

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**DOLUM AŞAMASINDA PASTÖRİZASYON  
SAĞLAYAN İNDÜKTİF SÜT DOLUM MAKİNESİ TASARIMI**

**Samet AKKAYA**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Can ÇİVİ**

**II. Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Tuncay YILMAZ**



**MANİSA-2019**

**Samet  
AKKAYA**

**DOLUM AŞAMASINDA PASTÖRİZASYON SAĞLAYAN İNDÜKTİF SÜT DOLUM  
MAKİNESİ TASARIMI**

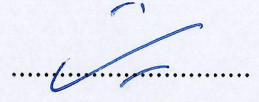
**2019**

## TEZ ONAYI

**Samet AKKAYA** tarafından hazırlanan "**DOLUM AŞAMASINDA PASTÖRİZASYON SAĞLAYAN İNDÜKTİF SÜT DOLUM MAKİNESİ TASARIMI**" adlı tez çalışması 23/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

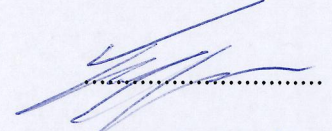
**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Can ÇİVİ**  
Celal Bayar Üniversitesi



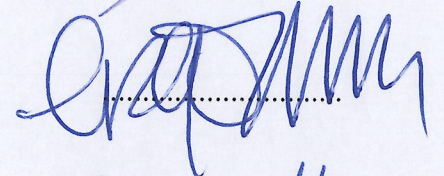
**II. Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Tuncay YILMAZ**  
Celal Bayar Üniversitesi



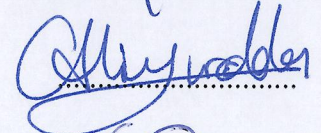
**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Bülent ERGÖNÜL**  
Celal Bayar Üniversitesi



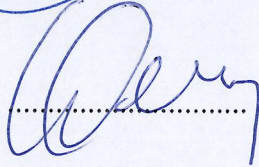
**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Ali YURDDAŞ**  
Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Şebnem TAVMAN**  
Ege Üniversitesi



## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Samet AKKAYA**



## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ .....	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1 İndüksiyon Teknolojisi.....	3
2.1.1. Gıda Endüstrisinde İndüksiyon Kullanımı .....	3
2.1.2. İndüksiyon ile Isıtma Prensipleri .....	6
2.1.3. İndüksiyon Isıtma Yönteminin Üstünlükleri .....	8
2.2. Mühendislik Sistemlerinin Modellenmesi ve Simülasyonu .....	9
2.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (CFD) .....	10
2.2.2. Kullanılan Genel Denklemler .....	10
2.2.3. Gıda Alanında CFD Analizlerine Örnekler .....	15
2.3. Gıdaları İşlemede Kullanılan Prosesler .....	17
2.3.1. Gıdalara Uygulanan Isıl İşlemler .....	17
2.3.2. Gıdaların Ambalajlanması ve Dolum Yöntemleri .....	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	24
3.1. Sistem Ön Tasarımı .....	24
3.2. Geometri Seçimleri ve Kabuller .....	29
3.3. Modelleme Hesaplamaları ve ANSYS Simülasyonları.....	31
3.3.1. Model 1: Düz Boru - 90°C.....	31
3.3.2. Model 2: Düz Boru - 120°C.....	40
3.3.3. Model 3: Düz Boru - 150°C.....	47
3.3.4. Model 4: Yüzey Akış Kırıcılığı - 90°C.....	51
3.3.5. Model 5: Yüzey Akış Kırıcılığı - 120°C.....	60
3.3.6. Model 6: Yüzey Akış Kırıcılığı - 150°C.....	65
3.3.7. Model 7: Akış Kırıcılığı Merkezi Mil - 90°C .....	69
3.3.8. Model 8: Akış Kırıcılığı Merkezi Mil - 120°C .....	76

3.3.9. Model 9: Akış Kırıcılı Merkezi Mil 150°C .....	80
3.4. Sistemin Gıda Güvenliğine Uygunluğunun Hesaplanması .....	85
3.4.1. Süt Değerleri ile FLUENT Simülasyonu .....	85
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	91
4.1. Analitik ve CFD ile Hesaplanan Boru Uzunluklarının İrdelenmesi.....	91
4.2. Tasarlanan Ekipmanların Gıda Güvenliği Açısından İncelenmesi .....	91
4.3. Nihai Tasarım .....	97
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	98
KAYNAKLAR .....	101
EKLER.....	103
EK A.3. Standart Çelik Boruların Boyutları Tablosu [21].....	103
EK B.3. Doymuş Suyun Özellikleri Tablosu [30].....	104
ÖZGEÇMİŞ .....	105

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$T_i$	Giriş sıcaklığı (K, °C)
$T_o$	Çıkış sıcaklığı (K, °C)
$c_p$	Özgül ısı (J/kg.K)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
$\mu_b$	Yığın ortalama sıcaklığında akışkan viskozitesi (Pa.s)
$\mu_w$	Duvar sıcaklığında akışkan viskozitesi
A	Isı transfer yüzey alanı, alan (m <sup>2</sup> )
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği)
D	Boru çapı (m)
$D_t$	Ondalık azalma süresi (s)
F	Termal ölüm süresi (s)
h	Taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> .K)
HTST	High temperature short time (Yüksek sıcaklık kısa süre)
K	Isıl iletkenlik (W/m.K)
kHz	Kilohertz
LTLT	Low temperature long time (Düşük sıcaklık uzun süre)
N	Mikrobik popülasyon sayısı
$N_0$	Başlangıç mikrobik popülasyon sayısı
$N_{Nu}$	Nusselts sayısı
$N_{Pr}$	Prandtl sayısı
$N_{Re}$	Reynolds sayısı
Q	Debi (m <sup>3</sup> /s)
q	Isı aktarım hızı (W)
T	Sıcaklık (K, °C)
t	Süre (s)
$T_{ort}$	Yığın ortalama sıcaklığı (K, °C)
$T_{ref}$	Referans sıcaklık (K, °C)
$T_w$	Duvar sıcaklığı (K, °C)
z	Isıl direnç sabiti (°C)
$\mu$	Kinematik viskozite (Pa.s)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\vartheta$	Hız (m/s)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. İndüksiyon ile boru ısıtma metodu .....	2
Şekil 2.1. İndüksiyonlu yemek ısıtıcısı örnek patent çizimi .....	5
Şekil 2.2. Süt pastörizasyon cihazı örnek patent çizimi.....	5
Şekil 2.3. Şematik süt pastörizasyon sistemi gösterimi .....	6
Şekil 2.4. İndüksiyon ısıtmada bobinin oluşturduğu manyetik akım çizgileri....	8
Şekil 2.5. Mikrobik popülasyon ve zaman ilişkisi .....	13
Şekil 2.6. Mikrobik popülasyon ve zaman ilişkisinin yarı logaritmik grafiği ....	13
Şekil 2.7. Tek hazneli vakumlu doldurma sistemi .....	20
Şekil 2.8. Çift hazneli vakumlu şişe doldurma sistemi .....	21
Şekil 2.9. Pistonlu doldurma sistemi.....	22
Şekil 2.10. Ölçülü tüplü sabit miktar doldurma sistemi.....	23
Şekil 3.1. Makine çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.2. Düz boru içindeki akış profili .....	26
Şekil 3.3. Düz boru etrafındaki indüksiyon bobin kesiti.....	26
Şekil 3.4. İndüksiyon sisteminin 3 boyutlu gösterimi.....	26
Şekil 3.5. Tasarım - 1 .....	27
Şekil 3.6. Tasarım - 2 .....	27
Şekil 3.7. Tasarım - 3 .....	28
Şekil 3.8. Holding için boru tasarım örnekleri .....	28
Şekil 3.9. FLUENT’te oluşturulan 2 boyutlu düz boru geometrisi.....	33
Şekil 3.10. Herhangi bir düzeltme yapılmamış temel mesh görüntüsü.....	34
Şekil 3.11. Düzeltilmiş mesh yapısı .....	35
Şekil 3.12. Model 1 ortalama akışkan sıcaklığı grafiği.....	36
Şekil 3.13. Model 1 hız grafiği .....	37
Şekil 3.14. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	38
Şekil 3.15. Akışkan sıcaklık dağılımı detayı.....	39
Şekil 3.16. Y+ değeri .....	39
Şekil 3.17. Akış hız dağılımı.....	40
Şekil 3.18. Model 2 mesh yapısı .....	41
Şekil 3.19. Model 2 ortalama akışkan sıcaklığı grafiği.....	42
Şekil 3.20. Sıcaklık dağılım detayı .....	43
Şekil 3.21. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	44
Şekil 3.22. Model 2 hız grafiği .....	45
Şekil 3.23. Akış hızı dağılım detayı .....	46
Şekil 3.24. Y+ değeri .....	46
Şekil 3.25. Model 3 mesh detayı.....	48
Şekil 3.26. Model 3 akışkan sıcaklık grafiği.....	49
Şekil 3.27. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	50
Şekil 3.28. Ortalama akış hızı grafiği .....	51
Şekil 3.29. Y+ değeri .....	51
Şekil 3.30. Axissymmetric hesaplanacak kesit görüntüsü .....	53
Şekil 3.31. Düzeltilmemiş mesh görüntüsü.....	53
Şekil 3.32. Düzeltilmiş mesh yapısı .....	54
Şekil 3.33. Akışkanın konuma bağlı sıcaklık grafiği .....	55
Şekil 3.34. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	56
Şekil 3.35. Yüzeydeki kanat girintilerinin sıcaklık dağılımına etkisi .....	57
Şekil 3.36. Ortalama hız grafiği .....	58



Şekil 3.37. Yüzeydeki kanatların akış hızına etkisi .....	59
Şekil 3.38. Y+ değeri .....	60
Şekil 3.39. Akışkan sıcaklığının konuma bağlı grafiği .....	61
Şekil 3.40. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	62
Şekil 3.41. Akışkan sıcaklık dağılımı detayı .....	63
Şekil 3.42. Konuma bağlı hız grafiği .....	64
Şekil 3.43. Boru içerisinde akışkan hız detayı .....	64
Şekil 3.44. Y+ değeri .....	65
Şekil 3.45. Sıcaklık – konum grafiği.....	66
Şekil 3.46. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	67
Şekil 3.47. Akışkan hızı grafiği .....	68
Şekil 3.48. Y+ değeri .....	68
Şekil 3.49. Axissymmetric hesaplanacak kesit örneği .....	70
Şekil 3.50. Düzeltilmiş mesh yapısı .....	71
Şekil 3.51. Konuma bağlı akışkan sıcaklığı grafiği .....	72
Şekil 3.52. Uzatılmış boru boyu için sıcaklık grafiği .....	72
Şekil 3.53. Sıcaklık dağılımı detayı .....	73
Şekil 3.54. Akışkan sıcaklık dağılımı .....	74
Şekil 3.55. Mil yüzeyindeki akış kırıcıların hız dağılımına etkisi .....	75
Şekil 3.56. Y+ değeri .....	76
Şekil 3.57. Sıcaklık – konum grafiği.....	77
Şekil 3.58. Uzunluğu artırılmış boru için sıcaklık – konum grafiği.....	78
Şekil 3.59. Mesh yapısı .....	79
Şekil 3.60. Sıcaklık dağılımı detayı .....	79
Şekil 3.61. Akışkan hız detayı.....	80
Şekil 3.62. Dinamik basınç haritası .....	80
Şekil 3.63. Mesh yapısı .....	81
Şekil 3.64. Sıcaklık grafiği.....	82
Şekil 3.65. Uzunluğu artırılmış boru için sıcaklık – konum grafiği.....	82
Şekil 3.66. Sıcaklık dağılımı detayı .....	83
Şekil 3.67. Akışkan sıcaklık değişim haritası .....	84
Şekil 3.68. Akış hız detayı .....	85
Şekil 3.69. Akış dinamik basınç detayı.....	85
Şekil 3.70. Mesh yapısı .....	86
Şekil 3.71. Sıcaklık grafiği.....	87
Şekil 3.72. Akışkan hız grafiği.....	87
Şekil 3.73. Hız dağılımı .....	88
Şekil 3.74. Y+ değeri .....	88
Şekil 3.75. Sıcaklık haritası.....	89
Şekil 4.1. Nihai tasarım.....	97

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. Isı değiştiricilerdeki akışların CFD simülasyon alışmaları.....	15
Tablo 3.1. Geometri modelleri .....	30
Tablo 3.2. Modellerde kullanılacak hesaplama kriterleri.....	31
Tablo 3.3. Model 1 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	36
Tablo 3.4. Model 2 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	42
Tablo 3.5. Model 3 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	49
Tablo 3.6. Model 4 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	55
Tablo 3.7. Model 5 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	63
Tablo 3.8. Model 6 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	66
Tablo 3.9. Model 7 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları .....	73
Tablo 3.10. Model 8 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları ...	78
Tablo 3.11. Model 9 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları ...	83
Tablo 3.12. Uzunluk – sıcaklık değişimini gösteren tablo.....	90
Tablo 4.1. Yapılan analiz sonuçlarının irdelenmesi.....	91
Tablo 4.2. Sütün pastörizasyon işleminde sıcaklık ve süre değerleri .....	91
Tablo 4.3. Sütteki mikroorganizmalar için bazı referans değerler.....	92
Tablo 4.4. Model 1 için termal ölüm süresi izelgesi .....	93
Tablo 4.5. Model 2 için termal ölüm süresi izelgesi .....	93
Tablo 4.6. Model 3 için termal ölüm süresi izelgesi .....	93
Tablo 4.7. Model 4 için termal ölüm süresi izelgesi .....	94
Tablo 4.8. Model 5 için termal ölüm süresi izelgesi .....	94
Tablo 4.9. Model 6 için termal ölüm süresi izelgesi .....	94
Tablo 4.10. Model 7 için termal ölüm süresi izelgesi .....	95
Tablo 4.11. Model 8 için termal ölüm süresi izelgesi .....	95
Tablo 4.12. Model 9 için termal ölüm süresi izelgesi .....	95
Tablo 4.13. Nihai boru uzunlukları, gıda güvenliğini sağlayan letalite süreleri ve ortalama akışkan sıcaklıklarının karşılaştırılması .....	96
Tablo 4.14. 85°C ortalama çıkış sıcaklığında, tasarımların sağladıkları letalite değerlerinin karşılaştırılması.....	96

## TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, kendilerini tanımaktan ve birlikte çalıőmaktan mutluluk duyduğum danışman hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Can ÇİVİ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tuncay YILMAZ'a; desteklerini esirgemeyen Sayın Arő. Gör. Anıl BAŞARAN'a; her zaman baőardıklarına ve baőaracaklarına inanan ve hep yanımda olan aileme; hayatımın her anında, karőılaőtığım zorluklarda ve güzel anlarda, bütün varlığıyla yanımda olan sevgili eőim Ebru GÖZLET AKKAYA'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Samet AKKAYA  
Manisa, 2019



# ÖZET

## Yüksek Lisans Tezi

### Dolum Esnasında Sterilizasyon/Pastörizasyon Sağlayan İndüktif Sıvı Gıda Dolu Makinesi Tasarımı

Samet AKKAYA

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Can ÇİVİ

#### II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tuncay YILMAZ

Bu çalışmada, indüksiyonlu ısıtma tekniğiyle çalışan, sıvı gıdaların dolumu esnasında pastörizasyon/sterilizasyon işlemlerini gerçekleştiren bir indüktif dolum makinesi tasarımı için parametrelerin belirlenmesi amacıyla gerekli analizler ve hesaplamalar yapılmıştır. Sıvı gıda maddesi için farklı tasarımlara sahip boru tiplerinde modellemeler yapılmıştır. Bunlardan ilki düz boru; ikinci tasarım, ısı transferini artırmak amacıyla yüzeyinde akış kırıcı kanatlar bulunan boru, üçüncü tasarım ise merkezinde bir mil bulunan ve bu milin üzerinde akış kırıcı kanatlar bulunan tasarımdır.

Çalışmada 3 farklı ısıl işlem sıcaklığı için hesaplamalar ve simülasyonlar yapılmıştır. Bu ısıl işlem sıcaklıkları 90°C, 120°C ve 150°C olarak ele alınmış olup; tasarımın ve sıcaklık değerinin boru içerisindeki akışkana etkisi yapılan analizlerle incelenmiştir. İlk iki tasarımda sıcaklık boru yüzeyinden akışkana aktarılmıştır; üçüncü tasarımda ise merkezde bir mil ve bu milin üzerinde akış kırıcı kanatlar tasarlanmış ve sıcaklığın bu mil üzerinden akışkana aktarıldığı durum analiz edilmiştir. Hesaplamalar ve analizlerin sonuçları irdelenmiştir.

Çalışmada akış analizi ve hesaplamaları gerçekleştirilen sıvı gıda maddesi olarak su ve süt ele alınmıştır. İlgili akışkanların fiziksel özellikleri simülasyona yansıtılarak akış analizleri elde edilmiş; ayrıca gıdanın mikrobiyolojik durumu incelenmiştir ve tasarımın gıda güvenliğini sağlama durumu irdelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, maliyet esaslı düşünüldüğünde en verimli tasarımın yüksek ısı transfer alanına sahip, yüzeyde kanatçıklı boru olduğu görülmekle beraber, gıda güvenliği esaslı düşünüldüğünde, uzun boru boyu olan tasarımların daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler: Gıda dolmu makinesi, indüksiyon, CFD analizi, sonlu elemanlar analizi, pastörizasyon, sterilizasyon**

2019, 105 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. / PhD Thesis**

### **Design of Inductive Liquid Food Filling Machine for Sterilization / Pasteurization During Filling**

**Samet AKKAYA**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Dr. Lecturer Can ÇIVI**

**Co-Supervisor: Dr. Lecturer Tuncay YILMAZ**

In this study, the necessary analyzes and calculations were carried out in order to determine the parameters for the design of an inductive filling machine which works with induction heating technique and performs pasteurization and sterilization processes during the filling of liquid foods. In these analyzes, pipe models with different designs were made for liquid foodstuffs. The first of these is straight pipe; the second design is a pipe with flow breaker blades on the surface to increase heat transfer, and the third design is a design with a shaft in the center and flow breaker blades on this shaft.

In the study, calculations and simulations were performed for 3 different heat treatment temperatures. These heat treatment temperatures are considered to be 90°C, 120°C and 150°C and the effect of the design and temperature value on the fluid in the pipe was examined by analysis. In the first two designs, the temperature was transferred from the pipe surface to the fluid; in the third and final design, a shaft in the center and flow breaker blades on this shaft are designed and the situation where the temperature is transferred to the fluid through this shaft is analyzed.

Water and milk as liquid foodstuffs which flow analysis and calculations are performed are discussed. Flow analysis was obtained by reflecting the physical properties of the related fluids into the simulation; in addition, the microbiological status of the food was examined and the food safety status of the design was examined.

As a result of the analysis; considering cost based, it is seen that the most efficient design is the finned tube with high heat transfer area. When food safety is considered, it is seen that designs with long pipe length give better results.

**Keywords: Food filling machine, induction, CFD analysis, Finite element analysis, pasteurisation, sterilization**

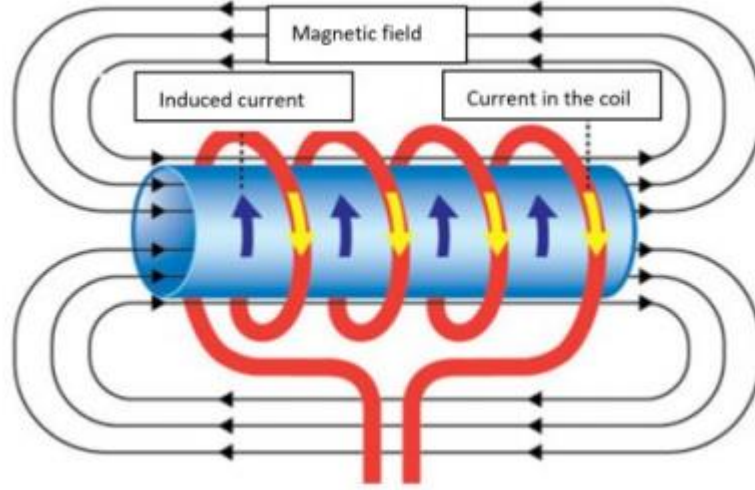
**2019, 105 pages**

## 1. GİRİŞ

Genel tanım olarak ısıtma işlemi, bir malzemenin iç özelliklerinde değişiklikler meydana getirmek amacıyla, sıcaklık ve zaman değişkenlerine bağlı olarak bir dizi ısıtma ve soğutma işlemlerinin uygulanmasıdır [1].

Gıda maddelerine uygulanan pastörizasyon ve sterilizasyon ısıtma işlemlerinin amacı, gıda maddesinin içerdiği bir takım mikroorganizma ve enzimlerin aktivasyonlarının durdurulması ve bu sayede raf ömürlerinin uzatılmasıdır. Geleneksel ısıtma yöntemleri ile induksiyon ile ısıtma yöntemi; ısı transferi verimi, ısınma süresi, enerji verimi, besin değerleri gibi çeşitli kriterler açısından kıyaslandığında, induksiyon ile ısınan bir sistem tasarımı bu kayıplardan tasarruf edilmesini sağlayarak, esmerleşme gibi gıda maddelerinde görülmesi istenmeyen bazı kalite problemlerinin de önüne geçebilir [2].

Michael Faraday, 1831 yılında, induksiyon ile ısıtma sisteminin temeli sayılan, elektromanyetik induksiyon teorisini bulmuştur. Bu teoride, elektromanyetik alan içerisindeki bir metal üzerinde induksiyon gerilimi oluştuğunu ve bu gerilim neticesinde metal malzeme üzerinde yüksek akımlar (eddy akımları) aktığı prensibini temel alır. Buna bağlı olarak induksiyon ısıtma, manyetik özelliği olan bir malzemenin değişken elektromanyetik alan etkisine sokulması ile üzerinde bir gerilim indüklemesi ve bu gerilimin sonucunda da yüksek akımların bu malzemeyi ısıtması işlemidir. Bu tez çalışmasında temel alındığı gibi örneğin boru bir malzemenin içerisinde sıvı akışı sağlanarak, malzeme üzerinde açığa çıkmış olan enerji sayesinde, sıvı malzeme ısıtılmış olur. Burada ısıtıcı malzeme olarak manyetik bir malzeme kullanılması gereklidir. Örneğin demir, nikel, kobalt gibi malzemelerin manyetik relüktansı düşüktür. Kullanılacak olan manyetik malzeme ile elektrik şebekesinde herhangi bir bağlantı olmayıp, malzemenin ısıtılması yalnızca elektromanyetik şekilde gerçekleştirildiği için sistemin çalışması esnasındaki riskler de azalmaktadır [3].



**Şekil 1.1.** İndüksiyon ile boru ısıtma metodu [4]

Bu tez çalışmasının temel amacı; ısıl işlem ve dolum aşamasının birleştirildiği, indüksiyon ile ısıtma tekniğini kullanan, kompakt, verimli bir dolum makinesinin tasarım hesaplarını yapmaktır. Çalışmada,  $+4^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındaki su ve süt, bir boru hattı içerisinde çevrimi esnasında indüksiyon bobini ile ısıtılan bir bölgeden geçirilerek, boru duvarı ile su/süt arasındaki ısı alışveriş davranışları incelenmiştir. Amaçlanan çıkış sıcaklığı  $+85^{\circ}\text{C}$  olup, çeşitli boru tasarımları içerisinde geçirilen akışkanın, kaç metre boru içerisinde bu çıkış sıcaklığına ulaşacağı, analitik olarak ve Ansys Fluent yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, optimum sistem tasarımı bu indüksiyon ile ısıtılan bölge için yapılmıştır. Tez çalışmasının amacı, gıda endüstrisindeki ticari ısıl işlem uygulamalarında çok yaygın olarak ele alınmayan indüksiyon ile ısıtma işleminin incelenmesi ve çeşitli sıcaklık ve boru tasarımları için simülasyonlar yapılarak nümerik olarak analiz edilmesidir.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 İndüksiyon Teknolojisi

Elektromanyetik indüksiyon yöntemi, metal gibi iletken malzemelerin yaygınca kullanıldığı makine ve metalürji sektörlerinin ergitme, ambalajlama, kaynak, kütleme, metal işleme ve çeşitli diğer ısıl işlem süreçlerinde yaygın kullanım alanları olan önemli bir ısıtma yöntemidir. Yöntemin sağladığı büyük avantajlardan dolayı kullanım alanı her geçen gün genişlemektedir [5]. İndüksiyon ile ısıtma işlemi, üretilen ısıyı iş parçasına aktaran çeşitli geleneksel ısıtma yöntemlerinin aksine, ısının iş parçası içerisinde üretildiği bir yöntemdir. Metal iş parçası üzerinde, ısıtmanın yeri belirli bir alan ile de sınırlandırılabilir. Yöntemin en önemli özelliklerinden bazıları; güvenilir olması, otomasyona uygun olması, çevre dostu olması ve enerji verimliliği bakımından oldukça verimli bir yöntem olmasıdır [6].

Makine ve metalürji sektöründe yaygın olarak uygulanan ısıl işlem proseslerinin pek çoğunda indüksiyon teknolojisi kullanım alanı bulur. Makine ve metalürji sektöründe olduğu gibi çeşitli ısıl işlem uygulamalarında gıda endüstrisinde de indüksiyon ile ısıtma yöntemine başvurulmaktadır. Gıda işleme sektöründe ısıl işlemin kullanılma amacı, kimyasal malzemeler kullanmadan gıda maddelerinin birtakım özelliklerini değiştirmek ve raf ömürlerini uzatabilmektir. Burada ısıl işlem diye genel olarak tanımladığımız işlemler, kullanılan hammaddelere ve ürünün nihai yapısına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir [7]. Gıda işleme prosesleri, en çok enerji gerektiren endüstri kollarından bir tanesidir. Birçok gıda işlemi için kullanılan ana enerji kaynakları, buhar ve sıcak havadır. Bunların yanında, buhar kullanılan proseslerin düşük enerji verimliliğine bağlı olarak; son yıllarda dikkate değer yeni araştırma konuları arasında, kızılötesi, mikrodalga, ohmik ısıtma gibi diğer bazı ısıtma teknolojileri yer almaktadır [8].

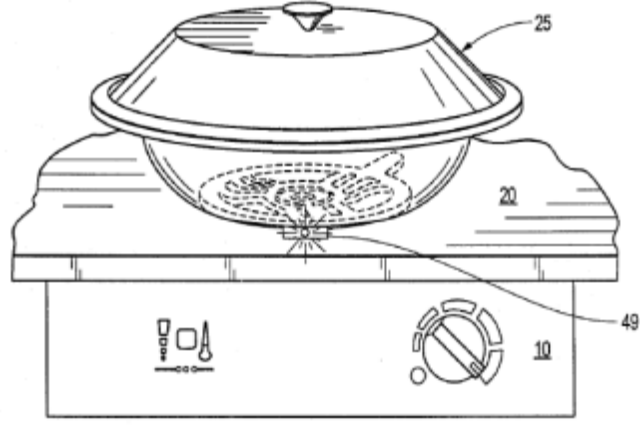
#### 2.1.1. Gıda Endüstrisinde İndüksiyon Kullanımı

Günümüzde kullanılan mevcut gıda ısıl işlem uygulamalarında, gıda maddesine yapılan ısı aktarımı, borulu, gövde borulu gibi çok parçadan oluşan ısı değiştiriciler ile sağlanmaktadır [7]. Mevcut sistemlerde, sıcak su veya buhar gibi bir takım aracı akışkan maddeler kullanılarak gıda ürünleri doğrudan veya dolaylı bir şekilde gerekli ısıl işlem sıcaklığına getirilmektedir. Isıl işlemin gerçekleşebilmesi için gerekli olan süreyi sağlayabilmek amacıyla, gıda maddesi istenilen sıcaklıkta

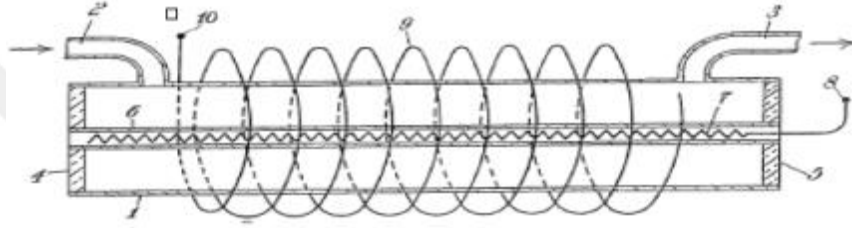


belirli bir süre bekletilir (holding) ve ardından soğutulur. Günümüzde hali hazırda kullanılan mevcut ısıl işlem tekniklerinde, proseste kullanılacak olan sıcak suyun veya buharın üretilmesi amacıyla bir takım yardımcı tesisler gerekmektedir. Bu sistemlerde prosesin özelliğine bağlı olarak; pompa, elektrikli ısıtıcı veya kazan gibi enerji tüketen ekipmanlar kullanılmaktadır. Doğal olarak bu ekipmanlar sistemin enerji tüketimini artırıcı bir etki yapmaktadır. Bir başka ifadeyle, aracı bir yüksek sıcaklıkta ısıtıcı akışkanın bulunması demek, hem kurulum maliyetlerini hem de işletme maliyetlerini artırmak anlamına gelmektedir. Yine buna bağlı olarak mevcut sistemlerin bir başka dezavantajı da yüksek sıcaklık ve basınçtaki bu aracı akışkanlı sistemlerin güvenlik açısından ortaya çıkardığı risklerdir. Bu akışkan malzemenin yüksek sıcaklık ve basınçta olması, sistemlerin kullanıldığı ortamlardaki iş güvenliği riskini artırmaktadır. Bu saydıklarımıza ilave olarak, gıda ısıl işlem uygulamaları yüksek hijyen gerektiren uygulamalardır. Mevcut sistemlerde olduğu gibi tesiste kullanılan ekipman sayısının artması, arzu edileyn hijyen standartlarına ulaşımı zorlaştırmakta ve sanitasyon maliyetlerini de artırmaktadır. Ayrıca, ısıl işlem için üretilen bu yüksek sıcaklık ve basınçtaki akışkan, çevre kirliliği riski nedeniyle kullanımdan sonra soğutulmak zorundadır. Bu da yine işletme maliyetini artırıcı bir başka faktördür. Bütün bu saydığımız maddelere ilaveten, kullanılan buharın üretimi için fosil yakıtlar kullanılmakta ve bu da hava kirliliğine sebep olmaktadır. Özellikle katı yakıt kullanımıyla oluşan bu hava kirliliğini önlemek amacıyla kurulması gereken baca gazı filtrasyon sistemi de ek maliyet oluşturmaktadır [9].

Gıda endüstrisinde indüksiyon kullanımı günümüzde sınırlı seviyededir ve kullanımının yaygınlaştığını gösteren yeni çalışmalar ve bir takım yeni patentler de mevcuttur. Manyetik indüksiyon teknolojisinin kullanımı ile ilgili çalışmalar için literatür taraması yaptığımızda, bu konuda yapılan çalışma sayısının az olduğu görülmektedir. Mevcut olan çalışmaların belirli bir kısmı da indüksiyonla ısıtmadan çok indüksiyon (eddy) akımını kullanarak numune özelliklerini test etmek amacıyla yapılmaktadır. İndüksiyonla ısıtma alanında kısıtlı sayıda akademik çalışma bulunmasına karşın, gıda alanında indüksiyon ile ısıtma kullanımı hakkında küçük ölçekli ocak, su ısıtma cihazları gibi pek çok patent ve ticari fikirler bulunmaktadır. Ancak indüksiyon yönteminin gıda işleme proseslerinde yer aldığı patent sayısı azdır [9].

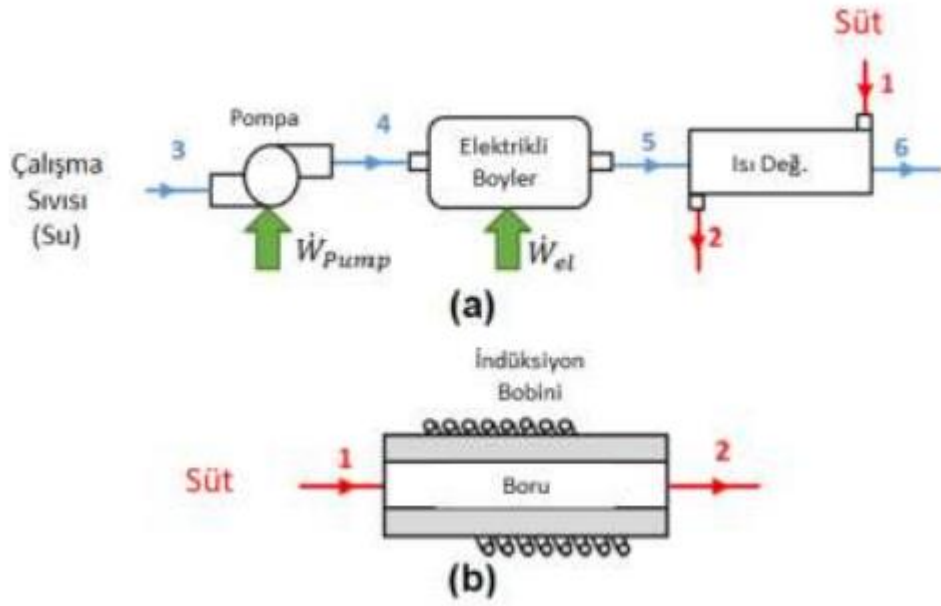


Şekil 2.1. İndüksiyonlu yemek ısıtıcısı örnek patent çizimi [9]



Şekil 2.2. Süt pastörizasyon cihazı örnek patent çizimi [9]

Gıda işleme proseslerinde indüksiyon uygulaması için ilk hesap yaklaşımı Başaran vd. tarafından yapılmıştır. Yapılmış olan çalışmada, indüksiyon yönteminin geleneksel gıda işleme proseslerinde kullanılan ısı değıştirciler ile kıyaslanarak enerji ve ekserji verimliliğine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Salça pastörizasyon işlemi için gerçek veriler kullanılarak hem geleneksel ısıtma hem de indüksiyon ile ısıtma yöntemi için enerji ve ekserji analizleri yapılmış, sonuç olarak indüksiyon ile ısıtma yönteminin çok büyük oranda enerji ve ekserji verimliliği sağlayabileceği yapılan hesaplamalarla ortaya konmuştur [10]. Bir diğer çalışmada ise süt pastörizasyon işlemi için geleneksel yöntem ve indüksiyonlu bir sistem teorik olarak karşılaştırılmış ve ekserji ve enerji analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında sütün 5°C'tan 75°C'a ısıtılması ele alınmıştır. Yine salça pastörizasyonu işlemine benzer bir sistemdir. Bu sistemlerin şematik görünümü Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Sonuç olarak indüksiyon yöntemi ile çalışan sistemin boyler sistemiyle çalışana göre daha az enerji girdisi ile çalıştığı görülmüş ve enerji, ekserji verimliliği açısından çok daha yüksek değerler elde edilmiştir [11].



**Şekil 2.3.** Şematik süt pastörizasyon sistemi gösterimi **a.** Elektrikli boyler sistemi **b.** İndüksiyonlu sistem [11]

### 2.1.2. İndüksiyon ile Isıtma Prensipleri

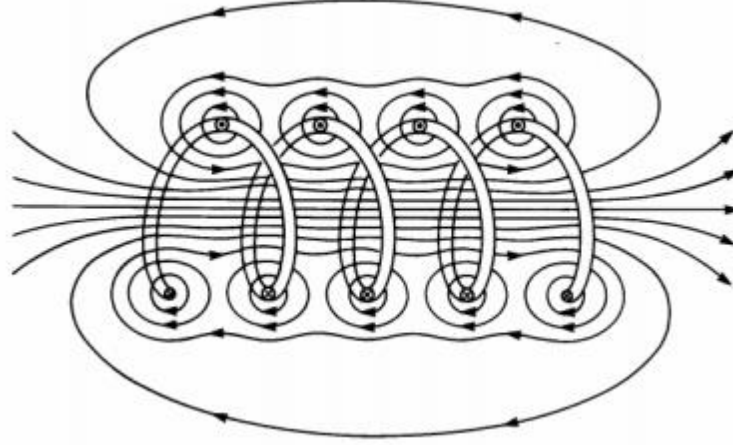
İndüksiyon ısıtma yönteminin endüstriyel düzeydeki uygulamaları 20 yüzyılda başlamıştır. İkinci dünya savaşı sırasında ve daha sonrasında, otomotiv ve uçak endüstrisinde kendine yer bulmuştur; daha sonraları ise kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Günümüzde ise metalurji sanayinde ön ısıtma ve son ısıtma işlemlerinde, metal ergitme, yüzey işlemleri, tavlama, kaynaklama gibi çeşitli endüstriyel uygulama alanlarında yaygın bir kullanım alanı vardır [12].

İndüksiyon ile ısıtma yöntemi, metal malzemenin içerisinde oluşan elektrik akımlarına dayanmaktadır. Bu elektrik akımları oluşumu, numune içerisinde bir ısı oluşumunu sağlar. Bir indüksiyon sisteminin ana bileşenleri; indüksiyon bobini, alternatif akım sağlayan güç kaynağı ve işleme alınan iş parçasıdır. Alternatif güç kaynağı ile bağlantı halinde olan bobinler, ısıtılması istenen iş parçasına göre şekillendirilir. Bobin vasıtasıyla meydana gelen alternatif akım geçişi, iş parçası üzerinde bir manyetik alan oluşturmaktadır. Bu manyetik alan, parçalar üzerinde Eddy (girdap) akımlarını tetikler. Bu akımların şiddetinin yüzeyden uzaklaştıkça azalması nedeniyle indüksiyon işlemi, yüzey ısıtma işlemlerinde daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Ancak tabii ki ortaya çıkan bu ısı, ısı transferiyle tüm

malzemeye yayılır [5]. İndüksiyon ile ısıtma yöntemindeki ısı transferi işlemi, geleneksel yöntemlerdeki ısıtmaya göre 3000 kat daha iyidir [13]. Ayrıca indüksiyon bobinin tasarımı veya frekans seçiminin doğru yapılması ile ısıtılan kesitin ve ısıtma hızının belirlenmesi ve artırılması da mümkündür [5].

İndüksiyon ile ısıtma yönteminin birçok ileri teknoloji sistemde yaygın olarak tercih edilmesinin önemli sebepleri bulunmaktadır. Özellikle son otuz yıl içerisinde indüksiyon ile ısıtma yönteminin popülerliğinin giderek artması ve bu denli önemli hale gelmesinin sebepleri arasında; yöntemin güvenilir, tekrarlanabilir, temassız olması ve bütün bu avantajlarının yanında önemli derecede zaman ve enerji tasarrufu sağlaması yer almaktadır [14].

İndüksiyon ile ısıtma temel olarak 2 mekanizmaya dayanmaktadır. Bunlar Joule ısınması ve manyetik histerezistir. Buradaki manyetik histerezis faktörü, Joule ısınmasına kıyasla daha az önemli bir faktör olması sebebiyle çoğu zaman göz ardı edilir. Histerezisi basitçe açıklayacak olursak, iş numunesi moleküllerinin manyetik alan altında titreşmesiyle ortaya çıkan enerjidir ve Curie sıcaklığının altındaki çelik malzemeler gibi manyetik malzemelerde görülmektedir. Diğer faktör olan Joule ısınmasının sebebi ise girdap akımlarının tam bir çevrim oluşturma isteği içerisinde olması nedeniyle malzemenin öz direnci ile meydana gelen ısınmadır. Aşağıda Şekil 2.4'te elektrik akımı taşıyan bakır bir bobinin meydana getirdiği manyetik alan görülmektedir. Burada görülen manyetik alan çizgileri vasıtasıyla numune içerisinde girdap akımları oluşmaktadır. Bu akımlar numune üzerinde bir dirence sebep olur ve bu direnç de numunenin ısınmasına yol açar. İndüksiyon ile ısınma işlemini sağlayan en önemli faktör olan Joule ısınması; alüminyum, bakır ve histerezisin tersine Curie sıcaklığı üzerindeki çelik gibi manyetik olmayan malzemelerde görülmektedir. Yukarıda açıklanmış olan bu iki mekanizma, skin effect olarak adlandırılan ve iletken kesitinde eşit olmayan bir akım dağılımı yoluyla ısıtma işlemini gerçekleştirir. Buradaki ısıtma gücünün yaklaşık %86'sı iletken malzemenin yüzey tabakasında yoğunlaşarak oluşmaktadır. Daha önce bahsettiğimiz gibi; bobin tasarımı ve indüksiyon akım frekansı ile indüksiyon cihaz gücünün seçimi, ısınan kesitin ve ısınma hızının kontrol edilebilmesine imkan vermektedir [5], [14], [15].



**Şekil 2.4.** İndüksiyon ısıtmada bobinin oluşturduğu manyetik akım çizgileri [5]

Ferromanyetik malzeme içerisinde oluşan girdap akımlarının malzemedeki konumu ve yoğunluğu, indüksiyon ile ısıtma işlemi esnasında uygulanan frekans değerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu durum indüksiyonla ısıtma işleminde akım nüfuz derinliği olarak tanımlanmakta olup, malzeme üzerinde oluşan bu girdap akımlarının yüzeyden itibaren erişebileceği derinlik olarak ifade edilmektedir [16]. İndüksiyon ile ısıtma işleminin bu özelliği göz önünde bulundurularak, farklı uygulama alanları için farklı frekans değer aralıklarında çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Yüksek frekans değerleri, bahsettiğimiz girdap akımlarını yüzeyde yoğunlaştıracağı için; metalurji endüstrisinde yüzey sertleştirme ve kaynaklama gibi işlemler yüksek frekans değerleri kullanılarak yapılmaktadır. Metal ergitme işlemlerinde olduğu gibi penetrasyon derinliğinin artması hedeflenen çalışmalarda ise düşük frekans değerlerinde çalışmak gerekmektedir. Günümüzde mevcut olan indüksiyon işlemlerini frekans eğerlerini baz alarak sınıflandırdığımızda; 1kHz altındaki frekans değerlerine düşük frekanslı, 1 kHz ile 100 kHz arasındaki frekans değerlerine orta frekanslı ve 100 kHz üzerindeki frekans değerlerine de yüksek frekanslı olmak üzere 3 farklı gruba ayırabiliriz [17].

### **2.1.3. İndüksiyon Isıtma Yönteminin Üstünlükleri**

İndüksiyon ile ısıtma işlemi pek çok yönden geleneksel ısıtma işlemlerine karşı üstünlükler sağlamaktadır. Önceki bölümlerde bu üstünlüklerden açıklamalar içerisinde bahsettik. İndüksiyon ile ısıtma işleminin sağladığı avantajlara genel olarak baktığımızda bu avantajları aşağıda olduğu gibi sıralayabiliriz:

- Metal malzemeleri ısıtma süresi kısadır.

