

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAKIR FİLMAŞİN ÜRETİMİNİN SAYISAL AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ BENZETİMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUDRET KUYUMCU

DENİZLİ, NİSAN- 2024

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



BAKIR FİLMAŞIN ÜRETİMİNİN SAYISAL AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ BENZETİMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUDRET KUYUMCU

DENİZLİ, NİSAN- 2024

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

KUDRET KUYUMCU

ÖZET

**BAKIR FİLMAŞIN ÜRETİMİNİN SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
BENZETİMLERİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KUDRET KUYUMCU
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MEHMET ORHAN)**

DENİZLİ, NİSAN- 2024

Bu çalışmada bakır tel üretimini için gerekli olan yarı mamulün (filmaşın) üretimi için hali hazırda kullanılan teknolojilerin mukayese edilmesi ve yeni bir üretim metoduna ilişkin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği benzetimleri yapılmıştır. Yeni bir yöntem geliştirilmesindeki temel maksat, oksijen ile temas etmeden yapılan üretim hızını ve enerji verimliliğini arttırmaktır. Bu kapsamda, sürekli üretimin gerçekleşmesi için ergimiş metale su soğutmalı bir ısı değiştirgecinden geçirilerek bakır filmaşın üretiminin benzetimi çalışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Sürekli Döküm, Bakır, Filmaşın, Isı Değiştiriciler, Zorlanmış Taşınım,

ABSTRACT

CFD SIMULATIONS OF COPPER WIRE-ROAD PRODUCTION
MSC THESIS
KUDRET KUYUMCU
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. MEHMET ORHAN)

DENİZLİ, APRIL 2024

In this study, Computational Fluid Dynamics simulations were carried out to compare the technologies currently used to produce the semi-finished product (wire rod) required for copper wire production and to develop a new production method. The main purpose of the new method is to increase the production speed and energy efficiency without contact with oxygen. In this context, copper wire rod production was simulated by passing molten metal through a water-cooled heat exchanger for continuous production.

KEYWORDS: Continuous Casting, Copper, Wire Rod, Heat Exchanger, Forced Convection.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1 Bakırın Tarihçesi	2
2.2 Bakırın Yapısı ve Fiziksel Özellikleri	3
2.3 Bakırın Kullanım Alanları	4
2.4 Bakır Filmaşın	4
2.4.1 “Southwire” Sürekli Filmaşın Üretim Prosesi	5
2.4.2 Upcast (Outokumpu) Sürekli Döküm	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	8
3.1 Materyal.....	8
3.1.1 Bakırın Termofiziksel Özellikleri	9
3.2 Yöntem	11
3.2.1 Matematiksel Model	11
3.2.2 Sayısal Yöntem	15
3.2.3 Had Çözücü.....	19
3.3 Tasarımlar	21
3.3.1 Tasarım-1	21
3.3.1.1 Tasarım-1 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	21
Tasarım-1’e ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.4’te gösterilmiştir.	22
3.3.1.2 Tasarım-1 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	22
3.3.2 Tasarım-2	24
3.3.2.1 Tasarım-2 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	24
3.3.2.2 Tasarım-2 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	25
3.3.3 Tasarım-3	26
3.3.3.1 Tasarım-3 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	26
3.3.3.2 Tasarım-3 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	27
3.3.4 Tasarım-4	29
3.3.4.1 Tasarım-4 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	29
3.3.4.2 Tasarım-4 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	30
3.3.5 Tasarım-5	32
3.3.5.1 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri.	32
3.3.5.2 Tasarım-5 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	33
3.3.6 Tasarım-6	35

3.3.6.1	Tasarım-6 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	35
3.3.6.2	Tasarım-6 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	36
3.3.7	Tasarım-7	38
3.3.7.1	Tasarım-7 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	38
3.3.7.2	Tasarım-7 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	39
3.3.8	Tasarım-8	41
3.3.8.1	Tasarım-8 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	41
3.3.8.2	Tasarım-8 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	42
3.3.9	Tasarım-9	44
3.3.9.1	Tasarım-9 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri	44
3.3.9.2	Tasarım-9 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları.....	45
3.4	Deneysel Çalışma ile Mukayese.....	47
3.5	Deneysel Çalışmanın Had Çözücü ile Mukayese Edilmesi	48
4.	SONUÇLAR.....	53
5.	KAYNAKLAR.....	55
6.	ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Bakır Filmaşın	5
Şekil 2.2: Southwire sürekli döküm proses şeması. (Ayhan, Ilgaz 2002).....	6
Şekil 2.3: Upcast Prosesinin Şematik ve Gerçek Görüntüsü (Jones ve diğ. 2021). 7	
Şekil 3.1: Katılma Prosesi Şematik Görünüşü (Vynnycky M, 2018).....	8
Şekil 3. 2 Sürekli döküm ile katılma süreci	14
Şekil 3. 3 İletim ile Gerçekleşen Isı Transferindeki Sıcaklık Bölgeleri.....	18
Şekil 3. 4: Had çözücü modeline ait sınır koşulları	20
Şekil 3. 5: Had çözücü modeline ait geometrik koşulları	20
Şekil 3.6: Tasarım-1 Had Çözücü Yakınsama Grafiği	22
Şekil 3.7: Tasarım-1 2D Sıcaklık Dağılımı.....	23
Şekil 3.8: Tasarım-2 Had Çözücü Yakınsama Grafiği	25
Şekil 3.9: Tasarım-2 2D Sıcaklık Dağılımı.....	26
Şekil 3. 10: Tasarım-3 Had Çözücü Yakınsama Grafiği	28
Şekil 3. 11: Tasarım-3 2D Sıcaklık Dağılımı.....	28
Şekil 3.12: Tasarım-4 Had Çözücü Yakınsama Grafiği.....	30
Şekil 3.13: Tasarım-4 2D Sıcaklık Dağılımı.....	31
Şekil 3.14: Tasarım-5 Had Çözücü Yakınsama Grafiği.....	33
Şekil 3.15: Tasarım-5 2D Sıcaklık Dağılımı.....	34
Şekil 3.16: Tasarım-6 Had Çözücü Yakınsama Grafiği.....	36
Şekil 3.17: Tasarım-6 2D Sıcaklık Dağılımı.....	37
Şekil 3.18: Tasarım-7 Had Çözücü Yakınsama Grafiği.....	39
Şekil 3.19: Tasarım-7 2D Sıcaklık Dağılımı.....	40
Şekil 3.20: Tasarım-8 Had Çözücü Yakınsama Grafiği.....	42
Şekil 3.21: Tasarım-8 2D Sıcaklık Dağılımı.....	43
Şekil 3.22: Tasarım-9 Had Çözücü Yakınsama Grafiği.....	45
Şekil 3.23: Tasarım-9 2D Sıcaklık Dağılımı.....	46
Şekil 3. 24 Deneysel çalışmanın kalıp modeli	47
Şekil 3. 25 Deneysel model Had çözücü yakınsama grafiği.....	49
Şekil 3. 26 Deneysel model sıcaklık dağılımı	50
Şekil 3.27: 1470 K ve 1356 K arası sıcaklık dağılımı	50
Şekil 3. 28 Deneysel model hız vektörleri	51
Şekil 3. 29 Deneysel Model Sıcaklığın Konuma Göre Değişimi.....	51
Şekil 3. 30 Deneysel Model Kritik Değerler.....	52

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2. 1: Bakırın Fiziksel Özellikleri	3
Tablo 3.1: Yoğunluğun ve viskozitenin sıcaklık ile değişimi (Marc J. Assael ve diğ., 2010).	9
Tablo 3.2: Tasarım-1 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	21
Tablo 3.3: Tasarım-1 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	21
Tablo 3.4: Tasarım-1 Had Çözücü Parametreleri	22
Tablo 3.5: Tasarım-1 Korelasyon ve Had Çözücü Sonuçları	22
Tablo 3.6: Tasarım-2 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	24
Tablo 3.7: Tasarım-2 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	24
Tablo 3.8: Tasarım-2 Had Çözücü Parametreleri	24
Tablo 3.9: Tasarım-2 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları	25
Tablo 3.10: Tasarım-3 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	27
Tablo 3.11: Tasarım-3 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	27
Tablo 3.12: Tasarım-3 Had Çözücü Parametreleri	27
Tablo 3.13: Tasarım-3 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları	27
Tablo 3.14: Tasarım-4 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	29
Tablo 3.15: Tasarım-4 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	29
Tablo 3.16: Tasarım-4 Had Çözücü Parametreleri	29
Tablo 3.17: Tasarım-4 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları	30
Tablo 3.18: Tasarım-5 Akışkanlara Ait Sınır Koşulları.....	32
Tablo 3.19: Tasarım-5 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	32
Tablo 3.20: Tasarım-5 Had Çözücü Parametreleri	32
Tablo 3.21: Tasarım-5 Sayısal ve Had Çözücü Parametreleri	33
Tablo 3.22: Tasarım-6 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	35
Tablo 3.23: Tasarım-6 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	35
Tablo 3.24: Tasarım-6 Had Çözücü Parametreleri	35
Tablo 3.25: Tasarım-6 Sayısal ve Had Çözücü Parametreleri	36
Tablo 3.26: Tasarım-7 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	38
Tablo 3.27: Tasarım-7 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	38
Tablo 3.28: Tasarım-7 Had Çözücü Parametreleri	38
Tablo 3.29: Tasarım-7 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları	39
Tablo 3.30: Tasarım-8 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	41
Tablo 3.31: Tasarım-8 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	41
Tablo 3.32: Tasarım-8 Had Çözücü Parametreleri	41
Tablo 3.33: Tasarım-8 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları	42
Tablo 3.34: Tasarım-9 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları.....	44
Tablo 3.35: Tasarım-9 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri	44
Tablo 3.36: Tasarım-9 Had Çözücü Parametreleri	44
Tablo 3.37: Tasarım-9 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları	45
Tablo 3. 38 Deneysel çalışmanın sınır koşulları	47
Tablo 3. 39 Deneysel geometriye ait mesh kalite değerleri	48
Tablo 3. 40 Deneysel model Had çözücü parametreleri	48
Tablo 3. 41 Deneysel model ve Had çözücü sonuçları	48
Tablo 3. 42 Deneysel Model Had Çözücü ve Sayısal Yöntem Kritik Uzunluklar	49

Tablo 3. 43 Deneysel Model Sıcaklığın Konuma Göre Değişimi	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Tablo 3. 44 Deneysel Model Kritik Sıcaklıklar ve Konumları	52
Tablo 4.1: Sayısal Çözüm ve Had Çözücü Kıyaslamaları	53



SEMBOL LİSTESİ

\dot{m}	:	Kütlesel Debi (kg/s)
ρ	:	Yoğunluk (kg/m ³)
μ	:	Dinamik Viskozite (mPa. s)
C_p	:	Özgül Isı (J/kg.K)
h	:	Özgül Entalpi (kJ/kg)
V	:	Hacim (m ³)
k	:	Isı İletim Katsayısı (W/m.K)
α	:	Isıl Yayınım Katsayısı (m ² /s)
Nu	:	Nusselt Sayısı
Re	:	Reynold Sayısı
Pr	:	Prandtl Sayısı
Q	:	Isı aktarım hızı (W)
ΔT	:	Sıcaklık Farkı (K)
ΔT_m	:	Logaritmik sıcaklık farkı (K)
D_h	:	Hidrolik Çap (mm)
L	:	Boru Uzunluğu (mm)
h	:	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² .K)
k	:	Türbülans kinetik enerjisi
ω	:	Spesifik dağılım oranı
\widetilde{G}_k	:	Türbülans kinetik enerjisinin üretimi
F	:	Modele bağlı kaynak terimleri
G_ω	:	Spesifik dağılım oranının üretimi
r_k	:	k nın etkin yayılımı
r_ω	:	ω nın etkin yayılımı
Y_k	:	k nın türbülans nedeniyle dağılımı
Y_ω	:	ω nın türbülans nedeniyle dağılımı
D_ω	:	Çapraz difüzyon terimi
S_k	:	Türbülans k kaynak terimi
S_ω	:	Türbülans ω kaynak terimi
k_{eff}	:	Etkili iletkenlik
Sm	:	Kütle kaynak terimi
\vec{J}_j	:	j türünün yayılma akışıdır
$k_{eff} \nabla T$:	Enerji transferinden dolayı ortaya çıkan iletim
$\sum_j h_j \vec{J}_j$:	Enerji transferinden dolayı ortaya çıkan tür difüzyonu
$\overline{T_{eff}} \cdot \vec{v}$:	Enerji transferinden dolayı ortaya çıkan viskoz dağılımı

ÖNSÖZ

Bu tez, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Bu tez çalışmasında, bilgi ve tecrübelerini bana aktaran, her koşulda desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Mehmet ORHAN' a ve yüksek lisans sürecim de bana kattıklarından dolayı Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU, Doç. Dr. Gülay YAKAR ve Prof. Dr. Burçin DEDA ALTAN'a sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Varlıkları ile her zaman yaşamıma değer katan ve beni bugünlere getiren aileme sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

1. GİRİŞ

Bakır, insanların maden çağından beri işleyip kullanmakta olduğu değerli madenlerden biridir. Günümüzde çoğunlukla elektrik teknolojileri alanında kullanılan bakır şekil verilebilme kabiliyeti ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Bakır, kullanım alanına göre farklı üretim yöntemlerine sahiptir. Günümüzde kullanılan yöntemlerin düşük kütleli debili ve dolayısıyla enerji tüketiminin fazla olması daha verimli tekniklerin gelişimi zaruri kılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, öncelikle bakır filmaşın üretim teknikleri sunulduktan sonra mevcut bir tekniğin dezavantajlarını gidermek adına yeni bir yaklaşım sunulacak ve bu yaklaşımın uygulanabilirliği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) benzetimleri ile sınanacaktır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar sadece bakırın filmaşın olarak değil istenilen geometrilerde sürekli dökümünü yapmak için ampirik bağıntıların geliştirilmesini sağlayacaktır. Aynı zamanda, kullanılan bu metodoloji ile, diğer metal türlerinin de öne sürülen üretim tekniği açısından işlenebilirliğine kapı aralanacaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Bakırın Tarihçesi

İnsanoğlunun teknolojik evrimine önemli katkılarda bulunan ilk metaller arasında nispeten düşük sıcaklıklarda eriyebilen metaller olmuştur. Arkeolojik bulgular ve antik kaynaklara dayanarak, bakırın insanoğlu tarafından keşfedilen ilk metal olduğu görülmektedir. Bu keşif, taş devrinden maden devrine (Bronz Çağı) geçişi başlatmıştır. Doğada saf olarak bulunan bakır, eski çağlarda basit araçlar, özellikle çekiç gibi aletlerle şekillendirilerek kullanılmıştır. Bakırın kullanımı evrimleşerek, bakırın çömlekçi fırınlarında eritilmesi farklı formlarda ve işlevlerde üretime yol açmıştır. Ardından, bakır ve kalay cevherlerinin bir araya getirilerek eritilmesi, tarih boyunca kaydedilen ilk alaşım olan bronzun (tunç) üretilmesine olanak tanımıştır. Tarih öncesi dönemde, yaklaşık M.Ö. 7000'den önce, bakırın kullanıldığı düşünülmektedir. Bakır-kalay bronzunun M.Ö. 3700-2400 yılları arasında önemli bir kullanım geçmişine sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca, bakır çinko alaşımı olan pirincin ise Roma İmparatorluğu öncesinde kullanılmaya başlandığı tahmin edilmektedir (Ehsani ve Yazıcı 2015).

Bakırın keşfi, kullanımı ve üretimi konusunda Anadolu bölgesi tarihi gelişmelere tanıklık etmiştir. Konya yakınlarındaki Çatalhöyük bölgesinde günümüzden 9000-10000 yıl öncesi bakır metalinin kullanıldığına dair bulgular elde edilmiştir. Ayrıca İran'ın Tepe Sialk bölgesinde bulunan bakır kalıntıları uzun bir süre dünyadaki en eski kalıntılar olarak bilinmekteydi. Anadolu da son yapılan keşifler ile birlikte bilinen en eski bakır madeni kalıntılarının İran bölgesinde değil Anadolu da coğrafyasın da olduğunu göstermektedir. Ayrıca İran, Mısır, Mezopotamya, Hindistan, İspanya ve Çin gibi diğer uygarlıklarda bakır metalini keşfeden ve kullanan topluluklar arasındaydı (Ehsani ve Yazıcı 2015).

2.2 Bakırın Yapısı ve Fiziksel Özellikleri

Bakır, 8.93 g/cm^3 yoğunluğa sahip yüksek iletkenliğe sahip ağır bir metaldir. Atom numarası 29, ergime sıcaklığı $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ ve kaynama sıcaklığı $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir (1 atm). Periyodik cetvelde 1B geçiş elementleri grubunda yer alır ve bu gruba ismini veren birkaç geçiş elementi arasında yer alır. Bakır, oda sıcaklığında katı halde bulunur. Kristal yapısı kübiktir ve kırmızımsı bir renge sahiptir. Kırmızı ve turuncu ışığı yansıtarak, diğer frekansları absorbe eder ve bu nedenle hoş bir kırmızımsı renk ortaya çıkar. Bakır, dövülebilir, sünek ve hem ısı hem de elektrik iletkenliği açısından son derece etkili bir metaldir. Kimyasal reaktivitesi düşüktür ve normal şartlarda +1 ve +2 oksidasyon durumlarında bileşikler oluşturur. Bakır metalinin özelliği, bazen serbest metal olarak doğada bulunmasıdır. Bu özellikler, bakırın çok yönlü bir metal olmasını sağlar ve endüstri, elektrik iletimi, ve de dekoratif amaçlar dahil olmak üzere birçok uygulama alanında kullanılır (Kökeş 2013).

