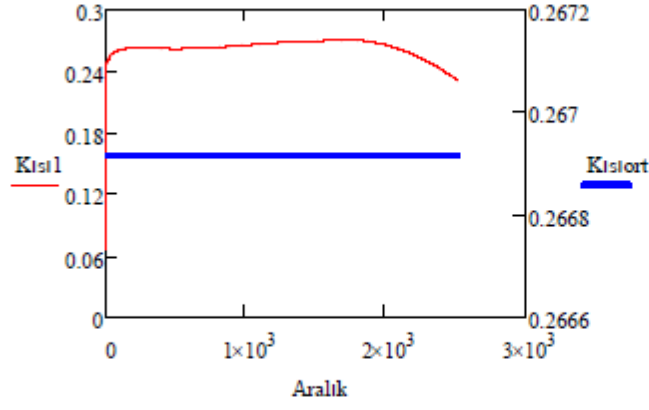
$K_{\text{Isl1}} := \left| \begin{array}{l} A \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(\text{Nabölüm} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} A \leftarrow \left[\frac{236 \cdot k\text{CO}_2 + 160 \cdot k\text{CO}_1 + 42 \cdot k\text{H}_2\text{O}_1 + 208 \cdot k\text{H}_2 + 86 \cdot k\text{N}_2 + 1 \cdot k\text{O}_2}{(236 + 160 + 42 + 208 + 86 + 1)} \right] \\ C_i \leftarrow A \cdot \frac{W}{m \cdot K} \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$

$\mu_{\text{ort1}} := \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(\text{Nabölüm} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \mu_{\text{ort}} \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$

$\text{Prort1} := \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(\text{Nabölüm} - 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow \text{Pr} \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$

$K_{\text{Islort}} := \left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(\text{Nabölüm}) \\ \quad \left| \begin{array}{l} W \leftarrow K_{\text{Isl}} \\ C_i \leftarrow W \end{array} \right. \\ C \end{array} \right.$

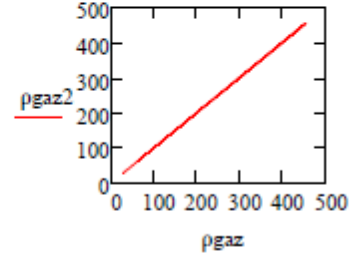




```

pgaz2 := | W ← 0
          | for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
          |   A ← ⌊ (Buzunluk · 1000) / m ⌋ · i + ⌊ (Buzunluk · 1000) / m ⌋
          |   (A-1)
          |   ∑ (pgazk)
          |   k = ⌊ (0 + ⌊ (Buzunluk · 1000) / m ⌋) · i ⌋
          |   W ← (∑ (pgazk) / ⌊ (Buzunluk · 1000) / m ⌋)
          |   Ci ← W
          | C

```

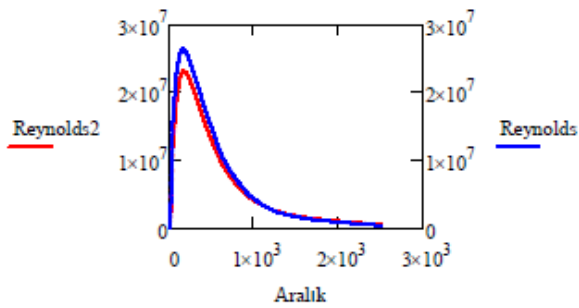
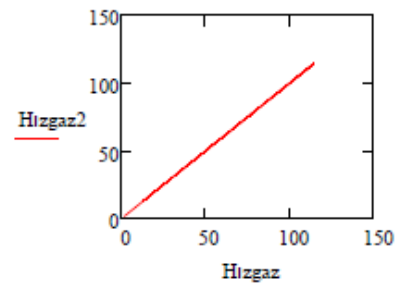


