



**AĞIR SİLAH NAMLULARINDA ZORLANMIŞ KONVEKSİYON İLE
SOĞUTMANIN SAYISAL İNCELENMESİ**

Murat AKBULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2016

Murat AKBULUT tarafından hazırlanan “AĞIR SİLAH NAMLULARINDA ZORLANMIŞ KONVEKSİYON İLE SOĞUTMANIN SAYISAL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan : Doç.Dr. Hüseyin TOPAL

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye : Doç.Dr. Ercan DEĞİRMENCİ

Makine Mühendisliği, Kara Harp Okulu

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/06/2016

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

.....
Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Murat AKBULUT

21/06/2016

AĞIR SİLAH NAMLULARINDA ZORLANMIŞ KONVEKSİYON İLE SOĞUTMANIN SAYISAL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat AKBULUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2016

ÖZET

Ağır silah namlularında, seri atışlar yapıldığında, sevk barutunun yanması sonucu açığa çıkan gazlardan namlu iç yüzeyine büyük miktarda ısı transferi gerçekleşmektedir. Gerçekleşen bu ısı transferi ile birlikte namluda aşınma ve erozyon miktarları artmaktadır. Ayrıca ısınan namlu coof-off riskini de tetiklemektedir. Isınma sorununu önlemeye yönelik zorlanmış konveksiyonla soğutma tekniği ağır silahlarda uygulanmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak tanımlanan sınır koşulları altında 155 mm'lik doğal ve aktif soğutmalı namluların tek ve seri atışlardaki sıcaklık dağılımları, sonlu elemanlar programı olan ANSYS Mechanical modülü ile sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceden yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ile doğrulanmıştır. Hesaplamalarda değişken termofiziksel özellikler kullanılarak sıcaklık dağılımına olan etkileri gösterilmiştir. Sabit özellik kabulünün genel olarak atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığına etkisinin olmadığı görülmüştür. Sıvı soğutmalı namlularda parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; yarım dairesel, yarım elips ve dikdörtgen kanal geometrilerinde hesaplamalar yapılmıştır. Kanal geometrisinin sıcaklık değerleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Yarım dairesel kanal geometrisinde soğutma performansı; kanal sayısının 8, 10, 12, 14 ve 16 ve soğutucu akışkan hızının 2, 3 ve 4 katına çıkarıldığı durumlar için ayrı ayrı incelenmiştir. Kanal sayısı ve soğutucu akışkan hızının artmasının atışlar esnasındaki sıcaklık değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ancak etkilerinin giderek azaldığı ve son değerlere yaklaşıldıkça hissedilmediği gözlemlenmiştir. Bunlara ilave olarak; nano akışkanın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı sistemler için analizler gerçekleştirilmiştir. Suyun kullanıldığı sistemlere göre % 3'lük iyileştirme sağlanmıştır. Son olarak çoklu atış görevlerinde doğal ve aktif soğutmalı namlulardaki sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Doğal soğutmalı namlunun çoklu atış görevi için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Isı transferi, Ağır silah namlusu, Sonlu elemanlar yöntemi

Sayfa Adedi : 91

Danışman : Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA

NUMERICAL ANALYSIS OF FORCED CONVECTION COOLING
FOR HEAVY WEAPON BARRELS

(M. Sc. Thesis)

Murat AKBULUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2016

ABSTRACT

When firing with a heavy weapon barrel, the released gas from the burning of ammunition propellant to the inner surface of barrel results in large amounts of heat flow into the weapon bore surfaces. Together with this, heat transfer wear and erosion rates are increased in the barrel. In addition, heated barrel triggers the risk of cook-off. Forced convection cooling technique is implemented for preventing the heating problem in heavy weapons. In this study, first of all, under the defined boundary conditions, temperature distribution was solved numerically by finite element programs ANSYS Mechanical module in the 155 mm naturally and actively cooled barrels, for single round and continuous rounds. The results were validated by comparing numerical and experimental data from literature. The influences of the variation of thermophysical properties to the temperature distribution were shown in calculations. The assumption of constant thermophysical properties had no effect on the inner surface temperature at the end of rounds. Parametric studies are made in liquid cooling barrels. In this context, the calculations in semicircular, semielliptical and rectangular channel geometries were performed. It was observed that channel geometries had no significant effect on temperature values. The cooling performance in semicircular geometries was investigated separately when channel number were 8, 10, 12, 14 and 16, and the coolant velocity was increased 2, 3 and 4 times. It was found that the increase in channel number and coolant velocity decreased the temperatures during rounds. However, it was also observed that their effects got lesser and as it was closer to the final values they had no remarkable effect. Moreover, analysis were made in which nano fluids are used as coolant. Compared to the systems that use water, a 3 % improvement was obtained. Finally, natural and active cooling barrels' temperature values were compared in multiple fire missions. It was found out that barrels cooled naturally were insufficient for multiple fire missions.

Science Code : 91412

Key Words : Heat transfer, Heavy weapon barrel, Finite elements method

Page Number : 91

Supervisor : Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında yardımları ve yol göstermeleriyle akademik gelişimime olumlu katkı sağlayan saygıdeğer hocam Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA'ya çok teşekkür ederim. Değerli desteklerini esirgemeyen ve bu beni çalışmada cesaretlendiren Doç.Dr.Müh.Yb. Ercan DEĞİRMENCİ'ye ve arkadaşım Musa BAHADIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. AĞIR SİLAHLAR	13
3.1. Ana Parçalar	18
3.2. Alt Sistemler.....	19
3.3. Sevk Yakıtları.....	25
3.4. Mermiler.....	28
3.5. Tapalar.....	31
4. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON.....	33
4.1. Problemin Genel Tanımı	33
4.2. Fiziksel Model.....	34
4.2.1. Kullanılan koordinat sistemi	36
4.2.2. Varsayımlar	36
4.3. Matematiksel Modelin Tanımlanması.....	37
4.3.1. Isı iletim denklemi.....	37
4.3.2. Zorlanmış iç taşınım denklemi.....	37

Sayfa

4.4. Başlangıç ve Sınır Şartları.....	39
4.5. Namludaki Isı Transferinin Analitik Çözümü.....	40
4.6. Namludaki Isı Transferinin Sayısal Çözümü	42
4.6.1. Sonlu elemanlar yöntemi	43
4.6.2. Sonlu eleman analiz programı.....	44
4.6.3. Modelin oluşturulması	44
4.6.4. Çözüm ağının oluşturulması	45
4.6.5. Sınır şartlarının tanımlanması	46
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	49
5.1. Sayısal Çalışmanın Doğruluğunun Kontrol Edilmesi	49
5.1.1. Doğal soğutmalı saf namluda tek atış analizi ve doğrulanması	49
5.1.2. Doğal soğutmalı saf namluda seri atış analizi ve doğrulanması	51
5.1.3. Aktif soğutmalı namluda seri atış analizi ve doğrulanması	54
5.2. Mesh Sayısının Bağımsızlığı Çalışması	59
5.3. Değişken Termofiziksel Özelliklerin Sıcaklık Analizine Etkileri	61
5.4. Sayısal Bulgular	64
5.4.1. Kanal geometrisinin ısı transferine etkileri	65
5.4.2. Kanal sayısının ısı transferine etkileri.....	70
5.4.3. Soğutucu akışkan hızının ısı transferine etkileri	73
5.4.4. Soğutucu akışkan cinsinin ısı transferine etkileri.....	76
5.5. Çoklu Atış Görevi Sıcaklık Analizi	80
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Fırtına obüsünün dış taraftaki ekipmanların isimlendirmeleri.....	18
Çizelge 3.2. Fırtına obüsünün iç taraftaki ekipmanların isimlendirmeleri	24
Çizelge 4.1. Çelik ve kromun termofiziksel özellikleri	45
Çizelge 5.1. Suyun termofiziksel özellikleri.....	56
Çizelge 5.2. Alümina nano akışkanın farklı tanecik boyutu ve konsantrasyonları için ısı transfer katsayıları	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Sıvı soğutmalı namlu	3
Şekil 3.1. Ağır silahlar	13
Şekil 3.2. Fırtına obüsü ölçüleri.....	15
Şekil 3.3. Fırtına obüsünün dış görünüşü.....	17
Şekil 3.4. Fırtına obüsünün içten görünüşü	23
Şekil 4.1. Üç boyutlu namlu ve kesiti	34
Şekil 4.2. Analizlerde kullanılacak doğal soğutmalı namlu ölçüleri	34
Şekil 4.3. Yarım dairesel kanallı sıvı soğutmalı namlu.....	35
Şekil 4.4. Dikdörtgen kanallı sıvı soğutmalı namlu.....	35
Şekil 4.5. Yarım elips kanallı sıvı soğutmalı namlu.....	35
Şekil 4.6. Sıcaklık dağılımının hesaplanacağı namlu en kesiti	36
Şekil 4.7. Yarım dairesel kanal.....	38
Şekil 4.8. Yarım elips kanal	38
Şekil 4.9. Dikdörtgen kanal	38
Şekil 4.10. Namlunun kesit görünüşü	40
Şekil 4.11. Tek atış esnasında iç yüzeye giren zamana bağlı ısı akısı grafiği.....	47
Şekil 5.1. 17 atış boyunca iç yüzeye girilen zamana bağlı ısı akısı grafiği	51
Şekil 5.2. Doğal soğutmalı saf namluda seri atışlar boyunca minimum iç yüzey sıcaklıkları ve karşılaştırılması.....	52
Şekil 5.3. Yarım dairesel kanallı namluda seri atışlar boyunca minimum iç yüzey sıcaklıkları ve karşılaştırılması.....	57
Şekil 5.4. Namlu iç yüzeyindeki maksimum sıcaklığın eleman sayısına göre değişimi	60
Şekil 5.5. Namlu malzemesinin ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi	62
Şekil 5.6. Namlu malzemesinin özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Maksimum iç yüzey sıcaklığın sabit ve değişken özelliğe bağlı değişimi	63
Şekil 5.8. Minimum iç yüzey sıcaklığın sabit ve değişken özelliğe bağlı değişimi	64
Şekil 5.9. Maksimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi	69
Şekil 5.10. Minimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi	69
Şekil 5.11. Maksimum iç yüzey sıcaklığın kanal sayısına bağlı değişimi	72
Şekil 5.12. Minimum iç yüzey sıcaklığın kanal sayısına bağlı değişimi	72
Şekil 5.13. Maksimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan hızına bağlı değişimi	75
Şekil 5.14. Minimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan hızına bağlı değişimi	75
Şekil 5.15. Maksimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan cinsine bağlı değişimi	78
Şekil 5.16. Minimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan cinsine bağlı değişimi	78
Şekil 5.17. Nano akışkanın kullanıldığı sistemlerde maksimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi	79
Şekil 5.18. Nano akışkanın kullanıldığı sistemlerde minimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi	80
Şekil 5.19. Çoklu atış görevi için kaplama iç yüzeye girilen zamana bağlı ısı akısı grafiği	81
Şekil 5.20. Mühimmat yükleme esnasındaki iç yüzey sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması	84

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Fırtına obüsü ateş idare bilgisayarında kullanılan yazılım ara yüzü.....	21
Resim 3.2. Fırtına obüsünün komutan ve nişancı bölmesi	21
Resim 3.3. Fırtına obüsü mermi doldurma paneli.....	24
Resim 3.4. M3/A1 sevk barutu	26
Resim 3.5. M4/A1/A2 sevk barutu	26
Resim 3.6. Modüler barut	27
Resim 3.7. Mermi üzerinde bulunan rumuzlar ve anlamları	28
Resim 3.8. Tapa mekanizmaları	31
Resim 4.1. Sıcaklık dağılımının hesaplandığı en kesit yüzeyinin iki boyutlu cad çizimi	45
Resim 4.2. Doğal soğutmalı saf namlu modelinin çözüm ağı	47
Resim 4.3. Doğal soğutmalı saf namlu modelinin sınır şartları.....	47
Resim 5.1. Doğal soğutmalı saf namlunun tek atış esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	49
Resim 5.2. Doğal soğutmalı saf namlunun tek atış esnasında ısınma periyodu sonundaki sıcaklık dağılımı.....	50
Resim 5.3. Doğal soğutmalı saf namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	53
Resim 5.4. Doğal soğutmalı saf namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı	54
Resim 5.5. Yarım dairesel kanallı namlu modelinin geometrisi	55
Resim 5.6. Yarım dairesel kanallı namlu modelinin çözüm ağı.....	55
Resim 5.7. Yarım dairesel kanallı namlu modelinin sınır şartları	56
Resim 5.8. Yarım dairesel kanallı namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	58
Resim 5.9. Yarım dairesel kanallı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı....	59
Resim 5.10. Yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlu için en uygun çözüm ağı	61
Resim 5.11. Yarım elips kanallı namlu modelinin çözüm ağı	65

Resim	Sayfa
Resim 5.12. Dikdörtgen kanallı namlu modelinin çözüm ağı	66
Resim 5.13. Yarım elips kanallı namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	67
Resim 5.14. Dikdörtgen kanallı namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	67
Resim 5.15. Yarım elips kanallı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı	68
Resim 5.16. Dikdörtgen kanallı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı	68
Resim 5.17. Yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımları (a): 8 kanallı, (b): 10 kanallı, (c): 14 kanallı, (d): 16 kanallı	71
Resim 5.18. Yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımları (a): $V = 1$ m/s, (b): $V = 2$ m/s, (c): $V = 3$ m/s, (d): $V = 4$ m/s	74
Resim 5.19. Doğal soğutmalı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevleri esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	82
Resim 5.20. Yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevleri esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	82
Resim 5.21. Nano akışkanın kullanıldığı yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevleri esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_c	Kanal en kesit alanı (mm^2)
a	Dikdörtgen kanalın kısa kenar uzunluğu (mm)
B	Yarım elips kanalın asal eksen uzunluğu (mm)
b	Dikdörtgen kanalın uzun kenar uzunluğu (mm)
c_p	Özgül ısı (J/kg.K)
D	Yarım dairesel kanalın çapı (mm)
D_h	Hidrolik çap (mm)
H	h/k oranı
h	Isı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
h_{kanal}	Kanal içerisindeki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
J_0, J_1	Bessel fonksiyonu katsayıları
k	Isıl iletkenlik (W/m.K)
Nu_d	Nusselt sayısı
q_x	Kamadan x kadar uzaklıktaki ısı akısı (W/m^2)
P	Kanal çevresi (mm)
Pr	Prandtl sayısı
$r_{c,d}$	Ceket dış yarı çapı (mm)
$r_{c,i}$	Ceket iç yarı çapı (mm)
$r_{n,d}$	Namlu dış yarı çapı (mm)
$r_{n,i}$	Namlu iç yarı çapı (mm)
Re_d	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (K)
$T_{\text{akışkan}}$	Soğutucu akışkan sıcaklığı (K)
T_{dy}	Namlu dış yüzey sıcaklığı (K)
T_{iy}	Namlu iç yüzey sıcaklığı (K)
T_{∞}	Atmosfer sıcaklığı (K)

Simgeler**Açıklamalar**

t	Zaman (s)
V_{ort}	Akışkanın ortalama hızı (m/s)
Y₀, Y₁,	Bessel fonksiyonu katsayıları
α	Isıl yayılım katsayısı (m ² /s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
2C	Yarım elips kanalın yedek eksen uzunluğu (mm)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ASELSAN	Askerî Elektronik Sanayii
KBRN	Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer
NABK	NATO Armaments Ballistic Kernel
NATO	North Atlantic Treaty Organization
TNT	Trinitrotoluen

1. GİRİŞ

Muharebe sahasında, piyadenin hafif ve ağır silahlarının tesirleri dışında kalan hedefleri tahrip ve imha edebilen, çok mürettebatla kullanılan, ağır ve özel maksatlı mühimmatı uzak mesafelere atabilen ve genelde namlu çapı 60 kalibreden (14,5 mm) büyük olan modern silahlara ağır silah denir. Tank, top, obüs, havan ve roketatar gibi silahlar ağır silah grubunda yer alırlar. Bu silahlar sahip oldukları uzun menzil ve etkili ateş gücü ile dünya ordularının envanterlerinde, gerek savaş halinde gerekse barış halinde en etkili askeri araç olarak yerlerini almaktadırlar.

Küresel güç konumundaki ülkeler başta olmak üzere gelişmiş ülkeler, hızla gelişen teknolojiyi savunma sanayilerine uygulamaktadırlar. Bu açıdan değerlendirildiğinde; teknolojik üstünlük askeri üstünlük anlamına gelmektedir. Ülkemizin jeopolitik konumu ve teknolojik açıdan üstün devletlerin etrafımızdaki tehditlere destek olabilme potansiyelleri düşünüldüğünde; Silahlı Kuvvetlerimizin envanterlerinde yer alan silahların geliştirilmesi gerekmektedir.

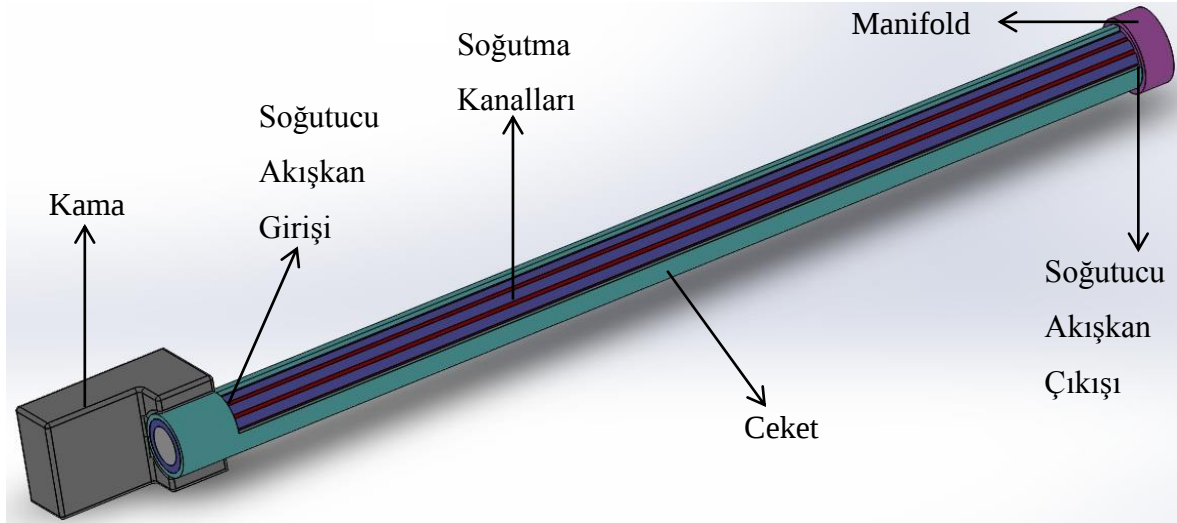
Silah sistemlerinin performanslarının artırılması yönündeki çalışmalar; barut, yakıt, mermi, namlu, ateşleme sistemi ve atış kontrol ekipmanlarını da kapsayacak şekilde bir bütünlük içinde devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar ancak balistik teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Balistik; kimya, yanma, akışkanlar mekaniği, malzeme, mukavemet, ısı transferi, mekanik, aerodinamik, uçuş mekaniği, meteoroloji, haritacılık, matematik ve bilgisayar programlama gibi bilim dallarını kullanarak merminin hareketini inceleyen çok disiplinli bir bilim dalıdır.

Ağır silah namlularında, seri atışlar yapıldığında, namlunun atış esnasında karşılaşacağı sorunlardan biri ısınma sorunudur. Silahın ateşlenmesiyle sevk barutu yanmaya başlar. Yanma neticesinde; yüksek basınç ve sıcaklıkta yanma gazları oluşur. Ortaya çıkan bu gazlar, merminin namluyu terk etmesine kadar geçen sürede, mermiye öteleme ve dönü enerjisi kazandırır. Aynı zamanda, bu yanma gazlarından namlu iç yüzeyine büyük miktarda ısı transferi gerçekleşmektedir. Seri atışlarda bir sonraki atış öncesinde namlunun soğuyabilmesi için kısa bir süre vardır. Bu sürede, namlu çevreye ancak küçük miktarda ısı transfer edebilmektedir. Sürekli atışlarda namlu ve atım yatağı sıcaklığı, müteakip atışlar

boyunca cook-off sıcaklığına doğru yükselmeye devam etmektedir. Cook-off sıcaklığına erişildiğinde; yükleme yapılan yanma odasında, mühimmatın patlayıcısı ile sıcak namlu yüzeyi arasındaki yeterli temasın kurulması ile beraber kısa bir süre sonra silah kendi kendine ateşlenecektir. Bu zamansız ateşleme, silahta ciddi hasarlara ve mürettebatı yaralamaya yol açabilir. Cook-off riskine ilave olarak, namluda meydana gelen aşınma ve erozyon olayları da namluya transfer olan ısı miktarı ile yakından ilgilidir. Aşınma ve erozyon, silahın doğruluğunu azaltmakta ve buna bağlı olarak da namlu ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenlerle; atış esnasında zamana bağlı namlu sıcaklık değerlerinin hesaplanması oldukça önem arz etmektedir.

Günümüzün çok boyutlu muharebe sahasında ağır silahların, hasmını saf dışı bırakacak öldürücü bir ateş gücüne sahip olması ve atış süratinin yüksek olması önem kazanmaktadır. Alev sıcaklığı 3700 K'e kadar çıkan yüksek enerjili sevk barutları ağır silahların performansını artırmaktadır [1]. Ancak bu sevk barutları namluda aşırı miktarda erozyon meydana getirmektedir. Ayrıca cook-off sıcaklığına erişmiş ve doğal soğumaya bırakılan bir namlunun tekrardan atmosfer sıcaklığına düşmesi yaklaşık 12 saat sürmektedir [2]. Çoklu atış görevi icra edecek bir ağır silah için bu süre, atış görevlerini zamanında yapamayacağı anlamına gelmektedir. Tüm bu koşullar değerlendirildiğinde; ağır silahlarda gerek kullanıcı güvenliği gerekse de silahın performansı açısından bazı soğutma tekniklerinin kullanılmasına ihtiyaç vardır.

Aşınmayı azaltıcı katkı maddelerinin kullanımı ve krom kaplama gibi pasif soğutma teknikleri, namluya transfer olan ısı üzerinde küçük bir etkiye sahiptirler. Aktif soğutma tekniklerinden olan zorlanmış sıvı/hava ile namlu soğutması ise namludan olan ısı kaybını arttırarak her bir atıştaki sıcaklık artışını azaltmaktadır. Sıvı soğutmalı namlularda namlu et kalınlığına belli aralıklarla kanallar açılmaktadır. Soğutucu akışkan namluyu soğutması için kanallara pompalanmaktadır.



Şekil 1.1. Sıvı soğutmalı namlu

Tez kapsamında; Sun ve Zhang'ın elde ettikleri zamana bağlı ısı akısı değerleri sınır şartı kabul edilerek, ANSYS 14 sonlu elemanlar programının Mechanical modülünde, tek ve seri atışlar için 155 mm'lik namluda sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceden yapılan ve deneysel sonuçlarla doğrulanmış sayısal çalışma ile karşılaştırılmıştır. Zorlanmış konveksiyonla soğutma tekniğinin performansını artırmak için farklı tasarımlar araştırılmıştır. Kanal geometrisi, kanal sayısı ve soğutucu akışkan debisi gibi parametrelerin soğutma üzerindeki etkileri grafikler halinde sunulmuştur. Ayrıca yeni nesil ısı transferi akışkanı olan nano akışkanlar kullanılarak da soğutma üzerindeki iyileştirmeler karşılaştırılmıştır. Aktif soğutma etkisinin kolaylıkla hissedilebildiği çoklu atış görevi için de hesaplamalar yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sun ve Zhang çalışmalarında saf namlu, krom kaplamalı namlu, zorlanmış konveksiyonla soğutmanın kullanıldığı namlu ve hem krom kaplamanın olduğu hem de sıvı soğutmanın uygulandığı namlular için tek boyutlu zamana bağlı ısı transferini incelemişlerdir. İç balistik kodundan elde ettikleri yanma gazlarının sıcaklığı ile ısı transfer katsayılarını sınır şartı olarak kullanmışlardır. Kaplama kalınlığı, suyun hızı, kanal çapı ve kanal sayısının maksimum sıcaklığa etkisini araştırmak için parametrik çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Namlu et kalınlığını 5 cm, soğutma kanal çapını 12 mm, kanal geometrisini yarım dairesel kanal, kanal sayısını 12 ve kaplama kalınlığını 200 μm olarak belirlemişlerdir. Krom kaplanmış namluda, kaplamanın namlu iç yüzeyinin maksimum sıcaklığını düşürdüğünü ancak maksimum sıcaklığa artış eğilimini düşüremediğini tespit etmişlerdir. Sıvı soğutmanın başlangıçta namlu iç yüzeyinin maksimum sıcaklığını düşüremediğini ancak daha sonraki atışlarda iç yüzey sıcaklığı artış eğilimini azalttığı ve belli bir süre sonra sanki-sabit hale ulaştırdığı sonucunu ortaya koymuşlardır. Her iki soğutma tekniğinin kullanıldığı namluda ise sadece iç yüzey maksimum sıcaklığının düşmediğini, aynı zamanda iç yüzey sıcaklığı artış eğiliminin de düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca kaplama kalınlığının maksimum sıcaklığa olan etkisinin diğer parametrelere göre daha belirgin olduğunu bulmuşlardır [3].

Bass ve Swardt, sıvı soğutmalı namludaki sıcaklık dağılımını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney düzeneğinde; 1,5 m uzunluğunda bir namlu, namluyu ısındırmak için elektrikli ısıtıcı ceketler, namlu boyunca suyun dolaşımını sağlamak için elektrikli pompa ve ısınan akışkanı tekrar giriş sıcaklığına kadar soğutmak için radyatörler kullanmışlardır. Maksimum ve en uygun debiyi, sistemin ısı çekebilme kabiliyetini ve doğal soğuma karakteristiklerini tanımlamak için testler yapmışlardır. Ayrıca farklı soğutucu akışkan kullanarak soğutma üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Doğal soğumanın zorlanmış soğutmaya göre çok yavaş olduğunu deneysel olarak tespit etmişlerdir. 16 l/dk'lık debide namlunun yarım saatte 80 $^{\circ}\text{C}$ 'den 40 $^{\circ}\text{C}$ 'ye düştüğünü gözlemlemişlerdir. Debinin 8 l/dk'dan 12 l/dk'ya çıkarıldığında soğutma kapasitesinin belirgin bir şekilde arttığını ancak 12 l/dk'dan 16 l/dk'ya çıkarıldığında soğutma kapasitesinin yine arttığını fakat çok belirgin bir fark görülmediğini gözlemlemişlerdir. En uygun debi olarak 16 l/dk göstermişlerdir. Soğutucu akışkan olarak; su yerine

% 100 antifriz kullanıldığında kayda değer bir farkın oluşmadığı sonucuna varmışlardır. Aynı şekilde radyatörün tekli ya da çiftli kullanmanın soğutma kapasitesini çok fazla etkilemediğini bulmuşlardır. Elfen sonlu eleman programını kullanarak yaptıkları analizlerde deneysel değerlere yakın sonuçlar elde etmişlerdir [2].

Mishra, Hameed ve Lawton atışta kullanılan mühimmat tipinin özelliğine bağlı namluya transfer olunan ısı transferini hesaplayabilen GUNTEMP8.EXE iç balistik kodunu geliştirmişlerdir. Aynı zamanda ANSYS 11 sonlu eleman programında tek boyutlu zamana bağlı namlu sıcaklık dağılımını modellemişlerdir. Namlu iç yüzeyinde, eksponansiyel olarak azalan ısı akısı sınır şartını uygulamışlardır. Geliştirdikleri modelin avantajı, mühimmata ve diğer işletme şartlarına bağlı iç balistik verileri ile entegre olabilmesidir. Yaptıkları analizlerin sonuçlarını kendi deney verileri ile karşılaştırmışlardır. Deneysel verileri, yiv ve setin başladığı yerden namlu ucuna doğru 5 cm uzaklıkta ölçmüşlerdir. Karşılaştırdıkları sonuçlarda maksimum hatayı % 3,69 çıkarmışlardır. Hata nedeni olarak, analizlerde namlunun sıcaklığa bağlı olarak değişen namlu termofiziksel özelliklerini sabit almalarını görmüşlerdir. Geliştirilmiş aşınma hesaplamaları ve cook-off tahmini için zamana bağlı namlu sıcaklık dağılımının doğru modellenmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır [4].

Mishra vd. aktif soğutma tekniğinin uygulandığı içten ve dıştan kanallı namlularda namlu sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Simülasyonları, 9 atışlık seri atışlar için deneysel verilerle doğrulama yaptıktan sonra dakikada 10 atış yapacak şekilde 40 atışın analizini gerçekleştirecek biçimde genişletmişlerdir. Doğal soğutma, içten kanallı soğutma ve dıştan kanallı soğutma için ayrı ayrı analizler gerçekleştirmişlerdir Doğal soğutmanın cook-off olayını önlemek için yetersiz kaldığını tespit etmişlerdir. İçten ve dıştan kanallı zorlanmış konveksiyonla soğutmanın ise cook-off ihtimalini ortadan kaldırdıklarını belirtmişlerdir. 40 atış sonunda namlu iç yüzey sıcaklığının 293 K'den; doğal soğutmalı namluda 423,09 K'e, içten kanallı namluda 356,23 K'e ve dıştan kanallı namluda 405,23 K'e yükseldiğini bulmuşlardır. Dıştan soğutma kanallı namlu ile içten soğutma kanallı namluyu kıyasladıklarında; aynı avantajı sağlamalarının yanında maliyetinin düşük olması ve içten kanallı namluların dayanabileceği maksimum basıncın düşük olması itibariyle dıştan soğutma kanallı namluların daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir [5].

Mishra vd. bir başka çalışmalarında daha önceki yaptıkları çalışmalarında geliştirdikleri model ile sıvı soğutma tekniğinin uygulanmış olduğu 155 mm'lik ağır silah namlusunda zamana bağlı namlu sıcaklık dağılımını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarında diğerlerinden farklı olarak; analizlerde namlu çeliğinin sıcaklığa bağlı değişken termofiziksel özelliklerini kullanmışlardır. Değişken özelliklerin soğutma üzerindeki etkisini, sabit kabul edilerek elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Analizler sonucunda, termofiziksel özelliklerin sabit kabulü ile namlu iç yüzeyinin maksimum sıcaklığının hesaplanmasında % 3,27'lik hata miktarının olduğu sonucuna varmışlardır. Atışlar sonundaki namlu iç yüzey sıcaklığındaki hatanın ise ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu tespit etmişlerdir. Namluda oluşan aşınma miktarı, namlu iç yüzey maksimum sıcaklığı ile ilişkili olduğu için sabit özellikler kabulünün ciddi hatalara yol açabileceğini belirtmişlerdir. Cook-off olayının ise atışlar sonundaki namlu iç yüzey sıcaklığı ile ilişkili olduğundan dolayı sabit özellikler kabulünün geçerli olabileceğini belirtmişlerdir [6].

Wu, Chen ve Xia, 155 mm'lik içten soğutma kanallı namludaki ısı transferini teorik olarak incelemişlerdir. MSC.Marc sonlu eleman programında tek boyutlu radyal yöndeki ısı transferini çözdürmüşlerdir. Sonuçları teorik çözümler ile doğrulamışlardır. Yaptıkları hesaplamalarda; doğal soğutmada namlu dış yüzeyinden taşınım ve ışınlama atmosfere olan ısı transferinin çok küçük olduğundan namlunun soğumasının yetersiz bulmuşlardır. Ancak namlu içerisine açılan kanallardan yapılan zorlanmış soğutmada namludan soğutucu akışkan vasıtasıyla büyük miktarda ısı çekilerek namlunun cook-off sıcaklığının altında tutulması sonucuna varmışlardır. Analizleri 43 atışlık seri atış görevi için gerçekleştirmişlerdir. Doğal soğutmalı namluda tek atış esnasında namlu iç yüzey sıcaklığının 4,4 ms'de maksimuma ulaştığını ve bu değer 945,8 K olduğunu bulmuşlardır. Teorik çözümde ise bu değeri 974,8 K hesaplamışlardır. Soğutma kapasitesi ile soğutma kanallarına giren akışkanın kanala girişi ile çıkışı arasındaki basınç kaybını dengelemek için en uygun akış debisinin seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır [1].

Witherell, Amerika Birleşik Devletleri Silahlı Kuvvetleri Araştırma, Geliştirme ve Mühendislik Merkezi Laboratuvarında hazırlamış olduğu teknik raporunda; aktif soğutma sistemine sahip 155 mm'lik XM297 topunun çoklu atış görevi altında namlu ve soğutucu akışkan sıcaklığını, sonlu eleman metodunu kullanarak geliştirilen bir model aracılığıyla hesaplamıştır. Farklı boyutlarda üç farklı radyatör kullanarak, radyatör kapasite faktörünün

namlu sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Namlu uzunluğunu 8392 mm ve krom kaplama kalınlığını 0,1016 mm olarak belirlemiştir. Namlu ve kaplama malzemesinin termal özelliklerini sıcaklığın fonksiyonu olarak ele almıştır. Çoklu atış görevini 2 aynı atış görevinden teşkil etmiştir. Her bir atış görevini; ilk olarak dakikada 10 atış sıklığıyla 30 atış daha sonra ise dakikada 3 atış sıklığıyla 13 atıştan oluşacak şekilde toplam 43 atıştan oluşturmuştur. Görevler arasında mühimmat yükleme süresini 12 dakika olarak belirlemiştir. Modeli, r-theta düzleminde 2 boyutlu sıcaklık dağılımı şeklinde oluşturmuştur. Sıcaklık dağılımının incelendiği nokta, yiv ve setin başladığı nokta ve buranın kamaya olan uzaklığını ise 1157 mm olarak vermiştir. Soğutucu akışkanı, yarı yarıya antifriz ile su karışımı şeklinde belirlemiştir.. Soğutucu akışkan debisini, 7,8 l/dk vermiştir. Başlangıçtaki namlu, dış ortam ve soğutucu akışkan sıcaklığını ise üniform ve 48,8 °C vermiştir. Kanal sayısı; 24, geometrisi; yarım dairesel, kanal çapı; 12 mm ve konumu; namlu merkezinden 228 mm uzaklıktaki çapta olacak şekilde soğutma kanallarını modellemiştir. Gerçekleştirdiği analizlerde; aktif soğutma sisteminin ilk atış görevinde, aktif soğutmanın olmadığı duruma göre küçük bir fayda ortaya koyduğunu ancak ikinci atış görevinde mühimmat yükleme yüzey sıcaklığını, 65 °C'nin üstünde önemli bir miktarda düşürdüğünü tespit etmiştir. Aktif soğutmanın uygulandığı namlularda ilk 43 atışlık görevde, 205 °C'lik namlu kritik iç yüzey sıcaklığına ulaşmadığını, doğal soğutmalı namluda ise 27. atışta bu değere ulaşıldığını belirtmiştir. İkinci 43 atışlık görevde, doğal soğutmalı namlu 48. atışta ve diğer aktif soğutmalı namlularda ise soğutma kapasitesi düşükten yükseğe doğru olacak şekilde sırasıyla 63, 68 ve 72. atışlarda kritik değere ulaşıldığını belirtmiştir. Kapasite faktörü düşük radyatörün kullanıldığı modelde, soğutucu akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığını 1. atış görevi sonunda 121 °C ve 2. atış görevi sonunda ise 148 °C hesaplamıştır. Soğutucu akışkanın kaynama problemi ihtimalinin olmaması için 2. atış görevi sonunda soğutucu akışkanın kanaldan çıkış sıcaklığının 121 °C'yi aşmaması gerektiğini belirtmiştir [7].

Gonzaga, Guedes ve Neto namluda tek boyutlu zamana bağlı sıcaklık dağılımını değişkenlerine ayırma metodunu kullanarak tamamen analitik olarak çözmüşlerdir. Çalışmalarında, dış yarı çapları 107,5 ve 127,5 mm olan farklı et kalınlıklarına sahip 155 mm'lik doğal soğutmalı namluları ele almışlardır. İç yüzey sınır şartı için Lawton ve Wu'nun kullandığı eksponansiyel olarak azalan ısı akısını belirlemişlerdir. Hesaplamaları tek ve dakikada 10 atış sıklığıyla 10 atışlık seri atışlar için yapmışlardır. Tek atışta, namlu iç yüzey maksimum sıcaklığını $r_{dış} = 107,5$ mm'lik namlu için 696,39 °C ve

$r_{dış} = 127,5$ mm'lik namlu için ise $700,67$ °C hesaplamışlardır. Bulunan sonuçların, daha önceki Lawton ve Wu'nun sonuçları ile kıyaslayarak uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca analitik çözümlerini, sayısal çözüm ile de karşılaştırmak için FlexPDE sonlu eleman programı ile $r_{dış} = 107,5$ mm'lik namludaki zamana bağlı sıcaklık dağılımını modellemişlerdir. Tek atışta $t = 20$ ms'de namlu iç yüzey sıcaklığını; sayısal çözümde 350 °C, analitik çözümde 390 °C bulmuşlardır. Seri atışlar için yaptıkları analitik çözümde, 10. atış sonunda namlu emniyet sıcaklığı olan 200 °C'ye çok yaklaşıldığını ve dolayısıyla 6 saniyede bir atış senaryosuyla yapılacak bir seri atışta, 11. atış sonunda sevk yakıtının kendiliğinden ateşlenip, silah mürettebatını tehlikeye atabileceğini belirtmişlerdir [8].

Chung, Shin, Oh, Yoo ve Nam 40 mm'lik bir namluda meydana gelen aşınma miktarını hesaplamak için ampirik bir denklem oluşturmuşlardır. Yaptıkları deneyde, namluya transfer olan ısı miktarını hesaplamak için, aynı atmosferik koşullarda iki farklı tip mühimmat ile atışlar gerçekleştirmişlerdir. Namlu dış yüzeyindeki sıcaklıkları, K-tipi termokupl ile ölçmüşlerdir. Ölçtükleri sıcaklık değerlerini, Fourier ısı iletim kanununda yerine koyarak, namlu et kalınlığı boyunca olan sıcaklık dağılımını hesaplamışlardır. Hesaplamalar sonucunda elde ettikleri ısı akısı değerlerini oluşturdukları ampirik denklemde yerine koyarak namlu üzerindeki aşınma miktarlarını hesaplamışlardır. Denklemden hesapladıkları aşınma ile deneysel olarak ölçtükleri aşınma değerlerinin benzer sonuçlar verdiğini ve ampirik denklemin doğrulunu tespit etmişlerdir [9].