Tablo 2. 1: Bakırın Fiziksel Özellikleri (Omaç, 2010).

	KATI	SIVI (ergimiş)
Erime Noktası ($^\circ\text{C}$)	1083	
Kaynama Noktası ($^\circ\text{C}$)		2300.00
Yoğunluk (g/cm^3)	8.93	
Füzyon Isısı (kJ/kmol)	13.14 [206 (kJ/kg)]	
Buharlaşma Isısı (kJ/kmol)		300.5

Tablo 2.1’de verilen özelliklere ait değerlerin her biri sıcaklığın bir fonksiyonu olup, fonksiyonlar ve yazarları sayısal yöntemler kısmında detaylı olarak ele alınmıştır.

2.3 Bakırın Kullanım Alanları

Bakır doğada mineral olarak bulunur. Bilinen bakır mineralleri sırasıyla Kalkosit, Kovelit, Kalkopirit, Kuprit, Enargit, Azurit ve Malahit'tir. Bakır uygulamada sadece saf olarak değil ayrıca Çinko, Silisyum, Magnezyum, Nikel ve Kurşun elementleriyle birlikte kullanılarak, Prinç, Bronz Tunç, Silisyum Tunç, Magnonin ve Nikel Gümüşü gibi alaşımlar da elde edilebilir (Akkaş 2011).

Rafine fırınlarında saflaştırılan bakır ileride tabii tutulacağı işleme göre değişik form verilmek üzere çeşitli şekillerde dökülür. Bakır minerali, türüne göre farklı rafinasyon işlemlerinden geçerek saflaştırılır. Saflık seviyesi en yüksek bakır türü Katot bakırdır. Katot bakır elde etmek için Anot bakır elektroliz işlemine tabii tutulur. Anot bakırın içerisindeki empüritelere (bakır harici elementler) elektroliz işlemi ile elimine edilerek minimum % 99.99 saflıkta elektrolitik katot bakır elde edilir. Elde edilen yüksek saflıktaki bu ürün elektrik üretim ve dağıtım, telekomünikasyon gibi alanlarda kullanılır.

Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri bakır, elektrik santralleri ve ısı ileten materyallerin vazgeçilmez girdisi haline getirmektedir. Soğuk hava makina ve teçhizatında, paslanmaz özelliğinden ötürü nakliye vasıtalarında ve dış kaplamalarda bakırın büyük kullanım alanları bulunmaktadır. Bunlara ilaveten bakırın kaynak işlerinde, metalurjide ve bronz üretiminde önemli yeri olup, daha birçok kullanım alanlarını saymak mümkündür. En geniş kullanım alanları sırasıyla; elektrik üretim ve iletimi ile ilgili tesislerde, inşaatta, ulaşım makina ve teçhizatındadır.

2.4 Bakır Filmaşın

Filmaşın, tel gibi ince kesitli metallere verilen isim olup tel çekmeye girmeden önceki yarı mamuldür. Filmaşın bakır üretimi için uygulama da yaygın olarak kullanılan 2 farklı metodoloji mevcuttur. Southwire üretim prosesinde oksijenli elektrolitik bakır (ETP) filmaşın üretimi için kullanılırken, Outokumpu prosesi ile oksijensiz bakır filmaşın (OFC) üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu metodolojiler kullanılarak elde edilen ürünlerin başta saflık değerleri olmak üzere fiziksel özellikleri de farklılık göstermektedir.

Oksijenli ve Oksijensiz bakırın mekanik özellikleri kıyaslandığında, özellikle soğuk şekillendirme davranışları açısından iki ürün arasında davranış farklılıkları gözlemlenmektedir. Oksijenli bakır soğuk şekil değiştirme sırasında içinde bulunan oksit partiküllerinden dolayı mekanik hasara yatkındır. Aynı mekanik gerilme değerlerinde oksijensiz bakır oksijenliye daha büyük Poisson oranına sahiptir (Ayhan ve Ilgaz 2002). Bir diğer deyişle oksijensiz bakır ile tel çekme mekanizmalarında daha küçük kesit alanlarına ulaşmak mümkündür. Özet olarak oksijensiz tek fazlı bakır, oksijenli bakıra göre deformasyon davranışı ve kırılma mukavemeti gibi plastik şekil değiştirme faktörlerinde daha üstün özelliklere sahiptir (Ayhan ve Ilgaz 2002).



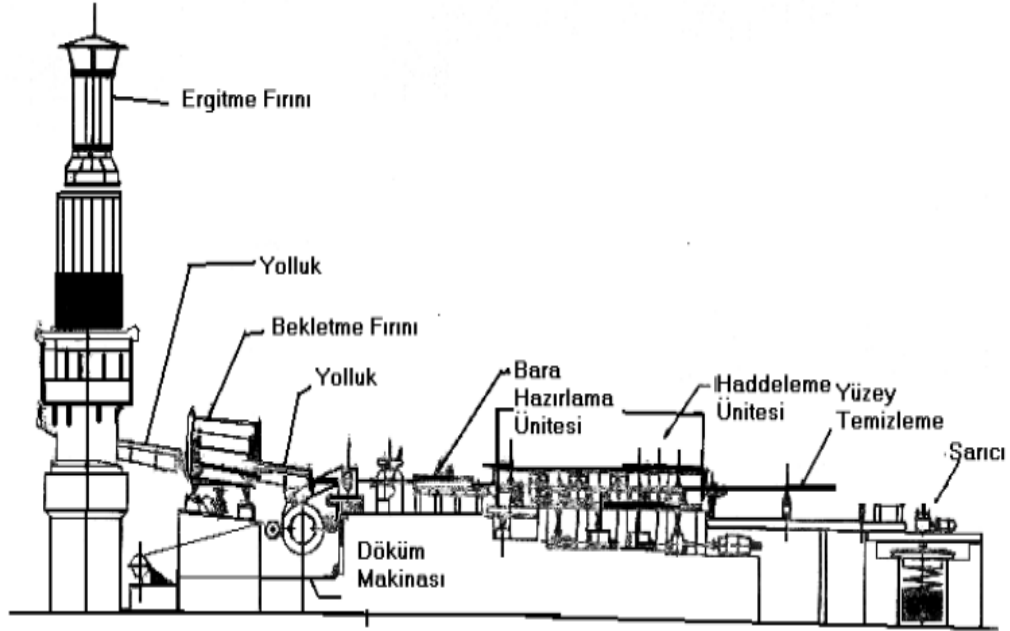
Şekil 2.1: Bakır Filmaşın

Sürekli döküm teknolojisi ile üretilmiş olan bakır filmaşın Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

2.4.1 “Southwire” Sürekli Filmaşın Üretim Prosesi

Bu metodolojide genel işlemler sırasıyla ergitme, döküm, sıcak şekillendirme ve paketlenmedir. Bakır katodlar önce ergitme fırınına yüklenir ve orada faz değiştirmesi beklenir. Faz değişim işlemi tamamlandıktan sonra ergimiş haldeki bakır atmosfer kontrollü yolluklar vasıtasıyla bekleme fırınına gönderilir. Bekleme fırınında kimyasal içerik kontrolü yapılır ve hız stabilize edilir. Sonra, ergiyik bakır atmosfer kontrollü yolluklar vasıtasıyla tandişe, oradan da döküm makinasına gönderilir.

Döküm makinasından bara olarak çıkan (katı fazda) ürün haddeleme ünitesine girerek son şeklini alır (Ayhan ve Ilgaz 2002).



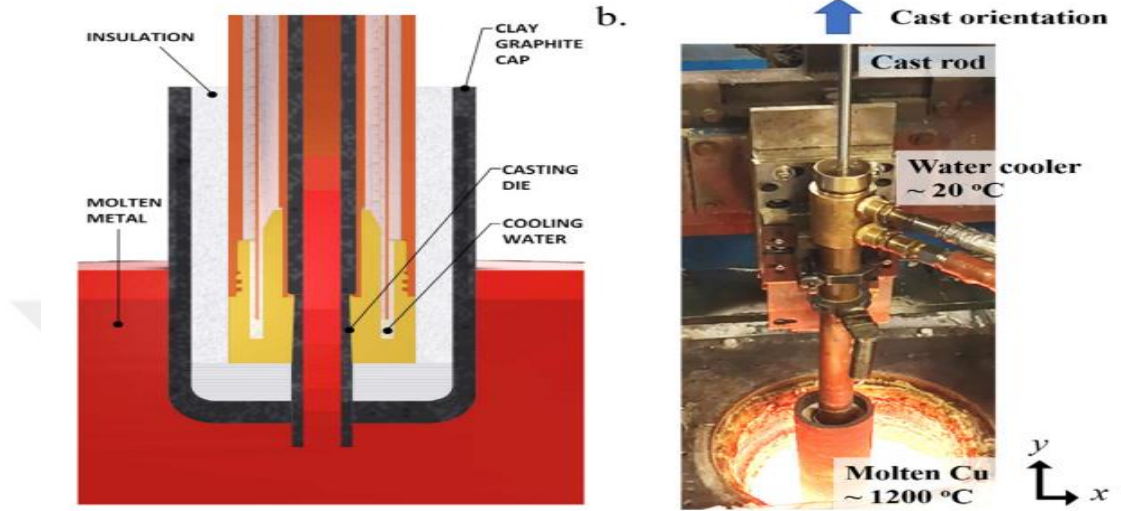
Şekil 2.2: Southwire sürekli döküm proses şeması. (Ayhan, Ilgaz 2002).

Oksijen ile teması kesilmemiş sürekli döküm yöntemi olan Soutwire prosesi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

2.4.2 Upcast (Outokumpu) Sürekli Döküm

Bu proses oksijensiz bakır filmaşın üretim yöntemi olup Southwire metodolijisinden yöntem olarak farklı çalışmaktadır. Buradaki prosesi özetleyecek olursak, ergitme fırınının içine daldırılan kalıplar vasıtasıyla yukarı doğru çekilen ergimiş bakır burada faz değiştirerek katı hale gelir. Prosesin oksijen ile temasını ince taneli grafit örtüsü kesmektedir. Yukarı yönde hareketi başlatmak için Starter bara adı verilen çubuk ergimiş metalin içine kalıpla birlikte daldırılır. Daldırılan çubuğun ön ve yan yüzeylerine ergimiş metal yapışır ve çubuk daha sonra belirli bir hızda yukarı çekilir. Çubuğa yapılan ilk yapışma işlemi adezyon daha sonraki süreç ise kohezyon ile meydana gelir. Böylelikle sürekli olarak yukarı yönlü hareketi sağlamaktadır.

Bu yöntem de ham madde olarak yüksek saflıkta bakır katod kullanılmaktadır. Bunun sebebi üretim yaparken bakır içerisinde çözülmüş oksijenin mevcut olmaması dolayısıyla empüritelerin oksitlenerek zararlı etkilerinin ortadan kaldırılmasının mümkün olmayışıdır.



Şekil 2.3: Upcast Prosesinin Şematik ve Gerçek Görüntüsü (Jones ve diğ. 2021).

Outokumpu prosesine yönelik şematik gösterim ve canlı örnek Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

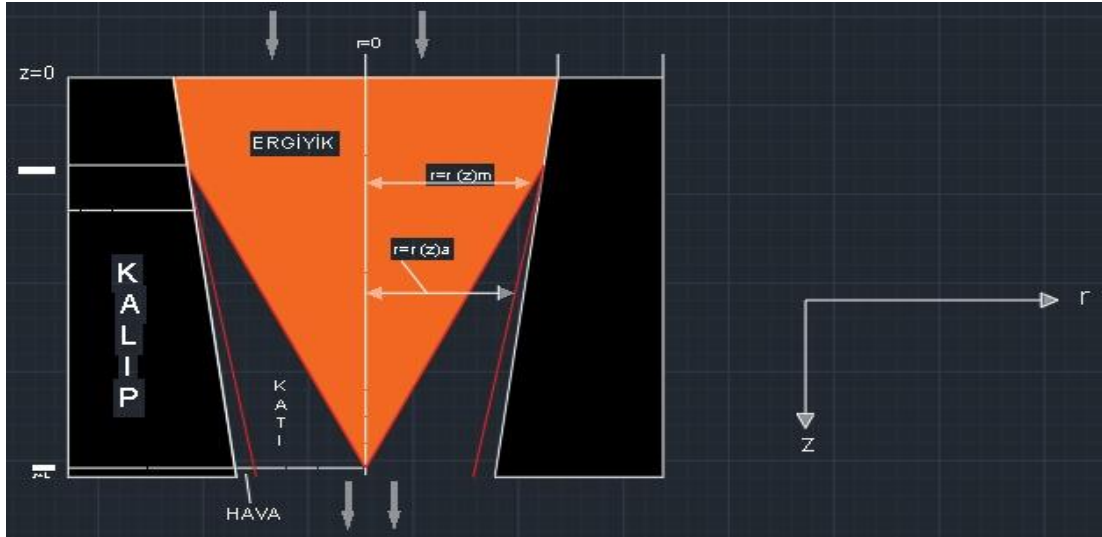
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bir sürekli döküm prosesinde, ısı değiştirgecini doğru bir şekilde boyutlandırabilmek için, tam katılaşmanın nerede meydana geleceğine dair bir tahmine sahip olmak önemlidir. Bu, akışkan akışı, ısı transferi ve faz değişimini dikkate alan bir model gerektirir; Bunun için genelleştirilmiş iki boyutlu (2D) bir katılaşma şeması şekil 3.1'de gsterilmektedir.

şekil 3.1'de Ergimiş metalin katılaşma esnasında büzülmesi, kalıptan çekilmesi ve kalıbın kendisinin genişlemesi sonucunda kalıp duvarı ile katılaşmış kabuk arasında bir hava boşluğu oluşurmaktadır. Hava boşluğu oluşumu kalıp ve kabuk arasında etkin ısı transferini engeller, daha uzun katılaşma mesafesine yol ağar ve kalıp sivrilmesi gibi ek proses tasarımı gerektirir (Vynnycky, 2018).

Boyutlandırma işlemlerini yapabilmek için kullanılacak olan malzemenin (bakır, alüminyum) termofiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.



şekil 3.1: Katılaşma Prosesi şematik Görünüşü (Vynnycky M, 2018)

Bir katılaşma prosesinde ergimiş metalin davranışı şekil 3.1 ile gsterilmiştir.

3.1.1 Bakırın Termofiziksel Özellikleri

Yoğunluk, viskozite, özgül ısı, ısı iletim katsayısı, ısıl yayılım katsayısı ve entalpi gibi termofiziksel özelliklerin sıcaklığa göre değişiminin doğru tayini sürekli döküm metodunun doğru modellenebilmesi için elzemdir.

Tablo 3.1’de kütle yoğunluğu ve viskozitenin sıcaklığa göre değişimi verilmiştir.

Tablo 3.1: Yoğunluğun ve viskozitenin sıcaklık ile değişimi (Marc J. Assael ve diğ., 2010).

Sıcaklık (K)	Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Viskozite (mPa.s)
1356	7998	4.03
1400	7962	3.74
1450	7921	3.46
1500	7881	3.21
1550	7840	3.00
1600	7799	2.81
1650	7758	2.65

Sabit basınç altında özgül ısıya ilişkin ampirik bağıntı ise Eşitlik 3.1’de ifade edilmiştir (Biswajit 2005).

$$c_p = 0.1009T(K) + 358.4 \quad (T > 270K) \quad (3.1)$$

Isı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimini veren ampirik bağıntılar Eşitlik 3.2 ve 3.3’te verilmiştir (Cagran 2009).

$$k(T) = 418.775 - 0.07509T \quad (1100K < T < 1356K) \quad (3.2)$$

$$k(T) = 89.7067 + 0.04976T \quad (1356K < T < 1900K) \quad (3.3)$$

Isıl yayılım katsayısının sıcaklık ile değişimini veren ampirik bağıntı Eşitlik 3.4 ve 3.5’te gösterildiği gibidir (Cagran 2009).

$$\alpha(T) = 9.7493 \times 10^{-5} - 1.5568T \quad (1100 K < T < 1356 K) \quad (3.4)$$

$$\alpha(T) = 1.7314 \times 10^{-5} + 1.3903T \times 10^{-8} \quad (1356\text{K} < T < 1900\text{K}) \quad (3.5)$$

Entalpinin sıcaklık ile değişimini veren bağıntılar Eşitlik 3.6 ve 3.7'de verilmiştir (Cagran 2009).

$$h(T) = -207.894 + 0.4809T \quad (1100 \text{ K} < T < 1356 \text{ K}) \quad (3.6)$$

$$h(T) = -45.463 + 0.53145T \quad (1356 \text{ K} < T < 2000 \text{ K}) \quad (3.7)$$

Sonuç olarak, zorlanmış iç taşınım problemlerinde kullanılacak olan Özgöl ısı, Dinamik Viskozite, Özgöl Entalpi, Yoğunluk ve Isı iletim katsayısı gibi değişkenlerin sıcaklıkla ilgili değişimini gösteren ampirik bağıntılar ve tablolar mevcuttur. Bu değişkenleri kullanarak yapılan hesaplamalar neticesinde tasarımlarımıza ait geometriler oluşturulmuştur.