Hızgaz2 :=

$W \leftarrow 0$ for $i \in 0..(\text{Nabölüm} - 1)$ $A \leftarrow \left(\text{floor}\left(\frac{\text{Buzunluk} \cdot 1000}{m}\right) \right) \cdot i + \text{floor}\left(\frac{\text{Buzunluk} \cdot 1000}{m}\right)$ $\sum_{k = \left(0 + \text{floor}\left(\frac{\text{Buzunluk} \cdot 1000}{m}\right) \cdot i\right)}^{(A-1)} (\text{Hızgaz}_k)$ $W \leftarrow \frac{\quad}{\text{floor}\left(\frac{\text{Buzunluk} \cdot 1000}{m}\right)}$ $C_i \leftarrow W$	C
---	---

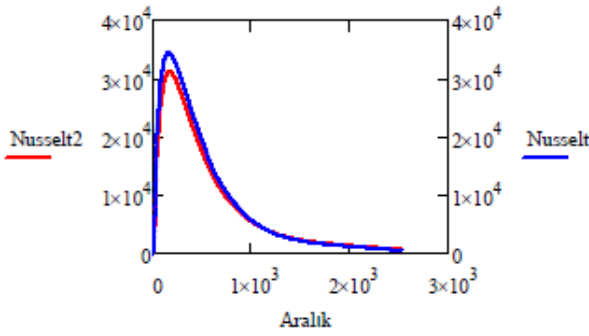
Reynolds2 :=

$W \leftarrow 0$ for $i \in 0..(\text{Nabölüm} - 1)$ $W \leftarrow \frac{\rho_{\text{gaz}2_i} \cdot \text{Hızgaz2}_i \cdot D_n}{\mu 1_i}$ $C_i \leftarrow W$	C
---	---

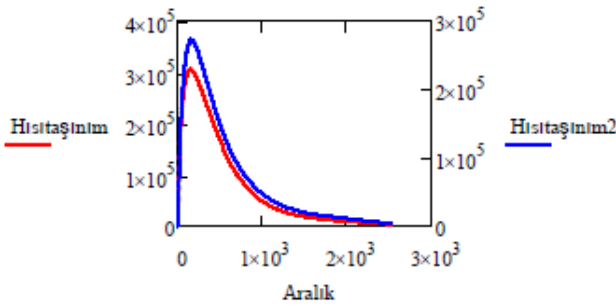


Nusselt2 :=

$W \leftarrow 0$ for $i \in 0..(\text{Nabölüm} - 1)$ $W \leftarrow 0.023 \cdot \text{Reynolds2}_i \cdot \left(\frac{D_n}{m}\right)^{0.8} \cdot (\text{Pr}1_i)^{0.3}$ $C_i \leftarrow W$	C
--	---



```
Hısıtaşım2 :=
  W ← 0
  for i ∈ 0..(Nabölüm - 1)
    Kısı1i·Nusselt2i
    W ← —————
    Dn
    Ci ← W
  C
```



$$\frac{\sum_{i=0}^{2520} \text{Hısıtaşım}_i}{2520} = 7.77 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3} \quad \max(\text{Hısıtaşım}) = 3.086 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$\frac{\sum_{i=0}^{2519} \text{Hısıtaşım2}_i}{2520} = 7.082 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3} \quad \max(\text{Hısıtaşım2}) = 2.746 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

$$\text{AA} := \pi \cdot \text{Dn} \cdot \text{Xe} = 0.238 \text{m}^2 \quad \text{AA1} := \pi \cdot \text{Dn} \cdot 1 \text{mm} \quad \text{AA1} = 9.425 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

$$QQ1 := \frac{\sum_{i=0}^{2520} H_{isitaşım1i}}{2520} \cdot (T_{ort} - 300 \cdot K) \cdot AA \cdot \max(tx) = 1.221 \times 10^5 J$$

$$QQ2 := \frac{\sum_{i=0}^{2519} H_{isitaşım2i}}{2519} \cdot (T_{ort} - 300 \cdot K) \cdot AA \cdot \max(tx) = 1.113 \times 10^5 J$$

$$E_{barut} = 6.783 \times 10^5 J$$

$$\frac{QQ1}{E_{barut}} = 0.18$$

$$\frac{QQ2}{E_{barut}} = 0.164$$

$$\theta = 0.17$$

Teta değerlerinin birbirini tutması yaptığımız hesapların ve kabullerin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