Wu, seri ateşli sıvı soğutmalı bir deniz silahında, soğutucu akışkan hızı ve namlu kalınlığı gibi faktörlerin namlu sıcaklık dağılımına olan etkisinin analizini tek ve seri atışlar için gerçekleştirmiştir. Namlu kalınlıkları için 12, 18, 24, 30 ve 36 mm, soğutucu akışkan hızı için ise 0,5, 1, 1,5 ve 4,5 m/s değerlerini kullanmıştır. Soğutucu akışkan olarak deniz suyunu ve namlu malzemesi olarak da 50BA aramit elyafı kullanmıştır. Atış senaryosunu dakikada 130 atış sıklığıyla toplam 70 atış şeklinde planlamıştır. Namlu kalınlığı küçük olduğunda, soğutucu akışkan hızının artırılmasının, ısı çekimini arttırdığı ve böylelikle namlu yüzey sıcaklığını düşürdüğünü belirtmiştir. Namlu kalınlığı geniş olduğunda, sıvı soğutmanın etkisinin toplam soğutma zamanına ve küçük miktarda soğutucu akışkan hızına bağlı olduğunu belirtmiştir [10].

Hasenbein, Benet Silah Laboratuvarında hazırladığı teknik raporda, deneysel ölçümler ile elde edilen verileri kullanarak, 155 mm'lik XM181 ve XM199 top namlularında,

XM123E1 mühimmatının cook-off açısından zaman-sıcaklık ilişkisini incelemiştir. XM181 topu için namlu sıcaklık değerini 375-500 F aralığında belirlemiştir. Mühimmatı, ön ısıtma ile 145 F sıcaklığına getirerek namluya sürmüş ve toplam 19 atış gerçekleştirmiştir. 20. atış için mühimmatı atım yatağına sürerek, mühimmatın cook-off olma zamanını ve namlu iç yüzey sıcaklığını, iç yüzeye yakın yerlerdeki termokupllar vasıtasıyla belirlemiştir. Elde edilen verilerden mühimmatın cook-off olma zamanı-namlu iç yüzey sıcaklığı eğrisini oluşturmuştur. XM181 ve XM199 namlularının her ikisi için de benzer sonuçlar elde etmiştir [11].

Qu, Li ve Yang, seri atışlı silahın içten sıvı soğutmalı namlusunu ele alarak, yüksek sıcaklıklı ve yüksek basınçlı yanma gazlarının neden olduğu termal yük altındaki namlunun zamana bağlı sıcaklığını hesaplamak için, sıvı-katı birleşik ısı transferi matematiksel modeli geliştirmişlerdir. Sonlu eleman metodu kullanarak, namludaki sıcaklık dağılımına içten soğutmanın etkisini analiz etmişlerdir. 4,2 saniye boyunca toplam 50 atış gerçekleştirmişlerdir. İlk 15 atışta sıvı soğutmanın etkisinin hissedilmediğini ancak sonraki atışlarda, sıvı soğutmanın çok hızlı bir şekilde namluyu soğuttuğunu ve atışlar arasındaki süreyi düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Sıvı soğutmanın, namluda düzensiz sıcaklık dağılımına yol açtığını ve bunun da namluda düzensiz gerilme dağılımına neden olacağını belirtmişlerdir. Soğutucu akışkan hızının, açık bir şekilde soğutma performansına etki ettiğini ancak akışkan hızının belli bir değere kadar arttığında, soğutma performansına etkisinin sınırlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca içten sıvı soğutmalı namlu üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel verilerle kıyaslama yaparak, hesaplamaların doğruluğunu göstermişlerdir [12].

Qu vd. yaptıkları bir başka çalışmalarında dıştan sıvı soğutmalı namlu ile doğal soğutmalı namludaki zamana bağlı sıcaklık dağılımını sonlu eleman metodu ile incelemişlerdir. Hesaplamalarda soğutucu akışkanın buharlaşmasının soğutma üzerindeki etkisini de değerlendirmişlerdir. Deneysel ölçümler yaparak da buldukları sonuçları kıyaslamışlardır. Yaptıkları kıyaslamada en fazla hata miktarını % 5,68 hesaplamışlardır. Sonuçlarda, namlu cidarı boyunca geniş bir sıcaklık gradyanının olduğunu tespit etmişlerdir. Atış sayısının az olduğu durumlarda, dıştan sıvı soğutma ile doğal soğutma arasında belirgin bir fark olmadığı ancak atış sayısının artmasıyla dıştan sıvı soğutmanın önemli bir soğutma katkısı sağladığını belirtmişlerdir. Namlunun sıcaklık artışının % 3-5 arasında düştüğünü tespit

etmişlerdir. Ayrıca makul atış planları altında, dıştan sıvı soğutma tekniği kullanılarak namlu ömrünün ilerletilebileceğini belirtmişlerdir [13].

Literatür araştırması değerlendirildiğinde ağır silah namlularında doğal ve zorlanmış konveksiyonla soğutma üzerine birçok sayısal ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Ancak özellikle zorlanmış konveksiyonla soğutmalı namlularda parametrik sayısal çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar incelendiğinde hesaplamaların seri atışlar için gerçekleştirildiği görülmektedir. Mevcut çalışmada ise literatürden farklı olarak yarım elips ve dikdörtgen kanalların soğutma performansına olan etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak farklı tanecik boyutlarında ve konsantrasyonlarda nano akışkan kullanıldığında, ısı transferinin ne ölçüde etkilendiği araştırılmıştır. Bunlara ilave olarak doğal ve aktif soğutmalı namluların çoklu atış görevi sıcaklık analizleri yapılmıştır. Hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar grafiklerle mukayese edilmiştir.

3. AĞIR SİLAHLAR

Hafif silahlardan daha büyük çaplı ve genelde namlu çapı 60 kalibreden (14,5 mm veya 0,57 inç) büyük olan, hedef üzerindeki tahrip gücü yüksek, menzili uzun ve birden fazla personel veya çeşitli vasıtalar yardımıyla kullanılan, modern savaş silahları ağır silahlar olarak adlandırılır. Bugünkü ağır silahları şöyle sıralayabiliriz:

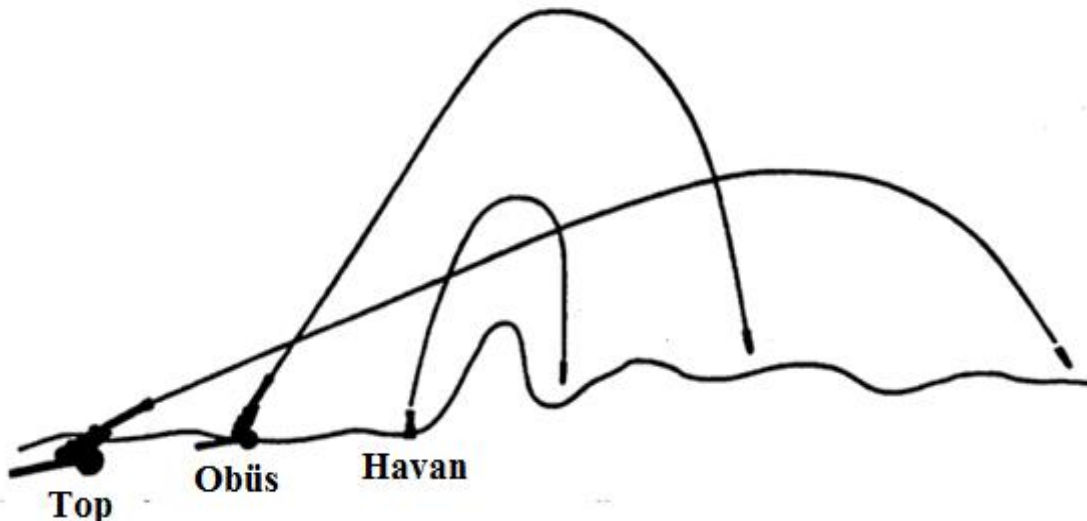
Havan; üst aç grubu ile atış yapabilen, mermi yolu dik, diğer ağır silahlar ile kıyaslandığında göreceli olarak kısa menzilli, namlusu kısa, ucuz ve basit yapıda olan ağır silaha denir.

Top; mermi yolu yatık, görerek veya görmeyerek yüksek açılarda ateş edebilen, ilk hızı yüksek ve namlu uzunluğu 30 çaptan fazla olan ağır silaha denir.

Obüs; top gibi görerek veya görmeyerek ateş edebilen ama topa nazaran daha hafif, ilk hızı az, mermi yolu dik ve namlu uzunluğu 20-30 çap uzunlukta olan ağır silaha denir.

Tank; muharebe ortamında top ve obüse göre daha ön saflarda yer alan, görerek atış yapan, diğer ağır silahlardan daha ağır bir zırha ve yüksek ateş gücünü sahip olan paletli ve zırhlı araca denir.

Roketatar; roketle hamilik eden, nişan alınmasını ve atış yapılmasını sağlayan tek namlulu veya çok namlulu bir ağır silahtır.

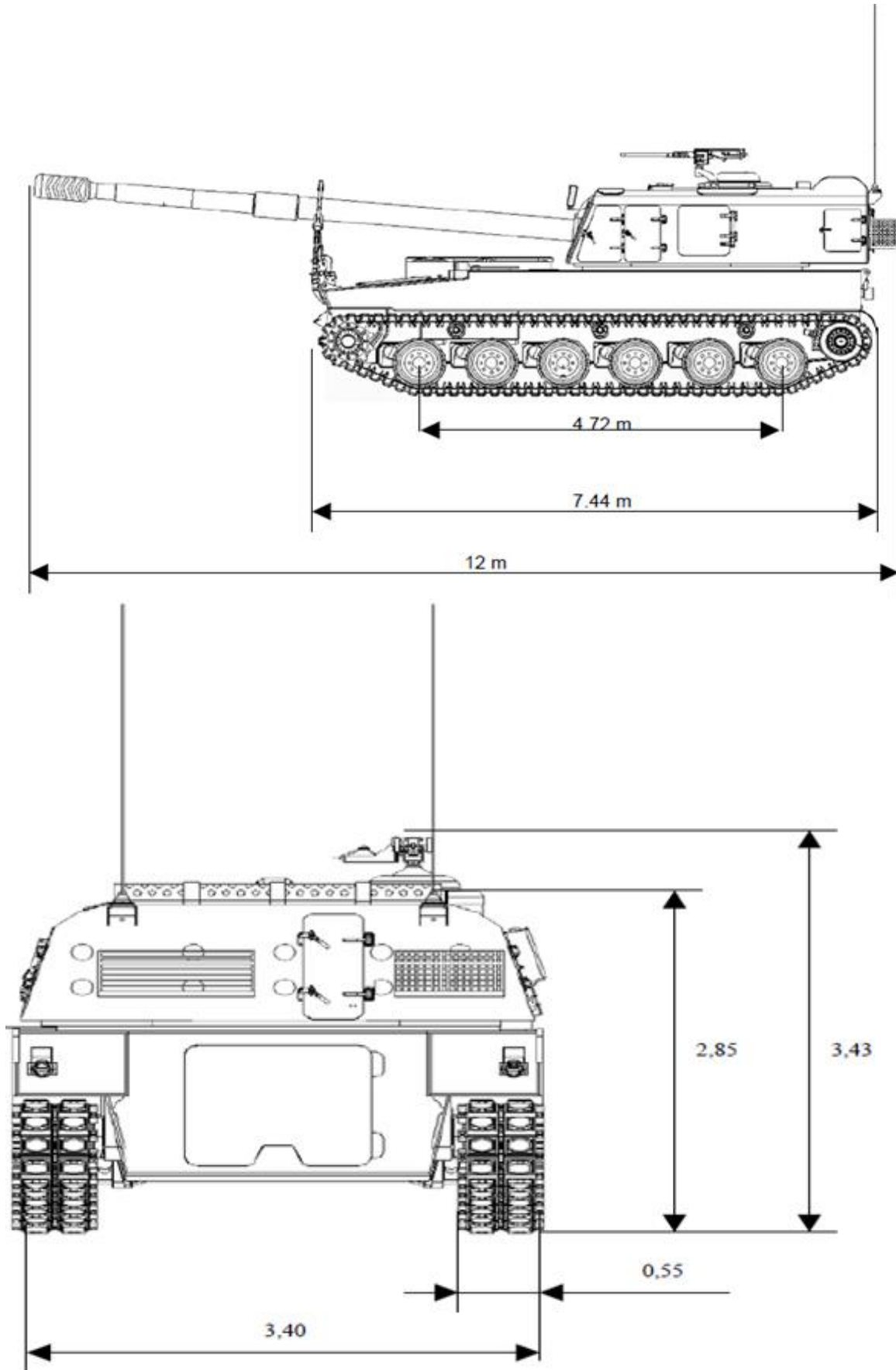


Şekil 3.1. Ağır silahlar

Bu tez kapsamında incelenecek ağır silah namlusu, ağır silah sınıfından obüs silahları içerisindeki T-155/52 Fırtına Kundağı Motorlu Obüs namlusudur. Bundan sonraki bölümde Fırtına obüsü hakkında bilgi verilecektir.

Obüsler, muharebe ortamında manevra birlik komutanına verilen görevin başarılmasını tehlikeye sokan hedefleri bir öncelik derecesine göre tahrip etmek veya baskı altında tutmak suretiyle, zamanında ve devamlı ateş desteği sağlayan ateşli silahlardır. Karada kullanılan obüsler 105 ile 203 mm arasında değişen çaplara sahiptirler ve hareket kabiliyetlerine göre ikiye ayrılırlar. Başka bir araçla çekilenler çekili obüs, kendi motoru ile yol alan ve genellikle paletli olanlar kundağı motorlu obüsler olarak adlandırılırlar. Bu ikisi arasında kısa mesafeleri kendi motoruyla gidebilen Panter gibi kendi yardımcı motoruna sahip çekili obüsler de bulunmaktadır [14].

Günümüzün teknolojik imkânları ile konvansiyonel muharebe ortamında, derinlikteki düşman birliklerini etkili bir şekilde ateş altına alma kabiliyetine sahip obüsler, düşmanın da öncelikli hedefleri arasında bulunmaktadır. Bu şartlar altında muharebe sahası içindeki obüslerin çok kısa süre içinde hedef tespit radarları ile belirlenmesi ve ateş altına alınması; düşman ateşlerine, Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) silahları ile yönlendirilmiş enerji silahlarına karşı aktif ve pasif koruma sistemlerine sahip olunmasını önemli hale getirmiştir. Kundağı motorlu obüsler, çekili obüsler ile karşılaştırıldıklarında; zırh koruması, hareket kabiliyeti, kısa sürede atışa hazır hale gelme, otomatik namlu yönlendirme sistemi ve KBRN kiti ile kirletilmiş bölgelerde görev yapabilme avantajlarına sahiptir.

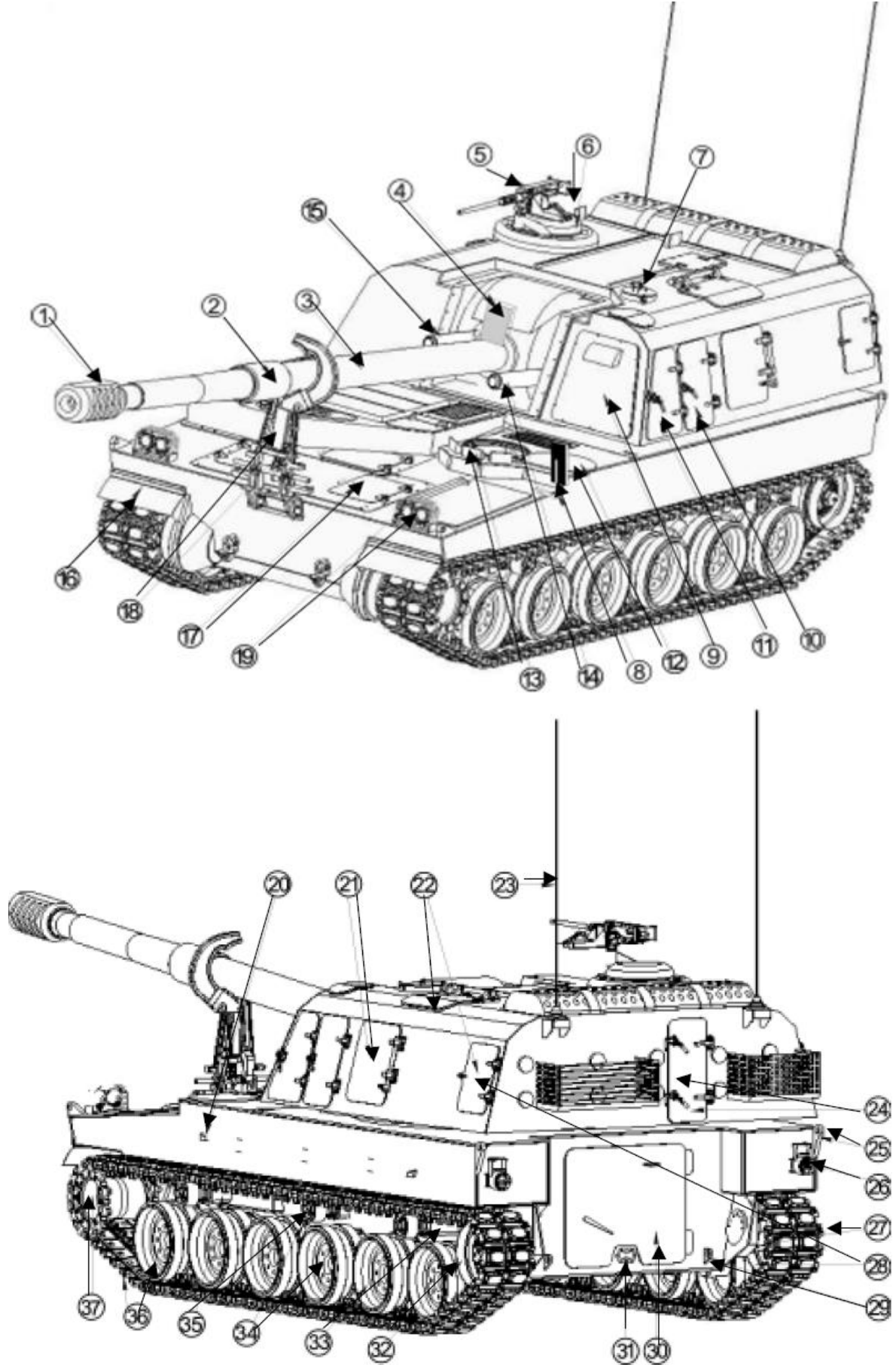


Şekil 3.2. Fırtına obüsü ölçüleri [15]

155 mm M44T ve M52T Kundağı Motorlu Obüs modernizasyon programlarından alınan dersler sonucunda 1995 yılında T-155 Kundağı Motorlu Fırtına Obüs programına başlanılmıştır. Fırtına programının tasarımı ve geliştirilmesinde topçu sınıfının taktik ve teknik kullanım konseptleri ve geleceğin muharebe sahası ateş destek ihtiyaçları özellikle dikkate alınmıştır.

Söz konusu taktik ve teknik kullanım konseptlerine uygun prototip geliştirme ve seri imalat faaliyetleri, Kara Kuvvetleri Teknik ve Proje Yönetim Daire Başkanlığı proje yönetiminde, 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı'nda (Arifiye) gerçekleştirilmiştir.

T-155 Kundağı Motorlu Fırtına Obüsü; uzun mesafeli ateş gücüne, navigasyon sistemine, otomatik atış kontrol sistemine ve mermi doldurma mekanizmasına sahip, yüksek hareket kabiliyeti ve dayanıklılığı olan, zırhlı ve paletli bir savaş aracıdır. Gerekğinde bir batarya ile birlikte, gerekğinde ayrı bir silah olarak kullanılabilir. Ateş İdare Merkezinden emir aldıktan sonraki 30 s içinde hedefe atış yapar, 90 saniye içerisinde de görevini tamamlayarak mevzi değiştirir. Otomatik mermi doldurma sistemi ile dakikada 6-8 atım atabilir, attığı atımın ilk hızını ölçerek gerekli düzeltmeleri yapar. Değişik yükseliş açıları ve barut miktarları kullanarak, üç mermiyi birden aynı hedefe, aynı zamanda isabet ettirir. Görerek ve 40 km. uzun menzilli atış yapabilme özellikleri sayesinde hem direkt destek, hem de genel destek atış görevlerini yerine getirir. Sahip olduğu sayısal haberleşme sistemi ile atış emri, metro raporu ve serbest mesaj alabilir [15].



Şekil 3.3. Fırtına obüsünün dış görünüşü [15]

Çizelge 3.1. Fırtına obüsünün dış taraftaki ekipmanların isimlendirmeleri [15]

1	Namlu Ağız Baskısı	20	Nişan Şahsı Çubukları Bağlama Yeri
2	Gaz Tahliye Silindiri	21	Personel Çıkış Kapısı
3	Silah Sistemi	22	Mermi Magazini Ulaşım Kapısı
4	İlk Hız Ölçme Radarı	23	Anten
5	Ağır Makineli Tüfek	24	Mermi Yükleme Kapısı
6	Top Komutanı Kulesi	25	Arka Kaldırma Kancaları
7	Görerek Atış Dürbünü Kapağı	26	Stop Lambaları
8	Yan Ayna	27	Paletler
9	Hidrolik Güç Paketi Kapağı	28	Mermi Magazin Ulaşım Kapısı
10	Hidrolik Akü Kapağı	29	Çekme Kancaları
11	Hidrolik Soğutma Sistemi Kapısı	30	Mürettebat Giriş Kapısı
12	Sürücü Kapağı	31	Çeki Kancası
13	Sürücü Periskopu	32	Gergi Tekerleri
14	Geri Tepme Sistemi	33	Palet Gergi Ayar Kolu
15	İrca Silindiri	34	Hidropnömatik Süspansiyon Ünitesi
16	Çamurluk	35	İstikamet Makaraları
17	Transmisyon Ulaşım Kapağı	36	Portör Tekerleri
18	Namlu Yol Kilidi	37	Cer Dişlileri
19	Farlar		

3.1. Ana Parçalar

Fırtına obüsü gövde, kule, namlu ve kundak ile askı donanımı olmak üzere dört ana parçaya sahiptir.

Gövde

Motor bölmesi, sürücü bölmesi, mürettebat bölmesi, namlu yol kilidi ve yardımcı akım sistemini kapsar. Gövde yapısı, 15 ve 20 mm'lik yüksek sertlikteki homojen zırh çeliğinden oluşur. Mürettebatı ve obüs alt sistemlerini makineli tüfek mermilerinden, parçacıklardan ve mayından koruması için tasarlanmıştır. 1000 BG'lik dizel motoruyla, yüksek hareket ve ivmelenme kabiliyetine sahiptir. Sahip olduğu içeriden komuta edilen namlu yol kilit sistemi vasıtasıyla, kısa sürede mevzi değiştirmek suretiyle, KBRN

taarruzu, düşmanın görerek ve görmeyerek ateşlerinin parça tesirlerine ve hava taarruzlarına karşı mürettebatın duyarlılığını azaltmaktadır.

Kule

Komuta merkezi, nişancı bölmesi, doldurucu yardımcısı bölmesi, doldurucu (magazin) bölmesini kapsar. Ana kule zırh levhalarının birleştirilmesiyle oluşmuştur. Kapı ve kapaklarla birlikte ana kule, alt sistem ve mürettebatın korunmasını sağlar [16].

Namlu ve Kundak

Namlu bölümü, kama bölümü, mermi itme bölümü ve geri tepme mekanizmasını kapsar. Namlu, 52 kalibre çap uzunluğunda, mono-blok olarak imal edilmiş olup, 23 litrelik yanma odası hacmine sahiptir. Namlu içerisinde 48 adet yiv/set bulunur. Namlu ve atım yatağına önceden basınç uygulaması (Otofretaj) yapılarak ömrü uzatılmıştır. Yukarı açılır kayar tip kama mekanizması mevcuttur. Kundak, silahın geri tepen kısmına (namlu ve kama) yataklık eder.

Askı Donanımı

İstikamet makaraları, gergi makarası, taşıyıcı tekerlekler ve paletleri kapsar. Palet-askı donanımı yüksek hızlarda engebeli arazilerde dahi mürettebatın görevini rahat bir şekilde yapabilmesine müsaade etmektedir. Aksi takdirde, hareket halinde iken araç sarsıntısına ve ivmelenmesine maruz kalan nişancının hedefe doğru nişan alması oldukça güçleşecektir. İstikamet makaraları, paletlerin dönerken istenilen yönde ilerlemesini ve palet atmasını engellemektedirler. Gergi tekerleği özellikle engebeli arazide paletlerin gergin bulunmasını sağlarken, taşıyıcı tekerlekler üzerine obüsün ağırlığı binmektedir.

3.2. Alt Sistemler

Fırtına obüsü; mermi doldurma sistemi, atış kontrol sistemi, namlu/kule yönlendirme sistemi, hidrolik güç paketi sistemi, namlu ve kundak sistemi, elektrik sistemi ve KBRN sistemi olmak üzere yedi alt sisteme sahiptir.

Mermi Doldurma Sistemi

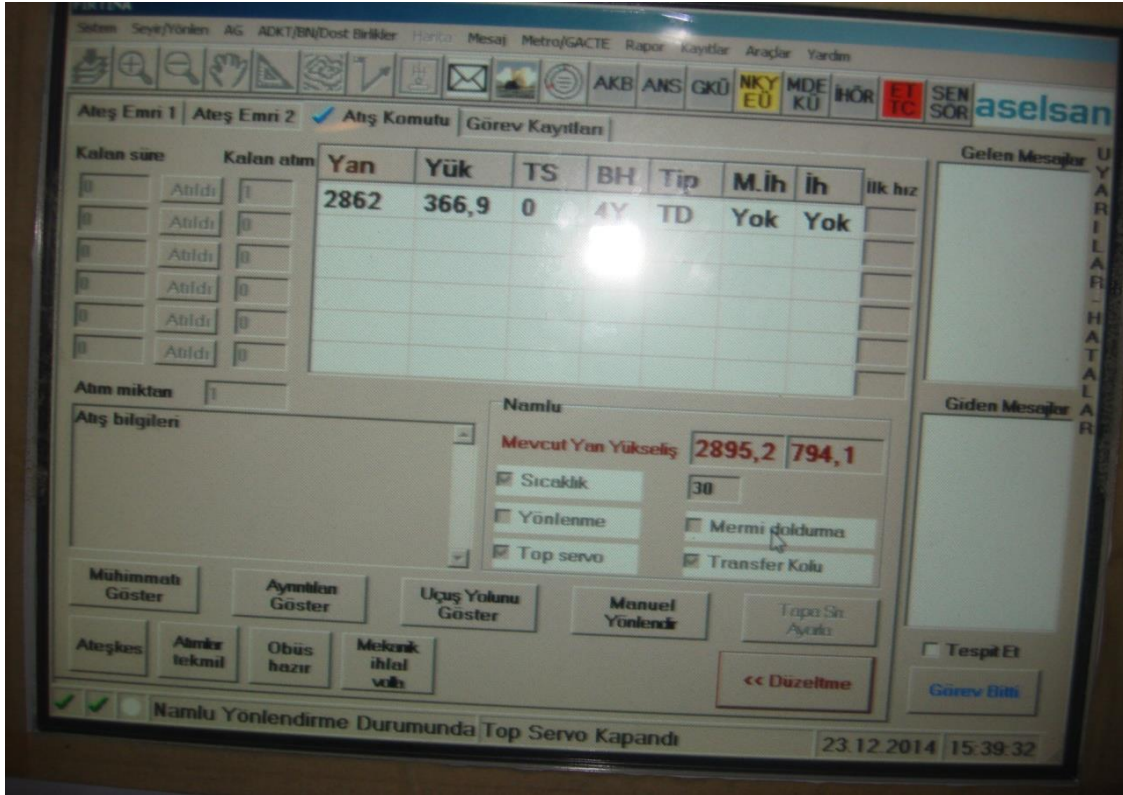
Mermi doldurma elektronik kontrol ünitesi, mermi magazin bölümü, mermi çekme teskeresi, mermi transfer kolu, mermi itme teskeresi ve mermi itme kontrol ünitesi yer almaktadır. Merminin magazine yüklenmesi manuel destekli elektrik gücüyle gerçekleşir. Servo kontrollü transfer kolu mermiyi magazinden mermi doldurma teskeresine nakleder. Kontrol birimleri mermi taşımayı kontrol eden otomatik test işleviyle donatılmıştır [16]. Mermi doldurma sistemi, otomatik, yarı otomatik ve manuel olarak kullanılır.

Atış Kontrol Sistemi

Ataletsel konumlama sistemi, ateş idare bilgisayarı, ilk hız ölçme radarı, nişancı görüntüleme ünitesi, güç kontrol ünitesi, sinyal dağıtım kutusu, elektronik tapa tanzim cihazı ve nişancı yardımcısı görüntüleme ünitesi yer almaktadır.

Ataletsel konumlama sistemi sayesinde tevcih hattı istikamet açısını 0,3 milyem ($0,016^\circ$), mevzi koordinatlarını 17,5 m, mevzi rakımını 10 m doğrulukla tespit edebilme imkân ve kabiliyetine sahiptir.

Ateş idare bilgisayarı ile teknik ateş idaresini çok kısa süre içerisinde doğru ve etkili bir şekilde hesaplayarak silaha tatbikine olanak sağlamaktadır. Bu durum, obüslerin kısa sürede reaksiyon göstermesini sağladığı gibi bataryaların takım veya kısımlar halinde kullanılmasına, ateş koordinasyon tedbirlerinin etkin bir şekilde uygulanmasına, bilgisayar destekli sayısal haberleşme yeteneği ile emniyetli ve güvenilir bir haberleşme ağının oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Ateş idare bilgisayarında kullanılan yazılım, NATO Topçu Balistik Kernel yazılımı (NATO Armaments Ballistic Kernel-NABK) kullanılarak geliştirilmiştir.



Resim 3.1. Fırtına obüsü ateş idare bilgisayarında kullanılan yazılım arayüzü

İlk hız ölçme radarı sayesinde düzeltme tanzimine olan ihtiyaç ortadan kalkmış olup, hedefler üzerinde baskın ateşi oluşturacak ve tanzimsiz tesir atış tekniğini kullanarak hedeflerin kısa sürede doğru ve etkin bir şekilde ateş altına alınmasını sağlamaktadır.

Namlu/Kule Yönlendirme Sistemi

Yükseliş dengeleme silindiri, yükseliş el pompası, joystick, yana dönüş dişli kutusu ve yan el çarkı, dengeleme el pompası, ışıklı sesli ikaz birimi yer almaktadır. Obüs ateş idare bilgisayarı tarafından elde edilen atış esasları namluya otomatik olarak ve çok kısa süre içerisinde tatbik edilebilmektedir. Bu özellik; atış süratinin artmasına, mürettebat hatalarından kaynaklanan aksaklıkların ortadan kalkmasına, aynı mevziiden kısa süre içerisinde birden fazla hedefin ateş altına alınabilmesine olanak sağlamaktadır. Sistem otomatik, yarı otomatik veya manuel olarak kullanılabilir şekilde dizayn edilmiştir.

Hidrolik Güç Paketi Sistemi

Hidrolik güç paketi, hidrolik güç paketi kontrol paneli, filtre dağıtım bloğu, soğutma sistemi ve hidrolik koruma/dağıtım bloğu yer almaktadır. Hidrolik gücü bir hat

şebekesinden geçirerek kontrol valfine, oradan da kule elemanlarına verir. Hidrolik güç, yana dönüş, yükseliş ve mermi itme sistemlerini çalıştırır. Elektro-hidrolik servo sistem tarafından namlu yükselişi ve kulenin yana dönüşü kontrol edilir.

Namlu ve Kundak Sistemi

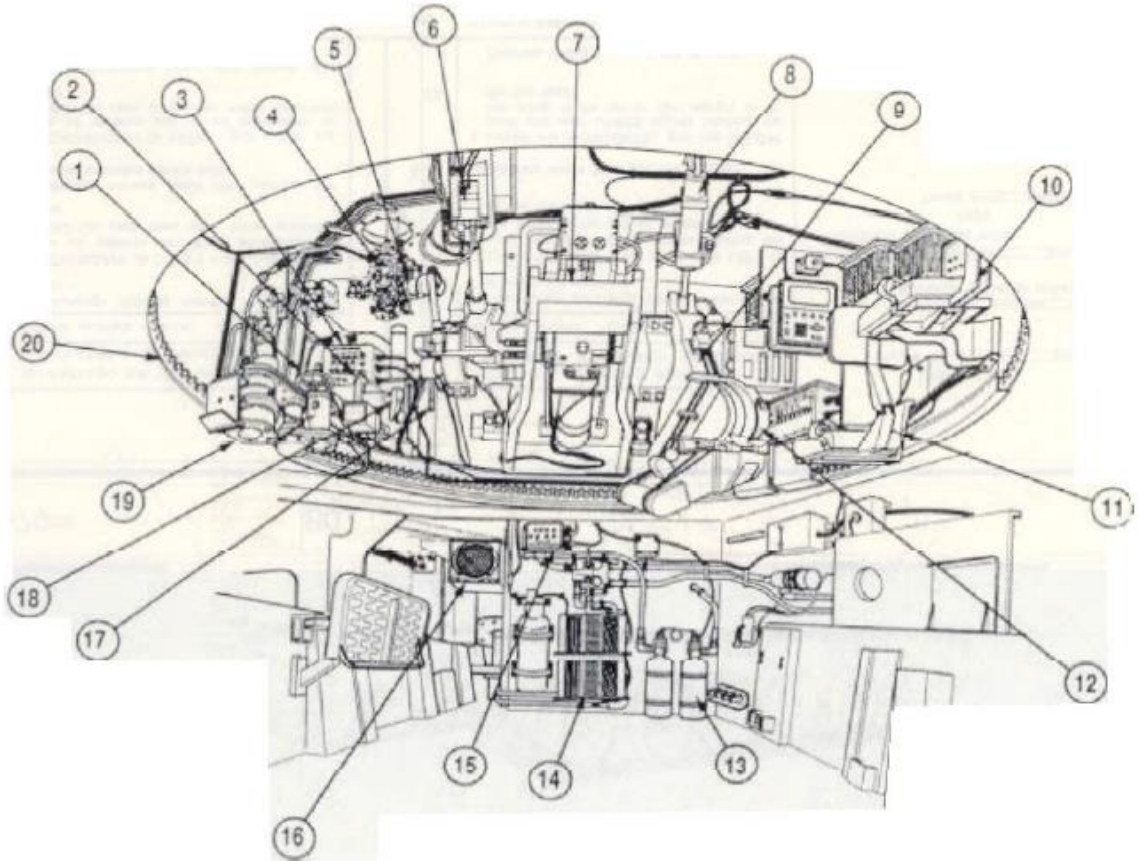
Namlu ağız baskısı, gaz tahliye silindiri, geri tepme sistemi, mermi itme sistemi, kama payı ve fûnye otomatiği yer almaktadır. Namlu ağız baskısı çok perdeli yapıdadır. Bu sayede geri tepme kuvveti ve patlama sesi büyük oranda azaltılır. Otomatik şarjörlü fûnye besleme sistemi bulunmaktadır. Obüste geri tepme mahmuzu bulunmamaktadır.

Elektrik Sistemi

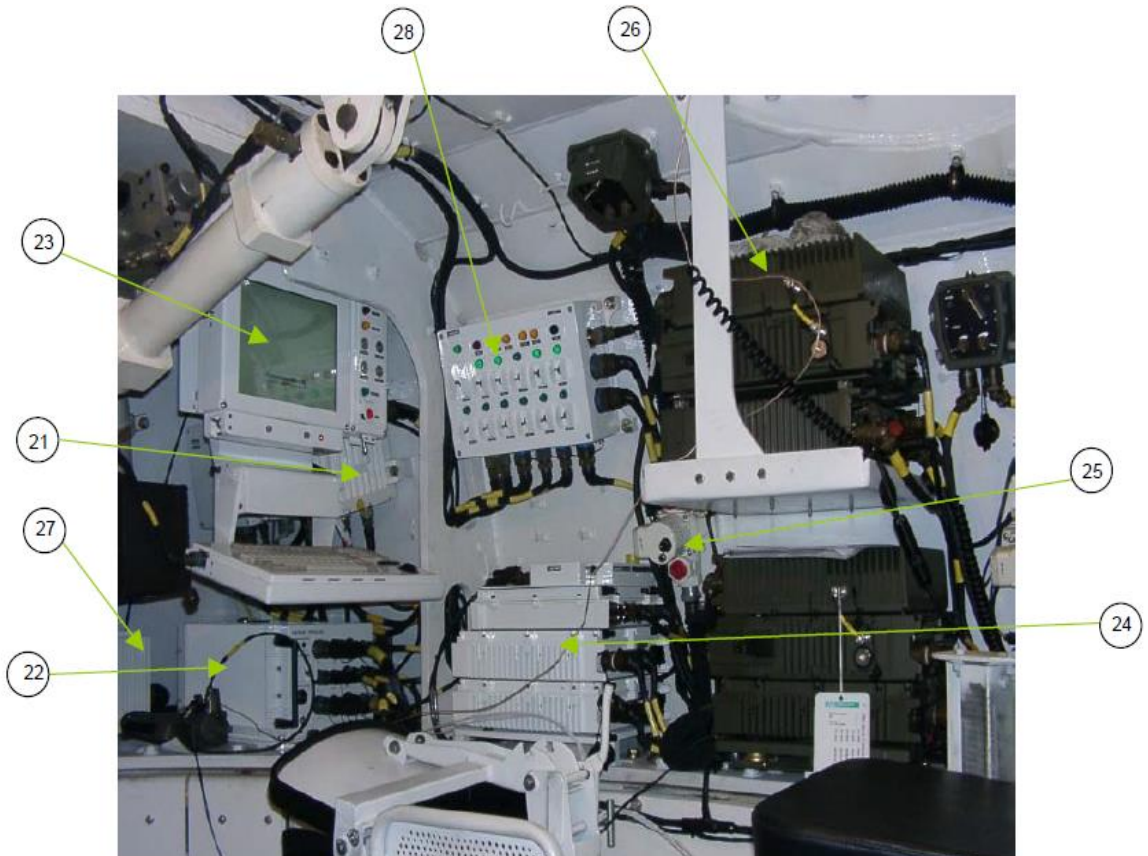
Akü grubu, şarj dinamosu, yardımcı akım sistemi, gövde güç dağıtım ünitesi ve kule güç dağıtım ünitesi yer almaktadır. Aracın çalışması için gereken elektrik enerjisini üretir ve sistemin normal çalışmasını sürdürür. Gövde elektrik sistemi, aracın ve motorun düzgün olarak çalışmasına, elektrik enerjisinin dağıtılmasına veya kontrol edilmesine, aracın aşırı elektrik yükünden korunmasına yardım eder. Kule elektrik sistemi, kulenin çalışması için gereken güç ve sinyali iletir.

Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer (KBRN) Sistemi

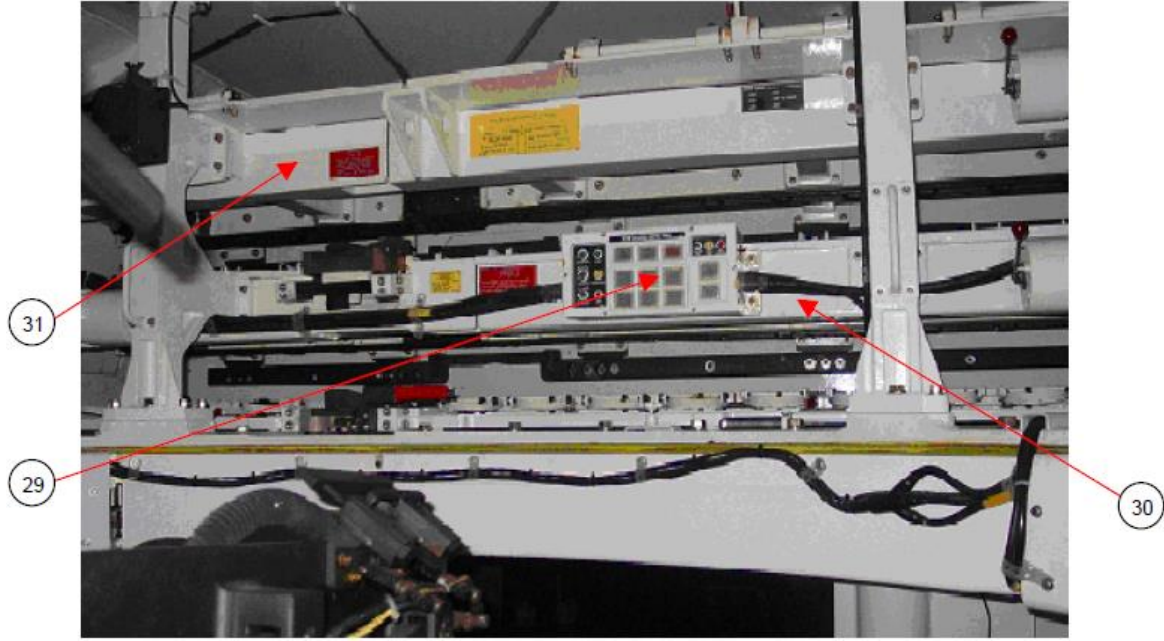
Fırtına tam zırh ve KBRN korumalıdır. Bu yetenek sayesinde mürettebat, düşman KBRN taarruzuna, görerek ve görmeyerek ateş eden silahlarının etkilerine karşı korunarak beka kabiliyetini artırmaktadır. Zırh, 14,5 mm zırh delici mermi ve 155 mm mühimmatın parça tesirine karşı balistik koruma sağlamaktadır.



Şekil 3.4. Fırtına obüsünün içten görünüşü [15]



Resim 3.2. Fırtına obüsünün komutan ve nişancı bölgesi [15]



Resim 3.3. Fırtına obüsü mermi doldurma paneli [15]

Çizelge 3.2. Fırtına obüsünün iç taraftaki ekipmanların isimlendirmeleri [15]

1	Kule Yana Dönüş El Çarkı	17	Dengeleme Silindiri El Pompası
2	Joystik	18	Yükseliş El Pompası
3	Hidrolik Güç Paketi Kontrol Paneli	19	Kule Yana Dönüş Dişli Grubu
4	M 117 Panoramik Top Dürbünü	20	Kule Çember Dişlisi
5	M145 Dürbün Hamili	21	Namlu Kule Yönlendirme Elektronik Ünitesi
6	Namlu Yükseliş Ve Dengeleme Silindiri	22	Atış Kontrol Bilgisayarı
7	Mermi İtme Sistemi	23	Nişancı Görüntüleme Ünitesi
8	Mermi Transfer Kolu Servo Silindiri	24	Atış Kontrol Sistemi Güç Birimleri
9	Mermi Transfer Kolu	25	Nbc Hava Isıtıcısı
10	Komutan Koltuğu	26	Telsiz (Rt-9600 Frekans Atlamalı)
11	Nişancı Kol Tuğu	27	Kule İlave Güç Birimi
12	Mermi Tutucu Kolu	28	Güç Kontrol Ünitesi
13	Yangın Söndürme Sistemi	29	Mermi Doldurma Kontrol Paneli
14	Personel Isıtıcı	30	Alt Teskere
15	Yardımcı Kontrol Kutusu	31	Üst Teskere
16	Personel Havalandırma		

3.3. Sevk Yakıtları

Yüzeyinden içeriye doğru yanarak ani çözünmeye uğrayan maddeler düşük hızlı patlayıcılardır. Düşük hızlı patlayıcılar sevk yakıtı olarak kullanılırlar. Namlu içinde tutuşturulduğunda büyük gaz hacmi yaratarak mermiyi ani olarak namlu dışına iten bir barut hakkına sevk yakıtı denir. Birkaç yüzyıl boyunca sevk yakıtı olarak sadece kara barut kullanılmıştır. Buna rağmen, kara barut birçok olumsuz özelliğe sahiptir. Yirminci yüzyılda kullanım alanlarının çoğunu, diğer düşük hızlı patlayıcılara bırakmıştır. Günümüzde ateşleyici karışımlarında kullanılmaya devam etmektedir. Günümüzde, silah barutu olarak kullanılan tüm düşük hızlı patlayıcılar nitroselüloz esaslı olup, genel olarak dumansız barut olarak adlandırılırlar [17].

Fırtına obüslerinde; M3, M4, M119, M203 serisi NATO sevk barutları ile altı modüllü modüler barut kullanma imkânı bulunmaktadır. Fırtına obüslerinde sık sık namlu temizlemeye ihtiyaç duyulmayacak namlu temizleyici, bakırlaşmayı önleyici ve namlu soğutma imkânı sağlayan katkı maddeleriyle takviye edilmiş barutların kullanılması gerekmektedir. Aksi takdirde namlunun aşırı kirlenmesi ve ısınması aşınmayı arttırarak atım ömrü 2000 olan namlunun çok kısa zamanda performansını kaybetmesine neden olunur. Bu nedenle mecbur kalınmadıkça bu tür sevk barutları kullanılmamalıdır.

M3 Serisi Barutlar

Barutlar yeşil keseli olup 155 mm obüslerde kullanılmak üzere düzenlenmiş, içerilerinde beş adet barut hakkı kesesi bulundurulur. 1'inci barut hakkı arka tarafında kırmızı renkte yemleme barutu bulunur. Envanterimizde M3 ve M3A1 olmak üzere iki modeli bulunmaktadır. M3A1 modelinde barut haklarının üst taraflarında sarı renkte alev azaltıcı ped bulunmaktadır. Özellikle gece atışlarında M3A1 modeli kullanılmalıdır. Ayrıca M3A1 modelinin yemleme barutu içindeki ilave madde, barut torbalarının yanmasını hızlandırarak, namlu içindeki tortu miktarını azalttığından Fırtına gibi atım hızı yüksek obüslerde kullanılması en uygun baruttur.



Resim 3.4. M3/A1 sevk barutu

M4 Serisi Barutlar

Barutlar beyaz keseli olup dört adet bez kuşak ile birbirlerine bağlanmışlardır. Bir adet esas barut hakkı ve dört adet birbirinden farklı ek barut keseleri bulunmaktadır. Envanterimizde M4A1 ve M4A2 olmak üzere iki modeli bulunmaktadır. M4A1 modeli yemleme barutu içinde tortu bırakmayı önleyen madde yerine sadece kara barut konulmuştur. Bu nedenle bu barutun kullanıldığı namlular sık sık temizlenmelidir.



Resim 3.5. M4/A1/A2 sevk barutu [18]

M119 Serisi Barutlar

155 mm obüslerin menzilini artırmak için imal edilmiş, tek parçalı bir barutturlar. Envanterimizde M119, M119A1, M119A2 olmak üzere üç modeli bulunmaktadır. M119A2 modeli en gelişmiş baruttur. Barut kırmızı keseli ve 7'nci barut hakkının karşılığıdır. Diğer modellerden farkı, ortasında ateşleme tüpü olmamasıdır. Ayrıca barutun

ön tarafında bakırlaşmayı önleyen alüminyum ceket ve ceketin içinde alev azaltıcı madde bulunmaktadır. Bu ceket sayesinde mermilerin roket yakıtlarını kolaylıkla yakabilmektedir.

M203 Serisi Barutlar

M203 ve M203A1 olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Envanterimizde sadece M203A1 barutu bulunmaktadır. M203A1 barutu, nitroselüloz maddesi emdirilmiş, kâğıttan yapılan, barut esaslı, çabuk yanabilen bir gövde içinde bulunmaktadır. Gövde kılıfı içerisine namlu aşınmasını önleyici madde emdirilmiştir. Bu nedenle M203 barutlarına göre namluyu daha az aşındırırlar.

Altı Modüllü Modüler Barut

Fırtına obüslerinin 40 km mesafeye atış yapabilmesi için altı modüllü modüler barut kullanılması gerekmektedir. Altı modüllü modüler barut, Fırtına obüsünün 23 litrelik atım yatağına girebildiğinden, uzun menzile atış yapabilmesi için gerekli ilk hızı obüste oluşturabilmektedir. Modüler barutlar özellikle her modülün birbiri yerine kullanılabilmesi nedeniyle artan barut hakkı söz konusu değildir. Bu nedenle ekonomik ve az yer kaplamaktadır. Modüler yapısı klasik M3, M4, M119 ve M203 serisi barutların belli barut haklarını karşılayabildiğinden, bu barutların yerine de kullanılarak her türlü mühimmatın atışına imkân verirler. Gövdelerinin sert yapıda olması ve iç içe geçmeleri modüler barutun her yükselişte doldurma yükselişi almadan atım yatağına sürülmesine imkân vererek atış hızını artırır.

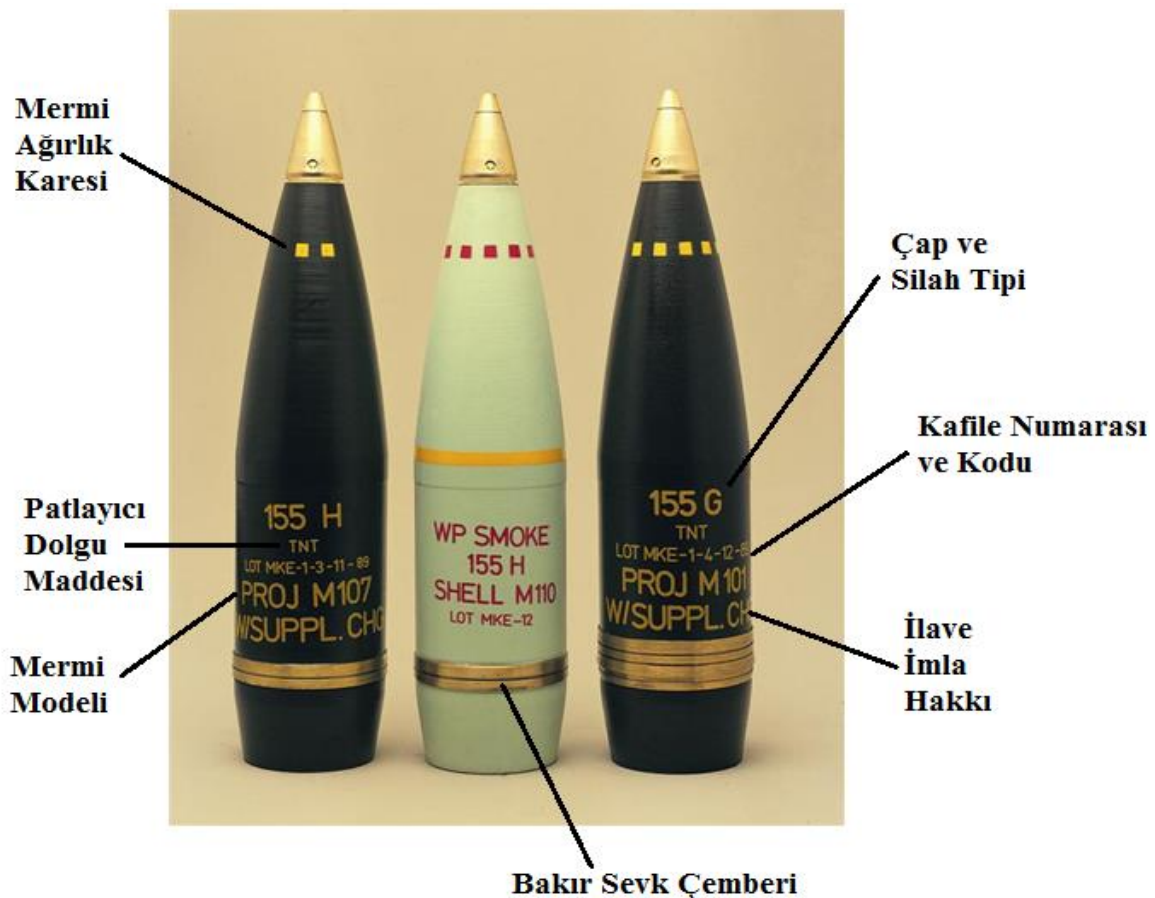


Resim 3.6. Modüler barut [18]

3.4. Mermiler

Mermi; hedef üzerinde yıkıcı etkiyi oluşturacak enerjiyi namlu içerisindeki kazandığı enerji ile hedefe taşıyan; çekirdek, barut, kapsül kovan gibi parçalardan oluşan bir harp malzemesidir. Mermiler, genellikle kinetik ve kimyasal enerjili mermiler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Kinetik enerjili mermiler hedefe hız ve kütlelerine bağlı olarak kinetik enerjileri ile etki eden ve herhangi bir patlayıcı ihtiva etmeyen mermilerdir. Kimyasal enerjili mermiler ise içinde yüksek infilak maddesi veya yanıcı yakıtlar ihtiva eden patlayıcılardır.

Fırtına obüsü ile kullanılacak mermilerin 155 H rumuzlu olmasına dikkat edilmelidir. H rumuzu bu merminin obüs mermisi olduğunu G rumuzu ise merminin top mermisi olduğunu gösterir. G rumuzlu mermilerin kullanılması, gerek bakır sevk çemberindeki farklılıklar gerekse mermi ağırlığı ve denge noktasındaki farklılıklar nedeniyle atımların yan ve mesafece hatalı gitmesine sebebiyet verir.



M107HE Tahrip Mermisi

Gövdesi paralanan cins parça tesirli bir mermidir. Zeminde ve havada paralandırılarak şok etkisi yaratılır. Çelik gövde içinde TNT veya B terkibi patlayıcı madde bulunur.

M110WP Beyaz Fosfor Sis Mermisi

Hafif yakıcı etkisi olmakla beraber esas olarak sis perdesi oluşturmak için kullanılır. İçerisinde beyaz fosfor maddesi bulunmaktadır.

M116HC Sis Mermisi

Sis perdesi oluşturmak, hedef tarif etmek veya işaretlemek maksadıyla kullanılır. İçerisinde HC beyaz kimyasal sis karışımı bulunur.

M483A1 Geliştirilmiş Klasik Mermi

Bu mermi içerisindeki bombacıklar çift maksatlıdır. Hem personele hem de hafif zırhlı malzemeye karşı etkilidir. Gövde çelik, dip kapak ve baş kısım alüminyumdan yapılmıştır. Dipten fırlatmalı bir mermi olup gövdesi içinde 88 adet bombacık ile fırlatma barutu bulunur.

M825WP Beyaz Fosfor Sis Mermisi

Balistik olarak M483A1 Geliştirilmiş Klasik Mermi gövdesine benzer olup, içerisine beyaz fosfor emdirilmiş keçeler konularak meydana getirilmiştir.

M118 Aydınlatma Mermisi

Balistik olarak M110WP sis mermi gövdesine benzer olup, içerisinde bir adet paraşüt ve yanıcı madde olarak magnezyum bulunmaktadır. Hedef bölgesinin aydınlatılması için kullanılır.

M485A1, A2 Aydınlatma Mermisi

Bu mermiler muharebe sahasının aydınlatılmasında kullanılır. Çelik gövde içinde paraşüt, birinci fırlatma hakkı ve kutu içinde aydınlatma elemanı bulunur. Bu elemanın içerisinde de ikinci fırlatma hakkı, gecikme elemanı, aydınlatma maddesi ve asıl paraşüt vardır.

M864 Dipten Yanma Uzun Menzilli Geliştirilmiş Klasik Mermi

M483A1 mermisinin tabanına dipten yanma ünitesi takılarak geliştirilmiş bir mermidir. Mermi ateşlendiğinde dipten yanma ünitesi yanarak ters yönlü bir basınç meydana getirerek mermi arkasında oluşan vakumu nötr hale getirir. Böylece mermiyi frenleyen kuvvetlerden biri azaltıldığından merminin menzili % 20 oranında artmış olur. İçerisinde 72 adet anti tank ve anti personel özelliği olan bombacık bulunmaktadır.

HE-ERFB Menzili Artırılmış Dipten Yanmalı Mermi

Klasik tahrip mermisine göre daha ince ve uzun olup, aerodinamik yapısındaki değişiklik, havanın direncini daha kolay yenebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Mermi gerisinde dipten yanma ünitesi mevcuttur. Mermi gövdesi paralanmış bir mermi çeşidi olup, imla maddesi miktarı klasik tahrip mermisinden dar yapısı nedeniyle daha azdır. Modüler barut hakkı ile kullanılarak 40 km ve ilerisine atış yapılabilir.

M-731/692 ADAM-S/L Anti Personel Serpme Mayın Mermisi

Bölge esirgeme topçu mermisi olarak adlandırılan bu mermi esas olarak anti personel serpme mayını olarak kullanılmaktadır. Amacı atılan bölgeye personel girişlerini engellemektir. İçerisinde 36 adet M67 veya M72 modeli takoz şeklinde anti personel mayın bulunmaktadır.

M-718/741 RAAM-S/L Anti Tank Serpme Mayın Mermisi

Kullanım amacı atılan bölgeye zırhlı araç girişine mani olmak veya zırhlı araçların hareket etmesini engellemektir. İçerisinde 9 adet M73 veya M70 modeli anti tank mayını bulunmaktadır.

3.5. Tapalar

Mermi ve roketlerin hedef üzerindeki etkinlikleri tapalar ile sağlanır. Genel olarak tapalar, herhangi bir fiziki etki ile ateşleme zincirini başlatırlar. Obüs ile kullanılan tapaların ilk hızları emniyet açısından çok önemlidir. İlk hızlarının çok düşük veya çok yüksek olmaları, üzerlerinde bulunan emniyet mekanizmalarının, hiç açılmayarak merminin kör gitmesine veya vaktinden önce açılarak mermi daha namlu içerisinde iken tapayı kurmasına ve namlu ağzında bulunan herhangi bir cisme çarpması ya da yoğun yağmurlu havalarda merminin erken paralanmasına sebep olurlar. Bu nedenle tapaların sadece takıldığı mermi değil aynı zamanda kullanıldıkları barut hakkı da önem arz etmektedir.



Resim 3.8. Tapa mekanizmaları [18]

M501A1 ve M501 MTSQ Mekanik Zamanlı Hassas Tapa

Bu tapalar hem ihtiraklı (zaman ayarlı) hem de hassas olarak kullanılabilir. Tapa 2-75 s gecikme ile tanzim edilebilir. Sadece M116 ve M116B1 modeli WP ve M118 aydınlatma mermilerinde kullanılır. Namlu içi emniyet mekanizması olmadığından tapa kesinlikle bir yere çarpmamalıdır.

M564 MTSQ Mekanik Zamanlı Hassas Tapa

Mekanik zamanlı hassas tapanın gelişmiş bir modelidir. Gövdesi paralan mermilerde kullanılır. Tapa 2-100 s aralığında taksimatlanmıştır. Yüksek ilk hızlarda (7 barut hakkı ve yukarısı) namlu içi emniyet sisteminin olmaması, yağışlı havalarda tapanın erken çalışmasına, kısa mesafede merminin erken infilak etmesine neden olabilir.

M500/A1-M520A1 MTSQ Mekanik Zamanlı Hassas Tapa

Her iki tapa da yaylı tip saat mekanizmasına sahiptir. Tapalar arasındaki tek fark tapanın önü emniyet sistemini sağlayan busterlerinin farklı olmasıdır. M500/A1 tapalarında bulunan M21A4 buster daha gelişmiş olan M125A1 busteriyle değiştirilerek M500 tapaları M520 tapası olarak adlandırılmıştır. Gövdesi paralanmış mermilerde kullanılır.

FUCHSIA ET Elektronik Zaman Ayarlı Tapa

Bu tapa, 155 mm ve 203 mm çapındaki mermiler için tasarlanmıştır. Namlu ilk hızı 950 m/s olan mermilerle 200 s uçuş süresi için kullanılabilir. Fuchsia, özellikle kargo sınıfı mermilerde kullanılmak üzere imal edilmiştir. Elektronik karıştırma ve radar tarafından karıştırılmayan bir elektronik koruma sistemi bulunmaktadır. Yağmurlu havalarda kullanılabilir.

ASELSAN 7250 VT Yaklaşmalı Tapa

Tapa kısa busterli olup standart hassas ve ihtiraklı (zaman ayarlı) tapalarla aynı büyüklüktedir. Uçuş süresi 7-119 s'ye tanzim edilebilir. Hedefte alçak (6 m) veya yüksek (10 m) paralanmaya göre ayarlanabilir. Gövdesi paralanmış mermilerde kullanılır. Yağmurdan etkilenmez.

M732 VT Yaklaşmalı Tapa

Tapa hedefin ortalama 7 m yukarısında paralanır. Tapanın plastik konik şeklindeki burnunun altında 0-150 s arasında taksimatlandırılmış bir zaman taksimatı vardır. Gövdesi paralanmış mermilerde kullanılır.

M51/A4/A5 PD Hassas/Tavikli (Gecikmeli) Tapa

M51A5 tapası 0,05 s, M51A4 tapası 0,05 veya 0,15 s gecikmelidir. Tapada namlu önü emniyet sistemi yoktur. Tapa kutusundan çıkarıldığında hassas konumdadır. Gövdesi paralanmış mermilerde kullanılır.

4. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu bölümde incelenen problemin çözümü için genel tanımlamalar, fiziksel ve matematiksel modeller sunulmuştur. Bunlara ek olarak; problemin sayısal çözümünde kullanılan sonlu hacim analiz programı ile hazırlanan model için oluşturulan çözüm ağı, yapılan kabuller ve kullanılan sınır şartları da sunulmuştur.

4.1. Problemin Genel Tanımı

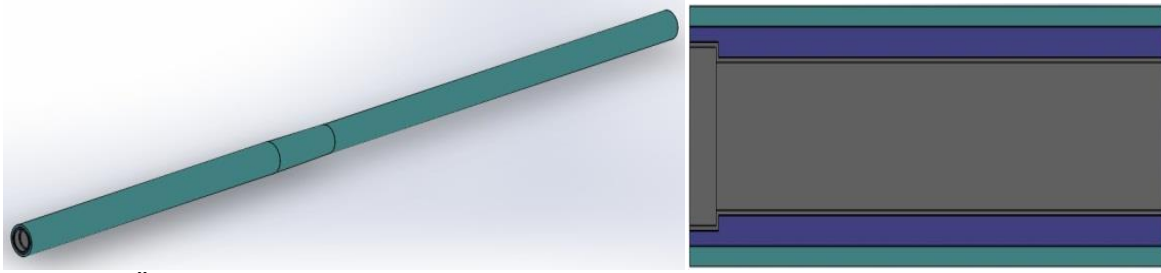
Sun ve Zhang, 155 mm'lik sıvı soğutma tekniğinin uygulandığı namluda, iç balistik kodu ile elde ettikleri yanma gazlarının zamana bağlı sıcaklıkları ve namlu iç yüzeyi ile olan ısı transfer katsayılarına bağlı olarak; kamaya yakın bölgedeki namlu en kesitinde radyal yöndeki zamana bağlı namlu sıcaklık dağılımını elde etmişlerdir. Kaplama kalınlığı, yarım daire kanal çapı, akışkan hızı ve kanal sayısı gibi parametrelerin soğutma üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir.

Bu çalışmada ise; doğal ve aktif soğutmalı namlulardaki zamana bağlı sıcaklık dağılımı, ANSYS sonlu eleman analiz programı ile sayısal olarak incelenmiştir. Soğutma kanalı geometrisi olarak; dikdörtgen, yarım elips ve yarım dairesel kanallar için analizler yapılmıştır. Yarım dairesel kanal geometrisinde; 8, 10, 12, 14 ve 16 farklı kanal sayılarının sıcaklık dağılımına olan etkileri incelenmiştir. Yarım dairesel kanalda soğutucu akışkan hızı 2, 3 ve 4 katına artırılarak soğutucu akışkan hızının soğutma üzerindeki etkisi sunulmuştur. Bunlara ilave olarak; her bir soğutma kanalı geometrisinde alümina nano akışkanı, soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır. Analizler; 10 nm ve 30 nm farklı tanecik boyutlarında ve % 1 ve % 3 farklı konsantrasyonlarda yapılmıştır.

Ayrıca termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı değişken olarak ele alınmalarının sonuçlara etkileri araştırılmıştır. Analizler tek, seri atışlar ve çoklu atış görev senaryoları için gerçekleştirilmiştir. Seri atışlardaki atım sürati 10 atış/dakika olarak belirlenmiştir.

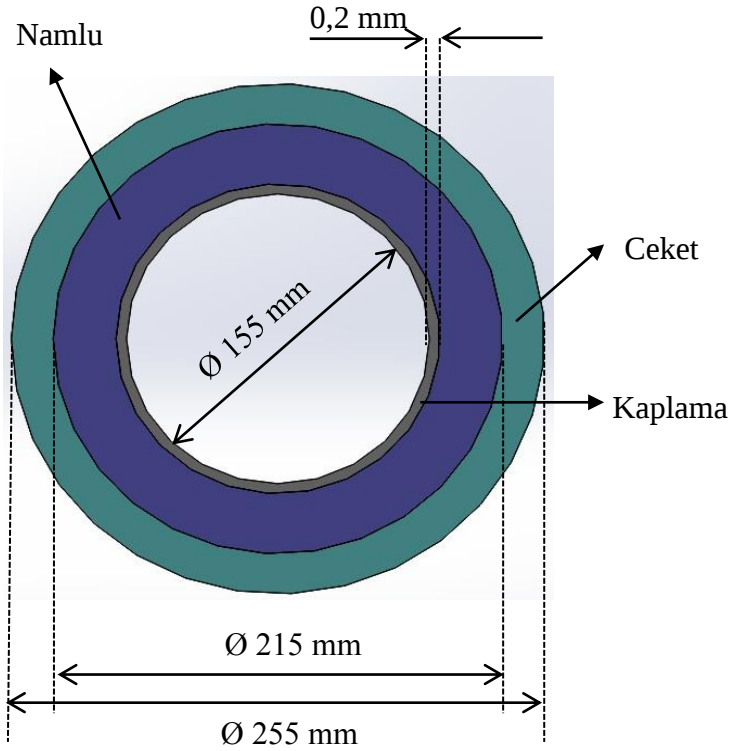
4.2. Fiziksel Model

Silah sistemlerinin ana bileşenlerinden biri olan namlu, merminin namluyu terk etmesine kadar bir ucu sabit diğer ucu da hareketli silindirik basınç tüpü olarak ele alınabilir. Namlu; barutun yerleştirilmesi ve yanması için gerekli yanma odası hacmine, merminin dönerek denge kazanması için gerekli yiv-setlere ve barut gazı enerjisinin mermiye aktarıldığı bir silindirik boya sahiptir.



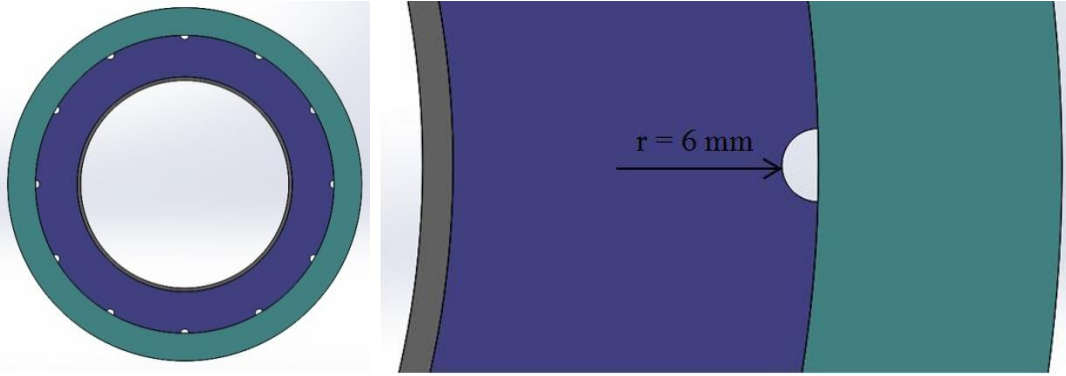
Şekil 4.1. Üç boyutlu namlu ve kesiti

Analizlerde kullanılacak namlu, 155 mm iç çapa ve 215 mm dış çapa sahiptir. Ceketin ise iç ve dış çapları sırasıyla 215 ve 255 mm'dir. Namlu uzunluğu 8095 mm ve namlu içerisinde 48 adet yiv/set bulunmaktadır. Namlu ve ceket kalınlığı sırasıyla 3 ve 2 cm'dir. Namlu ile ceket sıkı geçme ile birleştirilmiştir. Kaplama kalınlığı 200 μm 'dir.

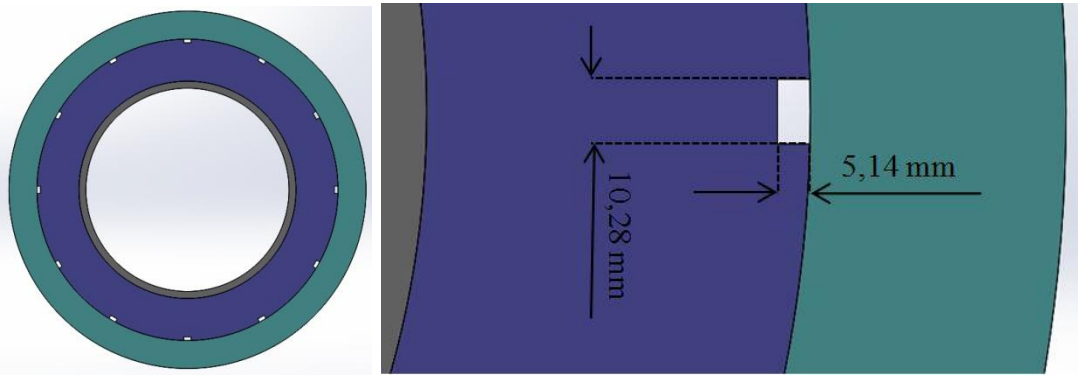


Şekil 4.2. Analizlerde kullanılacak doğal soğutmalı namlu ölçüleri

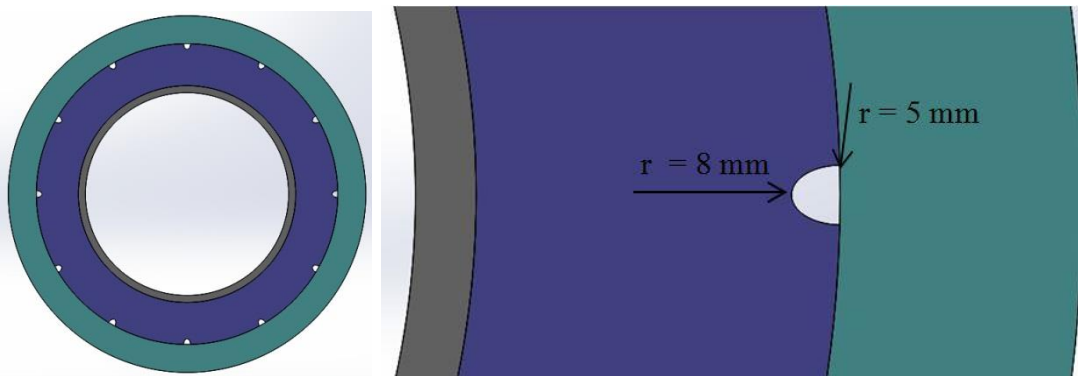
Zorlanmış konveksiyonla soğutulacak namlu geometrileri Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Kanal ebatları, her geometri için birim uzunlukta eşit ısı transfer yüzey alanına sahip olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Yarım dairesel kanallı sıvı soğutmalı namlu



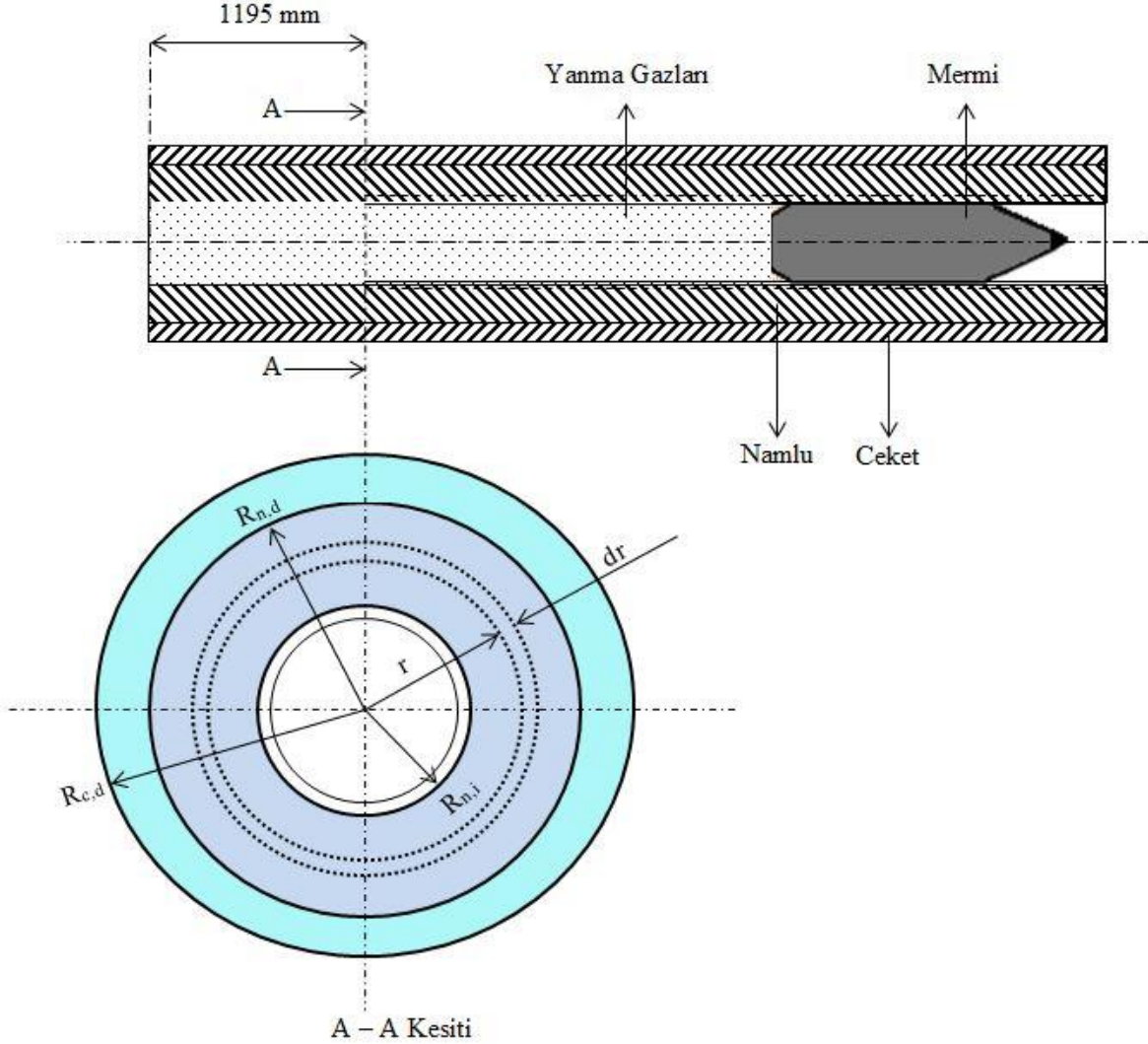
Şekil 4.4. Dikdörtgen kanallı sıvı soğutmalı namlu



Şekil 4.5. Yarım elips kanallı sıvı soğutmalı namlu

4.2.1. Kullanılan koordinat sistemi

Namlu geometrisinin silindirik olmasından dolayı namluda gerçekleşen ısı transferi silindirik koordinatlarda incelenmiştir.



Şekil 4.6. Sıcaklık dağılımının hesaplanacağı namlu en kesiti

4.2.2. Varsayımlar

Her bir atışta iç yüzeye transfer olan zamana bağlı ısı akısı aynı kabul edilmiştir. Isınma periyodu boyunca aksel yöndeki ısı iletimi radyal yöndeki ısı iletimine nazaran çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Yerçekiminin taşınım ısı transferine etkisi ile ceket dış yüzeyinden atmosfere ışıınım yolu ile olan ısı transferi ihmal edilmiştir. Namlu ve ceket ara yüzeyinde ısıl temas direncinin olmadığı kabulü yapılmıştır. Ayrıca mühimmat ile namlu iç yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı meydana gelen ısı da dikkate alınmamıştır.

Namlu ve ceket et kalınlığı eksenel yön boyunca eşit olarak kabul edilmiştir. Namlu, ceket ve kaplama malzemesi özellikleri üniformdur. Bu kabuller ışığında açısal yöndeki sıcaklık değişimi ortadan kalkmıştır. Böylelikle problemimiz tek boyutlu aksisimetrik durum olarak ele alınmıştır. Sıcaklık dağılımının hesaplanacağı en kesit yüzeyi kamadan 1195 mm uzaklıktadır. Sıvı soğutmalı namlularda kanal yüzeyi ile akışkan arasındaki ısı transfer katsayısı atışlar boyunca sabit olarak kabul edilmiştir.

4.3. Matematiksel Modelin Tanımlanması

Bu bölümde ele alınan problemin genel tanımı ve çözüm için kullanılan ısı transfer denklemi verilmiştir. Bunlara ilave olarak, soğutma kanallı namlularda, kanal iç yüzeyi ile soğutucu akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısını hesaplamak için kullanılan denklemler sunulmuştur.