- Bütün bir parçayı ısıtmak yerine malzemenin yalnızca istenilen kısımlarını ısıtabilme yeteneğine sahiptir.
- Sıcaklığı sürekli koruma zorunluluğu yoktur; güç yalnızca gerektiği zaman ısıtma işlemi için kullanılır.
- Geleneksel fuel-oil ya da gaz yakıtlı sistemlerde olduğu gibi çerve ortama ısı dağılımı yoktur. Bu da istenilen iş gücünün yalnızca makinenin etrafında oluşturulabilmesini sağlamaktadır.
- Geleneksel yakıtlı sistemlerde olduğu gibi kullanılan gazlar veya katı yakıtlar nedeniyle hava kirliliği yaratmaz. Yanma işlemi olmadığı için ısıtma alanında herhangi bir yanma ürünü de bırakmaz. Sonuçta herhangi bir yanma ürünü ve ısı radyasyonu olmadığı için duman atığı çıkışı ve dolayısıyla havalandırma ihtiyacı minimum seviyededir.
- İndüksiyon ile ısıtma işleminde işlem süresinin hızlı olması da otomatik endüstriyel üretim proseslerinde üretime uygunluğunun göstergesidir.
- Gaz karışımlarının doğurduğu gibi herhangi bir patlama riski olmaması, zararlı dumanlar çıkarmaması ve sistemin sebep olacağı herhangi bir yanık ihtimali olmaması sebebiyle sağlıklı ve güvenli bir uygulamadır.
- Geleneksel sistemlerde sıcaklığı değiştirme işlemi saatler alabilmektedir ancak indüksiyon ile ısıtma işlemlerinde arzu edilen yeni sıcaklığın kurulması yalnızca birkaç dakika içerisinde başarılabilmektedir [18].

## **2.2. Mühendislik Sistemlerinin Modellenmesi ve Simülasyonu**

Mühendislik hesaplamalarında bilgisayar destekli simülasyon işlemleri genellikle yapısal bir modelleme oluşturmak için simülasyon ve simülasyon modelleme ile terimsel modellemenin bütünleşmesiyle oluşur. Model oluşturmak, araştırmaya konu olan durumun çeşitli yönlerden kayda değer özelliklerinin incelenmesi amacıyla bir örneklem yapı oluşturmaktır. Burada bahse konu olan model, bir sistemin davranış ve karakteristikleriyle ilgili birtakım sanal deneyleri yürütmemize olanak sağlayan ve bilgisayar destekli oluşturulmuş bir temsil olan, söz konusu sistemin basit bir tezahürüdür. Temel olarak özetlemek gerekirse bilgisayar simülasyonu, bir sistemdeki girdilerin, çıktılarının ve incelenen süreçteki dış etkenlerle olan bazı etkileşimlerinin taklididir. Günümüzde modelleme ve simülasyon işlemleri, mühendislik araştırma ve geliştirme süreçleri başta olmak üzere çok geniş bir yelpaze içerisinde bütün süreçlerde yaygın olarak kullanılmakta ve tasarım süreçlerinin

önemli bir basamağını oluşturmaktadır [19]. Bu tez çalışmasında, üç boyutlu modelleme yazılımı olarak Solidworks, CFD analizleri ve simülasyon programı olarak Ansys Fluent ve 2 boyutlu bir takım çizim işlemleri için de Autocad yazılımlarından faydalanılacaktır.

### **2.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)**

Günümüzde bir çok mühendislik sisteminin analizi CFD programlarının yardımıyla yapılabilmekte ve bu analizler, tasarım süreçlerinde mühendisler için büyük ölçüde aydınlatıcı olmaktadır. Gıda prosesleri de CFD programlarında modellenerek, deneysel yaklaşımların yanında bir alternatif kontrol yöntemi olarak bilgisayar destekli analizleri yapılmaktadır. Bu sistemlere örnek olarak soğuk odaları, proses ekipmanlarını, dolum sistemleri verilebilir. Burada CFD analizleri yapılan işlemlere örnek olarak da; ısıtma, soğutma, kurutma, dolum işlemlerinde hız ve sıcaklık analizleri, ısı transferi gibi işlemler sayılabilir. Sayılan bütün bu uygulamalar için CFD kullanımının sağladığı bir takım avantajlar vardır. Bunlardan ilki, modellerin karmaşık yapılarında herhangi bir kısıtlamaya gidilme ihtiyacının olmamasıdır. Diğer yandan bu programlar sayesinde akış alanı ve transfer analizleri (örneğin ısı transferi) için çok yüksek bir çözünürlük elde edilebilir. Deneysel testlerdeki saha şartları her zaman aynı parametrelerle aynı değerlerin ölçülmesine imkan vermez ve karmaşık modeller için sıklıkla problem oluştururlar. Öte yandan uzamsal yüksek çözünürlüklü ölçümler her zaman basit ve çok zaman alıcı değildir. Yüzeylerdeki momentum ve skaler transfer bilgisi mevcuttur (örneğin ısı veya kütle akışları). Bu, yüzeydeki etkileşimlerin çevre etkisi altındaki değişimini görebilmeyi sağlar ve yüksek çözünürlükte yaptığı küçük parçacık hesaplarıyla ortalama değişimleri görebilmeyi sağlar. Bu yazılımların sağladığı bir diğer fayda ise sistemin ölçeklendirilmeye ihtiyacı olmamasıdır. Sistemler tam ölçek ile hesaplara sokulabilir [20].

### **2.2.2. Kullanılan Genel Denklemler**

Bu kısımda, tez çalışmasında kullanılan denklemler hakkında bilgi verilecektir. Bu denklemlerin ilki, bir akışkan içinden ısı aktarımı için taşınım katsayısını ifade eden aşağıdaki eşitliktir:

$$q = hA(T_w - T_{ort}) \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte:

- $h$  : taşınım katsayısı [ $W/m^2.K$ ]  
 $A$  : ısı transfer yüzey alanı [ $m^2$ ]  
 $T_{ort}$  : akışkanın yığın veya ortalama sıcaklığı [ $K$ ]  
 $T_w$  : akışkanla temastaki duvarın sıcaklığı [ $K$ ]  
 $q$  : ısı aktarım hızı [ $W$ ]

Çoğunlukla film katsayısı olarak da adlandırılan ısı aktarım katsayısı  $h$  değerinin üzerinde, akışkanın akış tipi yani laminar veya türbülent olmasının etkisi oldukça büyüktür [21].

Akışkan akış tipinin belirlenmesi için Reynolds sayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$N_{Re} = \frac{D\vartheta\rho}{\mu} \quad (2.2)$$

Burada:

- $D$  : boru çapı [ $m$ ]  
 $\vartheta$  : hız [ $m/s$ ]  
 $\rho$  : yoğunluk [ $kg/m^3$ ]  
 $\mu$  : kinematik viskozite [ $Pa.s$ ]

Reynolds sayısı 6000'in üzerinde olduğu durumlarda akış tam türbülenttir. Isı aktarım hızı, türbülent bölgede daha büyük olduğu için, endüstriyel tasarımlar genellikle türbülent bölgede olacak şekilde yapılmaktadır [21].

Bir boru içerisinde türbülent akış için ısı aktarım katsayısı alttaki denklemden hesaplanır. Bu denklemi kullanabilmek için gerekli olan şartlar;  $N_{Re}>6000$ ,  $0.7<N_{Pr}<16000$ ,  $L/D>60$  şeklindedir [21].

$$N_{Nu} = \frac{hD}{k} = 0,027N_{Re}^{0,8}N_{Pr}^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (2.3)$$

Bu denklemde:

- $N_{Nu}$  : Nusselts sayısı, boyutsuz  
 $h$  : ortalama ısı aktarım katsayısı [ $W/m^2K$ ]  
 $D$  : boru çapı [ $m$ ]



- $k$  : ısı iletkenlik [W/mK]  
 $N_{Re}$  : Reynolds sayısı, boyutsuz  
 $N_{Pr}$  : Prandtl sayısı, boyutsuz  
 $\mu_b$  : yığın ortalama sıcaklığında akışkan viskozitesi [Pa.s]  
 $\mu_w$  : duvar sıcaklığında akışkan viskozitesi [Pa.s]

Boru içerisindeki debi ve hız ilişkisi için alttaki denklem kullanılmaktadır:

$$Q = A \cdot v \quad (2.4)$$

Burada:

- $Q$  : debi [ $m^3/s$ ]  
 $A$  : kesit alanı [ $m^2$ ]  
 $v$  : hız [ $m/s$ ]

İstenilen çıkış sıcaklığını elde etmek için gerekli olan ısı aktarım miktarının hesaplanması için alttaki ısı denkleğinden faydalanılır:

$$q = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (2.5)$$

Bu denklemde:

- $\dot{m}$  : kütleli debi [ $kg/s$ ]  
 $c_p$  : özgül ısı [ $J/kgK$ ]  
 $T_o$  : çıkış sıcaklığı [ $K$ ]  
 $T_i$  : giriş sıcaklığı [ $K$ ]

şeklinde karışımıza çıkmaktadır.

Gıda ürünlerinin termal sterilizasyonu esnasında, gıda maddesinin içerisinde bulunan mikroorganizmalar ürünün sıcaklığıyla orantılı olarak azalmaktadır. Gıda maddesinin içerisinde istem dışı bulunan bu mikroorganizmalar, ısı işlem sürecinde tipik olarak logaritmik bir şekilde azalmaktadır. Tipik bir mikrobik popülasyon – zaman ilişkisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Aynı veri, Şekil 2.3’te gösterildiği gibi yarı logaritmik bir koordinat sistemi üzerine işlendiğinde ise düz bir çizgi gözlemlenir ve bu düz çizgi doğrudan ondalık azaltma süresi,  $D_t$  ile ilişkilidir [7], [22].

Ondalık azaltma süresini hesaplamak için kullanılacak denklem aşağıdaki gibidir:

$$N/N_0 = 10^{-t/D_t} \quad (2.6)$$

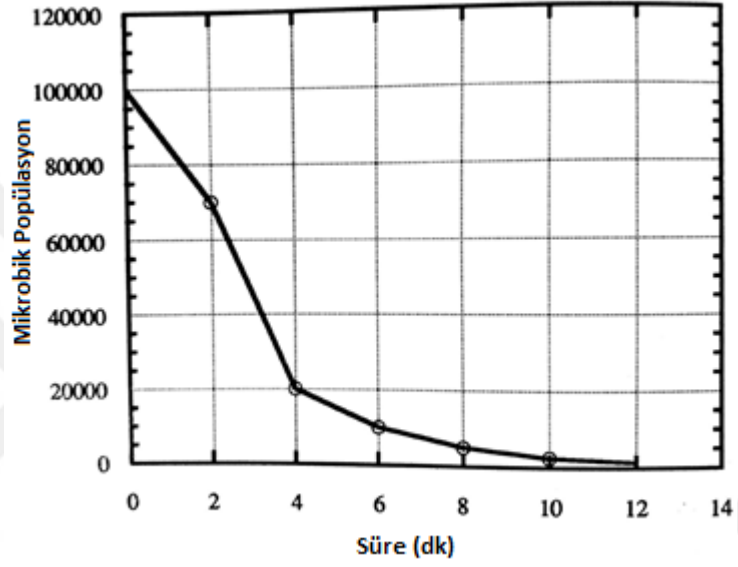
Bu denklemde:

$N$  : mikrobik popülasyon sayısı

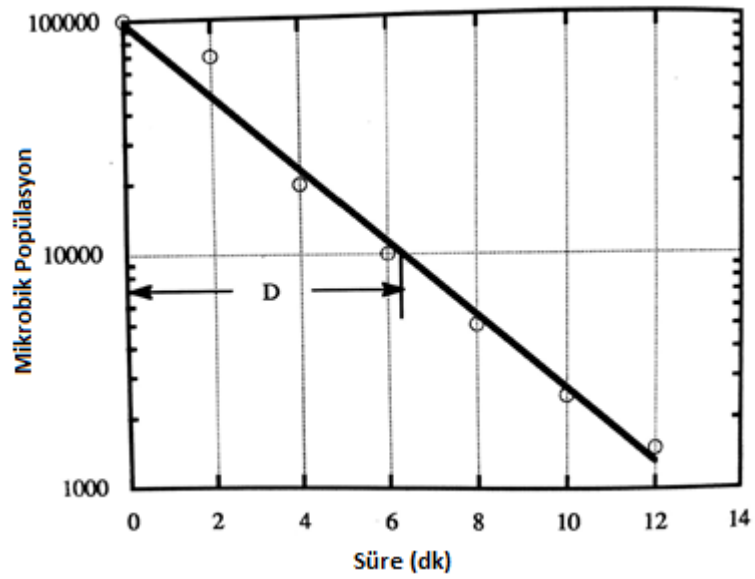
$N_0$  : başlangıçta mikrobik popülasyon sayısı

$t$  : süre [s]

$D_t$  : ondalık azaltma süresi [s]



Şekil 2.5. Mikrobik popülasyon ve zaman ilişkisi [7]



Şekil 2.6. Mikrobik popülasyon ve zaman ilişkisinin yarı logaritmik grafiği [7]

Gıda maddesi içerisinde bulunan mikroorganizma ve spor popülasyonlarının istenilen seviyeye azaltılması için gereken zaman termal ölüm süresi,  $F$  olarak tanımlanır. Bu süre, çeşitli  $D_t$  değerleri ile ifade edilmektedir. Örneğin, %99,99 oranında bir mikroorganizma sayısı azalması sağlamak için gerekli olan termal ölüm süresi  $F=4D_t$  olarak ifade edilir. Genel olarak uzun raf ömrü sağlanmak istenen gıda maddelerinin ısıtım süreçlerinde baz alınan termal ölüm süresi denkliği  $F=12D_t$  şeklindedir [7], [22].

Uzun raf ömürlü gıda ürünlerini göz önünde bulundurduğumuzda, ısıtım süreci mikrobik organizmaları öldürme işleminin yanında bozulmayı da engelleyebilecek şekilde dizayn edilebilir [7].

Yukarıda verilen bilgiler ışığında termal ölüm süresi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$\log N_0 - \log N = F/D_t \quad (2.7)$$

Burada:

$N$  : mikrobik popülasyon sayısı

$N_0$  : başlangıçta mikrobik popülasyon sayısı

$D_t$  : ondalık azaltma süresi [s]

$F$  : termal ölüm süresi [s]

şeklinde ifade edilmektedir.

Mikroorganizma hesaplamalarında kullanacağımız diğer bir değişken de  $z$  değeridir. Bu değer ısıtım direnç sabiti olarak tanımlanmaktadır ve denklem 2.8'de gösterilmiştir:

$$\frac{F}{t} = 10^{(T-T_{ref})/z} \quad (2.8)$$

Bu denklemde:

$F$  : termal ölüm süresi [s]

$T$  : sıcaklık [°C]

$T_{ref}$  : referans sıcaklık [°C]

$z$  : ısıtım direnç sabiti [°C]

t : süre [s]

### 2.2.3. Gıda Alanında CFD Analizlerine Örnekler

Günümüzde yaygın olarak kullanılan CFD yazılımları; ANSYS Fluent, Abaqus, Comsol, ADINA, FIDAP, CFX, Star, CFD2000, PHOENICS gibi yazılımlardır [23]. Bunların arasında en çok kullanılan yazılımlardan bir tanesi ANSYS Fluent'tir. Bu tez çalışmasında ANSYS Fluent yazılımının akademik alanlarda çalışmalar yapan bireysel kişilerin ücretsiz kullanımına sunulmuş olan 2019 Academic versiyonundan faydalanarak çalışmalar yürütülecektir.

Gıda alanında en yaygın yapılan CFD analizlerinden bir tanesi ısı değiştiriciler üzerine yapılan çalışmalardır. Tablo 2.1'de bu çalışmalardan bazıları ve kullanılan CFD metodları gösterilmiştir.

**Tablo 2.1.** Isı değiştiricilerdeki akışların CFD simülasyon çalışmaları [23]

Yazar/Tip	CFD Metodu
L. J. Shah ve ark. (2000) Dikey monte ısı eşanjörü	CFD yazılımı: CFX Çözüm tipi: SIMPLE
Koen Grijsperdt ve ark. (2003) Plakalı ısı eşanjörü	CFD yazılımı: FINE-Turbo, EURANUS Mesh yazılımı: FINE-Turbo Türbülans modeli: k - $\epsilon$ Çözüm tipi: SIMPLE, PISO Mesh: Dörtgen
Zhe Zhang ve ark. (2003) Plakalı fin eşanjör	CFD yazılımı: FLUENT Çözüm tipi: SIMPLE Türbülans modeli: Standart k - $\epsilon$ Mesh: 150000 eleman sayısı
Jian ve ark. (2004) Plakalı fin eşanjör	CFD yazılımı: FLUENT Çözüm tipi: Semi Implicit SIMPLER, Second Order Upwind Türbülans modeli: k - $\epsilon$ Mesh: 254817 eleman sayısı
S. Knudsen ve ark. (2004) Dikey monte ısı eşanjörü	CFD yazılımı: FLUENT 6.0 Çözüm tipi: PISO ve Second Order Upwind Mesh: 193150 eleman sayısı
Vimal Kumar ve ark. (2005) Tüp içinde sarmal eşanjör	CFD yazılımı: FLUENT 6.0 Türbülans modeli: k - $\epsilon$ Çözüm tipi: SIMPLEC
Kilas ve ark. (2007) Plakalı ısı eşanjörü	CFD yazılımı: FLUENT 6.1 Türbülans modeli: k - $\epsilon$ Mesh yazılımı: GAMBIT v2.1 Mesh: 2000000 eleman sayısı

Mourad Yataghene ve ark. (2007) Kazınmış yüzeyli ısı eşanjörü	CFD yazılımı: FLUENT Mesh yazılımı: GAMBIT Mesh: Hibrit
Myoung Il Kim ve ark. (2008) Kabuk-tüp tipi eşanjör	CFD yazılımı: FLUENT 6.0 Türbülans modeli: k - ε Çözüm tipi: SIMPLEC Mesh: Dört yüzlü geometri
Li-Zhi Zhang ve ark. (2009) Havadan havaya çapraz akışlı eşanjör	CFD yazılımı: FLUENT Çözüm tipi: SIMPLE Meshing software: GAMBIT Mesh: 160837 eleman sayılı dört ve altı yüzlü geometriler
C. T'Joen ve ark. (2010) Eğimli panjurlu fin tipi eşanjör	CFD yazılımı: FLUENT Türbülans modeli: k - ε

Gıda ürünleri üzerinde yapılan diğer CFD çalışmaları; gıda ürünlerinin taşınım ile soğutulması alanındaki çalışmalar (da Silva ve ark., 2010; Dehghannya ve ark., 2010; Martins ve ark., 2011; Tutar ve ark., 2009; Verboven ve ark., 1997, 2006; Zou ve ark., 2006), tarım ürünlerinin uzun süre korunması (Delele ve ark., 2008, 2009; Hoang ve ark., 2000, 2003; Nahor ve ark., 2005), taşınımla gıdaların kurutulması (Kaya ve ark., 2006), fırın dizaynı (Verboven ve ark., 2000a, b, 2003), hızlı dondurma çalışması ( Peralta ve ark., 2010) ve gıda ürünlerinin akış ve skaler değişiminin CFD modellemesi, türbülans ve sınır tabaka modellemesi ile incelenmesi çalışması (Defraeye ve ark., Verboven ve ark., Nicolai ve ark., 2013) şeklinde örneklenebilir [24].

İndüksiyon ile ısıtma işleminin kuramsal olarak incelenmesi için de geçmiş dönemlerde yapılan bazı çalışmalar mevcuttur. Sistemlerin tasarlanmasında fiziksel olarak yapılacak olan değişiklikler hem zaman hem de maliyet çerçevesinde değerlendirildiğinde, sonlu elemanlar ve hacimler yöntemleriyle yapılan incelemeler mühendisler için büyük avantajlar sağlamaktadır. Buna bağlı olarak da gıdaların ısıtılması işlemlerinde yapılan modellemeler; parametreler ve tasarımın optimize edebilebilmesine olanak sağlamakta; sıcak noktalar, soğuk noktalar, hız vektörleri, ısı transferleri gibi çeşitli yönlerden sistemin analiz edebilebilmesini sağlamaktadır [2].

İndüksiyon ile ısıtma yöntemi ile alakalı yapılan modelleme çalışmaları incelendiğinde, bu çalışmaların genellikle makine ve metalürji endüstrilerinde ısıtma, tavlama, kalıplama, sertleştirme, eritme, kaynak gibi çeşitli metal işleme yöntemleri

için yapıldığı görülmektedir. Kawakawi ve arkadaşları, 2013 yılında gerçekleştirdiği simülasyon çalışmasında induksiyon ocağındaki bir tencere içerisinde ısınmakta olan suyun içerisindeki akış profilinin simülasyonu üzerine çalışmışlardır. Deneysel sonuçlarla elde ettikleri sonuçları da simülasyon çalışması ile elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırdıklarında birbirlerine yakın sonuçlar elde ettiklerini tespit etmişlerdir. Simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırmasında başlangıç sonuçlarının birbirlerinden daha farklı olduğu ancak yüksek sıcaklık değerlerinde elde edilen sonuçların birbirlerine daha çok benzerlik gösterdikleri görülmüştür. Sanz-Serrano ve arkadaşları, 2017 yılında yapmış oldukları simülasyon çalışmasında ise induksiyon ocağında yapılan bir krep pişirme işleminin numune üzerindeki sıcaklık davranışlarının öngörülmesi ve ortaya çıkan kütle transferinin simülasyonu üzerinde çalışmışlardır. Yine bu çalışma sonucunda da deneysel sonuçlar ile örtüşen değerler elde edildiği görülmüştür. Çalışma sonuçlarında kütle transferi değerlerinde meydana gelen küçük farkların da su ve buhar için baz alınan difüzyon katsayıları ile basınç ve sıcaklığın değişime olan etkileri sabit değerler olarak kabulü sonucunda meydana gelmiş olabileceğini ifade etmişlerdir. Altıntaş ise 2016 yılında COMSOL Multiphysics yazılımından faydalanarak induksiyonlu sistemlerde kullanılan bobinlerin tasarımında kullanılan iletken malzeme türlerinin bir induksiyonlu sıvı ısıtıcısının performansı üzerine etkilerini araştırmıştır. Yazılımdaki sıvı materyal su olarak baz alınmış ve ısıtma işleminin sonucunda suda meydana gelen sıcaklık dağılımı gözlenmiştir. Çalışma sonuçları deneysel olarak incelenmemiştir [2].

### **2.3. Gıdaları İşlemede Kullanılan Prosesler**

Gıdaları işleme proseslerine genel olarak örnekler verecek olursak bunlar; ısıtma, soğutma, dondurma gibi ısı işlemler; kurutma, taşıma, ambalajlama gibi çeşitli proses adımları olarak sayılabilir. Bu bölümde gıdalara uygulanan ısı işlemler ve ambalajlama işlemleri ele alınmıştır.

#### **2.3.1. Gıdalara Uygulanan Isıl İşlemler**

Gıdalara uygulanan ısı işlemler dendiğinde akla gelen işlemler; pastörizasyon, sterilizasyon, pişirme, kurutma, haşlama, buharlaştırma, ışınlama gibi bir takım ısı işlem uygulamalarıdır. Gıda maddelerinin nem içeriğini kontrol etmek amaçlı yapılan kurutma ve buharlaştırma işlemlerinin yanı sıra, gıda maddelerinin mikrobiyolojik bileşimlerinin kontrol altında tutulması amacıyla yapılan

pastörizasyon ve sterilizasyon sağlayan bir takım işlemler de yapılmaktadır. Sterilizasyon işlemi, özel sistemlerde bulunan gıda maddesine, biyokimyasal ve mikrobiyolojik aktiviteleri kontrol etmek amacıyla, 100°C'in üzerinde uygulanan bir yüksek sıcaklıkta yapılan ısı işlemidir. Bu işlemin amacı, oda sıcaklığında uzun süre raf ömrü sağlamaktır. Bu işlemin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için gerekli olan zaman ve sıcaklık şartlarının yerine getirilmesi şarttır. Gıda endüstrisinde uygulanan bu ısı işlem tekniklerinde ısı, doğrudan gıda maddesinin üzerine uygulanabileceği gibi, ısı eşanjörleri ya da otoklavlar gibi dolaylı olarak ısıtmayı sağlayacak bir takım sistem elemanları vasıtasıyla da paketlenmiş olan gıda maddelerine uygulanabilir. Yaygın olarak uygulanan ısı işlemlerden bir diğeri de pastörizasyondur. Pastörizasyon yönteminde patojenik mikroorganizmaları öldürmek amacıyla uygulanması gereken sıcaklık değeri 60°C ile 100°C arasında değişmektedir. Bu yöntem sonrasında gıda maddesi buzdolabı koşullarında ve nispeten daha kısa bir raf ömrüne sahip olmaktadır. Diğeri bir ısı işlem olan haşlama işlemi ise gıda maddesindeki kimyasal tepkimeleri önlemek ve enzimatik ve mikrobiyolojik reaksiyonları kontrol etmek amacıyla; gıdanın paketlenme, kurutma, dondurma işlemlerinden hemen önce, kısa bir zaman aralığında, 96°C'in üzerine ısıtılarak, yapısının daha yumuşak bir hale getirildiği ısı işlem yöntemidir. Dehidrasyon işlemi, gıdanın içerisindeki suyu uzaklaştırmak için vakum sayesinde 50°C'in üzerinde bir sıcaklık gerektiren, buharlaştırma ile kurutma işlemidir. Gıdalara uygulanan bütün bu prosesler, gıdaları koruma, sahip oldukları özelliklerini geliştirme amacıyla yapılan veya konsantre meyve suları ve yarı kurutulmuş gıdalar gibi pazardaki talepler sonucunda yeni ürünler üretmek için kullanılmaktadır. Mikrodalga ve kızılötesi olarak uygulanan elektromanyetik radyasyon işlemi de yine gıdaların kurutulması ve korunması amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, gıda maddesinde herhangi bir ısı artışı görülmez ve iyonlaştırıcı radyasyonun uygulanması sonucunda gıdaların korunmasını mümkün kılar [25], [26].

Gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ısıtma ve soğutma ekipmanları, ısı değiştiriciler denilen sistem elemanlarıdır. Bu ısı değiştiricilerin de borulu, plakalı gibi çeşitli türleri bulunmaktadır [7]. Gıdaların ısı işlemlerinde kullanılan ekipmanlar pahalı, yatırım ve işletme maliyetleri yüksek ve bunlara ek olarak yüksek hijyen gerektiren elemanlardan oluşmaktadır. Bu ekipmanlar nihai ürünü üretmek için enerji tüketen cihazlardır. Mühendislik sistemlerinde en önemli kriterlerden biri

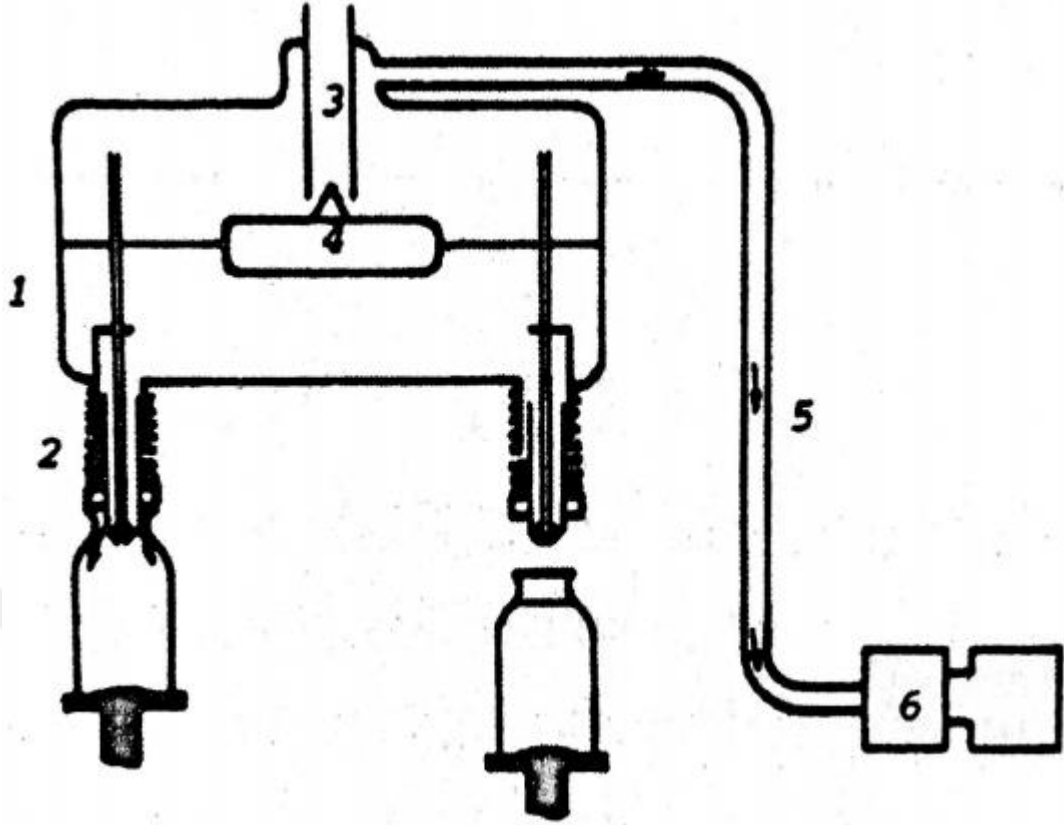
de enerji verimliliği konusudur. Isıl işlem sistemlerinin performanslarını iyileştirmek için enerji verimliliği ana kriterdir. Bunun yanında hijyenik sistem tasarımları da endüstrinin vazgeçilmez bir unsurudur [27], [28].

### **2.3.2. Gıdaların Ambalajlanması ve Dolum Yöntemleri**

Gıda endüstrisinde ambalaj, içerisine konmuş olan gıda maddelerinin son tüketiciye, bozulmadan ve en düşük maliyet ile güvenilir bir şekilde taşınmasını sağlayan bir araçtır. Gıda endüstrisinde kullanılan başlıca ambalaj malzemelerine baktığımızda; cam ambalajlar (şişeler, kavanozlar, damacanalara veya çeşitli kapsüller), kağıt, karton veya oluklu mukavva bazlı ambalajlar, ahşap ambalajlar, alüminyum ambalajlar, teneke ambalajlar, plastik esaslı ambalajlar ve bir takım çok katmanlı ambalaj malzemeleri karşımıza çıkmaktadır [29]. Bütün bu ambalaj çeşitlerinin sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında ambalaj detaylarına girilmeden sadece genel bir bilgi verilerek ilenmiştir.

Bu tez çalışmasında esas alınan konu sıvı ve koyu kıvamlı gıda ürünlerinin şişelere doldurulmasıdır. Bu dolum işlemi uygulamaları incelendiğinde karşılaşılan sistemlerden ilki vakumlu şişe doldurma makineleridir. Bu makineler tek hazneli ve çift hazneli olmak üzere ikiye ayrılır. Tek hazneli olan sistemde ürünün bulunduğu haznenin boşluğuna bir vakum pompası kullanılmak suretiyle vakum işlemi uygulanır. Doldurulacak ürün pompa vasıtasıyla hazneye iletilir ve haznenin içerisindeki ürün miktarı bir şamandıra ile kontrol altında tutulur. Hazne çeşitli sayıda dolum başlığı ile bağlantılı olup bu başlıkları besler [29].





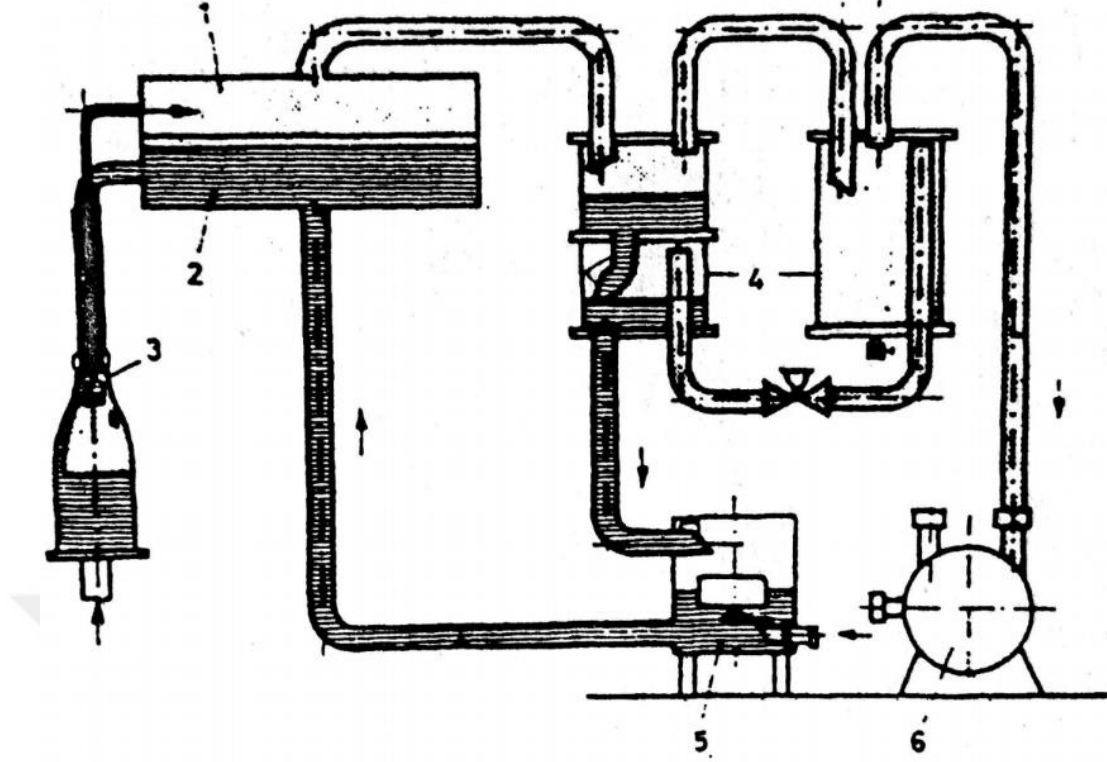
Şekil 2.7. Tek hazneli vakumlu doldurma sistemi [29]

Şekil 2.7’de tek hazneli bir vakumlu doldurma sisteminin çizimi gösterilmiştir. Burada numaralarla gösterilen parçalar;

1. Vakum altındaki ürün haznesi
2. Yaylı doldurma ventili
3. Ürün girişi
4. Şamandıra
5. Vakum borusu
6. Vakum pompası

şeklindedir.

Çift hazneli bir vakumlu doldurma makinesinde ise vakum haznesi ile ürün hazneleri birbirlerinden ayrıdır. Bu tip makineler viskozitesi yüksek olan meyve suyu veya çeşitli sıvı gıdaların dolum işlemlerinde kullanılmaktadır. Oldukça hızlı bir şekilde dolum işlemini gerçekleştirirler. Doldurma başlığı şişenin ağzına yerleştiğinde vakum ventili açılır ve şişede oluşan vakumla ürün şişeye emilir [29].

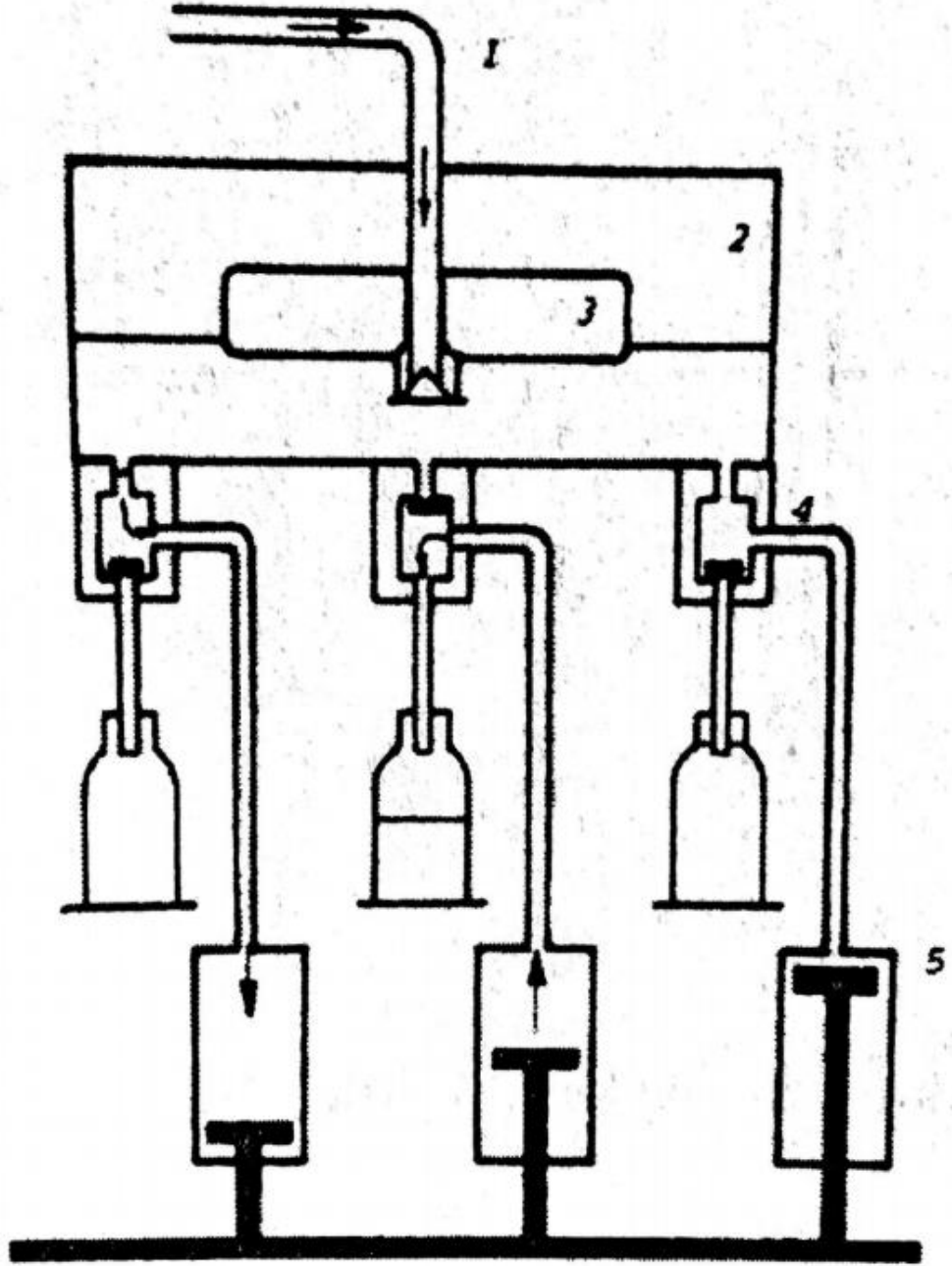


Şekil 2.8. Çift hazneli vakumlu şişe doldurma sistemi [29]

Şekil 2.8’de numaralandırılmış kısımlar alttaki gibidir:

1. Vakum haznesi
2. Sıvı ürün
3. Doldurma ventili
4. Savak ayırıcı
5. Ön tank
6. Vakum pompası

Üçüncü olarak incelenen dolum makinesi tipi pistonlu, sabit miktar doldurma makineleridir. Bu tip makinelerde şişelere dolumu yapılacak olan ürün önce bir ölçü kabına doldurulur ve sonrasında ambalaja aktarılır. Dolumu yapılacak ürün her türlü sıvı veya koyu kıvamlı ürün olabilir. Dozajlama işlemi tüm dolum başlıkları için tek bir merkezde ayarlanır ve son derece doğru olarak dozajlanır [29].

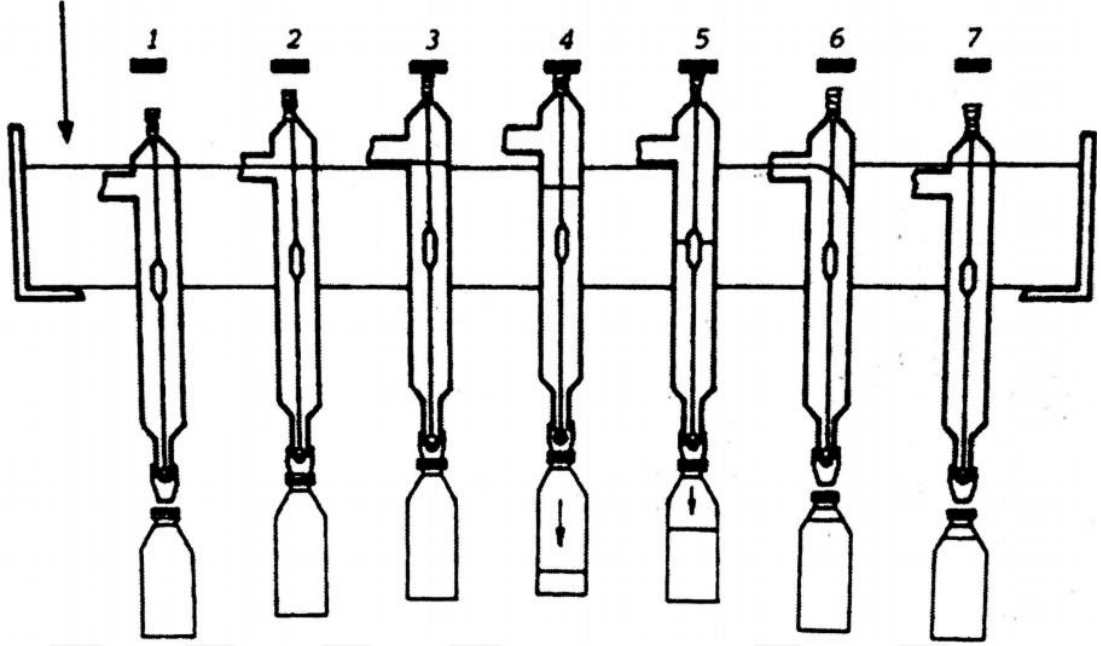


Şekil 2.9. Pistonlu doldurma sistemi [29]

Şekil 2.9'da numaralandırılmış kısımlar:

1. Ürün girişi
2. Ürün haznesi
3. Şamandıra
4. Ventil
5. Dozaj pistonu

Son olarak ölçülü tüplü sabit miktar doldurma makinelerinden bahsedilmiştir. Bu tip makineler, ayarlanmış ölçülü tüpler vasıtasıyla son derece doğru bir şekilde dolum yapabilmektedir ve süt ve benzeri gıda maddelerinin dolum işlemlerine en uygun dolum sistemleridir [29].



Şekil 2.10. Ölçülü tüplü sabit miktar doldurma sistemi [29]

Şekil 2.10'da gösterilen ölçülü tüplü sabit miktar dolum sisteminde, ölçülü tüp alçılır ve doldurma boynu ile birlikte ürünün bulunduğu hazneye dalar ve ürün tüpe dolar (1). Ölçülü tüp şişe tarafından yukarıya doğru itilir, fazla sıvı önceden belirlenmiş olan işarete ulaşana kadar dolum haznesine geri akar (2-3). Alt tarafta bulunan çıkış ventili, yukarıdaki doldurma çıkıntısına baskı yaparak açılır ve ürün şişeye doğru akar (4). Sonrasında ölçülü tüp şişeye beraber açılır ve boşaltma ventili yay düzeneği vasıtasıyla kapatılır (5). İzleyen safhada ölçülü tüp yeniden ürün ile dolar ve dolum işlemi tamamlanan şişeler de sistemden ayrılırlar (6-7) [29].

