



**GİZLİ ISI DEPOLAMALI U BORULU
ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN ISIL ANALİZİ**

Mak. Müh. Abdulhamit ERDOĞAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Gülşah ÇAKMAK
MART-2018**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİZLİ ISI DEPOLAMALI U BORULU ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN
ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulhamit ERDOĞAN

(131120102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Şubat 2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 16 Mart 2018

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gülşah ÇAKMAK (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü)

Prof. Dr. Zeki ARGUNHAN (B.E.Ü)

MART-2018

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı hazırlamamda bana her türlü yardımlarda ve önerilerde bulunan danışmanım ve kıymetli hocam Doç. Dr. Gülşah ÇAKMAK'a teşekkür ederim. Ayrıca bilgi ve tecrübeleriyle fikir edinmemi sağlayan Prof. Dr. Cengiz YILDIZ'a, tez çalışmasında kullandığım programın eğitimi için yol gösteren Doç. Dr. Nevin ÇELİK'e, tecrübelerinden faydalandığım sosyal medyadan tanıştığım Makine Yüksek Mühendisi Onur ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Bugüne dek bana maddi manevi desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarım ve dostlarım için de teşekkür ederim.

Abdulhamit ERDOĞAN

ELAZIĞ-2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
3. ISI DEĞİŞTİRİCİ	11
3.1 Isı Değıştiricilerin Sınıflandırılması	11
3.1.1 Isının Transfer Şekline Göre Sınıflama	11
3.1.1.1 Akışkanlar Arasında Doğrudan Temasın Olduğu Isı Değıştiricileri	11
3.1.1.2 Akışkanlar Arasında Doğrudan Temasın Olmadığı Isı Değıştiricileri	12
3.1.2 Isı Geçişı Yüzeyinin Isı Geçişı Hacmine Oranına Göre Sınıflama	13
3.1.3 Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflama	13
3.1.4 Isı Geçişı Mekanizmasına Göre Sınıflama	13
3.1.4.1 İki Tarafta Tek Fazlı Akış	13
3.1.4.2 Bir Tarafta Tek Fazlı, Diğer Tarafta Çift Fazlı Akış	14
3.1.4.3 İki Tarafta da Çift Fazlı Akış	14
3.1.4.4 Taşınım ve Işınım Beraber Isı Geçişı	14
3.1.5 Konstrüksiyon Geometrisine Göre Sınıflama	14
3.1.5.1 Borulu Isı Değıştiricileri	14
3.1.5.2 Levhalı Isı Değıştiricileri	17
3.1.5.3 Kanatlı Yüzeyli Isı Değıştiricileri	21
3.1.5.4 Rejeneratif Isı Değıştiricileri	23
3.1.6 Akıma Göre Sınıflama	23
3.1.6.1 Tek Geçişli Isı Değıştiricileri	23
3.1.6.2 Çok Geçişli Isı Değıştiricileri	25
3.2 U Borulu Isı Değıştiricileri	26

4. ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN BOYUTLANDIRILMASI	29
4.1 Gövde Borulu Isı Değiştiricinin Boyutlandırılması	29
5. ISI DEPOLAMA YÖNTEMLERİ	36
5.1 Duyulur Isı Depolama	36
5.1.1 Sıvı Ortamda Depolama	38
5.1.2 Katı Ortamda Depolama	39
5.1.3 İkili Ortamda Depolama	41
5.2 Gizli Isı Depolama	41
6. FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİYLE ISI DEPOLAMA	44
6.1 Faz Değiştiren Maddeler	44
6.2 Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması	44
6.2.1 Tuz Hidratlar	46
6.2.2 Yağ Asitleri	47
6.2.3 Parafinler	48
6.3 Faz Değiştiren Malzemelerin Seçimindeki Kriterler	50
6.4 FDM'lerin Özelliklerinin Değerlendirilmesi	51
6.4.1 Faz Değişim Isısı	51
6.4.2 Erime-Donma	51
6.4.3 Aşırı Soğuma	52
6.4.4 Çekirdekleşme	52
6.4.5 Isıl Çevrim Boyunca Kararlılık	52
6.4.6 Paketlenme ve Sistem Bileşenlerine Uygunluk	53
7. MATERYAL ve METOT	54
7.1 Deney Düzeneği	54
7.2 Metot	64
7.2.1 Isı Değiştiricinin Sonlu Elemanlara Dönüştürülmesi ve Programa Tanıtılması	66
8. SAYISAL ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ	80
9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle atık ısı enerjisinden faydalanmak üzere kullanılan ısı değiştiricilerinde faz değişim malzemesi (FDM) olan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (kalsiyum klorür hekzahidrat) kullanılarak ısı depolanmıştır. Yapılan deneysel çalışma ANSYS FLUENT 17.2 Student programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözülmüş ve deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Deneysel çalışmada u borulu bir ısı değiştiricinin gövde kısmına FDM eklenmiş, ısı değiştiricisine 1.75 l/dk debide 60 °C sıcaklığında sıcak su gönderilerek FDM'nin erimesi gözlemlenmiştir. FDM'nin düşey ekseninde simetri düzlemine yerleştirilen probalar aracılığıyla FDM'nin sıcaklığı zamana göre ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise, aynı parametrelere bağlı kalınarak FDM'nin erimesi gerçekleştirilmiş ve düşey ekseninde simetri düzlemine yerleştirilen problemlerin sıcaklıkları ölçülerek deneysel çalışma ile karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmada, ölçülen değerler arasında yaklaşık olarak ortalama %4 hata oranı hesaplanmış ve birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı Değiştirici, Faz Değişim Malzemesi, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Kalsiyum Klorür Hekzahidrat, Fluent

SUMMARY

Thermal Analysis of U Tube Heat Exchangers with Latent Heat Storage

In this study, heat is stored using a phase change material (PCM) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (calcium chloride hexahydrate) in heat exchangers especially used to utilize waste heat energy. A melting model of PCM was simulated using ANSYS FLUENT 17.2 (Student Version). The simulation was solved numerically with finite element methods and compared with experimental datas.

In the experimental study, PCM was placed to the body of the u-tube heat exchanger and the melting process of PCM was observed by pumping water, 1.75 l/min flow rate and 60 °C temperature, to the heat exchanger . The temperature of the PCM was measured with thermocouples placed on vertical symmetry plane during the melting process. In the numerical study, PCM was melted while keeping the same parameters and at the same time the temperature of PCM were measured with the thermocouples, placed on the vertical symmetry plane and then compared with the experimental study. As a result of the comparision, about 4% error rate was calculated between the experimental study and the numerical study and it was seen that the results were compatible with each other.

Key Words: Heat Exchanger, Phase Change Material, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Calcium Chloride Hexahydrate, Fluent

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 Akışkanların doğrudan temaslı olduğu ısı değiştiricisi.....	12
Şekil 3.2 Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri.....	12
Şekil 3.3 Düz borulu ısı değiştiricisi.....	15
Şekil 3.4 Spiral borulu ısı değiştiricileri.....	16
Şekil 3.5 Gövde boru tipi ısı değiştiricisi.....	17
Şekil 3.6 Levhalı ısı değiştiricisi.....	17
Şekil 3.7 Contalı levhalı ısı değiştiricisi.....	18
Şekil 3.8 Spiral levhalı ısı değiştiricisi.....	19
Şekil 3.9 Lamelli ısı değiştiricisi.....	20
Şekil 3.10 İnce film ısı değiştiricileri.....	20
Şekil 3.11 Levhalı kanatlı ısı değiştiricisi.....	21
Şekil 3.12 Borulu kanatlı ısı değiştiricileri.....	22
Şekil 3.13 Paralel akımlı ısı değiştiricisi.....	24
Şekil 3.14 Ters akımlı ısı değiştiricisi.....	24
Şekil 3.15 Çapraz akımlı ısı değiştiricisi.....	25
Şekil 3.16 Çok geçişli gövde borulu ısı değiştiricisi.....	26
Şekil 3.17 U borulu ısı değiştiricisi.....	27
Şekil 3.18 U borulu ısı değiştiricisi.....	28
Şekil 5.1 Duyulur ısı depolama sistemin şematik resmi.....	39
Şekil 5.2 Sıvı ve katılarda birlikte duyulur ısı.....	41
Şekil 6.1 Faz değiştiren materyallerin sınıflandırılması.....	45
Şekil 7.1 50 farklı FDM'nin erime noktası ve enerji depolama yoğunluğu.....	56
Şekil 7.2 Deney seti görünüşü.....	60
Şekil 7.3 Termokupul yerleşim şekli.....	60
Şekil 7.4 Isı değiştiricinin ön kısmı.....	65
Şekil 7.5 Isı değiştiricisi.....	65
Şekil 7.6 3 boyutlu düşey olarak simetrik bire bir ölçekteki modellenen ısı değiştiricisi.....	65
Şekil 7.7 Modelin isimlendirilmesi ve mesh işlemleri.....	66

Şekil 7.8 İdeal ve çarpıklık durumu	67
Şekil 7.9 Skewness mesh metrik spektrumu	68
Şekil 7.10 Bir hücrenin ortogonal kalitesini hesaplamak için kullanılan vektörler	68
Şekil 7.11 Ortogonal kalite metrik spektrumu	69
Şekil 7.12 Aspect ratio'nun farklı hücre tiplerinde gösterimi	69
Şekil 7.13 Mesh istatistikleri	70
Şekil 7.14 Mesh detay görüntüsü	70
Şekil 7.15 Mesh detay görüntüsü	71
Şekil 7.16 Mesh detay görüntüsü	71
Şekil 7.17 Mesh detay görüntüsü	72
Şekil 7.18 Mesh detay görüntüsü	72
Şekil 7.19 FLUENT genel ayarlar arayüzü	75
Şekil 7.20 Aktif edilmiş denklemlerin gösterilişi.....	76
Şekil 7.21 Malzeme tanıma arayüzü	76
Şekil 7.22 Akışkan giriş şartlarının girilmesi.....	77
Şekil 7.23 Ara yüzey sınır şartının gösterimi	78
Şekil 7.24 Zaman adımının seçilmesi	79
Şekil 8.1 Fluent arayüzünde çözümün gösterilişi.....	80
Şekil 8.2 Akışkan bölgenin kararlı durum incelemesi	81
Şekil 8.3 Katı bölgenin kararlı durum incelemesi	81
Şekil 8.4 FDM bölgenin kararlı durum incelemesi	82
Şekil 8.5 FDM'nin zaman göre erime oranı.....	83
Şekil 8.6 Akışkanın giriş ve çıkıştaki kütle değişim miktarı.....	83
Şekil 8.7 Isı değiştiricinde depolanan ısının zamana göre değişimi.....	84
Şekil 8.8 Isı değiştiricinin farklı zamanlardaki sıcaklık değerleri.....	86
Şekil 8.9 FDM'nin farklı zamanlardaki erime durumunun gösterilişi	88
Şekil 8.10 3 boyutlu FDM'nin zaman içindeki erimesinin gösterilişi	89
Şekil 9.1 Model üzerindeki problemlerin konumu.....	90
Şekil 9.2 1, 2, 3 ve 4 nolu problemlerin deneysel ve sayısal çalışmadaki sıcaklıklarının zamana göre değişim grafiği	91
Şekil 9.3 5, 6, 7 ve 8 nolu problemlerin deneysel ve sayısal çalışmadaki sıcaklıklarının zamana göre değişim grafiği	92

Şekil 9.4 9, 10, 11 ve 12 nolu problemlerin deneysel ve sayısal çalışmadaki sıcaklıklarının zamana göre değişim grafiği	93
--	----



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Akış şekillerine göre ısı değıştiricilerin sınıflandırılması.	23
Tablo 4.1 C ve n ile ilgili değerler	31
Tablo 4.2 Bazı akışkanların kirlilik faktörleri	34
Tablo 5.1 Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler	40
Tablo 6.1 FDM olarak kullanılabilen bazı tuz hidratları	47
Tablo 6.2 Bazı yağ asit maddelerin özellikleri	47
Tablo 6.3 Bazı parafinlerin termal özellikleri.....	49
Tablo 7.1 Faz değıştirme sıcaklığının uygulanması	57
Tablo 7.2 Çin ve Hindistan'daki tuz ve tuz hidratların toptan fiyatları.....	58
Tablo 7.3 Bazı gizli ısı FDM'lerin toptan fiyatları	59
Tablo 7.4 300 dakika içinde çeşitli depo malzemelerindeki FDM'lerin erime oranları.....	59
Tablo 7.5 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa göre değışimi	61
Tablo 7.6 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın genel özellikleri	62
Tablo 7.7 Reynolds sayısı için gerekli bilgiler	63

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Alan
C_p	: Sabit basınçtaki özgül ısı
d	: Çap
F	: Düzeltme çarpanı
H	: Entalpi
h	: Isı taşınım katsayısı
J_K	: Kern yönteminde boyutsuz ısı çarpanı
J	: Joule
K	: Toplam ısı geçiş katsayısı
m	: Debi
N	: Newton
Nu	: Nusselt sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
Pa	: Pascal
Q	: Isı
Re	: Reynolds sayısı
R_f	: Kirlilik faktörü
T	: Sıcaklık
V	: Hız
β	: Kompaktlık
ρ	: Yoğunluk
π	: Pi sayısı
μ	: Dinamik viskozite
λ	: Isı iletim katsayısı

KISALTMALAR

CAD	: Computer aided Design
CFD	: Computational Fluid Dynamics
FDM	: Faz Değişim Malzemesi
HAD	: Hesaplamalı Akışkan Dinamiği



1. GİRİŞ

İnsanlığın varoluşundan beri, insanoğlu kendisini sürekli geliştirmiş yeni şeyler bulmak için sürekli bir uğraş haline girmiştir. Çeşitli bilim insanları sayesinde farklı icatlar keşfetmişlerdir. Geçtiğimiz son yüzyıllarda bu gelişimi daha da ivmelendirerek devam ettirmiş evrende var olan enerjinin farklı şekillerde ortaya çıkışına şahit olmuştur. Nükleer enerji, elektrik enerji, kimyasal enerji, ısı enerji ve ışık enerjisi gibi değişik türleri keşfetmiştir. İnsanoğlunun yapısında bulunan daha rahat bir yaşamı elde etmek için bu enerji çeşitlerini kendi rahat yaşamı için faydalı bir şekilde kullanmaya çalışmıştır. Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile birlikte geliştirmiş olduğu teknolojik araçlar daha fazla enerji gereksinimine ihtiyaç duymaya başlamıştır. Bunun için bilim insanları, alternatif enerji bulmaya veya kullandığı enerjiyi daha tasarruflu veya verimli kullanmaya yönelmişlerdir.