3.2 Yöntem

Bu çalışmada, bakırın ergime-katılma prosesi aşağıda belirtilmiş olan teorik model dikkate alarak sayısal çözümlerle incelenmiştir.

3.2.1 Matematiksel Model

Dikkate alınan katılma prosesine yönelik kullanılan fizik kuran denklemler aşağıda sırasıyla belirtilmiştir.

(https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm).

İki boyutlu teğetsel simetrik sistemlerde, sürekli rejim şartlarında ve sıkıştırılamaz akım için süreklilik denklemi Eşitlik (3.8) verilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial(v_x)}{\partial x} = S_m \quad (3.8)$$

İki boyutlu aksel simetrik geometriler için aksel ve radyal yönde sürekli rejim şartlarında ve sıkıştırılamaz akım için Reynold'un Ortalanmış Navier-Stokes denklemleri, sırasıyla Eşitlik (3.9) ve (3.10)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_x) \\ & = -r \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) - \rho r \overline{v'_x v'_r} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[2r\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right. \\ & \left. - \rho r \overline{v'^2_x} \right] \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_r) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_r) \\
&= -r \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[r\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) - \rho r \overline{v'_x v'_r} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[2r\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} - \rho r \overline{v_r'^2} \right] \\
&- 2\mu \frac{v_r}{r}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Burada Reynold'un gerilme terimlerine ilişkin bünye denklemi Sst-k ω türbülans modeli tarafından, Eşitlik (3.11) ve (3.12)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \widetilde{G}_k - Y_k + S_k \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega v_i) \\
= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Enerji denklemi ise Eşitlik (3.13)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\
= \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{v}) \right) + S_h
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Ergime katılma problemlerinde momentum denklemlerine ek kaynak terimleri gelmektedir. Eşitlik (3.14)'te momentum kaynak terimleri görülmektedir.

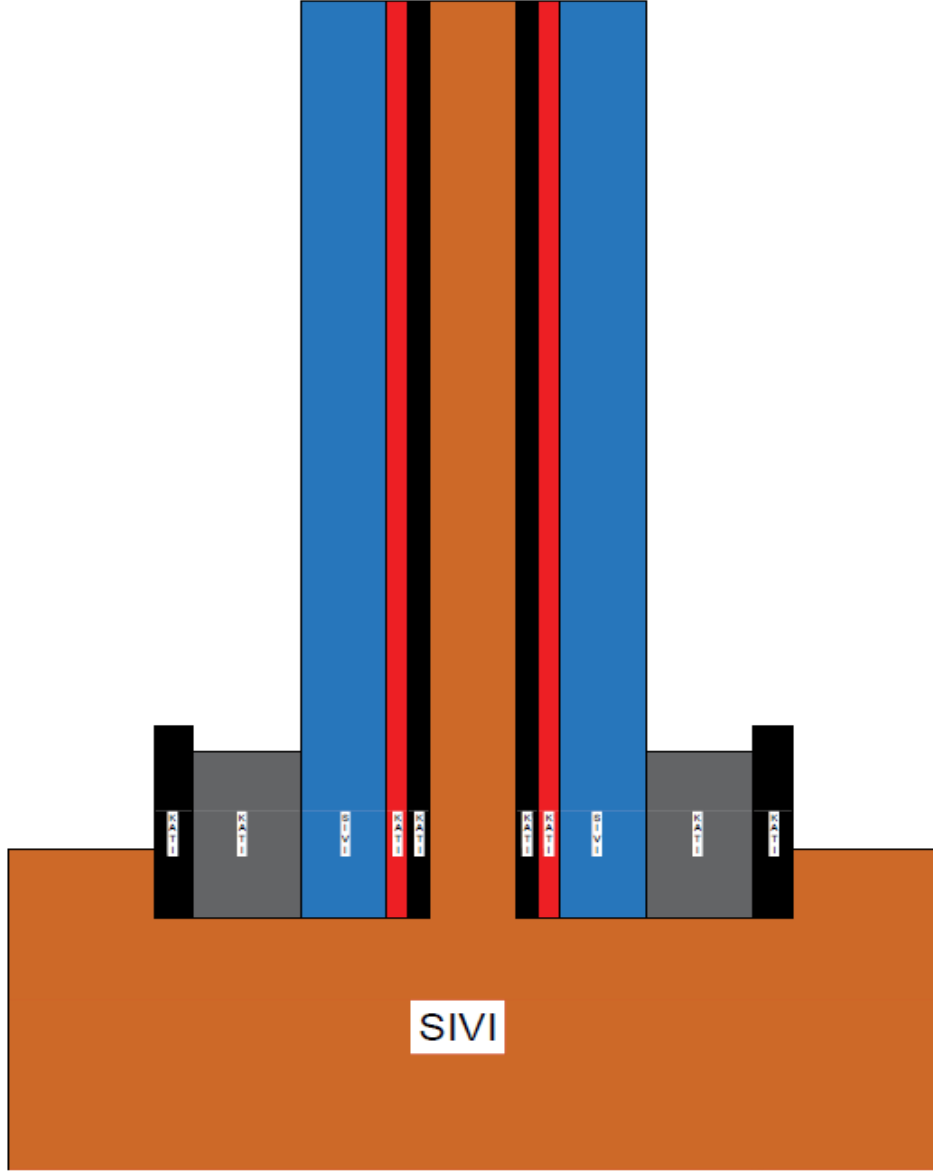
$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{pelte} (\vec{v} - \vec{v}_p) \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_x) \\
= -r \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) - \rho r \overline{v'_x v'_r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[2r\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \rho r \overline{v_x'^2} \right] + \\
\frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{pelte} (v_x - v_{p,x})
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_r) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_r) \\
&= -r \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[r\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) - \rho r \overline{v'_x v'_r} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[2r\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} - \rho r \overline{v_r'^2} \right] \\
& - 2\mu \frac{v_r}{r} \\
& + \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{pelte} v_r
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Eşitlik (3.14)'ün Eşitlik (3.9) ve (3.10)'a eklenmesi ile x yönü ve radyal yön momentum denklemi, sırasıyla Eşitlik (3.15) ve (3.16)'da ki gibi olur.





Şekil 3. 2 Sürekli döküm ile katılaşma prosesi

Şekil 3.2 bu tez çalışmasına konu olan bakırın sürekli döküm prosesini ve bileşenlerini temsil etmektedir.

3.2.2 Sayısal Yöntem

Tezin amacı gereği farklı sınır koşullarında tasarımlar yapabilmek için elimizde doğru bir fiziksel model olması gerekmektedir. Aksi halde her bir tasarım için had çözücü kullanmak veya prototip yapmak çok fazla zaman kaybı anlamına gelmektedir.

Burada doğru fiziksel modeli seçebilmek için öncelikle problemi doğru tanımlamamız gerekli. Faz değişiminin olduğu bu tür problemler ısı transferi ve akışkan hareketini içeren problemlerdir.

Bu çalışmada ısı transfer mekanizmalarını faz değişiminden önce ve sonra olmak üzere iki bölümde değerlendirdik. Faz değişimine kadar olan bölge için, ısı transferinde ters akışlı zorlanmış iç taşınım problemi çözüldü. Zorlanmış iç taşınım problemleri Reynold ve Prandtl fenomenlerine bağlı korelasyonlar içerdiği için uygun korelasyonu belirlemek adına Bölüm3.3'te gerekli tasarımlar yapıldı ve sonuçları karşılaştırıldı. Faz değişiminin tamamlanmasından sonra gene diğer bir yaklaşım olarak silindirik geometrilerde sürekli ısı iletimi problemi çözüldü. Tüm bu yaklaşımlar Çengel (2011) tarafından önerilen eşitliklerdir.

Isı transferi problemini doğru şekilde çözmek için girilen sınır koşullarında ortaya çıkan ısı enerjisini bilmemiz gerekli. Eşitlik (3.8) kullanılarak ayrı ayrı, ergimiş bakırdan suya aktarılan enerji, suyun toplam entalpi değişimine eşittir. Suyun dikkate alınan kontrol hacim boyunca kinetik enerji değişiminin olmadığı düşünülür ise, özgül ısıların sıcaklıkla değişmediği kabulü ile statik entalpi değişimi aşağıdaki gibi yazılır,

$$Q = \dot{m} \times c \times \Delta T. \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.17) kullanılarak sayısal yöntem için gerekli olan çıkış sıcaklıkları bulundu. Giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması alınarak akışkanlara ait termofiziksel özellikler ilgili tablolardan ve ampirik bağıntılardan elde edildi.

Reynold sayısı tanım olarak, bir akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere olan oranıdır.

$$Re = \frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times D_h \times \mu} \quad veya \quad Re = \frac{\rho \times v \times D_h}{\mu} \quad (3.18)$$

Re sayısına bağılı olarak akımın rejimi belirlenir. Bu çalışma kapsamında hem su hem de ergiyik metalin akımı türbülanslı akım rejiminde olacak şekilde seçilmiştir.

Su için yaygın olarak kullanılan Nu korelasyonlarından birisi Eşitlik (3.19)'da

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (Dittus - Boelter) \quad (3.19)$$

Verilmiş olup, burada

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{k} \quad (3.20)$$

Pr boyutsuz bir sayıdır. Isı taşınım katsayıları (h) Nusselt korelasyonlarına göre farklılık göstermektedir. Burada akışkanlarımız farklı karakteristik özelliklere sahip oldukları için ısı taşınım katsayıları farklı Nusselt korelasyonları ile tespit edilmiştir. Soğutucu akışkan (su) için türbülanslı akış rejiminde kullanılacak olan ilk korelasyon Eşitlik (3.19)'da ifade edilmiştir.

Dittus-Boelter korelasyonu küçük ile orta dereceleri sıcaklık farkları için kullanılabilir. Büyük özellik değişiklikleriyle karakterize edilen akışlar için, Örneğin Sieder-Tate'in tavsiye ettiği gibi düzeltmeler (Viskozite Düzeltme Faktörü μ/μ_w) dikkate alınmalıdır. Sieder-Tate tarafından önerilen Nusselt korelasyonu Eşitlik (3.21)'de gösterilmektedir.

$$Nu = 0.027 \times Re^{0.8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \frac{\mu}{\mu_w}^{0.14} \quad (0.7 < Pr < 16700 \quad Re \geq 10000) \quad (3.21)$$

Yüzey ve akışkan sıcaklıkları arası fark büyük olduğunda sıcaklıkla birlikte viskozite değişiminin de hesaba katılması gerekli olabilir. Bu nedenle Dittus-Boelter denkleminin değiştirilmiş bir formu olan Sieder-Tate denklemi kullanılır.

Ayrıca Çengel'in (2011) Nu korelasyonu için önerdiği bir diğer bağıntı Gnielinski korelasyonu Eşitlik (3.22)'te gösterilmiştir.

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \times (Re - 1000) \times Pr}{1 + 12.7 \times \frac{f^{0.5}}{8} \times (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (0.5 \leq Pr \leq 2000) \quad (3.22)$$

$$f = (0.790 \times \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (3.23)$$

Bura da f pürüzsüz borular için türbülanslı akışta sürtünme faktörüdür.

Çok düşük Prandtl sayısına sahip sıvı metaller için Eşitlik (3.24)'te verilen korelasyon kullanılmıştır.

$$Nu = 5.31 + 0.0221 Pe^{0.874} \quad (10^{-4} \leq Pr \leq 0.1 \quad 3 \times 10^3 \leq Re \leq 10^6) \quad (3.24)$$

Kullanılacak olan korelasyona göre ısı taşınım katsayısı artık hesaplanabilir.

$$h = \frac{Nu \times k}{Dh} \quad (3.25)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (3.26)$$

$$\Delta T_1 = T_{\text{sıcak, giriş}} - T_{\text{soğuk, çıkış}} \quad (3.27)$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{sıcak, çıkış}} - T_{\text{soğuk, giriş}} \quad (3.28)$$

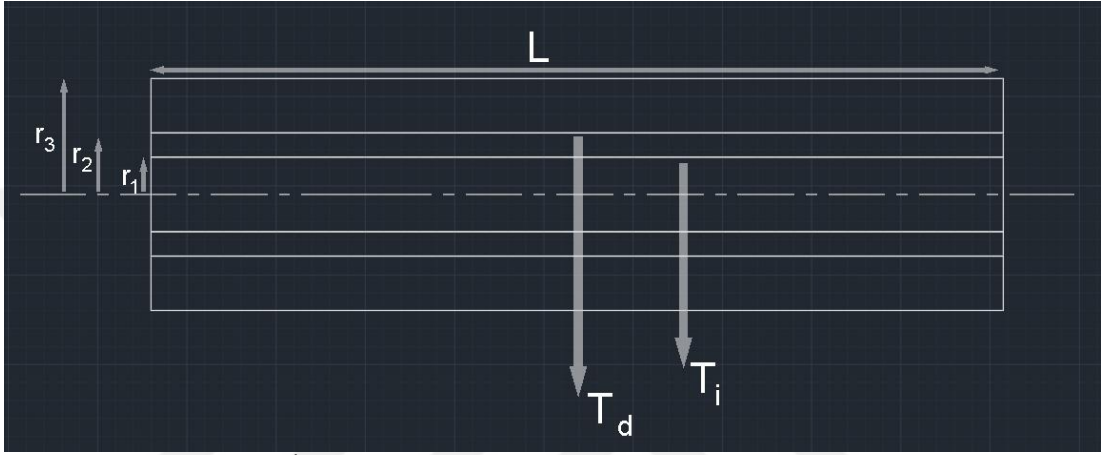
$$Q = \frac{2 \times \pi \times L \times \Delta T_M}{\frac{1}{h_i \times r_i} + \frac{1}{k} \times \ln \frac{r_d}{r_i} + \frac{1}{h_d \times r_d}} \quad (3.29)$$

Eşitlik (3.29)'da verilen “i” ve “d” indisleri sırasıyla bir silindirin iç ve dış yüzeylerindeki yüzeylerini ifade etmekte olup, dikkate alınan kontrol hacme göre yarıçaplar ve ısı taşınım katsayıları kolaylıkla seçilir. Verilen eşitlikler kullanılarak belirlenen sınır koşullarında istenilen çıkış sıcaklıklarını elde etmek için gerekli olan boru uzunluğu hesaplandı. Bu eşitlikler ile sadece katılaşma için gerekli olan kalıp uzunluğu hesaplanabilmektedir. Kalıp içinde bulunan ergimiş bakır tamamıyla faz

değiştirdikten sonra kullanılacak olan fiziksel model değişmektedir. Faz değişimi bittikten sonra aşağıdaki eşitlikler kullanıldı.

$$Q = \frac{T_i - T_d}{R_{toplam}} \quad (3.30)$$

$$R_{toplam} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k_1 \times L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \times \pi \times k_2 \times L} \quad (3.31)$$



Şekil 3. 3 İletim ile Gerçekleşen Isı Transferindeki Sıcaklık Bölgeleri

Şekil 3.3 Had çözücü de kullanılan geometriyi temsil etmektedir. Burada r_1 ergimiş metalin aktığı bölge, r_2 soğutucu akışkan ile ergimiş metak arasında bulunun kalıbın yarı çapını ve r_3 ise soğutucu akışkanın yarıçapını temsil etmektedir. T_i ile gösterilen bölge ergimiş metalin temas ettiği kalıbın ortalama yüzey sıcaklığı T_d ise soğutucu akışkanın temas ettiği yüzeyin ortalama sıcaklığını temsil etmektedir.

3.2.3 Had Çözücü

Akışkanlar Mekaniği problemleri için piyasa da birçok ticari HAD çözücü bulunmaktadır (Ansys-Fluent, Ansys-Cfx, Star-CCM+, vb). Biz, bu tez çalışmasında Ansys-Fluent tercih edilmiştir. Ansys-Fluent öğrenci sürümü ile birçok problemin çözümü mümkün olup kullanıcı arayüzü ve diğer paket programlarla olan uyumu yüzünden tercih sebebi olmuştur.

Ansys-Fluent çözüm işlemini yaparken Eşitlik (3.8)-(3.16)'daki fizik kuran denklemlerine sınır şartlarını uygulayarak çözüm işlemini yapmaktadır (bakınız Şekil 3.4 ve 3.5).

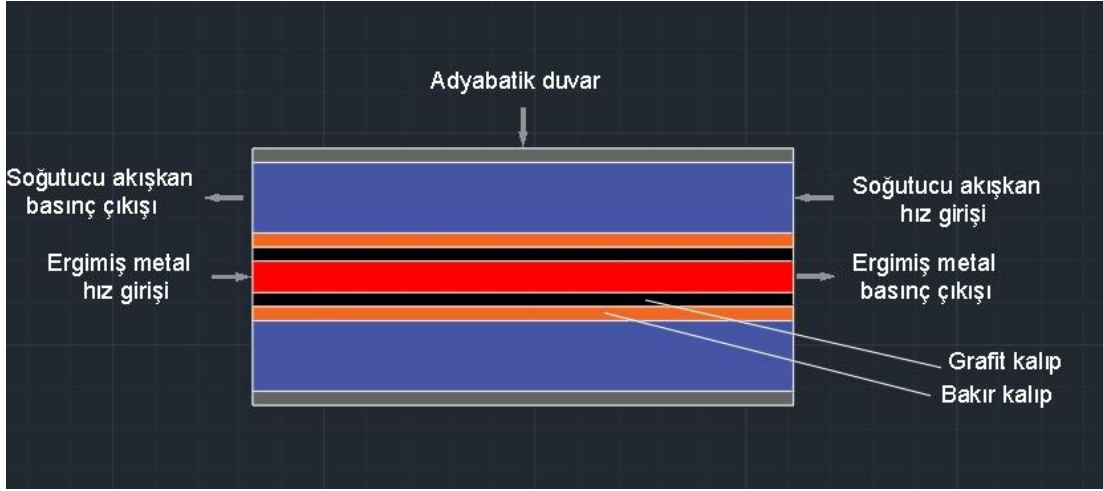
Had çözücü de işlem aşamaları aşağıdaki gibidir.