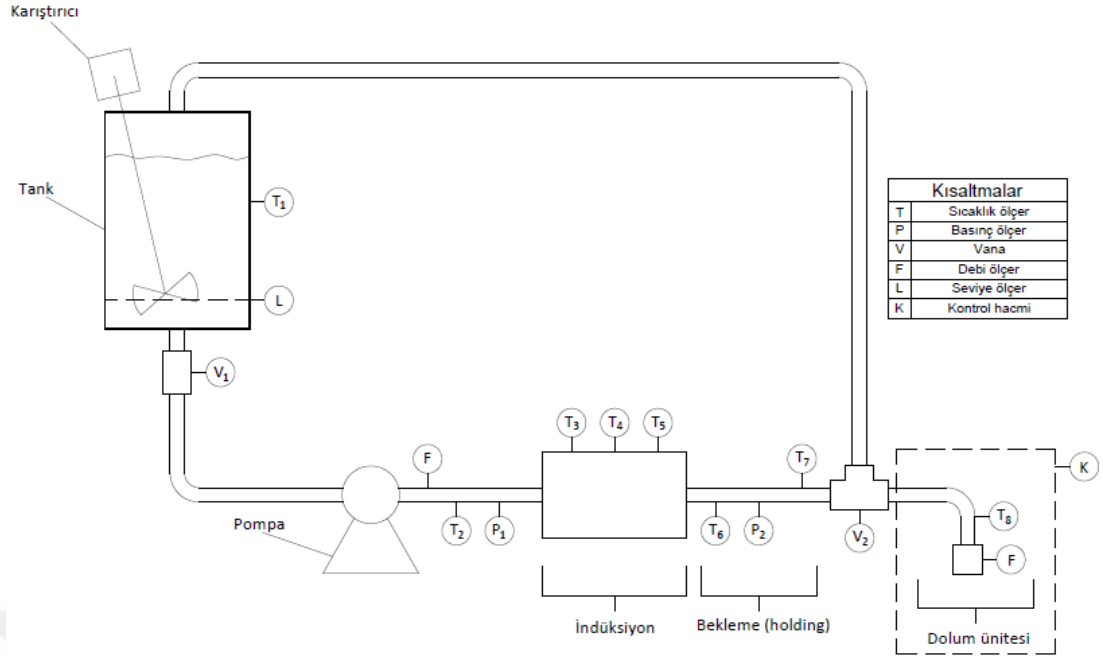
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, akışkan niteliği olan her türlü kıvamlı, sıvı veya partikül içeren gıdaların ambalaja dolum işlemlerinde, dolum esnasında pastörizasyon gerçekleştiren bir dolum makinesinin indüksiyonlu ısıtma kısmının analizleri yapılmış ve bu indüksiyonlu ısıtma bölgesinin tasarım kriterleri belirlenmiştir. Hesaplamalarda baz alınan sıvı öncelikle su olarak ele alınmıştır. Ön tasarımların, simülasyonların ve nihai tasarımın yapılması için faydalanılan yazılımlar; Autocad, Solidworks ve Ansys Fluent yazılımlarıdır. Büyük oranda kullanılacak olan Ansys yazılımı 2019 Akademik versiyon olup, bireysel ve akademik kullanım amaçları için ücretsiz olarak kullanıma sunulan sürümüdür. Buradaki ana parametreler akışkan malzemenin debisi, boru malzemenin ölçüleri, çeşitli sabit duvar sıcaklıkları ve ısı transferini artırıcı yönde etki yapacak olan tasarımsal farklılıklardır.

Çalışmada baz alınan sıvı gıda maddesi öncelikle sudur ve sisteme +4°C sıcaklık ile girdiği, +85°C ile çıktığı kabul edilmiştir. Suyun süt ile olan yapısal benzerliği dolayısıyla analizlerde akışkan olarak sisteme tanımlanmıştır. Gerekli denklemler kullanılarak sayısal hesaplamalar ve simüle edilen neticelerle karşılaştırılarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarının sonucunda optimum tasarım kriterleri belirlenmiş ve süt için hesaplamalar yapılarak gıda güvenliğini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Nihai tasarım parametreleri belirlendiğinde simüle edilen modelde sütün özellikleri baz alınarak sisteme akışkan malzeme olarak tanımlanmış ve simülasyon sonuçları irdelenmiştir.

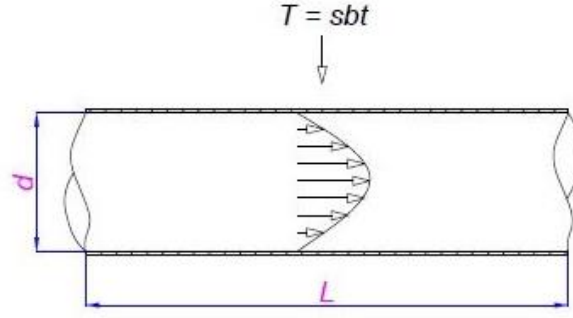
#### 3.1. Sistem Ön Tasarımı

Analiz işlemlerine başlamadan önce düşünülen dolum sistemindeki elemanlar ve çalışma mantığını ve senaryosunu anlamak amacıyla şematik bir sistem krokisi çizilmiştir. Bu şematik gösterim şekil 3.1’de görülebilir.

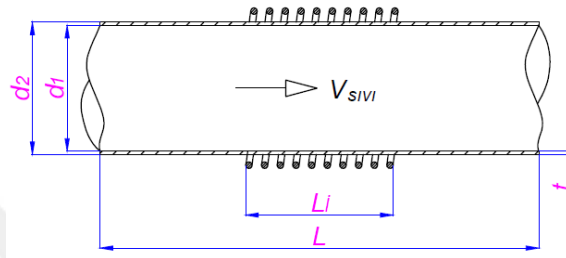


**Şekil 3.1.** Makine çalışma prensibinin şematik gösterimi

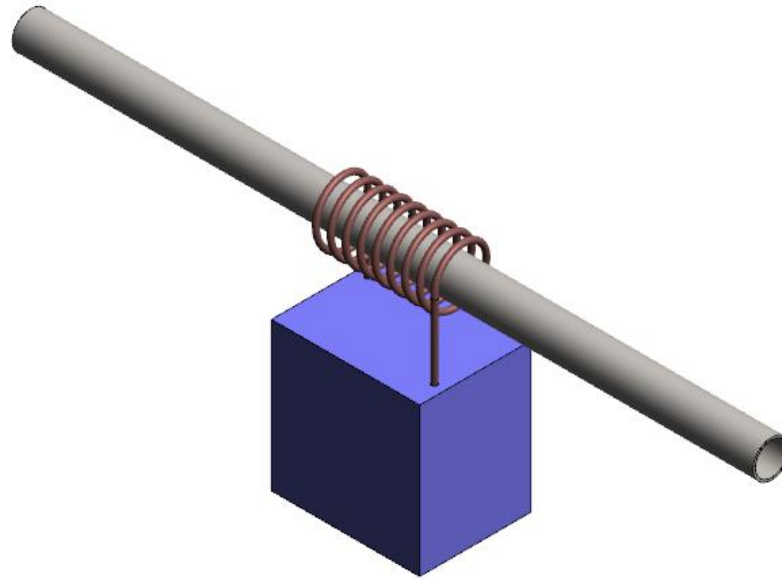
Öngörülen sistem senaryosunda, tankta bulunan akışkan gıda bir karıştırıcı vasıtası ile sürekli karıştırılmaktadır. Makine tesisatı içerisinde bir pompa vasıtası ile akışkan gıdanın dolaşımı sağlanmaktadır. Karıştırıcıdan indüksiyon ile ısıtmanın yapılacağı kısma gelen akışkan gıda, bu kısımda hedef sıcaklık değiştirilerek pastörize/sterilize edilmektedir. İhtiyaç duyulması halinde holding adı verilen bekleme kısmında akışkan gıdanın pastörizasyon/sterilizasyon işlemleri için gerekli olan süre garanti edilecektir. Bu işlemin ardından sistemdeki akışkan gıda, dolum ünitesine gönderilecek ve akabinde paketleneyecektir. Tez çalışması kapsamında yapılacak olan analizlerde öncelikle Şekil 3.2' de görüldüğü gibi düz boru yüzeyi ile başlanarak; farklı sabit yüzey sıcaklıklarında (90-120-150°C), sabit debide (0,1 L/s), sabit boru iç çapında (çizelge 40, 1"), akış tipi belirlenmiş, ısıl hesaplarla gerekli olan boru uzunluğu bu farklı sabit yüzey sıcaklıklarında ve 3 değişik boru yüzey tasarımına göre hesaplanmıştır.



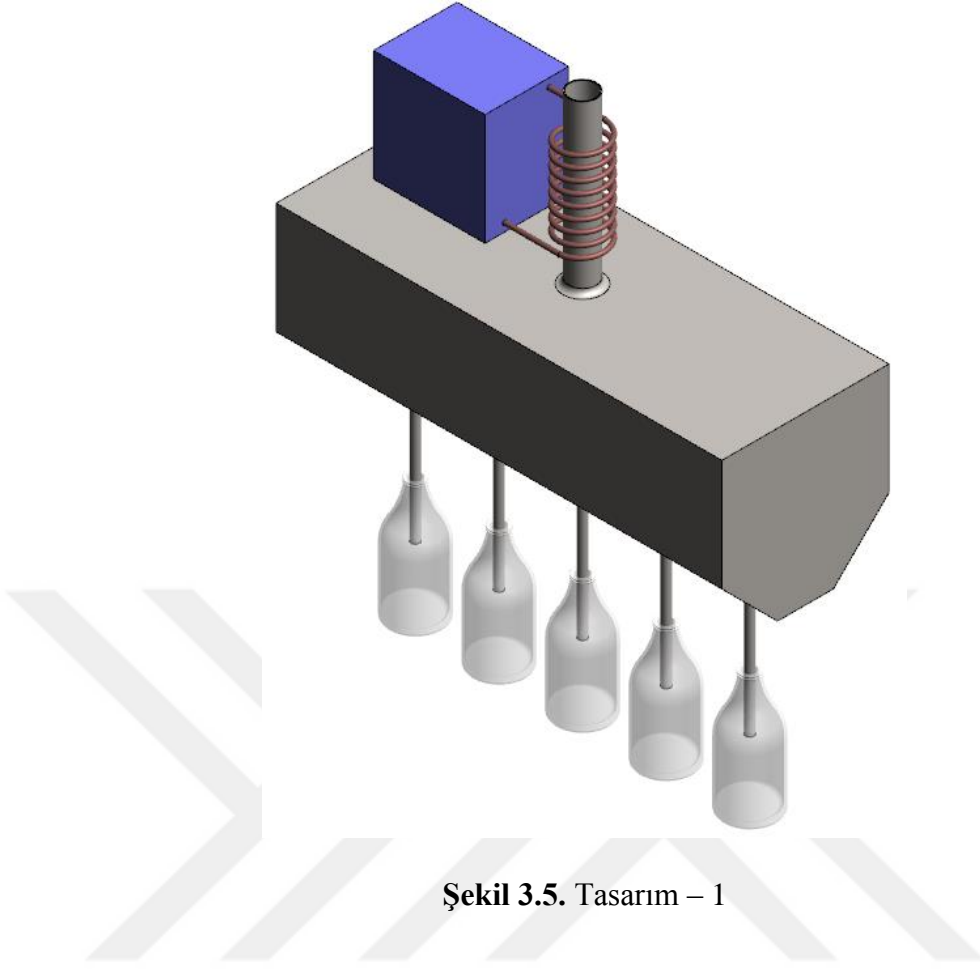
Şekil 3.2. Düz boru içindeki akış profili



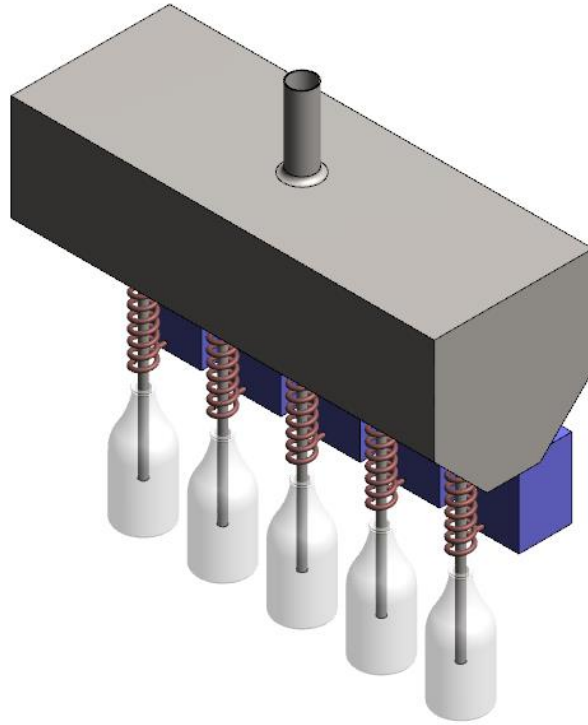
Şekil 3.3. Düz boru etrafındaki indüksiyon bobin kesiti



Şekil 3.4. İndüksiyon sisteminin 3 boyutlu gösterimi

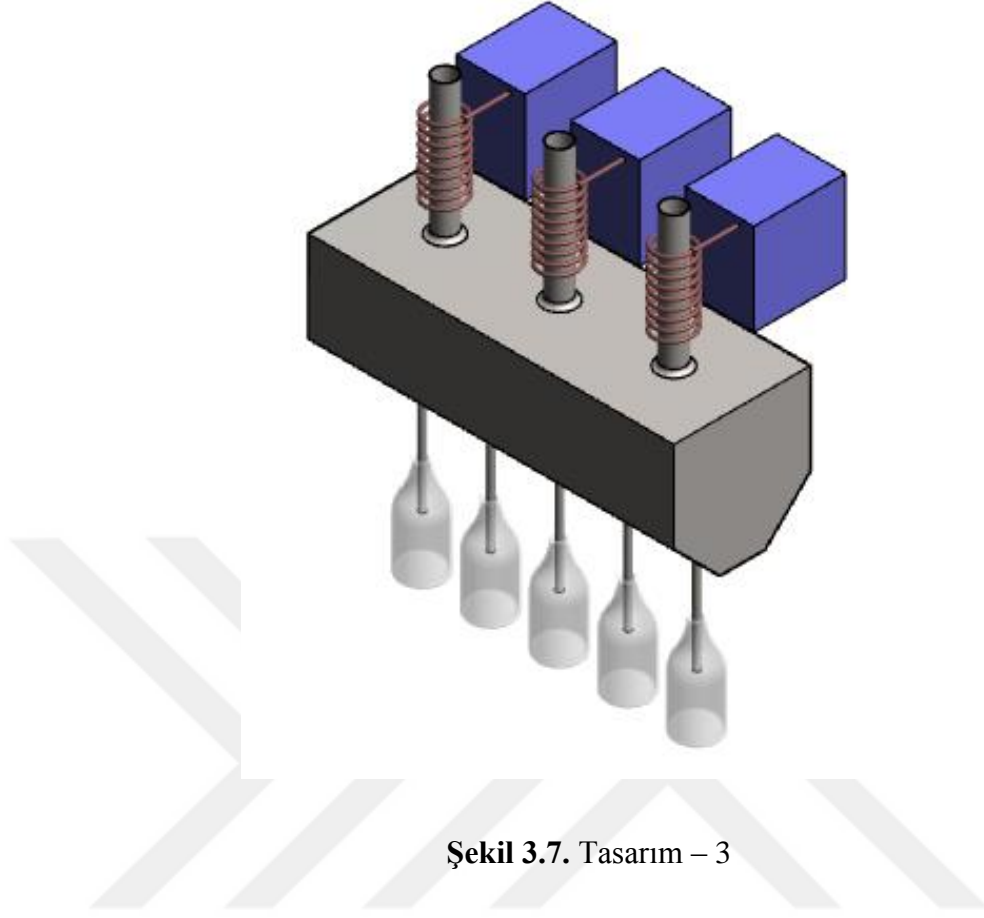


Şekil 3.5. Tasarım – 1



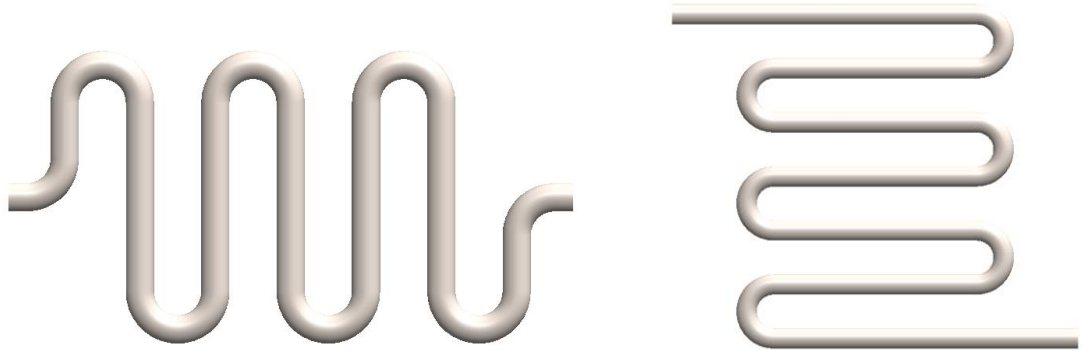
Şekil 3.6. Tasarım – 2





**Şekil 3.7.** Tasarım – 3

Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de induksiyon ile ısıtma içerisinde bulunduğu dolun sistemleri farklı şekillerde temsil edilmiştir. Buradaki induksiyon ile ısıtma kısımları, dolun kanalları ve dolun kanal sayıları değişik kapasite aralıklarında sistemlere göre farklılık gösterecektir.



**Şekil 3.8.** Holding için boru tasarım örnekleri

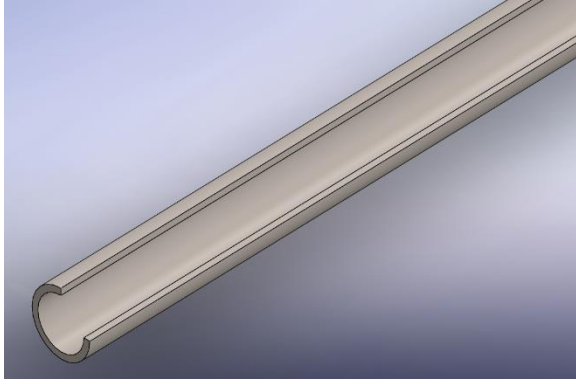
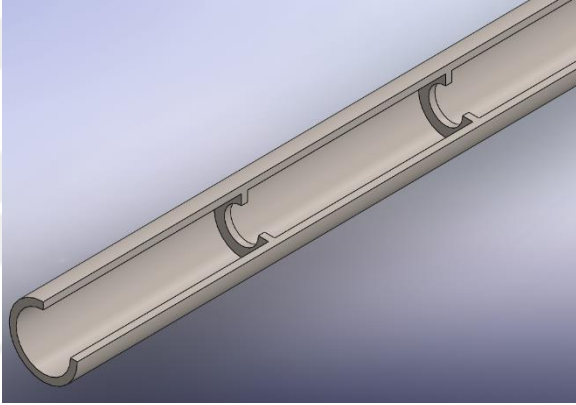
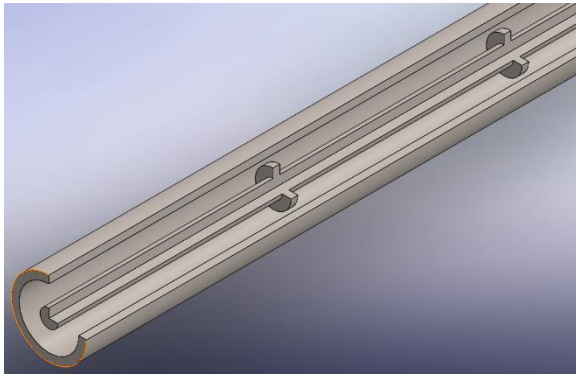
Şekil 3.8’de ısıtım sonrası sıvı gıdanın dolun işleme iletilmeden önce belirli bir süreyi geçirmesini garanti edecek boru tasarım örnekleri

gösterilmiştir. Buradaki borunun uzunluk miktarı sıvı gıdanın sistemde bekleyerek geçirmesi gereken süreye bağlı olacağından farklı sistem kriterleri için farklı tasarımlar ortaya çıkacaktır. Simülasyon sonuçlarına bağlı olarak bu bekleme kısmına gerek duyulmayabilir.

### **3.2. Geometri Seçimleri ve Kabuller**

Isı transfer alanını artırmak ve akış modifikasyonlarının etkisini görmek amacıyla farklı tip tasarımlar üzerinde analiz yapılmıştır. Bu analizlerde su ve ardından final analiz için bir gıda maddesi olarak süt için, gerekli parametreler ve sınır değerleri göz önünde bulundurularak ısınma koşullarını sağlayacak şekilde 3 farklı tasarım yapılmıştır. 3 farklı yüzey sıcaklığı için bu 3 farklı tasarımda analizler yapılmış olup, 9 farklı boru uzunluğu analizler neticesinde ortaya çıkan değerlerde gözlenip, belirlenmiştir. Tez çalışmamızda sabit yüzey sıcaklığındaki boruların içerisinden akış karakteristikleri incelenmiştir. Bunun için ele alınacak olan geometri modelleri tablo 3.1’de gösterilmiştir. Diğer yandan bu modellerde hesaplamalarda kullanılacak olan parametre kabulleri tablo 3.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.** Geometri modelleri

Model Adı	Model Gösterimi	Açıklama
Düz boru		Düz boru içerisinde akan akışkanın ısıtılması işlemidir. Isıtma işlemi yüzey duvarlarından sabit sıcaklık kabulüyle yapılacaktır.
Yüzeyde akış kırıcı kanatlı		Akış profilini değiştirip, türbülansı artırmak amacıyla yüzeyde akış bölücü girintiler bulunmaktadır. Isıtma duvar yüzeyinden sabit sıcaklık kabulüyle yapılacaktır.
Merkezde mil ve akış kırıcı kanatlı		Isı tranfer alanını genişletip akış profilini değiştirmek amacıyla merkezde mil ve üzerinde kanatçıklar vardır. Isıtma işlemi merkezdeki mil ile sabit sıcaklıkta ele alınacaktır. Duvar yüzeyleri adyabatik kabulü ile hesaplanacaktır..

**Tablo 3.2.** Modellerde kullanılacak hesaplama kriterleri

Model	Isıtma yüzeyi sıcaklığı [°C]	Debi [L/s]	Giriş sıcaklığı [°C]	Çıkış sıcaklığı [°C]
Düz boru	90-120-150	0,1	+4	+85
Yüzeyde akış kırıcı kanatlı	90-120-150	0,1	+4	+85
Merkez milli ve akış kırıcı kanatlı	90-120-150	0,1	+4	+85

### 3.3. Modelleme Hesaplamaları ve ANSYS Simülasyonları

#### 3.3.1. Model 1: Düz Boru - 90°C

Ek A.3'ten çizelge 40, 1 inç boru değerleri kullanılarak giriş hızı denklem 2.4'ten hesaplanır:

$$D = 26,64 \text{ mm} = 26,64 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$Q = A \times \vartheta \quad (2.4)$$

$$0,1 \times 10^{-3} = \pi \times \frac{(26,64 \times 10^{-3})^2}{4} \times \vartheta \quad (2.4)$$

$$\vartheta = 0,18 \text{ m/s}$$

Giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre yığın ortalama sıcaklığı:

$$T_{ort} = \frac{4 + 85}{2} = 44,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ek B.3'ten yığın ortalama sıcaklığı 44,5°C olan suyun değerleri alındığında;

$$\rho = 990,1 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,596 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \times \text{s}$$

Denklem 2.2 kullanılarak Reynolds sayısı hesaplanır ve akış türü belirlenir:

$$N_{Re} = \frac{D \times \vartheta \times \rho}{\mu} = \frac{0,02664 \times 0,18 \times 990,1}{0,596 \times 10^{-3}} = 7966 \quad (2.2)$$

Reynolds sayısı 6000'den büyük olduğuna göre akış tam türbülenttir.

Tam türbülent akışlarda kullanılacak eşitlik 2.3:

$$N_{Nu} = \frac{h \times D}{k} = 0,027 \times N_{Re}^{0,8} \times N_{Pr}^{1/3} \times \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

Bu eşitlik,  $N_{Re} > 6000$ ,  $0,7 < N_{Pr} < 16000$  ve  $L/D > 60$  durumlarında geçerlidir. Yapılan hesaplamalarda göreceği üzere Reynolds ve Prandtl sayıları şartları sağlar durumdadır. Boru uzunluğu bulunca da  $L/D$  şartı kontrol edilecektir.

Denklemdaki bilinmeyen değerler Ek B.3'ten okunur:

$$N_{Pr} = 3,91$$

$$k = 0,637 \text{ W/m} \times K$$

$$\mu_b = 0,596 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \times s$$

$$\mu_w = 0,315 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \times s$$

Değerler yerlerine yazılıp hesaplanır:

$$\frac{h \times 0,02664}{0,637} = 0,027 \times 7966^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,315 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$h = 1469,3 \text{ W/m}^2 \times K$$

Gerekli olan ısı aktarım miktarı denklem 2.5'ten hesaplanır:

$$q = \dot{m} \times c_p \times (T_o - T_i) \quad (2.5)$$

Buradaki özgül ısı ( $c_p$ ) değeri yine Ek B.3'ten ortalama yığın sıcaklığı için okunur ve denklemdaki sayısal değerler yerlerine yazılırsa:

$$q = 0,1 \times 4180 \times (85 - 4) = 33858 \text{ W} \quad (2.5)$$

Denklem 2.1'de bulunan değerler yerlerine yazılıp boru uzunluğu bulunur:

$$q = h \times A \times (T_w - T_{ort}) \quad (2.1)$$

$$33858 = 1469,3 \times \pi \times 0,02664 \times L \times (90 - 44,5) \quad (2.1)$$

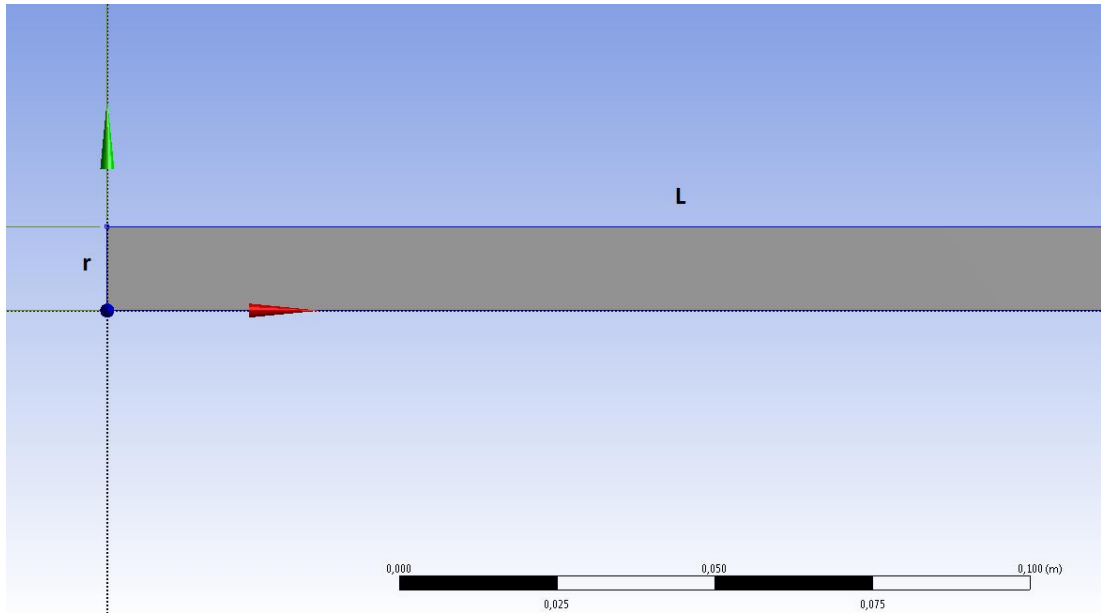
$$L = 6 \text{ m}$$

$$L/D = 6/0,02664 = 225 > 60$$

Bulunan 6 metrelik boru, 90°C sabit yüzey sıcaklığındaki bir tasarım içindir. Yani 6 metre bir indüksiyon bobinin merkezinde ısıtıldığı kabulü yapılmaktadır. Devam eden sayfalarda bu 6 metrelik boru için ANSYS FLUENT yazılımında yapılan simülasyonlar adım adım anlatılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

FLUENT'te yapılacak hesaplamalarda axissymmetric yöntem kullanılacaktır. Bu yöntemde, 2 boyutlu bir boru çizeceğiz ve yazılım bunu, tanımlayacağımız axis etrafında 360° döndürerek, 3 boyutlu bir boru sistemi olarak hesaplayacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, axis etrafında döndürme yapılarak bir boru sistemi oluşturulacağı için, geometri oluşturulurken boru kesitini yarıçap baz alarak oluşturmaktır. Çünkü merkez eksen etrafında 360° döndürerek hesaplandığında borunun tam bir çap değerine tamamlandığı unutulmamalıdır. Bu yöntem hızlı ve oldukça doğru sonuçlar veren, kullanılan sistem için optimum bir yöntem olacaktır.

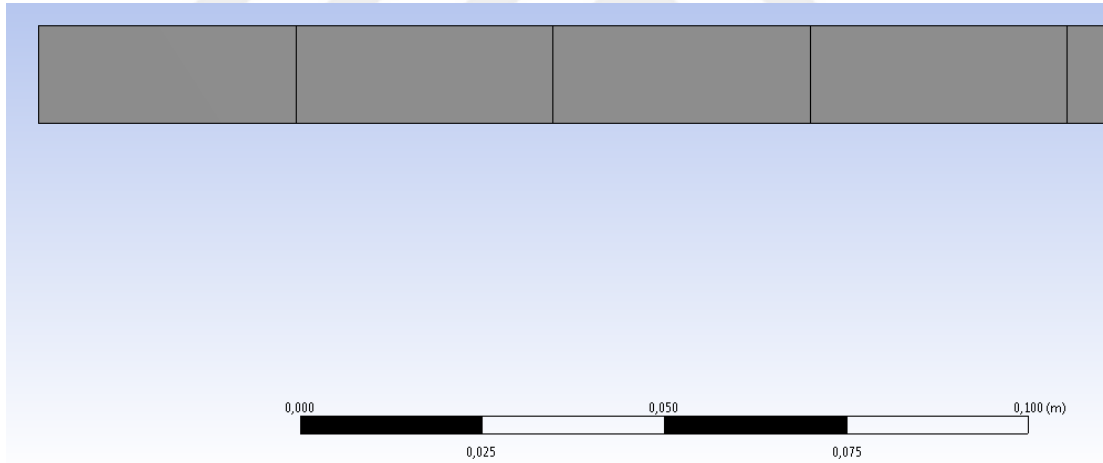
Öncelikle Şekil 3.9'da görülen geometri çizilmiştir. Modelin, hesaplamada bulunan boru boyu değeri ile yarıçap değeri kullanılarak çizildiğine dikkat edilmelidir.



**Şekil 3.9.** FLUENT'te oluşturulan 2 boyutlu düz boru geometrisi

Geometri dikdörtgen şeklinde çizildikten sonra bu çizim kalınlığı 0 birim olan bir yüzeye dönüştürülmüştür. Şekil 3.9'da görülen bu yüzeydir.

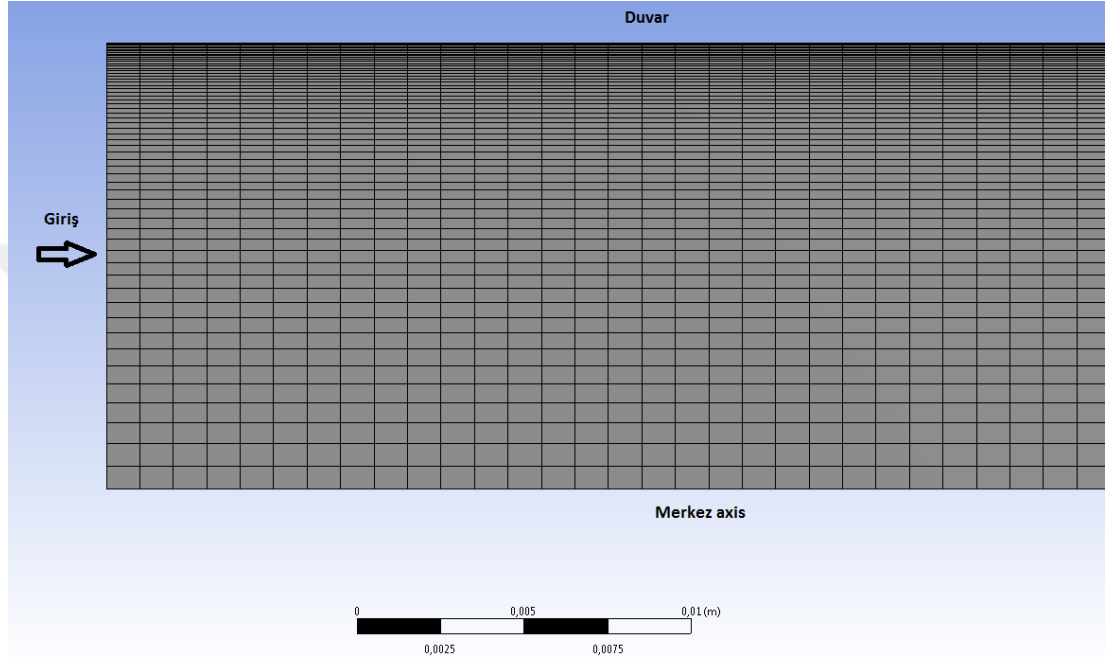
FLUENT’de geometriyi oluşturduktan sonra ikinci aşama mesh işlemidir. Oluşturulan model için mesh işlemi gerçekleştirildiğinde ilk önce Şekil 3.10’da görüldüğü gibi kaba bir mesh görüntüsü ile karşılaşılacaktır. Burada mesh olarak bahsedilen terim, sonlu elemanlar yöntemlerinde yaygın olarak duyulan bir terimdir. Tek ve sonsuz sayıda moleküllerden oluşan modelin, sonlu sayıda elemana bölünmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi yazılımlarının çalışma mantığı, bu çok sayıda küçük parçanın sistem içerisinde hesaplanarak bütün bir sistemin karakteristiğini ortaya çıkarmasıdır. O yüzden burada yapılan mesh işleminin kalitesi son derece önemlidir. Özellikle ısıtılan yüzeye yakın olan parçacıkların istenilen boyutta olması işlem doğruluğunu artıracaktır. Bunu anlamak için işlemlerde wall y+ değeri incelenecektir. Bu değer 0 ile 1 arasında olması işlem sonucunun doğruluk payının yüksek olması anlamına gelir. Eğer 0-1 arasına inilemiyorsa, mümkün olduğu kadar 1’e yakın bir wall y+ değeri ile çalışılmalıdır. Y+ değeri, Y ekseninde türetilen boyutsuz bir mesafedir.



**Şekil 3.10.** Herhangi bir düzeltme yapılmamış temel mesh görüntüsü

Sıradaki adımda yapılacak işlemler, yazılım tarafından kaba bir şekilde oluşturulan bu mesh yapısını inceltmek ve hesaplamaların doğruluğunu artırmak için yapılacaktır. Bunun için kenarlara “sizing” denilen ebat ayarlamaları yapılarak, mesh yapısındaki eleman sayısı arzu edilen seviyelere getirilecektir. Özellikle ısıtma işleminin yapıldığı sabit sıcaklıktaki duvar yüzeyine yakın noktalarda eleman yapıları olabildiğince inceltilmelidir. Buradaki amaç, ısı kaynağı olan duvara yakın elemanlardaki ısı transferi ve diğer parametrelerin daha iyi yakalanmasıdır. Burada

dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da, FLUENT yazılımının akademik ücretsiz versiyonunda maksimum eleman sayısı 520000 civarındadır. Bunun üstüne çıkıldığında program hesaplama yapmayacak, eleman sayısının azaltılmasını isteyecektir. Bu tez çalışmasında yer alan hesaplamalar için 520000 eleman sayısı oldukça fazla ve yeterlidir. Örnek olarak bahsedilirse, Şekil 3.10'da yer alan mesh yapısında eleman sayısı 170 olup oldukça kaba bir mesh yapısıdır.



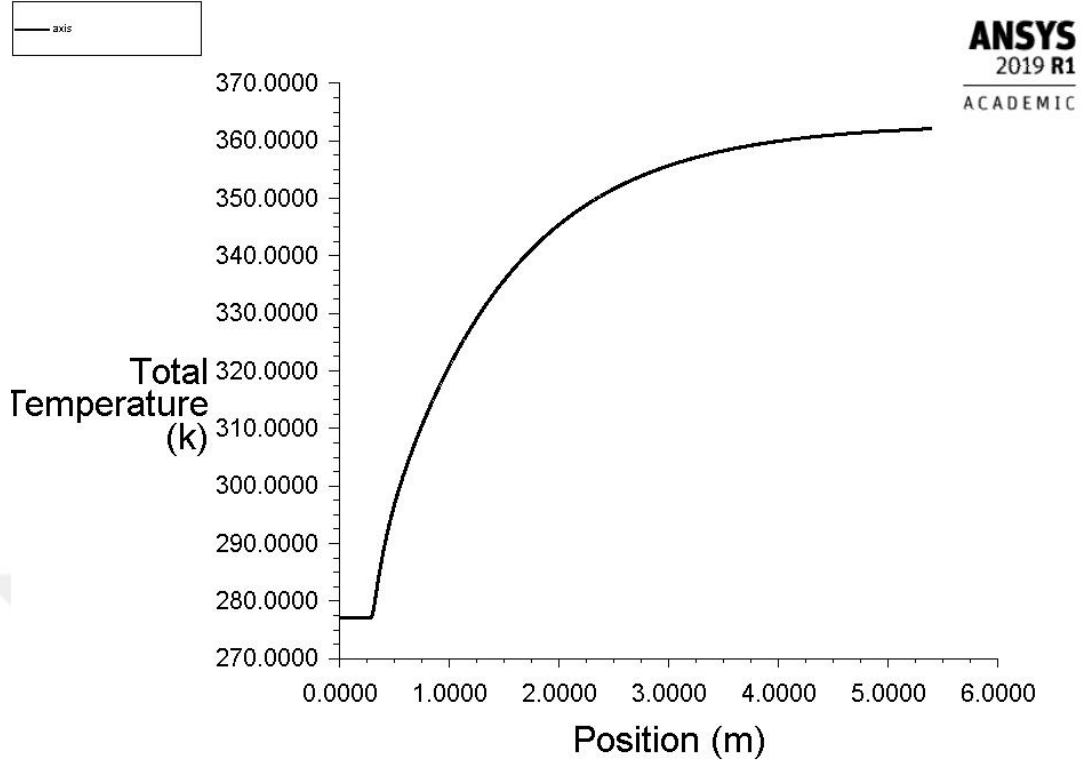
**Şekil 3.11.** Düzeltilmiş mesh yapısı

Şekil 3.11'de gösterilen düzeltilmiş mesh yapısında eleman sayısı 360000'dir. Burada duvara yakın olan bölgelerdeki eleman yapıları daha da ince olduğu görülmektedir.

Mesh yapısı istenilen şekilde oluşturulduktan sonra FLUENT analizi için bir dizi ayarlamalar yapılacaktır. Akış modeli türbülanslı k-e olarak ayarlanmıştır. Kabul ettiğimiz sınır koşulları ve hesapladığımız parametreler ayarlandıktan sonra çözüm yöntemi SIMPLE baz alınarak analiz işlemi yapılmıştır. Bu ayarlamalar bütün dizaynlar için aynı olacaktır.

Analiz sonucunda 6'ncı metredeki ortalama çıkış sıcaklığı 362,5°K yani 89,5°C olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.12'de ortaya çıkan sıcaklık ve boru boyu grafiği gösterilmiştir.





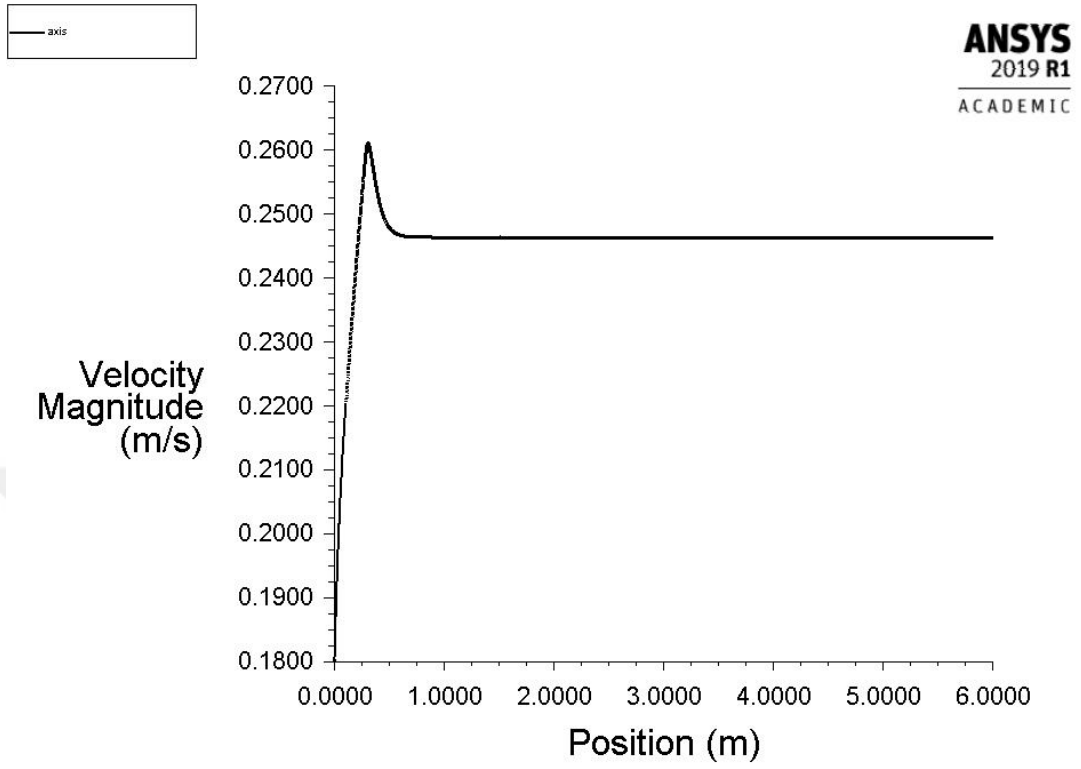
Şekil 3.12. Model 1 ortalama akışkan sıcaklığı grafiği

Tablo 3.3. Model 1 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	1,42
65	1,64
70	1,90
75	2,23
80	2,70
85	3,52

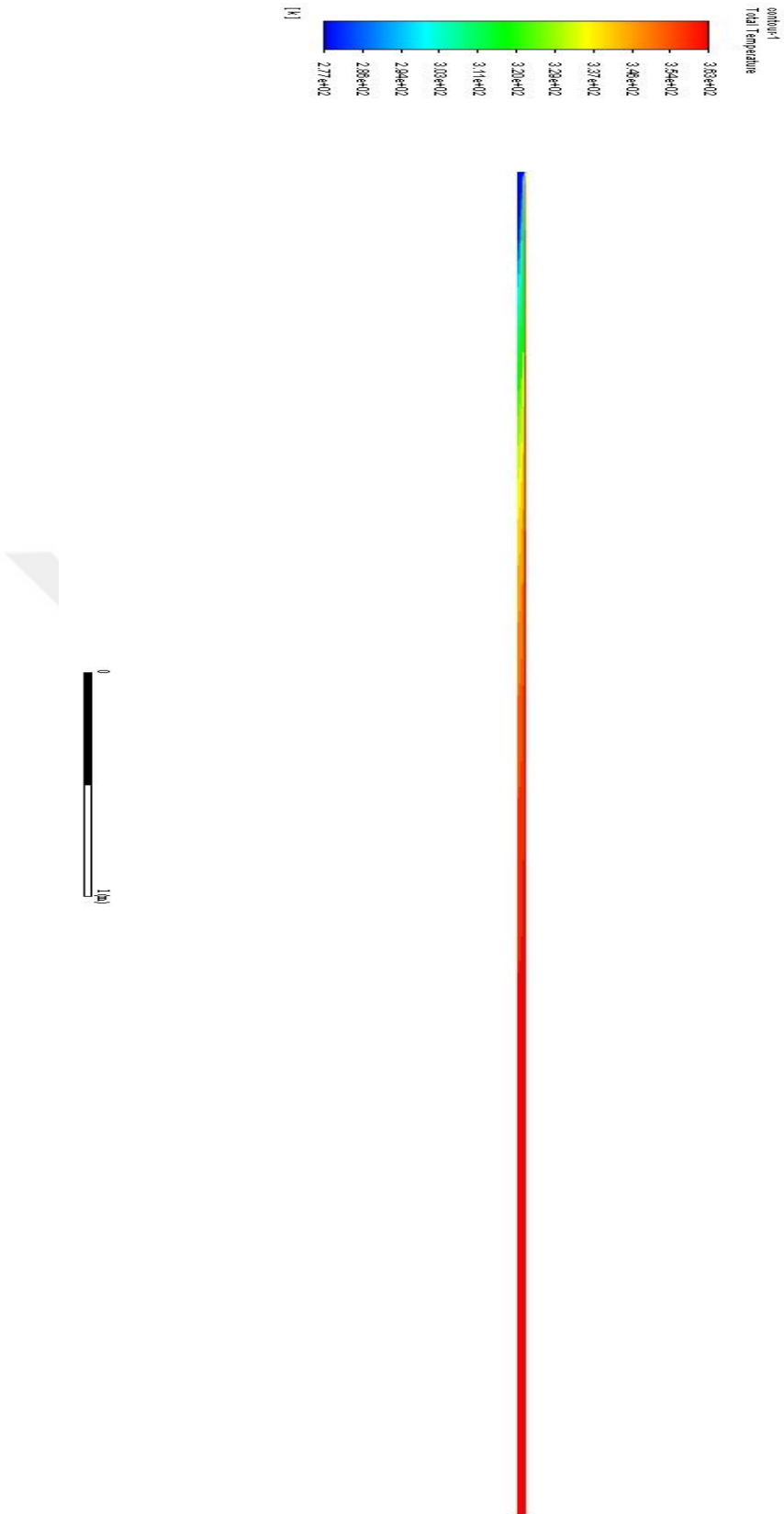
Tablo 3.3 ve Şekil 3.12 incelendiğinde, 85°C ortalama akışkan sıcaklığına ulaşılan boru boyunun aslında 6 m olmadığı anlaşılmaktadır. Burada karşımıza çıkan uzunluğu yaklaşık 3.52 m olarak alabiliriz. Sayısal hesaplamalar ile FLUENT analizi arasında bu farkın oluşmasının nedeni, sayısal hesaplamaların daha kaba bir şekilde yapılmasıdır. Yani sayısal hesaplamalar elle yapılırken parça bir bütün olarak tek elemanmış gibi düşünülür. Ancak fluent bunu çok sayıda elemana bölüp bütün bu elemanların birbirleri ile olan ilişkisini çözümler. Dolayısıyla yığın ortalama sıcaklıkları ve ısı transferi açısından daha detaylı analiz edip, çok daha doğru sonuç

verir. Ancak sayısal hesaplamalar başta gerekli olan programın girdi değerlerinin elde edilmesini sağlar.