4.3.1. Isı iletim denklemi

Yapılan kabuller neticesinde; problem silindirik koordinatlarda zamanla değişen tek boyutlu ısı iletim denklemine dönüşmüştür. Denklem Eş. 4.1’de verilmiştir.

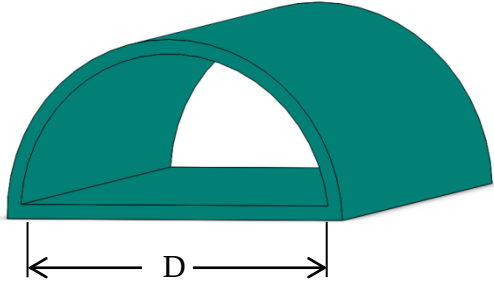
$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4.1)$$

4.3.2. Zorlanmış iç taşınım denklemi

Soğutma kanallarında soğutucu akışkan ile namlu iç yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayısını hesaplamak için zorlanmış iç taşınım uygulamalarında duyarlılığı ile tercih edilen Dittus-Boelter denklemi(Eş. 4.7.) kullanılmıştır. Her 3 farklı geometri için aynı denklemden yararlanılmıştır.

$$\text{Re}_d = \frac{V_{ort} D_h}{\nu} \quad (4.2)$$

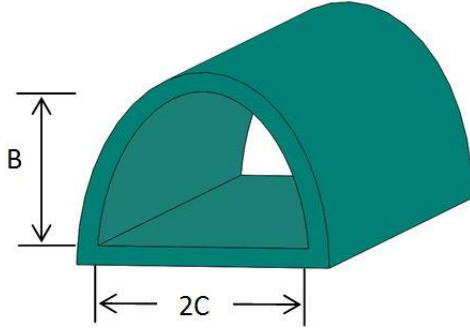
$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (4.3)$$



Şekil 4.7. Yarım dairesel kanal

Yarım dairesel kanal için;

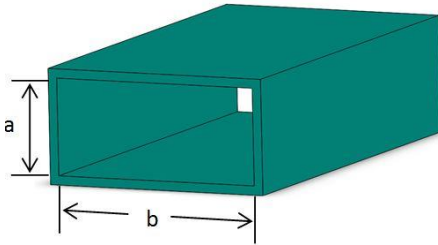
$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4\pi D^2 / 8}{(\pi r + D)} \quad (4.4)$$



Şekil 4.8. Yarım elips kanal

Yarım elips kanal için;

$$D_h = \frac{4BC(64 - 16E^2)}{(B + C)(64 - 3E^4)}, \quad E = \frac{B - C}{B + C} \quad (4.5)$$



Şekil 4.9. Dikdörtgen kanal

Dikdörtgen kanal için;

$$D_h = \frac{4ab}{2(a + b)} = \frac{2ab}{a + b} \quad (4.6)$$

$$Nu_d = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \quad (4.7)$$

$$Nu_d = \frac{hD_h}{k} \Rightarrow h = \frac{k}{D_h} 0,023 Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \quad (4.8)$$

4.4. Başlangıç ve Sınır Şartları

Başlangıç sınır şartı;

$$T(r,0) = T_{ilk} = T_{\infty} = 294 \text{ K}, \quad r_{n,i} \leq r \leq r_{n,d}, r_{c,i} \leq r \leq r_{c,d} \quad t = 0 \quad (4.9)$$

Namlu iç yüzey sınır şartı;

$$-k_{namlu} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{n,i}} = q_x, \quad (r = r_{n,i}), \quad t > 0 \quad (4.10)$$

q_x , kamadan x kadar uzaklıkta olan ve ısı transfer analizinin yapıldığı en kesit yüzeyindeki yanma gazlarından namlu iç yüzeyine olan anlık ısı akısı.

Kanal ile namlu arasındaki sınır şartı;

$$-k_{namlu} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_n} = h_{kanal}(T - T_{akiskan}), \quad (r = r_n), \quad t > 0 \quad (4.11)$$

Namlu ile ceket arasındaki ara yüzey sınır şartı;

$$T_{namlu}(r_d, t) = T_{ceket}(r_i, t) \quad (4.12)$$

$$\text{ve } -k_{namlu} \left. \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right|_{r=r_{n,d}} = -k_{ceket} \left. \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right|_{r=r_{c,i}}, \quad (r = r_{n,d} = r_{c,i}), \quad t > 0 \quad (4.13)$$

Kanal ile ceket iç yüzeyi arasındaki sınır şartı;

$$-k_{ceket} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{c,i}} = h_{kanal}(T - T_{akiskan}), \quad (r = r_{c,i}), \quad t > 0 \quad (4.14)$$

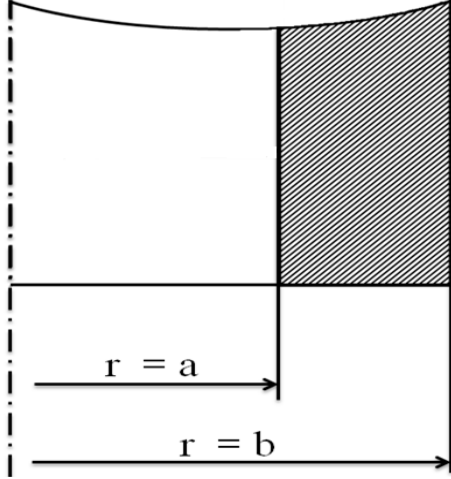
Ceket dış yüzey sınır şartı;

$$-k_{ceket} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{c,d}} = h_{\infty}(T - T_{\infty}), \quad (r = r_{c,d}), \quad t > 0 \quad (4.15)$$

Ceket dış yüzeyi ile atmosfer arasındaki ısı taşınım katsayısı (h_{∞}) 20 W/m².K ve soğutucu akışkan sıcaklığı ($T_{akiskan}$) 294 K'dir. q_x , h_{kanal} , h_{∞} , $T_{akiskan}$ analiz boyunca değişmemektedir.

4.5. Namludaki Isı Transferinin Analitik Çözümü

Analitik çözüm yapılırken Değirmenci'nin çalışmasındaki yaklaşım esas alınmıştır [19]. Silindirik koordinatlarda zamana bağlı ısı iletiminin genel denklemi, namlu boyu sonsuz uzunlukta ve açısal simetri kabülleri neticesinde Eş. 4.16. şeklinde sadeleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Namlunun kesit görünüşü

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.16)$$

$$r = r_{n,i} = a \Rightarrow -k_1 \frac{\partial T}{\partial r} + h_1 T = 0 \quad (4.17)$$

$$r = r_{n,d} = b \Rightarrow k_2 \frac{\partial T}{\partial r} + h_2 T = 0 \quad (4.18)$$

$$t = 0 \text{ ve } r = a \Rightarrow T|_{r=a} = T_{iy} \quad (4.19)$$

$$t = 0 \text{ ve } r = b \Rightarrow T|_{r=b} = T_{dy} \quad (4.20)$$

Başlangıç ve sınır şartlarıyla birlikte verilen kısmi diferansiyel denklem değişkenlerine ayırma yöntemi ile çözülebilir.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \Rightarrow T(r,t) = R(r)\tau(t) \quad (4.21)$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{1}{\tau} \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) = -\lambda^2 \quad (4.22)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = -\lambda^2 \alpha \tau \Rightarrow \frac{d\tau}{dt} + \lambda^2 \alpha \tau = 0 \quad (4.23)$$

$$\frac{d\tau}{dt} + \lambda^2 \alpha \tau = 0 \Rightarrow r' + \lambda^2 \alpha r = 0 \quad (4.24)$$

$$\tau(t) = Ae^{-\lambda^2 \alpha t} \quad (4.25)$$

$$\frac{1}{R} \left[\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right] = -\lambda^2 \quad (4.26)$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \lambda^2 R = 0 \quad (4.27)$$

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + r^2 \lambda^2 R = 0 \quad (4.28)$$

Eş. 4.28. Bessel fonksiyonudur. Bessel fonksiyonunun çözümü Eş. 4.29'da verilmiştir.

$$R(r) = AJ_0(\lambda r) + BY_0(\lambda r) \quad (4.29)$$

Elde edilen çözümler genel çözümde yerine koyulur.

$$T(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 \alpha t} [A_n J_0(\lambda_n r) + B_n Y_0(\lambda_n r)] \quad (4.30)$$

Eş. 4.30. sıcaklık fonksiyonunun genel çözümüdür. λ_n , A_n ve B_n katsayılarını bulmak için başlangıç ve sınır şartları genel çözümde yerine koyulur.

$$r = a \text{ ve } t = 0 \Rightarrow -k_1 \frac{\partial T}{\partial r} + h_1 T = 0 \quad (4.31)$$

h_1 , h_2 , k_1 ve k_2 sabit kabul edilirse;

$$\frac{h_1}{k_1} = H_1 \text{ ve } \frac{h_2}{k_2} = H_2 \quad (4.32)$$

$$-k_1 \frac{dR_a}{dr} + h_1 R_a = 0 \Rightarrow -\frac{dR_a}{dr} + H_1 R_a = 0 \quad (4.33)$$

$$-\frac{dR_a}{dr} + H_1 R_a = 0 \Big|_{r=a} \quad (4.34)$$

$$R(r_a) = AJ_0(\lambda r_a) + BY_0(\lambda r_a) \quad (4.35)$$

$$\frac{dR}{dr} = -\lambda AJ_1(\lambda r_a) - \lambda BY_1(\lambda r_a) \quad (4.36)$$

$$\lambda AJ_1(\lambda r_a) + \lambda BY_1(\lambda r_a) + H_1 AJ_0(\lambda r_a) + H_1 BY_0(\lambda r_a) = 0 \quad (4.37)$$

$$r = a \Rightarrow \lambda AJ_1(\lambda a) + \lambda BY_1(\lambda a) + H_1 AJ_0(\lambda a) + H_1 BY_0(\lambda a) = 0 \quad (4.38)$$

$$r = b \text{ ve } t = 0 \Rightarrow \frac{dR_b}{dr} + H_2 R_b = 0 \Big|_{r=b} \quad (4.39)$$

$$-\lambda A J_1(\lambda r_b) - \lambda B Y_1(\lambda r_b) + H_2 A J_0(\lambda r_b) + H_2 B Y_0(\lambda r_b) = 0 \quad (4.40)$$

$$r = b \Rightarrow -\lambda A J_1(\lambda b) - \lambda B Y_1(\lambda b) + H_2 A J_0(\lambda b) + H_2 B Y_0(\lambda b) = 0 \quad (4.41)$$

Eş. 4.38 ve Eş. 4.40 birbirlerine eşitlenerek A ve B katsayıları hesaplanır.

$$A = H_2 Y_0(\lambda b) - \lambda Y_1(\lambda b) - \lambda Y_1(\lambda a) - H_1 Y_0(\lambda a) \quad (4.42)$$

$$B = \lambda J_1(\lambda a) + H_1 J_0(\lambda a) + \lambda J_1(\lambda b) - H_2 J_0(\lambda b) \quad (4.43)$$

A ve B katsayıları genel çözümde yerlerine koyulur.

$$T(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 \alpha t} \left\{ \begin{aligned} & -J_0(\lambda_n r) [\lambda Y_1(\lambda a) + \lambda Y_1(\lambda b) + H_1 Y_0(\lambda a) - H_2 Y_0(\lambda b)] + \\ & Y_0(\lambda_n r) [\lambda J_1(\lambda a) + \lambda J_1(\lambda b) + H_1 J_0(\lambda a) + H_2 J_0(\lambda b)] \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

Verilen sınır şartlarına göre denklemin A ve B katsayıları hesaplanıp denklemin genel ifadesi elde edilmiştir. Şimdi λ_n katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Bu işlem için başlangıç şartları kullanılacaktır.

$$T(r, 0) = \left\{ \begin{aligned} & -J_0(\lambda_n r) [\lambda Y_1(\lambda a) + \lambda Y_1(\lambda b) + H_1 Y_0(\lambda a) - H_2 Y_0(\lambda b)] + \\ & Y_0(\lambda_n r) [\lambda J_1(\lambda a) + \lambda J_1(\lambda b) + H_1 J_0(\lambda a) + H_2 J_0(\lambda b)] \end{aligned} \right\} \quad (4.45)$$

$$T(r, 0) = R(r) \quad (4.46)$$

$$R(a) = T_{iy} \text{ ve } R(b) = T_{dy} \quad (4.47)$$

$$R(a) - R(b) = T_{iy} - T_{dy} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} & [J_0(\lambda b) - J_0(\lambda a)] [\lambda Y_1(\lambda a) + \lambda Y_1(\lambda b) + H_1 Y_0(\lambda a) - H_2 Y_0(\lambda b)] + \\ & [Y_0(\lambda a) - Y_0(\lambda b)] [\lambda J_1(\lambda a) + \lambda J_1(\lambda b) + H_1 J_0(\lambda a) - H_2 J_0(\lambda a)] = T_{iy} - T_{dy} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Eş. 4.48 transandantal denkleminin λ_n kökleri çözümü oluşturacaktır. Bunun için bir bilgisayar programından faydalanılması gerekmektedir. Analitik çözümün karmaşıklığı ve zorluğu nedeniyle sayısal çözüme geçilmiştir.

4.6. Namludaki Isı Transferinin Sayısal Çözümü

Uygulamada karşılaşılan birçok problem karmaşık sınır şartları veya karmaşık geometriler içerdiğinden; bu tür problemleri analitik olarak çözmek çok zordur ve çok fazla vakit alır. Namludaki ısı transferinin çok küçük zaman mertebelerinde gerçekleşmesi ve değişken sınır şartlarına sahip olması nedeniyle analitik çözümü oldukça zordur. Bu tür

problemlerde, yeterince duyarlı yaklaşık çözümler elde etmek için sayısal yöntemleri esas alan bilgisayar programları kullanılmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile günümüzde mühendisler bir bilgisayar veya paralel olarak çalışan birkaç bilgisayar kullanarak ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilecek mühendislik problemlerinin çözümlerini hızlı ve kolay bir şekilde yapabilmektedirler.

Isı iletim probleminin analitik çözümünde elde edilen sonuç, ana diferansiyel denklemi ve sınır şartlarını sağlayan tam çözümü temsil etmektedir. Sayısal çözümde ise diferansiyel denklem yerine çözüm alanı içerisinde seçilen n tane noktada n tane denklem oluşturulur ve bu denklemlerin eşzamanlı çözümleri seçilen noktalardaki sıcaklık değerlerini yaklaşık olarak verir [20]. Bir ısı iletimi problemini sayısal olarak çözebilmek için sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi, sınır elemanları yöntemi ve enerji dengesi gibi birçok yöntem kullanılır. Her bir yöntemin diğerlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada sayısal hesaplama yapmak için sonlu elemanlar yöntemini esas alan ANSYS 14 sonlu eleman programı kullanılmıştır. Programın Mechanical çözücüsünde analizler gerçekleştirilmiştir.

4.6.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi; yapısal mekanik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar gibi birçok alandaki mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabileceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilesidir [21].

Bu yöntemin temelindeki mantık, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözünebilir hale getirmek ve kesin sonuç yerine yaklaşık bir çözüm elde etmektir. Çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen basit, küçük ve birbirine bağlı alt bölgelere ayrıştırılır. Hassas

hesaplamaların olduğu yerler daha sık alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu elemanlar birbirlerine genellikle elemanların sınırlarında bulunan ve düğüm noktası olarak adlandırılan noktalardan bağlanmaktadır. Düğümlerin oluşturduğu ve ızgaraya benzeyen bu yapıya çözüm ağı denir. Çözüm bölgesinde çözümü aranan değişkenlerin fonksiyonu, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilen cebirsel polinomların lineer kombinasyonu şeklinde yaklaşık olarak kabul edilmektedir. Her eleman içindeki düğüm noktalarına tanım denklemleri yazılmaktadır. Neticesinde bilinmeyenleri düğüm noktalarındaki değerleri olan ve ortak çözümleri gereken denklem takımları oluşturulmaktadır. Matris şeklinde olan bu denklem takımlarının çözülmesiyle değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmektedir. Yaklaşık fonksiyonların değerlerinin bulunmasıyla her sonlu elemanın ve onların oluşturduğu çözüm bölgesinin değerleri bulunmaktadır.

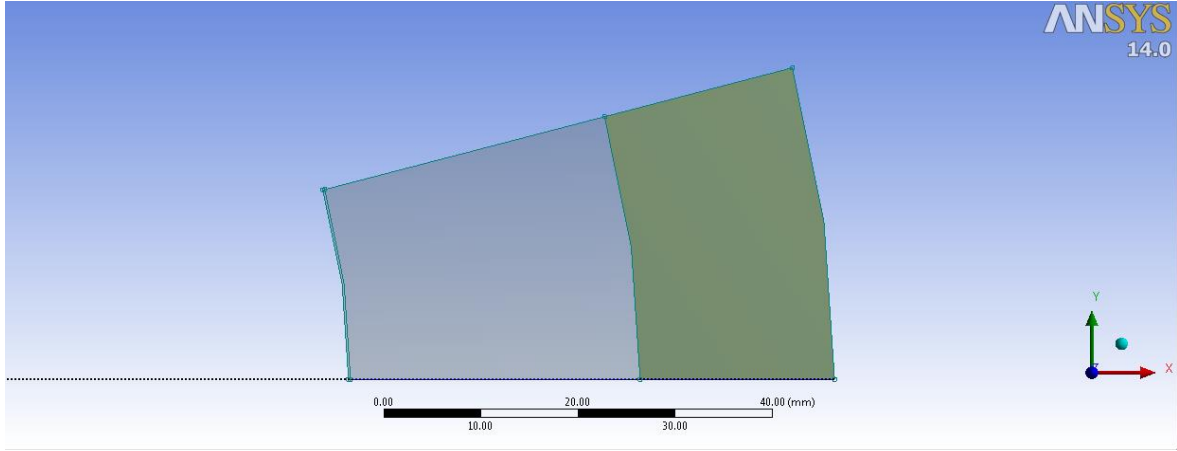
4.6.2. Sonlu eleman analiz programı

ANSYS Mechanical; gerilme, ısı, titreşim, termoelektrik ve manyetostatik gibi birçok mühendislik simülasyonlarını gerçekleştirmekte kullanılabilen sonlu eleman yazılımının bir modülüdür. Tipik bir simülasyonda öncelikli olarak modelin geometrisi oluşturulur, modele yükler uygulanır, yükler altındaki modelin tepkisi çözdürülür ve son olarak modelin verdiği tepki çeşitli açılardan değerlendirilir.

4.6.3. Modelin oluşturulması

Yüksek basınç ve sıcaklıktaki yanma gazları namlu boyunca merminin arkasından basınç uygulayarak mermiye hız kazandırır. Mermi namluyu terk ettikten sonra atmosfere karışırlar. Namlu ile direkt temas halinde olup namluyu ısıtırlar. Namlu içerisindeki yanma gazlarının sıcaklıkları namlu boyunca sürekli değişkendirler. En yüksek sıcaklığa ulaştıkları yer genelde namluda yiv-setin başladığı bölgedir. Dolayısıyla kendiliğinden ateşlenme(cook-off) riski bu bölgede meydana gelmektedir. Ayrıca namlu ömrünü azaltan aşınma miktarı da yine en fazla bu bölgede oluşur. Bu kapsamda; namlunun bu bölgesindeki en kesit yüzeyi modellenmiştir. Namlunun simetrik olma avantajından faydalanılarak hesaplama zamanını azaltmak için namlunun 1/24'ü modellenmiştir. Namlu geometrisi, ANSYS programının Design Modeler bölümünde iki boyutlu olarak çizilmiştir.

İki boyutlu namlu geometrisi en içte kaplama, sonra namlu ve en dışta ceket olacak şekilde Resim 4.1’de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Sıcaklık dağılımının hesaplandığı en kesit yüzeyinin iki boyutlu cad çizimi

Modelde, namlu ve ceket için aynı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bölüm 4.2.2’de namlu ve ceket arasındaki ara yüzeyin mükemmel temas halinde olduğu kabul edilmişti. Dolayısıyla bundan sonraki bölümlerde ceket ve namlu bir bütün şeklinde sadece namlu olarak nitelendirilecektir. Kaplama malzemesi olarak da krom tanımlanmıştır. Tanımlanan malzeme özellikleri, Çizelge 4.1’deki gibi ANSYS sonlu elemanlar programına girilmiştir.

Çizelge 4.1. Çelik ve kromun termofiziksel özellikleri [3]

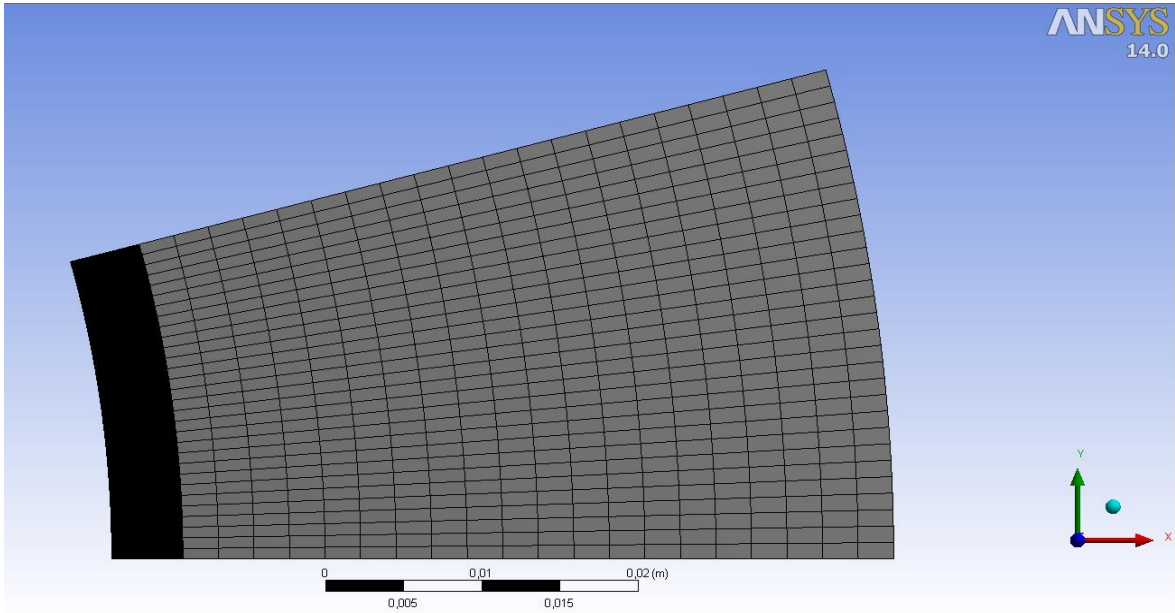
Malzeme	Isıl İletkenlik (W/m.K)	Özgül Isı (J/kg.K)	Yoğunluk (kg/m ³)
Çelik	36	460	7828
Krom	60	440	6900

4.6.4. Çözüm ağının oluşturulması

Çözüm ağı oluşturma, fiziksel bir yapıyı kendisinden daha küçük elemanlara bölme işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Yüzeysel yapılar üçgen, dörtgen şekilli elemanlara bölünebilirken, hacimsel yapılar dört yüzlü, altı yüzlü gibi elemanlara bölünmektedir. Elemanların köşe noktaları fiziksel yapıyı temsil eden noktalar uzayını oluşturur. Çözüm ağı elemanlarının şekilleri, büyüklükleri ve yoğunlukları çözüm sonucunu etkileyen faktörlerdir. Analiz sonucunda elde edilen değerler, elemanları birbirlerine bağlayan düğüm noktaları üzerinde bulunan değerlerden hesaplanmaktadır. Bu nedenle iyi bir hesaplama için öncelikle iyi bir eleman yapısı ve gerekli eleman sayısı gerekmektedir.

Elemanların büyüklüğü hesaplama alanı içindeki değişimleri yansıtacak kadar küçük olduğunda gerçeğe daha yakın sonuç elde edilmektedir. Diğer taraftan gereksiz sayıda çok eleman kullanılması da istenilmemektedir. Böyle bir durum hem hesaplama zamanının fazla olmasına hem hesaplamalarda oluşabilecek bir hatanın artmasına neden olmaktadır.

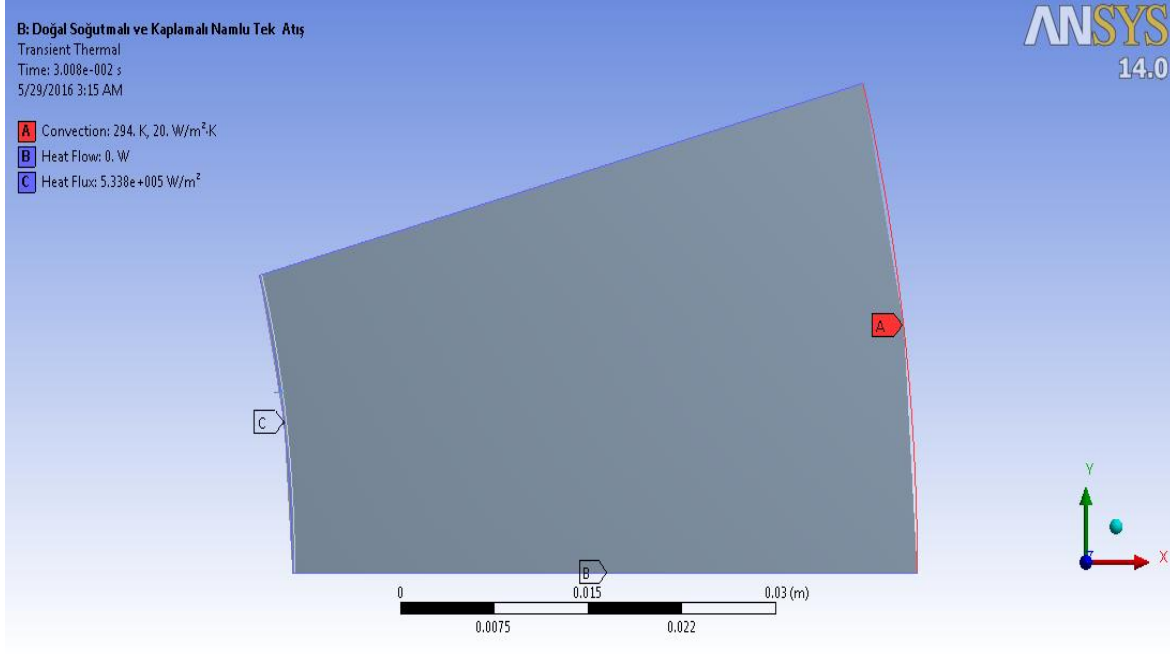
Çalışmada ilk olarak, sınır şartlarının kullanıldığı çalışmanın sonuçları ile doğrulama işleminin yapılacağı doğal soğutmalı saf namlu modeline mesh atılmıştır. Literatürdeki kaynaklardan edinilen bilgiler doğrultusunda, atış esnasında namlu et kalınlığının namlu iç yüzeyine yakın bölgelerinde çok büyük sıcaklık değişimlerinin oluşacağı beklenmektedir. Bundan dolayı bu bölgelere daha sık mesh atılmıştır. Eleman yapısı olarak gerçeğe daha yakın sonuç elde etmek için dörtgen mesh tercih edilmiştir. 11101 düğüm ve 3600 dörtgen elemandan oluşan çözüm ağı Resim 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.2. Doğal soğutmalı saf namlu modelinin çözüm ağı

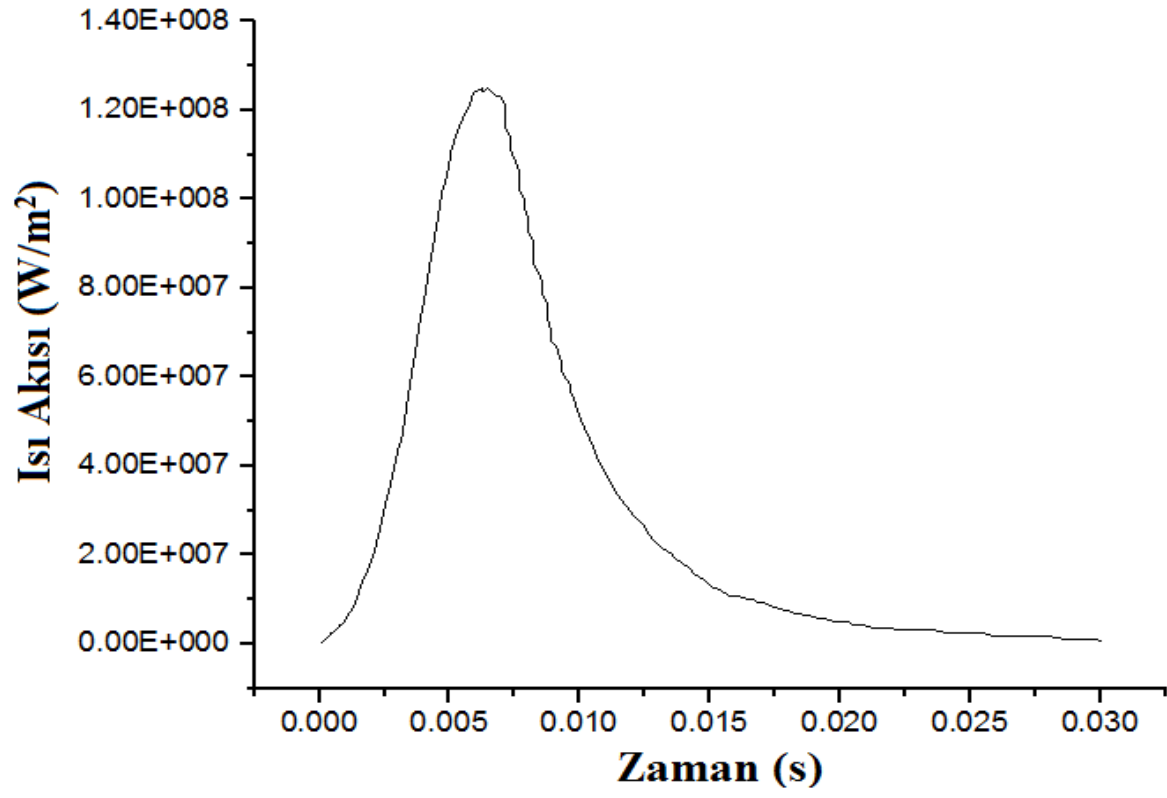
4.6.5. Sınır şartlarının tanımlanması

Namlu modeline mesh atıldıktan sonra Bölüm 4.4’te belirtilen başlangıç ve sınır şartları programa girilmiştir. Analizin sonlanacağı ana kadarki olan süre zaman adımlarına bölünmüştür. Tek atış için toplam 149 zaman adımı tanımlanmıştır. Namlu iç yüzeyi için girilen bu 149 zaman adımındaki ısı akısı değerleri tablo halinde programa aktarılmıştır. Sadece radyal yöndeki ısı transferi incelendiğinden, modelin alt ve üst kenarlarına yalıtımlı sınır şartı girilmiştir.



Resim 4.3. Doğal soğutmalı saf namlu modelinin sınır şartları

Namludan ilk atış yapıldığında; gazlardan namlu iç yüzeyine olan ısı transferi yaklaşık 30 ms içerisinde gerçekleşmektedir. Bu süreye ısınma periyodu denmektedir. Daha sonra namlu iç yüzeyine bir sonraki atış yapılana kadar ısı transferi olmamaktadır. Geçen bu zamana ise soğuma periyodu denir. Aynı çevrim müteakip atışlar boyunca devam etmektedir. Tek atışta soğuma periyodunun başlangıcına kadar olan zamana bağlı ısı akısı sınır şartı grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Tek atış esnasında iç yüzeye giren zamana bağlı ısı akısı grafiği [3]

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

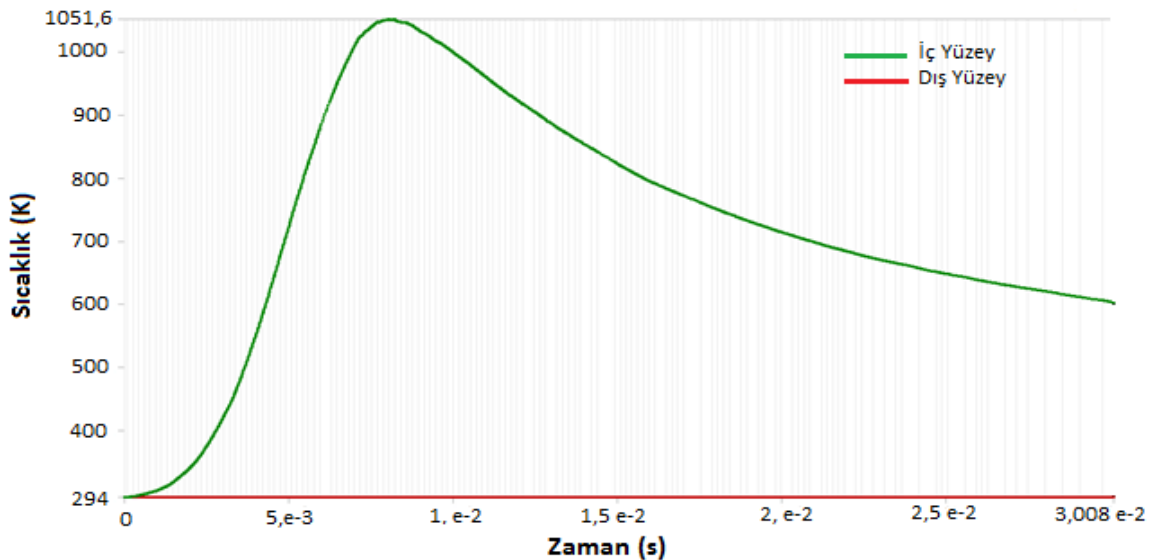
Bu bölümde ilk olarak; oluşturulan modelin doğruluğunu sınamak için Sun ve Zhang'ın deneysel verilerle doğruluğunu ispatladığı sonuçlar ile sayısal çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar mukayese edilmiştir. Modelin doğruluğu gösterildikten sonra mesh sayısının bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Değişken termofiziksel özelliklerinin kullanılmasının sıcaklık dağılımına olan etkisi incelenmiştir. Bu incelemelerden sonra parametrik çalışma için analizler gerçekleştirilmiştir.

5.1. Sayısal Çalışmanın Doğruluğunun Kontrol Edilmesi

Sayısal çalışmanın doğruluğunun kontrol edilmesinde Bölüm 4.6'da izlenen yol takip edilmiştir ve aynı adımlar tekrar edilmiştir. Doğal soğutmalı namluda tek ve seri atış ile aktif soğutmalı namluda seri atış durumları için çözümlerin doğruluğu araştırılmıştır.

5.1.1. Doğal soğutmalı saf namluda tek atış analizi ve doğrulanması

Öncelikle doğal soğutmalı saf namlunun tek atış esnasındaki sıcaklık grafikleri karşılaştırılmıştır. Bu işlem için bir önceki bölümde oluşturulan çözüm ağı ve tanımlanan sınır şartları altındaki model kullanılmıştır. Resim 5.1'de sonlu eleman programından elde edilen ve atış başlangıcından 30 ms boyunca namlu iç ve dış yüzeylerin sıcaklık grafiği sunulmuştur.

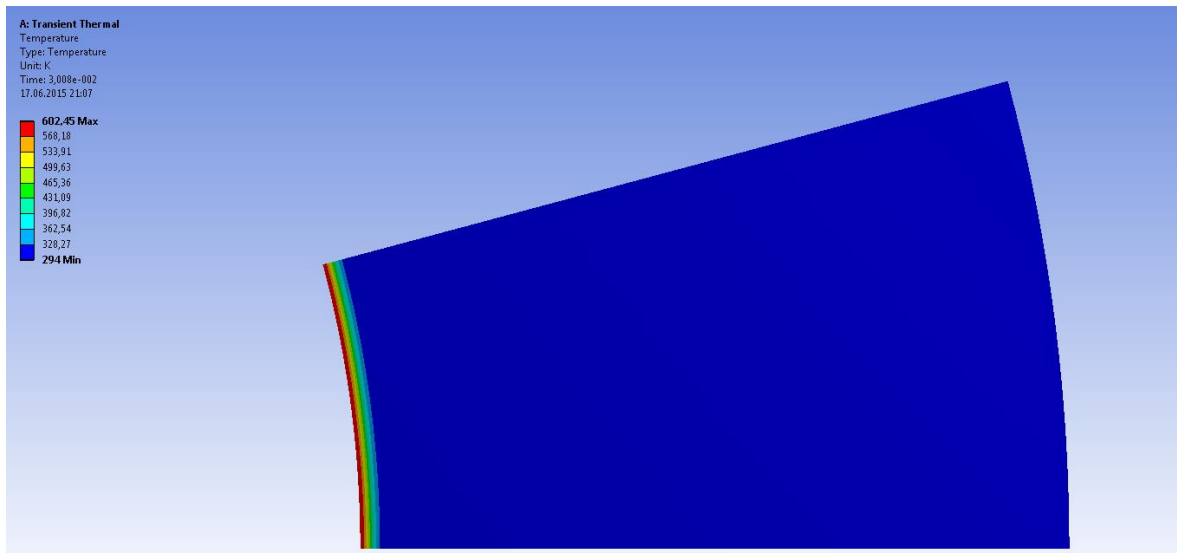


Resim 5.1. Doğal soğutmalı saf namlunun tek atış esnasındaki iç ve dış yüzeylerin sıcaklık grafiği

Namlu iç yüzey sıcaklığı yaklaşık 8 ms içerisinde 294 K'den 1052 K'e artmış daha sonra ani bir şekilde sıcaklık düşüşü gözlenmiştir. Sun ve Zhag'ın çalışmalarında ise tek atış esnasında namlu iç yüzeyin maksimum sıcaklık değeri 8 ms'de 1128 K olarak belirtilmiştir. Elde edilen sonucun uyumlu olduğu ve modelin doğrulandığı görülmektedir.

Değerler kıyaslandığında % 6,7'lik bir farklılık görülmektedir. Bunun nedeni olarak; sınır şartlarının farklı olması değerlendirilmektedir. Sun ve Zhang çalışmalarında kendi yazdıkları iç balistik yazılımdan elde ettikleri zamana bağlı yanma gazlarının sıcaklığı ile ısı transfer katsayısını sınır şartı olarak kabul etmişlerdir. Bu çalışmada ise Sun ve Zhang'ın yaptıkları analiz sonucunda buldukları namlu iç yüzeyine transfer olan zamana bağlı ısı akısı değerleri sınır şartı kabul edilip sıcaklık değerleri hesaplanmıştır.