- Geometri Oluşturma.
- Mesh Atma
- Mesh üzerinde sınır koşullarını belirleme
- Problemi Kurma ve Çözme
 - Zamandan bağımlı veya bağımsız (Steady, Transient)
 - Fiziksel Modelleri Seçme (Enerji, Viskoz Model, Çoklu Faz, Katılaşma-Ergime)
 - Materyal Ekleme
 - Geometri üzerinde bölge tanımlamaları (akışkan, katı)
 - Sınır koşullarını girme (duvar, giriş hızı, çıkış basıncı)
 - Yakınsama değerlerinin girilmesi
 - Uygun çözücü algoritmasının belirlenmesi (Simple, Coupled)
 - Başlatmaya hazırlık (İnitializaiton)
 - İterasyon sayısı Girme
 - Problemi Sür
 - Sonuçları Değerlendirme

Çözülecek olan probleme ait geometrik detaylar ve sınır bölgeleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

$$r_1=4 \text{ mm}, \quad r_2=6\text{mm} \quad r_3=20\text{mm}$$

Burada L ısı değiştirgeci uzunluğu kullanılan Nu korelasyonlarına göre istenilen akışkan çıkış sıcaklıklarını sağlayacak şekilde değişim göstermektedir.



Şekil 3. 4: Had çözücü modeline ait sınır koşulları



Şekil 3. 5: Had çözücü modeline ait geometrik koşulları

HAD çözücünde kullanılan modele ait sınır koşulları ve geometrik ölçüler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

3.3 Tasarımlar

Bu bölümde yapılan tasarımlara ait koşullar (sınır değerleri), geliştirmek istediğimiz yonteme ait sınır değerleridir. Soğutucu akışkan için 3 farklı Nusselt korelasyonu mevcuttur. En uygun korelasyonu belirlemek için farklı Nusselt korelasyonlarını aynı Reynold sayıları ile hesaplanarak ve bulunan sonuçları Had çözücü ile mukayese ederek uygun yöntem belirlenmiştir.

3.3.1 Tasarım-1

Tasarım-1'de 3.6 t/h üretim debisine sahip bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Dittus-Boelter korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.1.1 Tasarım-1 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.2: Tasarım-1 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
T _{giriş} “°C”	10	1200
m _{giriş} “kg/s”	3	1
Re Sayısı	72015	39492
Nusselt Korelasyonu	Dittus-Boelter	Sıvı metaller için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	988	988

Tasarım-1'e ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.3: Tasarım-1 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm sayısı	497327
Hücre sayısı	413075
Maks. Çarpıklık	0.43
Min. Ortogonal Kalite	0.73

Tasarım-1 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Tasarım-1 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (x yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Süreklilik, momentum ve enerji, Türbülans (SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

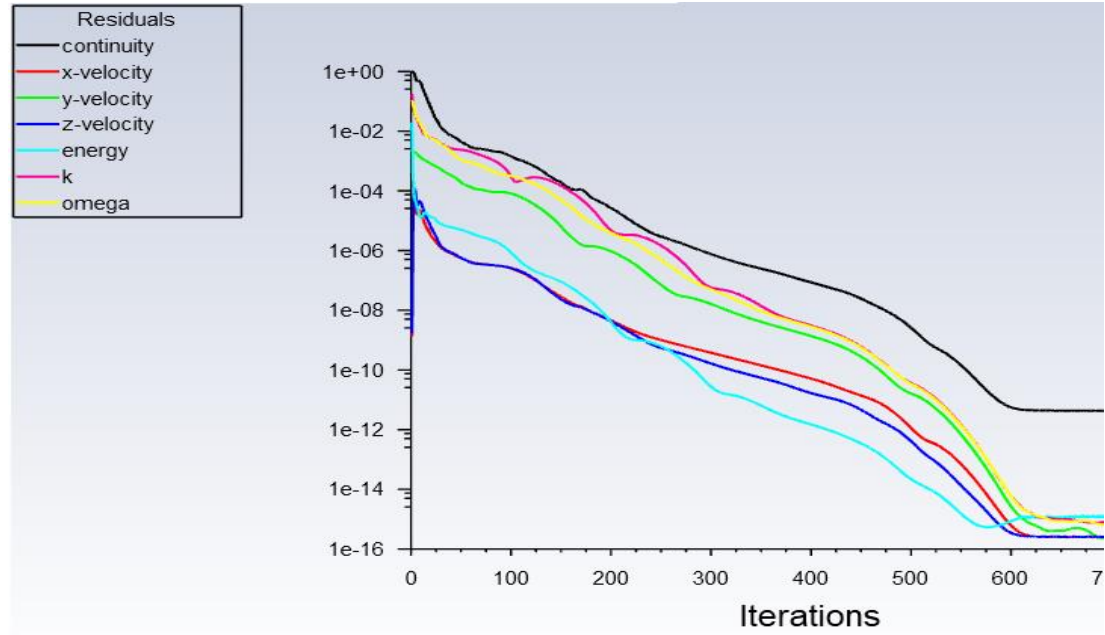
Tasarım-1’e ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.4’te gösterilmiştir.

3.3.1.2 Tasarım-1 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

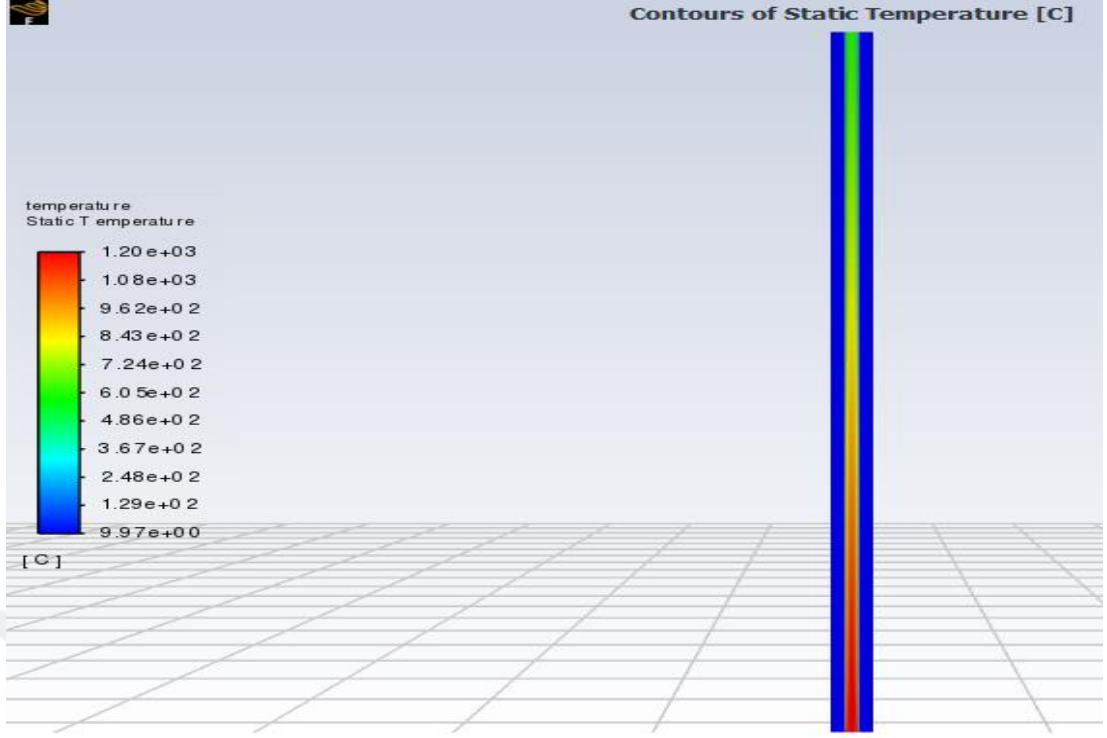
Tablo 3.5: Tasarım-1 Korelasyon ve Had Çözücü Sonuçları

	Korelasyon	Had Çözümü
T _{su,çıkış} “°C”	30	33.24242
T _{bakır,çıkış} “°C”	705.11	624.906

Tasarım-1 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.6: Tasarım-1 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.7: Tasarım-1 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyonlar ile elde edilen ısı değıştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.6 ve sıcaklık değışimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

3.3.2 Tasarım-2

Tasarım-2’de 3.6 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Sieder-Tate korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.2.1 Tasarım-2 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.6: Tasarım-2 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	10	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	3	1
Re Sayısı	72015	39492
Nusselt Korelasyonu	Sieder-Tate	Sıvı metal için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	656	656

Tasarım-2’ye ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.7: Tasarım-2 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	733040
Hücre Sayısı	725023
Maks. Çarpıklık	0.59
Min. Ortogonal Kalite	0.54

Tasarım-2 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.8: Tasarım-2 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

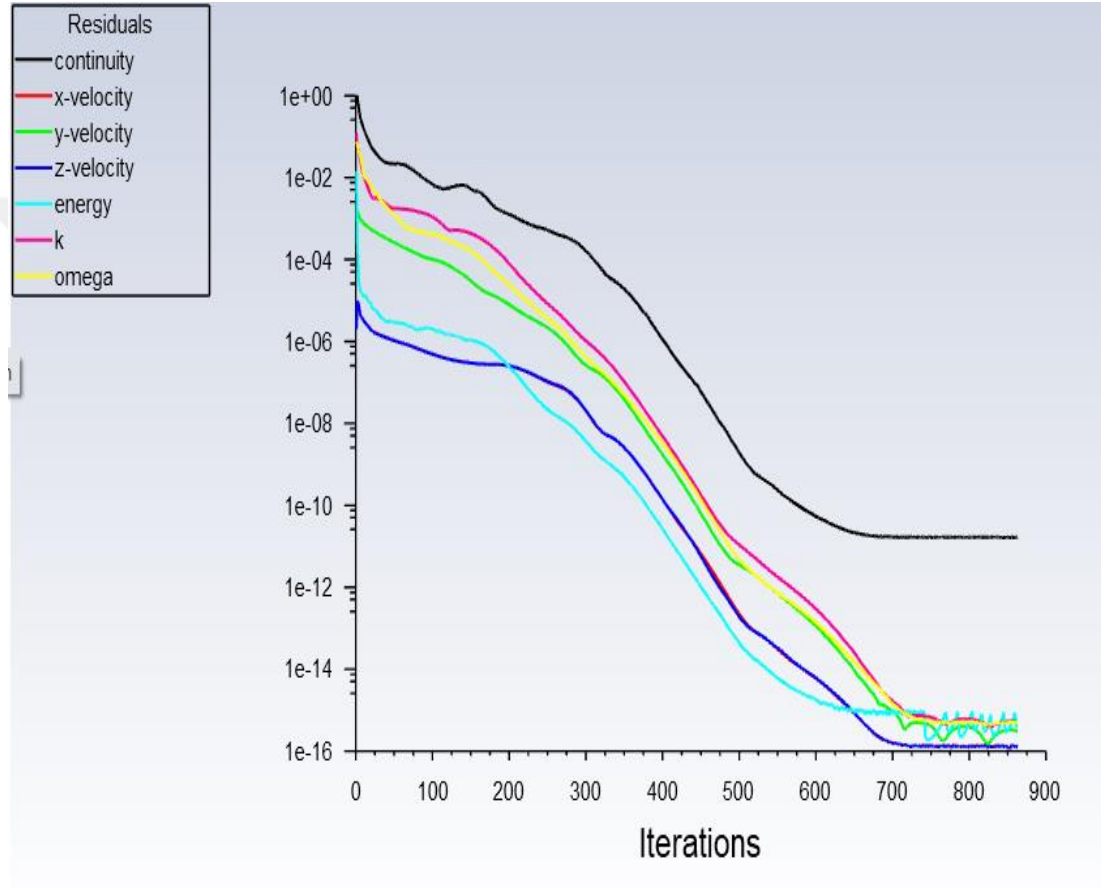
Tasarım-2’ye ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.8’te gösterilmiştir.

3.3.2.2 Tasarım-2 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

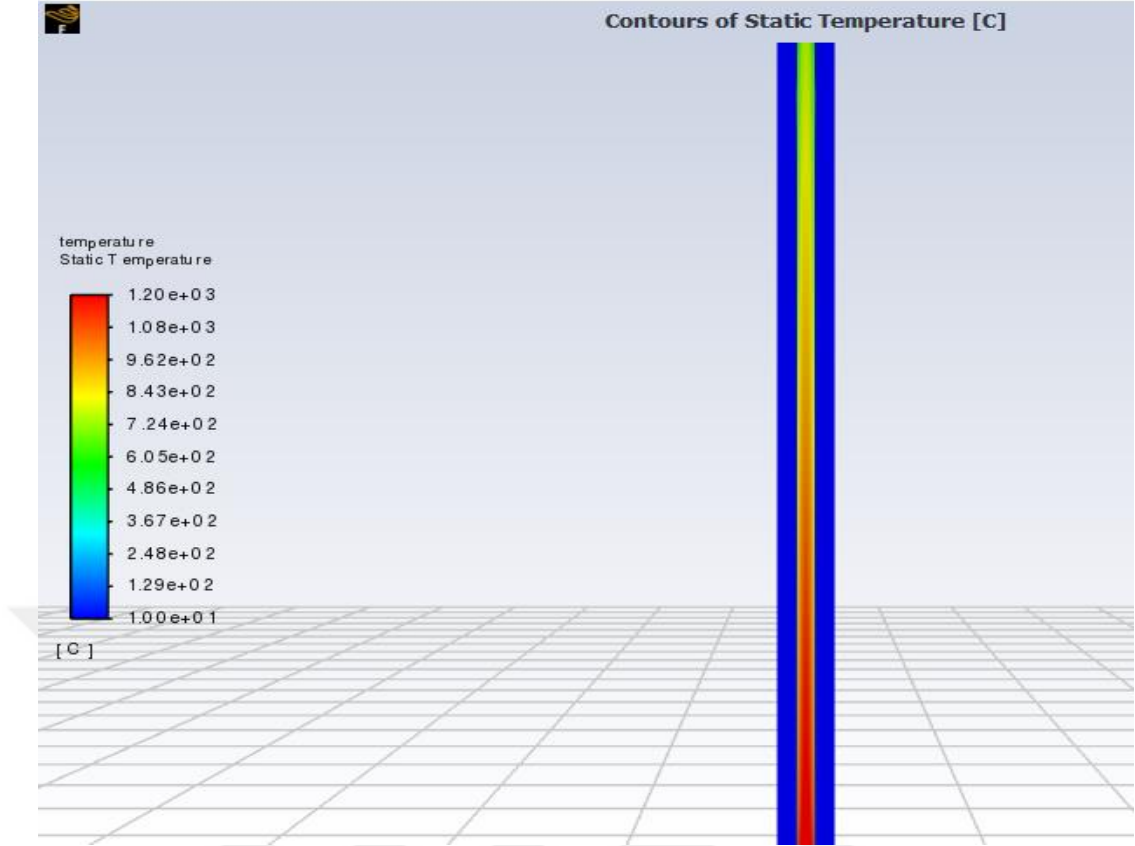
Tablo 3.9: Tasarım-2 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	30	752.89
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	705.11	28.07

Tasarım-2 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.9’te verilmiştir.



Şekil 3.8: Tasarım-2 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.9: Tasarım-2 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyonlar ile elde edilen ısı değiştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.10 ve sıcaklık değişimi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

3.3.3 Tasarım-3

Tasarım-3’te 3.6 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Gnielinski korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.3.1 Tasarım-3 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.10: Tasarım-3 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	10	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	3	1
Re Sayısı	72015	39492
Nusselt Korelasyonu	Gnielinski	Sıvı metal için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	859	859

Tasarım-3’e ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.20’de verilmiştir.