Son yıllarda dünyada kullanılmakta olan fosil yakıtların atmosfere verdiği zararlar ve bu yakıtların tükenme ihtimalinin olması sebebiyle gelişmiş ülkelerde terkedilmeye başlanmaktadır. Ayrıca bazı ülkeler tarafından, artan nüfus sebebiyle enerjiye çok fazla bütçe ayrıldığı gözlemlenmiş ve bunun için dışarı bağımlılıktan kurtulmak ve kendi enerjilerini kendileri üretmek için alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir.

Enerjinin üretilmesinin yanında diğer önemli bir husus ise enerjinin tasarruflu kullanılmasıdır. Gelişmiş ülkeler, yeni kaynaklar arayışının yanı sıra var olan enerji daha verimli bir şekilde kullanmak için de araştırmalar yapmaktadır. Farklı bakış açıları sayesinde günümüzde termal enerji depolama üzerine yoğun bir şekilde çalışılmalar yapılmaktadır. Bunun için fabrikaların atık ısıların geri kazanılmasında, soğutma kulelerindeki enerjinin geri kullanılmasında, binalardaki ısı enerjisinin geri kazanılması vb. gibi uygulamalarda faz değişim malzemesinin kullanılabilmesi üzerinde durulmuştur.

Termal enerji depolamalarda daha çok faz geçişi sırasındaki enerji kullanılmaktadır. Bu da uygulamada birçok zorluğun aşılmasına imkân sağlamıştır. Ayrıca faz değişim malzemesi (FDM) üzerine de bilim insanları çalışmalar yapmaya devam etmekte ve çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere farklı özelliklere sahip FDM'ler geliştirilmektedir. Termal enerji depolama sistemlerinin önemli bir artışı da ısıtmanın yanı sıra soğutma uygulamalarında kullanılabilmesidir. Bu sayede fazladan soğutma sistemlerine ihtiyacı azaltmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Wang ve arkadaşları, çift yönlü ve tek yönlü şaşırtma çubuklu bir ısı değiştiricini sayısal olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada CFD (Computational Fluid Dynamics) yöntemini kullanıp ısı transferi ve basınç düşüşü açısından kıyaslamaları yaparak çift yönlü ve şaşırtma çubuklu ısı değiştiricisini önermişlerdir. Bu çalışmalarında aynı kütle akış hızında çift yönlü ve şaşırtma çubuklu ısı değiştiricisindeki ısı transfer hızının %34,5-42,7 oranında tek yönlü şaşırtma çubuklu ısı değiştiricisinden daha yüksek ve basın düşüşünün ise %41,6-40,6 oranında daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır[1].

Maakoul ve arkadaşları, halka kenarında sarmal perdeler bulunan çift borulu bir ısı eşanjörünün tasarımı ve termo-hidrolik performansını sayısal olarak incelemişlerdir. FLUENT yazılımını kullanarak üç boyutlu hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) modeli, farklı konfigürasyonlar için halka yan akışkan akışını, ısı aktarım katsayısını ve basınç düşüşünü araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısının ve perde aralığının farklı değerleri (0.025-0.1 m) için sayısal bir analiz yapılmıştır. Sayısal model, ilk önce basit bir çift borulu ısı değiştirici için ampirik korelasyonlarla kıyaslandığında doğrulanmıştır. Daha sonra model sarmal bölmeler etkilerini araştırmak için kullanılmıştır. Helezonik şaşırtmalı bir halka tarafında elde edilen sonuçlar, basit çift-borulu ısı değiştiricilerine kıyasla gelişmiş ısı transferi performansı ve yüksek basınç düşüşü sağlamıştır. Çalışmada, termal performans ve yüksek basınç düşüşünün, bölme aralığı ve Reynold' un artan bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Buna ek olarak, sonuçları ifade eden ampirik korelasyonlar eğri uydurma temel alınarak geliştirilmiştir[2].

Maakoul ve arkadaşları, ticari yazılım ANSYS FLUENT kullanarak üç boyutlu hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) simülasyonlarını, son geliştirilen yonca-delik, sarmal bölmeler ve geleneksel bölümlü bölmeler arasındaki gövde tarafı akış dağılımını, ısı transfer katsayısını ve basınç düşüşünü, düşük gövde tarafı akış hızlarında incelemek ve karşılaştırmak için gerçekleştirmişlerdir. Bu sayısal karşılaştırmada, gövde, borular, bölmeler ve püskürtücülerden oluşan tüm ısı değiştiricileri modellenmiştir. Sayısal modelin, tek parçalı bölmeler için deney verileri ile karşılaştırılarak termo-hidrolik performansını oldukça iyi bir doğruluk ile öngördüğünü göstermişlerdir. Model daha sonra yonca-delik ve sarmal perdeli aynı ısı değiştiricinin termo-hidrolik performansını

hesaplamak ve karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sonuçlar, sarmal bölmelerin kullanımının daha yüksek termo-hidrolik performansa neden olduğunu, yonca-delik bölmelerinin bölümsel bölmelerle karşılaştırıldığında daha büyük bir basınç düşüşü ile daha yüksek bir ısı transfer performansı sağladığını göstermektedir[3].

Lyu ve arkadaşları, Jeotermal kuyular için sondaj kuyusundaki tek bir U borusu ısı eşanjörünün sayısal analizi yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada kütleli debi, derinlik derecesi, U borunun uzunluğu ve jeotermal alan ile kullanılan akışkan arasındaki sıcaklık farkının etkilerinin ısı eşanjörünün performansına etkisini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları simülasyonda yüksek sıcaklıktaki jeotermal alanlardan daha fazla ısı çekmek için sirkülasyon akışkanın miktarının daha fazla olması gerektiğini, U borunun uzatılmasının jeotermal enerjinin kullanılması için en verimli ve uygun maliyetli yol olduğunu tespit etmişlerdir[4].

Ramos ve arkadaşları, atık ısı geri kazanımında kullanılan, çapraz akışlı hava-su ısı borulu ısı değiştiricini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. CFD sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve modelleme tahminlerinin deney sonuçlarından %10 farklı olduğunu bulmuşlardır[5].

Skullong ve arkadaşları, kanatlı bir boru tipi ısı değiştiricinde ısı transferini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı Reynold sayıları, farklı kanat açıları ve farklı kanat boşluklarının ısı transferine etkilerini gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda boru içine eklenen kanatların normal borudaki Nusselt sayısı ve sürtünme faktöründen sırasıyla %505 ve 69 kat artış sağladığını belirlemişlerdir. Kanat açısının 60° kanat boşluk oranının 0,5 olması durumunda Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün maksimum olduğunu buna karşılık 30 derecelik kanat açısı ve kanat boşluk oranının 10 olmasında ise en iyi termal iyileştirme faktörünün elde edileceğini belirtmişlerdir[6].

Lei ve arkadaşları, klasik gövde borulu ısı değiştiricilerin şaşırtma levhalarını açılı bir şekilde yerleştirerek ısı transferine etkisi üzerinde çalışmışlardır. Yapmış oldukları sayısal analizde, açılı yerleştirilmiş şaşırtma levhalı ısı değiştiricinin basınç düşüşüne bağlı ısı transfer katsayısının klasik gövde borulu ısı değiştiriciden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir[7].

Ezra ve arkadaşları, birden fazla faz değişim malzemesi (FDM) içeren gizli ısı termal enerji depolama sistemi için erime sıcaklığı aralığının analizi ve optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Kademeli olarak düzenlenmiş çoklu FDM içeren gizli ısı termal enerji depolama birimlerini sayısal olarak çözebilen bir matematiksel model kullanarak analiz etmişlerdir. Sonuçlar, tüplerin sayısı, FDM sayısı, FDM'lerin erime sıcaklıkları, kullanılan akışkanın akış hızı ve giriş sıcaklığı ile farklılık gösteren çeşitli durumların genelleştirildiği boyutsuz formda sunulmuştur[8].

Álvarez ve arkadaşları, binaların doğal soğutması için FDM'nin binalara entegrasyonu ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada, binaların soğutma talebini azaltmak için geceleyin soğutma havalandırmalarında FDM'leri kullanmanın çok güçlü ve etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. FDM kullanımında, FDM ile hava arasındaki sınırlı temas alanı, FDM kullanımını engelleyen çok düşük taşınım katsayısı, soğüğün saklandığı zaman ile bina tarafından gerekli olduğu zaman arasındaki büyük faz kayması nedeniyle depolanan soğüğün düşük kullanım faktörü gibi dezavantajlar olduğunu belirtmişlerdir. Bu dezavantajları yok etmek için farklı çözümler üretmişlerdir. Temas alanının 3,6 oranında artırılması, ısı transfer katsayısının artırılması ve soğüğün depolanmasına izin veren aktif kontrol sistemlerinin eklenmesi ile kullanım faktörünün iyileştirilmesini sağlamışlardır[9].

Felinski ve Sekret, tüp şeklindeki kollektöre boşaltılmış FDM uygulamasının, ev tipi bir sıcak su sisteminin termal performansına etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda tüp kollektör depolamanın % 33 - % 66 aralığındaki şarj veriminin, güneş radyasyon şiddetine ve FDM sıcaklığına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak, tipik bir meteoroloji yılının her karakteristik döneminde sıcak su pik yükleri sırasında depoda sıcak su sıcaklığında bir artış gözlemlemişlerdir. Ve FDM'siz bir evsel sıcak su sistemindeki yıllık güneş fraksiyonunda %20,5 oranında iyileşme olduğunu ortaya koymuşlardır[10].

Elarga ve arkadaşları, evlerin tavan boşluğuna farklı tiplerde yerleştirilmiş FDM'lerin termal performansı üzerine deneysel ve sayısal analiz yapmışlardır. Yaz iklimi koşullarında sürekli izlenen bir çatıya 3 farklı çözüm uygulanmıştır. Biri FDM olmadan yalın haldeki çatı, diğer ikisi ise farklı erime/katılma sıcaklığına sahip FDM yerleştirilmiş çatı. Yaptıkları çalışmada, FDM ile geliştirilmiş elemanların yaz sezonunda yüksek bir termal performans verimliliği için gelecek vaat eden bir çözüm olduğunu ileri sürmüşlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlarda FDM şekline bağlı olarak %13 ile %59

arasında devam eden ısı pik yükünün azalma gösterdiğini ve istenilen performansa ulaşmak için FDM tiplerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir[11].

Wang ve arkadaşları, tam ölçekli bir odanın dış duvarında FDM'li tuğlanın kullanımına ilişkin deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada, bir çeşit kompozit FDM duvarının yıl boyunca uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmayı, üç mevsimde ve tam ölçekli bir odadaki aynı ölçekteki biri FDM'li duvar diğeri ise enerji tasarruflu duvar üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Yaz iklim koşullarında 1-2 saatlik bir gecikme ile FDM içeren duvarın soğutma yükü için %24,32 oranında azalma ve maksimum iç duvar yüzey sıcaklığı için yaklaşık 0.2 derecelik azalma hesaplamışlardır. Sonbahar ve ilkbaharda, FDM'li duvarın faz değişim sıcaklığı aralığının altında ve ortamdaki termal bozulmaya karşı tamamen dayanabildiğini belirtmişlerdir. Kış iklim şartlarında, FDM-duvarının ısıtma yükünü % 10-30'unu azaltabildiğini ve klimanın gündüz veya gece kapalı olduğu durumlarda, iç duvar yüzeyinden kayıp ısıнын % 9-72'sinde bir azalma elde edilebileceğini göstermişlerdir[12].