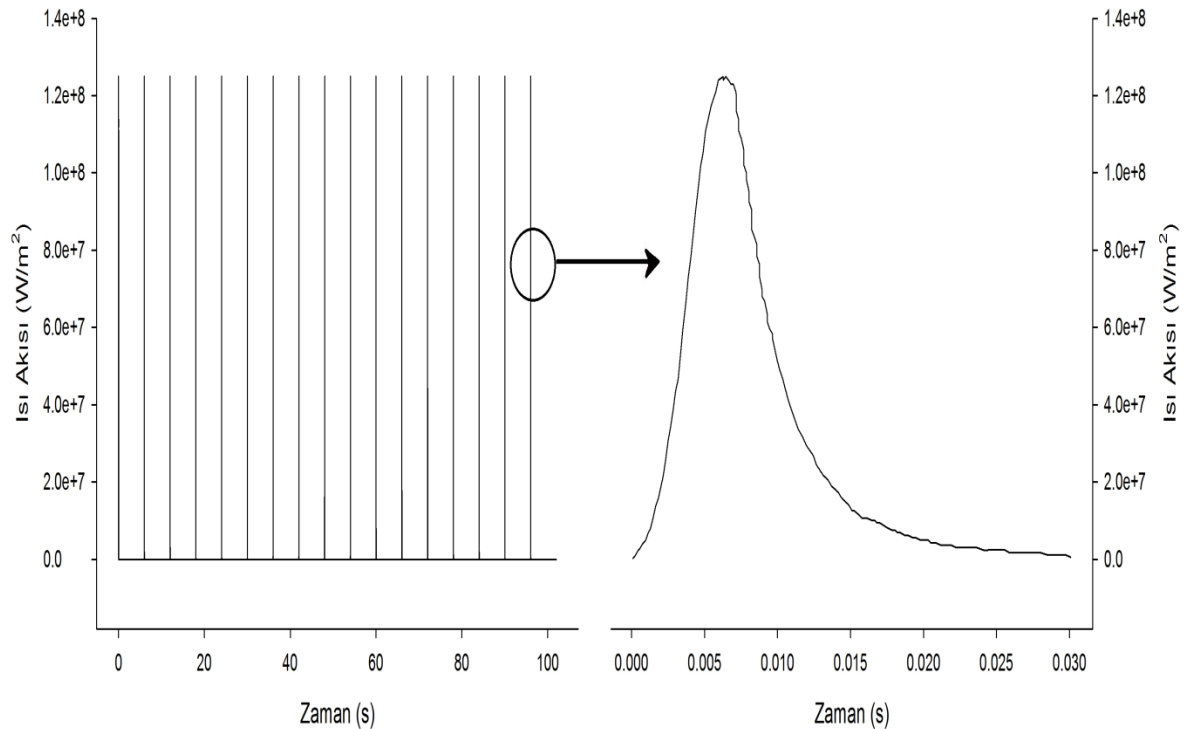
Resim 5.1'de namlu dış yüzey sıcaklığının sabit kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, ısınma periyodunun çok kısa bir süre olmasından dolayı iç yüzeye aktarılan ısı bu süre içerisinde iç yüzeyden daha uzak bir bölgeye transfer olamaması olarak yorumlanmaktadır. Resim 5.2'de de görüleceği üzere ısınma periyodu sonunda namlu et kalınlığında yaklaşık sadece 1 mm'lik bir mesafede sıcaklık değişimi oluşmuştur. Namlunun geri kalan bölgesi sabit sıcaklıktadır. Bu sürede ısı enerjisi dış yüzeye ulaşamamıştır.



Resim 5.2. Doğal soğutmalı saf namlunun tek atış esnasında ısınma periyodu sonundaki sıcaklık dağılımı

5.1.2. Doğal soğutmalı saf namluda seri atış analizi ve doğrulanması

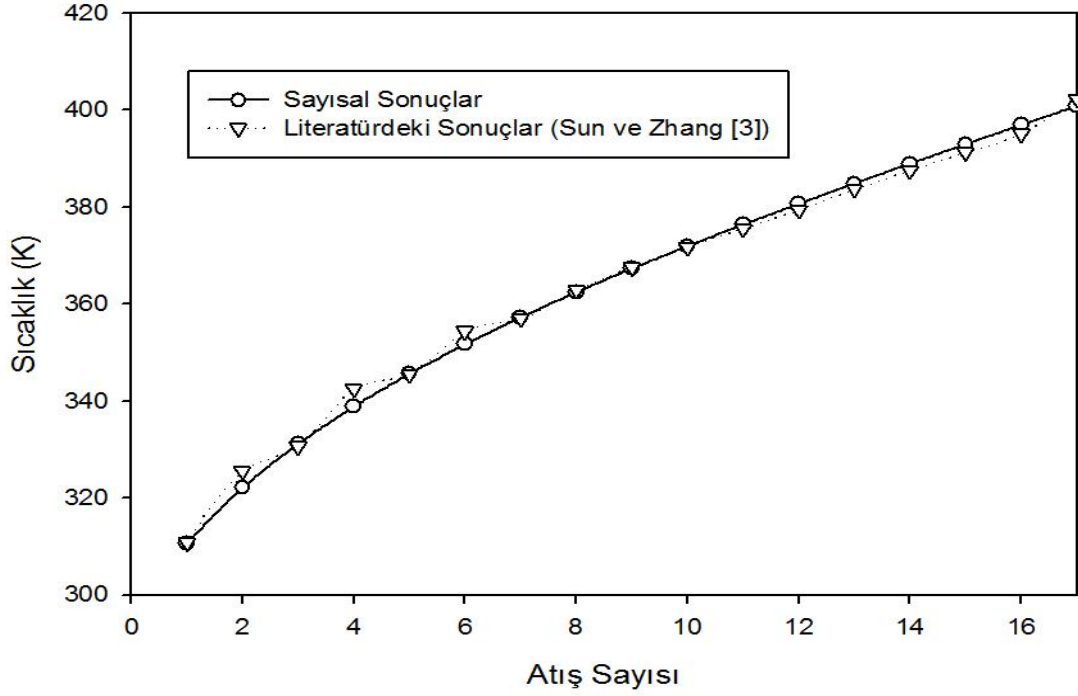
Tek atış için doğrulama işlemi gerçekleştirildikten sonra seri atış için doğrulama işlemine geçilmiştir. Seri atışlar için de tek atıştaki kullanılan doğal soğutmalı saf namlu modeli kullanılmıştır. Seri atışlarda toplam 17 atış yapılmıştır. Atışlar arasındaki süre 6 s olarak belirlenmiştir. Isınma periyodu 30 ms'dir. Bir sonraki atış yapılana kadar ki geçen 5,97 s ise soğuma periyodu süresidir. Seri atışlarda her bir atış süresi için 157 zaman adımı tanımlanmıştır. Bu 157 zaman adımının ilk 149'u ısınma periyodunu kapsamaktadır. Geri kalan 8 zaman adımı da soğuma periyodunu oluşturmaktadır. Hesaplama zamanını azaltmak adına soğuma periyodu ısınma periyoduna nazaran daha büyük zaman adımlarına bölünmüştür. İlk 149 zaman adımında tek atışta olduğu gibi iç yüzeye zamana bağlı ısı akısı değerleri tablo halinde girilmiştir. Sonraki 8 zaman adımında da iç yüzeye ısı akısı değeri 0 olarak girilmiştir. Diğer yüzeyler için sınır ve başlangıç şartları tek atışta oldukları gibi geçerlidir. Müteakip atışlar boyunca aynı sınır şartları uygulanmıştır. Dolayısıyla 102 s'lik seri atış süresi toplam 2669 zaman adımına bölünmüştür.



Şekil 5.1. 17 atış boyunca iç yüzeye girilen zamana bağlı ısı akısı grafiği

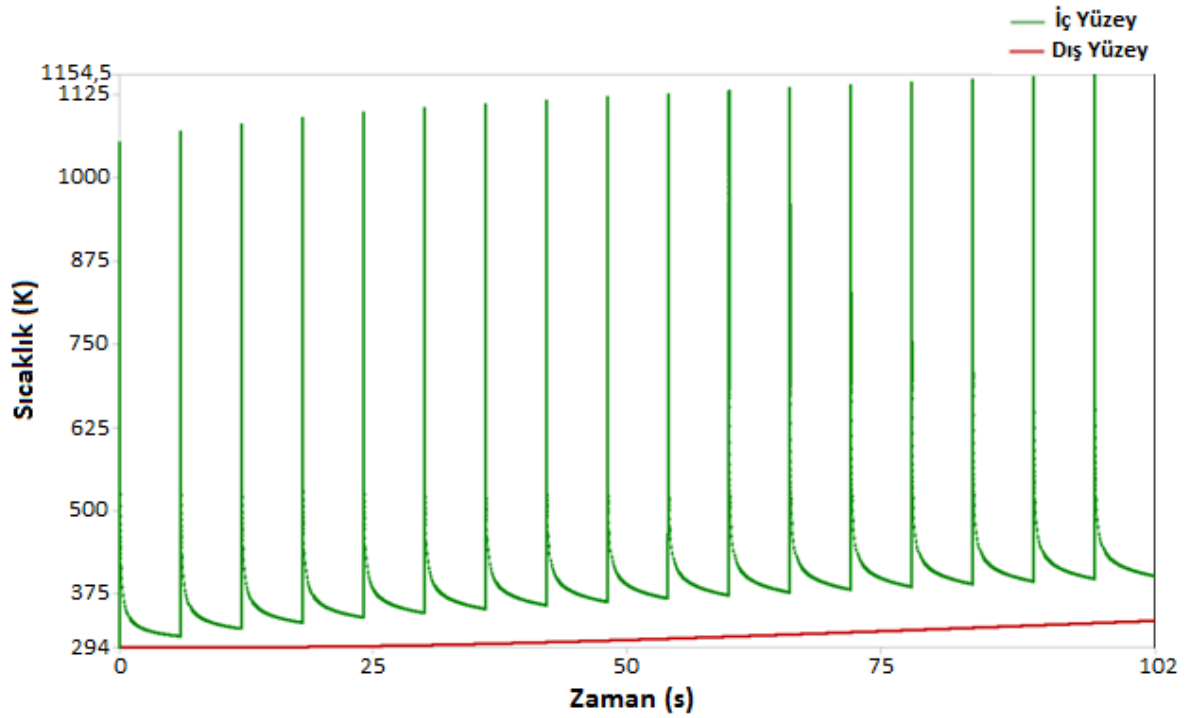
Sayısal çalışma sonucunda elde edilen minimum iç yüzey sıcaklık değerleri, Sun ve Zhang'ın çalışmalarında elde ettikleri değerler ile Şekil 5.2'de karşılaştırıldığında;

değerlerin birbirlerine yakın olduğu ve doğal soğutmalı saf namluda seri atışlar için de modelin doğruluğunun gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.2. Doğal soğutmalı saf namluda seri atışlar boyunca minimum iç yüzey sıcaklıkları ve karşılaştırılması

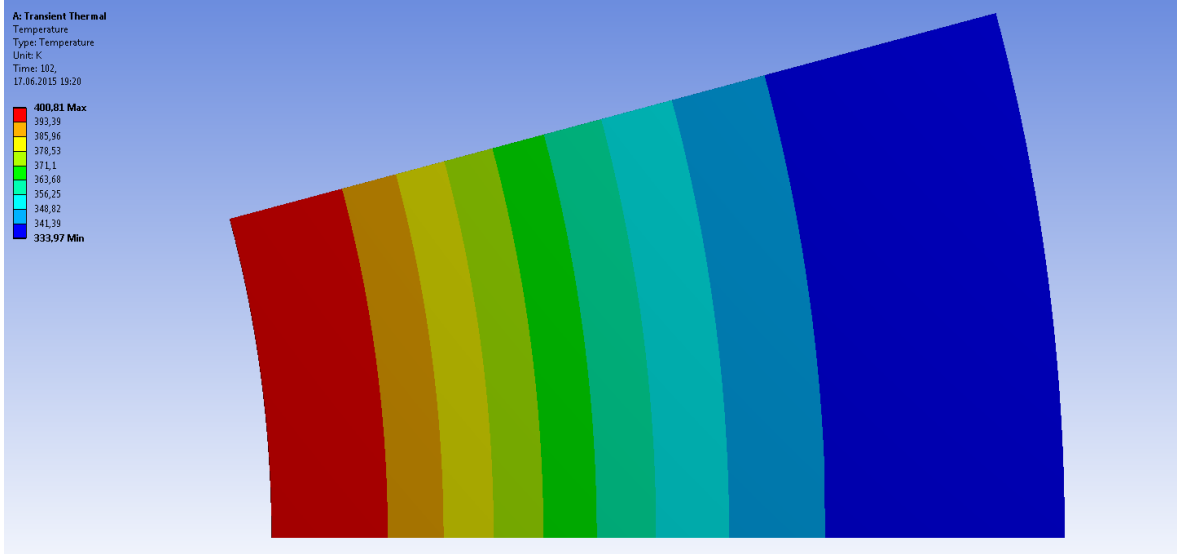
Seri atışlar boyunca hesaplanan namlu iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği Resim 5.3'te verilmiştir. Namlu dış yüzey sıcaklığı, iç yüzeyin aksine aşırı ani bir ısı yüklenmeye maruz kalmadığı için yavaş bir şekilde artış göstermektedir.



Resim 5.3. Doğal soğutmalı saf namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği

Namlu iç yüzey sıcaklığı atışlar boyunca zikzaklı bir eğilim çizmiştir. Bu durum iç yüzeyin atışlar altında ani ve mükerrer ısı yüküne maruz kaldığını göstermektedir. İç yüzeyin maksimum ve minimum sıcaklıkları her atış sonunda bir önceki atışa göre artmaktadır. Bu eğilim atışlar boyunca devam etmektedir. 17 atış boyunca namlu iç yüzeyinde görülen maksimum sıcaklık 1154,5 K bulunmuştur.

Seri atışlar sonunda namlu et kalınlığında meydana gelen sıcaklık dağılımı Resim 5.4’de verilmiştir. Beklenildiği gibi iç yüzeye yakın bölgelerde daha yoğun sıcaklıklar görülürken dış yüzeye doğru gidildikçe sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Isınma periyodu esnasında iç yüzeye ve ona çok yakın bölgelerde depo edilen ısı, soğuma periyodunda iç yüzeyden dış yüzeye doğru olacak şekilde yayılmaktadır.

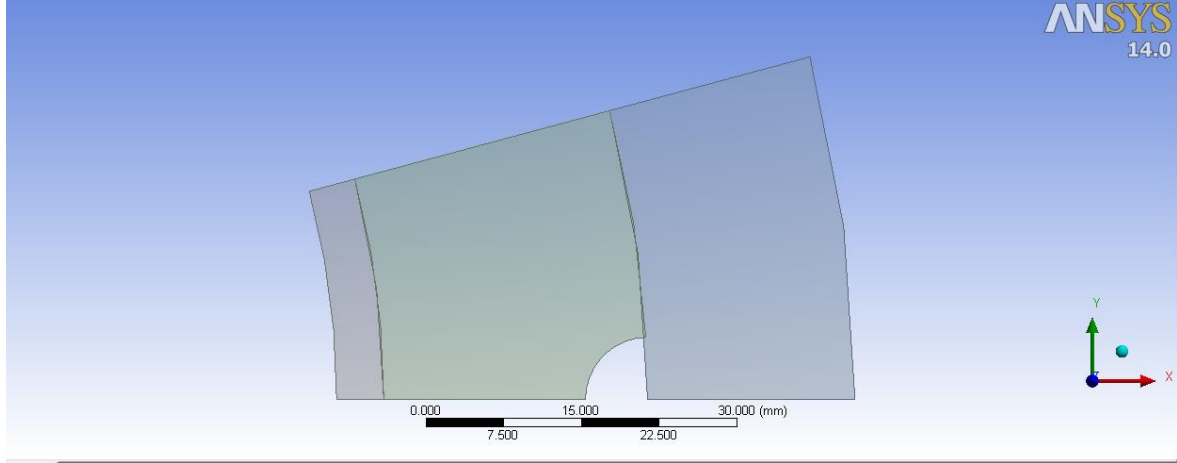


Resim 5.4. Doğal soğutmalı saf namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı

Ağır silah namlularında genelde 453 K sıcaklığı kritik cook-off sıcaklığı olarak bilinmektedir [5]. Eğer seri atışlarda namlu iç yüzey sıcaklığı bu sıcaklıkta iken sevk yakıtı namluya yerleştirilirse sevk yakıtı kendiliğinden ateşlenecektir. Yapılan seri atış analizi sonucunda namlu iç yüzey sıcaklığı 400,81 K bulunmuştur. Başlangıçta 294 K olan namlu iç yüzey sıcaklığı 17 atışta 106,81 K artmıştır. Aynı atım sıklığı ile atış görevine devam edilirse belli bir atış sayısından sonra sevk yakıtı yüklendiği esnadaki yüzey sıcaklığının kritik sıcaklığa erişmesi beklenmektedir. Dolayısıyla doğal soğutmanın namlu sıcaklığının kontrolü açısından yetersiz olduğu görülmektedir.

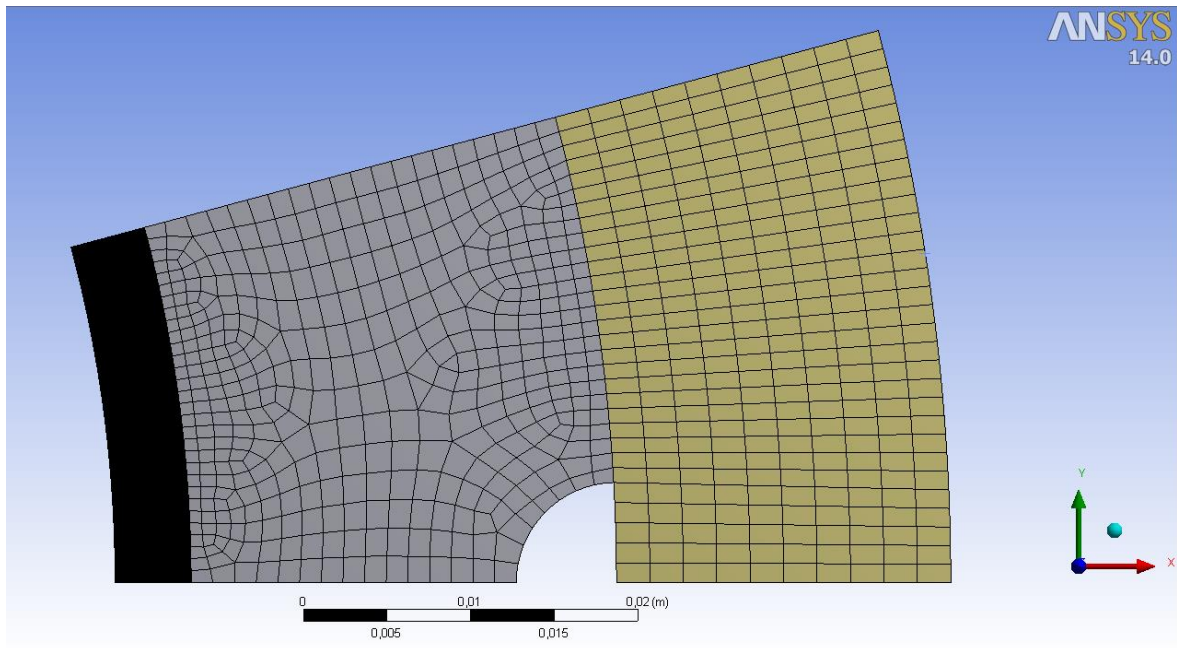
5.1.3. Aktif soğutmalı namluda seri atış analizi ve doğrulanması

Doğrulama işleminde son olarak aktif soğutmalı namlunun seri atış analizi gerçekleştirilmiştir. Aktif soğutmalı namluda; namlu ile ceket ara yüzüne aralarında eşit mesafeler olacak şekilde yarım dairesel kanallar yerleştirilmiştir. Bölüm 4.2’de verilen ölçülere göre namlu geometrisi çizilmiştir.



Resim 5.5. Yarım dairesel kanallı namlu modelinin geometrisi

Geometri çizildikten sonra doğal soğutmalı namludaki gibi namlu iç yüzeyine yakın bölgelerde eleman sayısı yoğun olacak şekilde modele mesh atılmıştır. Oluşturulan çözüm ağında 11520 düğüm ve 3731 dörtgen eleman bulunmaktadır.



Resim 5.6. Yarım dairesel kanallı namlu modelinin çözüm ağı

Aktif soğutmalı namluda, doğal soğutmalı saf namlunun seri atış analizinde olduğu gibi namlu iç yüzeyinde sınır şartı olarak zamana bağlı ısı akısı değerleri ve namlu dış yüzeyinde sabit ısı transfer katsayısı değeri girilmiştir. Burada farklı olarak; soğutma kanalı yüzeyi ile kanaldan geçen soğutucu akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısının tanımlanması gerekir. Bunun için zorlanmış iç taşınım uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Bölüm 4.3.2'deki denklemler kullanılmıştır. Soğutucu akışkan olarak 294 K

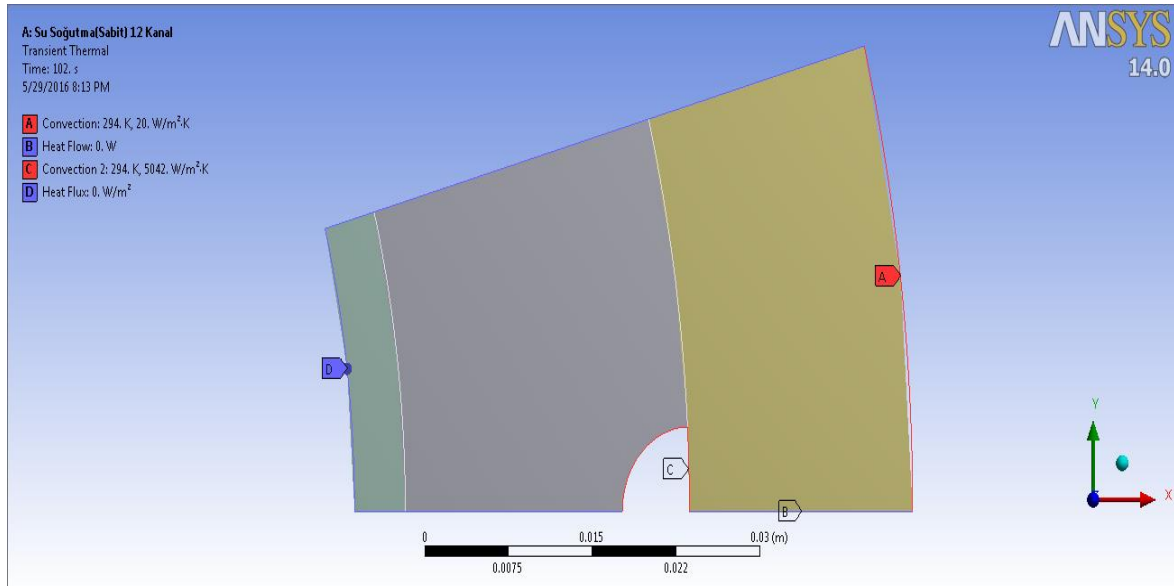
sıcaklığındaki su kullanılmıştır. Uygulamada namlu çıkışına doğru suyun sıcaklığı yükselmektedir. Ancak bizim hesaplama yaptığımız en kesit yüzeyi, soğutucu akışkanın namlu girişine yakın olduğundan 294 K kabul edilmiştir. Suyun termofiziksel özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Suyun kanal içindeki hızı, sıcaklık dağılımının hesaplandığı en kesit yüzeyinde 1 m/s’dir.

Çizelge 5.1. Suyun termofiziksel özellikleri [3]

Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik (W/m.K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kinematik Viskozite (m ² /s)	Prandtl Sayısı
294	0,599	999,98	1,006x10 ⁻⁶	7,02

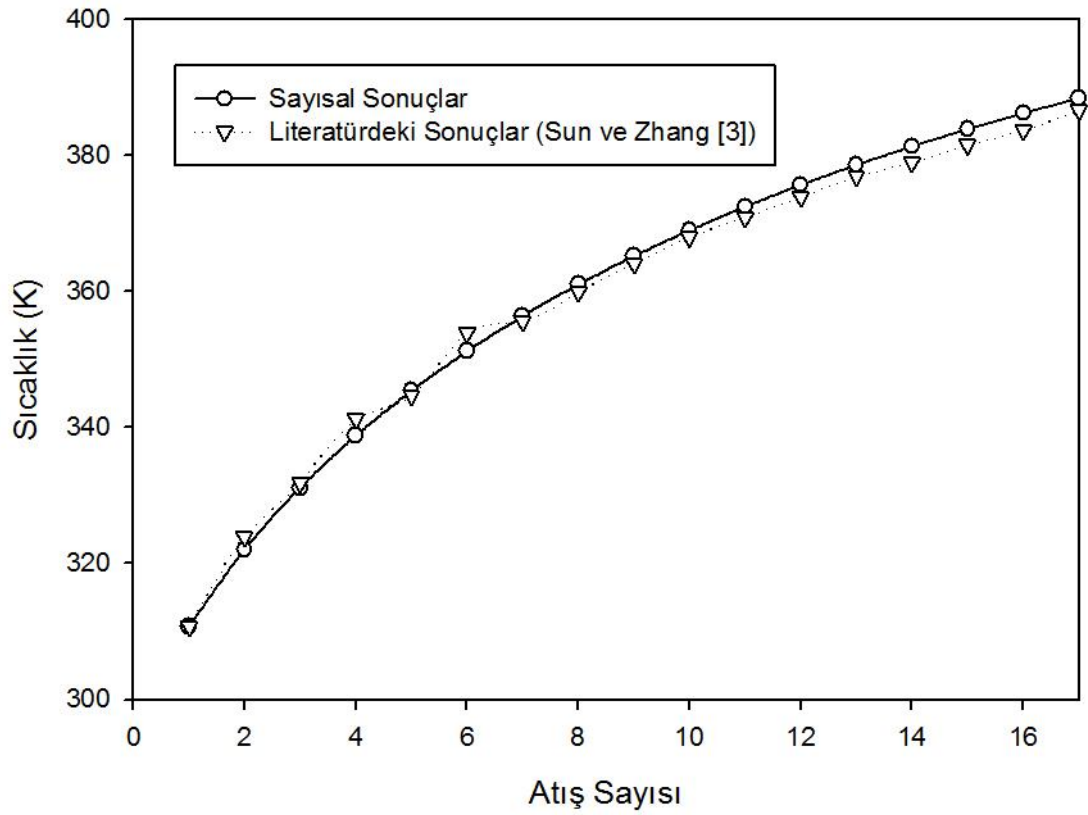
Yapılan hesaplamalar sonucunda yarım dairesel kanalın hidrolik çapı (D_h) 7,32 mm, Reynolds sayısı (Re_d) 7280 ve ısı taşınım katsayısı (h_{su}) 5042 W/m².K bulunmuştur. Hesaplanan bu değer seri atışlar boyunca sabit kabul edilmiştir.

Sınır şartlarının girildiği yarım dairesel kanallı namlu modeli Resim 5.7’de gösterilmiştir. Sınır şartları da girildikten sonra çözüm başlatılmıştır.



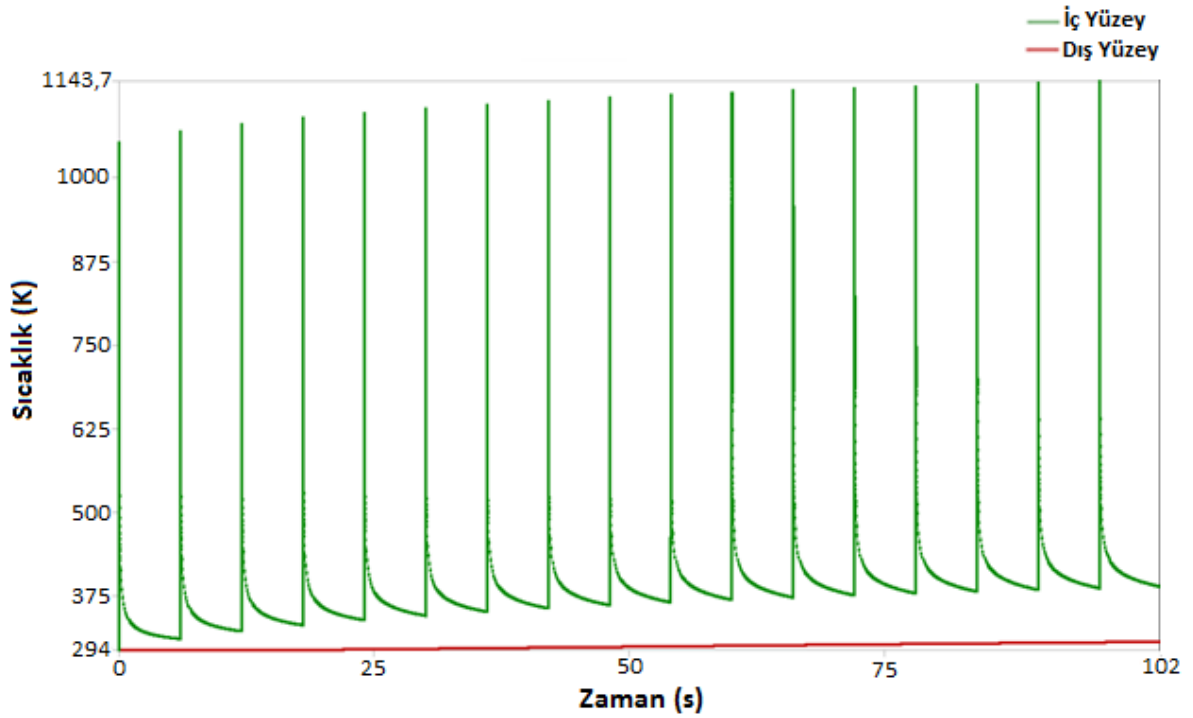
Resim 5.7. Yarım dairesel kanallı namlu modelinin sınır şartları

Sayısal çalışma sonucunda 17 atış boyunca elde edilen atış sonlarındaki minimum iç yüzey sıcaklıkları, Sun ve Zhang’ın çalışmalarındaki sonuçlarla Şekil 5.3’te mukayese edilmiştir.



Şekil 5.3. Yarım dairesel kanallı namluda seri atışlar boyunca minimum iç yüzey sıcaklıkları ve karşılaştırılması

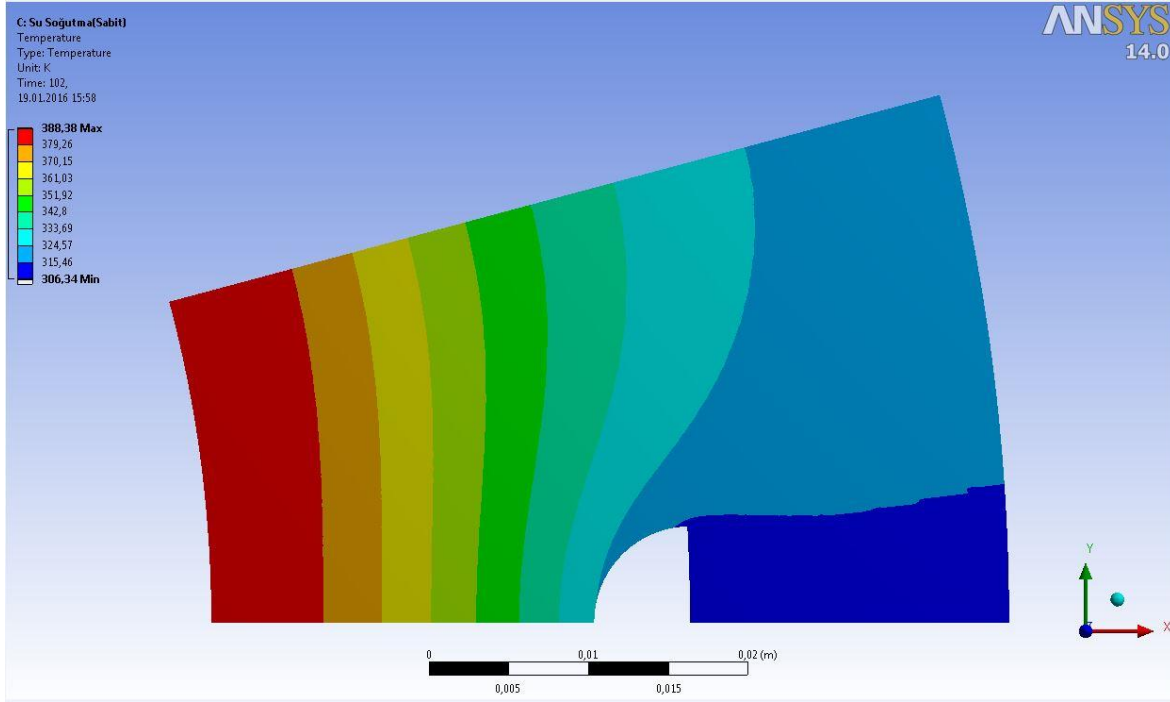
Yarım dairesel kanallı namlu için elde edilen sonuçların referans kabul edilen çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Resim 5.8’de atışlar esnasındaki namlu iç ve dış yüzey sıcaklık grafiği verilmiştir.



Resim 5.8. Yarım dairesel kanallı namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği

Aktif soğutmanın uygulandığı namluda seri atışlarda namlu iç ve dış yüzey sıcaklıkları saf namlununkine benzer eğilim göstermektedir. Atışlar esnasında namlu iç yüzeyinde erişilin maksimum sıcaklık değerinin ilk atışlarda arttığı daha sonraki atışlarda bu artışın azaldığı ve giderek sanki-sabit bir hale dönüşeceği gözlenmektedir. İlk birkaç atışta maksimum sıcaklık değeri ile atış sonundaki iç ve dış yüzeylerin sıcaklık değerlerinin saf namludaki değerler ile aynı olduğu görülmektedir. Atışlar ilerledikçe saf namluya göre sıcaklıkların artma eğiliminin daha az olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni ilk birkaç atıştan sonra ısının kanal yüzeyine doğru ilerlemesi ile beraber soğutucu akışkanın ısıyı çekmesi şeklinde yorumlanmaktadır. Soğutucu akışkanın ısı çekimi ile sıcaklık artışları da azalmaya başlamıştır.

Atışlar sonundaki namlu sıcaklık dağılımı incelendiğinde, yarım dairesel kanalda saf namluya göre kanaldan çekilen ısıdan dolayı daha düzensiz bir sıcaklık dağılımı meydana gelmiştir. Kanal ile dış yüzey arasındaki kalan bölge en düşük sıcaklıktadır. Kanaldan uzaklaştıkça sıcaklık artmaktadır. Analiz sonunda namlu iç yüzey sıcaklığı 388,38 K hesaplanmıştır.



Resim 5.9. Yarım dairesel kanallı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı

Hesaplamalar sonucunda saf namluya göre maksimum sıcaklıkta 10,8 K ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığında ise 12,43 K düşüş tespit edilmiştir. Sıcaklık dağılımında ise her bir noktadaki sıcaklık değeri saf namludaki sıcaklık değerinden daha düşük olduğu görülmektedir.

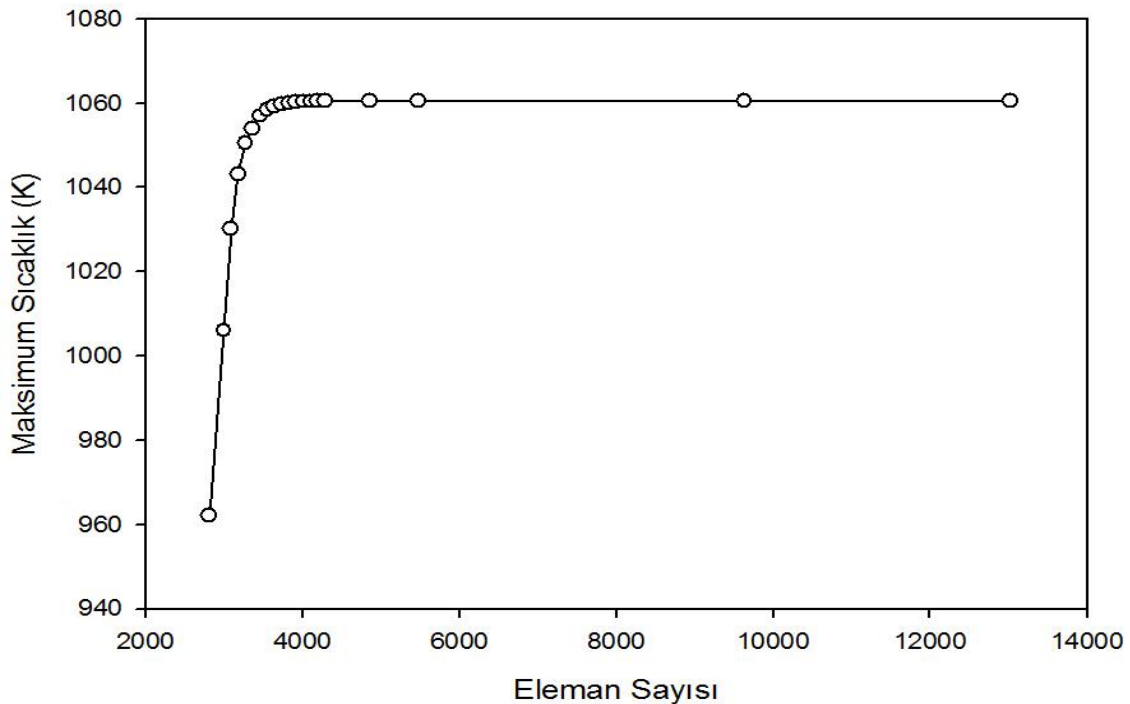
Modelin doğruluğu doğal ve aktif soğutmalı namlularda tek ve seri atış durumları için gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde doğruluğu sınanmış olan modeller üzerinde analizler gerçekleştirilecektir.

5.2. Mesh Sayısının Bağımsızlığı Çalışması

Modelin geometrisini resmedecek şekilde düğüm noktaları ve elemanların oluşturulmasına mesh atmak denir. Sonlu elemanlar yöntemi kabul edilebilir yaklaşık çözümler üreten bir sayısal çözüm tekniğidir. Bu yöntemle çalışan programlarda, incelenen problemde uygun çözüm ağı oluşturulmamış olsa bile bir sayısal çözüm alınmaktadır. Gerçekçi çözüm elde edilinceye kadar eleman sayısı arttırılarak, eleman tipi değiştirilerek, mesh atma tekniği değiştirilerek veya mesh üzerinde yerel kontroller yapılarak çözüm tekrarlanabilir.