Tablo 3.11: Tasarım-3 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	929290
Hücre Sayısı	919269
Maks. Çarpıklık	0.51
Min. Ortogonal Kalite	0.59

Tasarım-3 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.12: Tasarım-3 Had Çözücü Parametreleri

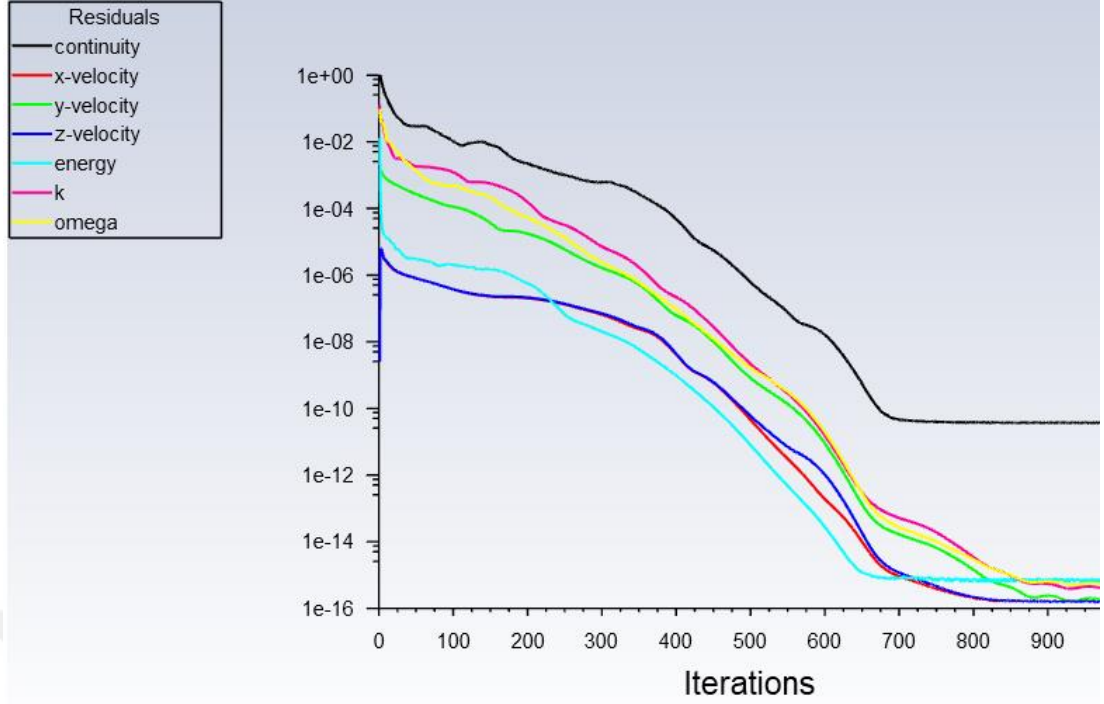
Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

Tasarım-3’e ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.12’de gösterilmiştir.

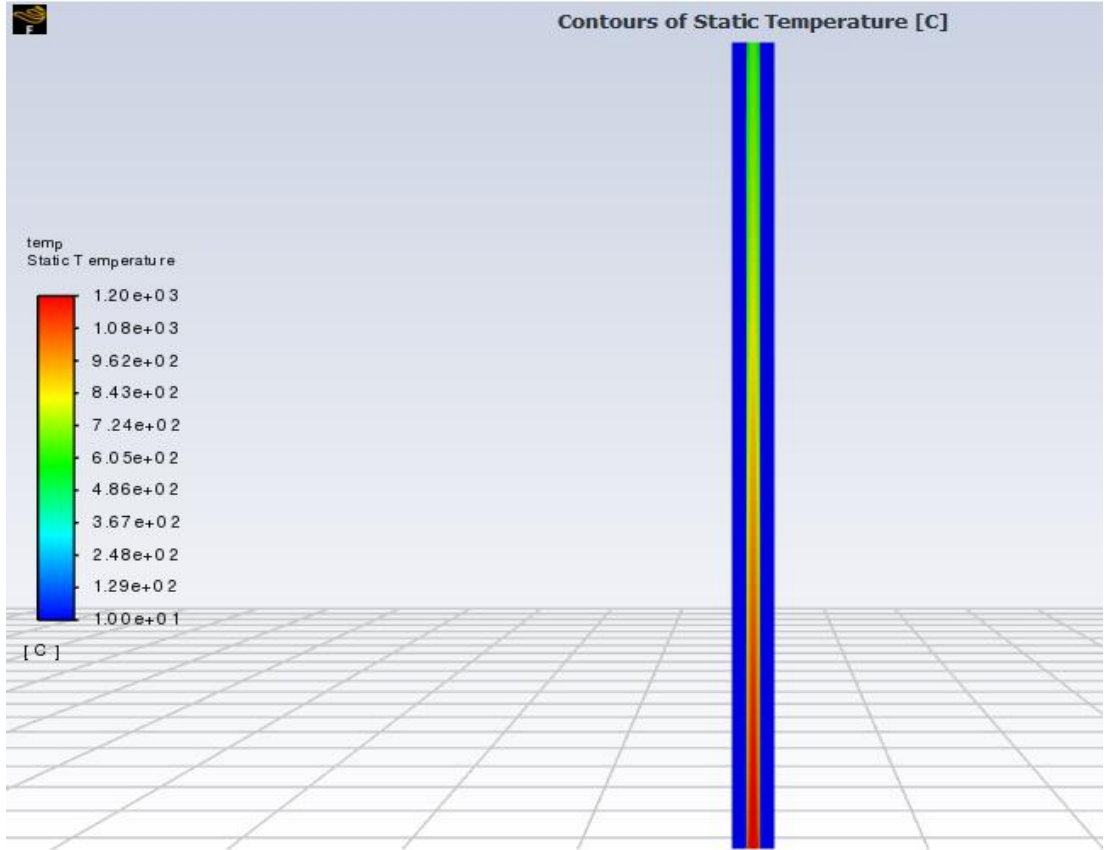
3.3.3.2 Tasarım-3 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

Tablo 3.13: Tasarım-3 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	30	32.174
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	705.11	651.34



Şekil 3. 10: Tasarım-3 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3. 11: Tasarım-3 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyonlar ile elde edilen ısı değiştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüne girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.10 ve sıcaklık dağılımı Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

3.3.4 Tasarım-4

Tasarım-4'te 1.8 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Dittus-Boelter korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.4.1 Tasarım-4 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.14: Tasarım-4 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	20	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	2.5	0.5
Re Sayısı	60013	19746
Nusselt Korelasyonu	Dittus-Boelter	Sıvı metal için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	116	116

Tasarım-4'e ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.14'te verilmiştir.

Tablo 3.15: Tasarım-4 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	126522
Hücre Sayısı	123872
Maks. Çarpıklık	0.57
Min. Ortogonal Kalite	0.5

Tasarım-4 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.15'te verilmiştir.

Tablo 3.16: Tasarım-4 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

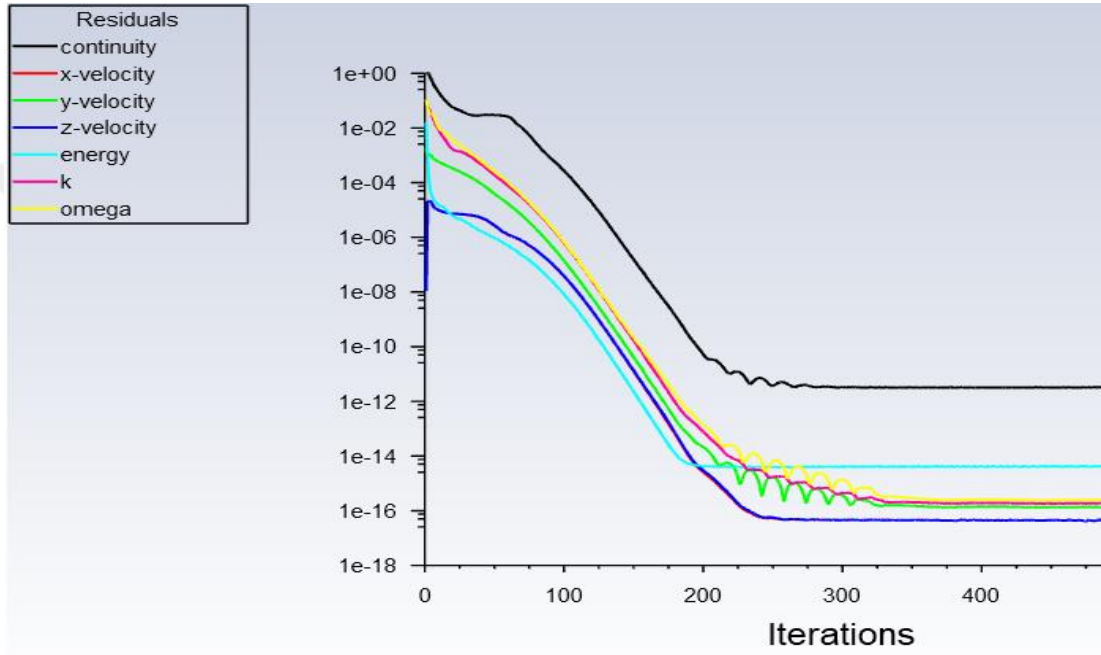
Tasarım-4'e ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.16'da gösterilmiştir.

3.3.4.2 Tasarım-4 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

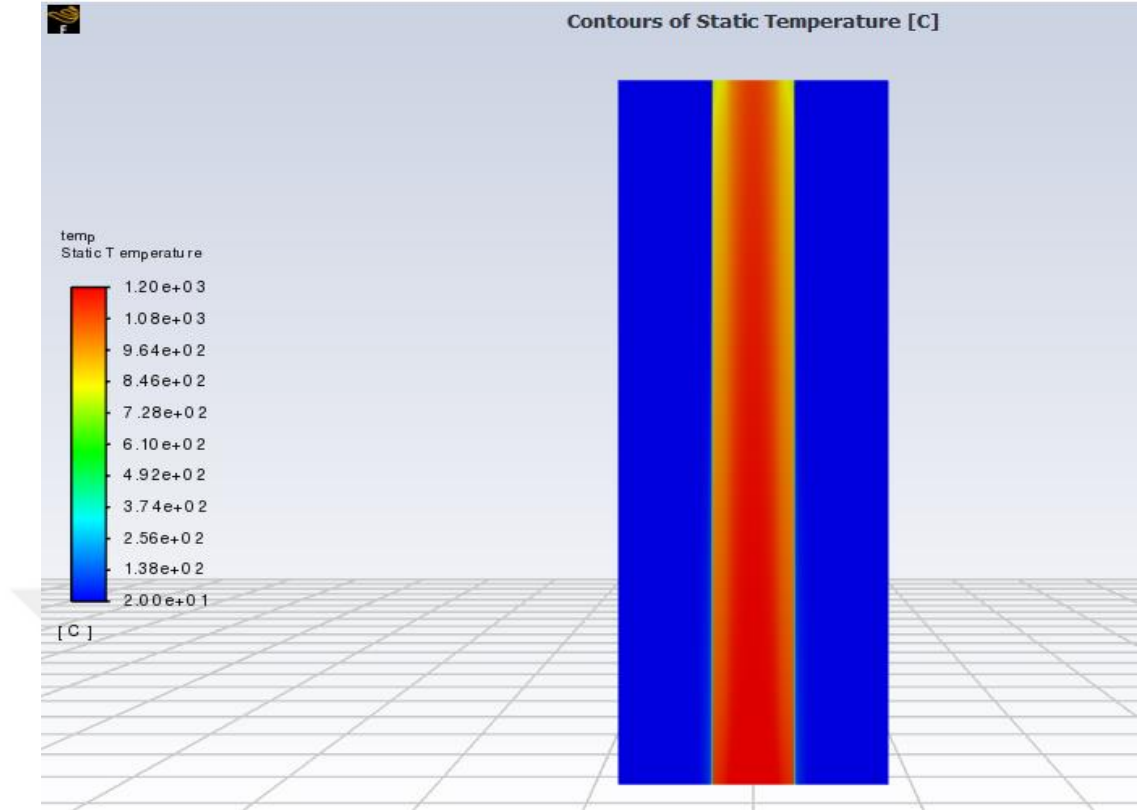
Tablo 3.17: Tasarım-4 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	23	24.243
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	1076	1025.1

Tasarım-4 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.12: Tasarım-4 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.13: Tasarım-4 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyonlar ile elde edilen ısı değiştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.12 ve sıcaklık değişimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

3.3.5 Tasarım-5

Tasarım-5'te 1.8 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Gnielinski korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.5.1 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.18: Tasarım-5 Akışkanlara Ait Sınır Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	20	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	2.5	0.5
Re Sayısı	60013	19746
Nusselt Korelasyonu	Gnielinski	Sıvı metaller için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	102	102

Tasarım-5'e ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablo 3.19: Tasarım-5 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	115896
Hücre Sayısı	113709
Maks. Çarpıklık	0.54
Min. Ortogonal Kalite	0.5

Tasarım-5 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.19'da verilmiştir.

Tablo 3.20: Tasarım-5 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

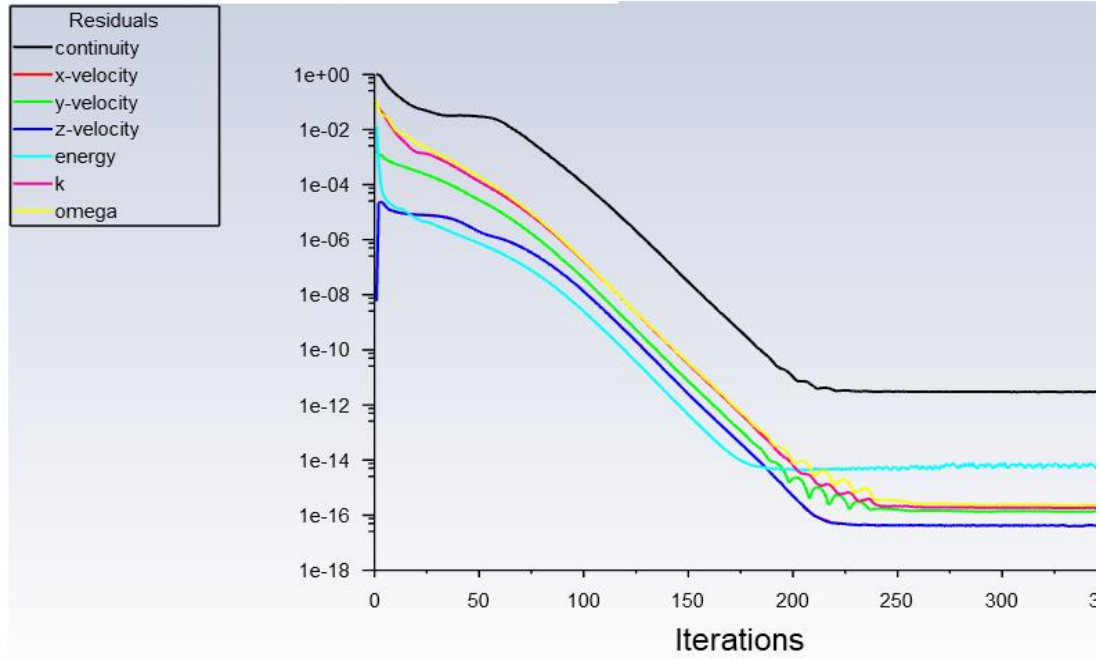
Tasarım-5'e ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.20'de gösterilmiştir

3.3.5.2 Tasarım-5 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

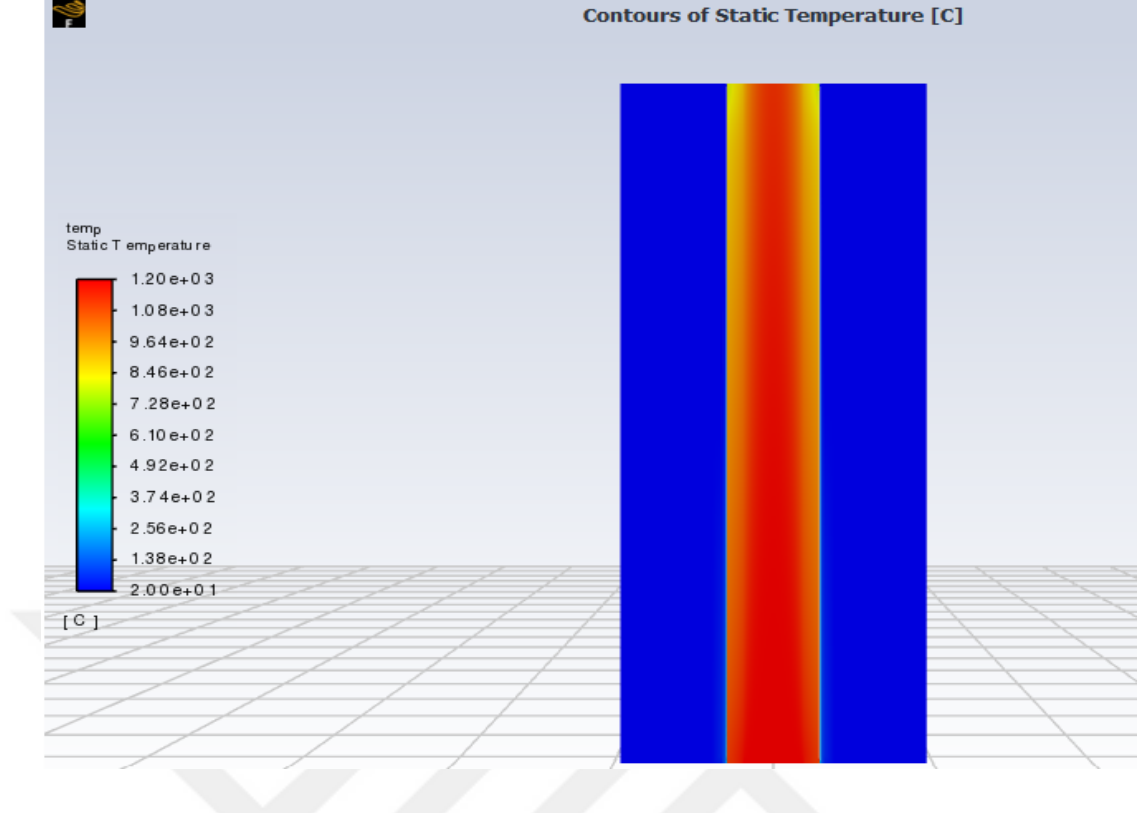
Tablo 3.21: Tasarım-5 Sayısal ve Had Çözücü Parametreleri

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	23	23.84
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	1076	1041.9

Tasarım-5 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.14: Tasarım-5 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.15: Tasarım-5 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyonlar ile elde edilen ısı değıştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.14 ve sıcaklık değışimi Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

3.3.6 Tasarım-6

Tasarım-6'da 1.8 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Sieder-Tate korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.6.1 Tasarım-6 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.22: Tasarım-6 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	20	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	2.5	0.5
Re Sayısı	60013	19746
Nusselt Korelasyonu	Sieder-Tate	Sıvı metaller için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	77	77

Tasarım-6'ya ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.22'de verilmiştir.