Poshtiri ve Jafari, bir binanın FDM içeren bir adsorpsiyon sistemi ile 24 saat soğutulmasını incelemişlerdir. FDM içeren gizli ısı depolama ünitesini gündüz güneş enerjisini depolamak için kullanmışlardır. Geceleri korunan termal enerji ve yardımcı bir ısıtıcı ile adsorpsiyonlu soğutucuyu çalıştırmışlardır. Oda sıcaklığı ile odanın termal konforunun sağlanabileceği maksimum soğutma ihtiyacını tahmin etmişler ve bunu gerçekleştirmişler. Buna ek olarak farklı parametrelerin oda sıcaklığı ve güneş fraksiyonu üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Sonuç olarak saatteki hava değişimi ve taze hava oranının yükselmesinin güneş fraksiyonunu azalttığı ve yardımcı enerji tüketimini arttırdığı bulunmuştur. Saatteki hava değişimi=4 ve taze hava oranı %20 olduğunda, günlük güneş fraksiyonunun 0,76 ve 24 saat boyunca 217 MJ yardımcı enerji gerektiği hesaplanmıştır. Bu koşullar altında 24 saat boyunca maksimum soğutma talebi 4000W olan termal konfor elde edilmiştir[13].

Yang ve arkadaşları, kentsel alanların iyi havalandırılmamasından dolayı insan sağlığı için çeşitli sorunlar doğuran ince toz ve tehlikeli kirletici maddelerin kentlerdeki miktarını azaltmak için bina çatılarına FDM uygulayarak, FDM içeren bu serin tavan sisteminin kentsel ısı ada fenomenindeki azalmaya etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda FDM içeren serin tavan sistemi uygulandığında ortalama sıcaklığın 6,8 ° C azaldığını

gözlemlemişler. Deneysel verilere göre ise, sıcaklık dağılım simülasyonun sonucunda ticari bölgedeki kentsel gölgelik katmanındaki sıcaklığın yaz aylarında 7,8 ° C, kışın 11,3 ° C azaldığını ve yerleşim alanındaki sıcaklığın sırasıyla yaz mevsiminde 6,4 ° C ve kışın 10,5 ° C azaldığını gözlemlemişlerdir[14].

Bakhshipour ve arkadaşları, FDM' li ısı değiştiriciyle birleşik soğutma çevrimini sayısal olarak incelemişlerdir. Önce FDM' siz bir soğutma çevrimi performans katsayısı hesaplanmış daha sonra ise sisteme FDM' li ısı değiştirici eklenip tekrardan performans katsayısı hesaplanmıştır. FDM' li ısı değiştiricini, soğutma çevriminde, kondansatörden sonraki ve genişleme valfinden önceki yere yerleştirmişlerdir. Simülasyon sonucunda, bir buzdolabının soğutma çevriminde FDM'nin kullanılmasının konveksiyon yönteminin iyileşmesine neden olduğunu ve buzdolabının performans katsayısının % 9.58 oranında arttığını gözlemlemişlerdir[15].

Stropnik ve Stritih, PV panellerinde FDM kullanarak verimliliği artırma üzerine çalışmışlardır. FDM'li ve FDM'siz PV panelinin anlık hücre sıcaklığı verilerini birbiriyle karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlarda; FDM içermeyen PV panelinin yüzeyindeki maksimum sıcaklık farkının, bir gün periyodunda FDM'li bir panelden 35.6 ° C daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Deney sonuçlarına dayanarak TRNSYS yazılımı ile FDM'li PV paneli için maksimum elektriksel etkinlik artışının hesaplanması yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlarda Ljunljana şehri için elektrik üretiminin bir yıl boyunca %7,3 den daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir[16].

Saffari ve arkadaşları, binalarda enerji performansını artırmak için FDM erime sıcaklığının simülasyon tabanlı optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada EnergyPlus, GenOpt yazılımlarını kullanarak ısıtma, soğutma, yıllık ısıtma ve soğutma enerji performanslarını artırmak için yenilikçi bir entalpi-sıcaklık fonksiyonu ile simülasyon tabanlı optimizasyon metodolojisi sunmuşlardır. Sonuç olarak, soğutmanın egemen olduğu bir iklimde yıllık enerji tüketimini azaltmak için en iyi FDM erime sıcaklığının maksimum 26 °C (erime aralığı 24-28 °C), ısınmanın egemen olduğu bir iklimde ise FDM'nin minimum erime sıcaklığının 20 °C (18-22 °C erime aralığı) olması durumunda yüksek enerji verimliliğini sağladığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca her bir iklim kuşağında FDM erime sıcaklığının uygun bir şekilde seçilmesinin ısınma, soğuma ve

toplam yıllık enerji tüketiminde kayda değer enerji tasarruflarına fayda sağlayacağını ortaya koymuşlardır[17].

Pahamli ve arkadaşları, FDM içeren tek geçişli gövde-boru ısı değiştiricilerindeki eksantriklik ve işlem parametrelerinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada; ısı transferi akışkanının geçtiği boruyu farklı konumlara yerleştirerek ve farklı akış özelliklerinde denemeler yaparak FDM'nin çeşitli değişkenlere bağlı olup olmadığını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, içteki borunun üzerinde katı FDM olduğu sürece FDM'nin ortalama sıcaklığının borunun eksantrikliğinin fonksiyonu olmadığını tespit etmişlerdir. Eksantrikliğin artırılmasıyla, erime işleminin son evrelerinde ısı transfer hızının ve ortalama sıcaklığın arttığını belirtmişlerdir[18].

Eslamnezhad ve Rahimi, farklı kanat dizilimleri ile ısı değiştiricilerindeki FDM için ısı transferinin artırılması üzerine çalışmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, iç boruya bağlı ve dış yüzeyine; dış boruya bağlı iç yüzeyine farklı şekilde yerleştirilmiş kanatlar durumunda FDM'nin erimesini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda yerleştirilen kanatların FDM içindeki ısı taşınımını etkilemeyecek şekilde yerleştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca ısı değiştiricinde en son eriyen FDM kısmının alt tabakada olduğunu göstermişlerdir. Bu dezavantajı önlemek içinde farklı bir model tasarımı yapmışlar ve bu tasarımın eskiye kıyasla erime süresini %17.9 oranında arttırdığını kanıtlamışlardır[19].

Abdulateef ve arkadaşları, uzunlamasına üçgen kanatlı üç borulu bir ısı değiştiricinde FDM'nin deneysel ve sayısal çalışmasını yapmışlardır. İlk önce sadece iç yüzeyden ısıtma yapmışlar fakat 4 saat süre sonunda tamamen erimediğini gözlemlemişlerdir. Daha sonra hem iç tarafta hem de dış tarafta sıcak akışkan kullanmışlardır. Ve daha düşük sıcaklıkta erimeyi başarmışlardır. Isı değiştiricine yerleştirdikleri iç, iç-dış ve dış üçgen kanatların sırasıyla %11, %12 ve %15 oranında önemli bir iyileştirme sağladığını kanıtlamışlardır. Sonuç olarak, dış üçgen kanatlı borunun, FDM'nin kısa süreli erimesinde etkili olduğunu göstermişlerdir[20].

Al-Abidi ve arkadaşları, termal enerji depolanması için dahili ve harici kanatçıkları olan bir üç borulu ısı değiştiricini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyde giriş sıcaklığı sabit veya sabit olmayan akışkanın FDM'yi eritmesini ve FDM'nin erime sürecindeki kütle

debinin etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçta, akışkanın giriş sıcaklığının kütledebiden daha önemli bir parametre olduğunu tespit etmişlerdir[21].

Raj ve Velraj, az maliyetli soğutma uygulamaları için FDM'li bir ısı değiştiricinin deneysel ve sayısal çözümlemesini yapmışlardır. Tasarladıkları sistemin, gün içinde sıcaklık değişiminin düşük olduğu ücretsiz soğutma uygulamaları için elverişli olduğunu belirtmişler ve sayısal analiz sonuçlarını deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır[22].

Chen ve arkadaşları, spiral yay tüpü etrafında grafit kompozit FDM'li bir ısı değiştiriciden oluşan termal enerji depolama sistemini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Genelde FDM'lerin düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalarından dolayı, kompakt bir ısı değiştiricisi etrafına yerleştirilmiş ve genişletilmiş kompozit bir FDM kullanılarak hızlı bir şekilde şarj işlemini gerçekleştiren bir sistem geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, Reynolds sayısının 8700'den yüksek olduğu anda ısı transferi sıcaklık farkının sistem performansı üzerinde büyük bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca spiral yay tüpünün helezon yarıçapının, FDM tankının yarıçapına optimum oranının 0,53 ile 0,64 arasında olduğunu belirtmişlerdir[23].

Qi ve arkadaşları, toprak kaynaklı ısı pompaları için FDM'lerin dolgu malzemesi olarak kullanılmasının termal performanslarına etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Dört farklı dolgu malzemesi termal performanslarının, başlangıç zemin sıcaklığının ve boru aralığının toprak kaynaklı ısı pompasına etkileri ve kombine etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, FDM'nin düşük termal efekt yarıçapı ve faz değişim sürecindeki tutarlı sıcaklığı nedeniyle sıradan toprağa göre bazı avantajları olduğunu bulmuşlardır[24].

Esapour ve arkadaşları, çok borulu ısı değiştiricilerinde faz değişiminin boru sayısına, geometrik dizilimine, debiye ve giriş sıcaklığına bağlı olup olmadığını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, akışkanın giriş sıcaklığının artmasıyla erime işleminin hızlandığını fakat debinin artmasının bu süreyi ciddi anlamda düşürmediğini bulmuşlardır. Ayrıca boru sayısının artmasının, borular arasındaki erime bölgesinin genişlemesinin ve bundan dolayı da taşınım ısı transferinin erime hızını arttırdığını da belirtmişlerdir. Boru sayılarındaki bu artışın erime süresinde %29'luk bir düşüşe neden olduğunu da ortaya koymuşlardır[25].

Allouche ve arkadaşları, yatay olarak yerleştirilmiş 100 litrelik silindirik bir tankta bir faz değişim termal enerji depolama sürecinin simülasyonu için hesaplamalı akışkan dinamikleri modeli geliştirmişlerdir. Yapmış oldukları modeli deneysel veriler ile doğrulamışlardır. FDM yığın sıcaklığında, deneysel ile matematiksel model arasında %5'lik bir hata payının olduğunu ve toplam birikmiş enerjide de %10'luk bir fark olduğunu bulmuşlardır. Dolayısıyla geliştirilen modelin, ısı transferinin iyi bir doğrulukla tahmin ettiği sonucuna varmışlardır[26].

Meng ve Zhang, tank içine yerleştirilmiş boruların etrafındaki FDM'nin termal enerji depolama olarak kullanımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında şarj ve deşarj işlemleri sırasında termal enerji depolama ünitesinin performansını ve akışkanın farklı giriş sıcaklığı ile farklı debilerde gönderilmesindeki etkilere yer vermişlerdir. Kompozit FDM içeren termal enerji depolama sisteminin daha iyi ısı aktarımına sahip olduğu, akışkanın yüksek akış hızı ve akışkan ile FDM arasında yüksek sıcaklık farkının ısı transferini arttırabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca tasarladıkları modelin, birbirleriyle birleştirilerek elde edilen büyük modelin, tek haldeki model kadar performans gösterebileceğini belirtmişlerdir. Sayısal olarak da, ısı şarj işleminde 0.1 m/s giriş akış hızı ile akışkanın girişteki sıcaklıkları 75 °C, 80 °C ve 85 °C olduğunda FDM'nin erime zamanlamalarının sırasıyla 3600s, 2615s ve 2100s olduğunu tespit etmişlerdir. Isı şarj işleminde ise 80 °C giriş sıcaklığında akışkanın akış hızları sırasıyla 0,2 m/s, 0,15 m/s ve 0,1 m/s olduğu zaman FDM'nin erime sürelerinin 2220 s, 2340 s ve 2615 s olduğunu bulmuşlardır[27].

Darzi ve arkadaşları, iki dairesel silindir, dairesel bir silindir içinde bir elips silindir ve dairesel bir silindirde bir kanatlı silindir içeren üç farklı yatay boru düzenlemesinde bir FDM'nin eritilmesi ve katılaştırılmasını, en-boy oranı ve elipsin yönü ve kanatların sayısına bağlı olarak sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, dairesel borunun üst tarafındaki doğal taşınımın borunun alt tarafındakinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca FDM'ye eklenen nanopartiküllerin ve eklenen kanatların erime ve katılaşma oranını arttırdığını da belirtmişlerdir[28].

Sheikholeslami ve arkadaşları, sonlu elemanlar yöntemi ile yenilikçi kanat konfigürasyonunu termal enerji depolama sistemlerinde kullanarak deşarj süresinin hızlanmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Deşarj süresinin hızlandırmanın iki yöntemi

olduğunu, birinin FDM'ye nano partiküllerin eklenmesi diğerinin ise uygun kanat eklenmesi ile olacağını belirtmişler ve ayrı ayrı olarak incelemişlerdir. Kullanmış oldukları kanat tipini ise kar tanelerinin kristal yapılarından ilham alarak geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçta, kar tanesi kristal yapısında tasarlanan kanatların, maksimum enerji depolama kapasitesini önemli ölçüde azaltmadan, deşarj işlemini belirgin bir şekilde arttırdığını gözlemlemişlerdir[29].