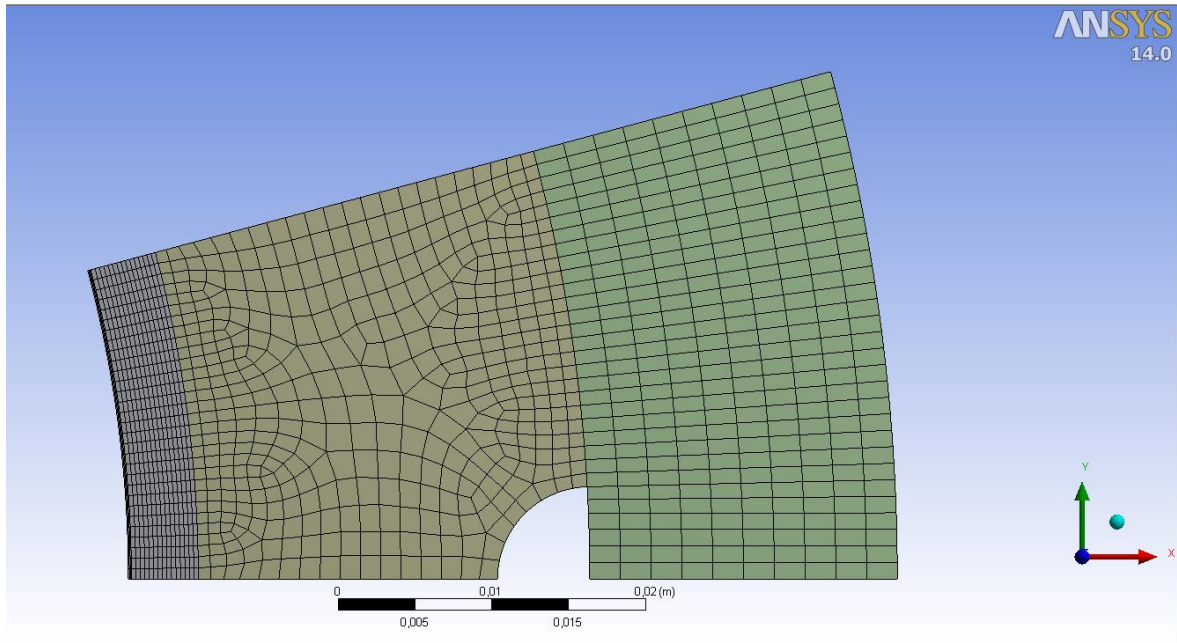
Gerçek fiziksel olaya uygun çözüm elde edildikten sonra mesh sayısının bağımsızlığı çalışması yapılmaktadır. Bu çalışma; elde edilen çözümde, mesh sayısının artırılması ile sonucun artık önemli miktarda değişmeyeceği en uygun mesh sayısını tespit etmektir. Çünkü gereğinden fazla mesh sayısı ile yapılan analizlerde hem analiz süresi çok uzamakta hem de çözüm dosyaları bilgisayar hafızasında çok fazla yer kaplamaktadır.

Bu kapsamda; aktif soğutma sisteminin uygulandığı yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namluda 20 atışlık seri atış analizinde mesh sayısının bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. 20 atış için 17 atışta olduğu gibi zaman adımları tanımlanmıştır. Atım sıklığı aynıdır. Dolayısıyla toplam 3140 zaman adımı oluşturulmuştur. Kaplama iç yüzeyi haricinde geri kalan sınır ve başlangıç şartları için 17 atışta uygulanan şartlar geçerlidir. Kaplama iç yüzeyi sınır şartı olarak da her atış için ilgili zaman adımlarında ısı akısı değerleri kaplama iç yüzeyine tablo halinde girilmiştir. Farklı mesh sayıları ile oluşturulan model aynı sınır şartlarına tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar kıyaslanarak aralarındaki farklar gözlenmiştir. En kısa sürede gerçeğe yakın sonuç veren en uygun mesh sayısı belirlenmiştir. Namluda sadece radyal yöndeki ısı transferi ve sıcaklık dağılımı incelendiğinden açısal yöndeki eleman sayısının değişimi sonuçlara çok fazla etki etmemektedir. Bu yüzden daha çok sıcaklık değişimlerin fazla olduğu iç yüzeye yakın bölgelerde radyal yöndeki eleman sayısı artırılarak analizler tekrarlanmıştır.



Şekil 5.4. Namlu iç yüzeyindeki maksimum sıcaklığın eleman sayısına göre değişimi

İç yüzeye yakın bölgelerdeki eleman sayıları namlu et kalınlığı boyunca kademeli olarak arttırılmıştır. Oluşturulan her bir çözüm ağında analizler tekrar edilmiştir. Eleman sayısının arttırılması ile kaplama iç yüzeyinde görülen en yüksek sıcaklık artmaktadır. Artan eleman sayıları programa daha fazla denklem çözdürdüklerinden analiz sürelerinin uzamasını da beraberlerinde getirmişlerdir. Şekil 5.4'te de görüleceği üzere belli bir eleman sayısından sonra elde edilen sonuçlarda belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Analiz süresi ve bilgisayar hafızası açısından en uygun çözüm ağı Resim 5.10'da verilmiştir. Çözüm ağı 4110 düğüm noktası ve 1311 elemandan meydana gelmektedir. Genelde dörtgen elemanlardan oluşturulmuştur. Dörtgen elemanın oluşturulamadığı bazı yerler üçgen elemanlara bölünmüştür.



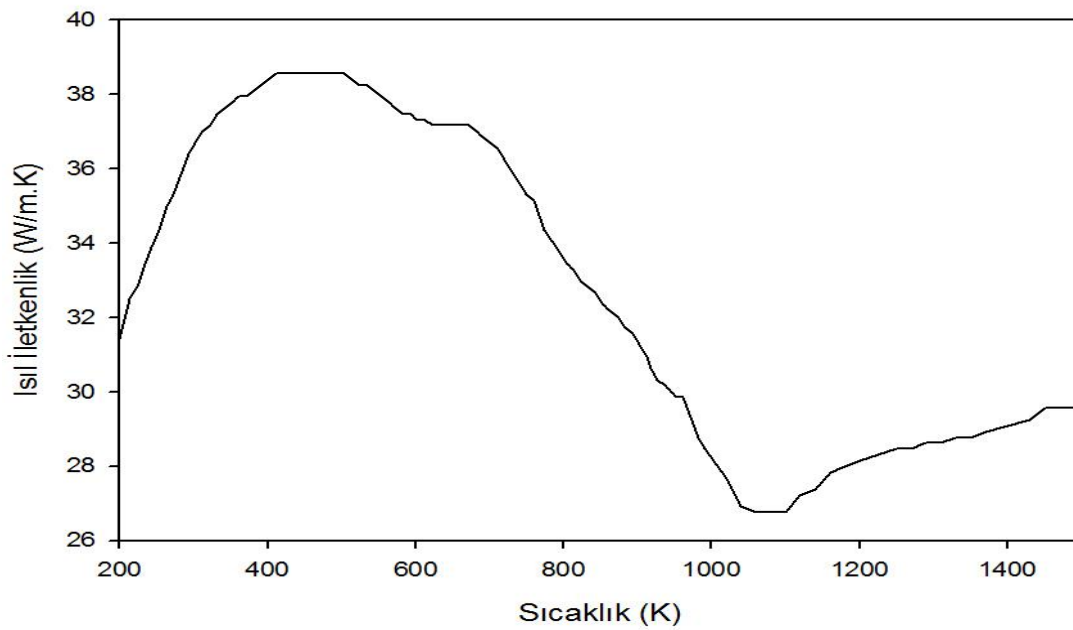
Resim 5.10. Yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlu için en uygun çözüm ağı

Bundan sonraki gerçekleştirilen analizlerde, çizilen modeller üzerinde de aynı çalışma yapılarak en uygun çözüm ağları tespit edilmiş ve analizlere bu çözüm ağları ile devam edilmiştir.

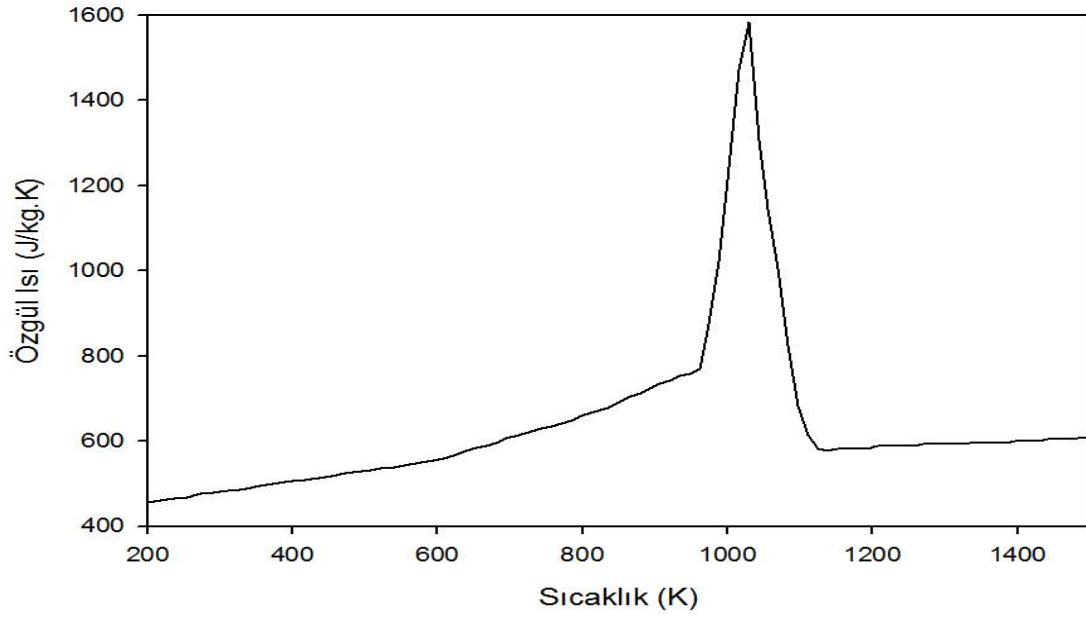
5.3. Değişken Termofiziksel Özelliklerin Sıcaklık Analizine Etkileri

Malzemelerin termofiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedirler. Literatürdeki birçok araştırmacı yaptıkları çalışmada, namlu malzemesinin ısı iletkenlik ve özgül ısısının sıcaklıkla değişimlerini ihmal etmişlerdir. Bunun neticesinde sonuçlarda bir

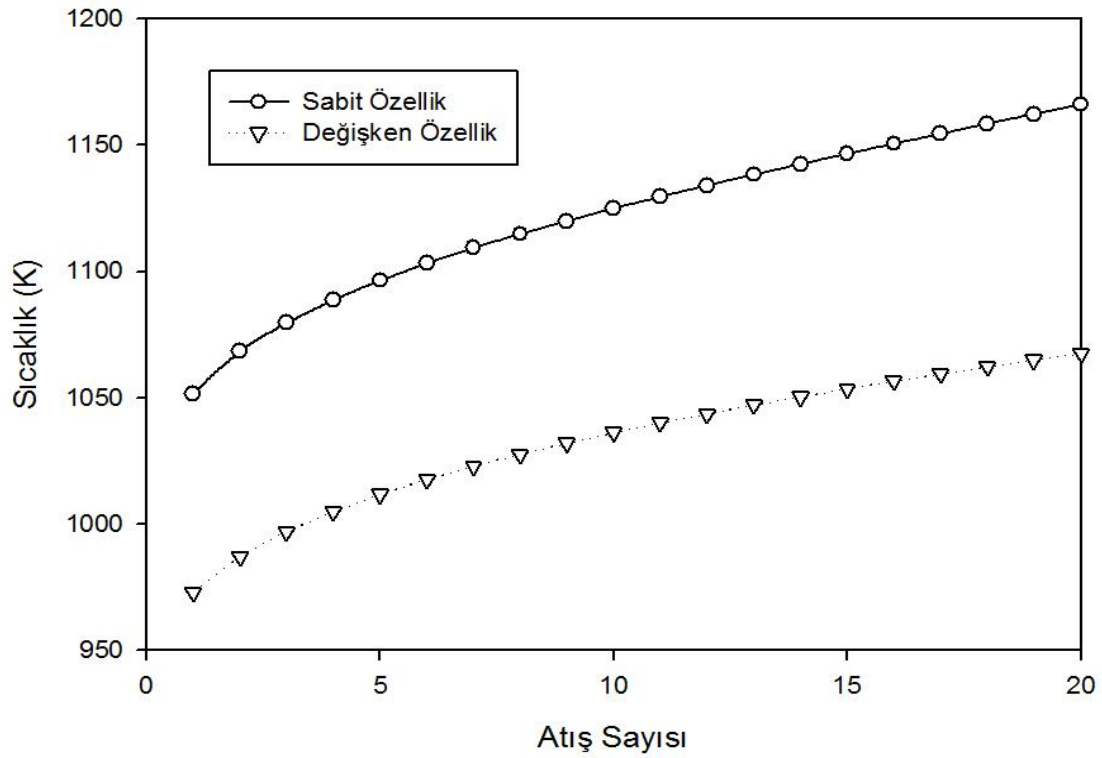
hata payının oluşması beklenmektedir. Çalışmanın bu bölümünde; modelin malzeme tanımlama aşamasında, Mishra vd. tarafından kullanılan değişken termofiziksel özellikler tablo halinde girilerek, değişken özelliklerin doğal soğutmalı saf namlunun seri atışlardaki sıcaklık değerlerine ve dağılımına olan etkileri araştırılmıştır. Programda malzeme özelliklerinin tablo halinde tanıtılmasında 100 veriye müsaade edilmektedir. Buna göre 100 farklı sıcaklık değerindeki ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerleri namlu malzemesinin özellikleri olarak girilmiştir. Sıcaklığa bağlı namlu malzemesinin ısıl iletkenlik ve özgül ısı grafikleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir.



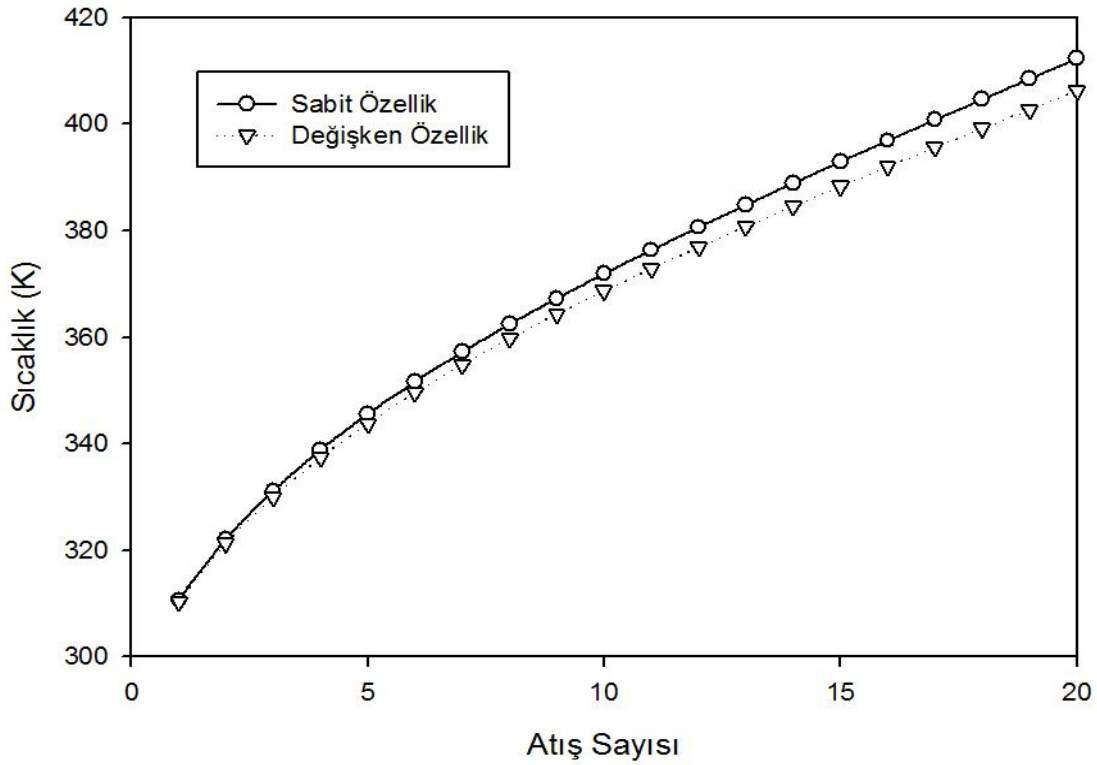
Şekil 5.5. Namlu malzemesinin ısıl iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 5.6. Namlu malzemesinin özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 5.7. Maksimum iç yüzey sıcaklığın sabit ve değişken özelliğe bağlı değişimi



Şekil 5.8. Minimum iç yüzey sıcaklığının sabit ve değişken özelliğe bağlı değişimi

Değişken özelliklerin sıcaklık değerlerine etkileri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de sunulmuştur. Sabit özellik kabulü ile yapılan 20 atışlık seri atış çalışmasında namlu iç yüzeyindeki maksimum sıcaklık 1166 K ve atışlar sonundaki namlu iç yüzey sıcaklığı 412,34 K bulunmuştur. Değişken özellik girildiğinde bu değerler sırasıyla 1067 K ve 406,24 K hesaplanmıştır. Maksimum sıcaklık değerinde % 9 atış sonundaki iç yüzey sıcaklığında ise % 1,5 hata çıkmıştır. Namluda meydana gelen erozyon ve aşınma miktarı, atışlar esnasındaki hissedilen maksimum sıcaklığa bağlı olduğundan bu hata payı önemli olabilir. Namludaki kendiliğinden ateşlenme riski ise atışlar sonundaki namlu iç yüzey sıcaklığına bağlıdır. Bu çalışmadaki analizler kendiliğinden ateşlenme riski açısından irdelendiğinden sabit özellik kabulünden kaynaklanan hatalar ihmal edilebilir. Dolayısıyla çalışmalara sabit özellik kabulü ile devam edilmiştir.

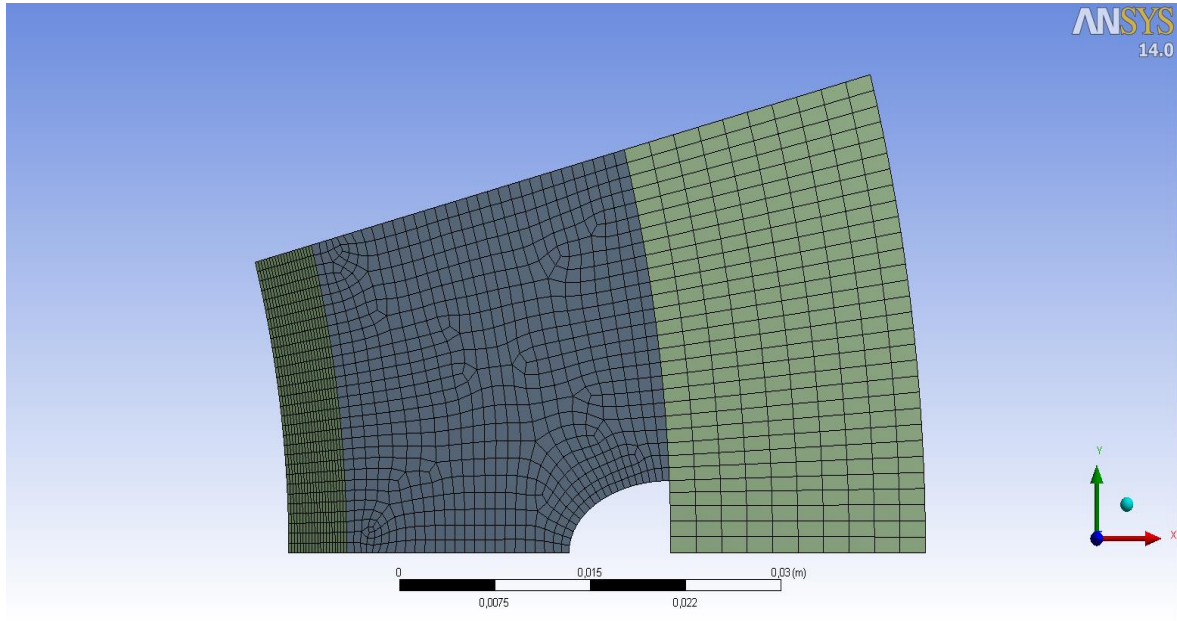
5.4. Sayısal Bulgular

Aktif soğutmalı namlu ile yapılan atışlar esnasında namluda gerçekleşen ısı transferine soğutma kanalı geometrisi, sayısı, soğutucu akışkan hızı ve cinsi gibi parametrelerin etki

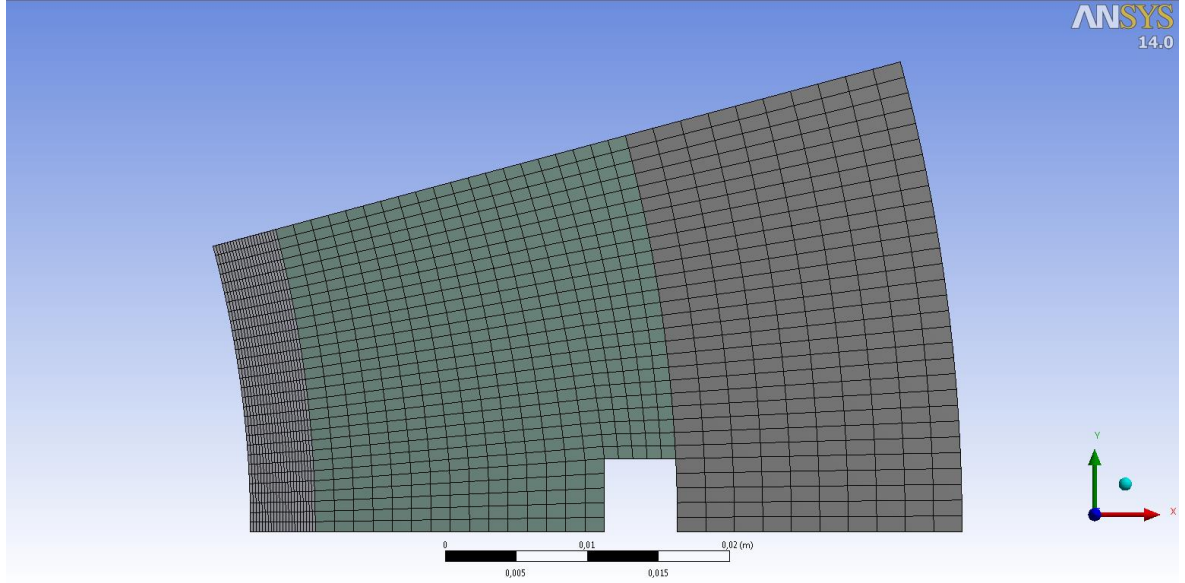
edeceği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda; bahsedilen tüm parametreler alt bölümler halinde incelenmiş ve sonuçlar mukayese edilmiştir.

5.4.1. Kanal geometrisinin ısı transferine etkileri

Bu bölümde aktif soğutmalı namlularda, soğutma kanalı geometrilerinin soğutma performansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Yarım elips ve dikdörtgen kanallı namlularda seri atış analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sabit termofiziksel özellikli namlu malzemesi kullanılmıştır. Kanal boyutları belirlenirken kanalların birim uzunlukta eşit ısı transfer yüzey alanlarına sahip olması dikkate alınmıştır. Simetri avantajı bu çalışmalarda da mevcuttur. Dolayısıyla namlunun 1/24'lük kısmı modellenmiştir. Bölüm 4.2'de belirtilen kanal boyutlarına göre Design Modeler'da namlu modelleri çizilmiştir. Daha sonra her iki model için uygun çözüm ağları oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağlarında; yarım elips kanallı namlu modelde 5144 düğüm ve 1647 dörtgen eleman, dikdörtgen kanallı namlu modelde ise 4789 düğüm ve 1535 dörtgen eleman bulunmaktadır.

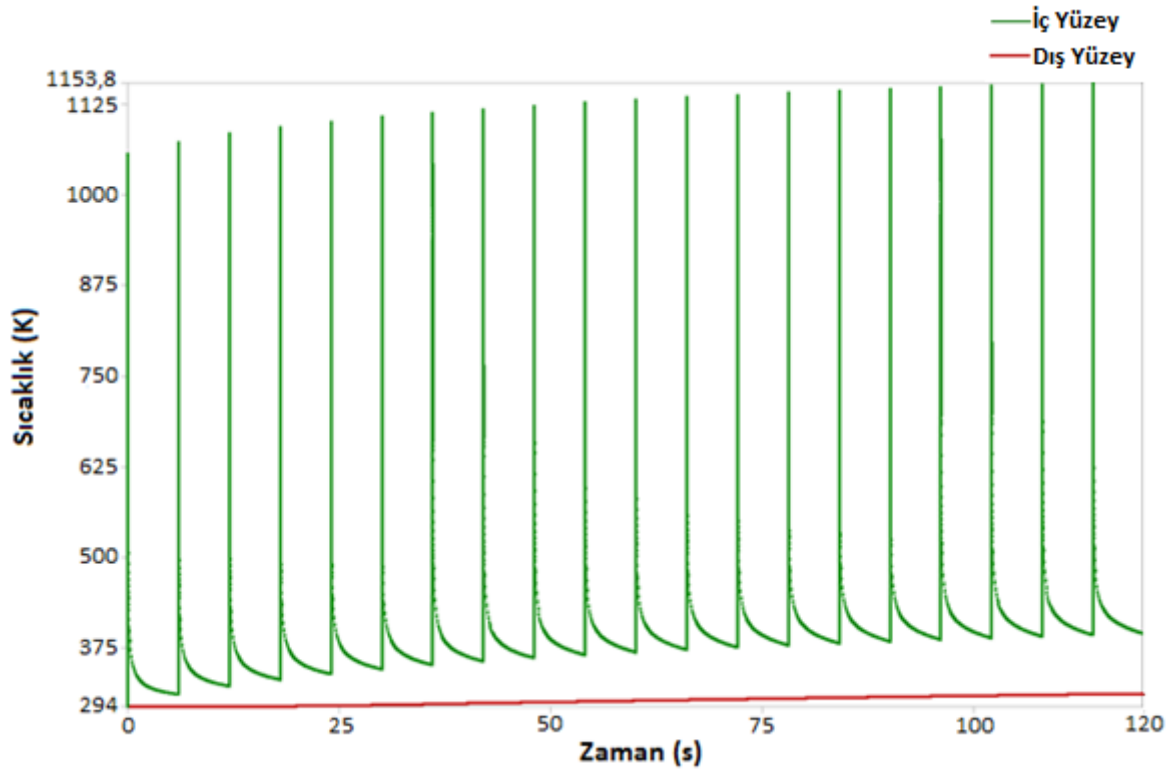


Resim 5.11. Yarım elips kanallı namlu modelinin çözüm ağı

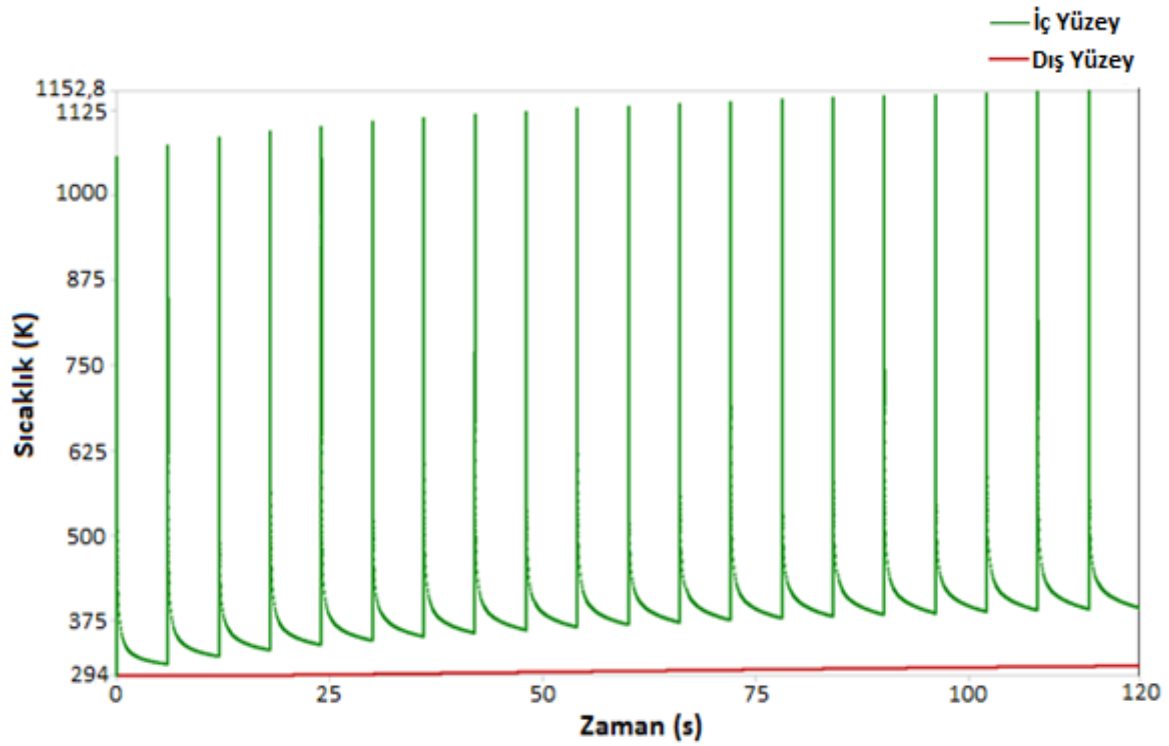


Resim 5.12. Dikdörtgen kanallı namli modelinin çözüm ağı

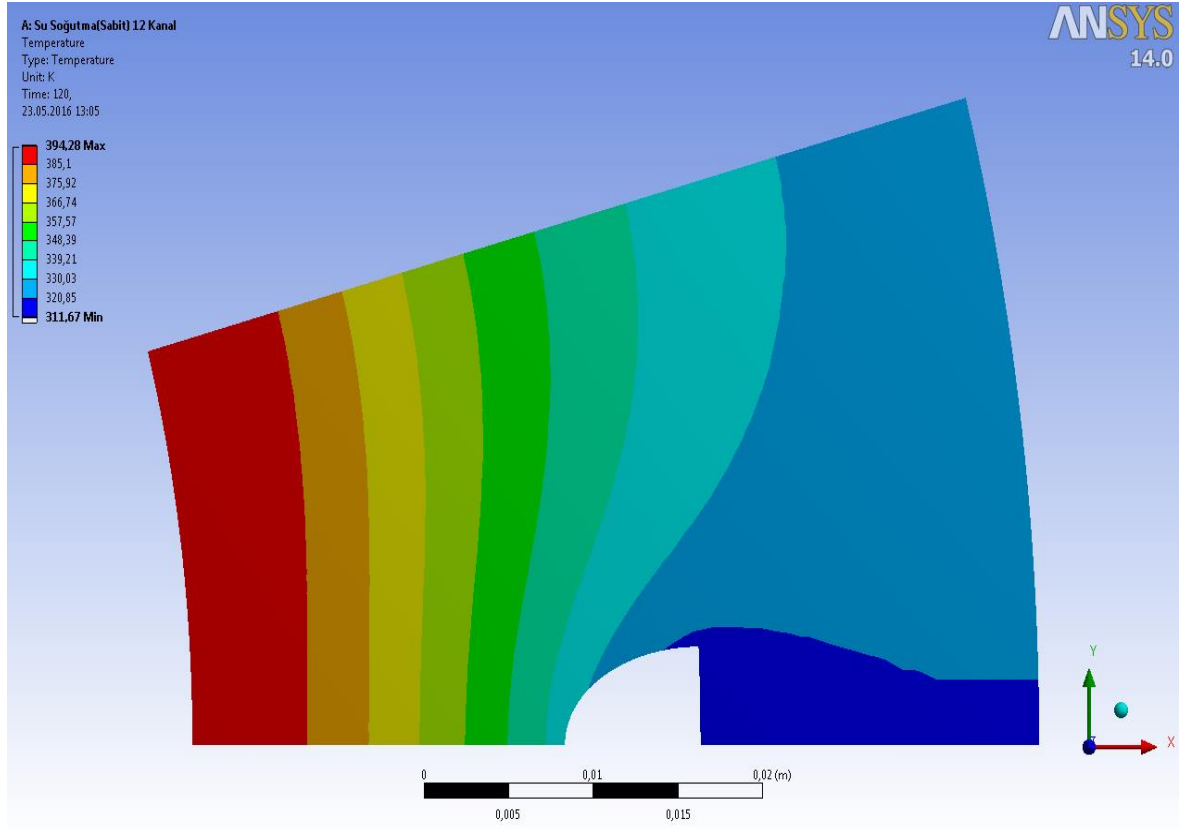
Çözüm ağları oluşturulduktan sonra başlangıç ve sınır şartlarının uygulanmasına geçilmiştir. Yarım dairesel kanaldan farklı olarak soğutucu akışkan ile kanal yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayılarının değerleri değişecektir. Bunun için yarım elips ve dikdörtgen kanallardaki soğutucu akışkanın ısı taşınım katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Hesaplamalar için yarım dairesel kanalda olduğu gibi Bölüm 4.3.3'deki zorlanmış iç taşınım denklemlerinden faydalanılmıştır. Soğutucu akışkan debileri her kanal geometrisinde aynı olacak şekilde, yarım elips ve dikdörtgen kanallardaki su hızları belirlenmiştir. Yarım elipste 0,899 m/s ve dikdörtgen kanalda 1,069 m/s hesaplanmıştır. Bu değerlere göre Reynolds sayıları ve ısı taşınım katsayıları sırasıyla yarım elips kanal için 10860 ve 4189 W/m².K, dikdörtgen kanal için 7288 ve 5392 W/m².K bulunmuştur. Sınır şartlarının da girilmesinden sonra çözümlere geçilmiştir.