Tablo 3.23: Tasarım-6 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	70744
Hücre Sayısı	77742
Maks. Çarpıklık	0.55
Min. Ortogonal Kalite	0.52

Tasarım-6 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.23'te verilmiştir.

Tablo 3.24: Tasarım-6 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

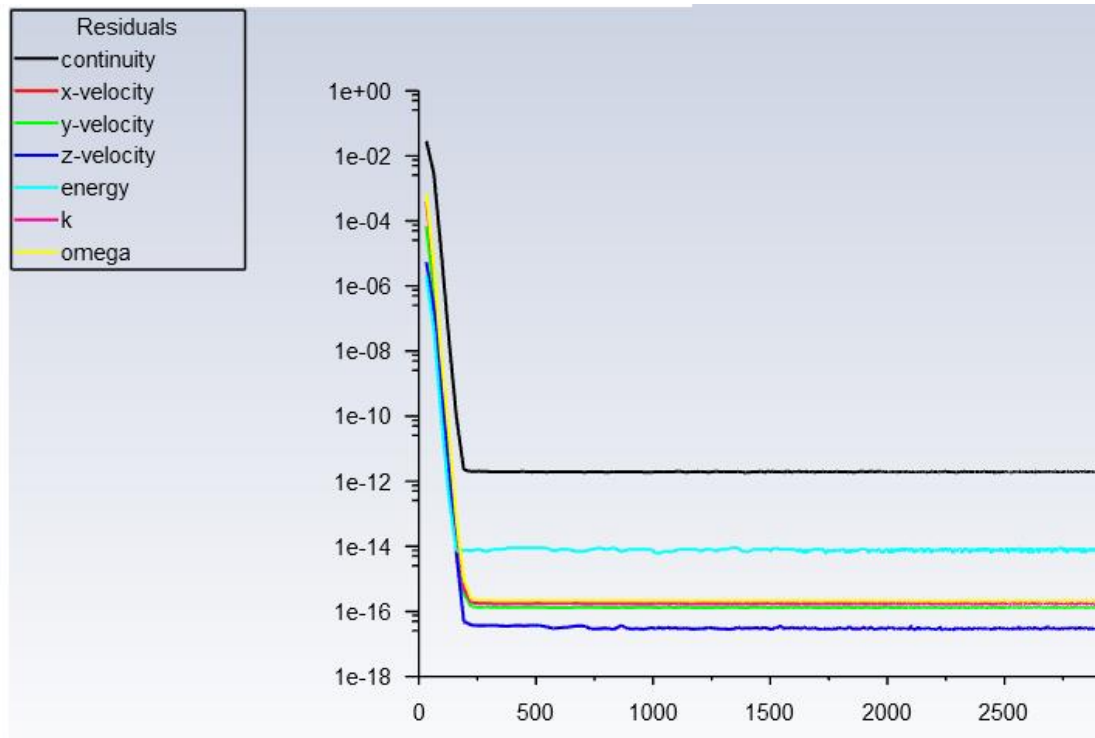
Tasarım-6'ya ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.24'te gösterilmiştir.

3.3.6.2 Tasarım-6 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

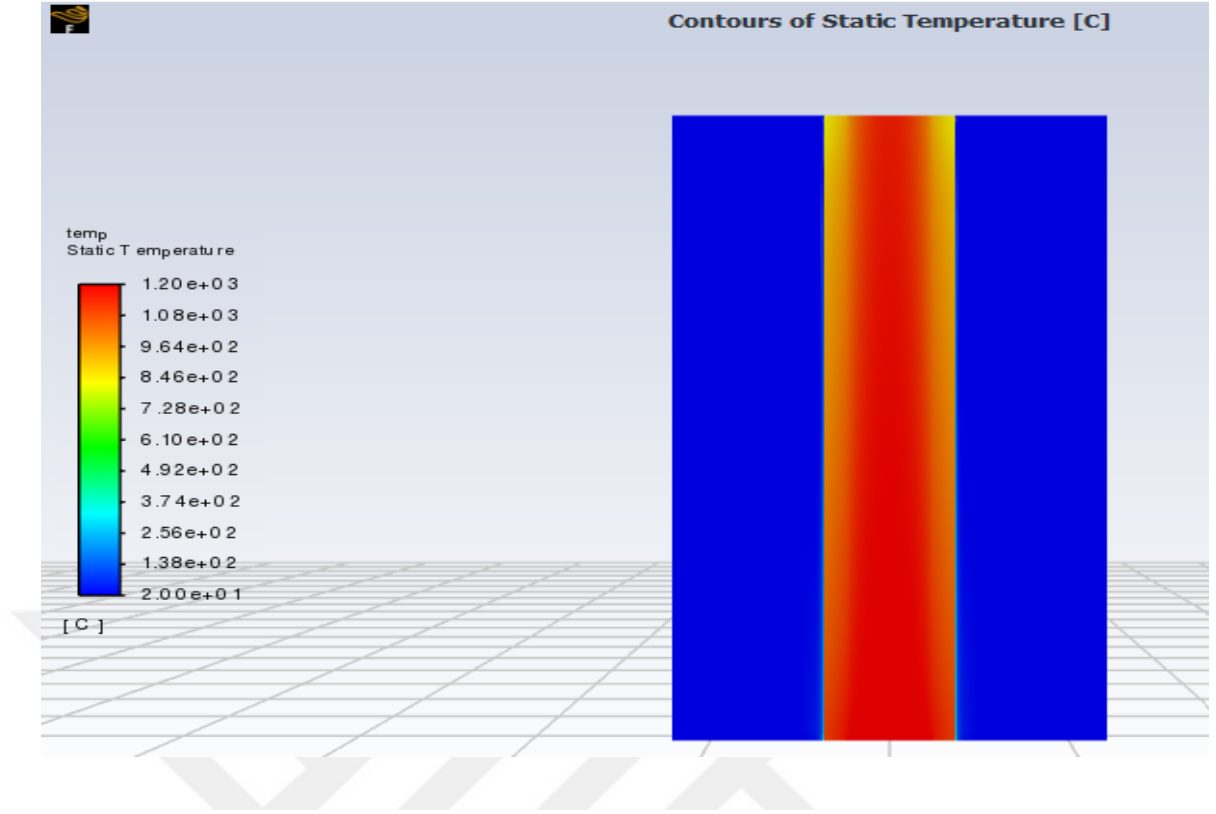
Tablo 3.25: Tasarım-6 Sayısal ve Had Çözücü Parametreleri

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	23	23.08
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	1076	1072

Tasarım-6 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.25’te verilmiştir.



Şekil 3.16: Tasarım-6 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.17: Tasarım-6 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyon ile elde edilen ısı değıştirici uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.15 ve sıcaklık değışimi Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

3.3.7 Tasarım-7

Tasarım-7’de 0.9 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Dittus-Boelter korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.7.1 Tasarım-7 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.26: Tasarım-7 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	18	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	4	0.25
Re Sayısı	96021	9873
Nusselt Korelasyonu	Dittus-Boelter	Sıvı metal için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	313	313

Tasarım-7’ye ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.26’da verilmiştir.

Tablo 3.27: Tasarım-7 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	335851
Hücre Sayısı	331168
Maks. Çarpıklık	0.58
Min. Ortogonal Kalite	0.6

Tasarım-7 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.27’te verilmiştir.

Tablo 3.28: Tasarım-7 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

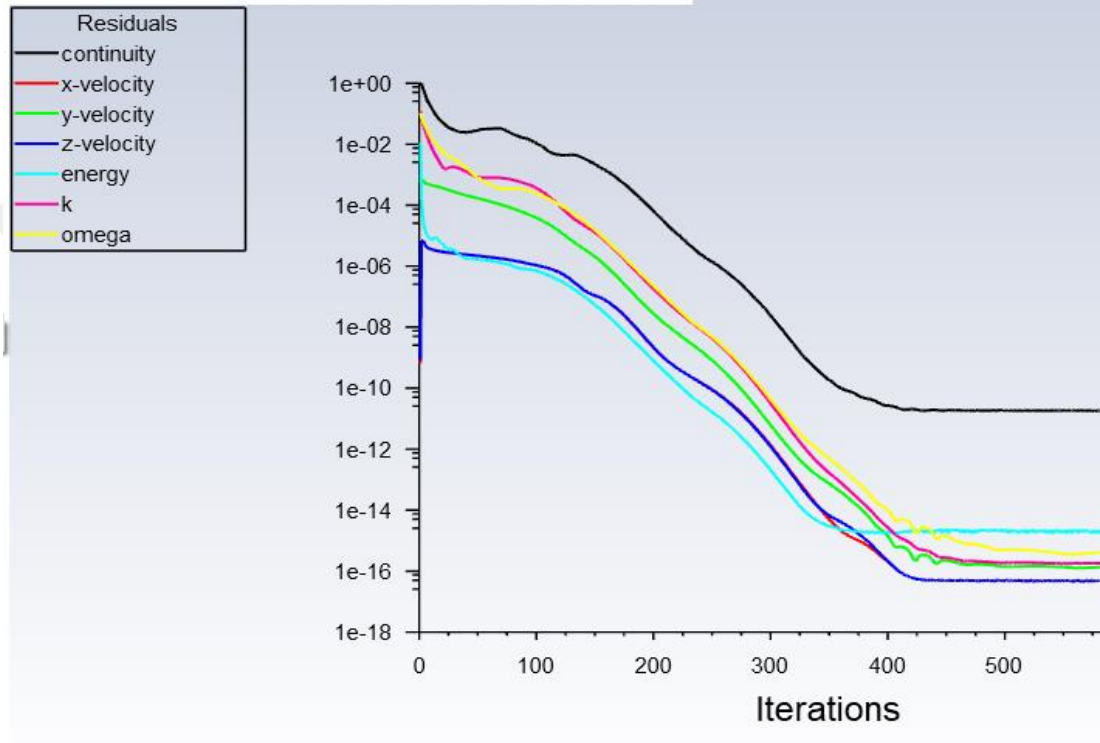
Tasarım-7’ye ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3284’de gösterilmiştir.

3.3.7.2 Tasarım-7 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

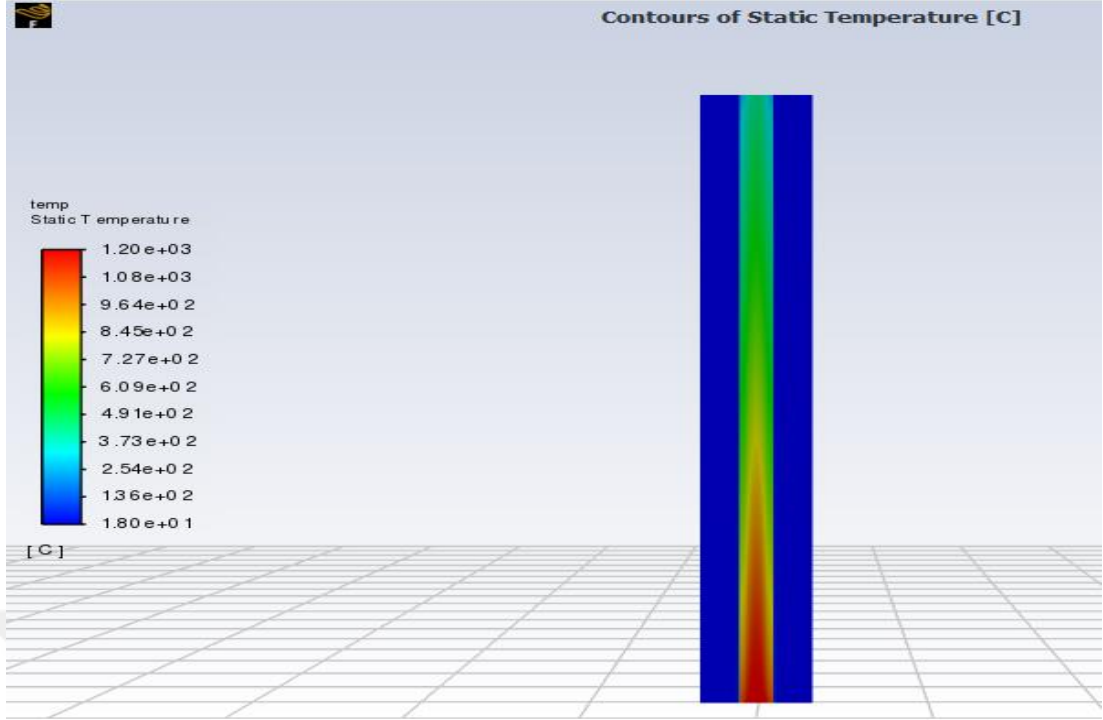
Tablo 3.29: Tasarım-7 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	23	23.884
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	540	424.1

Tasarım-7 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.18: Tasarım-7 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.19: Tasarım-7 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyon ile elde edilen ısı değiştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.18 ve sıcaklık değişimi Şekil 3.19 'da gösterilmiştir.

3.3.8 Tasarım-8

Tasarım-8’de 0.9 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Sieder-Tate korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.8.1 Tasarım-8 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.30: Tasarım-8 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	18	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	4	0.25
Re Sayısı	96021	9873
Nusselt Korelasyonu	Sieder-Tate	Sıvı metaller için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	214	214

Tasarım-8’e ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.30’da verilmiştir.

Tablo 3.31: Tasarım-8 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	231868
Hücre Sayısı	228603
Maks. Çarpıklık	0.54
Min. Ortogonal Kalite	0.577

Tasarım-8 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.31’de verilmiştir.

Tablo 3.32: Tasarım-8 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

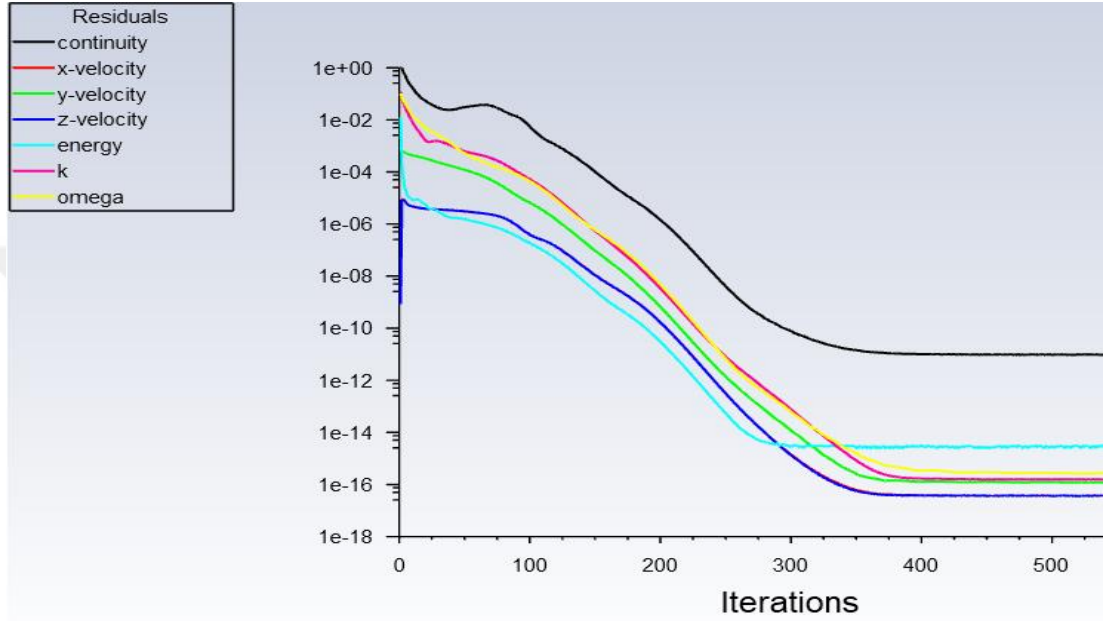
Tasarım-8’e ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.32’de gösterilmiştir.