Tyagi ve Buddhi, gizli ısı depolama malzemesi olarak kalsiyum klorür hekzahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) inorganik tuzunun erime ısı ve erime sıcaklığındaki değişikliklerini incelemek için hızlandırılmış bin termal çevrim testini deneysel olarak incelemişler. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın sabit bir sıcaklık aralığında eridiği ve termal çevrim işlemi sırasında erime ısısında küçük değişiklikler gösterdiğini fark etmişlerdir. Dolayısıyla bu FDM'nin çeşitli bina/depolama sistemleri ve ısıtma soğutma uygulamaları için gelecek vadeden bir faz değişim malzemesi olabileceğini belirtmişlerdir[30].

3. ISI DEĞİŞTİRİCİ

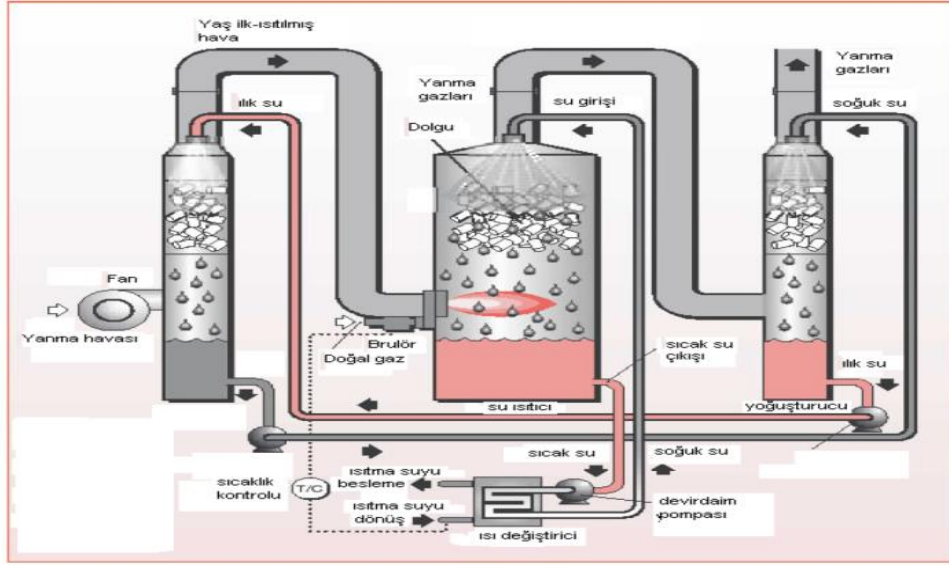
Farklı sıcaklıklara ait olan ve birbirinden katı bir cidar ile ayrılan, iki akışkan arasındaki ısı transferini gerçekleştirmek için kullanılan araçlara ısı değiştirici denmektedir. Mühendislik uygulamalarında önemli ve çok karşılaşılan olaylardan birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı transferidir. Bu ısı transferini ısı değiştiriciler sağlamaktadır. Isı değiştiricileri termik santrallarda, taşıt araçlarında, ısıtmada, iklimlendirmede, soğutma tesislerinde, kimya endüstrilerinde, elektronik cihazlarda, alternatif enerji kaynaklarının kullanımında, ısı depolanmasında vb. birçok yerde bulunabilmektedir. Isı değiştiricileri, içinde yoğuşma ve buharlaşma gibi bir faz değişimi yoksa bunlara duyulur ısı değiştiricileri, içinde faz değişimi olanlara ise gizli ısı değiştiricileri adı verilir[31].

3.1 Isı Değiştiricilerin Sınıflandırılması

3.1.1 Isının Transfer Şekline Göre Sınıflama

3.1.1.1 Akışkanlar Arasında Doğrudan Temasın Olduğu Isı Değiştiricileri

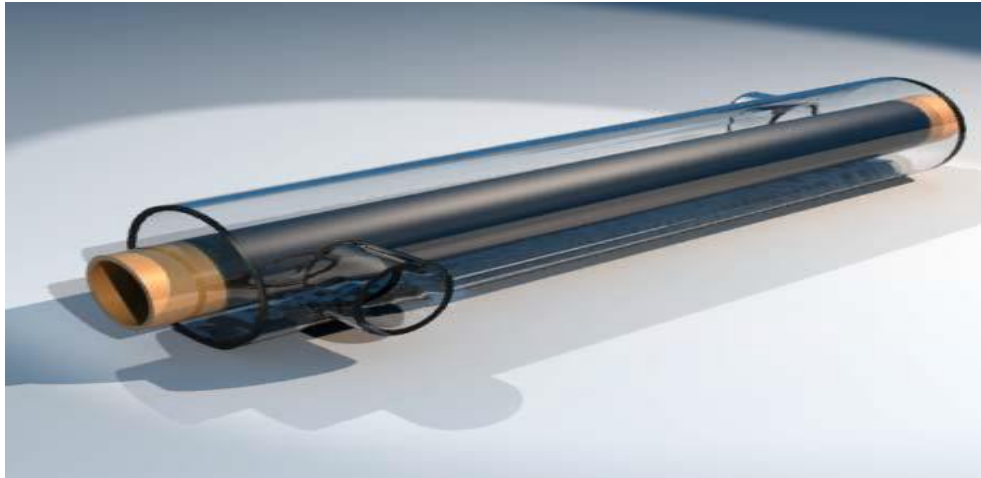
Bu şekildeki ısı değiştiricilerinde, farklı sıcaklıklara ait olan akışkanlar veya bir akışkan ile katı maddeler birbirleri ile direkt karıştırılır ya da temas ettirilir. Bu tip ısı değiştiricilerine soğutma kuleleri örnek olarak verilebilir. Farklı sıcaklığa sahip iki akışkanın birbiriyle temas ettirilen bu ısı değiştiricilerinde çoğu zaman akışkanlardan biri gaz fazında diğeri ise sıvı fazındadır. Isı transferi işlemi sonrasında, iki akışkan birbirinden kendiliğinden ayrılır[32]. Bu tip ısı değiştiriciler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Akışkanların doğrudan temaslı olduğu ısı değiştiricisi.[33]

3.1.1.2 Akışkanlar Arasında Doğrudan Temasın Olmadığı Isı Değiştiricileri

Bu ısı değiştiricilerinde ısı, önce sıcak akışkandan iki akışkanı ayıran bölüme veya bir kütleye geçer. Daha sonra bu ısı, bu yüzeyden veya kütleden soğuk akışkana transfer edilir. Şekil 3.2’de en basit haliyle bu tip ısı değiştiricisine yer verilmiştir. Bu ısı değiştiricilerin, doğrudan ısı geçişi olan ısı değiştiricileri, ısının depolandığı ısı değiştiricileri, akışkan yataklı ısı değiştiricileri olmak üzere üç farklı çeşidi vardır [34].



Şekil 3.2 Akışkanlar arasında doğrudan temasın olmadığı ısı değiştiricileri

3.1.2 Isı Geçişi Yüzeyinin Isı Geçişi Hacmine Oranına Göre Sınıflama

Bu sınıflandırma kompakt olan ve kompakt olmayan olarak ikiye ayrılır. Yüzey alanı-hacim oranı (β) $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 'den büyük ise kompakt, küçük olursa kompakt olmayan ısı değiştirici olarak adlandırılır.

$$\beta = \text{Isı geçişi yüzeyi (m}^2\text{)} / \text{Isı değiştiricinin hacmi (m}^3\text{)} \quad (3.1)$$

Kompakt ısı değiştiricileri ağırlıktan ve hacimden kazanç sağladığı ve daha esnek bir imalata olanak tanıdığı için kompakt olmayan ısı değiştiricilerine göre tercih edilirler. Buna karşılık akışkanlardan en az birinin gaz olması, yüzeyi kirleten, korozif olan akışkanların kullanılamaması ve akış esnasında oluşan yüksek basınç kayıplarını yenebilmek için ilave vantilatör ve pompa gücüne gerek duyulması, kompakt ısı değiştiricilerinin dezavantajlarıdır[32].

3.1.3 Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflama

Isı değiştiricilerinde çoğunlukla iki akışkan arasındaki ısı transferi görülmektedir. Buna karşın, bazı kimyasal proseslerde, soğutma işleminde, havanın elementlerine ayrılmasında, hidrojenin saf hale getirilmesinde ve sıvılaştırılması gibi işlemlerde üç akışkanlı ısı değiştiricileri görülmektedir[32].

3.1.4 Isı Geçişi Mekanizmasına Göre Sınıflama

3.1.4.1 İki Tarafta Tek Fazlı Akış

Isı değiştiricinin iki tarafındaki tek fazlı akışkanlardaki ısı taşınımı, bir pompa ya da vantilatör ile tahrik edilen zorlanmış taşınım ile olabilir veya yoğunluk farkının nedeniyle doğal taşınım şeklinde olabilir. Bu ısı değiştiricilerinin örnekleri şunlardır; salon ısıtıcıları, otomobil radyatörleri, hava ısıtıcıları, buhar kazanları ekonomizörleri, kompresör iç soğutucuları ve rejeneratörler vs... [34]

3.1.4.2 Bir Tarafta Tek Fazlı, Diğer Tarafta Çift Fazlı Akış

Bu ısı değıştircilerin, tek taraflarında zorlanmış veya tek fazlı akış varken diğer tarafta kaynamakta veya yoğunlaşmakta olan iki fazlı akış vardır. Bu ısı değıştircilerin örnekleri şunlardır; termik santrallerin kondenserleri, soğutma sistemlerinin kondenserleri veya buharlaştırıcısı ile buhar kazanları vs... [31]

3.1.4.3 İki Tarafta da Çift Fazlı Akış

Bu ısı değıştircilerinde bir tarafta yoğunlaşma varken diğer tarafta buharlaşma olan değıştircilerdir. Hidrokarbonların distilasyonunda yüksek basınçlı buhar kullanılarak alçak basınçlı buhar elde edilmesi için kullanılır[34].

3.1.4.4 Taşınım ve Işınım Beraber Isı Geçişı

Bu tip ısı değıştircilerinde, bir tarafta yüksek sıcaklıktaki gaz akışkandan diğer taraftaki akışkana geçen ısı taşınım ve ışınlımla birlikte olduğu ısı değıştircilerdir. Bu tip ısı değıştircilerine örnek olarak şunlar verilebilir; yüksek sıcaklıkta çalışan dolgu maddeli rejeneratörler, fosil yakıt yakan ısıtıcılar, buhar kazanları ve buhar kazanların kızdırıcıları ile piroliz ocakları[34].

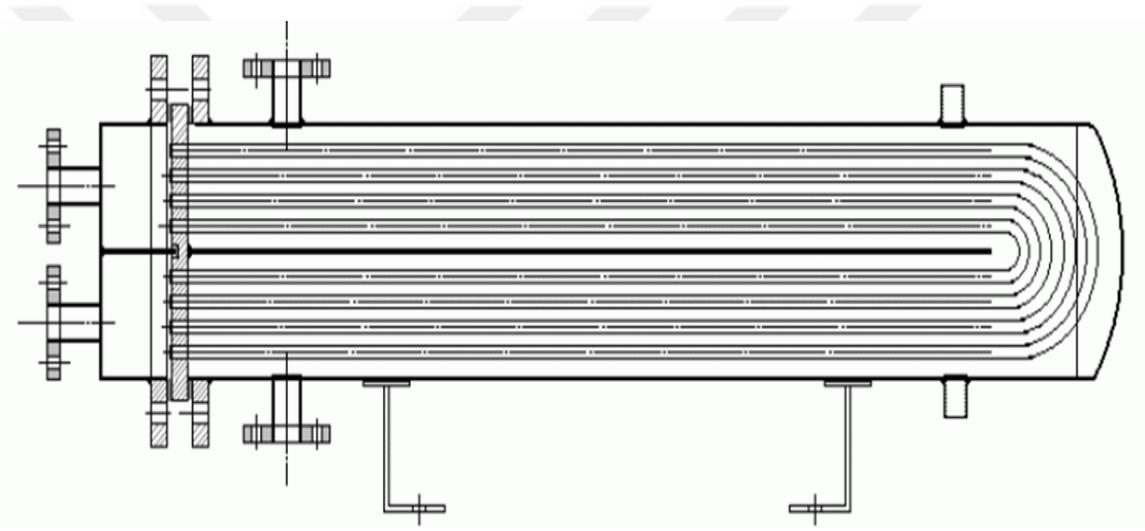
3.1.5 Konstrüksiyon Geometrisine Göre Sınıflama

3.1.5.1 Borulu Isı Değıştircileri

Bu ısı değıştircilerindeki borular genelde dairesel kesitlidirler. Fakat bazı durumlarda boruların kesitleri dikdörtgen veya eliptik olabilirler. Borulu ısı değıştircileri boru uzunluğu, çapı ve yerleştirme şekli isteğe göre yapılabildiği için dizaynı oldukça kolay olmaktadır. Ayrıca dairesel boruların, yüksek basınçlara dayanımı oldukça yüksektir. Üç başlıkta incelenebilir[35].