$$QQ3 := \frac{\sum_{i=0}^{159} H_{isitaşım2i}}{159} \cdot (T_{ort} - 300 \cdot K) \cdot AA \cdot tx_{159} = 8.637 \times 10^4 J$$

$$D_{ndıs} = 0.09 \text{ m} \quad D_n = 0.03 \text{ m}$$

$$X_{159} = 0.159 \text{ m} \quad V_{namluhacim} := \left(\frac{D_{ndıs}^2 - D_n^2}{4} \right) \cdot \pi \cdot X_{159} = 0.899 L$$

$$d_{namlu} := 7800 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad Namlukütle := V_{namluhacim} \cdot d_{namlu} = 7.013 kg$$

$$\text{Çeliközısı} := 605 \cdot \frac{joule}{kg \cdot K} \quad \frac{QQ3}{\text{Çeliközısı} \cdot Namlukütle} = 20.357 K$$

$$Q_{ort} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..(N_{abölüm} - 1) \\ \quad \begin{cases} W \leftarrow H_{isitaşım1i} \cdot AA1 \cdot i \cdot (T_{gaz_i} - 300 \cdot K) \cdot (tx_{i+1} - tx_i) + W \\ C_i \leftarrow W \end{cases} \\ C \end{cases}$$

$$\max(Q_{ort}) = 2.506 \times 10^4 J \quad \frac{\max(Q_{ort})}{E_{barut}} = 0.037$$

$$\text{Qort2} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Nabölüm} - 1) \\ \quad \begin{cases} W \leftarrow \text{Hısıtaşınm2}_i \cdot \text{AA1} \cdot (i + 1) \cdot (T_{\text{gaz}_i} - 300.\text{K}) \cdot (t_{x_{i+1}} - t_{x_i}) + W \\ C_i \leftarrow W \end{cases} \\ C \end{cases}$$

$$\max(\text{Qort2}) = 2.347 \times 10^4 \text{ J} \quad \frac{\max(\text{Qort2})}{\text{Ebarut}} = 0.035$$

$$\text{Hısıtaşı1} := \begin{cases} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0 \dots (\text{Nabölüm} - 1) \\ \quad \begin{cases} W \leftarrow \text{Hısıtaşınm2}_i \cdot (T_{\text{gaz}_i} - 300.\text{K}) \\ C_i \leftarrow W \end{cases} \\ C \end{cases}$$

$$\max(\text{Hısıtaşı1}) \cdot \text{AA1} = 5.032 \times 10^4 \text{ W}$$

$$\text{Hısıtaşı1ort} := \frac{\sum_{i=0}^{\text{Nabölüm}-1} \text{Hısıtaşı1}_i}{\text{Nabölüm} - 1} \cdot \text{AA} = 3.168 \times 10^7 \text{ W}$$

Namlu ısı transfer denklemlerinin çözümü için namlu içinden birim alandan olan ısı akısının sınır şartı olarak bilinmesi gereklidir.

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 kadar ki zaman aralığına karşılık gelen balistik döngü boyunca maruz kalır. Isı akısının değeri taşınım ısı transferi mekanizmasını oluşturan ısı taşınım kat sayısına ve gaz sıcaklığı ile namlu iç yüzey sıcaklığı arasındaki farka bağlıdır.

Namlu boyunca veya balistik döngü süresince namlu içindeki gaz sıcaklığı ve basıncı değişmemektedir. Ayrıca gazın özellikle hızı da değişmemektedir. Dolayısıyla ısı taşınım katsayısının ve bunun oluşturduğu ısı akısının hesaplanması mili saniyeler mertebesinde çok kısa sürede değişen bir çok parametreye bağlıdır.

Bu ısı akısının hesaplanması için Lawton tarafından verilen yarı-ampirik denklem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir balistik döngüde yani birim atışta birim alana transfer edilen ısı enerjisi Lawton tarafından verilen denklem ile hesaplanır.

$$\text{Lawton denklemleri: } H_{\text{isi}} = K_{\text{isi}} \cdot (T_{\text{max}} - T_i) / 1.082 \cdot (\pi / \alpha \cdot t_0)^{1/2}$$

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

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 dalgalanmasını yiv-set başlangıç bölgesinde ölçülmesiyle belirlenir ve Lawton tarafından aşağıdaki denklem ile hesaplanabileceği verilmiştir.