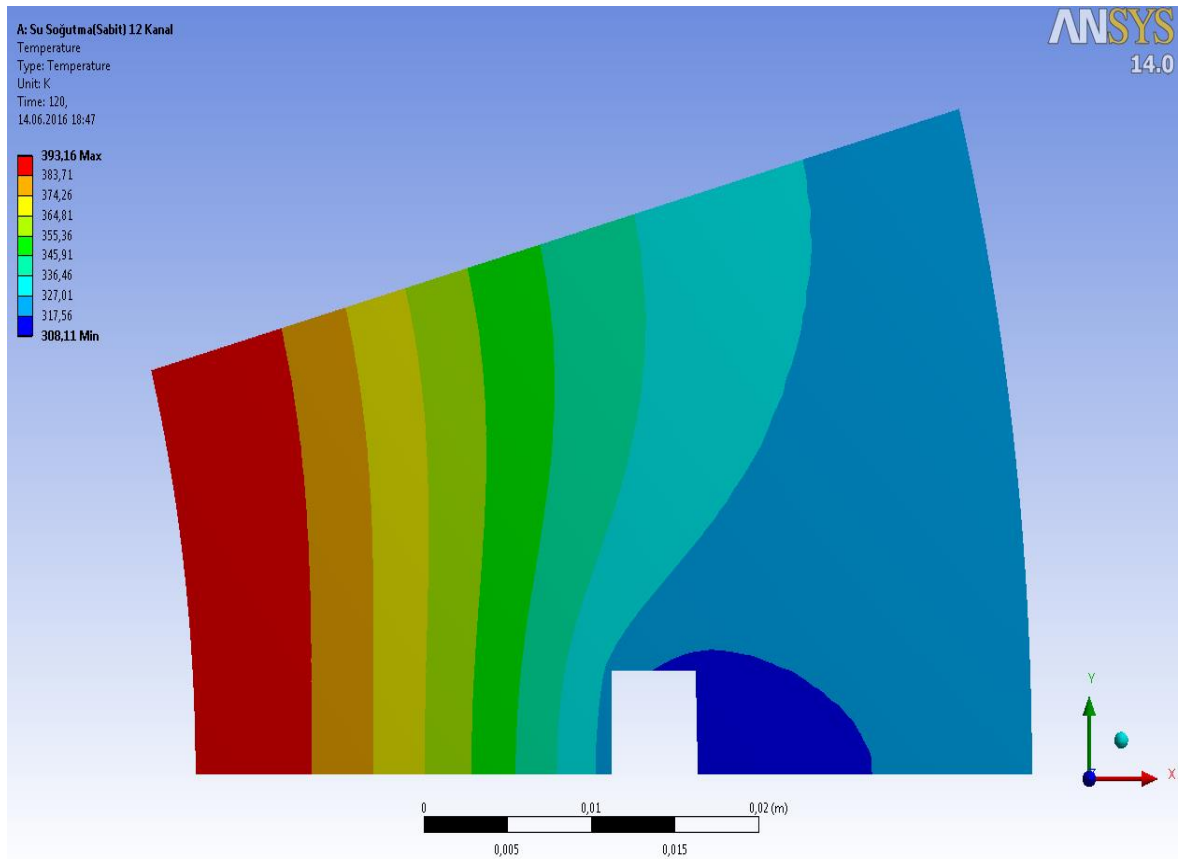
Resim 5.13. Yarım elips kanallı namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği



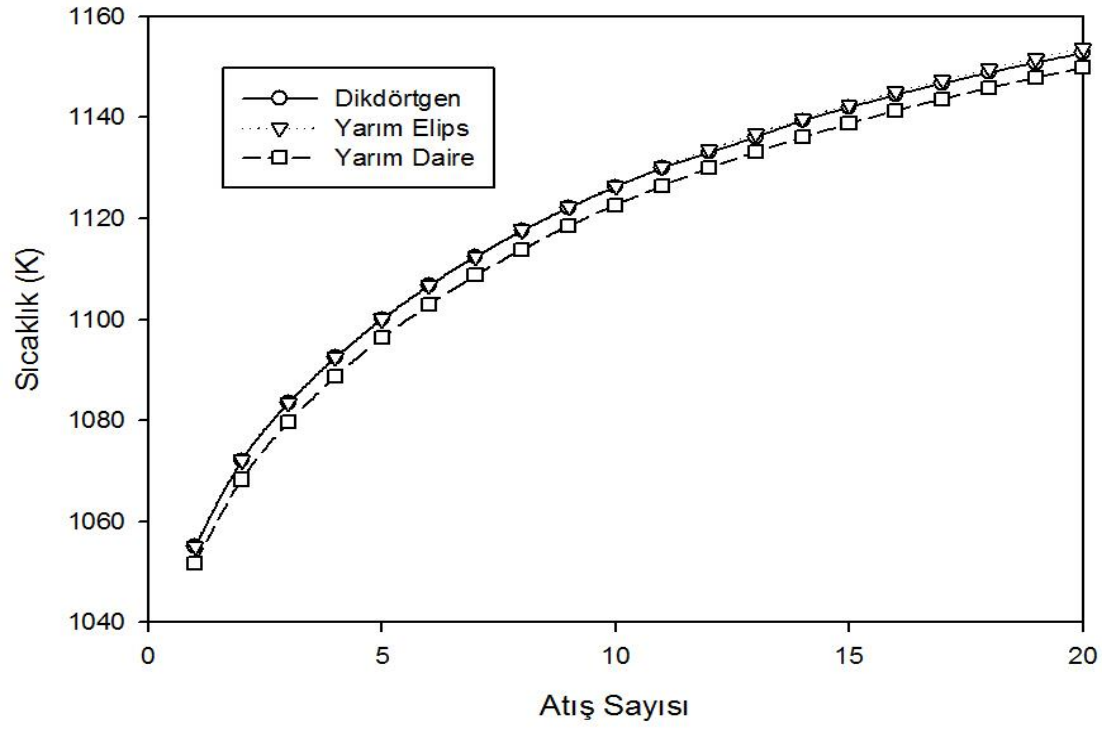
Resim 5.14. Dikdörtgen kanallı namlunun seri atışlar esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği



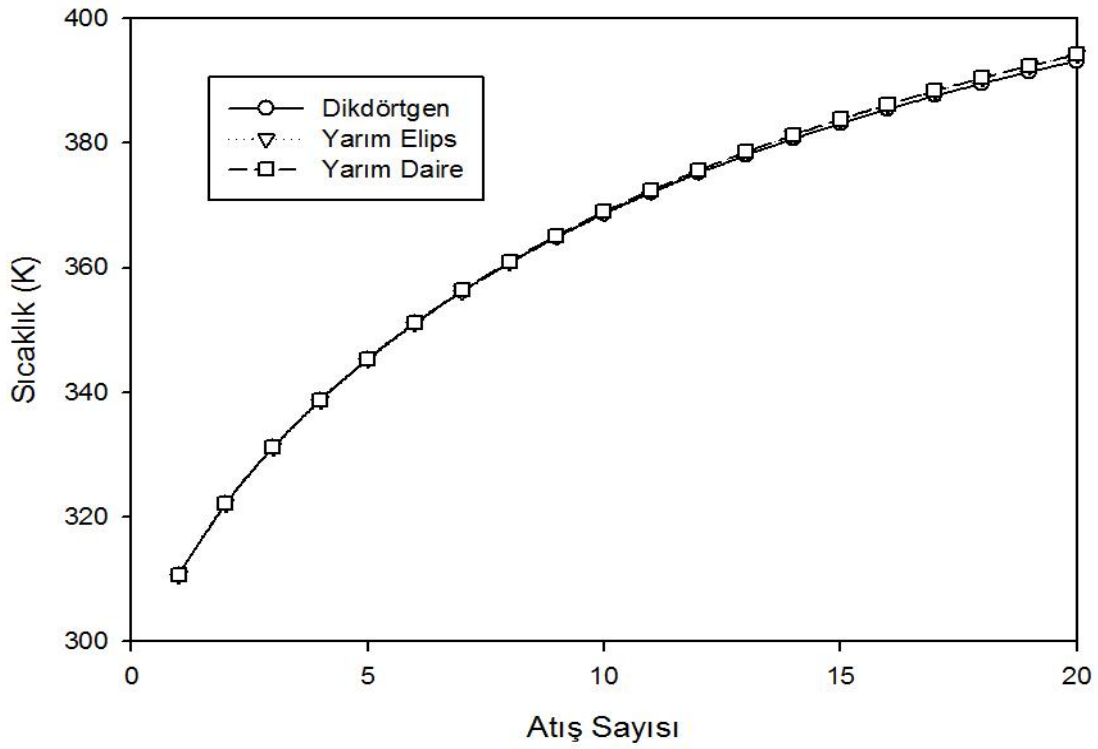
Resim 5.15. Yarım elips kanallı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı



Resim 5.16. Dikdörtgen kanallı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.9. Maksimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi



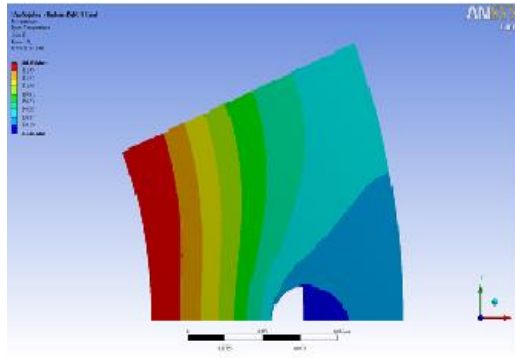
Şekil 5.10. Minimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi

Dikdörtgen, yarım elips ve yarım dairesel kanallı namlularda, atışlar boyunca iç yüzeyde görülen maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 1152,8 K, 1153,8 K ve 1149,9 K, atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklık değerleri ise sırasıyla 393,16 K, 394,28 K ve 394,17 K olarak hesaplanmıştır. Kanalların namlu et kalınlığı içerisindeki konumları ve soğutucu akışkan ile aralarındaki ısı transfer katsayıları, sıcaklık değerlerine etki etmektedir. Isı transfer katsayısının diğerlerine göre daha büyük olması nedeni ile dikdörtgen kanalda atışlar sonunda en düşük sıcaklığın görülmesi beklenen bir durumdur. Sıcaklık değerleri arasındaki farkların çok küçük olması; kanallardaki ısı transfer katsayılarının birbirlerine yakın olması ve kanalların eşit ısı transfer yüzey alanlarına sahip olması ile yorumlanmaktadır. Bu nedenle yapılan karşılaştırmalar sonucunda; kanal geometrilerinin sıcaklık değerlerini önemli orada değiştirmedeği tespitinde bulunulmuştur.

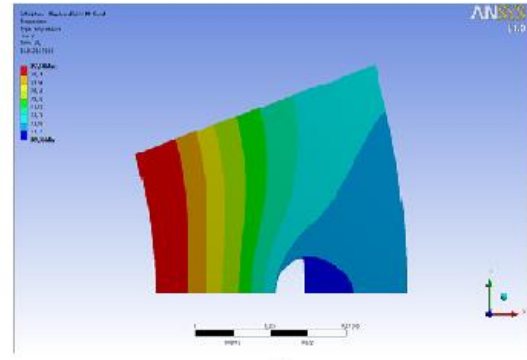
5.4.2. Kanal sayısının ısı transferine etkileri

Kanal sayısı, aktif soğutmalı namlularda sıcaklık değerlerine etki eden önemli bir parametredir. Bu konuda, Sun ve Zhang tarafından yapılmış bir parametrik çalışma literatürde bulunmaktadır [3]. Sun ve Zhang çalışmalarında 12, 15, 18 ve 24 kanal sayılarını kullanmışlardır.

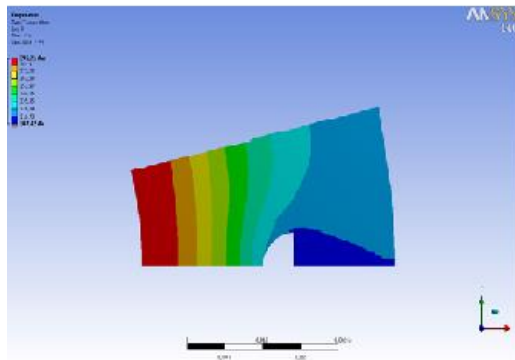
Çalışmanın bu bölümünde, yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlu ile gerçekleştirilen seri atışlarda kanal sayısının ısı transferine etkileri sunulmuştur. Kanal sayıları olarak 8, 10, 12, 14 ve 16 belirlenmiştir. İleride yapılabilecek aktif soğutmalı namluların mukavemet analizi çalışmalarına yardımcı olabilmek adına kanal sayısının azaltıldığı durumlar da ele alınmıştır. Namlu geometrileri oluşturulmasında, simetrinin sağlanması açısından kanal sayısına uygun olarak farklı oranlarda namlu modellenmiştir. 8, 10, 14 ve 16 kanallı namlularda, namlu sırasıyla 1/16, 1/20, 1/28 ve 1/32'lik oranlarda modellenmiştir. Çizilen geometrilere en uygun çözüm ağları oluşturulduktan sonra daha önceki analizlerde gerçekleştirilen sınır şartları modellere uygulanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen namlu sıcaklık dağılımları Resim 5.17'de gösterilmiştir.



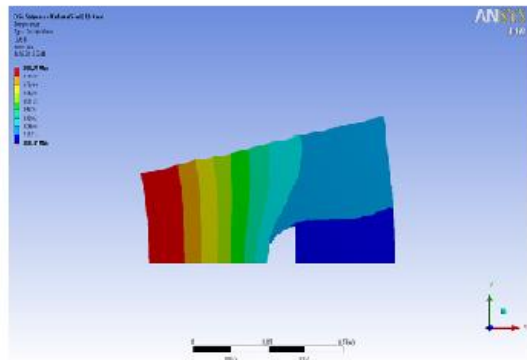
(a)



(b)



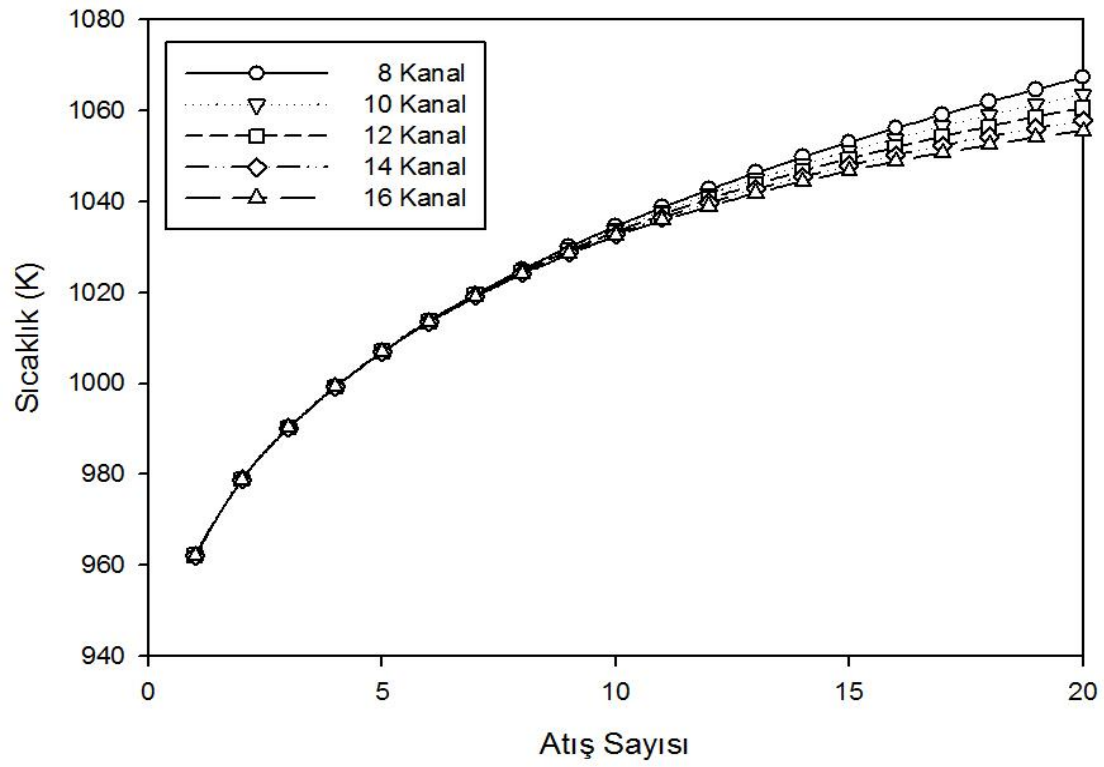
(c)



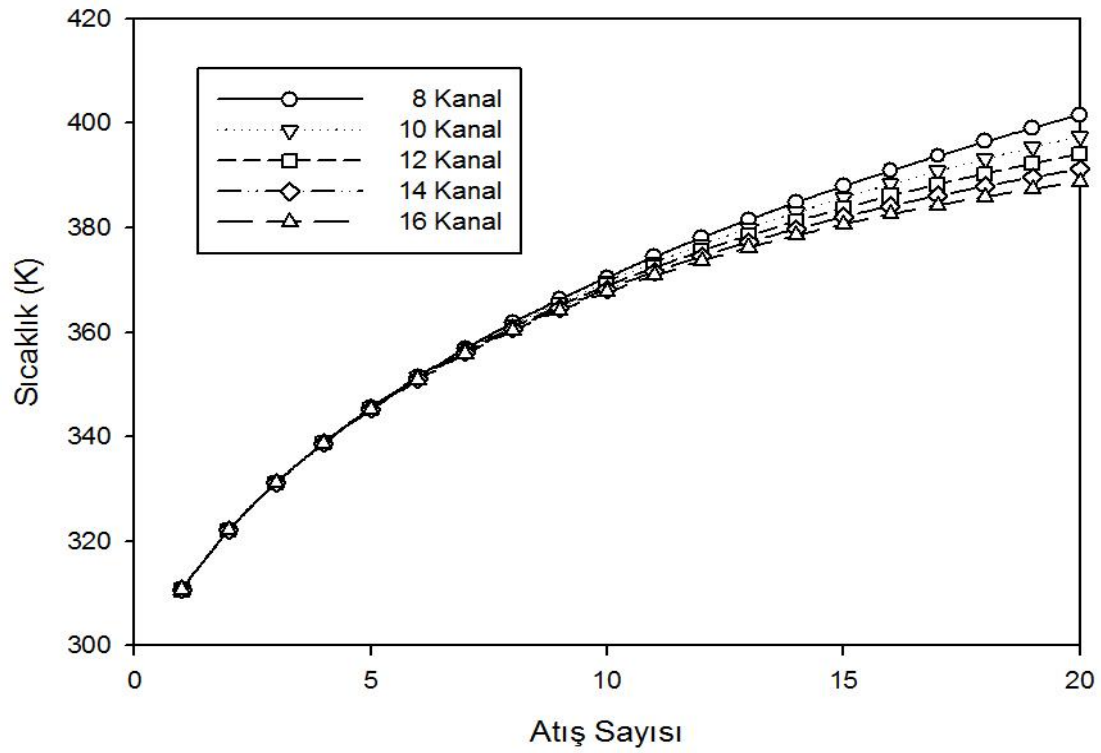
(d)

Resim 5.17. Yarı dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımları (a): 8 kanallı, (b): 10 kanallı, (c): 14 kanallı, (d): 16 kanallı

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, maksimum sıcaklığın ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığın kanal sayısına bağlı değişim grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de sunulmuştur.



Şekil 5.11. Maksimum iç yüzey sıcaklığın kanal sayısına bağlı değişimi

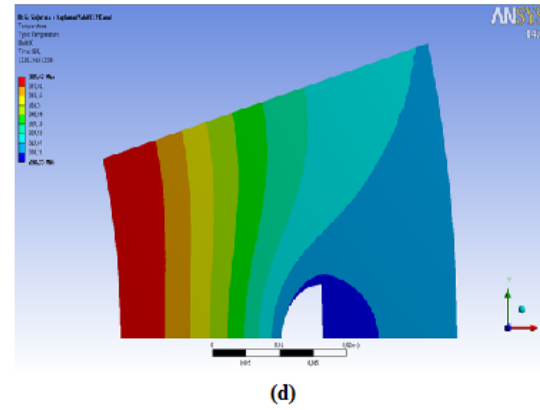
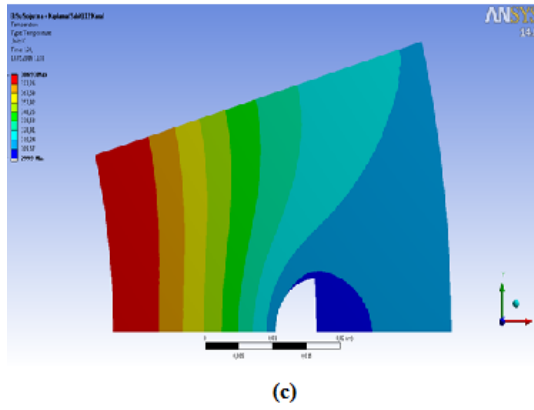
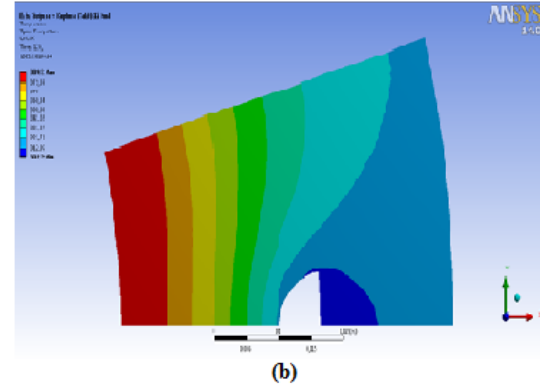
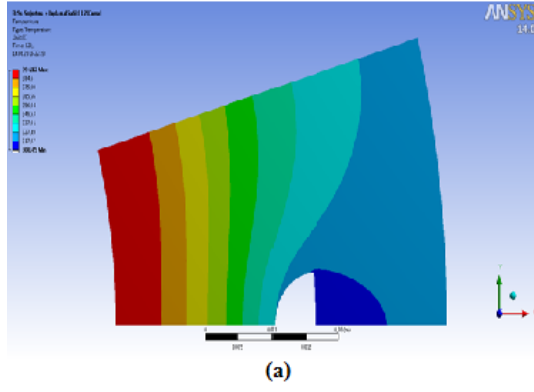


Şekil 5.12. Minimum iç yüzey sıcaklığın kanal sayısına bağlı değişimi

Karşılaştırmalı grafikler incelendiğinde; beklenildiği üzere en düşük sıcaklıklar kanal sayısının en fazla olduğu namluda görülmüştür. 16 kanallı namluda 20 atış esnasında ulaşılan maksimum sıcaklık 1055,5 K ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığı 388,75 K hesaplanmıştır. Bu değerler 8 kanallı namluda sırasıyla 1067,3 K ve 401,63 K bulunmuştur. Kanal sayısının 2 katına çıkarılması; maksimum sıcaklıkta % 1,10 ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığında % 3,20 oranlarında azalma sağlamıştır. Kanal sayısı değişiminin sıcaklık değerlerini çok fazla değiştirmedeği ve hissedilebilir derecede önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni olarak; kanalların namlu et kalınlığı içerisindeki bulundukları bölgenin, düşük sıcaklık bölgesi olmasından dolayı kanal sayısı değişiminden kaynaklanan ısı transferinin, namlu iç yüzeyindeki sıcaklık değerlerini önemli ölçüde değiştiremediği değerlendirilmektedir.

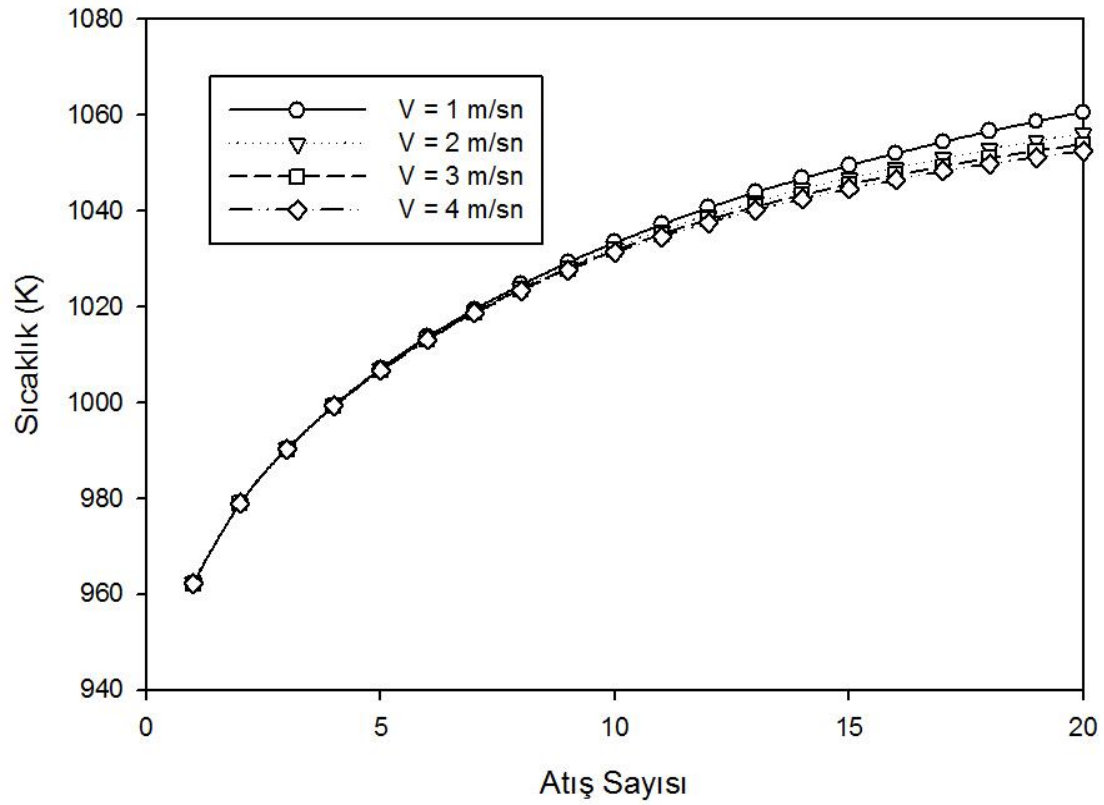
5.4.3. Soğutucu akışkan hızının ısı transferine etkileri

Sıvı soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanın hızı arttırılarak, akışkanın ile yüzey arasındaki ısı taşınım katsayısının arttırılması ve neticesinde yüzeyden daha fazla ısının çekilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada, soğutucu akışkanın hızı 2, 3 ve 4 katına çıkarıldığında daha büyük ısı taşınım katsayısının oluşturulması ile namludaki sıcaklık değerlerinin nasıl değiştiği irdelenmiştir. Çalışmanın yapıldığı namlu yarım dairesel kanallı ve kaplamalıdır. Kanal sayısı tüm hızlarda 12 olarak belirlenmiştir. Soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Isı taşınım katsayılarının hesabı için daha önceki analizlerde olduğu gibi Bölüm 4.4.3'deki denklemlerden istifade edilmiştir. Hızın 2, 3 ve 4 katına çıkarılması ile Reynolds sayıları sırasıyla 14560, 21840 ve 29120 hesaplanmıştır. Elde edilen yeni Reynolds sayılarında, hesaplanan ısı taşınım katsayıları sırasıyla 8780, 12145 ve 15288 W/m².K bulunmuştur. Kullanılan geometri, çözüm ağı ve sınır şartları daha önce gerçekleştirilen yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlu ile aynıdır. Sadece kanal yüzeyi ile soğutucu akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı olarak yeni bulunan değerler tanımlanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen namlu sıcaklık dağılımları Resim 5.18'de gösterilmiştir.

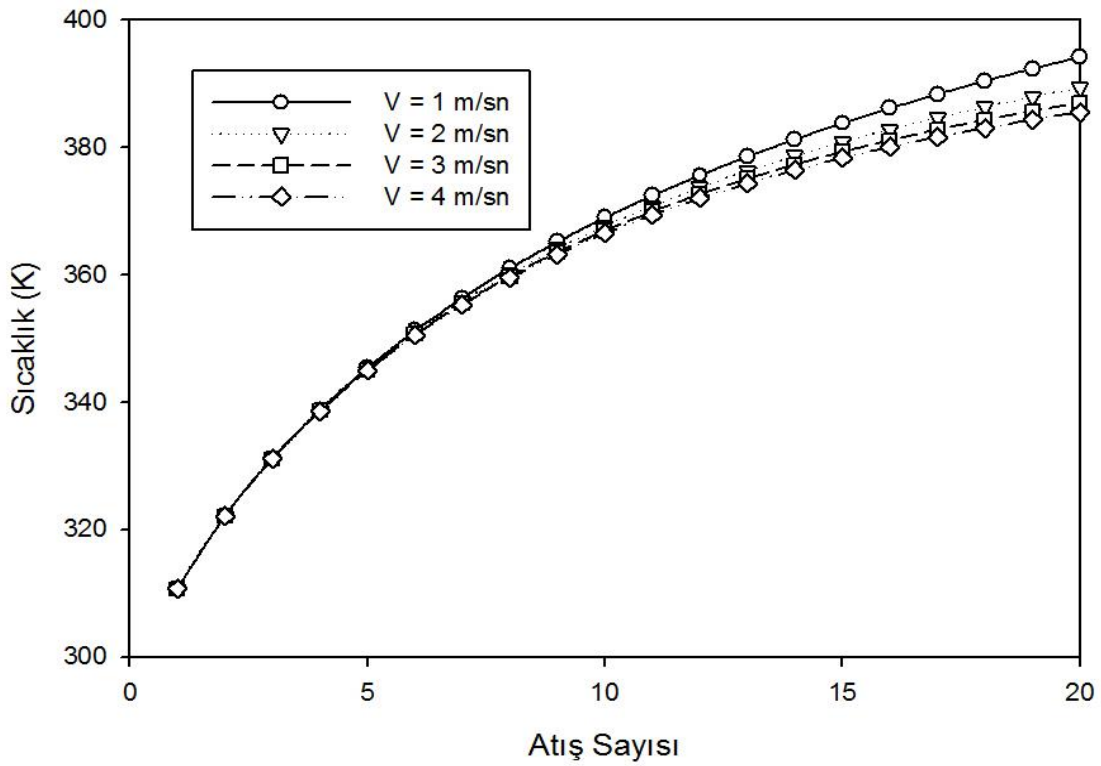


Resim 5.18. Yarı dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun seri atışlar sonundaki sıcaklık dağılımları (a): $V = 1$ m/s, (b): $V = 2$ m/s, (c): $V = 3$ m/s, (d): $V = 4$ m/s

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, maksimum sıcaklığın ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan hızına bağlı değişim grafikleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te sunulmuştur.



Şekil 5.13. Maksimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan hızına bağlı değişimi



Şekil 5.14. Minimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan hızına bağlı değişimi

Sıcaklık değerlerine bakıldığında; soğutucu akışkan hızının en fazla olduğu namluda en düşük sıcaklıkların oluştuğu görülmektedir. $V = 4$ m/s olan namluda, maksimum sıcaklık ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklık değerleri sırasıyla 1052,4 K ve 385,4 K hesaplanmıştır. Bu değerler, $V = 1$ m/s olan namluda sırasıyla 1060,5 K ve 394,1 K hesaplanmıştır. Hız değeri 2, 3 ve 4 katına çıkarıldığında sıcaklık değerlerindeki azalma miktarları sırasıyla, maksimum sıcaklıkta 4,5 K, 6,7 K ve 8,1 K ve atışlar sonundaki iç yüzey sıcaklığında ise 4,8 K, 7,2 K ve 8,6 K olmuştur. Hız artışının belli bir değere kadar soğutma kapasitesini artırdığı daha büyük değerlere çıkıldığında etkisinin çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürdeki deneysel tespitler ile uyumlu bir sonuç ortaya koymaktadır [2].

5.4.4. Soğutucu akışkan cinsinin ısı transferine etkileri

Parametrik çalışmada son olarak soğutucu akışkan cinsinin soğutma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Literatürdeki birçok çalışmada soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Bass ve Swardt ise çalışmalarında su yerine % 100 antifriz kullanmışlar ve kayda değer bir farkın meydana gelmediğini belirtmişlerdir [2].

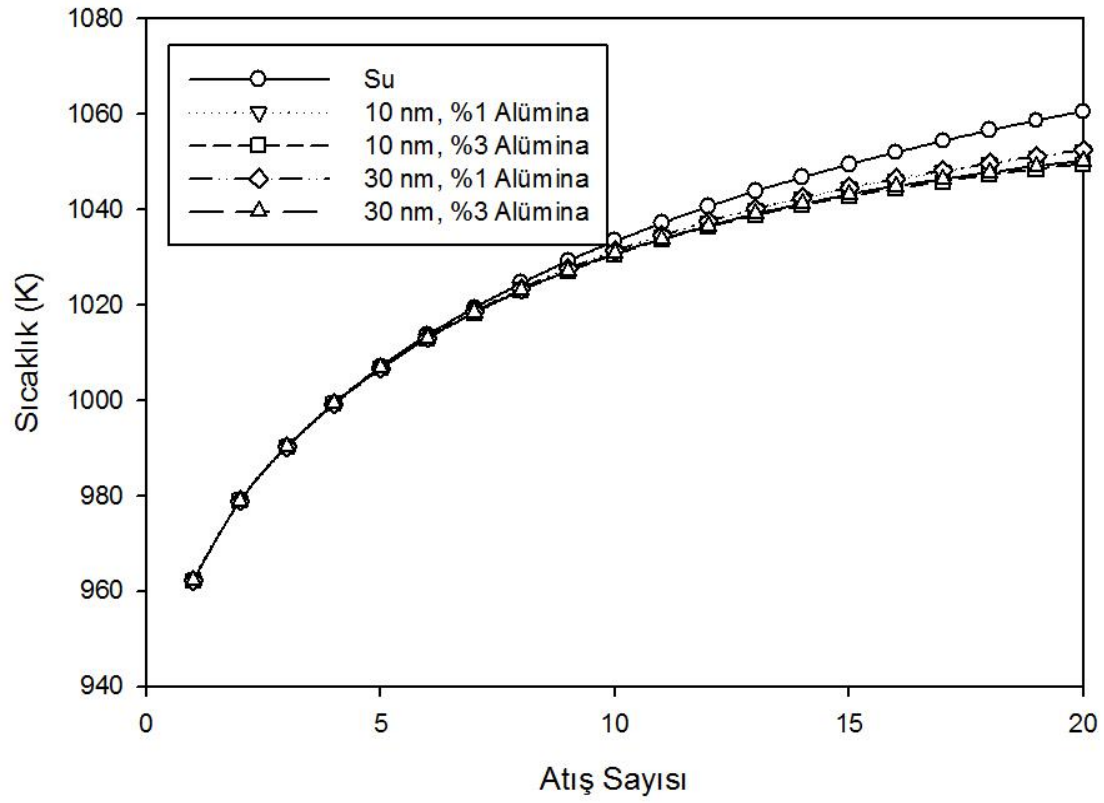
Bu çalışmada farklı soğutucu akışkan cinsi olarak yeni nesil ısı transfer akışkanı olma potansiyeli taşıyan nano akışkan seçilmiştir. Nano tanecikler ve taşıyıcı bir akışkandan oluşan iki fazlı sistemler nano akışkan olarak adlandırılmaktadır [22]. Nano tanecik olarak bakır (Cu), gümüş (Ag) gibi metaller veya alüminyum oksit (Al_2O_3), bakır oksit (CuO) gibi metal oksitler kullanılabilir. Etilen glikol ya da su taşıyıcı akışkan olarak kullanılmaktadır. Tanecik boyutları 1 nm ile 100 nm çap aralığında değişebilir. Isı transferinin etkin olabilmesi için nano akışkanlar yaygın olarak hacimce % 5'e kadar nano tanecik içerirler. Akışkan içerisine süspanse edilen tanecikler akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini büyütür [23].

Bu amaç doğrultusunda, çalışmanın bu bölümünde Turgut vd. tarafından yapılan çalışmalarda deneysel olarak belirledikleri 10 nm ve 30 nm tanecik boyutuna sahip Al_2O_3 -su nano akışkanların, hacimce % 1, 2 ve 3 katkı oranlarındaki ve 294 K'deki ısı iletkenlik ve viskozite değerleri kullanılmıştır [22]. Bu değerlere bağlı olarak farklı kanal geometrilerinde hesaplanan ısı taşınım katsayıları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Hesaplamalarda Bölüm 4.3.3'deki denklemler kullanılmıştır.

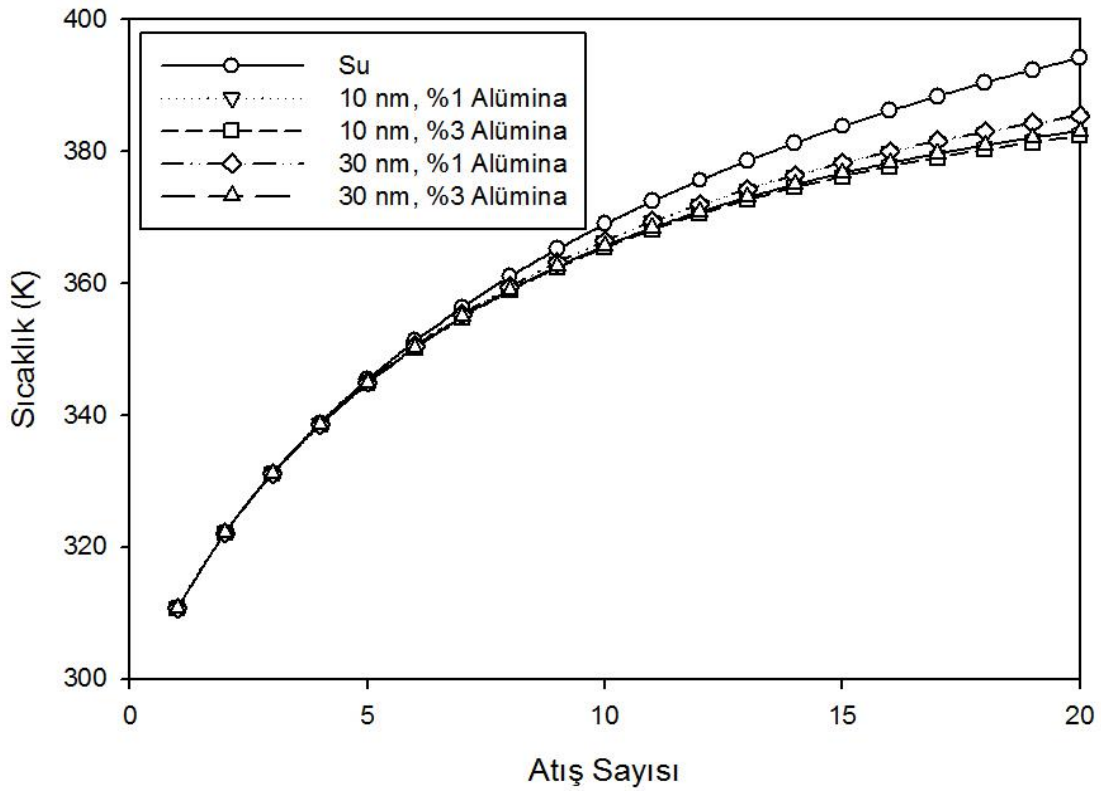
Çizelge 5.2. Alümina nano akışkanın farklı tanecik boyutu ve konsantrasyonlar için ısı transfer katsayıları

Yarım Dairesel Kanal									
Tanecik Boyutu(Çap), Konsantrasyon	V (m/s)	D _h (mm)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m.s)	C _p (J/kg .K)	k (W/m .K)	Re	Pr	h (W/m ² .K)
10 nm, %1	1	7,32	1025,2	0,00116	4061,9	4,5	6441,7	1,05	16083
10 nm, %2	1	7,32	1052,2	0,00115	3948,9	7,3	6697,7	0,62	21818
10 nm, %3	1	7,32	1079,3	0,00158	3841,5	15	5000	0,40	29875
30 nm, %1	1	7,32	1025,2	0,00114	4061,9	4,2	6539,9	1,11	15524
30 nm, %2	1	7,32	1052,2	0,00154	3948,9	8,5	4993,4	0,72	21255
30 nm, %3	1	7,32	1079,3	0,00178	3841,5	12	4425,8	0,57	24887
Yarım Elips Kanal									
10 nm, %1	0,89	12,14	1025,2	0,00116	4061,9	4,5	9604,3	1,05	13348
10 nm, %2	0,89	12,14	1052,2	0,00115	3948,9	7,3	9986,1	0,62	18108
10 nm, %3	0,89	12,14	1079,3	0,00158	3841,5	15	7454,9	0,40	24796
30 nm, %1	0,89	12,14	1025,2	0,00114	4061,9	4,2	9750,8	1,11	12885
30 nm, %2	0,89	12,14	1052,2	0,00154	3948,9	8,5	7445,1	0,72	17641
30 nm, %3	0,89	12,14	1079,3	0,00178	3841,5	12	6598,7	0,57	20655
Dikdörtgen Kanal									
10 nm, %1	1,07	6,86	1025,2	0,00116	4061,9	4,5	6451,7	1,05	17195
10 nm, %2	1,07	6,86	1052,2	0,00115	3948,9	7,3	6708,1	0,62	23327
10 nm, %3	1,07	6,86	1079,3	0,00158	3841,5	15	5007,8	0,40	31942
30 nm, %1	1,07	6,86	1025,2	0,00114	4061,9	4,2	6550,1	1,11	16598
30 nm, %2	1,07	6,86	1052,2	0,00154	3948,9	8,5	5001,2	0,72	22725
30 nm, %3	1,07	6,86	1079,3	0,00178	3841,5	12	4432,7	0,57	26608

Isı taşınım katsayıları elde edildikten sonra ilk olarak yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlu için seri atış analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı tanecik boyutları ile % 1 ve 3 konsantrasyonlarda alümina nano akışkanları için ayrı ayrı sayısal çalışma yapılmıştır. Analizlerdeki kanal sayısı 12'dir. Sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen soğutucu akışkan cinsine bağlı sıcaklık değerlerinin grafikleri Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilmiştir.