➤ Düz Borulu Isı Değiştiricileri

Pratikte iki borulu olanların aksine, boru demetlerinden yapılmış türleri de görölmektedir. Çift borulu olanlar, bu ısı değiştiricilerin en basit halidir. Çift borulu ısı değiştiriciler aynı yöne koyulmuş iki borudan imal edilmektedir. şekil 3.3'te bu ısı değiştiricisinin resmine yer verilmiştir. Akışkanlardan biri içerideki borudan ilerlerken, diğer akışkan dışarıdaki borudan ilerler. Akışkanların akış doğrultusu paralel veya ters yönlü olabilir. Bu tip ısı değiştiricinin temizliği kolay olduğundan, özellikle kirli akışkanlar için uygun bir yapıdır. Çok yüksek basınçlarda çalışılmak istenmesi durumunda boru çaplarının küçük olması gerekmektedir[32].



şekil 3.3 Düz borulu ısı değiştirici

➤ Spiral Borulu Isı Değiştiricileri

Bu ısı değiştiricileri, bir veya daha fazla borudan spiral ile bu spiralin dışındaki bir borudan imal edilmektedir. Basit ve ucuz şekilde elde edilebilen bu ısı değiştiricileri genellikle havuz ve depolardaki akışkanların sıcaklık kontrolünde kullanılabilir. Bu tipteki değiştiricilerde ısı genleşmenin oluşturduğu gerilme sorunları yoktur. Fakat bu ısı değiştiricinin depo kısmı ile spiral borunun dış yüzeyi kolaylık temizlenebilirken borunun iç yüzeyleri kolaylıkla temizlenemez. şekil 3.4'te bu ısı değiştiricisinin üretim esnasındaki resmi gösterilmiştir. Bu şekildeki ısı değiştiricilerinin depo bölümündeki debi ve akışkan hızları düşük olması nedeniyle ısı kapasite küçüktür[31].

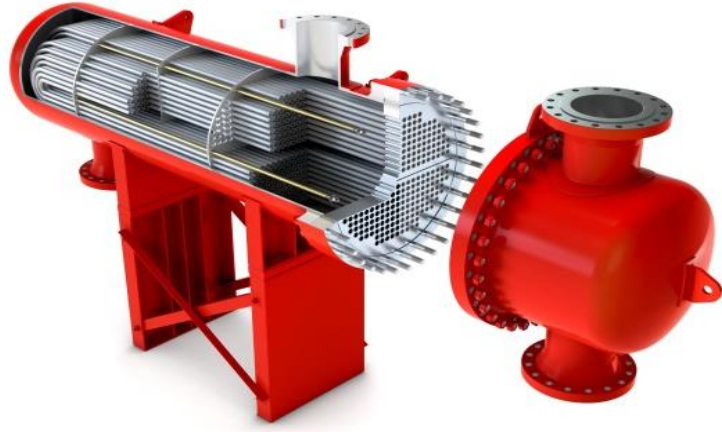


Şekil 3.4 Spiral borulu ısı değıştircileri

➤ **Gövde Borulu Isı Değıştircileri**

Bu ısı değıştircisi, iç kısmında birbirine paralel borulardan oluşan ve dış kısmında ise silindirik bir gövdeden meydana gelmiştir. Akışkanlardan birisi boruların içinden akarken, diğeri ise gövde içinden akmaktadır. Ana elemanları; gövde, borular veya boru demeti, gövde içindeki akışı yönlendiren şaşırtma levhaları ve boruların tespit edildiğı ön ve arka aynalardır. İşletme kolaylıkları ile geniş bir çalışma basıncı aralığı sebebiyle kullanım alanı yaygındır. Bu tip ısı değıştircileri nükleer santrallerde, kimya endüstrisinde, termik santrallerde, güç santrallerinde ön ısıtıcı olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.5’te gövde borulu ısı değıştircisinin tasarım resmine yer verilmiştir.

Gövde borulu ısı değıştircilerinde kullanılan boru çapları 10mm ile 57mm aralığında değışmektedir. Genellikle daha kompaktlık ve ucuz ısı değıştirici imkânı sağladığından, küçük boru çapları seçilir. Kirli akışkanların kullanılması gerektiğı durumlarda ise temizleme imkânı açısından büyük çaplı borular tercihe edilir. Boru et kalınlığı, boru içindeki korozyon payına ve akışkan basıncı düşünülerek seçilir[32].



Şekil 3.5 Gövde boru tipi ısı değiştircisi

3.1.5.2 Levhalı Isı Değiştircileri

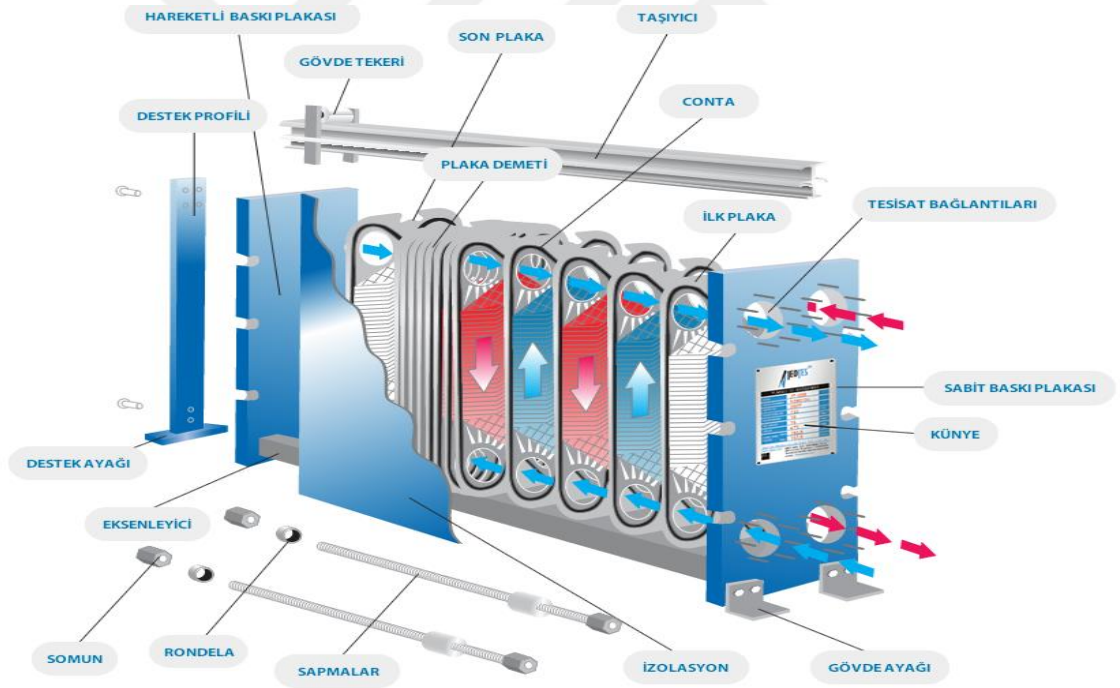
Bu ısı değiştircileri, çoğunlukla ince metal plakalardan yapılır. Plakalar düz, sıralı, oluklu ya da pürüzsüz olabilirler. Yüksek sıcaklık ve basınc farklarında kullanılamazlar. Akışkanlar, yassı levhalarla birbirinden ayrılmıştır. Isı transferi bu levhalardan olur. Her çeşit gaz, sıvı bileşimi veya iki fazlı akışlarda kullanılırlar. şekil 3.6’da bu ısı değiştircisine yer verilmiştir. Dört grupta incelenebilir[35].



Şekil 3.6 Levhalı ısı değiştircisi

➤ Contalı Levhalı Isı Değiştiricileri

İnce plakalar, üstte ve altta iki taşıyıcı çubuğa tutturularak oluşturulmuş ısı değiştiricilerdir. Bu ısı değiştiricisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Isı değiştiricisi, dikdörtgensel ince metal plakaların bir araya gelmesiyle oluşur. Akışkanları birbirinden ayıran, dalgalı veya oluklu şeklindeki ince levhalardan bir bölüm yapılarak imal edilir. Metal levhalar arasına contalar yerleştirilmiştir. İstenilen sayıda levha eklenerek temas yüzeyi artırılabilir. Akışkanlar levhalar arasındaki boşluklardan akarak ısı transferini sağlarlar. Isı transferi bütün levha yüzeyi boyunca olur. Levha kalınlığı 0,5-1,2 mm, levhalar arasındaki boşluk ise 5-6 mm conta ile sağlanır. Levha malzemesi, bakır ve alaşımları, alüminyum, paslanmaz çelik, karbonlu çelik, nikel ve molibden alaşımları kullanılmaktadır[35].

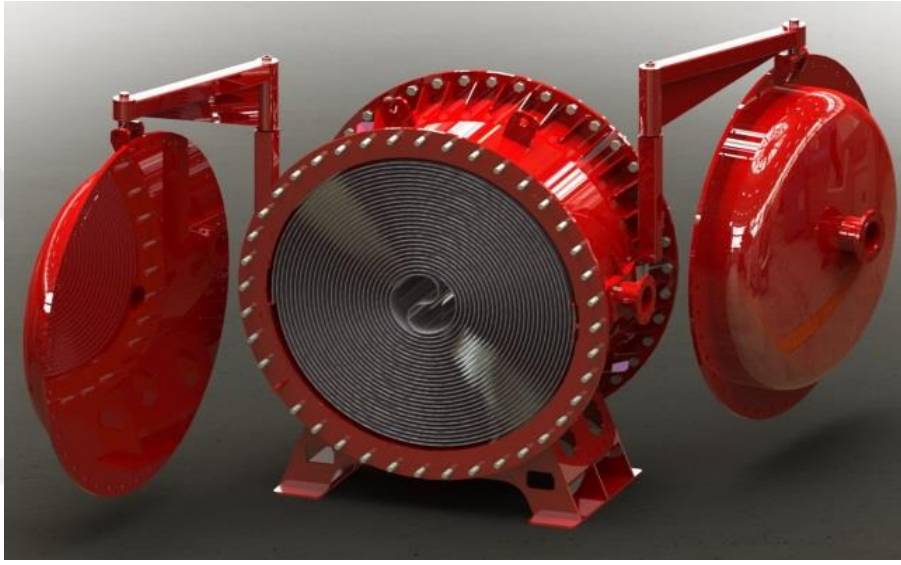


Şekil 3.7 Contalı levhalı ısı değiştiricisi

➤ Spiral Levhalı Isı Değiştiricileri

İşletmeye göre boyutlandırılmış iki levhanın birbirine spiral şeklinde sarılmasıyla elde edilmektedir. İki levha arasına yerleştirilen çubuklar ile homojen bir boşluk oluşturulabilir.

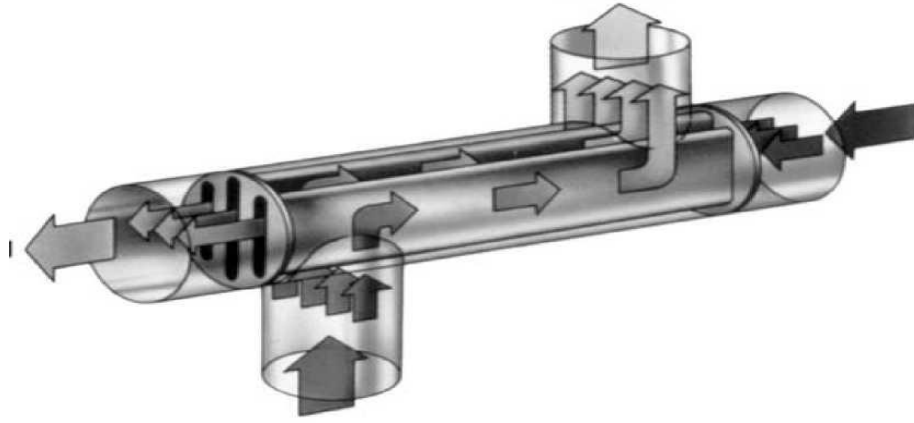
Levhaların iki yüzeyi contalı bir kapak ile kapatılır. Akışkanlar birbirlerine göre paralel veya ters hareket edecek şekilde imal edilebilir. Tortu oluşturacak akışkanlar kullanılması halinde, bu ısı değıştircilerin temizlenmesi kolay olması nedeniyle rahatlıkla kullanılabilir. Bu nedenle kâğıt endüstrisinde, sülfat ve sülfıt fabrikalarında bu ısı değıştirici tercih edilir. Şekil 3.8’de tasarımı yapılmış spiral levhalı ısı değıştiricisi gösterilmiştir. Yüksek kompakt olmalarına rağmen özel imalatları sebebiyle pahalıdırlar. Maksimum yüzey alanı 150 m², en yüksek işletme basıncı 10 bar ve en yüksek işletme sıcaklığı 500 °C ile sınırlıdır[32].