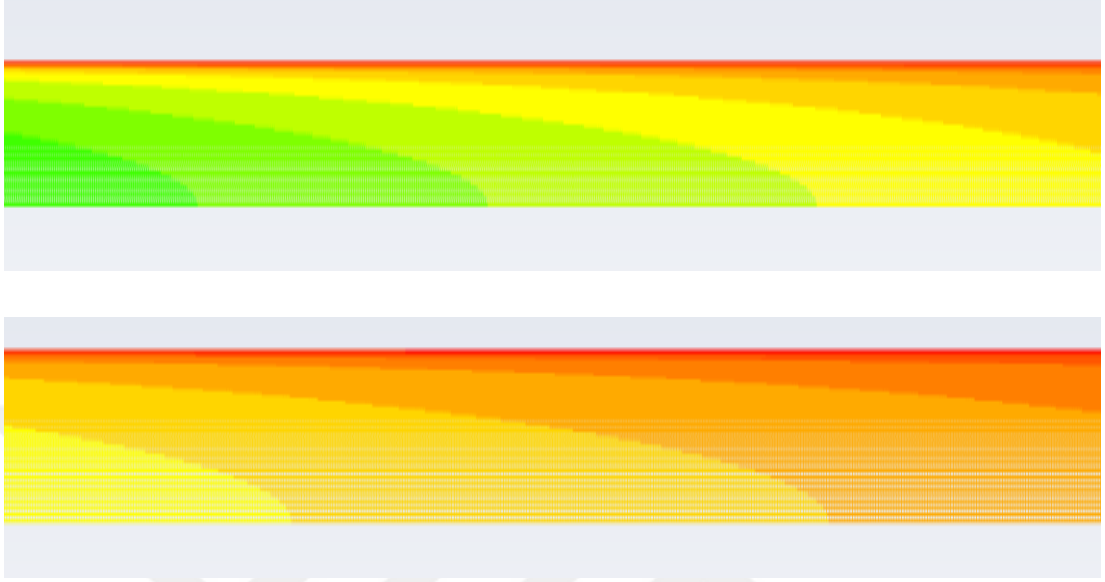
Şekil 3.13. Model 1 hız grafiği

Şekil 3.13'te ortalama 0.18 m/s hız ile boru içerisine giren akışkanın, 0.7 m civarında hız profil karakteristiğinin ortaya çıktığı ve sonrasında boru içerisindeki yaklaşık ortalama hızı 0.246 m/s'dir.



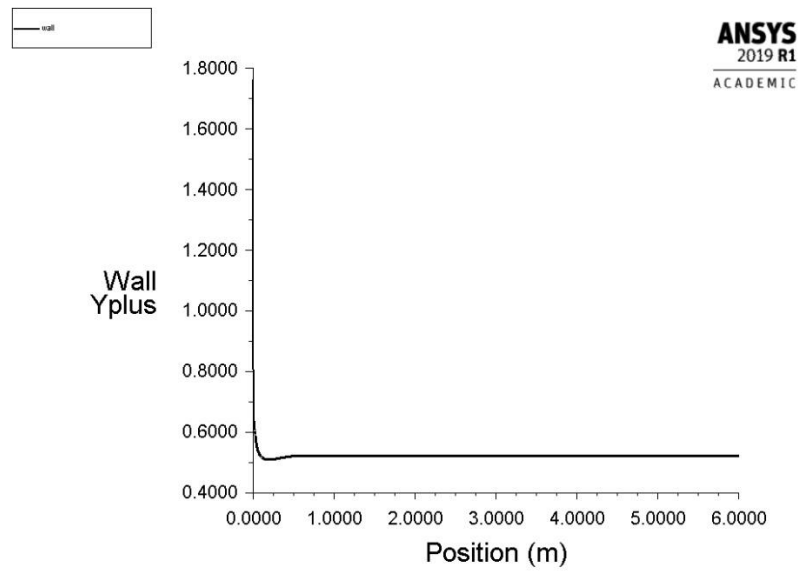
Şekil 3.14. Akışkan sıcaklık dağılımı

Şekil 3.14'te akışkan sıcaklık dağılımı verilmiştir. Daha iyi gözlenebilmesi amacıyla Şekil 3.15'te daha yakın görüntüleri paylaşılmıştır. Buradan duvara ve merkez eksene yakın bölgelerdeki ısı transferi karakteristikleri anlaşılabilir.



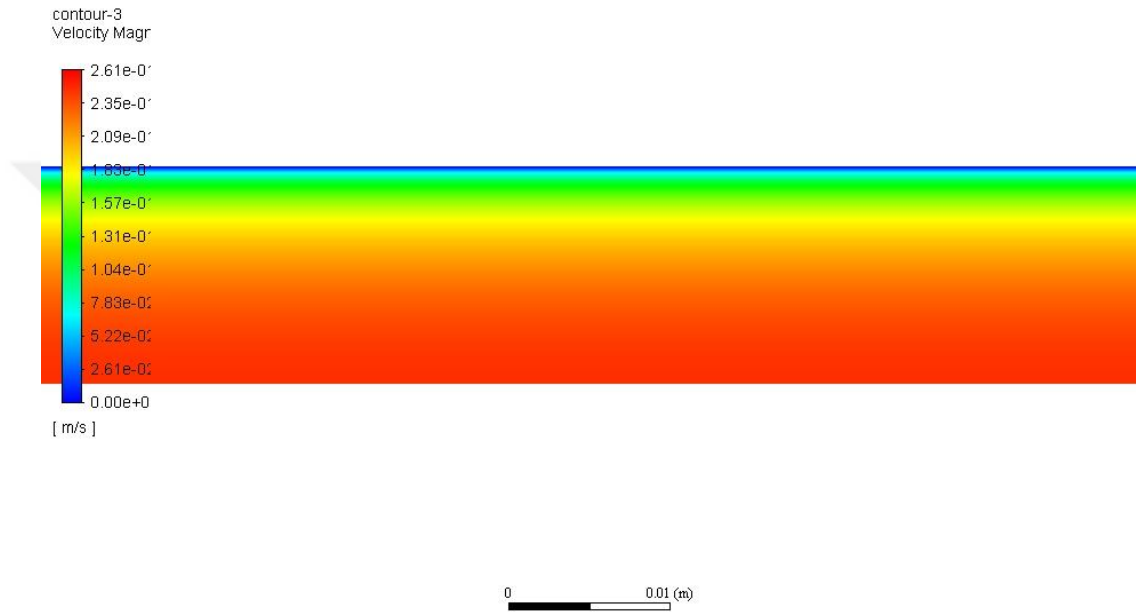
Şekil 3.15. Akışkan sıcaklık dağılımı detayı

Analiz doğruluğunun yüksek olması için wall y+ değerinin 1'in altında olması gerektiğinden daha önce bahsedilmişti. Bu analizde wall y+ değerini kontrol ettiğimizde 0,5 civarında olduğunu görüyoruz. Bu değer grafiği de Şekil 3.16'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.16. Y+ değeri

Şekil 3.17 incelendiğinde, merkeze doğru akışın ortalama hızının arttığı ve duvara yakın bölgede ise akış hızının daha yavaş olduğu gözlenebilmektedir. Merkeze yakın bölgelerde ortalama hız en yüksek değere ulaşarak 0.26 m/s ortalama hızlara kadar ulaşmaktadır. Duvara yakın bölgede ise neredeyse durağandır.



Şekil 3.17. Akış hız dağılımı

### 3.3.2. Model 2: Düz Boru - 120°C

Akış hızı, ortalama sıcaklık, Reynolds sayısı gibi değerler 90°C yüzey sıcaklığı için yapılan hesaplama ile aynıdır. Duvar sıcaklığındaki viskozite değeri farklı olacağından ısı aktarım katsayısı denklem 2.3 kullanılarak 120°C için hesaplanır:

$$N_{Nu} = \frac{h \times D}{k} = 0,027 \times N_{Re}^{0,8} \times N_{Pr}^{1/3} \times \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$\frac{h \times 0,02664}{0,637} = 0,027 \times 7966^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,232 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$h = 1533,6 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

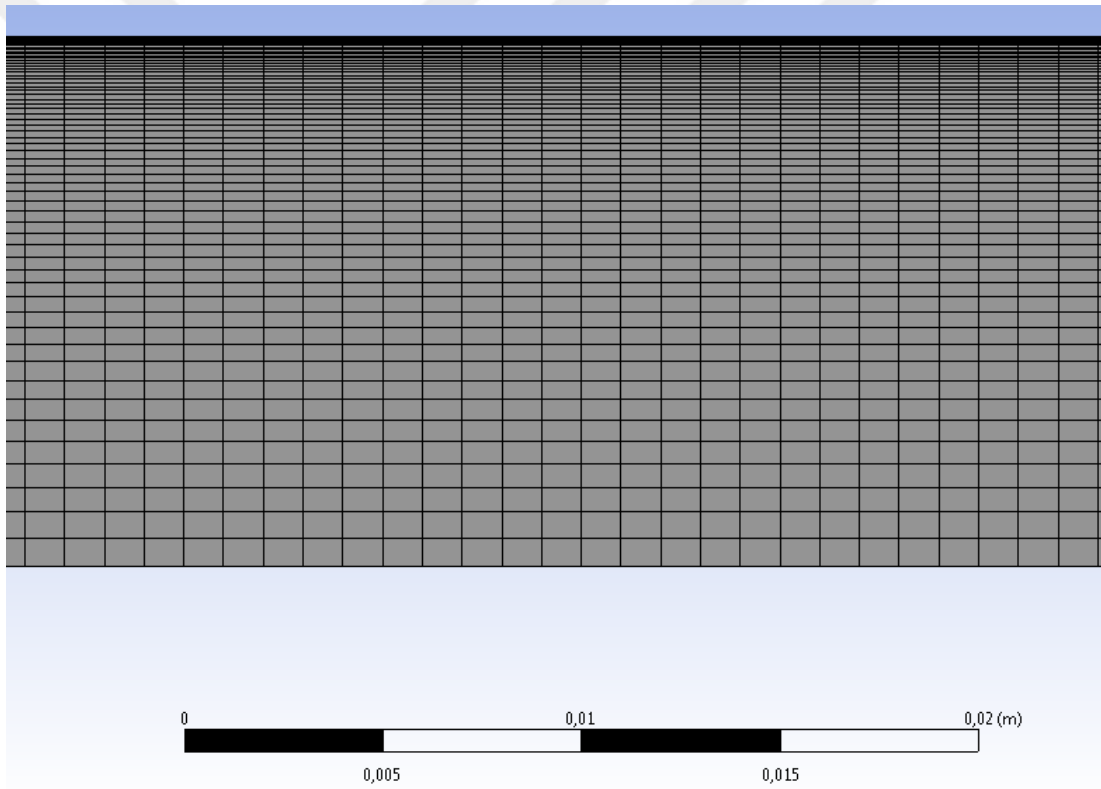
$$q = h \times A \times (T_w - T_{ort}) \quad (2.1)$$

$$33858 = 1533,6 \times \pi \times 0,02664 \times L \times (120 - 44,5) \quad (2.1)$$

$$L = 3,5 \text{ m}$$

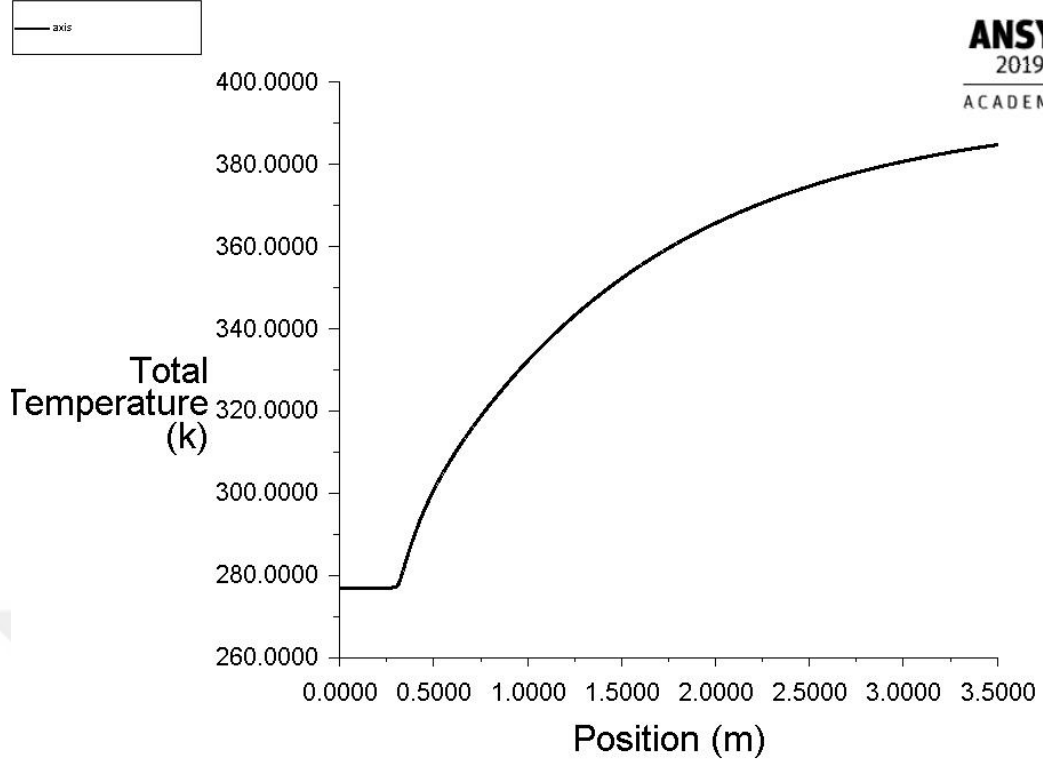
$$L/D = 3,5/0,02664 = 131 > 60$$

90°C için yapılan hesaplarda olduğu gibi geometri çizilerek mesh yapısı oluşturulur. Bu boru uzunluğunda oluşturulan mesh yapısı Şekil 3.18'de gösterilmiş olup, yapıdaki eleman sayısı 210000'dir.



**Şekil 3.18.** Model 2 mesh yapısı

Analiz sonucunda 3,5'inci metredeki ortalama çıkış sıcaklığı 386,9°K, yani yaklaşık olarak 114°C olarak hesaplanmıştır. Boru içerisindeki akışkanın konuma bağlı sıcaklık grafiği Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

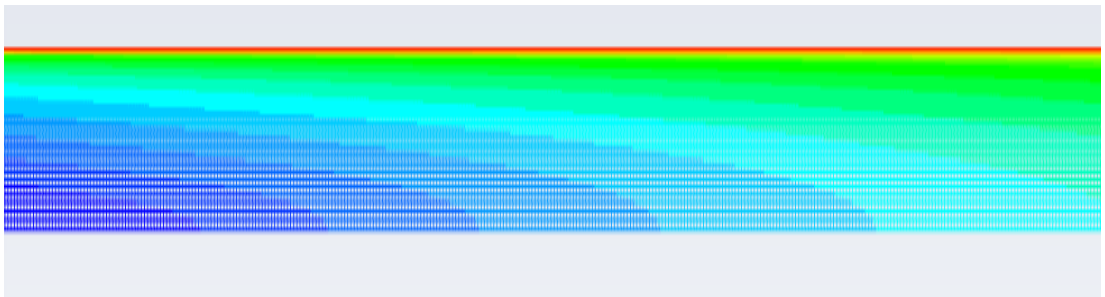


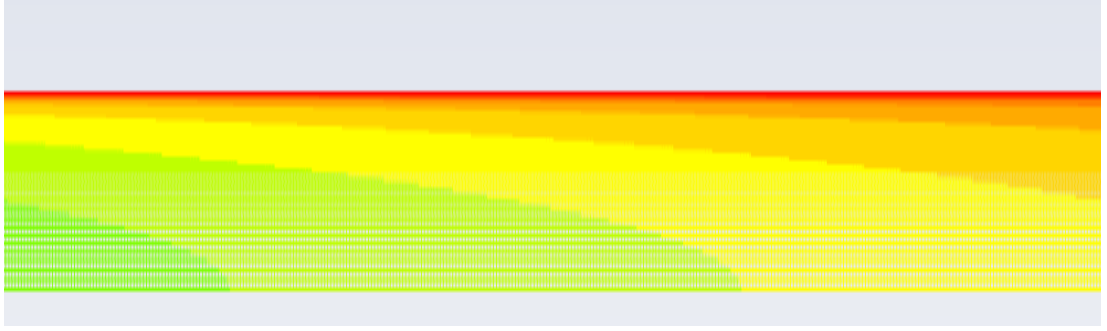
Şekil 3.19. Model 2 ortalama akışkan sıcaklığı grafiği

Tablo 3.4. Model 2 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	1,02
65	1,13
70	1,25
75	1,38
80	1,52
85	1,69

Tablo 3.4'te görüleceği üzere 120°C yüzey sıcaklığına ulaşılan boru boyu yaklaşık olarak 1.69 m'dir.

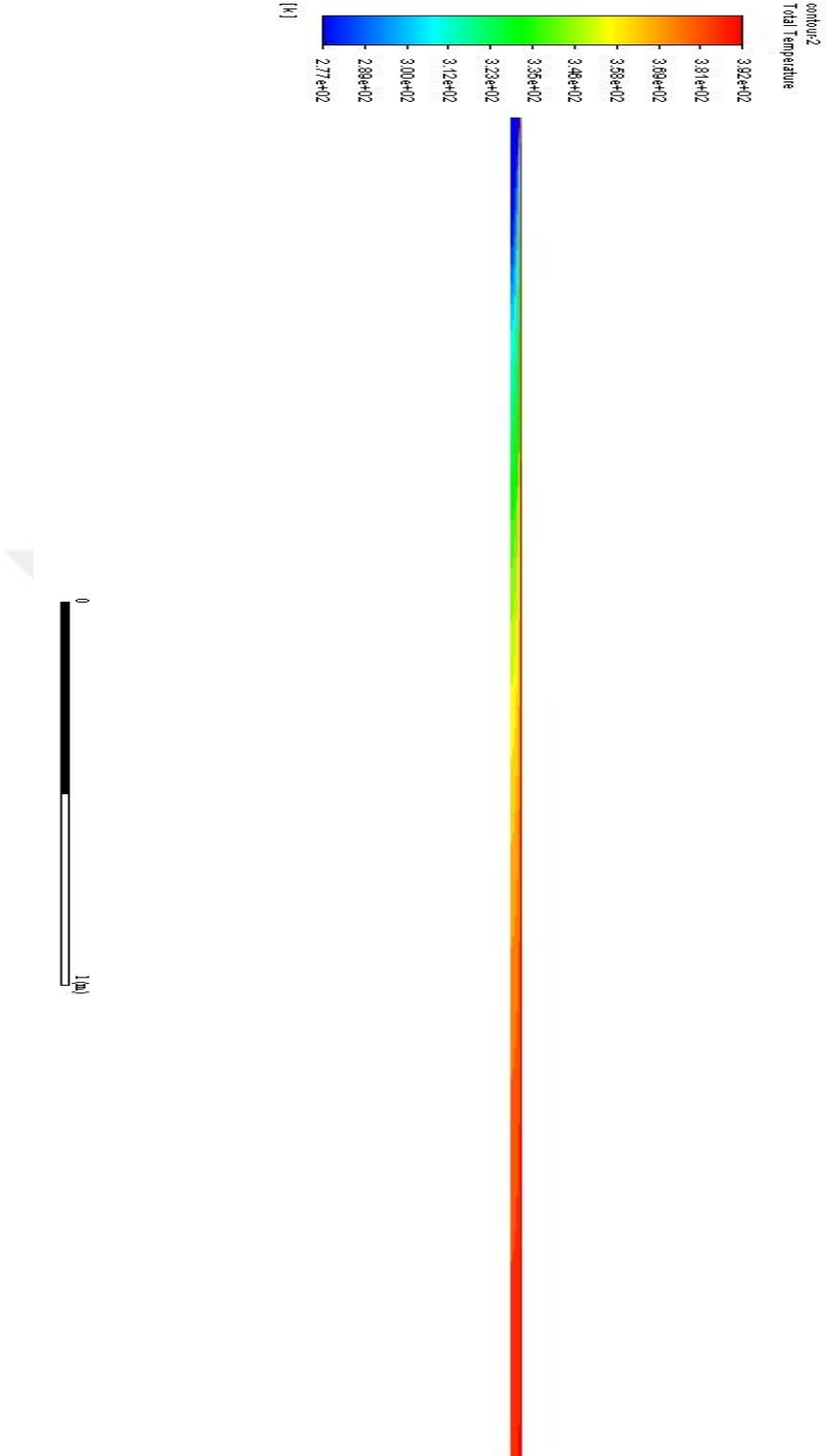




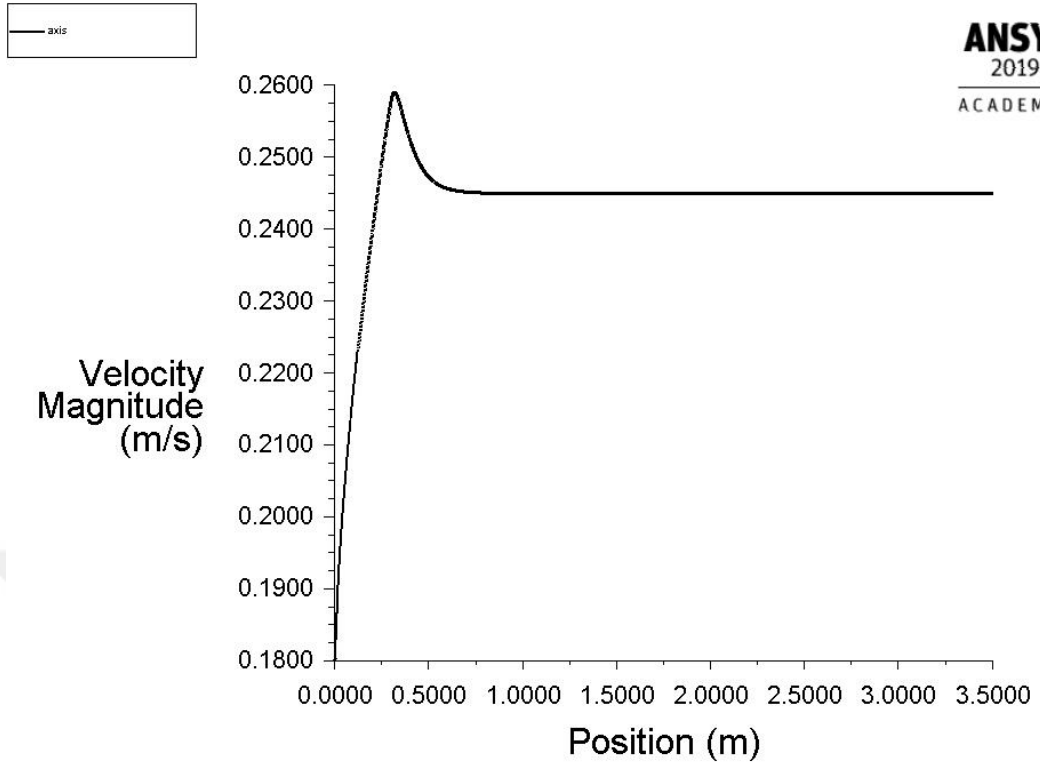
**Şekil 3.20.** Sıcaklık dağılım detayı

Şekil 3.20’de görüleceği gibi duvara yakın kısımlarda ısı transfer oranı merkeze yakın olan kısımlardan daha fazla olduğu görülmektedir. Boru içerisindeki akış devam ettikçe ısı merkeze doğru taşınmaya başlamaktadır.



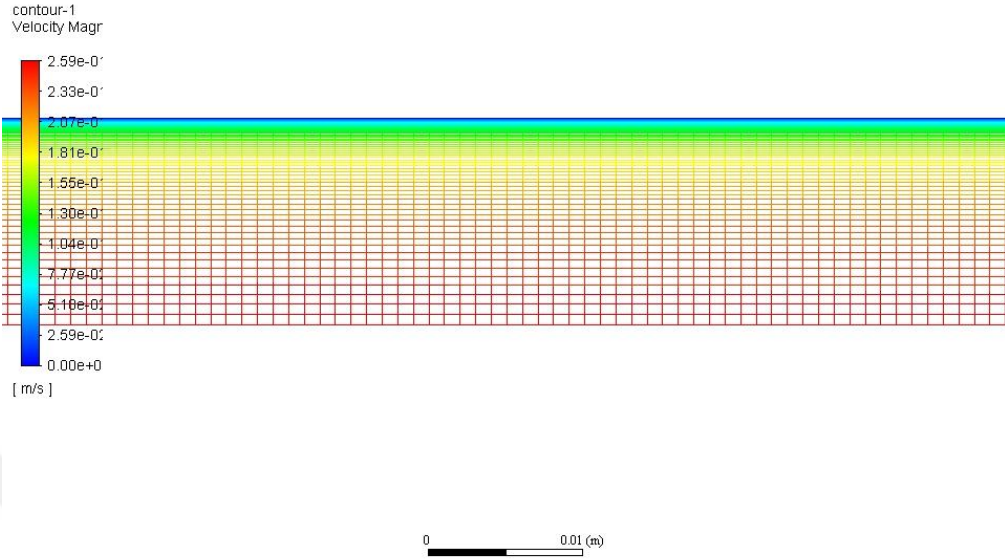


Şekil 3.21. Akışkan sıcaklık dağılımı



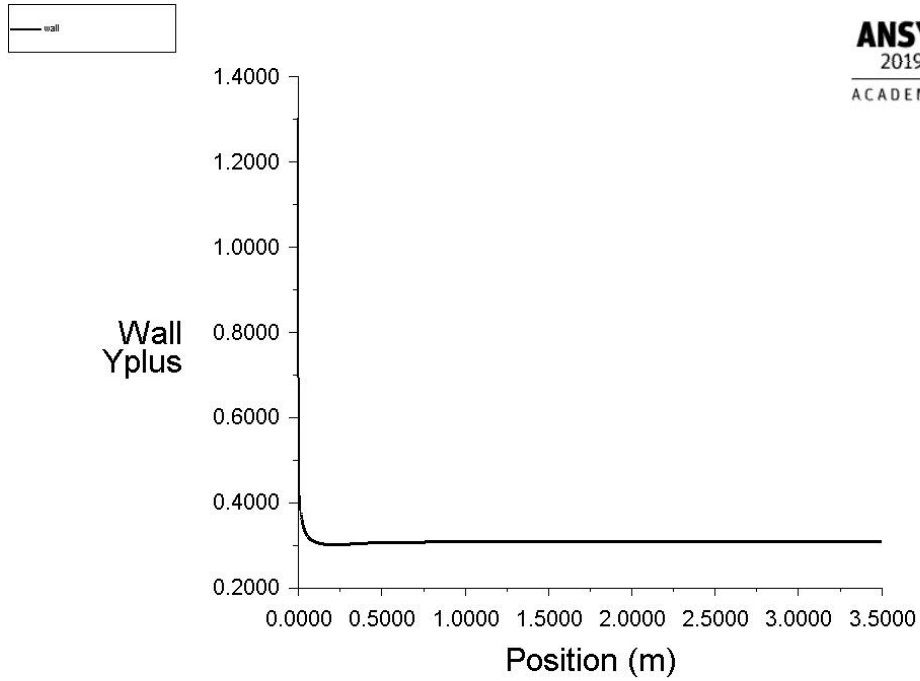
**Şekil 3.22.** Model 2 hız grafiği

Şekil 3.22’de ortalama 0.18 m/s hız ile boru içerisine giren akışkanın, 0.8 m civarında hız profil karakteristiğinin ortaya çıktığı ve sonrasında boru içerisindeki yaklaşık ortalama hızı 0.243 m/s civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 3.23. Akış hızı dağılım detayı

Son olarak da wall y+ değeri sonuçlardan incelenmiştir. Şekil 3.24'teki grafikte de gösterildiği gibi bu değer yaklaşık 0,3'tür.



Şekil 3.24. Y+ değeri

### 3.3.3. Model 3: Düz Boru - 150°C

Akış hızı, ortalama sıcaklık, Reynolds sayısı gibi değerler 90°C ve 120°C yüzey sıcakları için yapılan hesaplama ile aynıdır. Duvar sıcaklığındaki viskozite değeri farklı olacağından ısı aktarım katsayısı denklem 2.3 kullanılarak 150°C için hesaplanır:

$$N_{Nu} = \frac{h \times D}{k} = 0,027 \times N_{Re}^{0,8} \times N_{Pr}^{1/3} \times \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$\frac{h \times 0,02664}{0,637} = 0,027 \times 7966^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,183 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$h = 1585,4 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

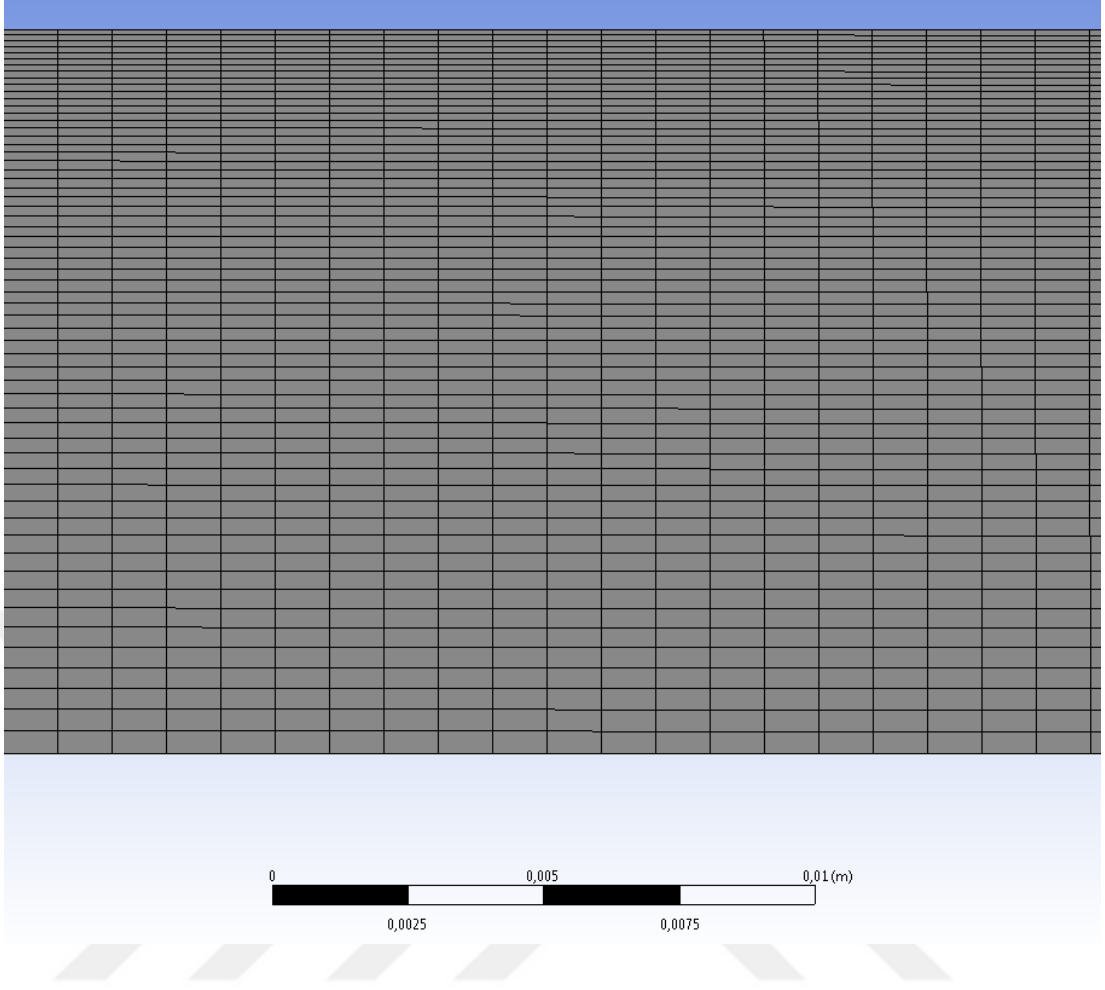
$$q = h \times A \times (T_w - T_{ort}) \quad (2.1)$$

$$33858 = 1585,4 \times \pi \times 0,02664 \times L \times (150 - 44,5) \quad (2.1)$$

$$L = 2,4 \text{ m}$$

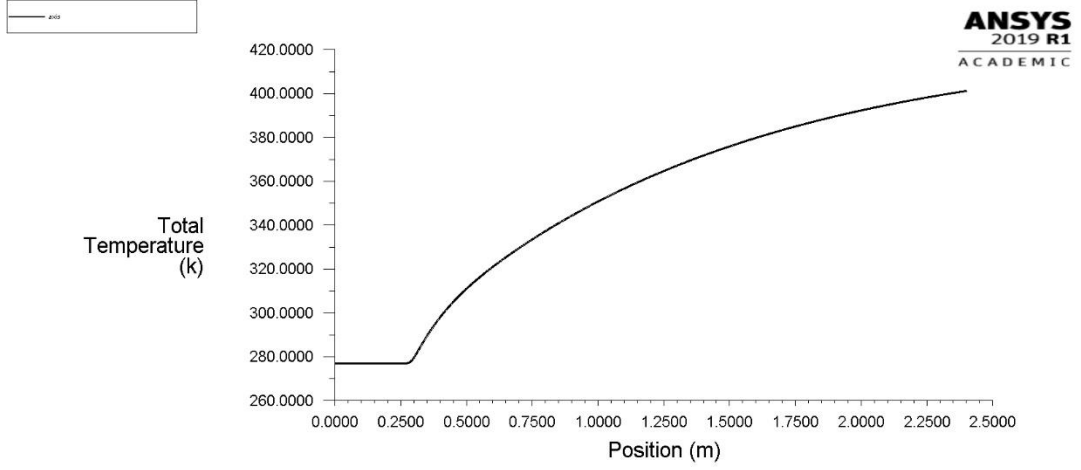
$$L/D = 2,4/0,02664 = 90 > 60$$

Bulunan boru boyu ve yarıçap değeri ile ANSYS'te geometri oluşturulur ve diğer düz boru hesaplamalarında olduğu gibi mesh yapısı oluşturulur ve düzenlenir. Ortaya çıkan mesh detayı Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Bu mesh yapısında bulunan eleman sayısı 144000'dir.



**Şekil 3.25.** Model 3 mesh detayı

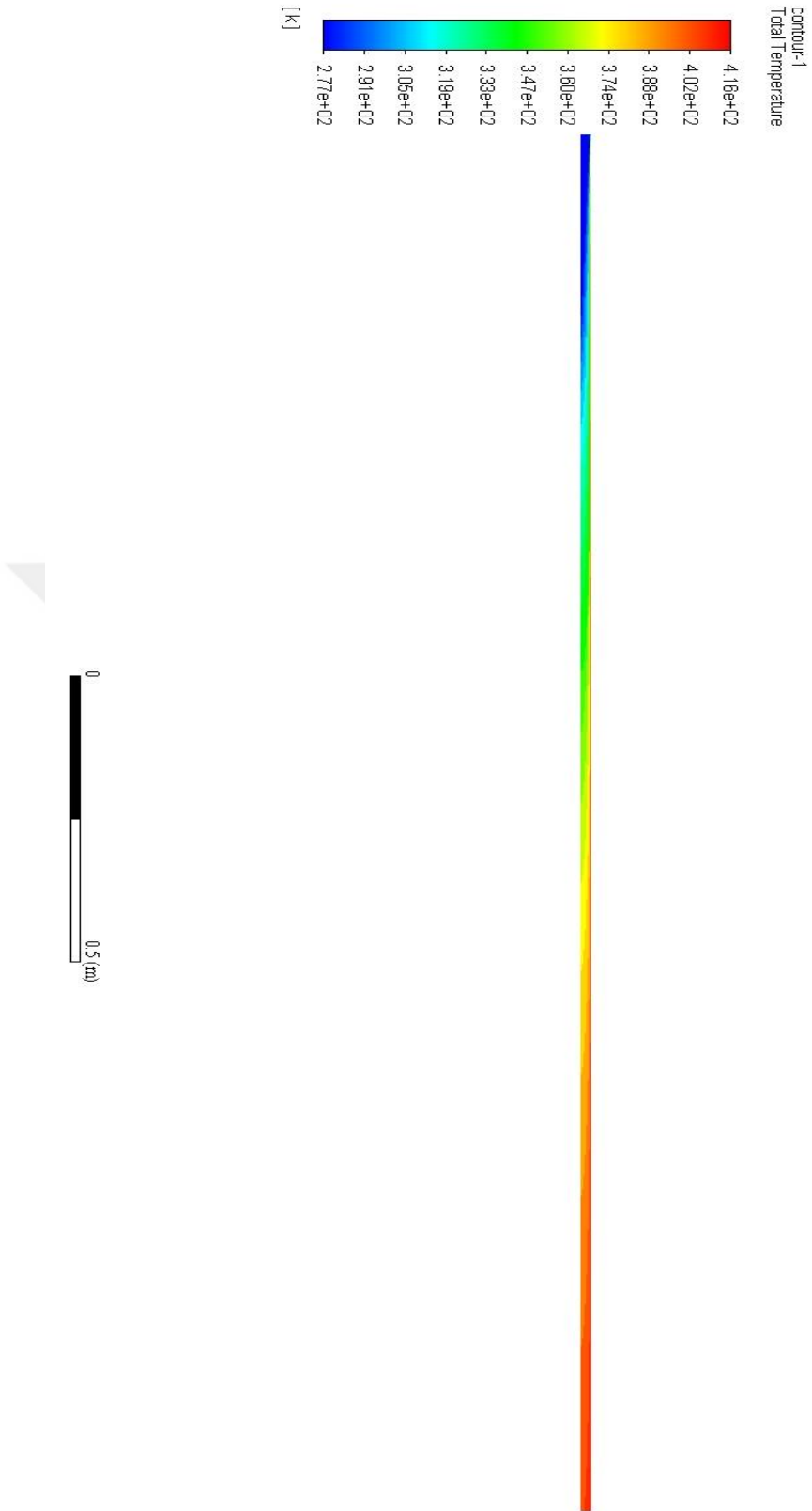
Analiz sonucunda 2,4'üncü metredeki ortalama çıkış sıcaklığı  $404,8^{\circ}\text{K}$ , yani yaklaşık olarak  $132^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır. Boru içerisindeki akışkanın konuma bağlı sıcaklık grafiği Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Ayrıca hangi konumda  $85^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa ulaştığını anlamak için de grafik değerleri tabloya dökülmüş, Tablo 3.5'te gösterilmiştir. Buna göre akışkan yaklaşık olarak 1.12 m'de  $85^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa ulaşmaktadır.