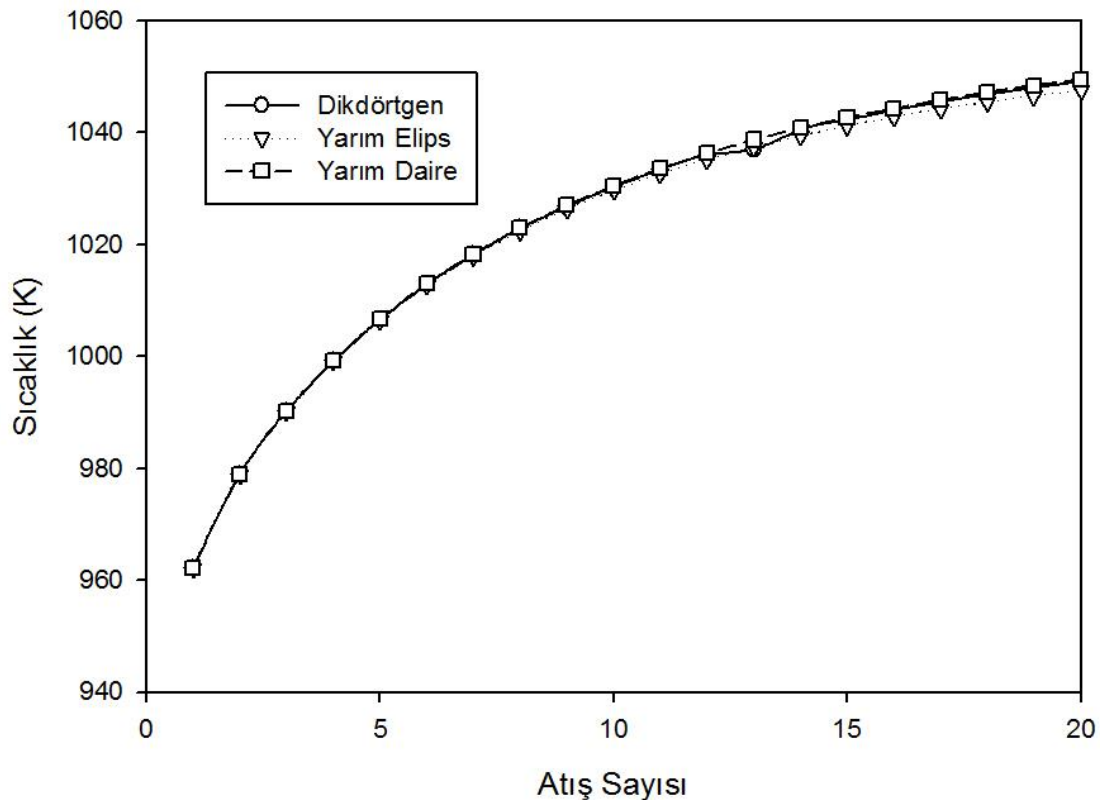
Şekil 5.15. Maksimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan cinsine bağlı değişimi



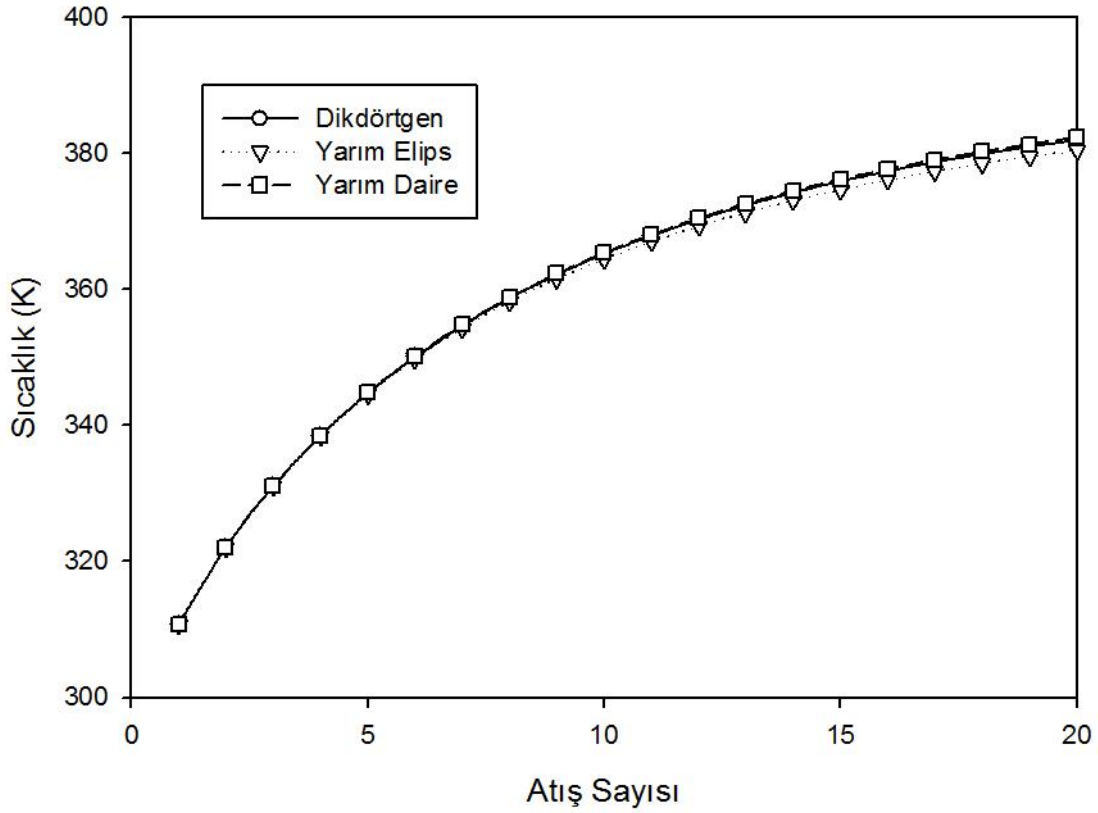
Şekil 5.16. Minimum iç yüzey sıcaklığın soğutucu akışkan cinsine bağlı değişimi

Karşılaştırma grafikleri incelendiğinde; alümina nano akışkanların her koşulda suya göre daha iyi soğutma performansına sahip oldukları görülmektedir. Nano akışkanlar arasında en yüksek ısı transfer katsayısına sahip olan 10 nm tanecik boyutunda ve % 3 konsantrasyonda olan nano akışkan ile gerçekleştirilen analizde en düşük sıcaklıklar gözlemlenmiştir. 20 atış boyunca iç yüzeyde oluşan maksimum sıcaklık 1049,5 K ve 20 atış sonundaki iç yüzey sıcaklığı ise 382,28 K hesaplanmıştır. Su ile kıyaslandığında, ısı taşınım katsayısı yaklaşık 6 kat artmasına rağmen sıcaklık değerlerini en fazla % 3 oranında düşürebilmiştir. Bunun nedeni olarak; iç yüzeyden giren ısı akısının radyal yönde iletim yolu ile soğutma kanalı yüzeylerine ulaşmaya kadar müteakip atışlar boyunca iç yüzeyin sürekli taşınım yolu ile ısı transferine maruz kalması ile değerlendirilmektedir.

Nano akışkanlar arasında en iyi sonucu veren nano akışkan yapısının 10 nm tanecik boyutunda ve % 3 konsantrasyonda olduğu tespit edildikten sonra farklı kanal geometrileri için analizler gerçekleştirilmiştir. Kanal geometrisinin, soğutucu akışkan olarak nano akışkan kullanıldığında soğutma performansını ne derecede etkilediği araştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Nano akışkanın kullanıldığı sistemlerde maksimum iç yüzey sıcaklığının kanal geometrisine bağlı değişimi



Şekil 5.18. Nano akışkanın kullanıldığı sistemlerde minimum iç yüzey sıcaklığın kanal geometrisine bağlı değişimi

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; nano akışkanın kullanıldığı aktif soğutma sistemlerinde, kanal geometrisinin soğutma performansını, suyun kullanıldığı sistemlerde olduğu gibi kayda değer bir şekilde etkilemediği görülmüştür.

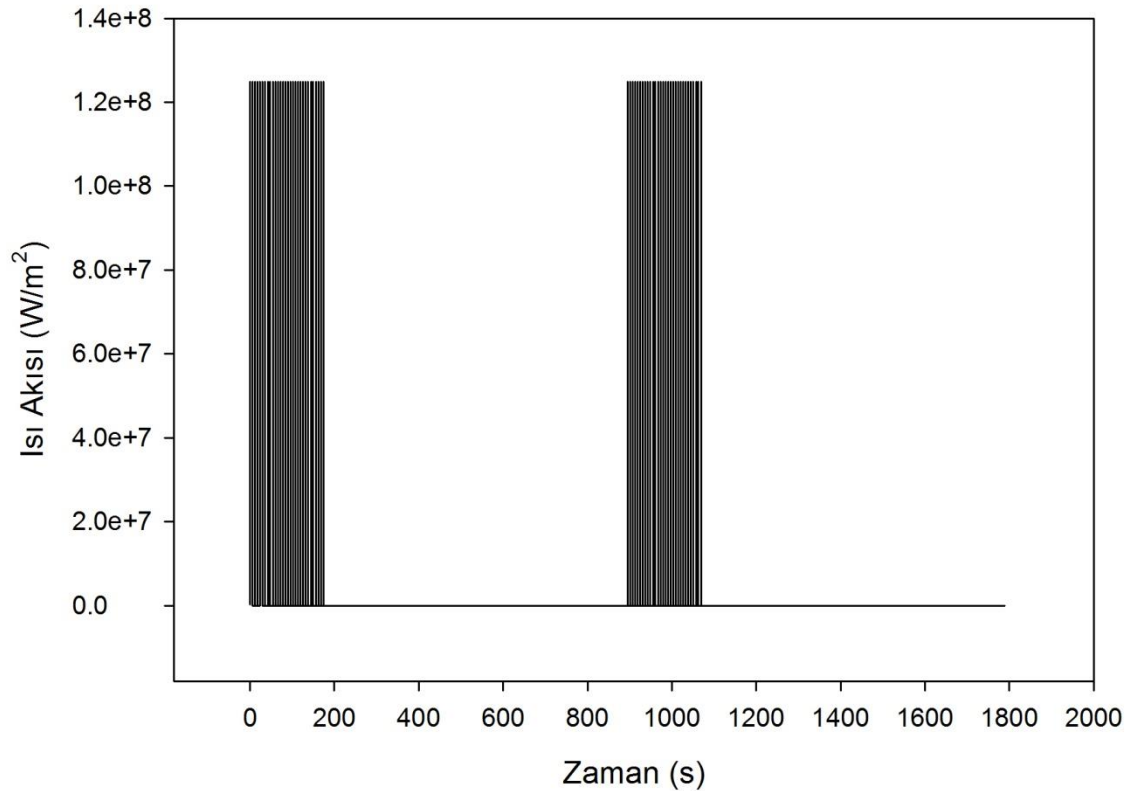
5.5. Çoklu Atış Görevi Sıcaklık Analizi

Silahlı kuvvetlerin envanterlerinde yer alan ağır silahların yüksek ateş yoğunluklu muharebe ortamlarında lojistik ve personel açısından birden fazla çoklu atış görevi yapması gerekebilir. Aktif soğutma sistemi olmayan bir silah ile birden fazla çoklu atış görevi icra edilmek istendiğinde, namluda kritik sıcaklığın aşılması beklenmektedir. Kritik sıcaklık değerini aşmadan görevlerin başarı ile yerine getirebilmesi için aktif soğutma sistemlerine gerek duyulmaktadır.

Bu çalışmada; aktif soğutma sisteminin doğal soğutma sistemine olan üstünlüğünü gösterebilmek adına çoklu atış görev senaryosu belirlenmiş ve sıcaklık analizleri

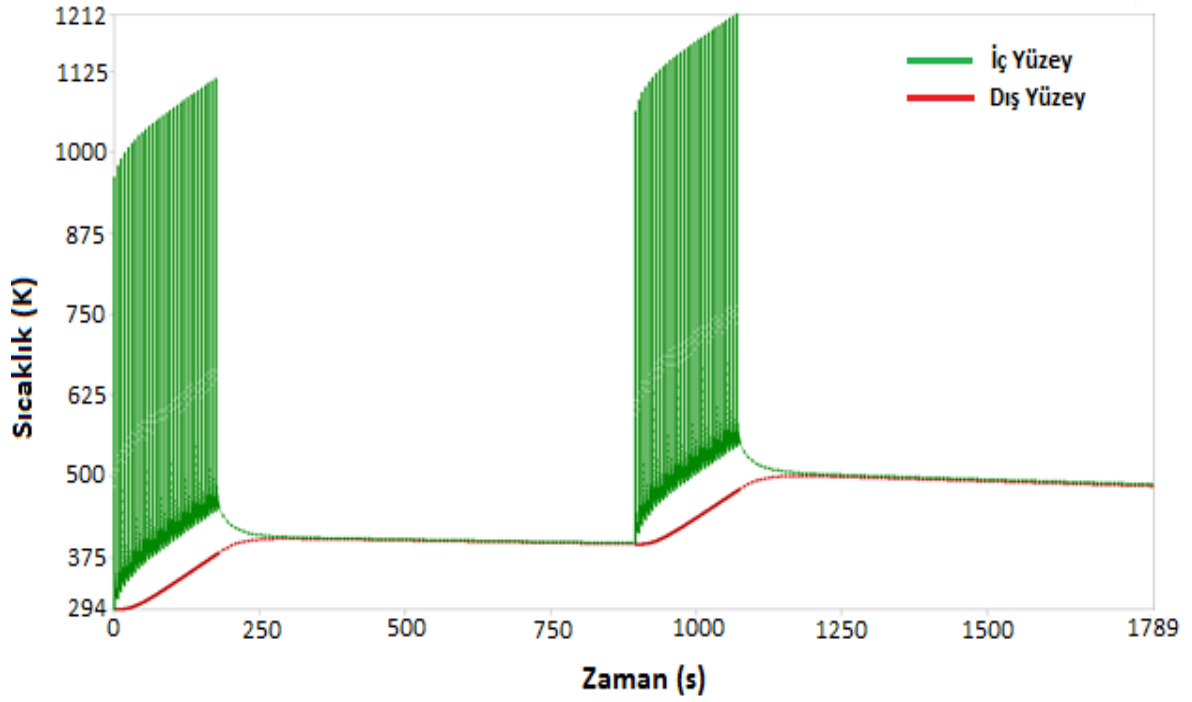
gerçekleştirilmiştir. Çoklu atış görevi senaryosu için literatürdeki 155 mm'lik XM 297 topu ile gerçekleştirilen atış planlaması esas alınmıştır [24]. Senaryo kapsamında, 2 atış görevi planlanmıştır. Atış görevlerinin her biri 30 atıştan meydana gelmektedir. İlk 30 atış dakikada 10 atım sürati ile yapıldıktan sonra 12 dakika mühimmatın yüklenme süresi belirlenmiştir. Daha sonra ikinci atış görevinde de dakikada 10 atım sürati ile 30 atış planlanmıştır. Atışlar bittikten sonra 12 dakikalık namlunun soğuması eklenerek senaryo tamamlanmıştır.

Öncelikle doğal soğutmalı ve kaplamalı namlunun analizi gerçekleştirilmiştir. İç yüzey sınır şartı olarak tek atışta uygulanan zamana bağlı ısı akısı değerleri atışlar boyunca tekrarlanarak girilmiştir. Çoklu atış görevleri boyunca iç yüzeye tanımlanan zamana bağlı ısı akısı grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir. Sınır şartları girildikten sonra analiz başlatılmıştır.



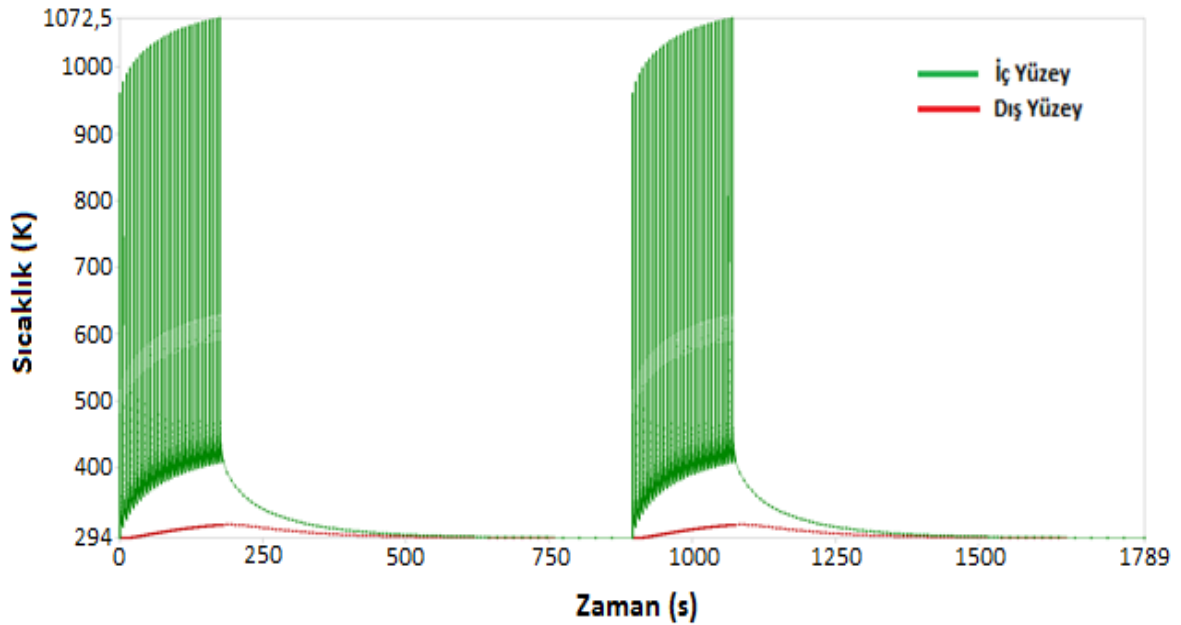
Şekil 5.19. Çoklu atış görevi için kaplama iç yüzeye girilen zamana bağlı ısı akısı grafiği

Senaryo süresince namlu iç ve dış yüzey sıcaklık grafiği Resim 5.19'da sunulmuştur.



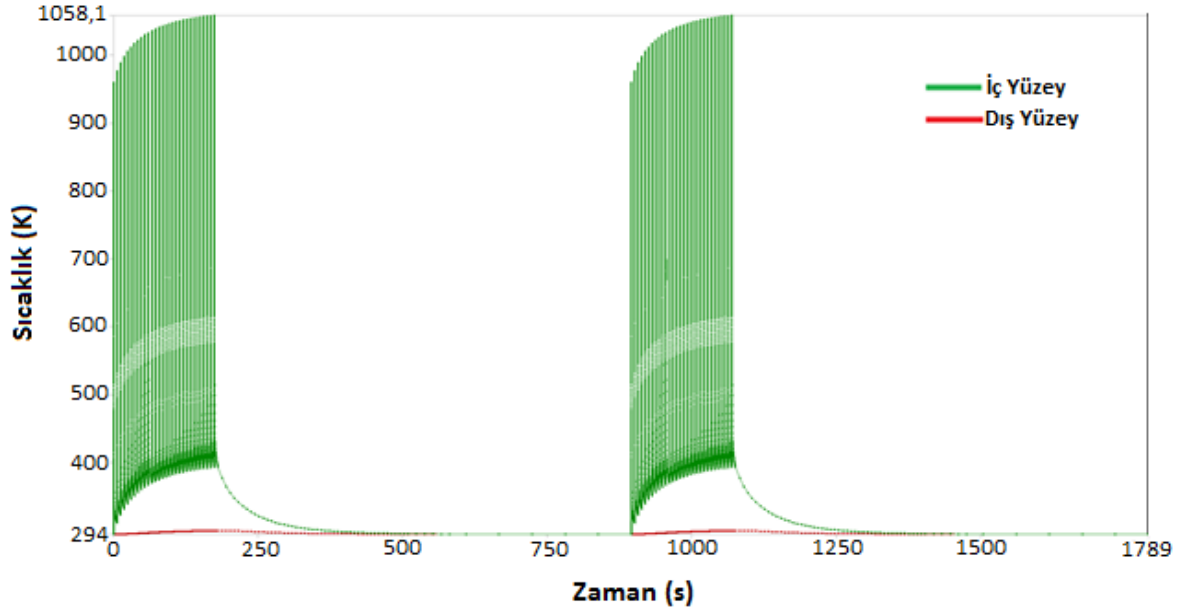
Resim 5.19. Doğal soğutmalı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevleri esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği

Daha sonra yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevi sıcaklık analizine geçilmiştir. Kanal sayısı 12, soğutucu akışkan su ve soğutucu akışkan hızı 1 m/s'dir. Senaryo süresince namlu iç ve dış yüzey sıcaklık grafiği Resim 5.20'de sunulmuştur.



Resim 5.20. Yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevleri esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği

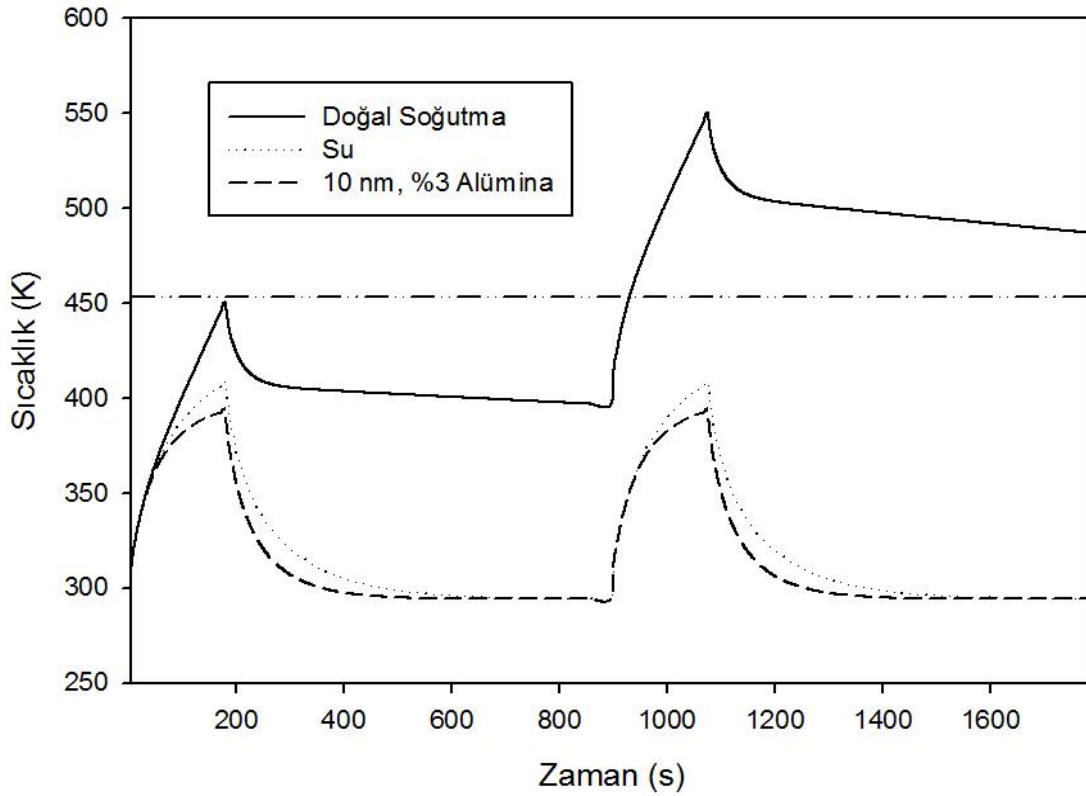
Son olarak 10 nm tanecik boyutunda ve % 3 konsantrasyondaki alümina nano akışkanın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevi sıcaklık analizi gerçekleştirilmiştir. Senaryo süresince namlu iç ve dış yüzey sıcaklık grafiği Resim 5.21’de sunulmuştur.



Resim 5.21. Nano akışkanın kullanıldığı yarım dairesel kanallı ve kaplamalı namlunun çoklu atış görevleri esnasındaki iç ve dış yüzeylerinin sıcaklık grafiği

Sıcaklık grafikleri incelendiğinde; aktif soğutma sistemi uygulanan namlularda görülen maksimum sıcaklık değerleri doğal soğutmalı namluya göre çok daha düşüktürler. Doğal soğutmalı namluda atış görevleri icra edilirken atışlar boyunca maksimum sıcaklık değeri sürekli artarken aktif soğutmalı namlularda son atışlara doğru artık giderek sanki-dengeli hal almıştır. Aktif soğutma sistemi, maksimum sıcaklık değerinde % 11,5 oranında belirgin bir düşüş sağlamıştır. Nano akışkanın kullanılması bu oranı % 12,6 değerine çıkartmıştır.

Çoklu atış görevlerinde mühimmat yükleme esnasındaki iç yüzey sıcaklık değerleri bir sonraki atışın gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceğini belirleyen parametredir. Bu açıdan atışlar boyunca mühimmat yükleme esnasındaki iç yüzey sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.20’de yapılmıştır.



Şekil 5.20. Mühimmat yükleme esnasındaki iç yüzey sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Sevk yakıtının kendiliğinden ateşlenmesi açısından namludaki kritik sıcaklık 453 K kabul edilmiştir. İlk atış görevinde her üç namluda da kritik sıcaklığın aşılmadığı görülmektedir. Ancak doğal soğutmalı namluda daha fazla atışın yapılmasına müsaade edilmeyecek kadar namlu iç yüzey sıcaklığının kritik sıcaklığa yaklaştığı ve değerinin 450,3 K olduğu tespit edilmiştir. Zorlanmış sıvı soğutmalı namlularda ilk atış görevi sonundaki mühimmat yükleme sıcaklığı su ve alümina kullanılan sistemler için sırasıyla 407,7 K ve 393,07 K hesaplanmıştır. Bu sistemlerde ilk atış görevinin bitmesine müteakip yaklaşık 6 dakika sonra namlu tekrar atmosfer sıcaklığına düşmüştür. Doğal soğutmalı namluda ikinci atış görevinin başlaması esnasında iç yüzey sıcaklığı 396,2 K bulunmuştur. Aktif soğutmalı sistemler ikinci atış görevi başlayana kadar doğal soğutmalı namluya göre namluyu 102,2 K daha fazla soğutmuşlardır. İkinci atış görevi başladıktan sonra doğal soğutmalı namluda 7. atışta kritik sıcaklığa erişilmiştir. Dolayısıyla doğal soğutmalı namluda planlanan atış senaryosu tamamlanamayacak ve geri kalan 23 atış gerçekleştirilemeyecektir. Aktif soğutmalı namlularda ise ikinci atış görevine atmosfer sıcaklığında başladıkları için ikinci atış görevlerini de emniyetli bir şekilde gerçekleştirmişlerdir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geleceğin muharebe sahası gereksinimleri menzilin, atım süratinin, isabetin ve hedefteki tahribatın arttırıldığı ağır silah tasarımlarını gerektirmektedir. Sevk yakıtlarının enerjileri ya da miktarları artırılarak anılan performans kriterleri geliştirilmektedir. Ancak namlunun bu gelişimlere beraberinde ayak uydurması gerekmektedir. Bu maksatla ağır silah namlularında sıvı soğutma tekniği kullanılarak silahların atım süratleri, icra edebilecekleri atış görevleri ve namlu ömürleri artırılmaktadır.

Zorlanmış konveksiyonla namlu soğutulmasında soğutma kapasitesi; kanal sayısı, kanal geometrisi, soğutucu akışkan hızı, radyatör kapasitesi, kaplama kalınlığı, soğutucu akışkan cinsi gibi birçok parametreye bağlıdır. Ayrıca kanalların namlu içerisindeki konumlandırılması da önemli bir parametredir.

Bu çalışma kapsamında; ilk olarak tek atış esnasında namlu içerisindeki ısı transferi analitik olarak çözülmeye çalışılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar programı ANSYS Mechanical modülü ile sayısal çalışmalar yapılmıştır. Hesaplamalarda literatürde yer alan ve doğruluğu deneysel verilerle ispatlanmış zamana bağlı ısı akısı değerleri sınır şartı olarak kullanılmıştır. Namlunun sıcaklık açısından en kritik bölgesi simetrik olmasından dolayı tek boyutlu incelenmiştir. Öncelikle tek ve seri atışlar için doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Modelin doğruluğu ispatlandıktan sonra değişken termodinamik özellikler tanımlanarak gerçekleştirilen analizlerde meydana gelen hata payları hesaplanmıştır. Sabit özellik kabulünün sonuçları önemli derecede etkilemediği sonucuna varılmıştır. Daha sonra sıvı soğutma sistemi üzerine etki ettiği değerlendirilen parametrik çalışmalara geçilmiştir. Çalışmalar 20 atışlık seri atışlar için yapılmıştır.

Parametrik çalışmada ilk olarak yarım elips ve dikdörtgen kanal geometrilerinin soğutma performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Eşit ısı transfer yüzey alanı olacak şekilde kanallar boyutlandırılmışlardır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda kanal geometrisinin seri atışlar esnasında oluşan sıcaklık değerlerini ciddi oranda etkilemediği tespit edilmiştir. Dikdörtgen kanalda, en yüksek ısı transfer katsayısına sahip olduğundan dolayı diğerlerine göre çok küçük oranda daha düşük sıcaklıklar görülmüştür.

Daha sonra kanal sayısının namluda oluşan sıcaklık değerlerine etkisi irdelenmiştir. Kanal sayısı olarak 8, 10, 12, 14 ve 16 kanal kullanılmıştır. Beklenildiği üzere kanal sayısı fazla olan namluda soğutucu akışkan vasıtasıyla daha fazla ısı çekileceğinden sıcaklık değerleri düşmüştür. Ancak bu düşüş kanal sayısının 2 katına çıkarıldığı durumda bile çok hissedilebilir düzeyde olmamıştır.

Yarım dairesel kanallı namluda kanal sayısı 12 olarak sabit tutulup soğutucu akışkan hızının 2, 3 ve 4 katına çıkarıldığı durumlar için ayrı ayrı çözümler gerçekleştirilmiştir. Atışlar esnasındaki maksimum ve minimum iç yüzey sıcaklıklarının soğutucu akışkan hızına bağlı değişimleri grafiklerde karşılaştırma amaçlı sunulmuştur. Maksimum sıcaklık, hızın 3 m/s'ye çıkarılmasına kadar hız artışı ile belirgin bir şekilde azalırken; 3 m/s'den 4 m/s'e çıkıldığında ise hemen hemen değişmemiştir. Hızın artması ile Re sayısının artması ve buna bağlı olarak ısı transfer katsayısının artması yüksek hızlarda daha düşük sıcaklıkların görülmesine neden olmuştur.

Nano akışkanın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı kanallı namlularda seri atış halinde sıcaklık analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı tanecik boyutunda ve farklı konsantrasyonlarda nano akışkan kullanılarak ayrı ayrı incelemelerde bulunulmuştur. Her üç kanal geometrisinde de nano akışkan kullanılan sistemin su kullanılan sisteme göre daha avantajlı olduğu ve sıcaklık değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. 10 nm ve % 3 konsantrasyondaki nano akışkan sahip olduğu yüksek ısı iletkenlikten ötürü en iyi soğutma performansını gerçekleştirdiği yorumlanmaktadır.

Son olarak zorlanmış konveksiyonun doğal soğutmaya göre belirgin üstünlüğünü ve sağlamış olduğu faydanın kolaylıkla hissedilebildiği çoklu atış görevi sıcaklık analizi irdelenmiştir. Doğal soğutmalı namluda kritik sıcaklık erişildiğinden atış görevlerini tamamlayamayacağı tespit edilmiştir. Su ve nano akışkan için ayrı ayrı çözümleme yapılan sıvı soğutmalı sistemlerde ise çoklu atış görevlerinin kendiliğinden ateşlenme sıcaklığına erişilmeden başarılı bir şekilde tamamlandığı gözlemlenmiştir.

Sıvı soğutmalı sistemler için yapılan parametrik çalışmalarda elde edilen sonuçların iç yüzey sıcaklık değerlerine çok fazla tesir edemediği değerlendirilmektedir. Bunun nedeni olarak atışlar esnasında iç yüzeyden dış yüzeye doğru 1 mm'lik mesafede çok dik sıcaklık gradyanlarının oluşması ve soğutma kanallarının bu bölgeye tesir edebilecek soğutma

süresini bulamaması şeklinde yorumlanmaktadır. İç yüzeye transfer olan taşınım ısı transferinin namlu içerisindeki iletim ısı transferine oranla çok yüksek olduğundan Biot sayısının büyük olduğu değerlendirilmektedir. Dolayısıyla seri atış halinde atışlar arasındaki kısa süre, soğutma kanallarının namlu iç yüzeyini yeterince soğutmasına müsaade etmemektedir. Kanal sayısının artması veya soğutucu akışkanın ısı transfer katsayısının artırılması da bu kısa sürede iç yüzey sıcaklığını önemli ölçüde azaltabilmek için yeterli olamamaktadır. Çoklu atış görevlerinde ise sıvı soğutma sistemi namluyu yeterince soğutabilecek vakti görevler arasındaki mühimmat yükleme süresinde bulabilmektedir. Sıvı soğutmalı namlunun avantajı bu görevlerde çok daha belirgin hale gelmektedir.

Öneriler

Bu çalışmada zorlanmış konveksiyonla soğutulan namlularda farklı kanal geometrisi, kanal sayısı, akışkan hızı ve akışkan cinsi parametreleri için namludaki sıcaklık değerleri tek boyutlu aksisimetrik olarak incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen bilgiler ışığında ise gelecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Literatürde bu konuda yapılan birçok çalışma namlu kesitini modellemek şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda namlunun tamamı üç boyutlu modellenerek kanal içerisindeki ısı ve akış karakteristikleri beraber incelenebilir. Kanalda meydana gelen basınç düşüşleri hesaplanarak gerekli pompa gücü hakkında hesaplamalar yapılabilir.
- Aktif soğutma sisteminde namluda ısınan soğutucu akışkanı namluya tekrar soğutarak gönderen radyatör üzerinde çalışmalar yapılabilir. Radyatör kapasiteleri değiştirilerek soğutma üzerindeki etkileri irdelenebilir.
- Soğutma kanallarının namlu içerisindeki konumları değiştirilerek namlu iç yüzeyine daha yakın konumlandırıldıklarında sıcaklık değerlerine olan etkileri incelenebilir.
- Aktif soğutmalı sistemlerde elde edilen sıcaklık değerlerine bağlı olarak termal gerilme analizleri gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda namlu iç yüzeylerine etki eden basınç değerlerine bağlı olarak mukavemet analizleri yapılabilir.

- Soğutma kanalları yüzey alanları arttırılacak şekilde boyutlandırıldıklarında namluda gerilme ve ısı analiz birleşik şekilde çözümlenerek kanal boyutlarının soğutma performansları üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Sevk yakıtının özelliklerine göre namlu içindeki yanma gazlarının sıcaklıklarını ve ısı transfer katsayılarını sonlu elemanlar programında sınır şartı olarak kullanılabilecek şekilde veren iç balistik kodu yazılabilir. Böylelikle sevk yakıtının parametrelerine göre aktif soğutmalı sistemlerde sıcaklık analizleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

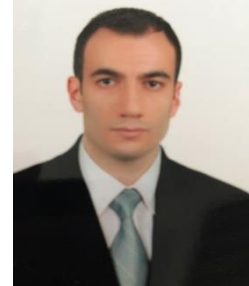
1. Wu B., Chen G. and Xia W. (2008). Heat transfer in a 155 mm compound gun barrel with full length integral midwall cooling channels. *Applied Thermal Engineering*, 28, 881-888.
2. Bass M. and Swardt R.R. (2006). Laboratory heat transfer experiments on a 155 mm compound gun tube with full length integral mid-wall cooling channels. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 128, 279-284.
3. Sun Y. and Zhang X. (2015). Transient heat transfer of a hollow cylinder subjected to periodic boundary conditions. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 137(5), 1-10.
4. Mishra A., Hameed A. and Lawton B. (2010). A novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 137, 1-6.
5. Mishra A., Hameed A. and Lawton B. (2010). Transient thermal analyses of midwall cooling and external cooling methods for a gun barrel. *Journal of Heat Transfer*, 132, 1-8.
6. Mishra A., Hameed A. and Lawton B. (2009). *Assessment of variable thermophysical properties on temperature history of a 155 mm gun barrel using ANSYS*. Paper presented at the International Conference on Methods and Models in Computer Science, Delhi, Indian.
7. Witherell M.D. (2006). A thermal performance study of the 155 mm xm297 actively cooled barrel. Technical Report ARAEW-TR-06022.
8. Gonzaga R.N., Guedes R.O.C. and Neto F. S. (2010). *Analytical determination of the transient temperature distribution in gun barrels subjected to external cooling*. Paper presented at the 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Brasil.
9. Chung D.Y., Shin N., Oh M., Yoo S.H. and Nam S.H. (2007). Prediction of erosion from heat transfer measurements of 40 mm gun tubes. *An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, 263, 246-250.
10. Wu Y. (2013). Analysis of thick-walled cylinder temperature field based on the thermal-fluid-solid coupling. *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(16), 40094-4100.
11. Hasenbein R.G. (1976). The effects of temperature on time to propellant cook-off. Technical Report Benet Weapons Laboratory.
12. Qu P., Li Q. and Yang Z. (2014). Thermal analyses of midwall cooling gun tubes based on liquid-solid coupled method. *Journal of Information & Computational Science*, 11(9), 3241-3250.

13. Qu P., Li Q. and Yang S. (2014). Thermal analyses and experimental validation of external cooling method for a gun barrel. *Journal of Information & Computational Science*, 11(13), 4759-4767.
14. Gündüzer O. (2011). *Namlu Cidarı Boyutlandırılmasına İç Balistik Davranışın Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-29.
15. T-155 K/M Fırtına Obüsü Tanıtım Kitapçığı. (2007). Sakarya.
16. Sönmez O. (2009). *Obüs Namlusu Yanma Odasında Atış Esnasında Ortaya Çıkan Gerilmelerin Matematiksel Modellenmesi ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 4-5.
17. Akçay, M. (2010). *Balistik* (İkinci Baskı). İstanbul: Kazmaz Matbaacılık, 34.
18. Alper, İ. Çoruhlu, A. (2006). *Silah Sistemleri ve Balistik*. Ankara: KHO Basımevi, 13-92.
19. Değirmenci E. (2010). *Yüksek Sıcaklığa ve Dinamik İç Basınca Maruz Kompozit Destekli Boru Tasarımı*, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 29-32.
20. Çengel, A. Y. (2012). *Isı ve Kütle Transferi* (çev. V. Tanyıldızı ve İ. Dağtekin). İzmir: Güven Kitabevi. (Eserin orijinali 2003'de yayımlandı). 285.
21. Arıkan, M.A.S. (1991). Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları. *Makine Mühendisleri Odası Seminer Notları*.
22. Turgut, A. C., Sağlanmak, Ş. ve Doğanay, S. (2015). Nano akışkanların ısı iletkenlik ve viskozitenin deneysel incelenmesi: tanecik boyutu etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(1), 95-103.
23. Harab A. B. (2015). *Non-Newtonian Nano Akışkanla Dolu Olan İki Dairesel Silindir Arasındaki Laminar Doğal Taşınımın Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5.
24. Smith D.C. and Wildman J. E. (1999). *XM297 cannon system fort he crusader system: "A unique government - industry team"*. Paper presented at 34th Annual Gun & Ammunition Symposium & Exhibition, California, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKBULUT, Murat
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 23.08.1989, Malatya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (534) 306 41 16
Faks : -
e-mail : muratakbulut44@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /F.B.E.	Devam Ediyor
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/ Mak.Müh.B.	2011
Lise	Malatya Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Kara Harp Okulu Dekanlığı	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Hobiler

Futbol, Basketbol



GAZİ GELECEKTİR..