Şekil 3.8 Spiral levhalı ısı değıştirici

➤ Lamelli Isı Değıştircileri

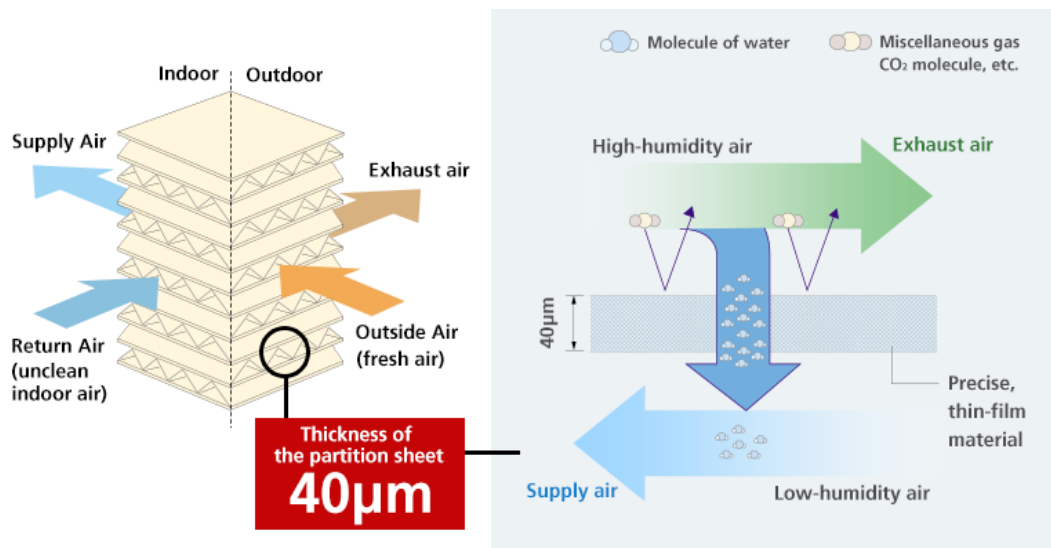
Bu tip ısı değıştirciler, yassılaştırılmış borulardan oluşturulmuş bir demetin bir gövdenin içine yerleştirilmesiyle elde edilir. En basit haliyle bu ısı değıştircisi Şekil.3.9’da gösterilmiştir. Lamel adı verilen bu borular, çoğunlukla elektrikli veya nokta dikiş kaynağı ile birbirlerine bağlantısı yapılır. Akışkanlardan biri, yassılaştırılmış lamelli borular içinden ilerlerken diğerk akışkan da bu lamellerin aralarından ilerler. Gövde içinde ayrıca şaşırtma levhaları yoktur. Akış tek geçişli olup akışkanlar birbirlerine göre ters veya paralel olarak akabilir[31].



Şekil 3.9 Lamelli ısı değıştircisi

➤ İnce Film Isı Değıştircileri

Bu ısı değıştircileri, yüksek viskozite sahip ve yüksek sıcaklığa duyarlı maddelerin soğutulmasında ve ısıtılmasında kullanılmaktadır. Şekil 3.10’da bu ısı değıştircilerin, havanın karbondioksitten ayrıştırılmasında kullanımı gösterilmiştir. Değıştirci içindeki, yüksek sıcaklığa hassas maddelerin kısa kalış süresi ve büyük ısı taşınım katsayısına sahip olmaları nedeniyle, pratikte çoğu zaman bu ısı değıştircileri buharlaştırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu tipler 15 m yükseklik, 2 m çap değerlerine kadar imal edilebilirler[35].



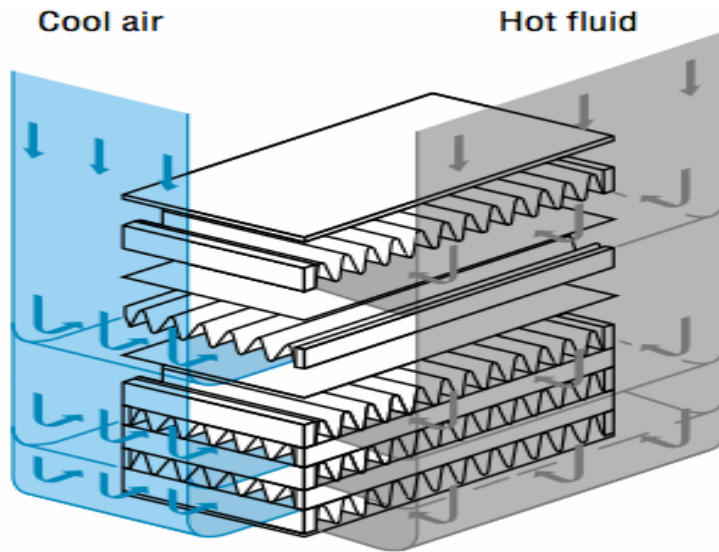
Şekil 3.10 İnce film ısı değıştircileri

3.1.5.3 Kanatlı Yüzeyli Isı Değiştircileri

Levhalı ve borulu ısı değiştircilerinde genellikle, β , yüzey alan-hacim yoğunluğu (kompaktlık) $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ değerinden, ısı verimleri ise %60 değerinden daha küçüktür. Bu tipteki ısı değiştircilerinin kompaktlığı ve ısı verimleri arttırılmak istenirse ısıtma yüzeylerine kanat ismi verilen ek yüzeyler eklenerek ısıtma yüzeyleri arttırılmış olur. Genel prensibi, ısı taşınım katsayısının düşük olduğu akışkan tarafına uygun bir şekilde kanatlar yerleştirilir. Bu yöntemle, küçük bir hacimde daha fazla ısı transferi gerçekteşmesine rağmen yüzeylere eklenen kanatların ekstra basınç kayıplarına neden olduğu ihmal edilmemelidir. Bu nedenle yapısal olarak kanat tasarımlarının en uygunu araştırılmalıdır[31]. Levhalı kanatlı ve borulu kanatlı olarak iki şekilde incelenebilir[36].

➤ Levhalı Kanatlı Isı Değiştircileri

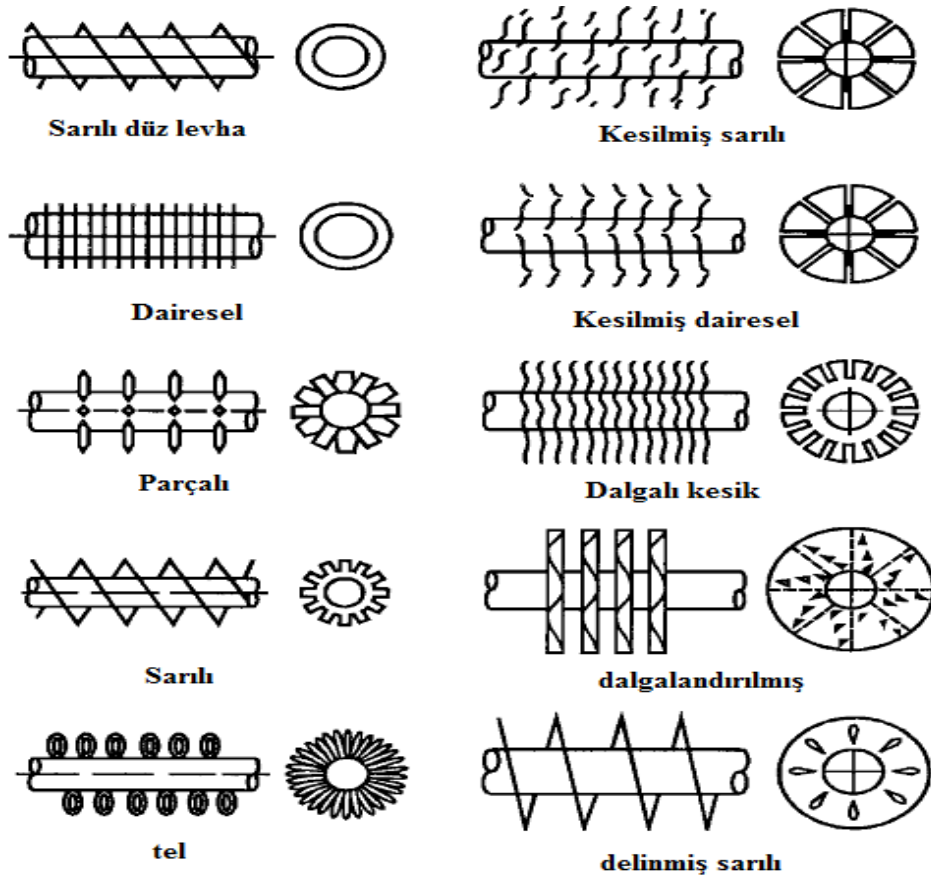
Bu ısı değiştircilerinde akış, oluklu kanatlar arasına yerleştirilmiş olan yassı levhalarla birbirinden ayrılmıştır. Genellikle düşük sıcaklıkta çalışan tesislerde, akışkanlar arası sıcaklık farkının (1°C 'den 5°C 'ye kadar) düşük olduğu yerlerde kullanılır. Sahip oldukları akışa göre çeşitli şekillerde (paralel, ters veya çapraz akış) düzenlenebilir. Bu değiştirciler orta seviyeli (700 kPa 'a kadar) basınçlarda kullanılır. şekil 3.11'de bu ısı değiştirişi gösterilmiştir[37].



şekil 3.11 Levhalı kanatlı ısı değiştircisi

➤ Borulu Kanatlı Isı Değiştircileri

Genellikle sıvı-gaz arasındaki ısı transferini sağlamak bu tip ısı değiştircileri kullanılır. Kanatlar gaz akışkan bölgesine yerleştirilir. Boru içine, genelde sıvının basıncı daha yüksek olduğundan sıvı fazdaki akışkan gönderilir. Boru dışından ise gaz fazındaki akışkan gönderilir. Bu yüzden kanatlar borunun dışına yerleştirilir. şekil 3.12’de boru dışına yerleştirilen farklı kanat profilleri gösterilmiştir[38].



şekil 3.12 Borulu kanatlı ısı değiştircileri

Boru içine kanatlar daha çok evaporatörler ve kondenserlerde konur. Kanatlar boru üzerine lehim, kaynak, sıkı geğme gibi yöntemlerle tutturulur. Isı değiştircisinin kullanılabilme sıcaklığı bu tutturma şekline de bağlıdır. Alan-hacim oranı maksimum 3300 m²/m³ değerine ulaşabilir. Bu tipler; taşıtlarda, güç santrallerinde, iklimlendirme ve soğutma tesisatlarında kullanılırlar[38].

3.1.5.4 Rejeneratif Isı Değiştiricileri

Bu şekilde ısı değiştiricilerinde ısı, öncelikle sıcak akışkan ile bir ortamda depo edilir, daha sonra soğuk akışkana transfer edilir. Bunlara rejeneratör adı verilir ve ısı geçişi dolaylı olur. Isının depolandığı alanlara matris ya da dolgu maddesi adı verilir. Kompaktlık değerleri oldukça yüksek olup ilk yatırım masrafları azdır. Buna karşılık, sadece gaz akışkanlarda kullanılabilirler[32].

3.1.6 Akıma Göre Sınıflama

Isı değiştiricilerinde akışın farklı tipte tasarlanması; logaritmik sıcaklık farkına, ısıl gerilmelere ve etkenliğe oldukça etki etmektedir. İki çeşit akış şekli söz konusudur. Buna göre Tablo 3.1’de genel sınıflandırma yapılmıştır[37].

Tablo 3.1 Akış şekillerine göre ısı değiştiricilerin sınıflandırılması. [37]

Tek Geçişli	Çok geçişli
- Paralel akışlı - Ters akışlı - Çapraz akışlı	- Çapraz-ters ve çapraz-paralel akımlı ısı değiştiricileri - Çok geçişli gövde-borulu ısı değiştiricileri - n adet paralel levha geçişli ısı değiştiricileri

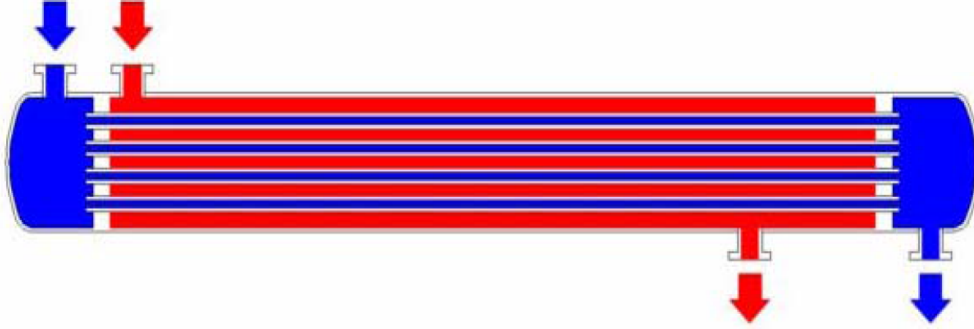
3.1.6.1 Tek Geçişli Isı Değiştiricileri

Tek geçişli ısı değiştiricilerinde iki akışkan birbirine sadece bir kere temas ederler veya birbirini sadece bir kere geçerler. Üç başlıkta incelenebilir.