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

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

$M_r := M_p + M_B = 0.513 kg$ Sevk barutu ağırlığı ve çekirdek ağırlığı toplamı.

$V_m := V_0 = 1.07 \times 10^3 \frac{m}{s}$ Namlu Çıkış hızı

$P_{\max} = 3.45 \times 10^8 Pa$ Namlu içi Maksimum Basınç

$D_n = 0.03 m$ Namlu iç çapı

$$t_0 := \frac{0.8 \cdot M_r \cdot V_m}{P_{\max} \cdot D_n^2} = 1.414 \times 10^{-3} \text{ s} \quad \begin{array}{l} \text{Zaman} \\ \text{Sabiti-1} \end{array} \quad t_1 = 1.182 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Lawton denkleminde ısı akısının hesabı için gerekli olan (T_{max}-T_i) değeri Thomhill tarafından önerilen yarı ampirik denklem ile hesaplanır.

$$\frac{T_f - T_i}{T_{\max} - T_i} = 1,7 + 670 \frac{d^{2,22}}{m_p^{0,86}} \quad \begin{array}{l} \text{Thomhill} \\ \text{Denklemi} \end{array}$$

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

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

Putti Thomhillin denklemine namlu çıkış hızında eklemiştir. Thomhillin denklemini tutan sonuçlar verirken putti bu denkleme hızı ekleyince daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

T_f = 453.15 K Sevk barutu tutuşma sıcaklığı K

T_i = 293.15 K Ortam sıcaklığı 20 C⁰ olarak alınmıştır.

Namlu ısı iletim katsayısı

$$k := 42.5 \frac{\text{W}}{\text{m K}} = 42.5 \frac{\text{kg.m}}{\text{K.s}^3}$$

32CrMoV12-10 Thermal Conductivity
(40-45 W/m.K) Ambient Temperature

$$k2 := 60.5 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} = 60.5 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{K} \cdot \text{s}^3}$$

Yapısal Çelik ısı iletim katsayısı

$$\rho_{\text{namlu}} := 7800 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Namlu malzemesi yoğunluğu}$$

32CrMoV12-10 Specific Heat
(7800 kg/m³)

$$C_{p\text{namlu}} := 470 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{Namlu malzemesi özısıısı}$$

32CrMoV12-10 Specific Heat
(460-480 joule/kg/K) 50-100 C°

$$C_{p\text{namlu2}} := 434 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Yapısal Çelik 50-100 C°

$$\alpha := \frac{k}{\rho_{\text{namlu}} \cdot C_{p\text{namlu}}} = 1.159 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

ısı yayılım kat sayısı m²/s

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

$$\alpha2 := \frac{k2}{\rho_{\text{namlu}} \cdot C_{p\text{namlu2}}} = 1.787 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$d := D_n = 0.03 \text{ m} \quad m_p := M_B = 0.15 \text{ kg}$$

$$T_{\text{max}} := T_i + \frac{(T_f - T_i)}{\left[1.7 + 670 \cdot \frac{\left(\frac{d}{\text{m}}\right)^{2.22}}{\left(\frac{m_p}{\text{kg}}\right)^{0.86}} \cdot \sqrt{\frac{900}{V_m}} \cdot \sqrt{\frac{\text{m}}{\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}} \right]}$$

$$T_{\text{max}} = 346.359 \text{ K}$$

$$H_{\text{isi}} := k \cdot \frac{(T_{\text{max}} - T_i)}{1.082} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot t_0 = 4.092 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$H_{\text{isi2}} := k2 \cdot \frac{(T_{\text{max}} - T_i)}{1.082} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha2}} \cdot t_0 = 4.691 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