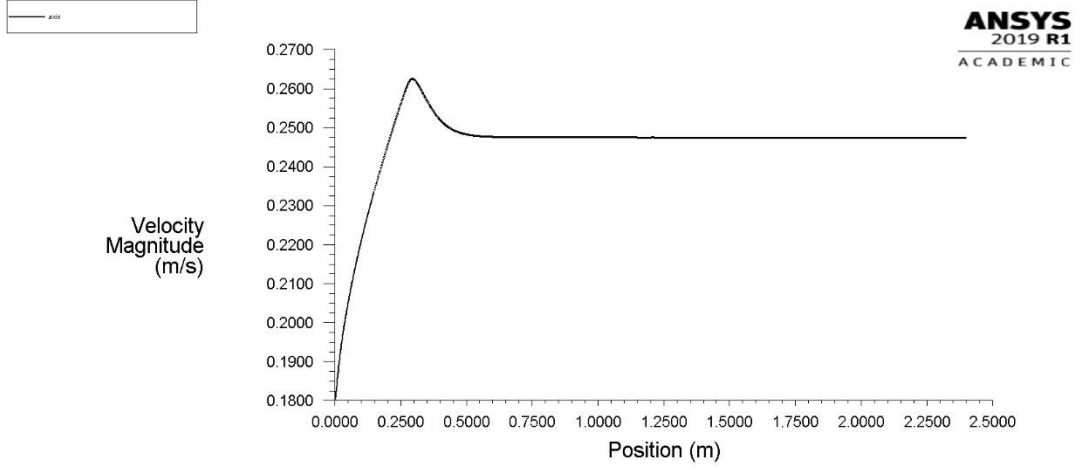
**Şekil 3.26.** Model 3 akışkan sıcaklık grafiği

**Tablo 3.5.** Model 3 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	0,74
65	0,81
70	0,88
75	0,96
80	1,04
85	1,12

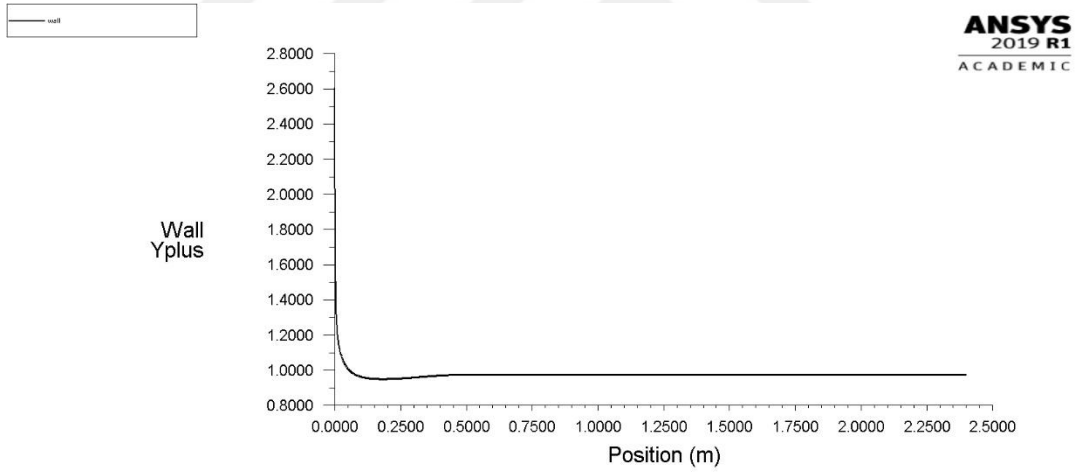


Şekil 3.27. Akışkan sıcaklık dağılımı



**Şekil 3.28.** Ortalama akış hızı grafiği

Şekil 3.28’de ortalama akış hızı grafiği gösterilmiştir. Akış hızı karakteri yaklaşık olarak 0,5 m’de ortaya çıkmaktadır ve sonrasında ortalama hız 0,247 m/s olarak devam etmektedir.



**Şekil 3.29.** Y+ değeri

Son olarak devar Y+ değeri incelendiğinde, Şekil 3.29’da da görülebileceği gibi yaklaşık olarak 0,97 civarındadır. Bu da 1’in altında olup arzu edilen seviyededir.

### 3.3.4. Model 4: Yüzey Akış Kırıcılı - 90°C

Bu kısımda, iç yüzeyinde akış profilini bozarak daha da türbülanslı hale getirerek ısı transferi miktarını artıracak küçük kanatlar bulunan bir tasarım için



hesaplamalar yapılacaktır. Reynolds sayısı hesaplamak için çap değeri için en dar kesit alanında bulunan çap değeri baz alınacaktır. Yüzeyle 5'er mm ölçüsünde girintiler olduğu varsayılarak hesaplamalar buna göre yapılacaktır.

Ek A.3'ten çizelge 40, 1 inç boru değerleri kullanılarak giriş hızı denklem 2.4'ten hesaplanır, burada kullanılan çap değeri minimum çap değeri olarak alınacaktır. Türbülansın maksimum olduğu ve akış karakteristiğini değiştirdiği minimum çap bölgeleri olacaktır:

$$D = 26,64 - 10 \text{ mm} = 16,64 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$Q = A \times v \quad (2.4)$$

$$0,1 \times 10^{-3} = \pi \times \frac{(16,64 \times 10^{-3})^2}{4} \times v \quad (2.4)$$

$$v = 0,46 \text{ m/s}$$

Denklem 2.2 kullanılarak minimum çap bölgesi için Reynolds sayısı hesaplanır ve akış türü belirlenir:

$$N_{Re} = \frac{D \times v \times \rho}{\mu} = \frac{0,01664 \times 0,46 \times 990,1}{0,596 \times 10^{-3}} = 12716 \quad (2.2)$$

Tam türbülent akışlar için eşitlik 2.3'ten h değeri hesaplanır:

$$\frac{h \times 0,01664}{0,637} = 0,027 \times 12716^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,315 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

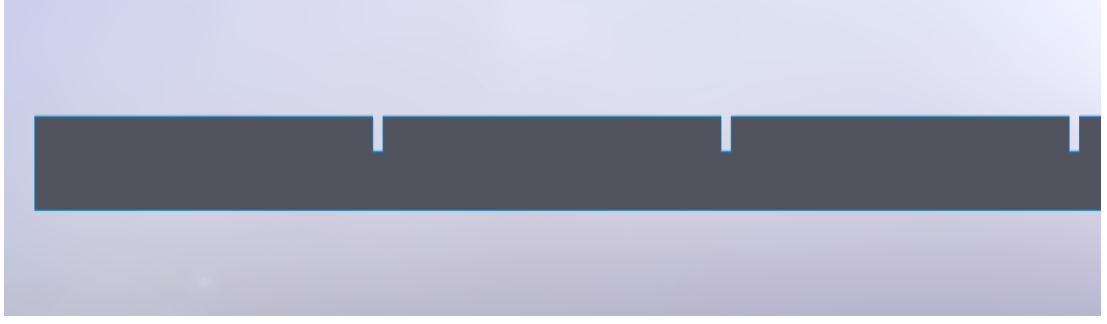
$$h = 3420 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

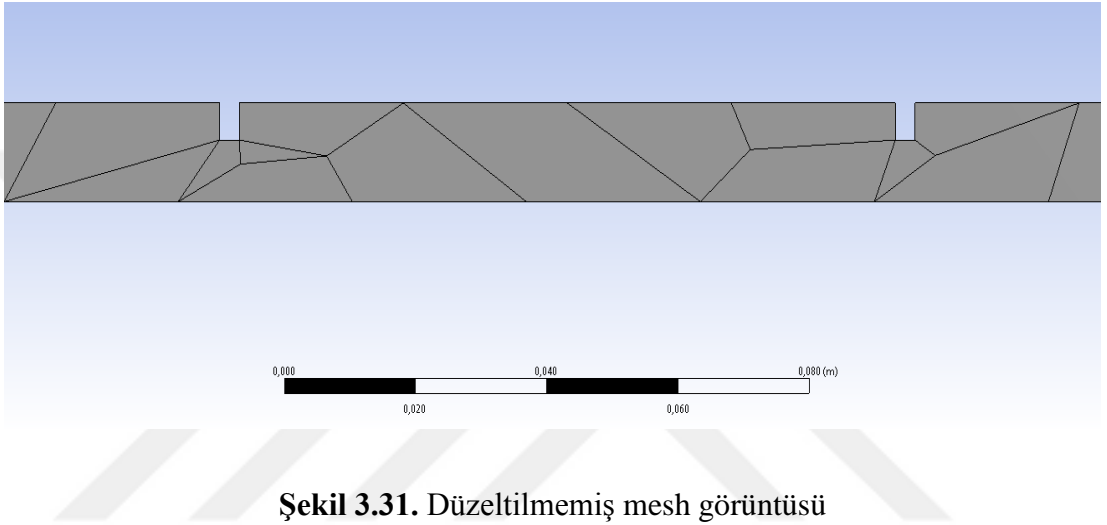
$$33858 = 3420 \times \pi \times 0,02664 \times L \times (90 - 44,5) \quad (2.1)$$

$$L = 2,6 \text{ m}$$

$$L/D = 2,6/0,02664 = 98 > 60$$

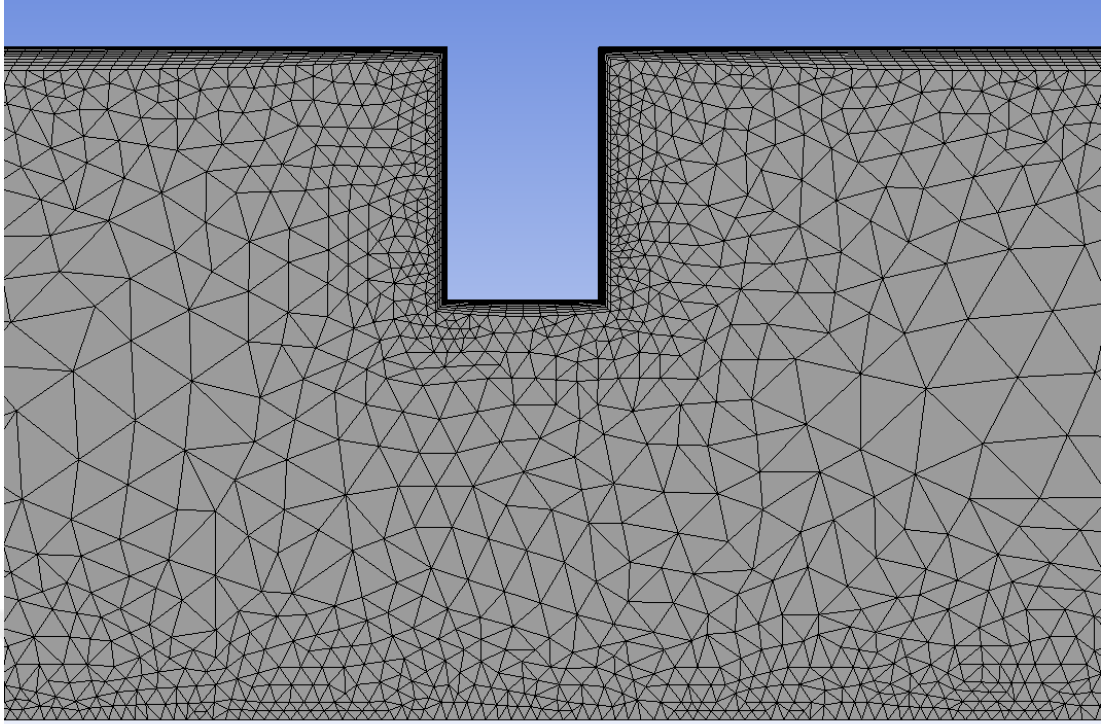


**Şekil 3.30.** Axissymmetric hesaplanacak kesit görüntüsü



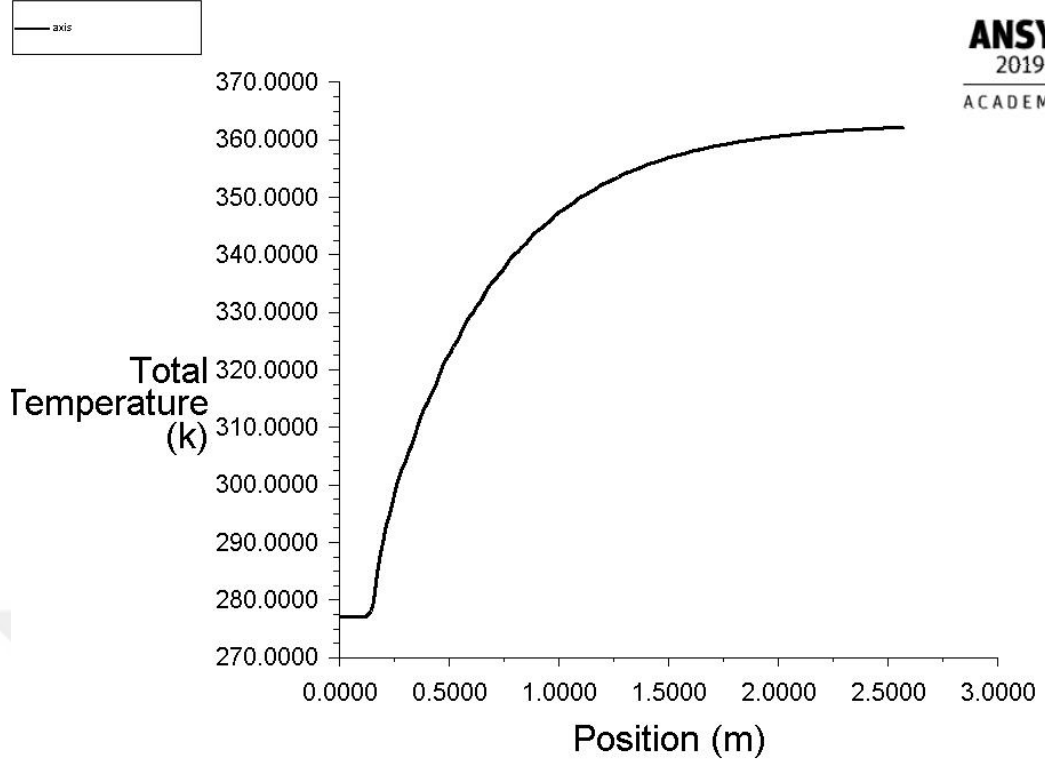
**Şekil 3.31.** Düzeltilmemiş mesh görüntüsü

Şekil 3.31’de görüldüğü gibi mesh işlemi direkt hiçbir ayarlama yapmadan yapıldığında kalitesiz bir mesh yapısı ortaya çıkmaktadır. Bu durumdayken mesh yapısındaki eleman sayısı 226’dır. Şekil 3.32’de gösterilen düzeltilmiş mesh yapısında ise ısı kaynağı duvara yakın bölgeler oldukça inceltilmiş olup, eleman sayısı 283000’dir.



**Şekil 3.32.** Düzeltilmiş mesh yapısı

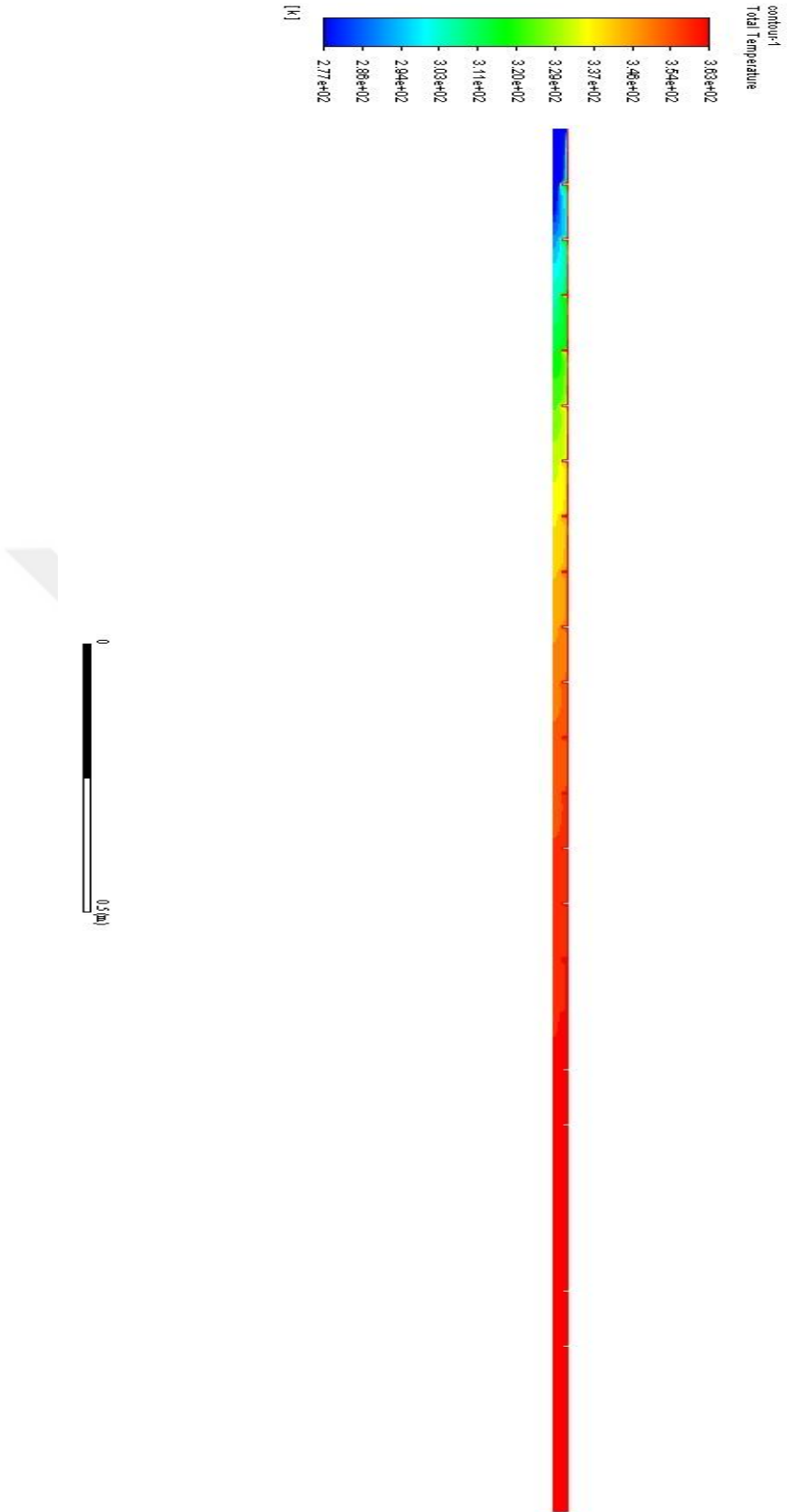
Analiz sonucunda borunun çıkışındaki sıcaklık değeri yaklaşık  $89^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.33'te sıcaklık grafiği ve Şekil 3.34'de sıcaklık dağılımı verilmiştir. Burada önemli olan bir diğer nokta da yüzeyde bulunan akış kırıcı kanatların etrafındaki ısı transfer profilinin gözlenmesidir. Bu da Şekil 3.35'te gösterilmiştir. Akış kırıcı kanatlar türbülansı artırarak ısı transferini artırıcı bir rol oynamıştır. Tablo 3.6'da ise akışkanın  $85^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa ulaştığı konum değeri gösterilmiştir. Buna göre boru içerisindeki akışkan yaklaşık olarak 1.61'nci metrede  $85^{\circ}\text{C}$  sıcaklık düzeyine ulaşmaktadır.



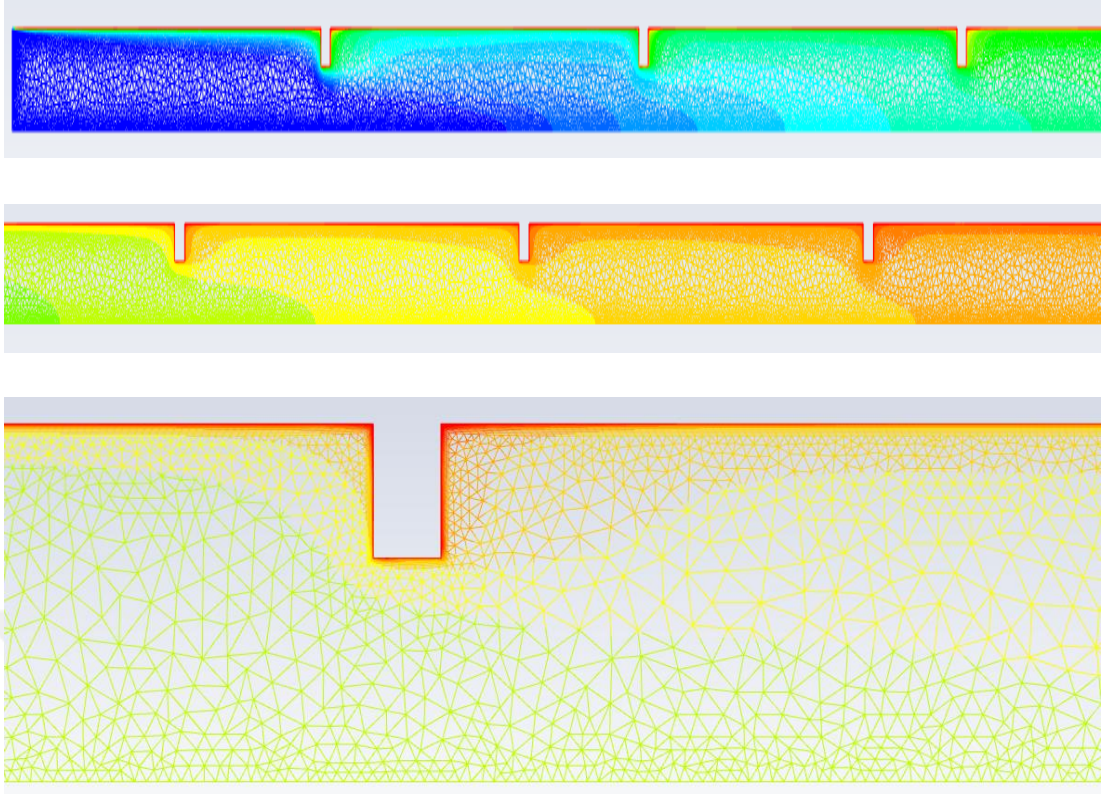
**Şekil 3.33.** Akışkanın konuma bağlı sıcaklık grafiği

**Tablo 3.6.** Model 4 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	0,66
65	0,76
70	0,87
75	1,03
80	1,24
85	1,61



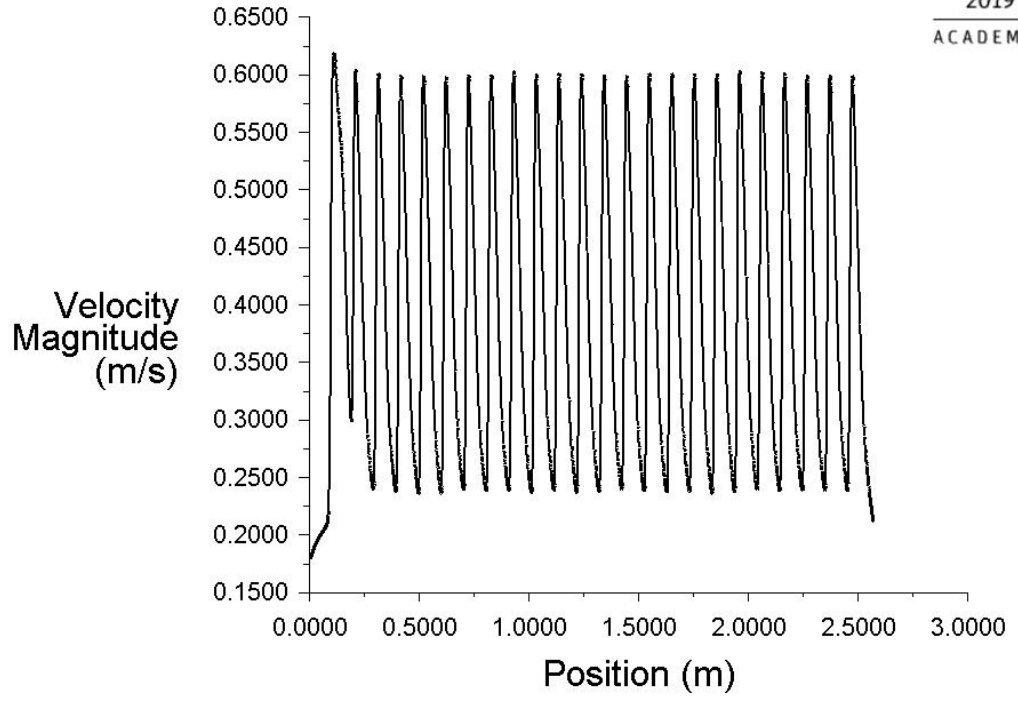
Şekil 3.34. Akışkan sıcaklık dağılımı



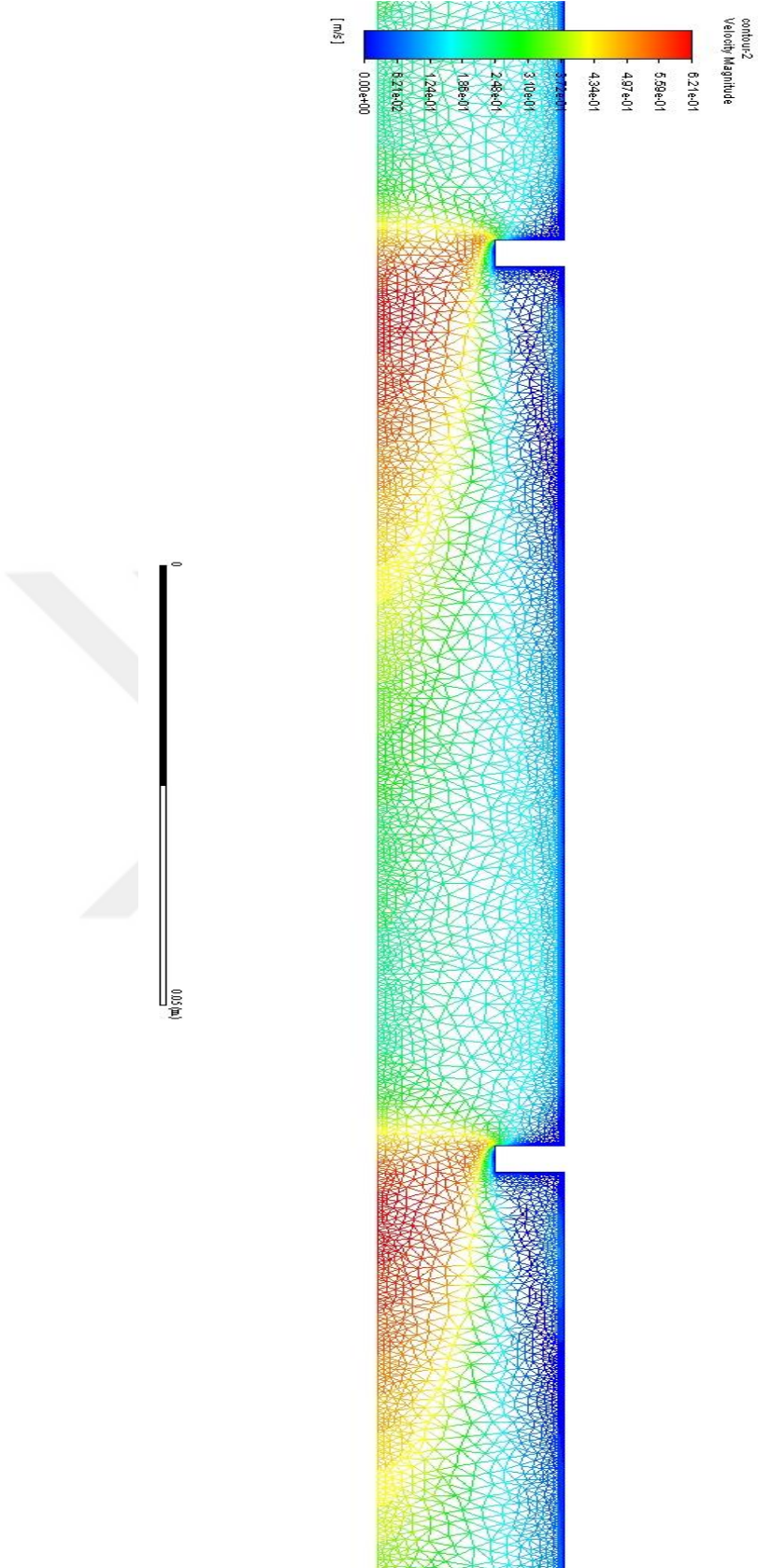
**Şekil 3.35.** Yüzeydeki kanat girintilerinin sıcaklık dağılımına etkisi

Şekil 3.36’da paylaşılan hız grafiği incelendiğinde, akışın her kanat daralma alanından geçtiğinde hızlandığı görülebilir. Şekil 3.37’de bu detay daha net görülebilmektedir. Boru içerisindeki ortalama hız yaklaşık 0,38 m/s olmaktadır.

axis



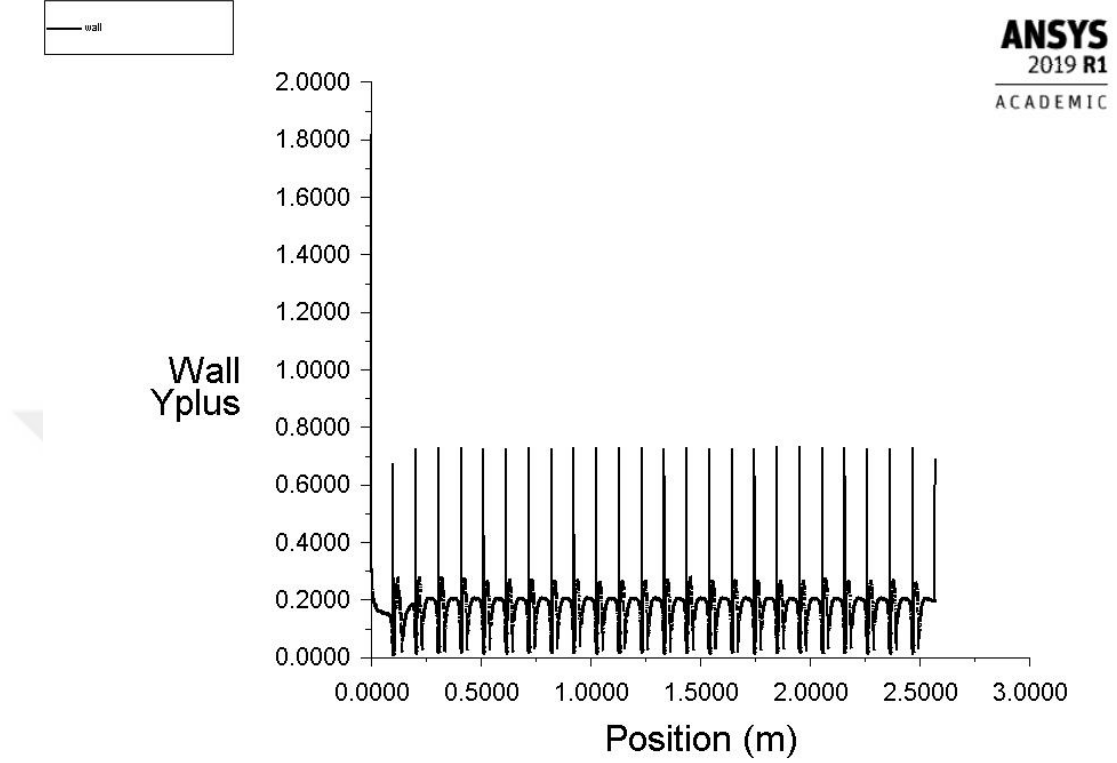
Şekil 3.36. Ortalama hız grafiği



Şekil 3.37. Yüzeydeki kanatların akış hızına etkisi



Son olarak da  $y^+$  değeri kontrol edildiğinde ortalama 0,17 civarında olduğu görülmektedir. Şekil 3.38’de bu değerın akış boyunca değışim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.38.  $Y^+$  değeri

### 3.3.5. Model 5: Yüzey Akış Kırıcılı - 120°C

Reynolds sayısı ve diğer parametreler akış kırıcılı dizaynı 90°C sıcaklıktaki hesapla aynıdır. Değişen hesaplar altta yapılmıştır. Tam türbülent akışlar için eşitlik 2.3'ten  $h$  değeri 120°C yüzey sıcaklığına göre hesaplanır:

$$\frac{h \times 0,01664}{0,637} = 0,027 \times 12716^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,232 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

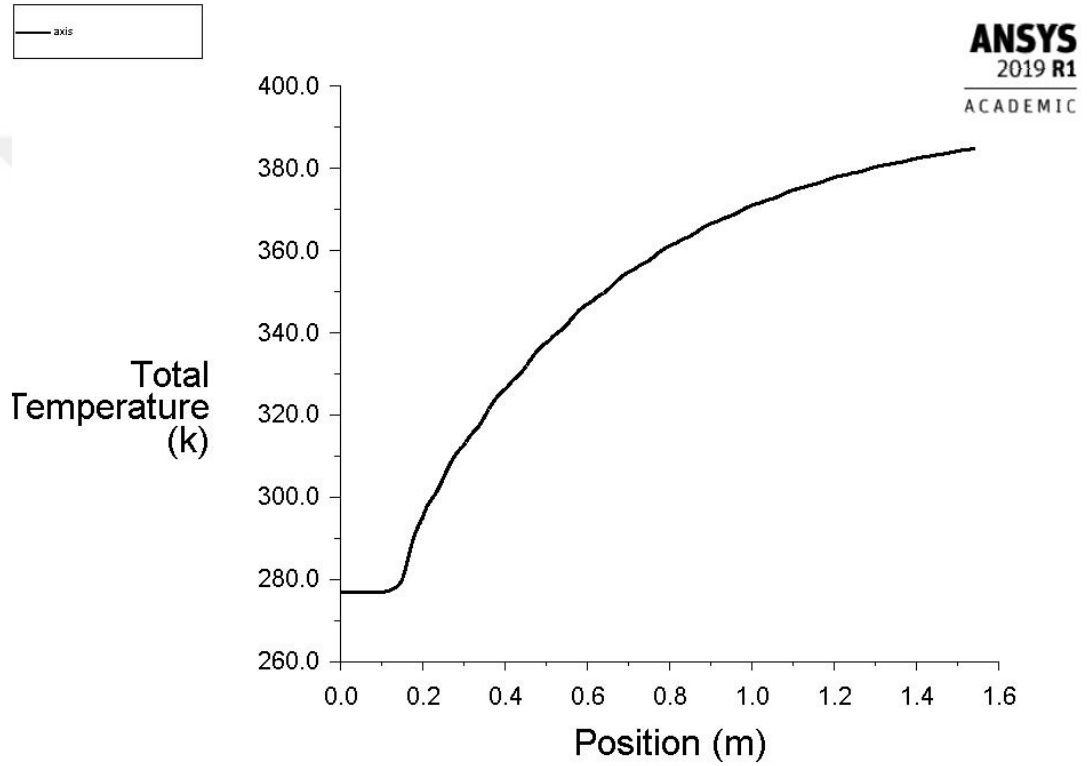
$$h = 3569 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

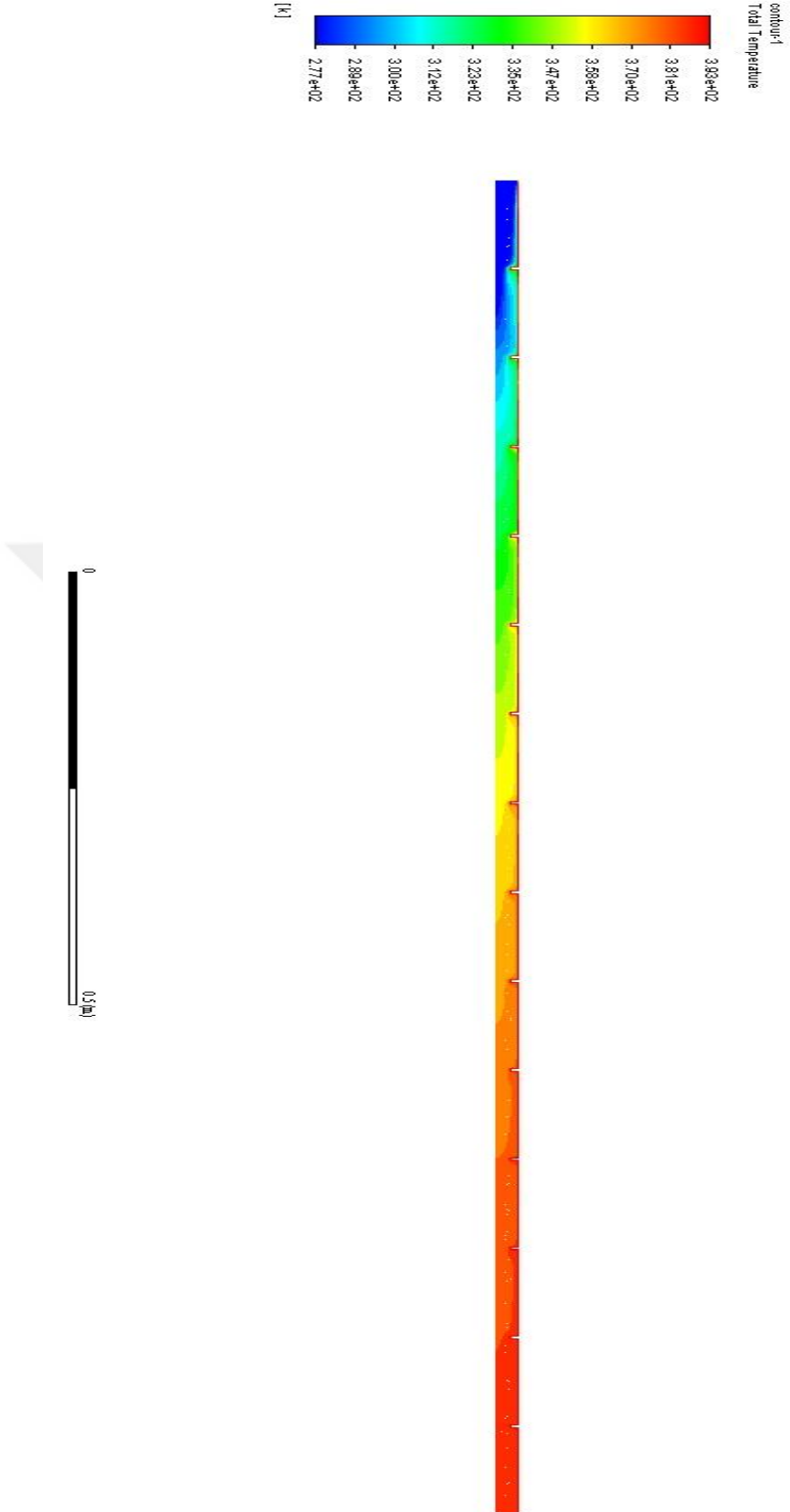
$$33858 = 3596 \times \pi \times 0,02664 \times L \times (120 - 44,5) \quad (2.1)$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

Normalde L/D değerinin 60'tan küçük olduğu durumlarda eşitlik 2.3'n sağ tarafi bir düzeltme katsayısı ile çarpılır. Ancak bu katsayının etkisi nispeten küçük olacağından ve analizler FLUENT üzerinde doğruluk katsayısı çok daha yüksek bir Şekilde yapıldığından bu düzeltme yapılmadan devam edilecektir. Şekil 3.32'dekine çok benzer bir mesh yapısı elde edildiğinden tekrar gösterilmemiştir. Eleman sayısı ise 152000 civarındadır. Analiz sonucunda çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 113°C olmaktadır. Aşağıda paylaşılan grafiklerde sıcaklık ve hız değerleri ve boru içerisindeki dağılımları gösterilmiştir. Akışın ortalama hızı 0,38 m/s olmaktadır.



**Şekil 3.39.** Akışkan sıcaklığının konuma bağlı grafiği

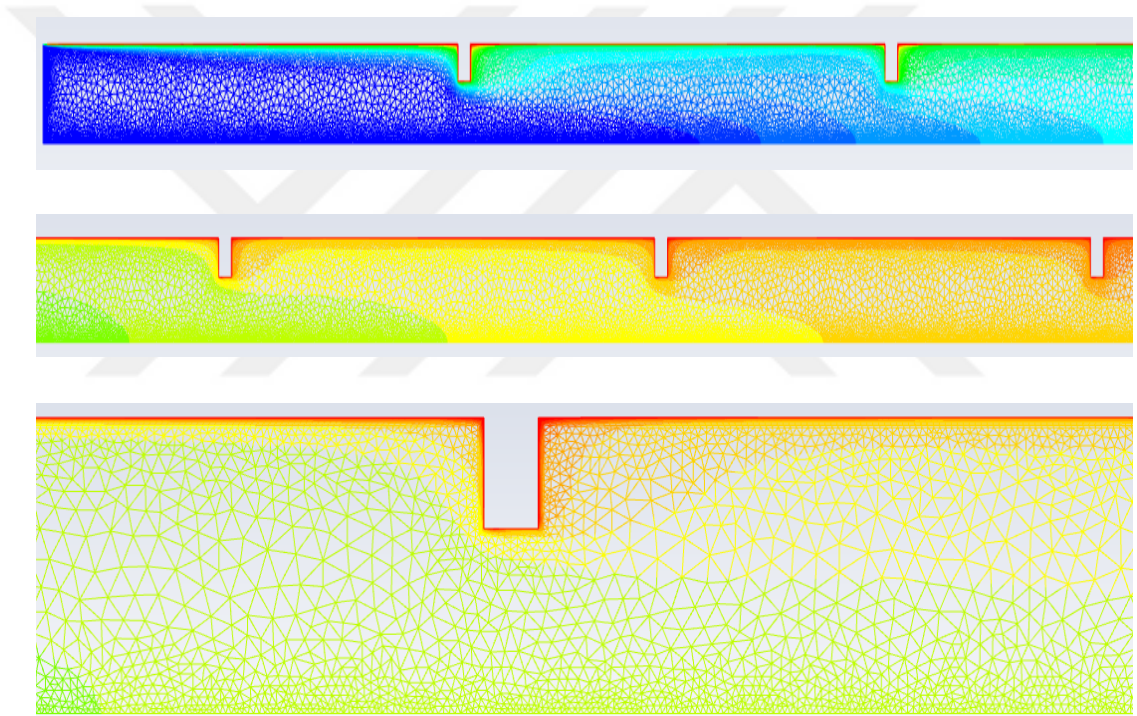


Şekil 3.40. Akışkan sıcaklık dağılımı

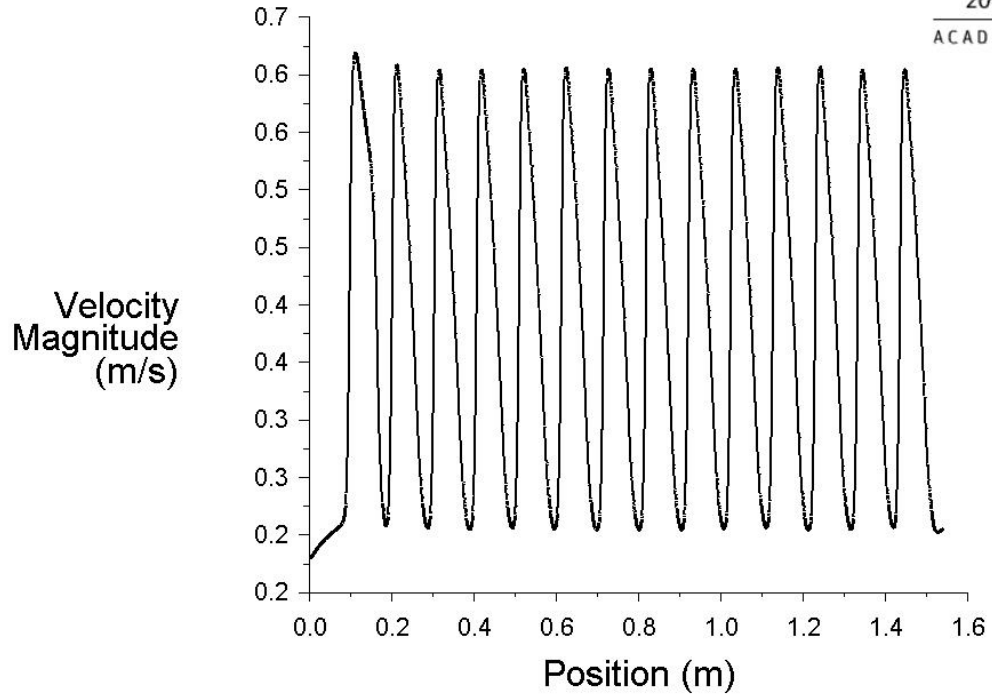
Bu değerlere göre akışkan maddenin hangi uzunlukta 85°C ortalama sıcaklığa ulaştığı kontrol edildiğinde, yaklaşık olarak 0,76 m olduğu görülmüştür. Tablo 3.7’de bu değerler gösterilmiştir.