➤ Paralel Akışlı

Bu düzenlemede, ısı değiştirici içindeki iki akışkan değiştiricinin aynı tarafından girip, birbirlerine paralel olarak akarlar ve değiştiricinin diğer ucundan aynı yönde çıkarlar. Isı değiştirici boyunca, akışkan sıcaklığının değişimi tek boyutludur. Isı değiştiricinin ısı

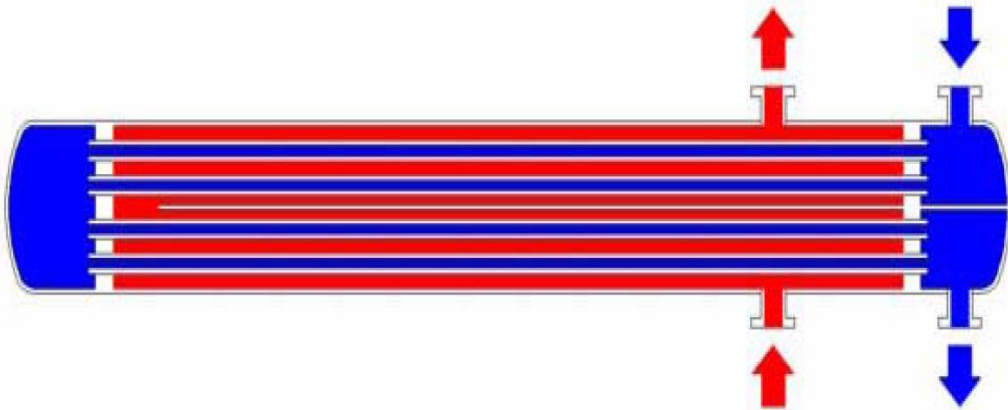
geçişi olan cidar sıcaklığı fazla değişmediğinden, ısıl gerilmelerinin istenmediği yerlerde tercih edilebilir[33]. Şekil 3.13'te paralel akımlı ısı değiştiricisi gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Paralel akımlı ısı değiştiricisi

➤ Ters Akışlı

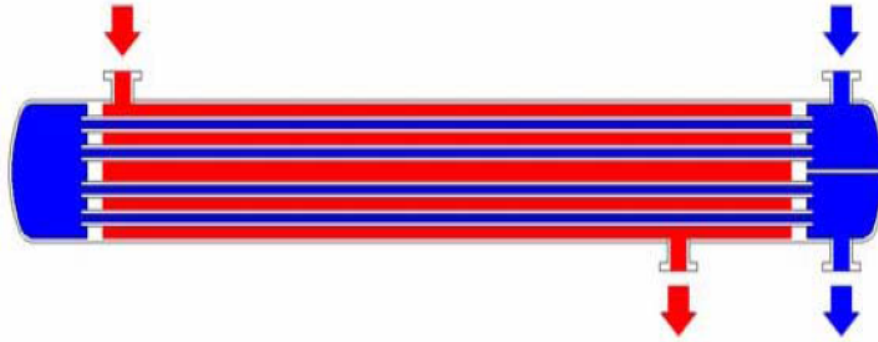
Akışkanlar birbirine paralel ancak zıt yönlerde aktığı için bu tiplerin en büyük avantajı var olan sıcaklık farkının en yüksek verimle kullanılabilmesidir. Burada küçük çaplı bir boru, daha büyük çaplı bir boru içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3.14'te bu ısı değiştiricisinde akan akışkanın yönleri gösterilmiştir. Akışkanlardan biri içteki borunun içinden diğeri ise boru aralıklarından akar. Gövde olarak adlandırılan borunun içine çok sayıda küçük çaplı boru yerleştirilebilir. Ancak boru sayısı artacak olursa çeşitli imalat zorlukları ile karşılaşılabilir. Zıt akışlı ısı değiştiricilerinde logaritmik sıcaklık farkı, diğer bütün akış tasarımlarından daha büyüktür. Bu nedenle diğer ısı değiştiricilerine kıyasla daha kompakt bir yapıya sahiptirler[37].



Şekil 3.14 Ters akımlı ısı değiştiricisi

➤ Çapraz Akışlı

Her iki akışkan bu ısı değıştircisinde birbirine dik olarak akarlar. Akışkanlar, kanatlar veya şaşırtma levhaları yardımı ile değıştirci içinde ilerlerken kendi kendisi ile karışabilir ya da karışmayabilir. Bu tipte akışkanın sıcaklık dağılımı iki boyutlu olup, verim paralel akışlılardan daha iyi, ters akışlılardan daha kötüdür. En genel haliyle Şekil 3.15’de bu ısı değıştircisi gösterilmiştir. Avantajı ise, imalatı kolay olmasıdır. Dolayısıyla, uygulamalarda kompakt ısı değıştircilerin çoğu çapraz şeklinde imal edilirler[39].



Şekil 3.15 Çapraz akımlı ısı değıştircisi

3.1.6.2 Çok Geçişli Isı Değıştircileri

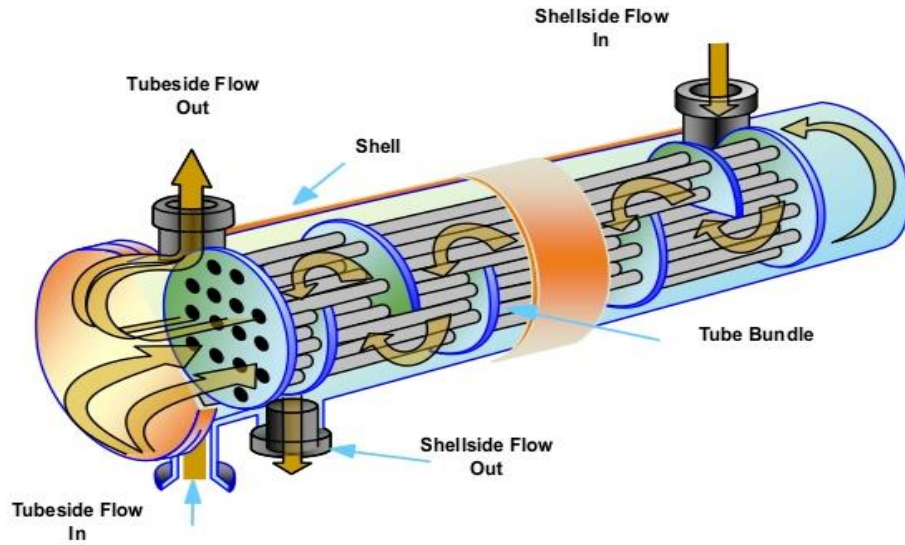
Isı değıştircilerinin iç bölümlerinde akışkanlardan birinin izleyeceği yolu değışik şekillerde dizayn edilerek çok geçişli tertipler elde edilebilir. Isı değıştircilerindeki geçiş sayısının artırılmasının en büyük nedeni verimi arttırmaktır. Çok geçişli ısı değıştircileri kanatlı yüzeylerde, gövde-boru tiplerinde ve levhalı tiplerde değışik konumlandırmalarda imal edilebilir.

➤ Çapraz Ters ve Çapraz Paralel Akışlı Isı Değıştircileri

Çapraz ters, genellikle kanatlı yüzeyli ısı değıştircilerinde tercih edilir. İki veya daha fazla sayıda çapraz geçiş arka arkaya ters akışlı olarak seri halde bağlanır. Isı değıştircisi verimliliği, her bir geçişteki akışkanların karışıp karışmadığına ve geçiş sayısına bağlıdır.

➤ Çok Geçişli Gövde Borulu Isı Değiştircileri

Isı değiştircilerinin çok geçişli dizayn edilmesi, gövde borulu ısı değiştircilerinde en çok kullanılan şeklidir. Sistemdeki borular bir taraftan sabitlendiğinden ısı gerilmeler çok dūřuktur. Gövde tarafındaki akışkan kendi içinde karıştığından, herhangi bir yerdeki gövde akışkanının sıcaklığı sabittir. şekil 3.16’da akışkanın ısı değiştirici içindeki hareketi gösterilmiştir.



şekil 3.16 Çok geçişli gövde borulu ısı değiştiricisi

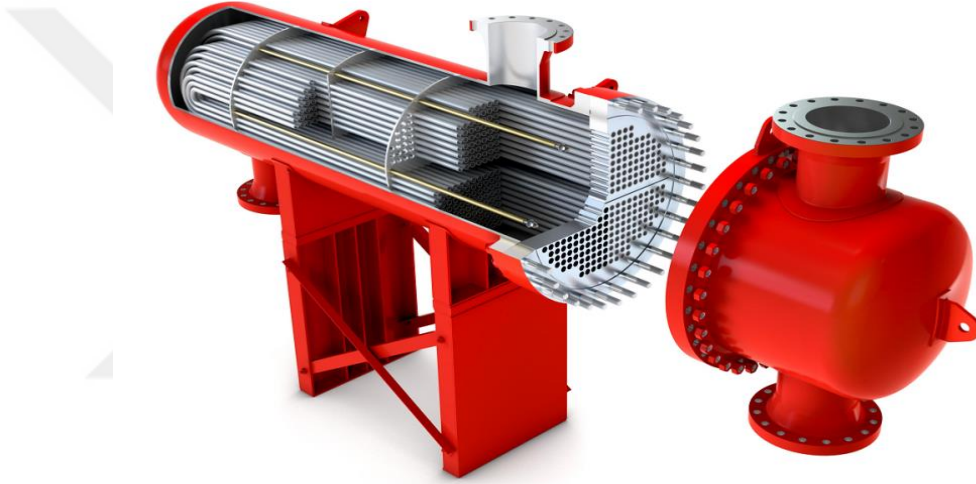
➤ n Adet Paralel Levha Geçişli Isı Değiştircileri

Levha tipi ısı değiştircilerinde, levhaların çeşitli şekillerde tasarlanması ile çok geçişli akışlar elde edilebilir. Levha tipi ısı değiştircilerinde, conta yeri değiştirilerek bu dūzenlemeler kolayca imal edilirler[32].

3.2 U Borulu Isı Değiştircileri

U borulu ısı değiştircileri gövde borulu ısı değiştircilerinin farklı bir şekilde dizayn edilmiş bir şeklidir. U tūp demetli ısı değiştircilerde ayna bir tanedir. Isı, uzun eşanjör boruları birbirinin içine yerleştirilecek gibi U şeklinde bükülerek tūp demetini oluşturur; bu nedenle bir ayna vardır. Ayna ile kapak arasında cıvatarla bağlı ve perdeli bir kafa

bulunur. Bu kafaya kanal (channel) adı verilir. Kanal kafanın gövdeden sökölüp çıkarılması ile ayna ve tüp demeti serbest kalmakta ve bunları da gövdeden dışarı almak mümkün olmaktadır. U tüp demetlerinde tüplerin iç temizliğinin yapılması ve teknik kontrolü güç olduğu gibi herhangi bir nedenle arızalanan tüpün değiştirilmesi de, iç sıralarda ise, mümkün değildir. Şekil 3.17’de tasarımı yapılmış u borulu ısı değıştircisine yer verilmiştir. Tek bir aynaya bağılı olduklarından sıcaklık değışikliğinin etkisi ile demetin uzaması bir sakınca meydana getirmez. Bu nedenle tüp tarafı ile gövde tarafı arasında büyük sıcaklık farklarına müsaade edilir[40].



Şekil 3.17 U borulu ısı değıştircisi

Kovan veya manto denilen dış ana gövdenin içine boru demetinden oluşan çok sayıdaki küçük çaplı borular belirli geometride dizilerek üretilmişlerdir. Isıtma yüzeyi, belirli aralıklarda yerleştirilmiş çok sayıdaki borudan oluşmaktadır. Akışkanlardan biri borulardan, diğeri ise boruların etrafında geçer. Şekil 3.18’de bu ısı değıştirilişinin u boru kısımları açık bir şekilde gösterilmiştir.

Borulardan biri çalışmaz hale geldiğinde kör tapa ile iptal edilebilir veya değıştirilir. Bu tip ısı değıştircilerinin boru tarafı elle temizlenebilir, çok büyük olmamak kaydıyla, boru demeti dışarıya alınabilen ısı değıştircileri de gövde tarafından temizlenebilir. Bununla birlikte bu işlemler nispeten zaman alır ve özellikle tesisin durma süresi maliyeti bakımından ucuz bir işlem değildir[32].



Şekil 3.18 U borulu ısı değiştirici

U borulu ısı değiştiricilerinin üretimi düz borulu ısı değiştiricileri ile benzer olması ile beraber, aralarındaki en büyük fark, boruların bir tarafının U şeklinde kıvrılması ve ikinci bir sabitlenmesi gereken aynaya ihtiyaç kalmamasıdır.

4. ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN BOYUTLANDIRILMASI

Bir ısı değıştiricinin tasarımı veya performansının belirlenebilmesi için, ısı değıştiricideki toplam ısı geçişi, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları, toplam ısı geçişi katsayısı, akışkan hızları, ısı değıştirici yüzeyi vs. gibi özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

4.1 Gövde Borulu Isı Değıştiricinin Boyutlandırılması

Aşğıda gövde borulu bir ısı değıştiricinde yapılması gereken ısı hesaplarına yer verilmiştir.