Namlu içerisinde geçen zaman t_x olarak adlandırdığımız zaman parametresinin son anı buda namluyu böldüğümüz sayıcı kadar $t_{x_{\text{Sayıcı}}} = t_{\text{namlu}}$

$$t_{\text{namlu}} := t_{x_{\text{Sayıcı}}} = 3.985 \times 10^{-3} \text{ s} \quad \max(t_x) = 3.985 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$q_{isiakisi} := \frac{H_{isi}}{\max(tx)} = 1.027 \times 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad q := q_{isiakisi} \cdot \frac{\text{mm}^2}{W} = 10.267$$

$$q_{isiakisi2} := \frac{H_{isi2}}{\max(tx)} = 1.177 \times 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad q2 := q_{isiakisi2} \cdot \frac{\text{mm}^2}{W} = 11.771$$

Toplam Kütle yaklaşımında herhangi bir zamanda tüm namlu et kalınlığında sıcaklığının aynı olduğunu ve sadece zamana göre değiştiğini kabul edilmektedir. Kabulun geçerliliği için Biot sayısının 0.1 den küçük olması gereklidir. Namlu gerçekte iç yüzeyinde çok yüksek bir ısı taşınım katsayısına maruz kalırken dış yüzeyinde oldukça düşük doğal taşınım olmaktadır. İç yüzeydeki ısı taşınımı etkin olduğundan Biot sayısı hesabında iç yüzeydeki ısı taşınım katsayısının kullanılması daha doğru olacaktır.

Bununla birlikte toplam kütle yaklaşımının vereceği sonuçları görmek açısından bu analitik yöntem kullanılarak kendi kendini ateşleme süresi aşağıda hesaplanmıştır.

$$h := 65 \cdot \frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \text{Namlu Dış yüzey ısı taşınım katsayısı } W/\text{m}^2/\text{K}$$

$$L_c := 0.002 \cdot \text{m} \quad L_c \text{ karakteristik uzunluk } \text{m}$$

$$\text{Biot} := h \cdot \frac{L_c}{k} = 3.059 \times 10^{-4}$$

$$\text{Biot2} := h \cdot \frac{L_c}{k2} = 2.149 \times 10^{-4} \quad \text{Yapısal Çelik}$$

$$L_{birim} := 0.002 \cdot \text{m}$$

$$A0 := \pi \cdot D_{ndis} \cdot L_{birim} = 5.655 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} D_{nset} &:= D_n \\ D_{ndis} &:= D_{ndis} \end{aligned}$$

$$A_{ii} := \pi \cdot D_{nset} \cdot L_{birim} = 1.885 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$m_{namlu} := \frac{(D_{ndis}^2 - D_{nset}^2)}{4} \cdot L_{birim} \cdot \pi \cdot \rho_{namlu} = 0.088 \text{ kg}$$

$$t_{00} := \frac{m_{namlu} \cdot C_{pnamlu}}{h \cdot A0} = 1.128 \times 10^4 \text{ s}$$

$$t_{002} := \frac{m_{namlu} \cdot C_{pnamlu2}}{h \cdot A0} = 1.042 \times 10^4 \text{ s}$$

$$H_{si} = 4.092 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$H_{si2} = 4.691 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$R_f := \frac{200}{60 \cdot s} = 3.333 \frac{1}{s}$$

Dakikada 200 atım

$$\theta\theta := \frac{H_{si} \cdot A_{ii} \cdot R_f}{h \cdot A_0} = 6.994 \times 10^3 \text{ K}$$

$$\theta\theta2 := \frac{H_{si2} \cdot A_{ii} \cdot R_f}{h \cdot A_0} = 8.019 \times 10^3 \text{ K}$$

$$T_k := (180 + 273.15) \cdot \text{K} = 453.15 \text{ K}$$

Kendi Kendine Ateşleme Sıcaklığı

$$T_i = 293.15 \text{ K}$$

$$t_c := t_{00} \cdot \left[-\ln \left[1 - \left[\frac{(T_k - T_i)}{\theta\theta} \right] \right] \right]$$

$$t_c = 261.042 \text{ s}$$

$$t_{c2} := t_{002} \cdot \left[-\ln \left[1 - \left[\frac{(T_k - T_i)}{\theta\theta2} \right] \right] \right]$$

$$t_{c2} = 209.931 \text{ s}$$

Yapısal Çelik