**Tablo 3.7.** Model 5 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

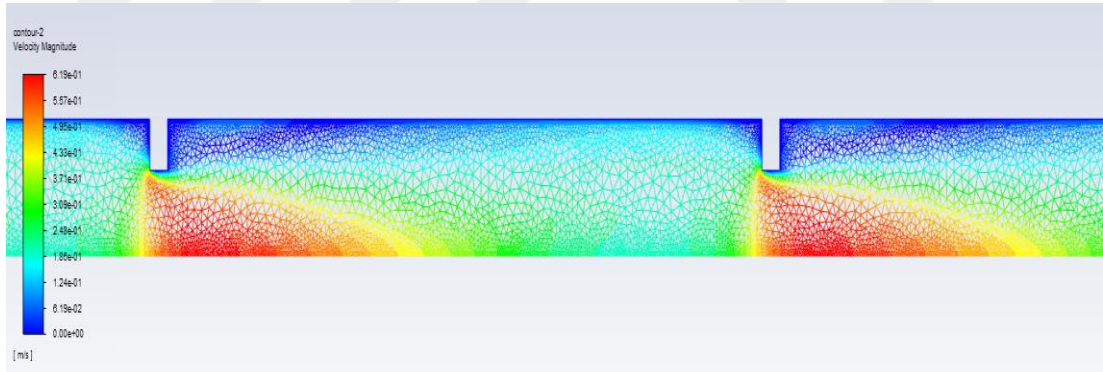
Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	0,46
65	0,51
70	0,56
75	0,62
80	0,68
85	0,76



**şekil 3.41.** Akışkan sıcaklık dağılım detayı

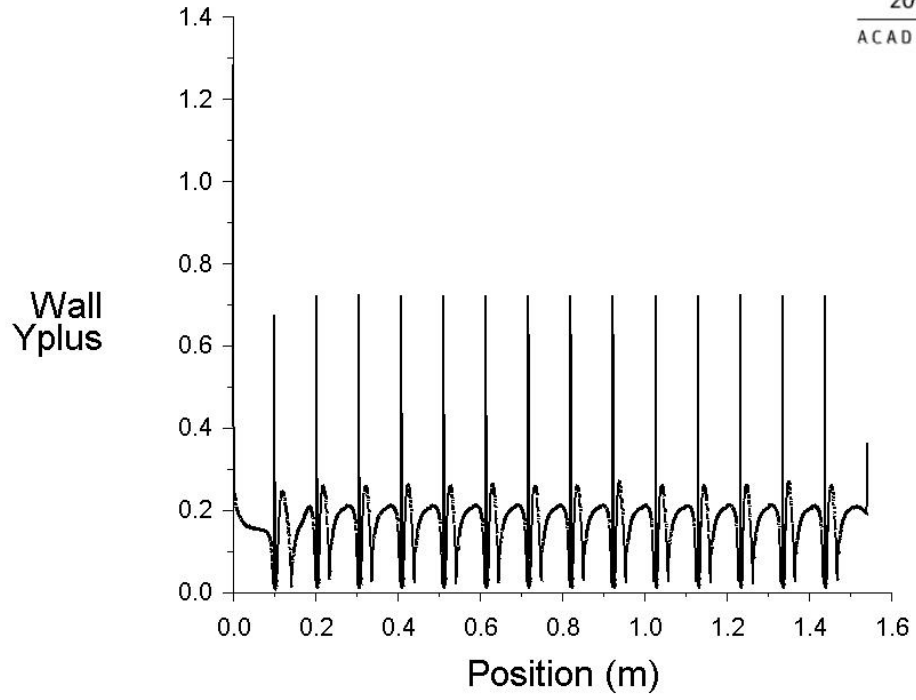


Şekil 3.42. Konuma bağlı hız grafiği



Şekil 3.43. Boru içerisinde akışkan hız detayı

Şekil 3.43'te görülebileceği gibi hız dağılımı  $90^{\circ}\text{C}$  duvarda olduğu gibidir. Çapın daraldığı kısımlarda hızlanan akışkan, çapın genişlediği kısımlarda tekrar yavaşlamaktadır. Türbülansa pozitif etki yapmaktadır. Son olarak da  $y^+$  değeri incelendiğinde ortalama değerin 0,167 olduğu görülmektedir. Buna bağlı grafik de Şekil 3.44'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.44. Y+ grafiği

### 3.3.6. Model 6: Yüzey Akış Kırıcılı - 150°C

Reynolds sayısı ve diğer parametreler akış kırıcı dizaynı 90°C ve 120°C sıcaklıktaki hesaplarla aynıdır. Değişen hesaplar altta yapılmıştır. Tam türbülent akışlar için eşitlik 2.3'ten h değeri 150°C yüzey sıcaklığına göre hesaplanır:

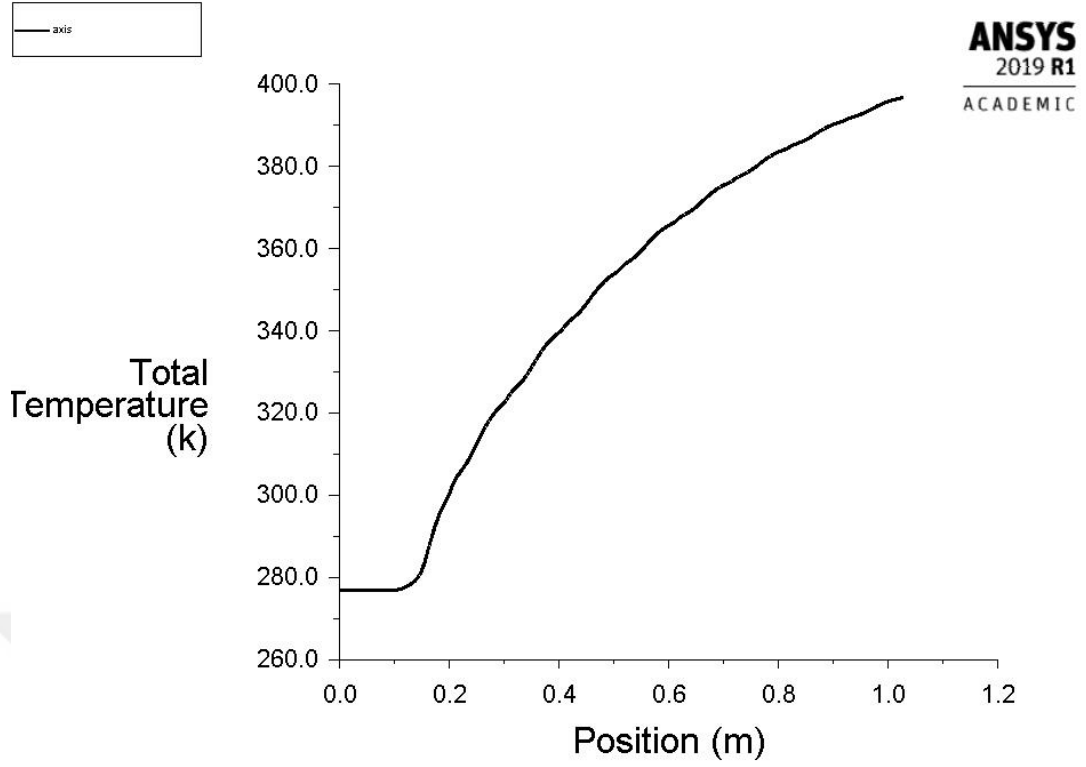
$$\frac{h \times 0,01664}{0,637} = 0,027 \times 12716^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,183 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$h = 3690 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

$$33858 = 3690 \times \pi \times 0,02664 \times L \times (150 - 44,5) \quad (2.1)$$

$$L = 1,04 \text{ m}$$

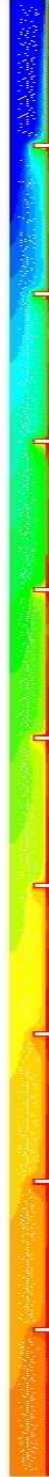
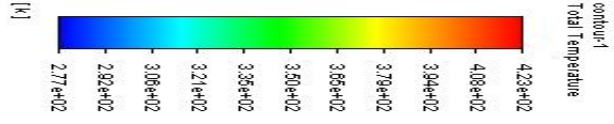


Şekil 3.45. Sıcaklık – konum grafiği

Tablo 3.8. Model 6 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	0,36
65	0,39
70	0,42
75	0,46
80	0,49
85	0,54

Tablo 3.8’de görülebileceği üzere 85°C sıcaklığa ulaşılan konum değeri yaklaşık olarak 0,54 m’dir. Akıştaki ortalama hız değeri ise 0,378 m/s’dir. Hız grafiği Şekil 3.47’de gösterilmiştir. Ortalama Y+ değeri 0,178’dir.



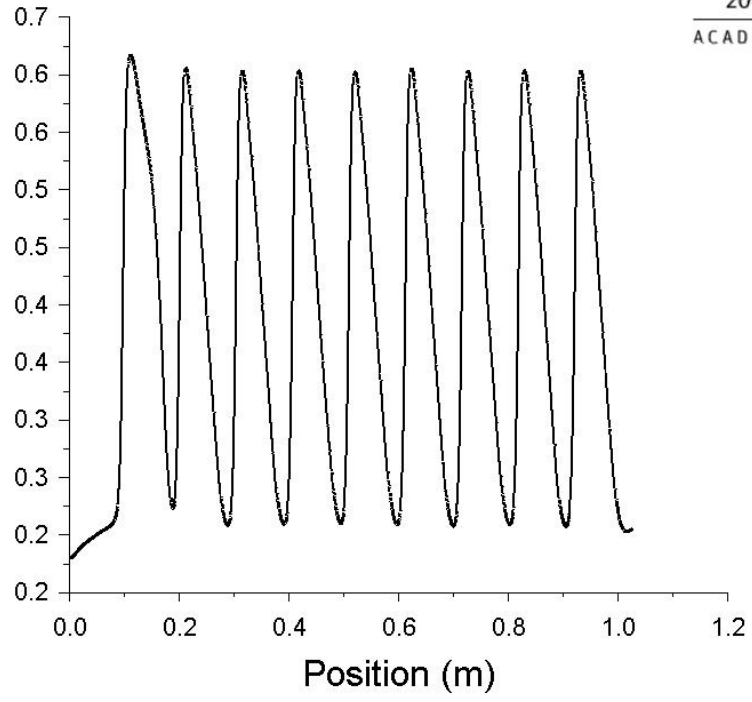
Şekil 3.46. Akışkan sıcaklık dağılımı



axis

ANSYS  
2019 R1  
ACADEMIC

Velocity  
Magnitude  
(m/s)

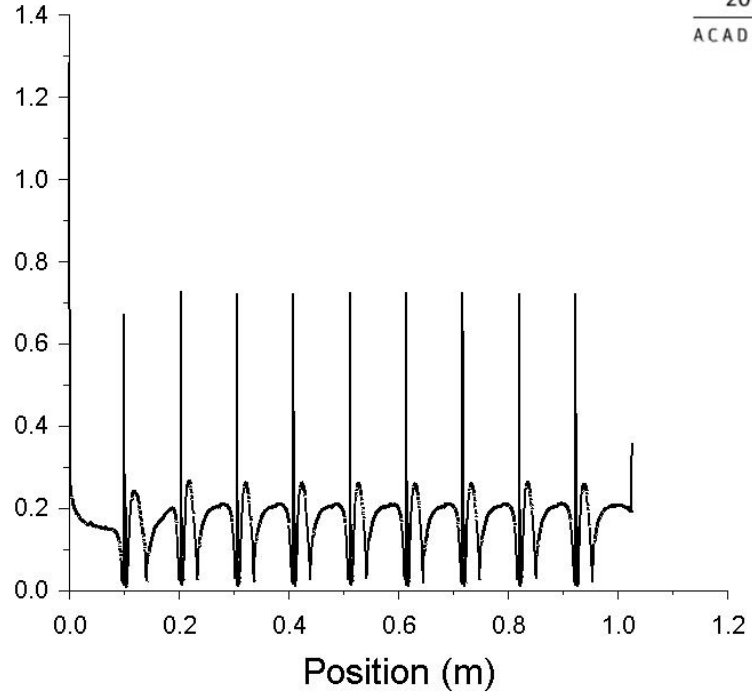


Şekil 3.47. Akışkan hızı grafiği

wall

ANSYS  
2019 R1  
ACADEMIC

Wall  
Yplus



Şekil 3.48. Y+ değeri

### 3.3.7. Model 7: Akış Kırıcılı Merkezi Mil - 90°C

Bu kısımda ısıtma işlemi merkezdeki bir mil tarafından yapılacaktır. Duvar yüzeyleri adyabatik kabul edilerek, ısı transferi olmadığı kabul edilecek ve analizler buna göre yapılacaktır. Mil üzerinde yine akış kırıcı kanatlar bulunacaktır. Mil çapı 8 mm kabul edilmiş olup, kanat çıkıntılarının yüksekliği de 4 mm kabul edilecek ve hesaplamalar buna göre yapılacaktır. Şekil 3.49'da tasarım detayı gösterilmiştir.

Ek A.3'ten çizelge 40, 1 inç boru değerleri kullanılarak giriş hızı denklem 2.4'ten hesaplanır, burada kullanılan çap değeri minimum çap değeri olarak alınacaktır. Türbülansın maksimum olduğu ve akış karakteristiğini değiştirdiği minimum çap bölgeleri olacaktır. Giriş hızı alttaki gibi hesaplanır:

$$D = 26,64 - 8 \text{ mm} = 18,64 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$Q = A \times v \quad (2.4)$$

$$0,1 \times 10^{-3} = \pi \times \frac{(18,64 \times 10^{-3})^2}{4} \times v \quad (2.4)$$

$$v = 0,37 \text{ m/s}$$

En dar kesitteki akış hızı ise alttaki gibi hesaplanır ve Reynolds sayısı hesaplanırken bu değer kullanılır:

$$D = 26,64 - 16 \text{ mm} = 10,64 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$Q = A \times v \quad (2.4)$$

$$0,1 \times 10^{-3} = \pi \times \frac{(10,64 \times 10^{-3})^2}{4} \times v \quad (2.4)$$

$$v = 1,12 \text{ m/s}$$

Denklem 2.2 kullanılarak minimum çap bölgesi için Reynolds sayısı hesaplanır ve akış türü belirlenir:

$$N_{Re} = \frac{D \times v \times \rho}{\mu} = \frac{0,01064 \times 1,12 \times 990,1}{0,596 \times 10^{-3}} = 19797 \quad (2.2)$$

Tam türbülent akışlar için eşitlik 2.3'ten h değeri hesaplanır:

$$\frac{h \times 0,01064}{0,637} = 0,027 \times 19797^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,315 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

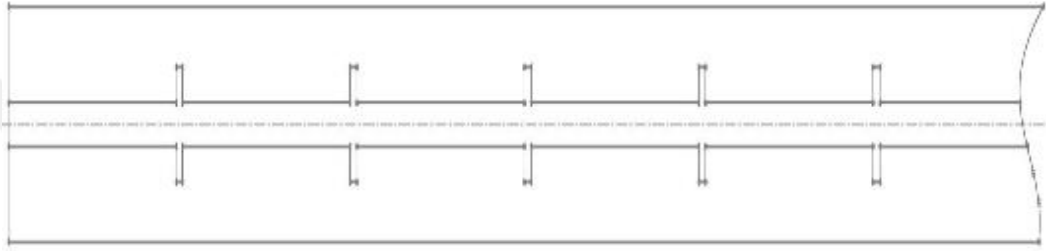
$$h = 7621 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

$$33858 = 7621 \times \pi \times 0,008 \times L \times (90 - 44,5) \quad (2.1)$$

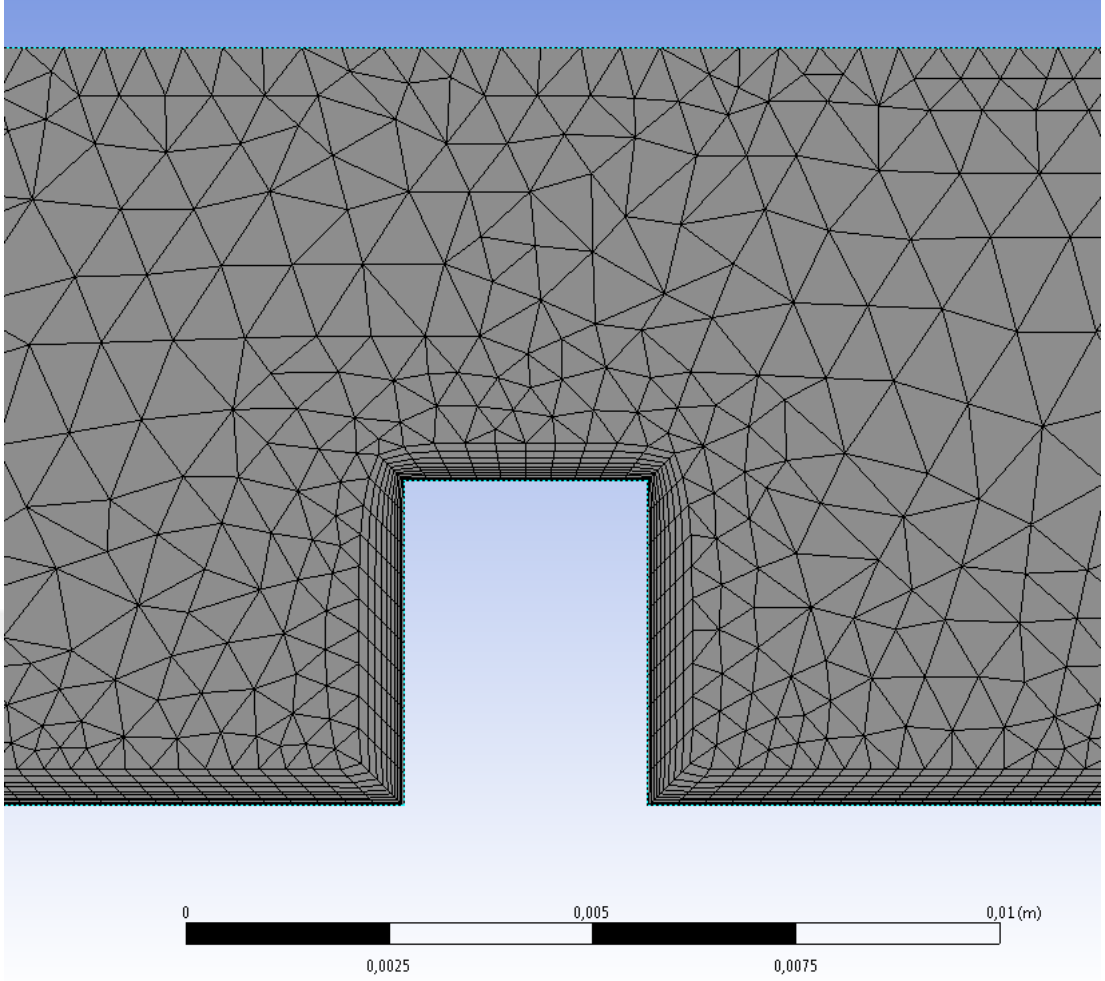
$$L = 3,9 \text{ m}$$

$$L/D = 3,9/0,01864 = 209 > 60$$



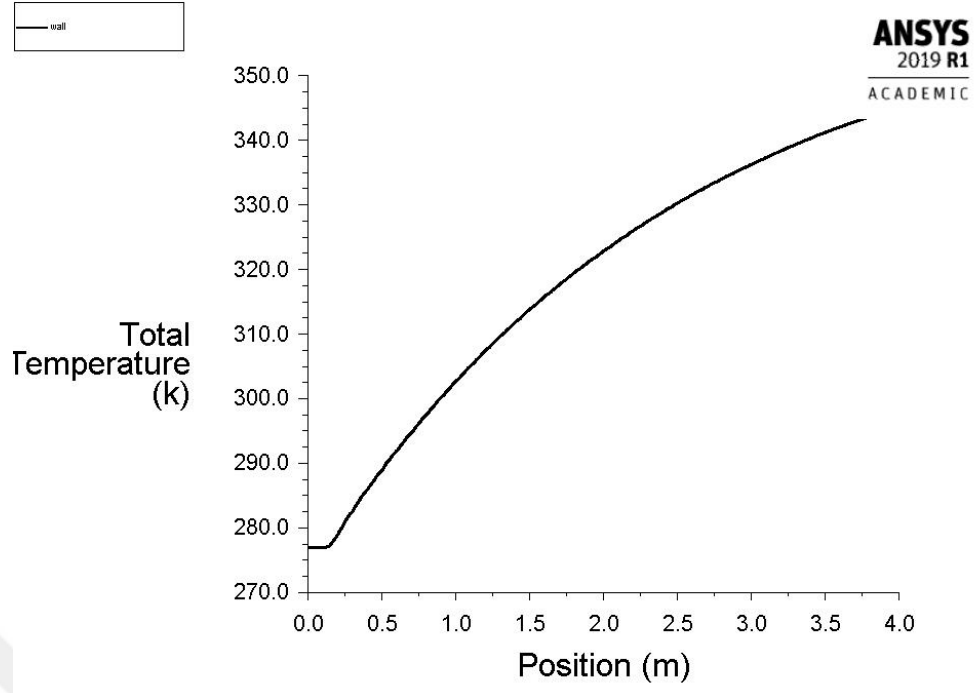
**Şekil 3.49.** Axissymmetric hesaplanacak kesit örneği

Şekil 3.50'de görüldüğü gibi mesh yapısı yaklaşık 279000 elemanla oluşturulmuştur.

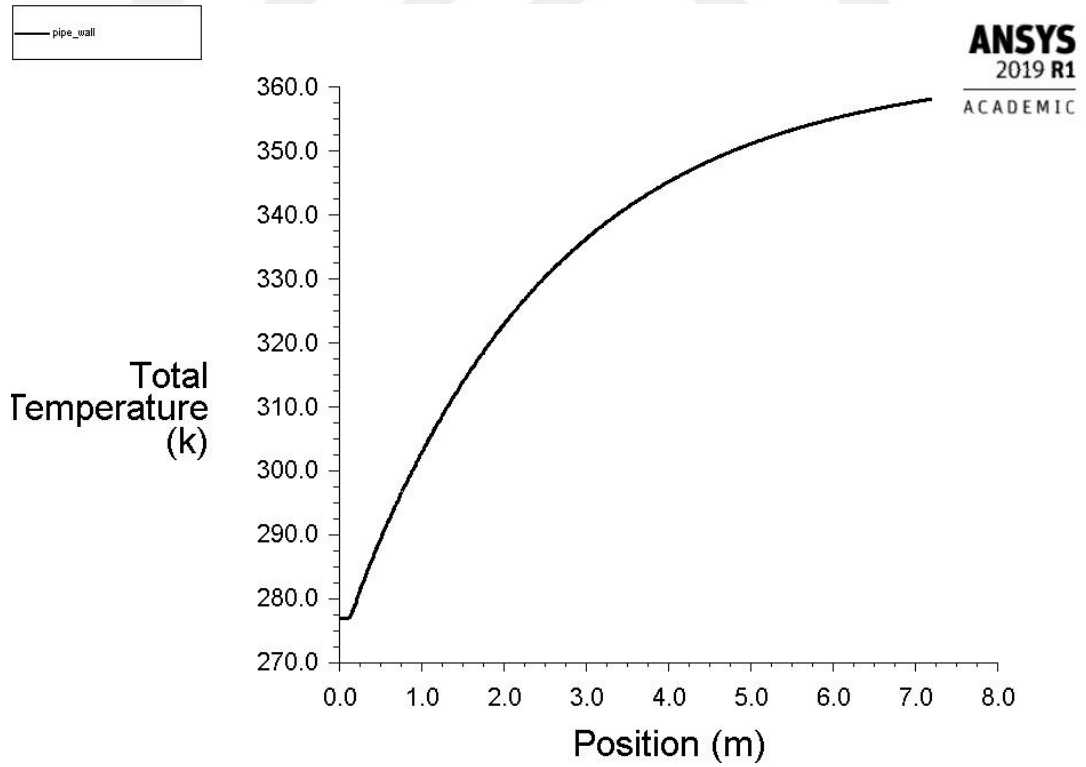


**Şekil 3.50.** Düzeltilmiş mesh yapısı

Analiz sonucunda borunun çıkışındaki sıcaklık değeri yaklaşık  $74^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır. Buradan anlaşılacak sonuç da akış kırıcı kanatlar da olsa mildeki ısı transferi alanı yeterli olmamıştır. Daha uzun bir boru gerekmektedir. Daha uzun bir boru çizilip ikinci bir analiz yapıldığında sonuçlar göstermektedir ki 7,13 metre uzunluğunda bir borunun çıkışında akışkan  $85^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa ulaşmaktadır. Şekil 3.51’de sıcaklık grafiği ve Şekil 3.52’de daha uzun bir boru ile yapılan ikinci analiz için sıcaklık grafiği paylaşılmıştır. Şekil 3.53’te akış kırıcılar ve mil etrafındaki ısı transfer dağılımı gösterilmiştir. Bunun yanında sıcaklık değişim tablosu da Tablo 3.9’da görülebilir. Şekil 3.54’te genel sıcaklık dağılımı verilmiştir. Ortalama hızın da  $0,319\text{ m/s}$  olduğu görülmektedir.



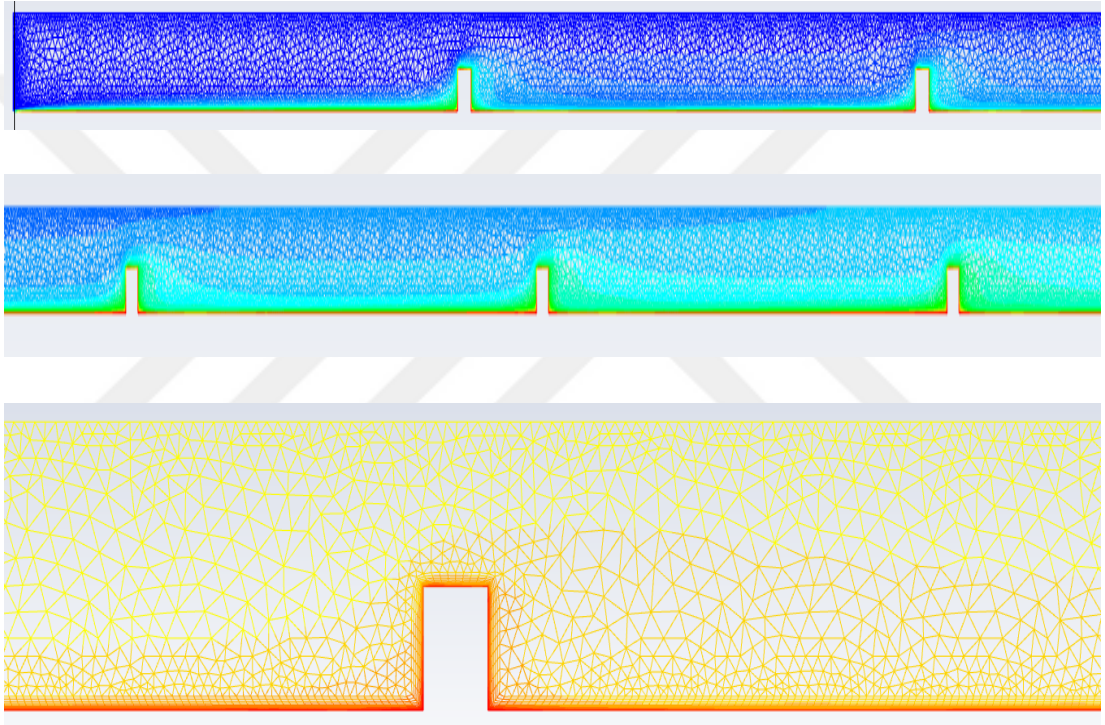
Şekil 3.51. Konuma bağlı akışkan sıcaklığı grafiği



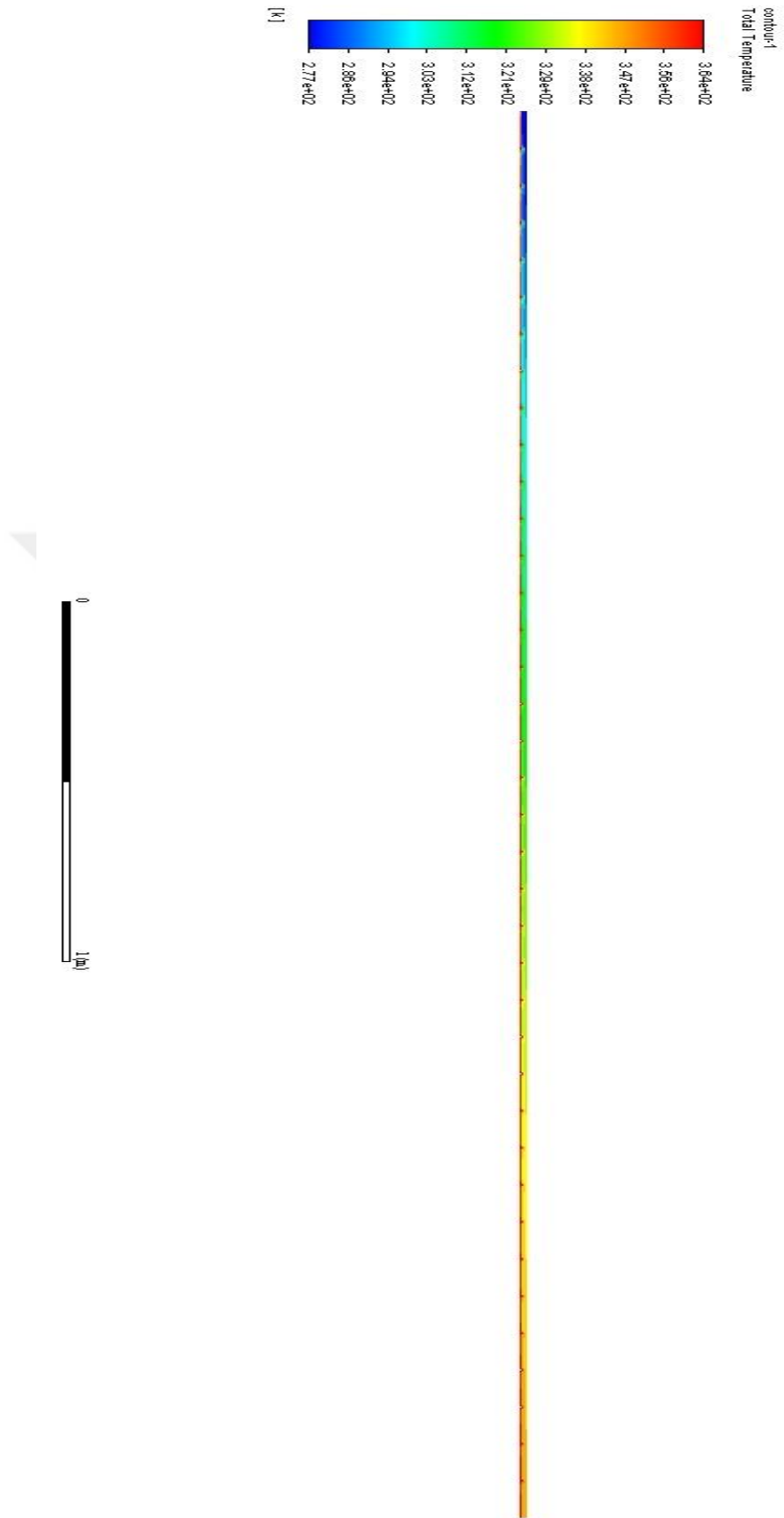
Şekil 3.52. Uzatılmış boru boyu için sıcaklık grafiği

**Tablo 3.9.** Model 7 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

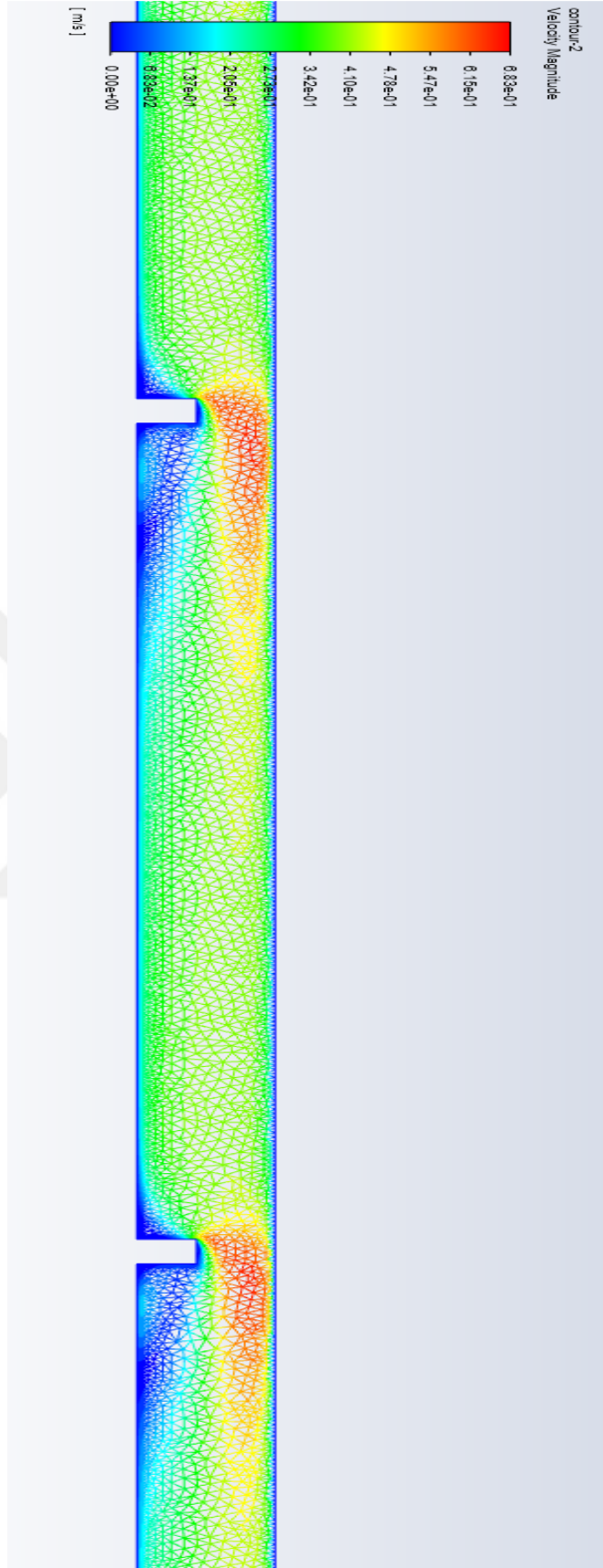
Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	2,71
65	3,16
70	3,71
75	4,43
80	5,42
85	7,13



**Şekil 3.53.** Sıcaklık dağılımı detayı



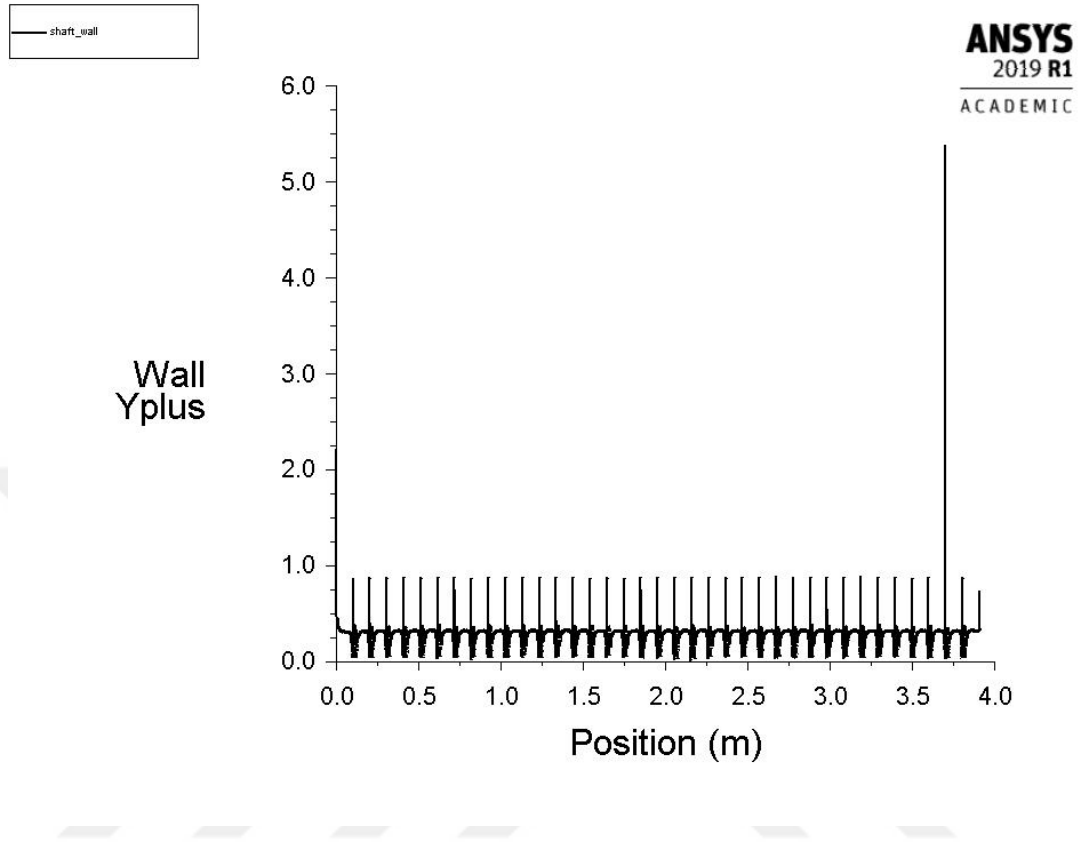
Şekil 3.54. Akışkan sıcaklık dağılımı



Şekil 3.55. Mil yüzeyindeki akış kırıcıların hız dağılımına etkisi



Son olarak da  $y^+$  değeri kontrol edildiğinde ortalama 0,28 civarında olduğu görülmektedir. Şekil 3.56'da bu değerın akış boyunca değışim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.56.  $y^+$  değeri

### 3.3.8. Model 8: Akış Kırıcılı Merkezi Mil - 120°C

Giriş hızı ve Reynolds sayısı gibi parametreler 90°C yüzey sıcaklığında olduğu gibidir. Tam türbülent akışlar için eşitlik 2.3'ten  $h$  değeri 120°C sıcaklığa göre hesaplanır hesaplanır:

$$\frac{h \times 0,01064}{0,637} = 0,027 \times 19797^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,232 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

$$h = 7954 \text{ W/m}^2 \times K$$

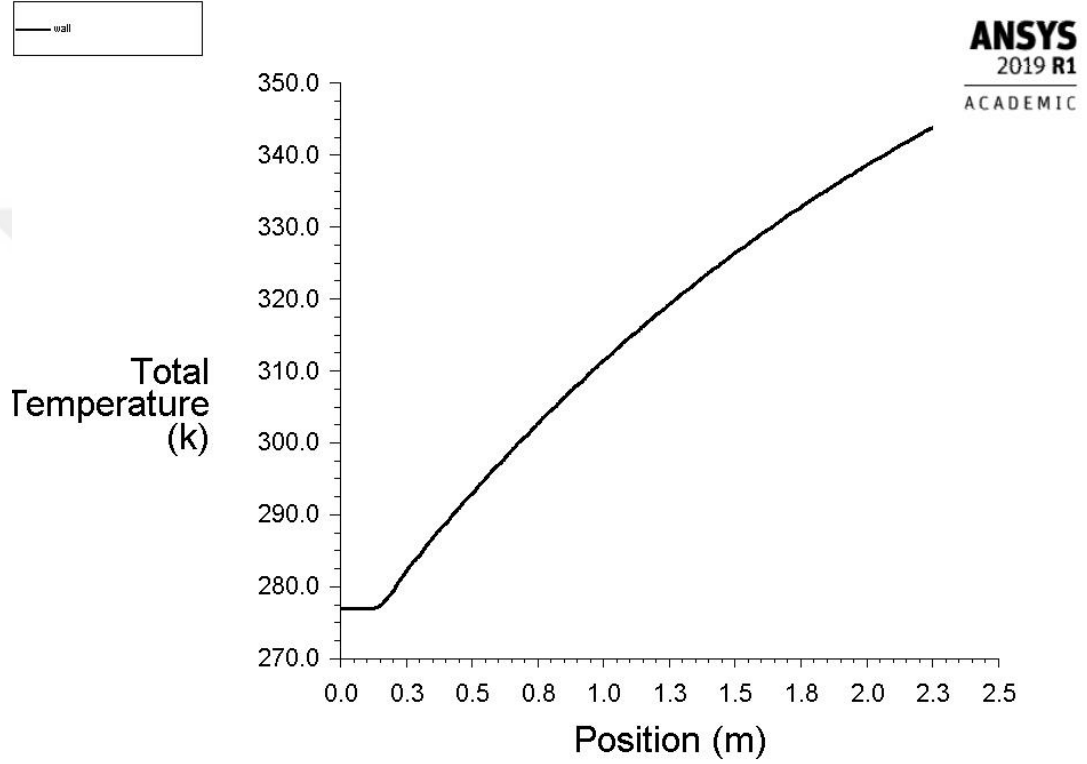
Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

$$33858 = 7954 \times \pi \times 0,008 \times L \times (120 - 44,5) \quad (2.1)$$

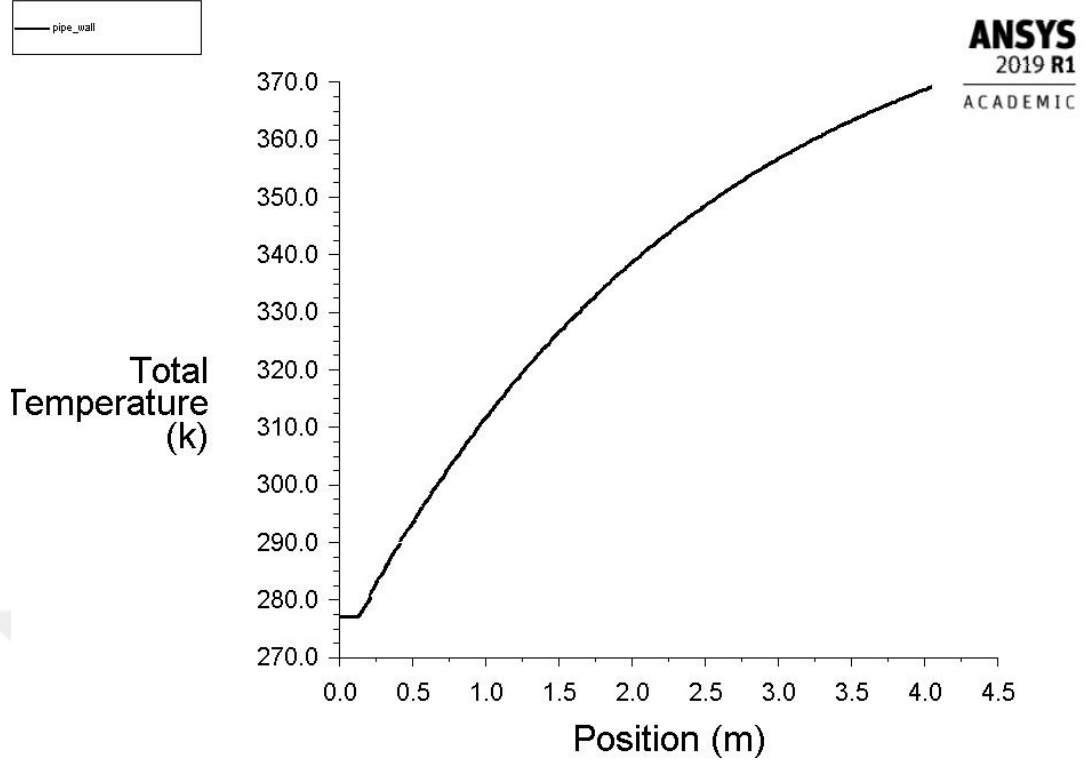
$$L = 2,3 \text{ m}$$

$$L/D = 2,3/0,01864 = 123 > 60$$

Şekil 3.57’de görüldüğü üzere boru çıkışında sıcaklık 85°C’a ulaşmamıştır. Çıkıştaki ortalama sıcaklık yaklaşık olarak 75°C’tır. Akışkanın 85°C sıcaklığa ulaşması için gerekli olan yaklaşık uzunluk 3,1 metredir. Ortalama hız ise 0,322 m/s olmaktadır. Bunun için daha uzun bir boru için ikinci bir analiz yapılmış olup bu analizin sonuçları Şekil 3.58’de ve Tablo 3.10’da gösterilmiştir.