3.3.8.2 Tasarım-8 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

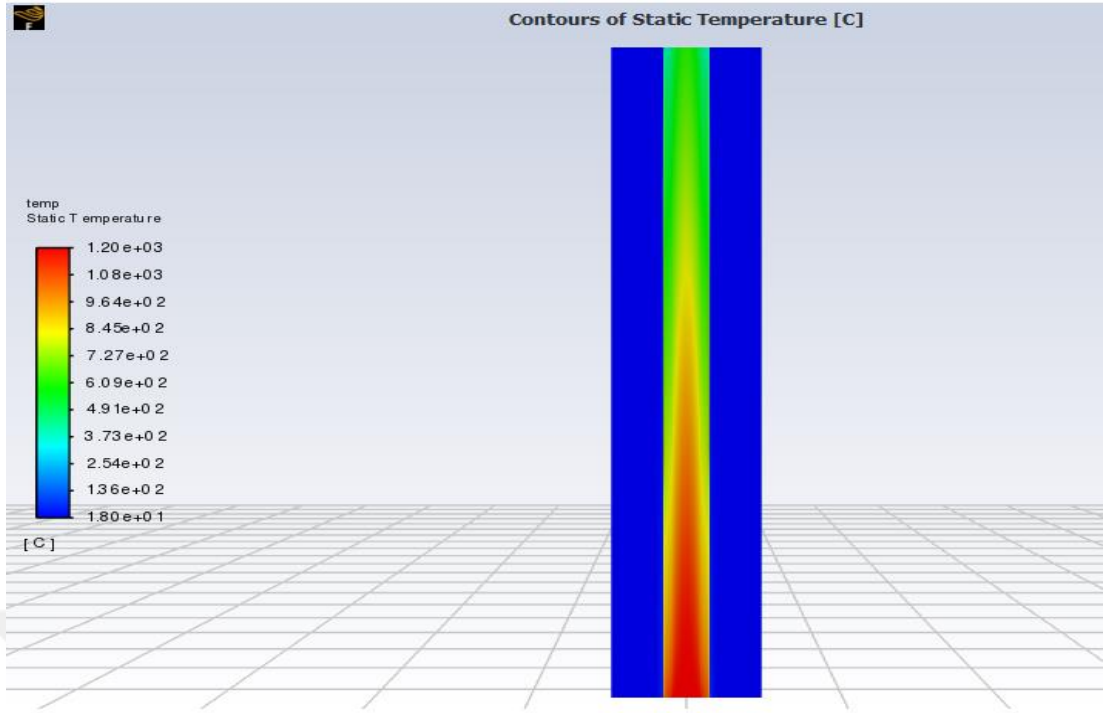
Tablo 3.33: Tasarım-8 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	23	22.68
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	540	581.8

Tasarım-8 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.33’te verilmiştir.



Şekil 3.20: Tasarım-8 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.21: Tasarım-8 2D Sıcaklık Dağılımı

Korelasyon ile elde edilen ısı değiştirici uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.20 ve sıcaklık değişimi şekil 3.21’de gösterilmiştir.

3.3.9 Tasarım-9

Tasarım-9'da 0.9 t/h üretim kapasiteli bir sistem için gerekli olan kalıp uzunluğu soğutucu akışkana ait Gnielinski korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

3.3.9.1 Tasarım-9 Sınır Koşulları, Mesh Kalitesi ve Had Çözücü Parametreleri

Tablo 3.34: Tasarım-9 Akışkanlara Ait Giriş Koşulları

	Su (Soğutucu Akışkan)	Ergimiş Bakır
$T_{giriş}$ “°C”	18	1200
$\dot{m}_{giriş}$ “kg/s”	4	0.25
Re Sayısı	96012	9873
Nusselt Korelasyonu	Gnielinski	Sıvı metaller için korelasyon
Kalıp Uzunluğu “mm”	270	270

Tasarım-9'a ait giriş koşulları ve kullanılan korelasyonlar Tablo 3.34'te verilmiştir.

Tablo 3.35: Tasarım-9 Geometriye Ait Mesh Kalite Değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	297642
Hücre Sayısı	293625
Maks. Çarpıklık	0.6
Min. Ortogonal Kalite	0.484

Tasarım-9 modeline ait geometrinin mesh kalitesi ile ilgili parametreler Tablo 3.35'te verilmiştir.

Tablo 3.36: Tasarım-9 Had Çözücü Parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (y yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Enerji, Vizkoz(SST, k- ω)
Algoritma	Simple
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

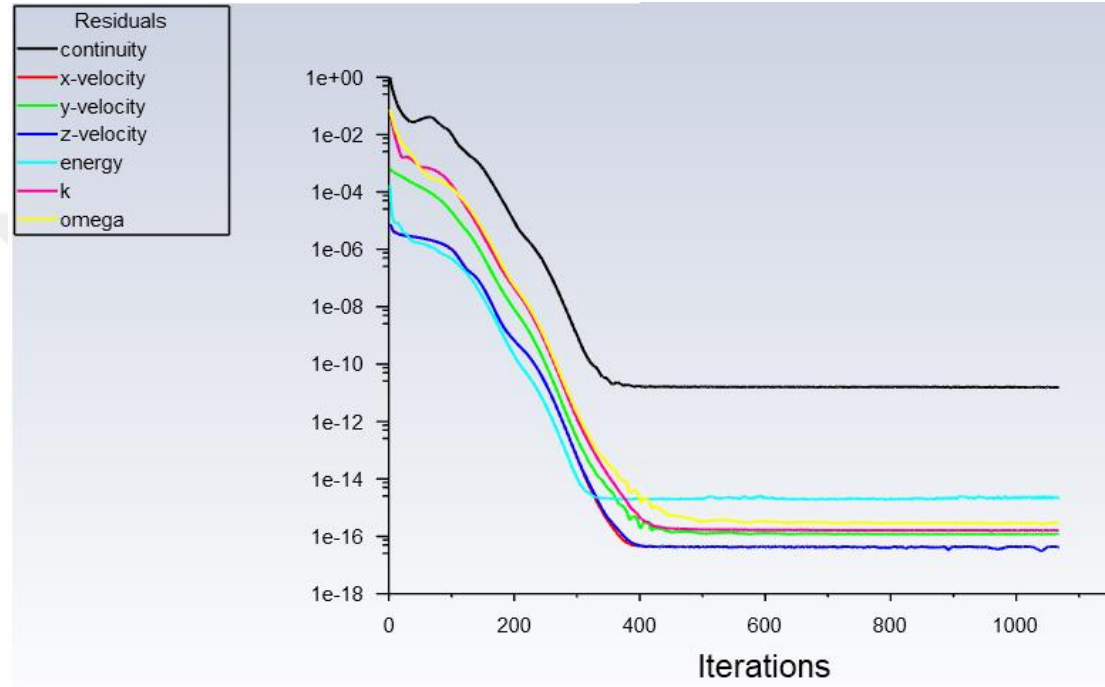
Tasarım-9'a ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.36'da gösterilmiştir.

3.3.9.2 Tasarım-9 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

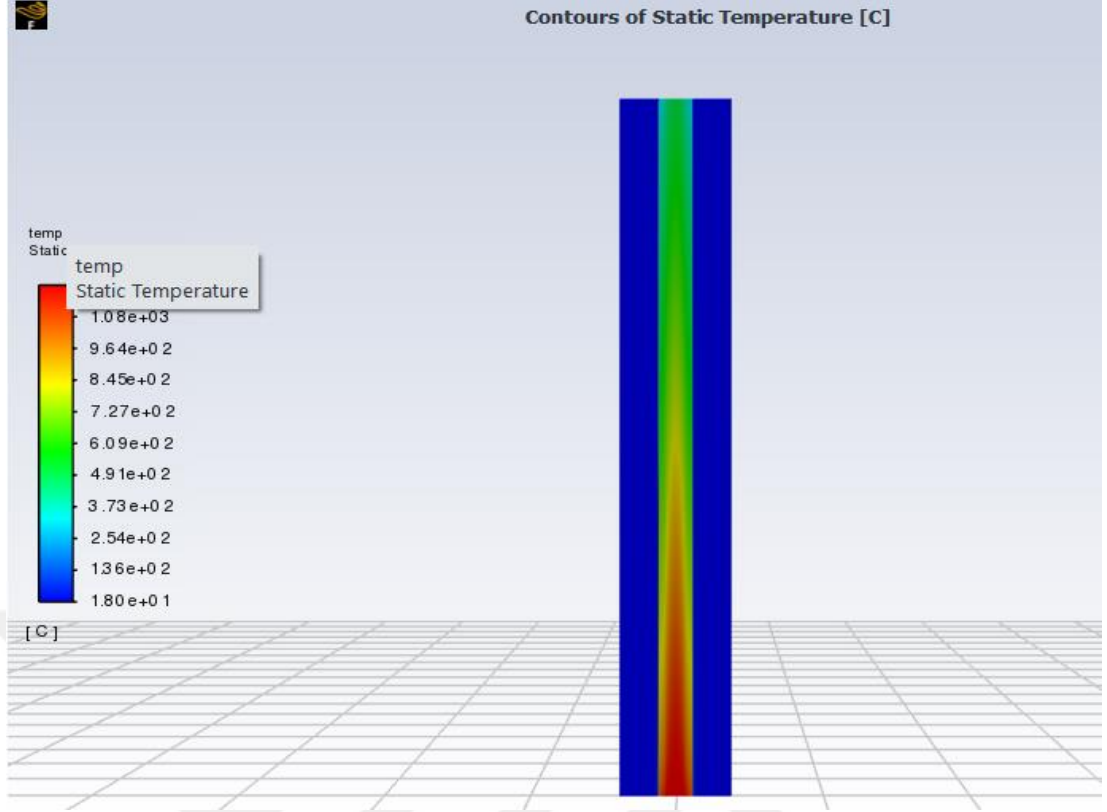
Tablo 3.37: Tasarım-9 Sayısal ve Had Çözücü Sonuçları

	Sayısal Çözüm	Had Çözümü
$T_{su,çıkış}$ “°C”	23	23.4
$T_{bakır,çıkış}$ “°C”	540	486.97

Tasarım-9 Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.37’de verilmiştir.



Şekil 3.22: Tasarım-9 Had Çözücü Yakınsama Grafiği



Şekil 3.23: Tasarım-9 2D Sıcaklık Dağılımı

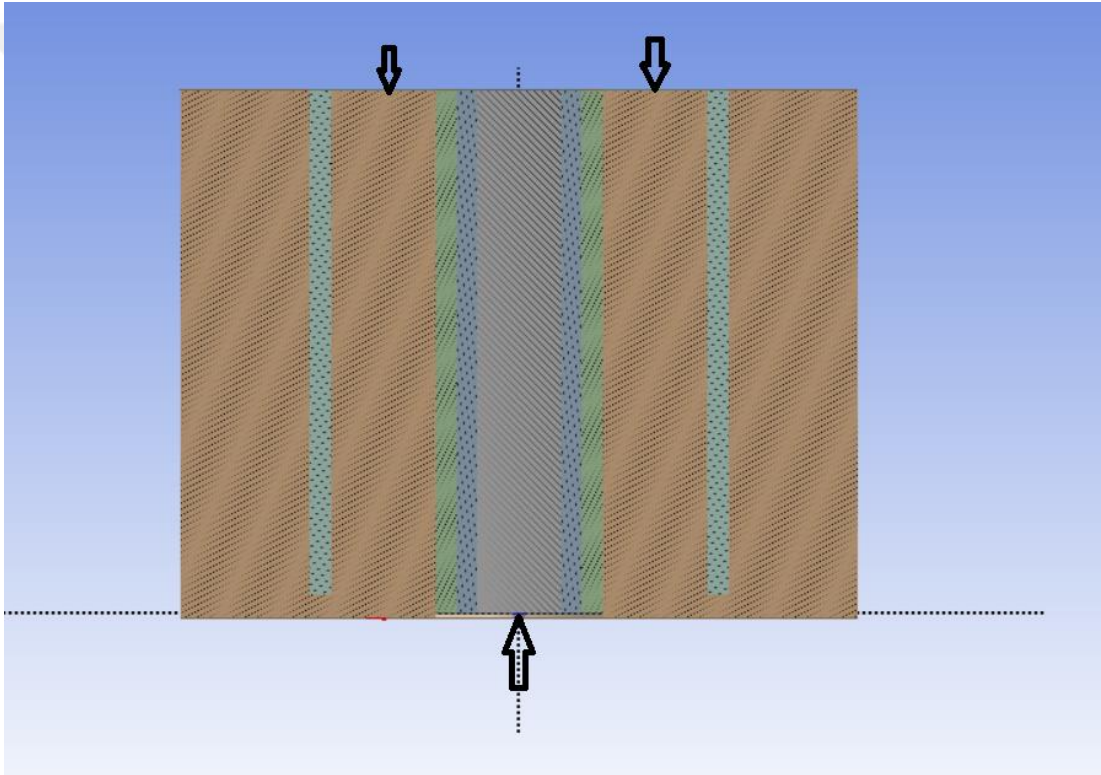
Korelasyonlar ile elde edilen ısı değıştirgeci uzunluğu ve sınır şartları HAD çözücüye girilmiş olup yakınsama grafiği Şekil 3.22 ve sıcaklık değışimi Şekil 3.23'te gösterilmiştir.

3.4 Deneysel Çalışma ile Mukayese

Sıvı fazdaki bakır ters akışlı ısı değiştiriciye girerek faz değişimini gerçekleştirmiş ve katı faz da kalıbı terk etmiştir. Kalıp geometrisi ve sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

Tablo 3. 38 Deneysel çalışmanın sınır koşulları

	Giriş Hızı m/s	Kütlesel Debi kg/s	$T_{giriş}$ °C	$T_{ıkış}$ °C
Sıvı Bakır	0.06	-	1170	30
Su	-	0.739	28	34



Şekil 3. 24 Deneysel çalışmanın kalıp modeli

Suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları mevsimsel koşullara göre değişkenlik gösterebilmektedir. Fakat giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark yaklaşık olarak 7 °C olarak ölçölmüştür.

3.5 Deneysel Çalışmanın Had Çözücü ile Mukayese Edilmesi

Had çözücüde kullanılacak olan geometrinin eksen boyunca simetrik olmasından dolayı model 2 boyutlu olarak kurulup çözümlenmiştir. Bu sayede hesaplama için gerekli olan zamandan tasarruf edilmiş hem de yüksek mesh kalitesinden dolayı sonuçların doğruluğu artmıştır.

Tablo 3. 39 Deneysel geometriye ait mesh kalite değerleri

Mesh Kalitesi	
Düğüm Sayısı	85271
Hücre Sayısı	84000
Maks. Çarpıklık	0.00
Min. Ortogonal Kalite	1.00

Deneysel modele ait mesh kalite parametreleri Tablo 3.39’da gösterilmiştir.

Tablo 3. 40 Deneysel model Had çözücü parametreleri

Had Çözücü	
Zaman	Zamandan Bağımsız (Steady)
Yerçekimi (x yönünde) “m/s ² ”	-9.81
Fiziksel Modeller	Ergime-Katılaşma, Viskoz(SST, k- ω)
Algoritma	“Coupled”
Ayrıklaştırma	İkinci Dereceden “Upwind”

Deneysel modele ait fizik kuran denklemler ve çözücü ayarları Tablo 3.36’da gösterilmiştir.

Tablo 3. 41 Deneysel model ve Had çözücü sonuçları

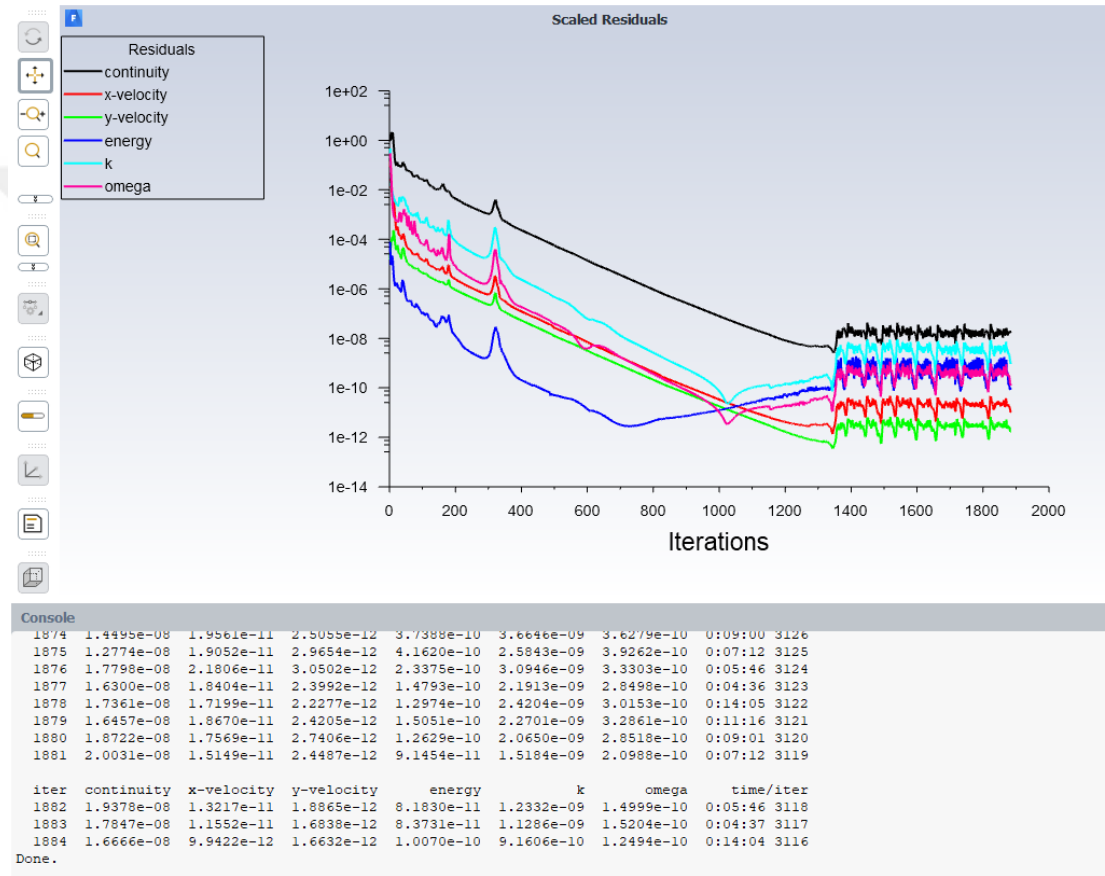
	Deneysel Sonuç	Had Çözümü
T _{su,çıkış} “°C”	35	33.9
T _{bakır,çıkış} “°C”	40	28

Deneysel modele ait Had çözücü ve korelasyon çözümüne ait sonuçlar Tablo 3.41’de verilmiştir.