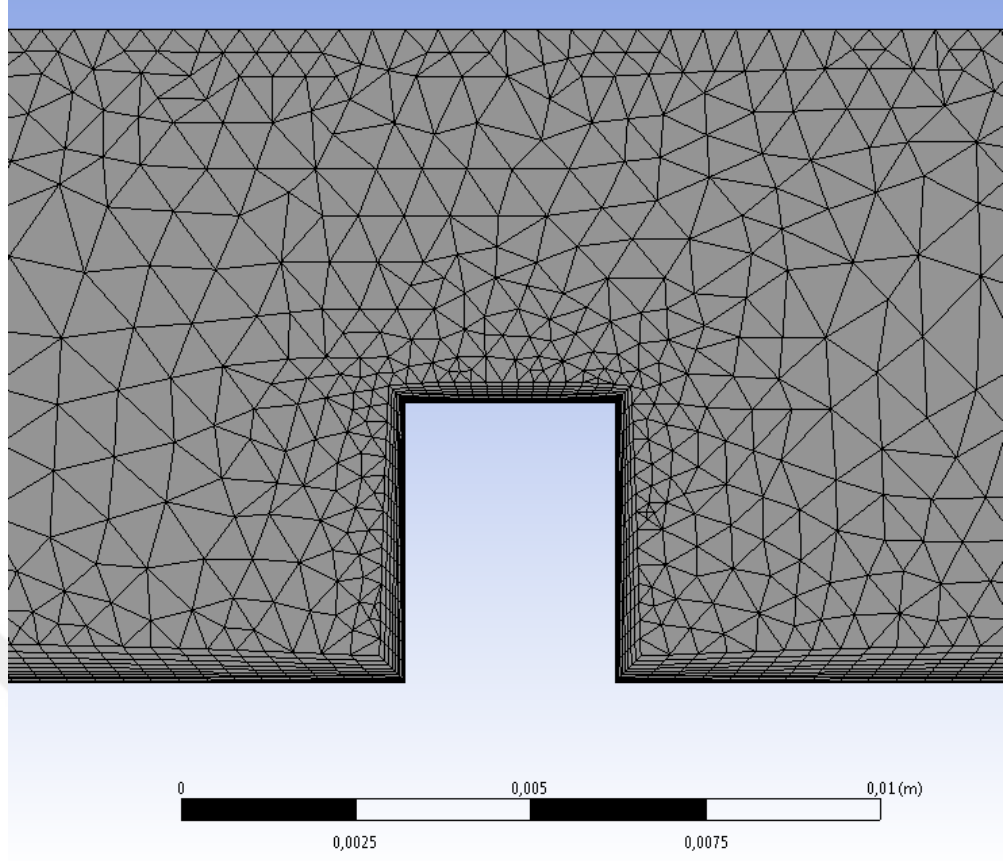
Şekil 3.57. Sıcaklık – konum grafiği



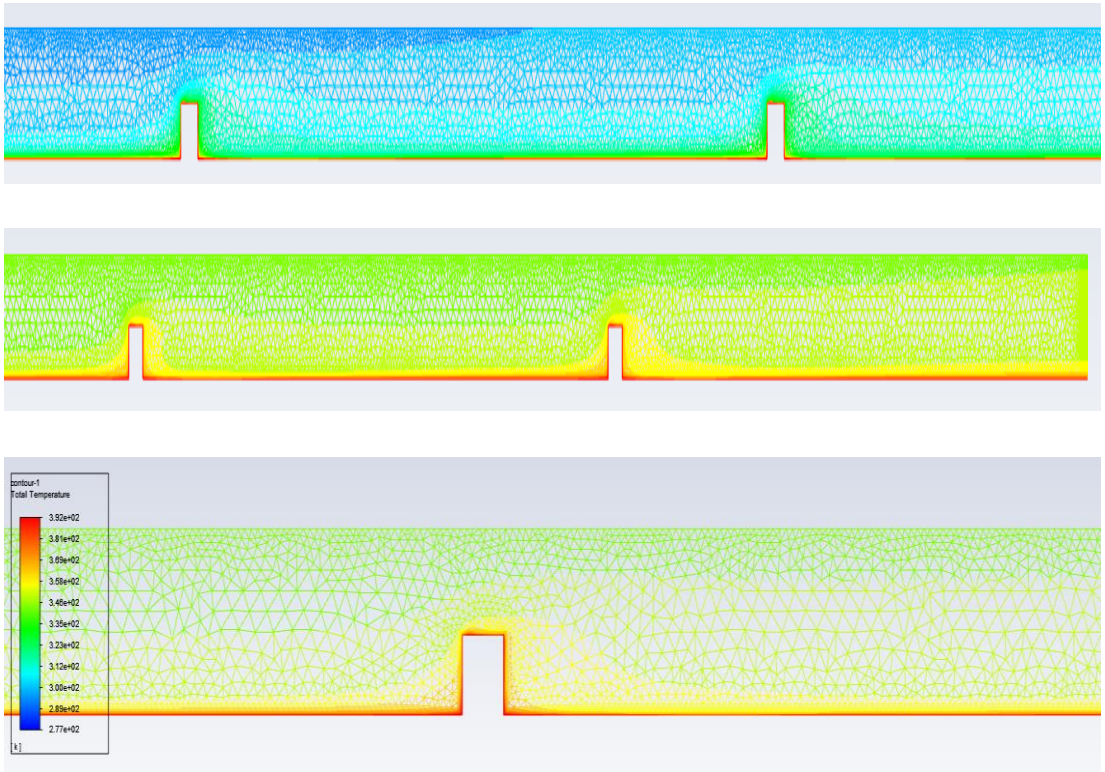
**Şekil 3.58.** Uzunluğu artırılmış boru için sıcaklık – konum grafiği

**Tablo 3.10.** Model 8 akışkan ortalama sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

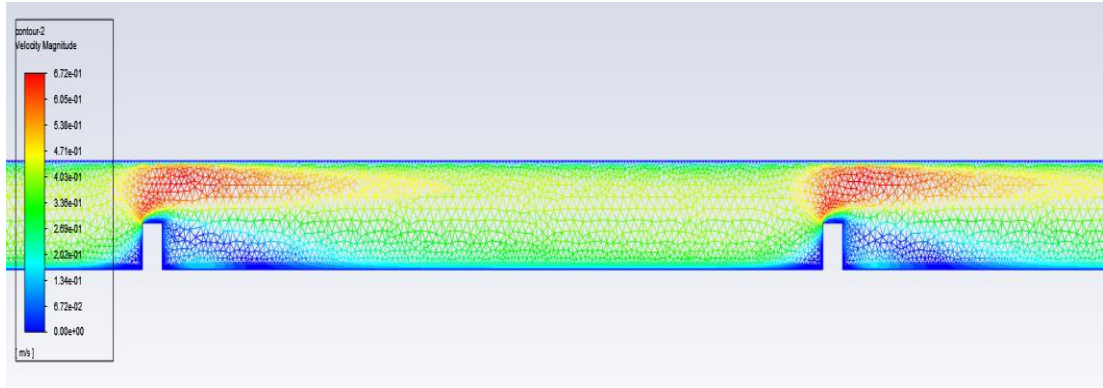
Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	1,75
65	1,97
70	2,21
75	2,48
80	2,76
85	3,10



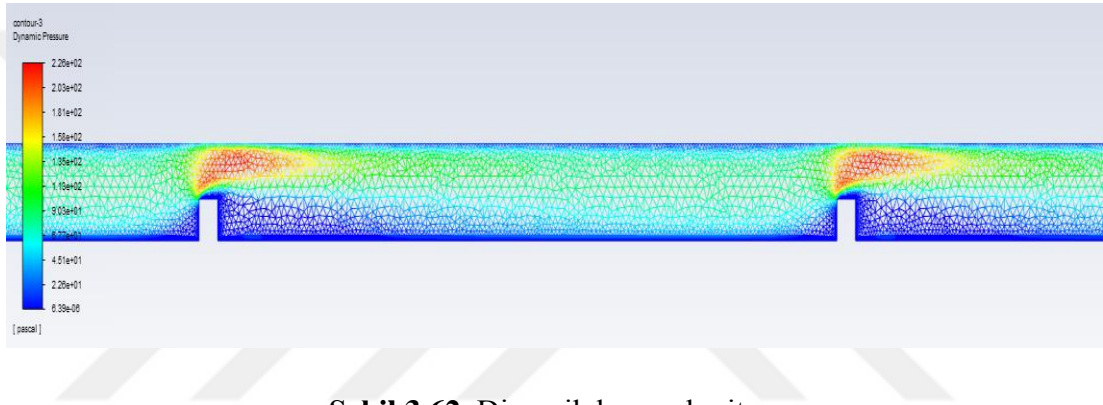
Şekil 3.59. Mesh yapısı



Şekil 3.60. Sıcaklık dağılımı detayı



Şekil 3.61. Akışkan hız detayı



Şekil 3.62. Dinamik basınç haritası

Şekil 3.61 ve Şekil 3.62 incelendiğinde hızın arttığı dar kesitli bölgelerde dinamik basıncın da doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 3.59'da mesh yapısı görülmektedir. Mesh eleman sayısı yaklaşık 170000'dir. Wall y+ değeri 0,32'dir.

### 3.3.9. Model 9: Akış Kırıcılı Merkezi Mil 150°C

Giriş hızı ve Reynolds sayısı gibi parametreler 90°C ve 120°C yüzey sıcaklıklarında olduğu gibidir. Tam türbülent akışlar için eşitlik 2.3'ten h değeri 150°C sıcaklığa göre hesaplanır hesaplanır:

$$\frac{h \times 0,01064}{0,637} = 0,027 \times 19797^{0,8} \times 3,91^{1/3} \times \left( \frac{0,596 \times 10^{-3}}{0,183 \times 10^{-3}} \right)^{0,14} \quad (2.3)$$

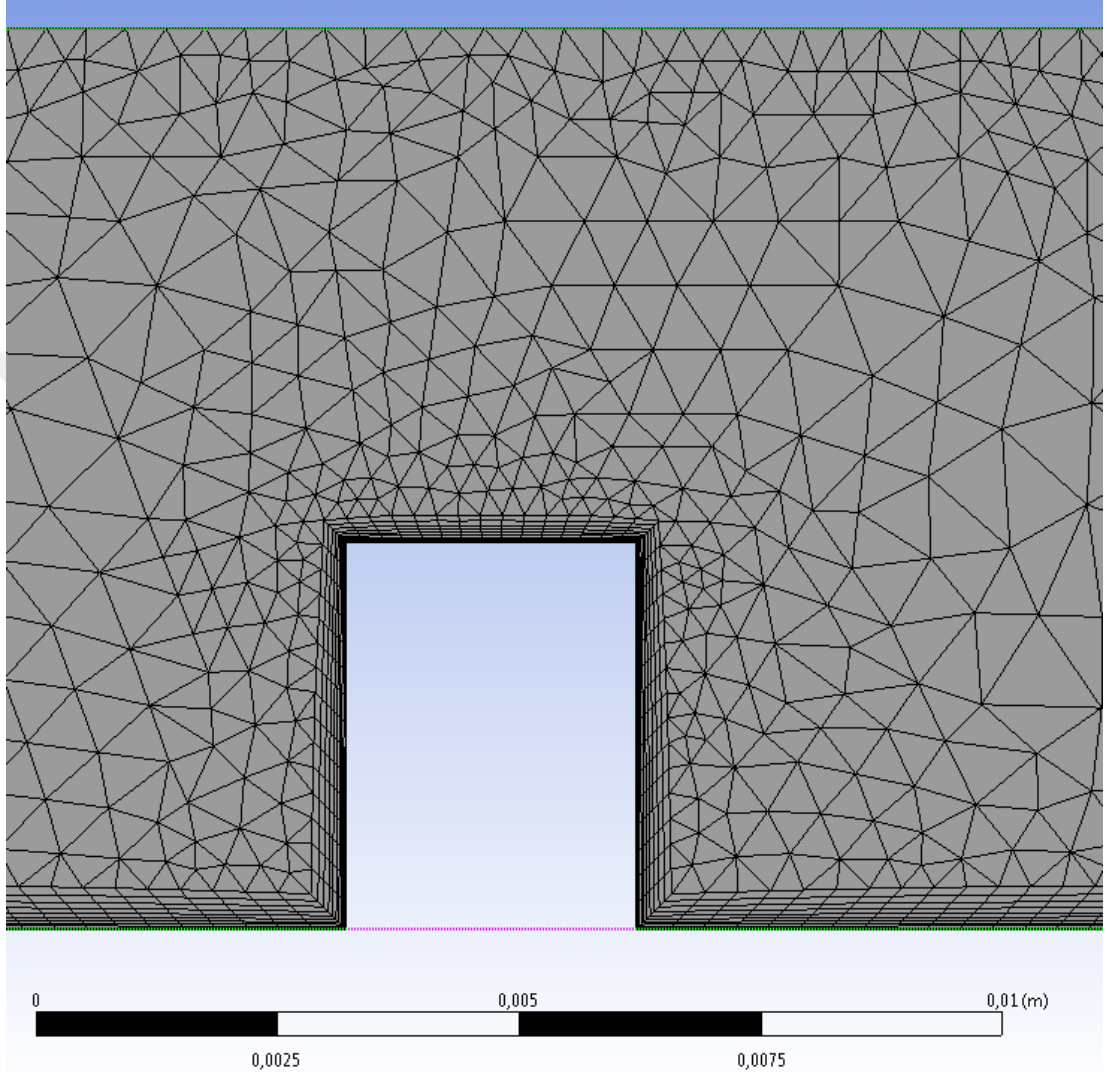
$$h = 8223 \text{ W/m}^2 \times K$$

Denklem 2.1'den boru boyu hesaplanır:

$$33858 = 8223 \times \pi \times 0,008 \times L \times (150 - 44,5) \quad (2.1)$$

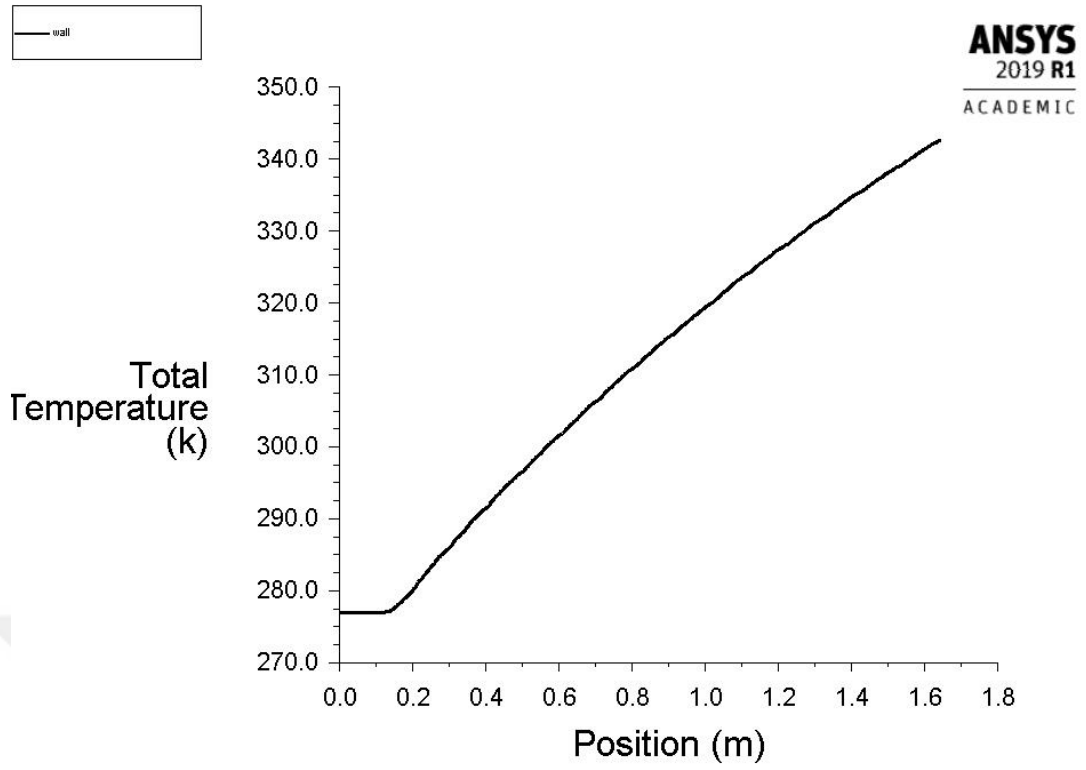
$$L = 1,6 \text{ m}$$

$$L/D = 1,6/0,01864 = 86 > 60$$

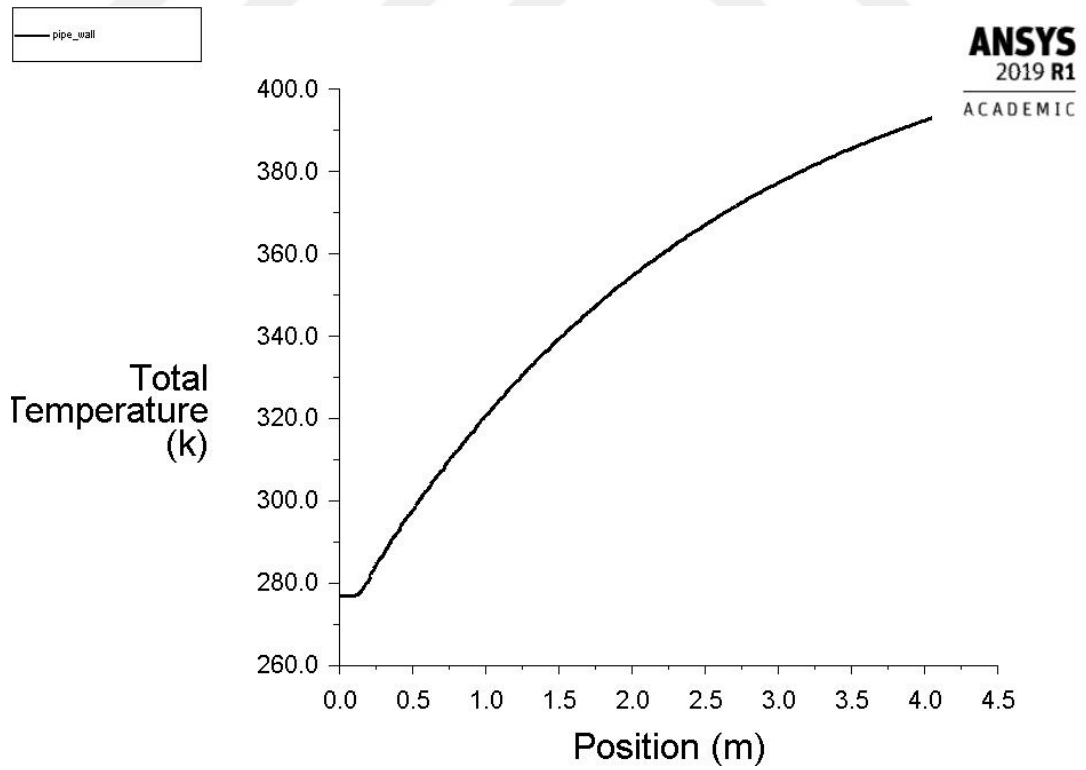


**Şekil 3.63.** Mesh yapısı

Şekil 3.63'de mesh yapısı örneklenmiştir ve eleman sayısı yaklaşık olarak 133000'dir.



Şekil 3.64. Sıcaklık grafiği

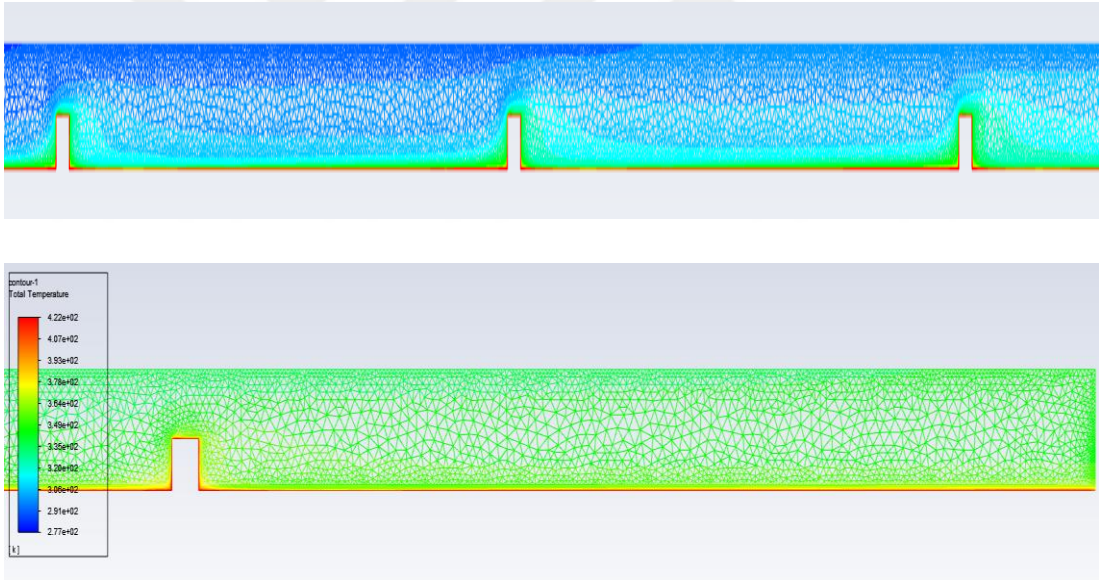


Şekil 3.65. Uzunluğu artırılmış boru için sıcaklık – konum grafiği

**Tablo 3.11.** Model 9 akışkan sıcaklık değerlerine karşılık gelen boru boyları

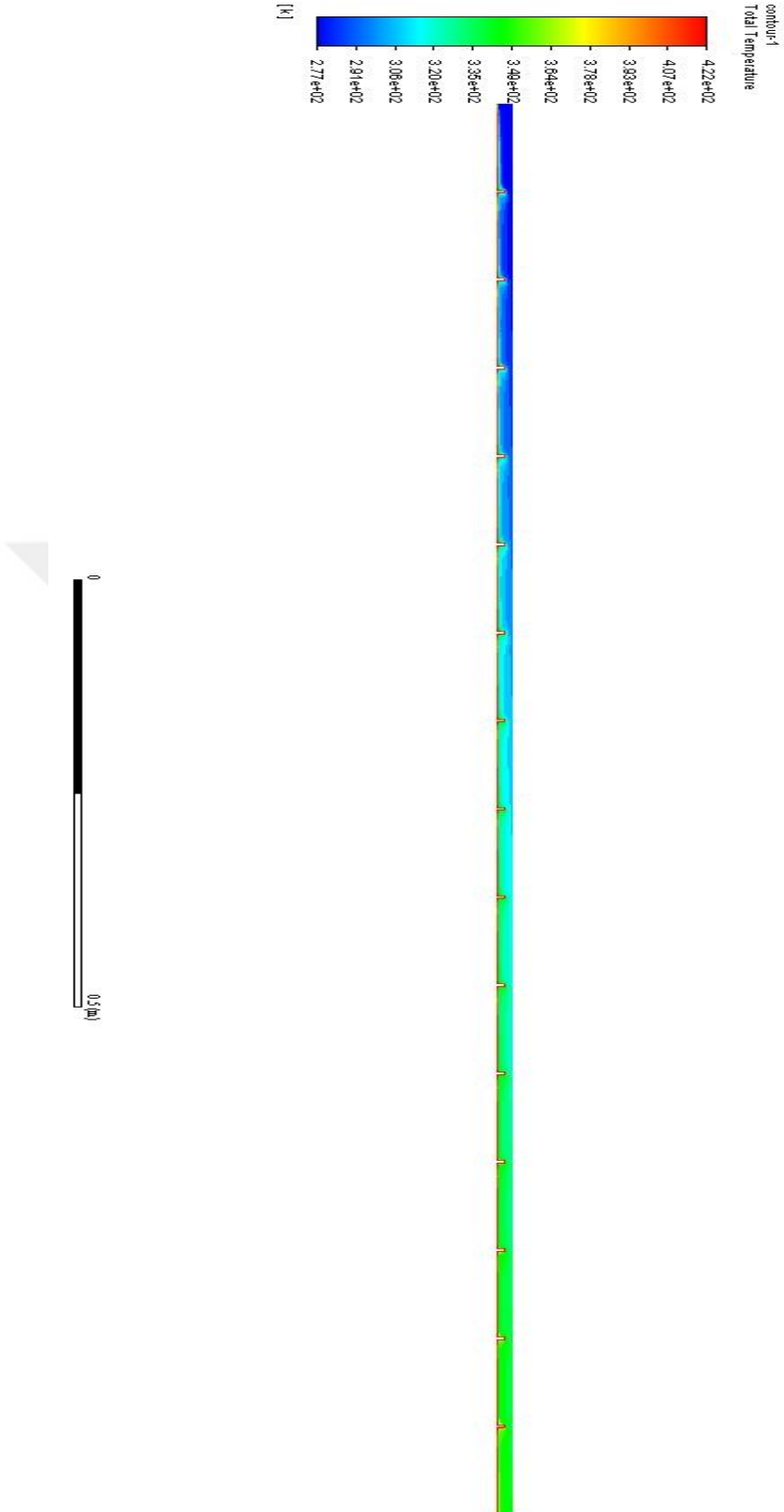
Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	1,32
65	1,46
70	1,61
75	1,77
80	1,95
85	2,13

Şekil 3.64'te görüldüğü üzere boru çıkışında sıcaklık 85°C'a ulaşmamıştır. Çıkıştaki ortalama sıcaklık yaklaşık olarak 81°C'tır. Ancak Şekil 3.65'te göreceği üzere boyu uzatılmış boru için ikinci bir analiz yapılmış olup, akışkanın 85°C sıcaklığa ulaşması için gerekli olan yaklaşık uzunluğun 2,13 m olduğu görülmektedir. Akış ortalama hızı ise 0,32 m/s olmaktadır.

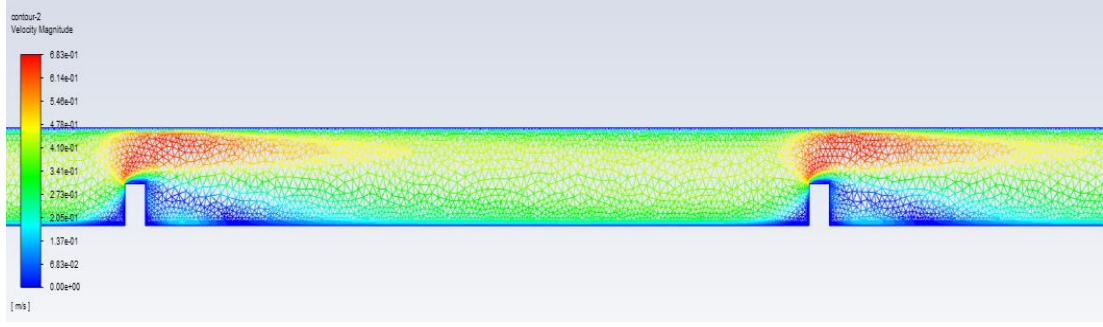


**Şekil 3.66.** Sıcaklık dağılımı detayı

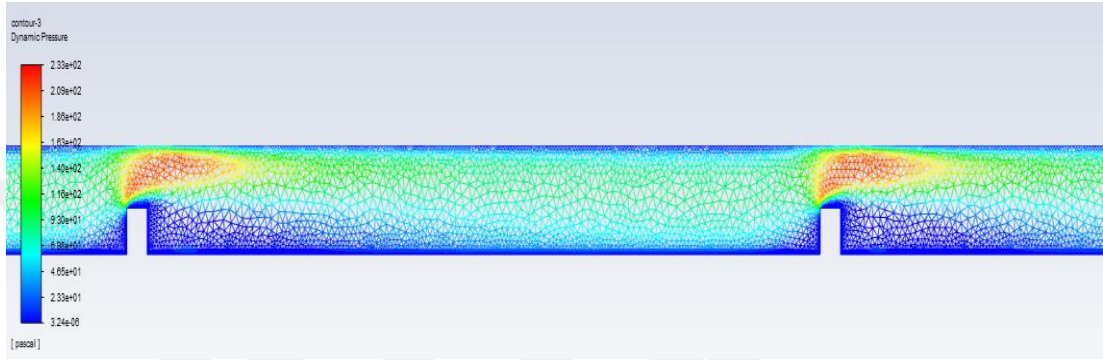




Şekil 3.67. Akışkan sıcaklık değişim haritası



**Şekil 3.68.** Akış hız detayı



**Şekil 3.69.** Akış dinamik basınç detayı

Şekil 3.68 ve 3.69 incelendiğinde yine hızın arttığı dar kesitli bölgelerde, dinamik basıncın da doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Son olarak wall y+ değeri incelendiğinde bu değer de 0,28 olduğu görülmektedir.

### 3.4. Sistemin Gıda Güvenliğine Uygunluğunun Hesaplanması

#### 3.4.1. Süt Değerleri ile FLUENT Simülasyonu

Bu bölümde hesaplanan boru tipi düz boru tipi olup yüzey sıcaklığı da 90°C olan modelleme bir de süt için yapılmıştır. Analizler sonucunda süt ve su değerleri kıyaslanmıştır.

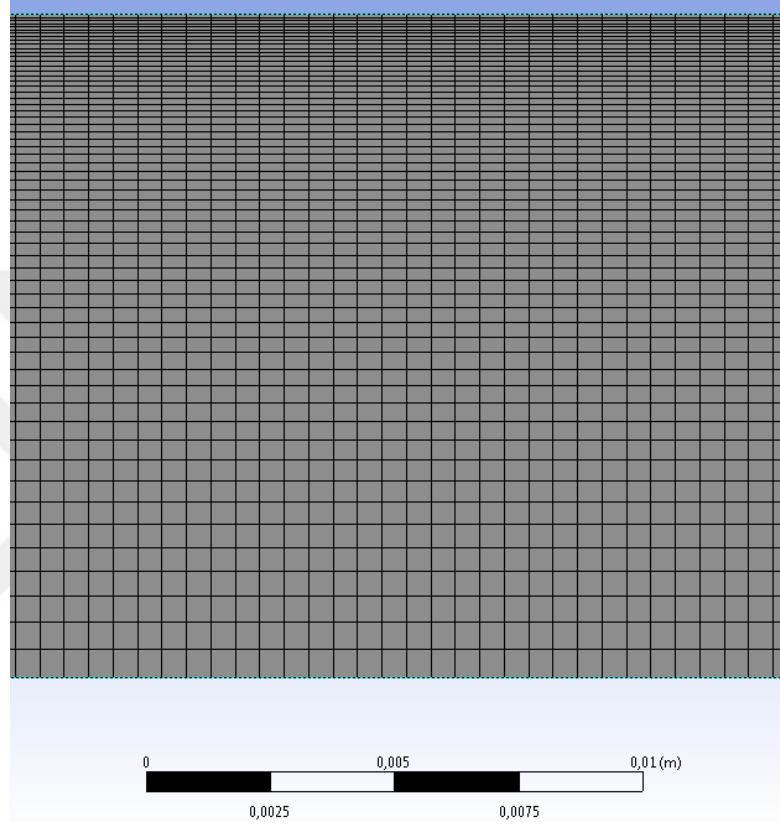
Öncelikle, düz boru tasarımında su için yapılan modellemede 90°C yüzey sıcaklığı durumunda gerekli olan boru boyu yaklaşık olarak 3,44 m olarak bulunmuştu. Süt ve su akışkanlarının fiziksel özellikleri benzer olduğu için bu boyda boru modellenerek, süt parametreleri için simüle edilmiştir. Programa tanımlanan süt fiziksel özellikleri aşağıda yazıldığı gibidir [21]. Burada baz alınan değerler yığın ortalama sıcaklığındaki süt değerleri değildir. Sütün her sıcaklıktaki fiziksel özellikleri incelenemediği için literatürden elde edilen bilgiler baz alınmıştır. Şekil 3.70'te 420000 eleman sayılı mesh yapısı gösterilmiştir.

$c_p$  : 3,85 kJ/kg.K

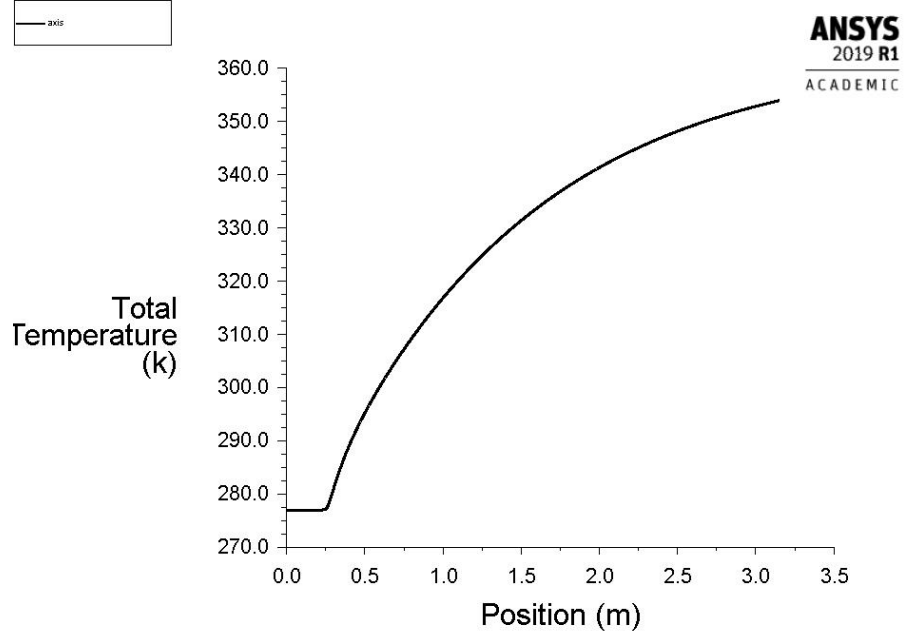
$k$  : 0,538 W/m.K

$\rho$  : 1030 kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  : 2,12 x 10<sup>-3</sup> Pa.s

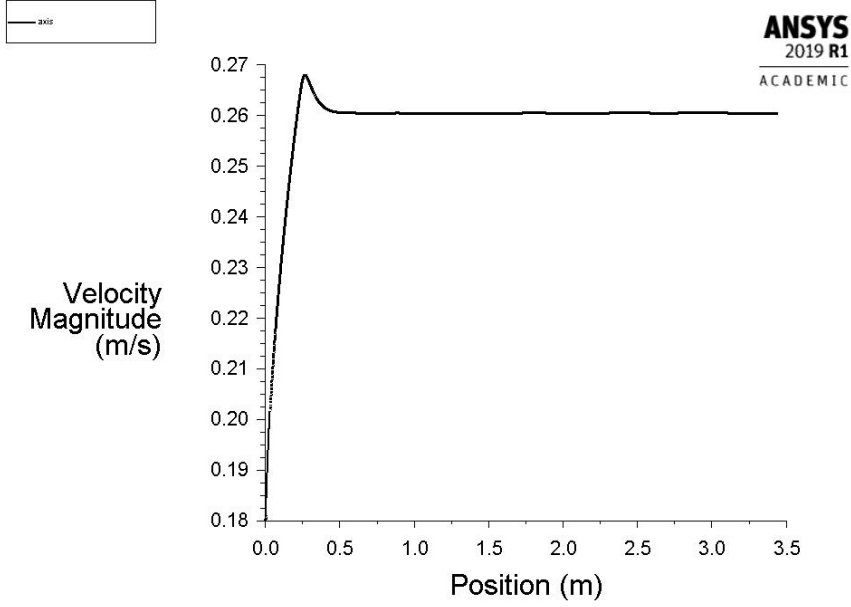


**Şekil 3.70.** Mesh yapısı



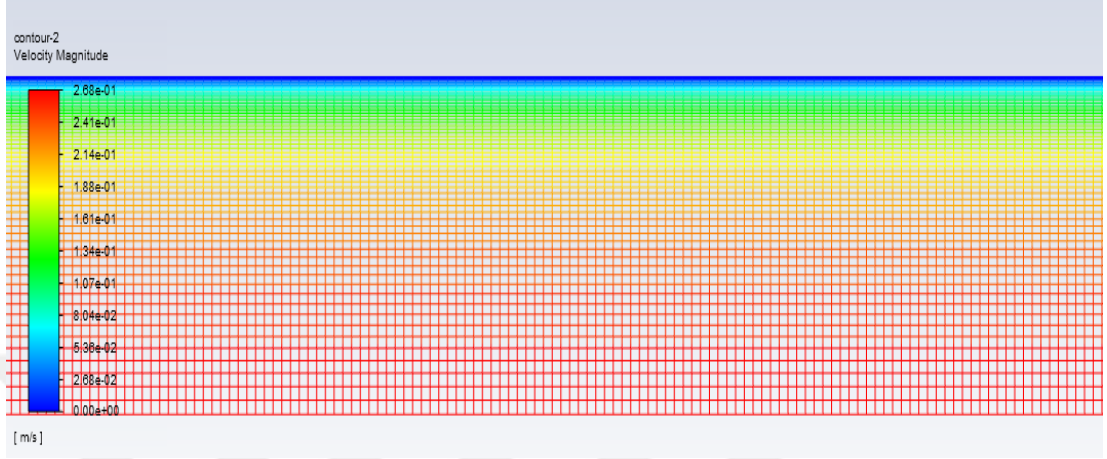
Şekil 3.71. Sıcaklık grafiği

Şekil 3.71’de sütun boru içerisindeki sıcaklığının konuma bağlı olarak değişimi verilmektedir. Çıkış sıcaklığı 84,3°C olmaktadır.

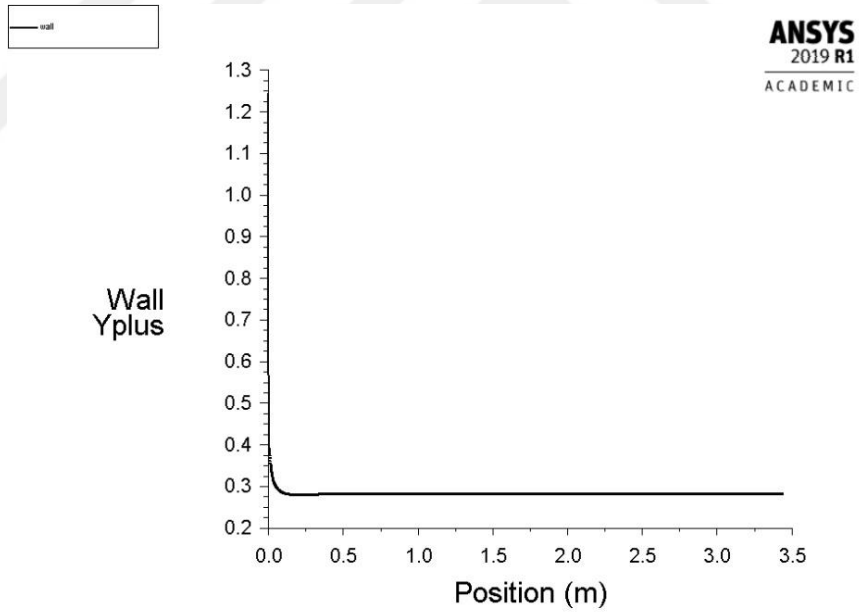


Şekil 3.72. Akışkan hız grafiği

Şekil 3.72’de görüleceği üzere boruya ortalama 0,18 m/s hız ile giren akışkan, hız karakteristiği oluştuktan sonra yaklaşık olarak 0,26 m/s hızla akışını sürdürmektedir. İlk 0,5 m boru içerisinde ortalama hız ortalama 0,23 civarındayken, borunun kalan kısmında ortalama 0,26 m/s ile akışına devam etmektedir.

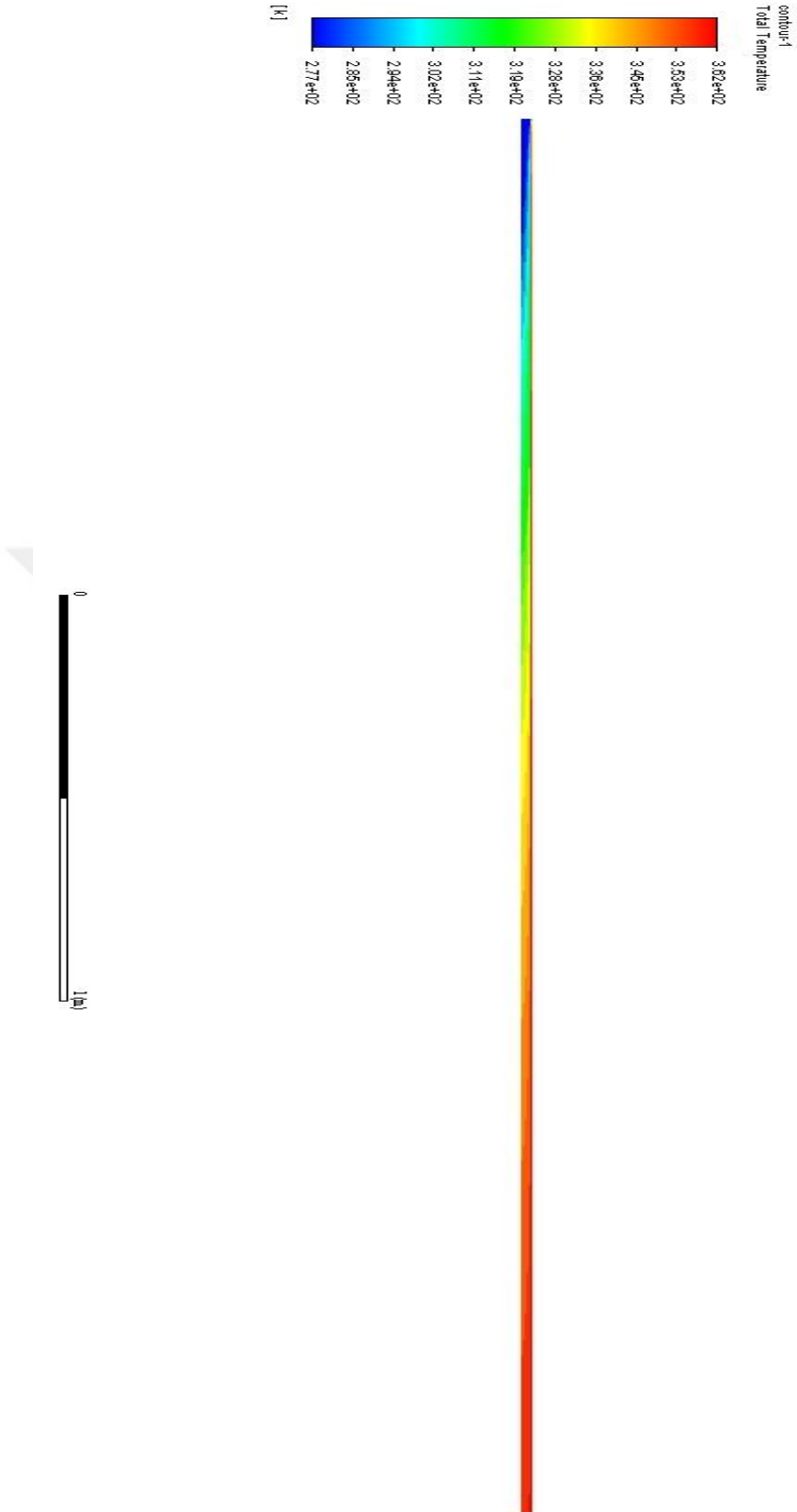


Şekil 3.73. Hız dağılımı



Şekil 3.74. Y+ değeri

Şekil 3.74’te görüleceği üzere hesaplamadaki y+ değeri yaklaşık olarak 0,28’dir.



Şekil 3.75. Sıcaklık haritası

**Tablo 3.12.** Uzunluk – sıcaklık değişimini gösteren tablo

Akışkan ortalama sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)
60	1,570
65	1,810
70	2,105
75	2,485
80	3,020
84,3	3,440

Buradaki analizde görüleceği üzere süt için yapılan simülasyon sonuçları, su için elde edilen sonuçlar ile neredeyse aynıdır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. CFD ile Hesaplanan Parametrelerin İrdelenmesi

Yapılan 9 farklı analize göre elde edilen boru boyları tablo 4.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1.** Yapılan analiz sonuçlarının irdelenmesi

Model No	Yüzey sıcaklığı (°C)	Analiz sonucu boru boyu (m)	Akış ort. hızı (m/s)
Model 1	90	3,52	0,246
Model 2	120	1,69	0,243
Model 3	150	1,12	0,247
Model 4	90	1,61	0,38
Model 5	120	0,76	0,38
Model 6	150	0,54	0,378
Model 7	90	7,13	0,319
Model 8	120	3,1	0,322
Model 9	150	2,13	0,322

### 4.2 Tasarlanan Ekipmanların Gıda Güvenliği Açısından İncelenmesi

Çalışmada ele alınan sıvı gıda maddesi sütün pastörizasyon işlemi için gerekli olan şartlar incelendiğinde Tablo 4.2’deki değerler karşımıza çıkmaktadır. Burada sıcaklık ve süre parametrelerinin önemi anlaşılmaktadır. 63°C ve 30 dakika işlem süresinin olduğu metod literatürde LTLT (low temperature long time) yani düşük sıcaklık uzun süre şeklinde adlandırılırken, 72°C ve 15 saniye işlem süresi ise HTST (high temperature short time) yani yüksek sıcaklık kısa süre olarak adlandırılmaktadır. Çoğu bakteri, sütün sıcaklığı 70°C’ın üzerine çıktığı andan itibaren saniyeler içerisinde ölmektedir [31], [32].

**Tablo 4.2.** Sütün pastörizasyon işleminde sıcaklık ve süre değerleri [31], [32], [33]

Sıcaklık (°C)	Süre
63	30 dk
72	15 s
89	1 s
90	0,5 s
94	0,1 s
100	0,01 s



Sütün içerisinde bulunan ve hastalık üreten mikroorganizmalara bakıldığında öne çıkan ilk 3 tanesi; mycobacterium tuberculosis, brucella ve coxiella burnetii organizmalarıdır. Bunların içerisinde ısıya dayanıklılığı en fazla olan coxiella burnetii olup, her üç mikroorganizmanın karakteristik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir [34].

**Tablo 4.3.** Sütteki mikroorganizmalar için bazı referans değerler [34]

<b>Mikroorganizma</b>	<b>D<sub>65,6</sub> (s)</b>	<b>z (°C)</b>
Microbacterium tuberculosis	12-15	4-5
Brucella	6-12	4-5
Coxiella burnetii	30-36	4-5

Tablo 4.3'te görülen *D* değeri daha önce genel denklemlerde verilen mikroorganizmaların ondalık azalma süresidir. Bir başka deyişle sütün içerisindeki mikroorganizma miktarını başlangıçtaki miktarın %10'una düşürmek için gerekli olan süredir. Tabloda bulunan *z* değeri ise ısı direnç sabiti olarak tanımlanmaktadır ve ondalık azalma süresi *D*'nin mikroorganizma miktarındaki %90 azalmayı sağlayabilmesi için gerekli olan sıcaklık artışıdır [7].

Çalışma dahilinde yaptığımız tasarımların gıda güvenliğini incelemek için referans alınan değerler Tablo 4.3'te paylaşılan maksimum değerler olan *D*<sub>65,6</sub> için 36 saniye ve *z* değeri için de 5°C şeklindedir. Analizler sonucunda bulunan boru uzunluklarına ve ortalama hız değerlerine göre termal ölüm sürelerinin hangi aralıkta tamamlandığı hesaplanmıştır. Genel pastörizasyon uygulamalarında bu termal ölüm süresi, daha önce literatür kısmında bahsedildiği gibi 12\*D değeri ile hesaplanmaktadır. 60°C altındaki *F* değerleri nispeten çok küçük olduğu için hesaplamalara etkisi yok denecek kadar azdır.

$$D_{65,6} = 36 \text{ s}$$

$$F = 12 \times 36 = 432 \text{ s}$$

$$\frac{F}{t} = 10^{(T-65,6)/z} \quad (2.8)$$

12 logaritmalık bir letalite değeri sağlamak için gerekli olan süre görüldüğü gibi 432 saniyedir.

**Tablo 4.4.** Model 1 (düz boru ve 90°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F	Kümülatif F
60	1,42	5,77	0,08	0,08	0,44	0,44
65	1,64	0,89	0,76	0,42	0,37	0,81
70	1,9	1,06	7,59	4,17	4,41	5,22
75	2,23	1,34	75,86	41,72	55,97	61,19
76	2,31	0,33	120,23	98,04	31,88	93,07
77	2,4	0,37	190,55	155,39	56,85	149,92
78	2,49	0,37	302,00	246,27	90,10	240,02
79	2,6	0,45	478,63	390,31	174,53	414,55
<b>80</b>	<b>2,7</b>	<b>1,91</b>	<b>758,58</b>	<b>618,60</b>	<b>1181,89</b>	<b>1596,44</b>
85	3,52	3,33	7585,78	4172,18	13907,26	15503,69

**Tablo 4.5.** Model 2 (düz boru ve 120°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	1,02	4,20	0,08	0,08	0,32	0,32
65	1,13	0,45	0,76	0,42	0,19	0,51
70	1,25	0,49	7,59	4,17	2,06	2,57
75	1,38	0,53	75,86	41,72	22,32	24,89
80	1,52	0,58	758,58	417,22	240,37	265,26
81	1,56	0,16	1202,26	980,42	161,39	426,65
<b>82</b>	<b>1,59</b>	<b>0,12</b>	<b>1905,46</b>	<b>1553,86</b>	<b>191,83</b>	<b>618,48</b>
83	1,62	0,12	3019,95	2462,71	304,04	922,52
84	1,66	0,16	4786,30	3903,13	642,49	1565,01
85	1,69	0,12	7585,78	6186,04	763,71	2328,72

**Tablo 4.6.** Model 3 (düz boru ve 150°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	0,74	3,00	0,08	0,08	0,23	0,23
65	0,81	0,28	0,76	0,42	0,12	0,35
70	0,88	0,28	7,59	4,17	1,18	1,53
75	0,96	0,32	75,86	41,72	13,51	15,04
80	1,04	0,32	758,58	417,22	135,13	150,17
81	1,05	0,04	1202,26	980,42	39,69	189,87
82	1,07	0,08	1905,46	1553,86	125,82	315,68
<b>83</b>	<b>1,09</b>	<b>0,08</b>	<b>3019,95</b>	<b>2462,71</b>	<b>199,41</b>	<b>515,09</b>
84	1,11	0,08	4786,30	3903,13	316,04	831,14
85	1,12	0,04	7585,78	6186,04	250,45	1081,58

**Tablo 4.7.** Model 4 (yüzeyde akış kırıcı kanatlı tasarım ve 90°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	0,66	1,74	0,08	0,08	0,13	0,13
65	0,76	0,26	0,76	0,42	0,11	0,24
70	0,87	0,29	7,59	4,17	1,21	1,45
75	1,03	0,42	75,86	41,72	17,57	19,02
80	1,24	0,55	758,58	417,22	230,57	249,58
81	1,29	0,13	1202,26	980,42	129,00	378,59
<b>82</b>	<b>1,36</b>	<b>0,18</b>	<b>1905,46</b>	<b>1553,86</b>	<b>286,24</b>	<b>664,82</b>
83	1,43	0,18	3019,95	2462,71	453,66	1118,48
84	1,51	0,21	4786,30	3903,13	821,71	1940,19
85	1,61	0,26	7585,78	6186,04	1627,90	3568,10

**Tablo 4.8.** Model 5 (yüzeyde akış kırıcı kanatlı tasarım ve 120°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	0,46	1,21	0,08	0,08	0,09	0,09
65	0,51	0,13	0,76	0,42	0,05	0,15
70	0,56	0,13	7,59	4,17	0,55	0,70
75	0,62	0,16	75,86	41,72	6,59	7,28
80	0,68	0,16	758,58	417,22	65,88	73,16
81	0,69	0,03	1202,26	980,42	25,80	98,96
82	0,71	0,05	1905,46	1553,86	81,78	180,74
83	0,72	0,03	3019,95	2462,71	64,81	245,55
<b>84</b>	<b>0,74</b>	<b>0,05</b>	<b>4786,30</b>	<b>3903,13</b>	<b>205,43</b>	<b>450,98</b>
85	0,76	0,05	7585,78	6186,04	325,58	776,56

**Tablo 4.9.** Model 6 (yüzeyde akış kırıcı kanatlı tasarım ve 150°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	0,36	0,95	0,08	0,08	0,07	0,07
65	0,39	0,08	0,76	0,42	0,03	0,11
70	0,42	0,08	7,59	4,17	0,33	0,44
75	0,46	0,11	75,86	41,72	4,42	4,85
80	0,49	0,08	758,58	417,22	33,11	37,96
81	0,50	0,03	1202,26	980,42	25,94	63,90
82	0,51	0,03	1905,46	1553,86	41,11	105,01
83	0,52	0,03	3019,95	2462,71	65,15	170,16
84	0,53	0,03	4786,30	3903,13	103,26	273,42
<b>85</b>	<b>0,54</b>	<b>0,03</b>	<b>7585,78</b>	<b>6186,04</b>	<b>163,65</b>	<b>437,07</b>

**Tablo 4.10.** Model 7 (merkezinde akış kırıcılı mil olan tasarım ve 90°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	2,71	8,50	0,08	0,08	0,64	0,64
65	3,16	1,41	0,76	0,42	0,59	1,23
70	3,71	1,72	7,59	4,17	7,19	8,43
75	4,43	2,26	75,86	41,72	94,17	102,59
76	4,59	0,50	120,23	98,04	49,17	151,77
77	4,77	0,56	190,55	155,39	87,68	239,45
78	4,96	0,60	302,00	246,27	146,68	386,13
<b>79</b>	<b>5,19</b>	<b>0,72</b>	<b>478,63</b>	<b>390,31</b>	<b>281,42</b>	<b>667,55</b>
80	5,42	3,10	758,58	618,60	1919,81	2587,35
85	7,13	5,36	7585,78	4172,18	22364,96	24952,31

**Tablo 4.11.** Model 8 (merkezinde akış kırıcılı mil olan tasarım ve 120°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	1,75	5,43	0,08	0,08	0,41	0,41
65	1,97	0,68	0,76	0,42	0,29	0,70
70	2,21	0,75	7,59	4,17	3,11	3,81
75	2,48	0,84	75,86	41,72	34,98	38,79
80	2,76	0,87	758,58	417,22	362,80	401,59
<b>81</b>	<b>2,82</b>	<b>0,19</b>	<b>1202,26</b>	<b>980,42</b>	<b>182,69</b>	<b>584,28</b>
82	2,89	0,22	1905,46	1553,86	337,80	922,07
83	2,95	0,19	3019,95	2462,71	458,89	1380,96
84	3,02	0,22	4786,30	3903,13	848,51	2229,47
85	3,1	0,25	7585,78	6186,04	1536,90	3766,37

**Tablo 4.12.** Model 9 (merkezinde akış kırıcılı mil olan tasarım ve 150°C yüzey sıcaklığı) için termal ölüm süresi çizelgesi

T [°C]	L [m]	t [s]	F/t	Ort. F/t	F [s]	Küm. F [s]
60	1,32	4,10	0,08	0,08	0,31	0,31
65	1,46	0,43	0,76	0,42	0,18	0,49
70	1,61	0,47	7,59	4,17	1,94	2,44
75	1,77	0,50	75,86	41,72	20,73	23,17
80	1,95	0,56	758,58	417,22	233,23	256,39
81	1,98	0,09	1202,26	980,42	91,34	347,74
<b>82</b>	<b>2,01</b>	<b>0,09</b>	<b>1905,46</b>	<b>1553,86</b>	<b>144,77</b>	<b>492,51</b>
83	2,06	0,16	3019,95	2462,71	382,41	874,92
84	2,09	0,09	4786,30	3903,13	363,65	1238,56
85	2,13	0,12	7585,78	6186,04	768,45	2007,01

Tablolar 4.4 - 4.12 incelendiğinde; gerekli olan 432 saniye eşdeğerindeki ölüm süresinin bütün tasarımlarda sağlandığı görülmektedir. Herhangi bir bekleme (holding) kısmına gerek olmaksızın gıda güvenliği sağlanmaktadır. Tablo 4.13'te elde edilen sonuç değerleri bütün tasarımlar için tek bir çizelgede paylaşılmıştır.

**Tablo 4.13.** Nihai boru uzunlukları, gıda güvenliğini sağlayan letalite süreleri ve ortalama akışkan sıcaklıklarının karşılaştırılması

Model No	Yüzey sıcaklığı (°C)	Letalite için min. sic. (°C)	Letalite için min. boy (m)	F (s)
Model 1	90	80	2,7	1596,44
Model 2	120	82	1,59	618,48
Model 3	150	83	1,09	515,09
Model 4	90	82	1,36	664,82
Model 5	120	84	0,74	450,98
Model 6	150	85	0,54	437,07
Model 7	90	79	5,19	667,55
Model 8	120	81	2,82	584,28
Model 9	150	82	2,01	492,51

Tablo 4.13'te, gerekli olan 12 logaritmalık letalite süresi 432 saniyeyi sağlayan minimum akışkan sıcaklıkları ve minimum boru uzunlukları karşılaştırılmıştır. Tasarımların letalite açısından verimliliklerini daha iyi anlayabilmek amacıyla 85°C ortalama çıkış sıcaklığı referans alınarak, letalite değerlerinin karşılaştırılması da Tablo 4.14'te yapılmıştır.

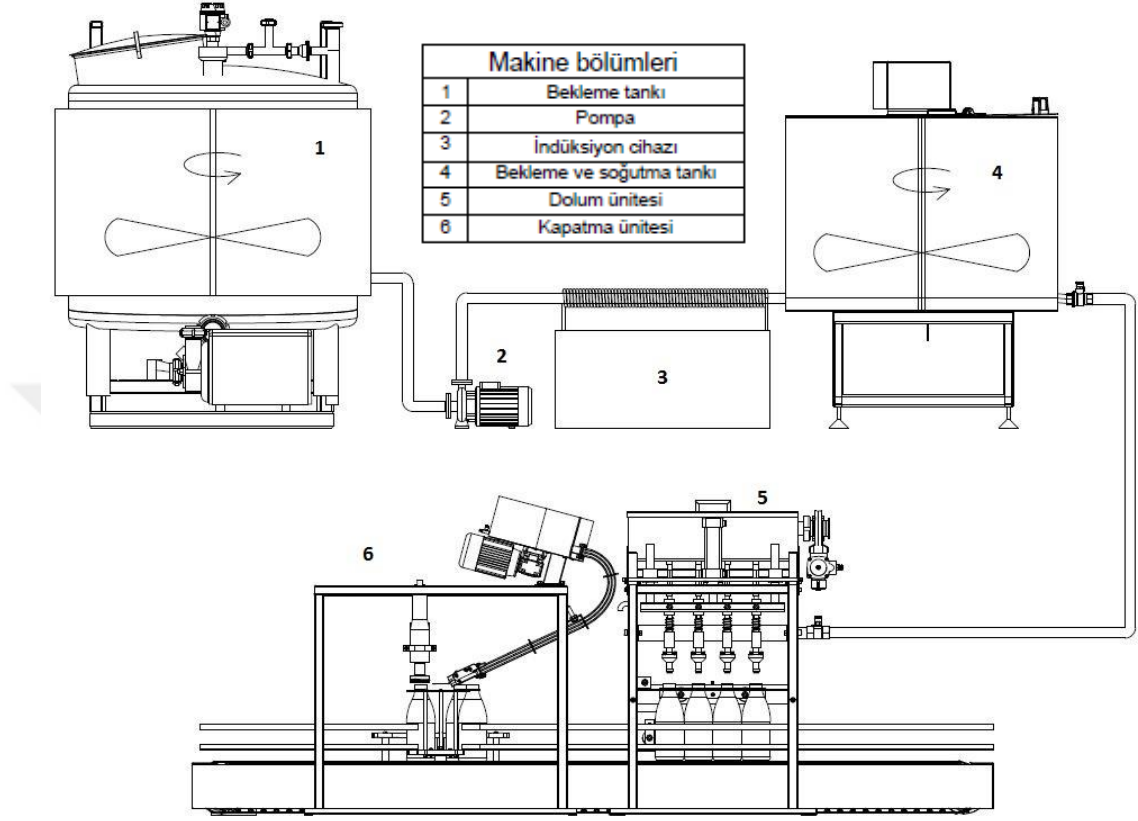
**Tablo 4.14.** 85°C ortalama çıkış sıcaklığında, tasarımların sağladıkları letalite değerlerinin karşılaştırılması

Model No	Yüzey sıcaklığı (°C)	Boru uzunluğu (m)	F (s)	~D
Model 1	90	3,52	15503,69	430*D
Model 2	120	1,69	2328,72	64*D
Model 3	150	1,12	1081,58	30*D
Model 4	90	1,61	3568,10	99*D
Model 5	120	0,76	776,56	21*D
Model 6	150	0,54	437,07	12*D
Model 7	90	7,13	24952,31	693*D
Model 8	120	3,1	3766,37	104*D
Model 9	150	2,13	2007,01	55*D

Tablo 4.14'ten anlaşıldığı gibi, gıda güvenliğinin boru uzunluğu ile doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Borunun uzun olması, söz konusu yüzey

sıcaklığında gıda maddesinin daha uzun yol katederek, ısıl işleme daha fazla maruz kalmasını sağladığı için, gerekli olan letalite süresini de sağlamaktadır.

### 4.3. Nihai Tasarım



Şekil 4.1. Nihai tasarım

Şekil 4.1'deki 1 nolu ekipman buffer tankı olup, sütün ısıl işlem öncesinde bekletildiği tanktır. Bu tankın içerisinde karıştırıcı ekipman bulunmaktadır. 2 nolu pompa vasıtasıyla bu tanktaki süt boru sistemine doğru taşınır ve bu esnada 3 numara ile gösterdiğimiz, tez çalışmamız kapsamında tasarım analizlerini yaptığımız indüksiyonlu ısıtma bölgesine gelerek ısıl işlem görür. Isıl işlem sonrasında 4 numara ile gösterilen ikinci bir buffer ve soğutma tankına alınır. Yine bu tankta da karıştırıcı mekanizma bulunmaktadır. Buradan 5 numara ile gösterilen dolum ünitesine gelerek şişelere dolum işlemi gerçekleşir ve yine konveyör üzerinde ilerleyerek 6 numara ile gösterilmiş kapak kapatma bölümüne gelir ve şişelerin ağzı kapatılır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, indüktif bir sıvı gıda dolun makinesinde kullanılmak amacıyla 3 farklı boru tasarımı için sayısal hesaplamalar ve analizler yapılmıştır. Her 3 boru da 1 inç, çizelge 40, endüstriyel tip olup 26,64 mm iç çapa sahip standart borudur. Tasarımlardan ilki düz borudur. İkinci tasarımda bu borunun yüzeyinde akış kırıcı 5 mm uzunluğunda kanatlar olduğu durum ele alınmıştır. Üçüncü tasarımda ise ısının boru merkezindeki bir milden transfer edildiği ve yine bu milin üzerinde akış kırıcı kanatların olduğu durum ele alınmıştır; bu tasarımda milin çapı 8 mm ve kanatların uzunluğu da 4 mm olarak alınmıştır. Tasarımlarda kullanılan akış kırıcı kanatlar her 100 mm'de 1 tane olarak yerleştirilmiştir. Her 3 tasarım için de giriş sıcaklığı 4°C, çıkış sıcaklığı 85°C ve debi 0,1 L/s olarak kabul edilmiştir. Merkezdeki milden ısıtılan tasarımda boru yüzeyi adyabatik kabulüyle işlemler yapılmıştır. Yüzey sıcaklıkları 90°C, 120°C ve 150°C olarak sabit kabul edilmiştir.

1. 85°C çıkış sıcaklığını elde etmek amacıyla yapılan hesaplamalara göre; sayısal olarak hesaplanan değerler ile FLUENT'te yapılan analizler sonucu ortaya çıkan boru boylarının arasında bariz fark olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, elle yapılan hesaplamalarda parçanın tek bir eleman olarak ele alınması olabileceği gibi yığın ortalama sıcaklığı baz alınarak hesaplama yapılması da olabilir. FLUENT analizleri ise parçayı sonlu ve çok sayıda eleman sayısına bölerek simüle ettiği için bu yöntemde akış ve ısı transferi karakteristiklerinin doğruluk payı daha yüksek şekilde yansıttığı öngörülmektedir. Sonuçların teyit edilmesi için ilerleyen çalışmalarda deneysel olarak incelenmesi tavsiye edilmektedir.

2. 150°C yüzey sıcaklığında yapılan modellemeler, her 3 tasarım tipi için de en kısa boru uzunluğu ile 85°C çıkış sıcaklığını sağlarken; bunun tam tersi olarak da 90°C yüzey sıcaklığındaki modellemeler, her 3 tasarım için de en uzun boru boyu ile 85°C çıkış sıcaklığını sağlamaktadır.

3. Akış profilini bozmak ve türbülansı artırmak; dolayısıyla ısı transferini artırmak amacıyla tasarımlarda kullanılan kanat şeklindeki parçaların, amaçlandığı gibi ısı transferini artırdığı gözlenmiştir. Model 1-2-3 için düz boru uzunlukları ile Model 4-5-6'daki yüzeyde akış kırıcı olan tasarımın boru uzunlukları arasında yaklaşık 2 kat

fark olduğu gözlenmiştir. Akış kırııcıların ısı transferini artırması boru uzunluğunun azalması yönünde olumlu etki yapmaktadır.

4. Isıtmanın boru yüzeyinden yapıldığı ilk 6 modelde ısı transfer yüzey alanı daha fazla olduğu için, yüzeydeki sıcaklık akışkana daha hızlı bir şekilde aktarılmaktadır. Merkezdeki mil üzerinden ısı transferinin yapıldığı Model 7-8-9'da daha uzun boruların gerektiği gözlenmiştir. Mil üzerinde akış kırııcı kanatlar bulursa da boru yüzeyinden yapılan ısıtmaya kıyasla, ısı transfer yüzey alanı çok daha küçük olmaktadır.

5. Boru uzunluğunun artması, akışkana daha fazla ısının aktarılmasını sağlamaktadır. Her bir sıcaklıkta gıdanın daha uzun süre seyretmesi, letalite değerleri açısından olumlu bir etki yapmaktadır. Gıda güvenliğini temin eden en düşük akışkan sıcaklığına sahip tasarım 79°C ile merkezi mil ve milin yüzey sıcaklığı 90°C olduğu Model 7 durumunda gerçekleşmektedir; aynı zamanda buradaki boru uzunluğu 5,19 m olarak görülmektedir. Gıda güvenliğini temin eden en yüksek sıcaklığa sahip tasarımın da yüzeyinde akış kırııcı kanatların bulunduğu ve yüzey sıcaklığı 150°C olan Model 6 olduğu ve buradaki boru uzunluğu da 0,54 m olarak görülmektedir. Sonuç olarak gıdanın güvenliğini sağlayan boru uzunluğu ve yüzey sıcaklığı ilişkisine baktığımızda bu iki parametrenin arasında ters orantı olduğu görülmektedir. Yani sabit debide, boru uzunluğu arttıkça gıda güvenliği açısından ihtiyaç duyulan ortalama akışkan sıcaklığı azalırken; boru uzunluğu azaldıkça sıvı gıda maddesinin daha yüksek sıcaklıklara çıkması gerektiği bu şekilde gözlenmiştir.

6. 85°C sıcaklık referans alınarak her 3 tasarım tipinin sağladıkları toplam letalite süreleri incelendiğinde yine uzunluğa bağlı olarak ısı transfer yüzeyine daha uzun süre temas eden merkezi mil tasarımının (model 7-8-9) en iyi letalite değerlerini sağladığı ve bu değerleri daha düşük akışkan sıcaklığında sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak, düşük yüzey sıcaklığında da olsa daha uzun süre ısı transferine maruz kalan akışkan gıda daha iyi letalite değerlerini sağlamaktadır. Bu çalışma dahilinde analiz edilen letalite değerlerinin deneysel olarak incelenmesi ve gıda maddesinin içerisindeki mikroorganizma miktarlarının gözlenmesi önerilmektedir.

7. Akış kırııcı kanatların bulunduğu tasarımlarda ısı transferinin daha iyi gerçekleştiği gözlenmiş olsa da pratikte üretilebilirlik ve uygulanabilirlik kolaylığı en fazla olan



düz boru tasarımıdır. Ayrıca düz boru tasarımının kurulum maliyeti de diğerlerine göre daha düşük olacaktır. Aynı zamanda, akış kırıncılı tasarımlardaki kanatların köşe bölgelerinde ölü noktalar oluşma riski olduğu için gıda proseslerindeki hijyen şartlarının sağlanıp sağlanmadığının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle, incelenen tasarımlar arasında gıda proseslerinde kullanıma en uygun olanı düz boru tasarımı olduğu öngörülmektedir.

8. Çalışmada elde edilen değerler incelendiğinde sıvı bir gıda maddesi olarak sütün, su ile elde edilen sonuçlara benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Hata payı düşürülerek simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların benzerlik oranının artırılması için sütün de bütün sıcaklık değerlerine bağlı olarak; viskozite, yoğunluk, özgül ısı gibi kriterlerinin araştırılması gerekmektedir.

9. İndüksiyon ile ısıtma yönteminin farklı gıda maddelerinde; farklı debi ve sıcaklık kriterleri ya da kapasite kriterleri gibi belirleyici parametreler için sıcaklık, zaman ve gıda maddesinin kalitesi açısından etkilerinin incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Farklı işlem koşullarının ısıtma sürecine etkisinin deneysel olarak incelenmesi tavsiye edilmektedir.

İndüksiyon ile ısıtmanın, doğrudan parçanın istenilen bölümünü ısıtabilmeye olanak sağladığı için enerji yönünden geleneksel yöntemlere göre çok daha verimli olduğu öngörülmektedir. Burada önemli olan değişkenler; debi, yüzey sıcaklığı, boru uzunluğu, akış tipi gibi makinenin tasarım şartlarını belirleyecek olan kriterlerdir. Çalışmada, 9 farklı tasarımda; boru uzunluğu ve yüzey sıcaklığı için analizler yapılarak sonuçları irdelenmiştir. Farklı parametreler için tasarlanacak olan makinelerin ayrıca analiz edilmesi ve deneysel verilerle sonuçların teyit edilmesi önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Totten, G. E. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies 2nd Edition. CRC Press, Portland, ABD, 2006, 848 s.
- [2] Kaya, O. Sürekli İndüksiyon Isıtma Sisteminin Kurulumu ve Vişne Suyunun Isıtılmasında Uygulanabilirliğinin Deneysel ve Kuramsal Olarak İncelenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2019, 110 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [3] Altıntaş, A., Yıldız, M. N., Kızılkaya, İ. İndüksiyon ısıtma prensibi ile çalışan mikrokontrol denetimli bir sıvı ısıtıcısı tasarımı. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2012, 29, 45-52.
- [4] Lenhard, R., Malcho, M., Kaduchova, K. Numerical simulation of induction heating thickwalled tubes. University of Zilina, Department of Power Engineering, MATEC, Web of Conferences, Zilina, Slovakia, 2018, 168, 1-6.
- [5] Zinn, S., Semiatin, S. L. Elements of Induction Heating Design, Control and Applications. Electric Power Research Institute, Inc. California, ABD, 1988, 335 s.
- [6] Vairamohan, B., Bran, I., De Bellefon, G. M. What's new in electrotechnologies for industrial process heating? Industrial Energy Efficient Technology Guide. 2007, 156-164.
- [7] Singh, R. P., Heldman, D. Introduction to Food Engineering 5th Edition. Academic Press, Cambridge, ABD, 2013, 892 s.
- [8] Pan, Z., Atungulu, G. G. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing. CRC Press, Florida, ABD, 2011, 300 s.
- [9] Çivi, C., Yılmaz, T., Başaran, A. Gıda işleme proseslerinde indüksiyon ile ısıtma kullanımının değerlendirilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2019, 7, 158-168.
- [10] Başaran, A., Yılmaz, T., Çivi, C. Application of inductive forced heating as a new approach to food industry heat exchangers: A case study – Tomato paste pasteurization. Journal of Thermal Analyses and Calorimetry. 2018, 134, 2265-2274.
- [11] Başaran, A., Yılmaz, T., Çivi, C. Comparison of Conventional and Inductive Driven Milk Pasteurization Systems According to Energy and Exergy. 2nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC 2017), October 11-13, 2017, 256-260.
- [12] Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J., Burdío, J. M. Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology and future challenges. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014, 61, 2509-2520.
- [13] German, R. M. Sintering Theory and Practice. John Wiley & Sons, Inc., Pennsylvania, ABD, 1996, 568 s.
- [14] Rapoport, E., Pleshivtseva, Y. Optimal Control of Induction Heating Processes. CRC Press, Florida, ABD, 2007, 349 s.
- [15] Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M. Handbook of Induction Heating. Marcell Dekker Inc. New York, ABD, 2003, 750 s.
- [16] Dereci, S. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2010, 89s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [17] Tokgöz, S. Elektromanyetik İndüksiyona Karşı Katı Cisimlerin Davranışı ve Sıcaklık Kontrolü. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2011, 101 s. (Yüksek Lisans Tezi).

- [18] Çetin, S. Bir Fazlı Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi ve Dizaynı. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 2005, 147 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [19] Garcia, F., Cros, M. J., Martin-Clouaire, R., Rellier, J. P. Modelling and simulating agricultural production processes. An ASAE meeting presentation paper. 2002, 02-3037.
- [20] Defraeye, T., Verboven, P., Nicolai, B. CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: Turbulence and boundary-layer modelling. *Journal of Food Engineering*. 2013, 114, 495-504.
- [21] Geankoplis, C. J. Taşınma Süreçleri ve Ayırma Süreci İlkeleri (S. Yapıcı, Çev.). İzmir, Güven Kitabevi, 2011, 1052 s.
- [22] Ibarz, A., Barbosa-Canovas, G. V. Unit Operations in Food Engineering. CRC Press, Washington, ABD, 2003, 873 s.
- [23] Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Bashir, M. H., Khan, A. R., Ahmad, K. N., Khan, S. CFD applications in various heat exchangers design: a review. *Applied Thermal Engineering*. 2012, 32, 1-12.
- [24] Defraeye, T., Verboven, P., Nicolai, B. CFD modelling of flow and scalar Exchange of spherical food products: Turbulence and boundary-layer modelling. *Journal of Food Engineering*. 2013, 114, 495-504.
- [25] Heldman, D. R., Lund, D. B., Sabliov, C. Handbook of Food Engineering. CRC Press, Florida, ABD, 2006, 1194 s.
- [26] Rahman, M. S. Handbook of Food Preservation. CRC Press, Florida, ABD, 2002, 1088 s.
- [27] Shah, R. K., Sekulic, D. P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons, New Jersey, ABD, 2012, 976 s.
- [28] Varzakas, T., Tzia, C. Handbook of Food Processing: Food Preservation. CRC Press, Florida, ABD, 2015, 691 s.
- [29] Üçüncü, M. Gıda Ambalajlama Teknolojisi. Meta Basım Matbaacılık Hizmetleri, İzmir, Türkiye, 2007, 896 s.
- [30] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları (Tahsin Engin Çev.). İzmir Güven Kitabevi, İzmir, Türkiye, 2008, 938 s.
- [31] Bylund, G. Dairy Processing Handbook, Tetra Pak Processing Systems, Lund, İsveç, 1995, 436 s.
- [32] Holsinger, V. H., Ratjowski, K. T., Stabel, J. R. Milk pasteurisation and safety: a brief history and update. *International Office of Epizootics*. 1997, 16,441-451.
- [33] Thermal Processing of Food. Whitepaper, Safefood 360°, Inc. 2014, 22 s.
- [34] Robertson, G. L. Food Packaging: Principles and Practice 3rd Edition. CRC Press, Florida, ABD, 2012, 687 s.

## EKLER

### EK A.3. Standart Çelik Boruların Boyutları Tablosu [21]

Nominal Boru Boyutu (inç)	Dış Çap		Çizelge No	Duvar Kalınlığı		İç Çap		İç kesit alanı	
	inç	mm		inç	mm	inç	mm	ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> × 10 <sup>4</sup>
1/8	0.405	10.29	40	0.068	1.73	0.269	6.83	0.00040	0.3664
			80	0.095	2.41	0.215	5.46	0.00025	0.2341
1/4	0.540	13.72	40	0.088	2.24	0.364	9.25	0.00072	0.6720
			80	0.119	3.02	0.302	7.67	0.00050	0.4620
3/8	0.675	17.15	40	0.091	2.31	0.493	12.52	0.00133	1.231
			80	0.126	3.20	0.423	10.74	0.00098	0.9059
1/2	0.840	21.34	40	0.109	2.77	0.622	15.80	0.00211	1.961
			80	0.147	3.73	0.546	13.87	0.00163	1.511
3/4	1.050	26.67	40	0.113	2.87	0.824	20.93	0.00371	3.441
			80	0.154	3.91	0.742	18.85	0.00300	2.791
1	1.315	33.40	40	0.133	3.38	1.049	26.64	0.00600	5.574
			80	0.179	4.45	0.957	24.31	0.00499	4.641
1 1/4	1.660	42.16	40	0.140	3.56	1.380	35.05	0.01040	9.648
			80	0.191	4.85	1.278	32.46	0.00891	8.275
1 1/2	1.900	48.26	40	0.145	3.68	1.610	40.89	0.01414	13.13
			80	0.200	5.08	1.500	38.10	0.01225	11.40
2	2.375	60.33	40	0.154	3.91	2.067	52.50	0.02330	21.65
			80	0.218	5.54	1.939	49.25	0.02050	19.05
2 1/2	2.875	73.03	40	0.203	5.16	2.469	62.71	0.03322	30.89
			80	0.276	7.01	2.323	59.00	0.02942	27.30
3	3.500	88.90	40	0.216	5.49	3.068	77.92	0.05130	47.69
			80	0.300	7.62	2.900	73.66	0.04587	42.61
3 1/2	4.000	101.6	40	0.226	5.74	3.548	90.12	0.06870	63.79
			80	0.318	8.08	3.364	85.45	0.06170	57.35

EK B.3. Doymuş Suyun Özellikleri Tablosu [30]

Sıcaklık T, °C	Doyma Basıncı P <sub>sat</sub> , kPa	Yoğunluk ρ, kg/m <sup>3</sup>		Buharlaşma Entalpisi h <sub>fg</sub> , kJ/kg	Orçül Isı C <sub>p</sub> , J/kg · K		Isı İletim Katsayısı k, W/m · K		Dinamik Viskozite μ, kg/m · s		Prandtl Sayısı Pr	Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı β, 1/K	
		Buhar	Sıvı		Buhar	Sıvı	Buhar	Sıvı	Buhar	Sıvı			
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 <sup>-3</sup>	0.922 × 10 <sup>-5</sup>	13.5	1.00	-0.068 × 10 <sup>-3</sup>
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 × 10 <sup>-5</sup>	11.2	1.00	0.015 × 10 <sup>-3</sup>
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 <sup>-3</sup>	0.946 × 10 <sup>-5</sup>	9.45	1.00	0.733 × 10 <sup>-3</sup>
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 <sup>-3</sup>	0.959 × 10 <sup>-5</sup>	8.09	1.00	0.138 × 10 <sup>-3</sup>
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 <sup>-3</sup>	0.973 × 10 <sup>-5</sup>	7.01	1.00	0.195 × 10 <sup>-3</sup>
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 <sup>-3</sup>	0.987 × 10 <sup>-5</sup>	6.14	1.00	0.247 × 10 <sup>-3</sup>
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	1.001 × 10 <sup>-5</sup>	5.42	1.00	0.294 × 10 <sup>-3</sup>
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 <sup>-3</sup>	1.016 × 10 <sup>-5</sup>	4.83	1.00	0.337 × 10 <sup>-3</sup>
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-5</sup>	4.32	1.00	0.377 × 10 <sup>-3</sup>
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 <sup>-3</sup>	1.046 × 10 <sup>-5</sup>	3.91	1.00	0.415 × 10 <sup>-3</sup>
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 <sup>-3</sup>	1.062 × 10 <sup>-5</sup>	3.55	1.00	0.451 × 10 <sup>-3</sup>
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 <sup>-3</sup>	1.077 × 10 <sup>-5</sup>	3.25	1.00	0.484 × 10 <sup>-3</sup>
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 <sup>-3</sup>	1.093 × 10 <sup>-5</sup>	2.99	1.00	0.517 × 10 <sup>-3</sup>
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 <sup>-3</sup>	1.110 × 10 <sup>-5</sup>	2.75	1.00	0.548 × 10 <sup>-3</sup>
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 <sup>-3</sup>	1.126 × 10 <sup>-5</sup>	2.55	1.00	0.578 × 10 <sup>-3</sup>
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 <sup>-3</sup>	1.142 × 10 <sup>-5</sup>	2.38	1.00	0.607 × 10 <sup>-3</sup>
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 <sup>-3</sup>	1.159 × 10 <sup>-5</sup>	2.22	1.00	0.653 × 10 <sup>-3</sup>
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.176 × 10 <sup>-5</sup>	2.08	1.00	0.670 × 10 <sup>-3</sup>
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 <sup>-3</sup>	1.193 × 10 <sup>-5</sup>	1.95	1.00	0.702 × 10 <sup>-3</sup>
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 <sup>-3</sup>	1.210 × 10 <sup>-5</sup>	1.85	1.00	0.716 × 10 <sup>-3</sup>
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 <sup>-3</sup>	1.227 × 10 <sup>-5</sup>	1.75	1.00	0.750 × 10 <sup>-3</sup>
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.261 × 10 <sup>-5</sup>	1.58	1.00	0.798 × 10 <sup>-3</sup>
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 <sup>-3</sup>	1.296 × 10 <sup>-5</sup>	1.44	1.00	0.858 × 10 <sup>-3</sup>
130	270.1	934.6	1.496	2174	4253	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 <sup>-3</sup>	1.330 × 10 <sup>-5</sup>	1.33	1.01	0.913 × 10 <sup>-3</sup>
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 <sup>-3</sup>	1.365 × 10 <sup>-5</sup>	1.24	1.02	0.970 × 10 <sup>-3</sup>
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 <sup>-3</sup>	1.399 × 10 <sup>-5</sup>	1.16	1.02	1.025 × 10 <sup>-3</sup>
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 <sup>-3</sup>	1.434 × 10 <sup>-5</sup>	1.09	1.05	1.145 × 10 <sup>-3</sup>
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 <sup>-3</sup>	1.468 × 10 <sup>-5</sup>	1.03	1.05	1.178 × 10 <sup>-3</sup>
180	1002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 <sup>-3</sup>	1.502 × 10 <sup>-5</sup>	0.983	1.07	1.210 × 10 <sup>-3</sup>
190	1254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-5</sup>	0.947	1.09	1.280 × 10 <sup>-3</sup>
200	1553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.571 × 10 <sup>-5</sup>	0.910	1.11	1.350 × 10 <sup>-3</sup>
220	2318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 <sup>-3</sup>	1.641 × 10 <sup>-5</sup>	0.865	1.15	1.520 × 10 <sup>-3</sup>
240	3344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 <sup>-3</sup>	1.712 × 10 <sup>-5</sup>	0.836	1.24	1.720 × 10 <sup>-3</sup>
260	4688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 <sup>-3</sup>	1.788 × 10 <sup>-5</sup>	0.832	1.35	2.000 × 10 <sup>-3</sup>
280	6412	750.8	33.15	1544	5290	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 <sup>-3</sup>	1.870 × 10 <sup>-5</sup>	0.854	1.49	2.380 × 10 <sup>-3</sup>
300	8581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 <sup>-3</sup>	1.965 × 10 <sup>-5</sup>	0.902	1.69	2.950 × 10 <sup>-3</sup>
320	11274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 <sup>-3</sup>	2.084 × 10 <sup>-5</sup>	1.00	1.97	
340	14586	610.5	92.62	1028	8240	11870	0.469	0.1110	0.070 × 10 <sup>-3</sup>	2.255 × 10 <sup>-5</sup>	1.23	2.43	
360	18651	528.3	144.0	720	14690	25800	0.427	0.178	0.060 × 10 <sup>-3</sup>	2.571 × 10 <sup>-5</sup>	2.06	3.73	
374.14	22090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 <sup>-3</sup>	4.313 × 10 <sup>-5</sup>			

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Samet AKKAYA  
Doğum Yeri ve Yılı : Manisa, 1990  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : sametakkaya13@gmail.com

### Eğitim Durumu

Lise : Demirci Anadolu Öğretmen Lisesi, 2008  
Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü, 2015  
Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü

### Mesleki Deneyim

Ağar Oto Egzoz San. ve Tic. A.Ş. 2015-2016  
Novatek Endüstriyel Sistemler San. ve Tic. Ltd. Şti. 2016-2018  
Whirlpool Beyaz Eşya San. ve Tic. A.Ş. 2018-..... (halen)