Tablo 3. 42 Deneysel Model Had Çözücü ve Sayısal Yöntem Kritik Uzunluklar

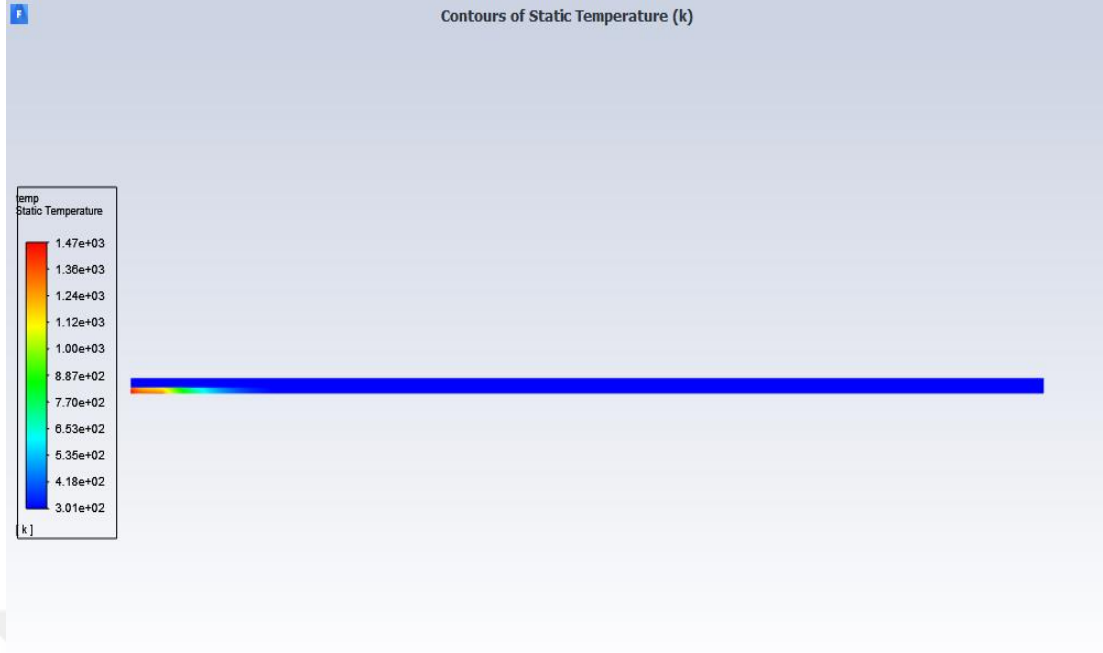
	Zorlanmış Taşınım (m)	İletim (m)	Toplam
Had Çözücü	0.042	0.776	0.818
Fiziksel Model	0.0361	0.80118	0.83728

Deneysel model ve sayısal yöntem ile elde edilen kritik uzunluklar Tablo 3.42'de gösterilmiştir.

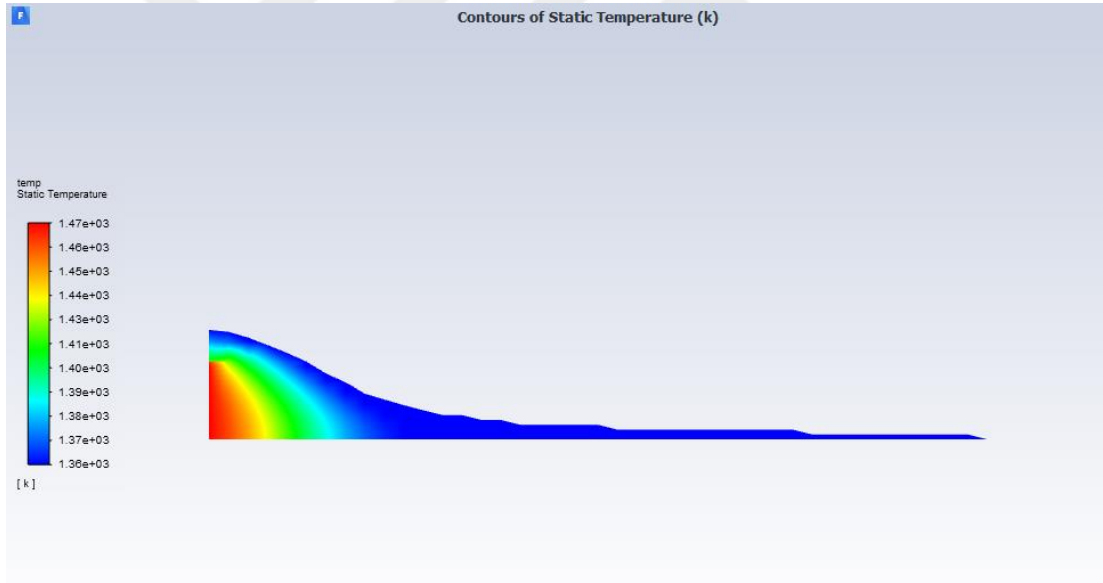


Şekil 3. 25 Deneysel model Had çözücü yakınsama grafiği

Deneysel modele ait yakınsama grafiği Şekil 3.25'te gösterildiği gibidir.

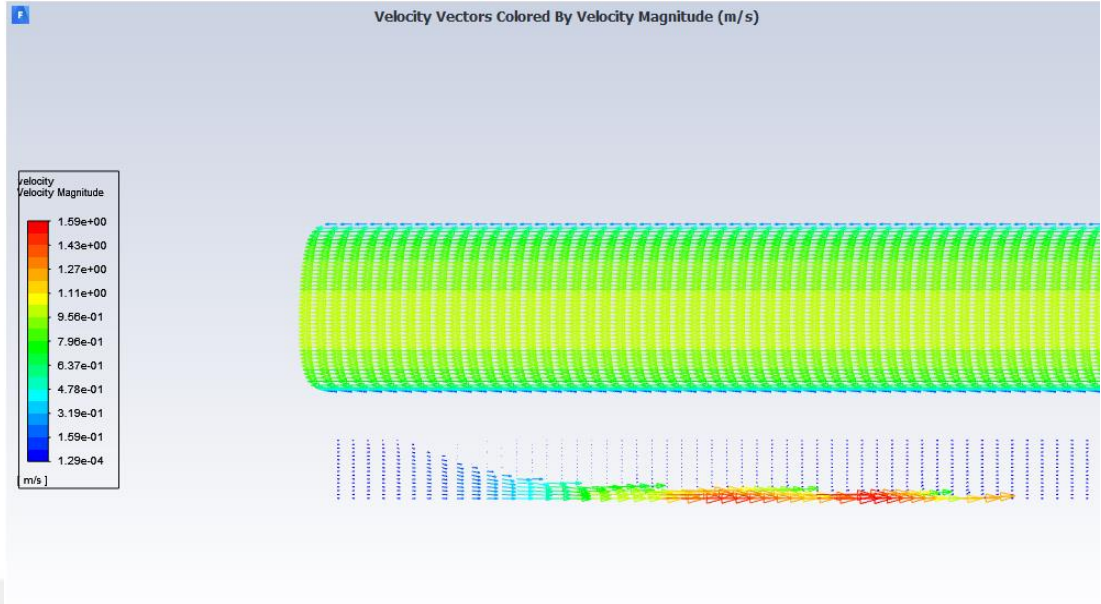


Şekil 3. 26 Deneysel model sıcaklık dağılımı



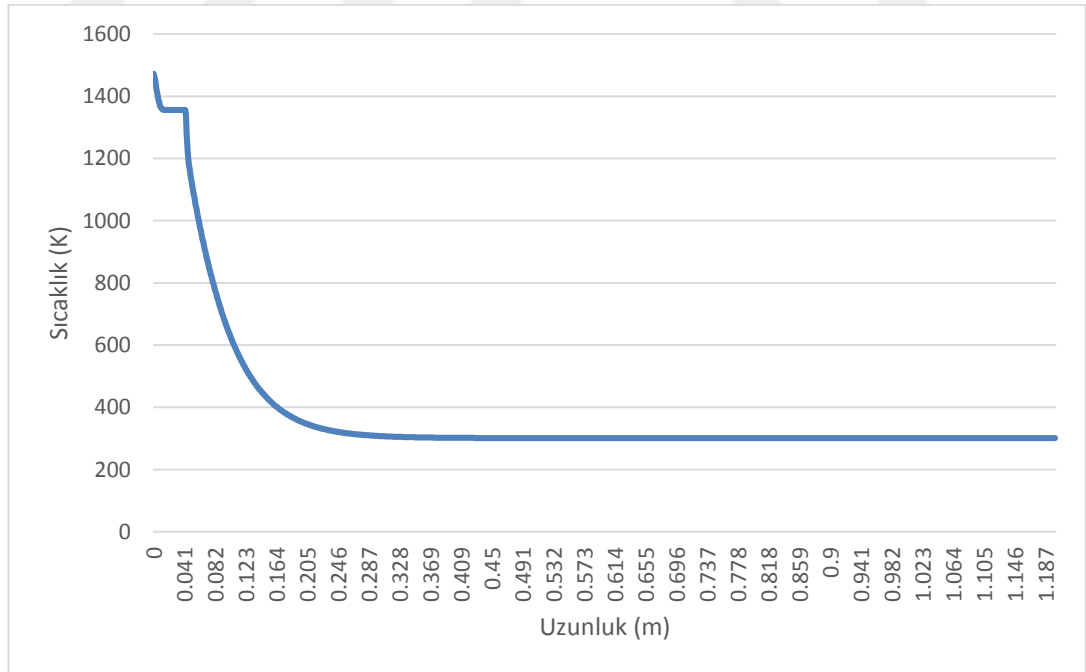
Şekil 3.27: 1470 K ve 1356 K arası sıcaklık dağılımı

Ergimiş halde giren akışkanın ısı değiştirgeci içerisinde faz değişiminin sürdüğü bölgenin sıcaklık değişimi Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 28 Deneysel model hız vektörleri

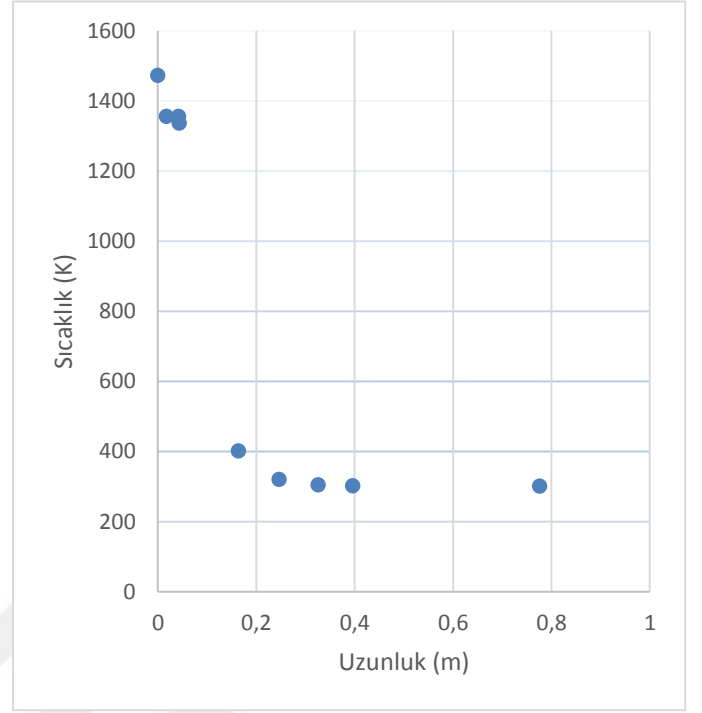
Isı değiştirgeciindeki akışkanlara ait hız profilleri Şekil 3.28’de gösterilmiştir. Şekil 3.28’in alt kısmında bulunan bölge değişken hız profiline sahiptir. Bunun sebebi ergimiş haldeki metalin kabuktan merkeze doğru faz değişiminin başlaması ve bu sebeple kesit alandaki daralma ile akışkanın hız kazanmasıdır.



Şekil 3. 29 Deneysel Model Sıcaklığın Konuma Göre Değişimi

Tablo 3. 43 Deneysel Model Kritik Değerler

Uzunluk(m)	Sıcaklık (K)
0	1473
0.017	1356
0.042	1356
0.043	1336.4
0.164	401.369
0.246	320.878
0.326	305.038
0.396	301.999
0.776	301



Şekil 3. 30 Deneysel Model Kritik Değerler

4. SONUÇLAR

Tablo 4.1 de verilen a, b ve c ifadeleri sırasıyla Dittus-Boelter, Sieder-Tate ve Gnielinski korelasyonlarını temsil etmektedir.

Tablo 4.1: Sayısal Çözüm ve Had Çözücü Kıyaslamaları

Tasarım	Uzunluk	Nu Kor.	Sayısal Çözüm		Had Çözücü		Suyun çıkış sıcaklığı nispi farkı	Bakırın çıkış sıcaklığı nispi farkı
	mm		Tsu °C	Tbakır °C	Tsu °C	Tbakır °C	%	%
1	988	a	30	705.11	33.2424	624.906	10.8	12.83
2	656	b	30	705.11	28.07	752.89	6.87	6.77
3	859	c	30	705.11	32.174	651.34	7.24	8.25
4	116	a	23	1076	24.24	1025.1	6.08	4.97
5	102	c	23	1076	23.84	1041.9	3.65	3.27
6	77	b	23	1076	23.08	1072	0.347	0.373
7	313	a	23	540	23.884	424.1	3.84	27.3
8	214	b	23	540	22.68	581.8	1.41	7.74
9	270	c	23	540	23.4	486.97	1.74	11.1

Tablo 4.1’de ifade edilen Nu korelasyonları hesaplamalar için ön tasarım niteliğinde olup yaklaşık sonuç vermektedir. Kullanılan korelasyonların içinde Had çözücüye en yakın sonuçları Sieder-Tate korelasyonu verdi. Sieder-Tate korelasyonu ile faz değişimine kadar olan bölgenin yaklaşık uzunluğu hesaplandı. Faz değişimi için gerekli olan kalıp uzunluğunu hesaplarken akışkana ait füzyon ısısı da hesaba dahil edildi. Faz değişimi tamamlandıktan sonra istenilen çıkış sıcaklığını elde etmek için iletim ile olan ısı transferi problemi çözüldü.

Sayısal model, Had çözücü ve deney verilerinin sonuçları karşılaştırıldığında faz değişimin olduğu katılaşma problemleri için Bölüm 3.2.2’de verilen eşitliklerin kullanışlı olabileceği kanaatine varıldı.

Bu bağlamda elde edilen veriler uygulama için ön tasarım parametrelerine ışık tutar niteliktedir. Bu tez çalışmasında önerilen üretim yöntemi daha hızlı ve daha

verimli bir üretim geliştirebilir. Fakat bahsi geçen üretim yönteminden elde edilecek olan ürünlerin mekaniksel ve elektriksel özelliklerine dair herhangi bir somut çalışma yapılmadı. Ayrıca bu yaklaşımlar için bu tez çalışmasında sadece silindirik geometrilerin faz değişimi incelendi. Dikdörtgen kesite sahip geometrilerde için bu yaklaşımın kullanılabilirliğine dahil herhangi somut bir çalışma yapılmamıştır. Silindirik geometriler soğuma esnasında tüm kesit alan boyunca homojen bir şekilde daralacak olup dikdörtgen kesitli geometriler için böyle bir yaklaşımı kabul etmek doğru sonuç vermeyebilir.



5. KAYNAKLAR

Assael, M. J., Kalyva, A. E., Antoniadis, K. D., Michael Banish, R., Egry, I., Wu, J., Kaschnitz, E. ve Wakeham, W. A. “Reference data for the density and viscosity of liquid copper and liquid tin”, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 39(3), (2010).

Akkaş, C., “Oksitli bakır cevherlerinden bakır kazanımı.”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2011).

Ayhan, C. ve Ilgaz, U. M. “Elektrolitik bakır sektöründeki farklı filmaşın üretim proseslerinin mukayesesi ve sarkuysan’da gerçekleştirilen modernizasyon ve geliştirme çalışmaları”, METALURJİ, 129(4), 55-80., (2002)

Cagran C.,”Thermal conductivity and diffusivity of liquid copper”, Msc. Thesis, Graz Technical University, Graz., (2000).

Cengel, Y.A., Isı ve Kütle Transferi, İzmir, Güven Kitabevi, 451-491, (2011).

Ehsani, A., Yener Yazıcı, E. H., “Anadolu’da bakır madenciliği ve kullanımının kısa tarihçesi”, Yer Altı Kaynakları Dergisi, 9, 43-48, (2016)

Jones, T. D. A., Strachan, R. I., Mackie, D. M., Cooper, M., Frame, B. ve Vorstius, J. B. “Computational fluid dynamic simulations of solidification for enhancing speed of continuous cast copper”, Engineering Science and Technology, An International Journal, 24(1), 92-104., (2021).

Kökeş, H., “Oksitli bakır cevherlerinden hidrometalurjik yöntemle bakır sülfat kristalleri üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2013).

Omaç, F.,” Bakırın tel çekme işlemi esnasında meydana gelen tozlanma sorununun incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,

Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı,
İstanbul, (2010).

Vynnycky, M. “Applied mathematical modelling of continuous casting
processes: A review”, *Metals*, 8(11), (2018).