- Boru ve gövde tarafı akışkanlar için ortalama sıcaklıklar, T_b (°C) ve T_g (°C)

T_{bi} : boru tarafı akışkan giriş sıcaklığı (°C)

T_{gi} : gövde tarafı akışkan giriş sıcaklığı (°C)

T_{bo} : boru tarafı akışkan çıkış sıcaklığı (°C)

T_{go} : gövde tarafı akışkan çıkış sıcaklığı (°C)

$$T_b = \frac{T_{bi} + T_{bo}}{2} \quad (4.1)$$

$$T_g = \frac{T_{gi} + T_{go}}{2} \quad (4.2)$$

- Isıl güç, Q

m_b : boru tarafı akışkan debisi (kg/s)

m_g : gövde tarafı akışkan debisi (kg/s)

c_{pb} : boru tarafı akışkan özgül ısı (W/kg °C)

c_{pg} : gövde tarafı akışkan özgül ısı (W/kg °C)

$$Q = m_b \cdot c_{pb} \cdot (T_{bi} - T_{bo}) = m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{go} - T_{gi}) \quad (4.3)$$

➤ Logaritmik ortalama sıcaklık farkı, ΔT_m (°C)

$$\Delta T_m = \frac{(T_{bi} - T_{gi}) - (T_{bo} - T_{go})}{\ln \left(\frac{T_{bi} - T_{gi}}{T_{bo} - T_{go}} \right)} \quad (\text{Parelel akım}) \quad (4.4)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{bo} - T_{gi}) - (T_{bi} - T_{go})}{\ln \left(\frac{T_{bo} - T_{gi}}{T_{bi} - T_{go}} \right)} \quad (\text{Ters akım}) \quad (4.5)$$

➤ Bir geçişteki boru sayısı, n_1 (adet)

V_b : boru tarafı akışkan hızı (m/s)

ρ_b : boru tarafı akışkan yoğunluğu (kg/m³)

ρ_g : gövde tarafı akışkan yoğunluğu (kg/m³)

d_i : Boru iç çapı (mm)

$$n_1 = \frac{m_b}{V_b \cdot \rho_b \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_i^2}{4} \right)} \quad (4.6)$$

➤ Toplam boru sayısı, n_t (adet)

n_b : Boru geçiş sayısı

$$n_t = n_1 \cdot n_b \quad (4.7)$$

➤ Boru demeti çapı, D_i (mm)

d_d : Boru dış çapı (mm)

C, n : Tablo 4.1'den ilgili katsayı

t : Boru merkezleri arası mesafe (mm)

$$D_i = d_d \cdot \left(\frac{n_t}{C} \right)^{1/n} \quad (4.8)$$

Tablo 4.1 C ve n ile ilgili değerler

Boruların üçgen düzenlenişi, $t = 1.25 d_d$

Geçiş sayısı	1	2	4	6	8
C	0,319	0,249	0,175	0,0743	0,0365
n	2,142	2,207	2,285	2,499	2,675

Boruların kare düzenlenişi, $t = 1.25 d_d$

Geçiş sayısı	1	2	4	6	8
C	0,215	0,156	0,158	0,0402	0,0331
n	2,207	2,291	2,263	2,617	2,643

- Boru tarafındaki akışkan hızı, V_b (m/s)

$$V_b = \frac{m_b}{\rho_b \cdot n_1 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_i^2}{4}\right)} \quad (4.9)$$

- Boru tarafındaki Reynolds sayısı, Re_b

μ_b : Boru içindeki akışkana ait dinamik viskozite

$$Re_b = \frac{V_b \cdot \rho_b \cdot d_i}{\mu_b} \quad (4.10)$$

- Boru tarafındaki akışkana ait Prandtl sayısı, Pr_b

λ_b : Boru içindeki akışkana ait ısı iletim katsayısı

$$Pr_b = \frac{\mu_b \cdot c_{pb}}{\lambda_b} \quad (4.11)$$

- Boru tarafındaki akışkana ait Nusselt sayısı, Nu_b

Hidrodinamik ve ısı bakımından tam gelişmiş türbülanslı akış hali için ($Re_b > 2300$)

$$Nu_b = 0,023 \cdot Re_b^{0,8} \cdot Pr_b^{0,3} \quad \text{Akışkan soğuyorsa} \quad (4.12)$$

$$Nu_b = 0,023 \cdot Re_b^{0,8} \cdot Pr_b^{0,4} \quad \text{Akışkan ısınıyorsa} \quad (4.13)$$

Hidrodinamik ve ısıl bakımdan tam gelişmemiş laminar akış hali için ($Re_b < 2300$)

$$Nu_b = 1,86 \left(\frac{d}{L} \cdot Re_b \cdot Pr_b \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_c} \right)^{0,14} \quad (4.14)$$

➤ Boru tarafındaki ısı taşınım katsayısı, h_b ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$$h_b = \frac{Nu_b \cdot \lambda_b}{d_i} \quad (4.15)$$

➤ Eşdeğer çap, d_e (mm)

$$d_e = \frac{1,27}{d_d} \cdot (t^2 - 0,785 \cdot d_d^2) \quad (\text{Kare diziliş}) \quad (4.16)$$

$$d_e = \frac{1,10}{d_d} \cdot (t^2 - 0,917 \cdot d_d^2) \quad (\text{Üçgen diziliş}) \quad (4.17)$$

➤ Gövde ekvatorundaki serbest geçiş kesiti, A_s (m^2)

L_p : Şaşıрма levhaları arasındaki uzaklık (mm)

D_i : Gövde iç çapı (mm)

$$A_s = \frac{(t - d_d) \cdot L_p \cdot D_i}{t} \quad (4.18)$$

➤ Gövde tarafındaki akışkan hızı, V_g (m/s)

$$V_g = \frac{m_g}{\rho_g \cdot A_s} \quad (4.19)$$

- Gövde tarafındaki Reynolds sayısı, Re_g

$$Re_g = \frac{V_g \cdot \rho_g \cdot d_e}{\mu_g} \quad (4.20)$$

- Gövde tarafındaki Prandtl sayısı, Pr_g

$$Pr_g = \frac{\mu_g \cdot c_{pg}}{\lambda_g} \quad (4.21)$$

- Gövde tarafındaki Nusselt sayısı, Nu_g (Kern'e göre)

$$Nu_g = J_K \cdot Re_g \cdot Pr_g^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_c} \right)^{0,14} \quad (4.22)$$

- Gövde tarafındaki ısı taşınım katsayısı, h_g (W/m².°C)

$$h_g = \frac{Nu_g \cdot \lambda_g}{d_e} \quad (4.23)$$

- Kirlilik faktörü, R_f (m².°C/W)

Isı değıştirici tasarımı yapılırken, toplam ısı geçiş katsayısının hesabında R_f kirlilik faktörü daima göz önüne alınmalıdır. Bu faktörün teorik olarak elde edilmesi güçtür. Genelde deneylerden elde edilen bulgular kullanılır. Tablo 4.2' de ısı değıştirici tasarımında kullanılan çeşitli akışkanların, belirli çalışma periyodu sonunda oluşturdıkları kirlilik faktörleri verilmiştir.

Tablo 4.2 Bazı akışkanların kirlilik faktörleri, R_f ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

Isıtıcı ortam sıcaklığı Su sıcaklığı	115°C'ye kadar 50°C'den az		115-205°C arası 50°C'den çok	
Su hızı (m/s)	1'den az	1'den çok	1'den az	1'den çok
Deniz suyu	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
Aritılmış su	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Kazan besleme suyu	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002
Motor soğutması	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Şehir veya kuyu suyu	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004
Büyük göl suyu	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004
İşlem yapılmış soğutma kulesi suyu	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004
İşlem yapılmamış soğutma kulesi suyu	0,0006	0,0006	0,0010	0,0008
Kazan blöf suyu	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Kaba su	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004
Küçük nehir suyu	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004
Büyük nehir suyu	0,0006	0,0004	0,0008	0,0006
Çamurlu su	0,0006	0,0004	0,0008	0,0006
Sert su	0,0006	0,0006	0,0010	0,0010
Temiz sirkülasyon yağı			0,0002	
Makine veya transformatör yağı			0,0002	
Bitkisel yağlar			0,0006	
Soğutma yağı			0,0008	
Fuel oil			0,0010	
Organik buharlar			0,0001	
Su buharı (yağ yok)			0,0001	
Alkol buharları			0,0001	
Su buharı (yağ var)			0,0002	
Soğutucu akışkan buharları			0,0004	
Hava			0,0004	
Yüksek fırın gazı			0,0002	
Diesel egzoz gazı			0,0002	
Organik sıvılar			0,0020	
Soğutucu akışkan sıvısı			0,0002	
Soğutucu akışkan, salamura			0,0002	

➤ Isı değiştiricisi yüzey alanı, A (m^2)

F : Isı değiştiricileri için sıcaklık düzeltme çarpanı

$$P = \frac{(T_{bi} - T_{bo})}{(T_{go} - T_{gi})} \quad (\text{Kapasite oranı}) \quad (4.24)$$

$$R = \frac{(T_{go} - T_{gi})}{(T_{bi} - T_{gi})} \quad (\text{Etkenlik}) \quad (4.25)$$

$$F(P, R) = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - P}{1 - P \cdot R}\right)}{\ln\left[\frac{2 - P(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}\right]} \quad (4.26)$$

$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_M \cdot F} \quad (4.27)$$

➤ Isı değıştiricisi boru boyu, L (m)

$$L = \frac{A}{n_t \cdot \pi \cdot d_i} \quad (4.28)$$

➤ Toplam ısı geçiş katsayısı, K (W/m².°C)

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_b} \cdot \frac{d_d}{d_i}\right) + (Rf_b \cdot \frac{d_d}{d_i}) + \left[\frac{d_d}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_d}{d_i}\right)\right] + Rf_g + \frac{1}{h_g}} \quad (4.29)$$

5. ISI DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Isıl enerji, madde içindeki atomların veya moleküllerin potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamından oluşur. Bu enerji, atomik veya moleküllerin titreşmesinden meydana gelir, bu enerjinin transferi ise sıcaklık farkından kaynaklı ısı transferiyle gerçekleşmektedir[41].

Üç farklı yöntemle ısı enerjisi depolanabilir. Bunlar; gizli, duyulur, ve termokimyasal ısı depolamalarıdır. Bu yöntemler, birim hacimde depoladıkları enerji oranı açısından birbirinden ayrılmaktadır. Isıyı depolayan malzemenin iç enerjisindeki değişim sonucunda; duyulur ısı, gizli ısı veya bunların bileşimi şeklinde sınıflandırılır. Genelde, birim hacimdeki iç enerji değişimi fazla olan malzemenin kullanılması, gereken ısı miktarını depolama hacmini küçülteceğinden dolayı tercih edilmektedir.

Isı depolama sistemlerinin avantajları şu şekilde açıklanabilir:

- Enerji üretim miktarını artırır; enerji verimliliğini de artırarak ve şebekeyi destekleyebilmektedir.
- Kojenerasyon santrallerin performanslarını arttırmada kullanılır.
- Elektrik birim fiyatının ucuz olduğu zaman aralıklarında satın alınabilir.
- Sistem daha güvenli olur.
- Var olan sistemlere eklenebilir, atılan ısının geri kullanılmasına olanak sağlar.
- Yenilenebilir enerjiden faydalanmasını sağlar[42].

Isı depolama yöntemleri iki şekilde gerçekleşir; duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama.

5.1 Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama, faz değişimi olmadan, sıcaklığın artırılmasıyla veya azaltılmasıyla malzemede toplanan enerjiyle sağlanır. Bu tip depolamada depoya ısı yükleme veya depodan ısı çekme esnasında sistemin sıcaklığı değişir. Depolanan ısının en basit şekilde hesaplanması, aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$Q = m.c_p.\Delta T \quad (5.1)$$

$$Q = \rho.c_p.V.\Delta T \quad (5.2)$$

Burada c_p malzemenin özgül ısısı, ΔT sıcaklık farkı, V tankın hacmi, ρ malzemenin yoğunluğudur. . Depolama ve boşaltmada sıcaklık değişiminin ve depo boyutunun büyük olması duyulur ısı depolama sistemlerinin iki temel dezavantajıdır. Yüksek sıcaklık değişimine izin veriliyorsa aynı oranda, depo boyutu küçültülmelidir. Bu ısı depolama şekli diğer sistemler ile kıyaslandığında depo boyutu oldukça büyüktür. Hem yüksek ısı kapasiteye hem de yüksek ısı yayılımına sahip malzeme kullanıldığında, depo boyutu küçültülebilir.

Isı depolama malzemesi olarak, sıcaklığı arttırıldığında duyulur ısı şeklinde ısı depolayan sıvı ve katı malzemeler kullanılır. Duyulur ısı depolama materyallerin birçoğunun fiyatı düşüktür ve piyasada bol miktarda bulunur. Buna ek olarak, mevcut teknoloji bu tip depolama şekillerini geliştirmiştir. Dolayısıyla, günümüzdeki birçok ısı depolama uygulanmasında, duyulur ısı depolama yönteminden yararlanılmaktadır. Bu yöntemde, ısının depo edilmesi ve geri kazanımı durumlarında, kullanılan malzemenin sıcaklığı değişir. Çok sayıda ısı depolama ve geri kazanma çevriminin gerçekleştirilebilmesi, duyulur ısı depolama yönteminin en çekici özelliklerinde birisidir[43].

Duyulur ısı depolama, depolama ortamına göre;

- Sıvı ortamda depolama
- Katı ortamdan depolama
- Karışık ortamda depolama

şeklinde sınıflandırılabilir.

5.1.1 Sıvı Ortamda Depolama

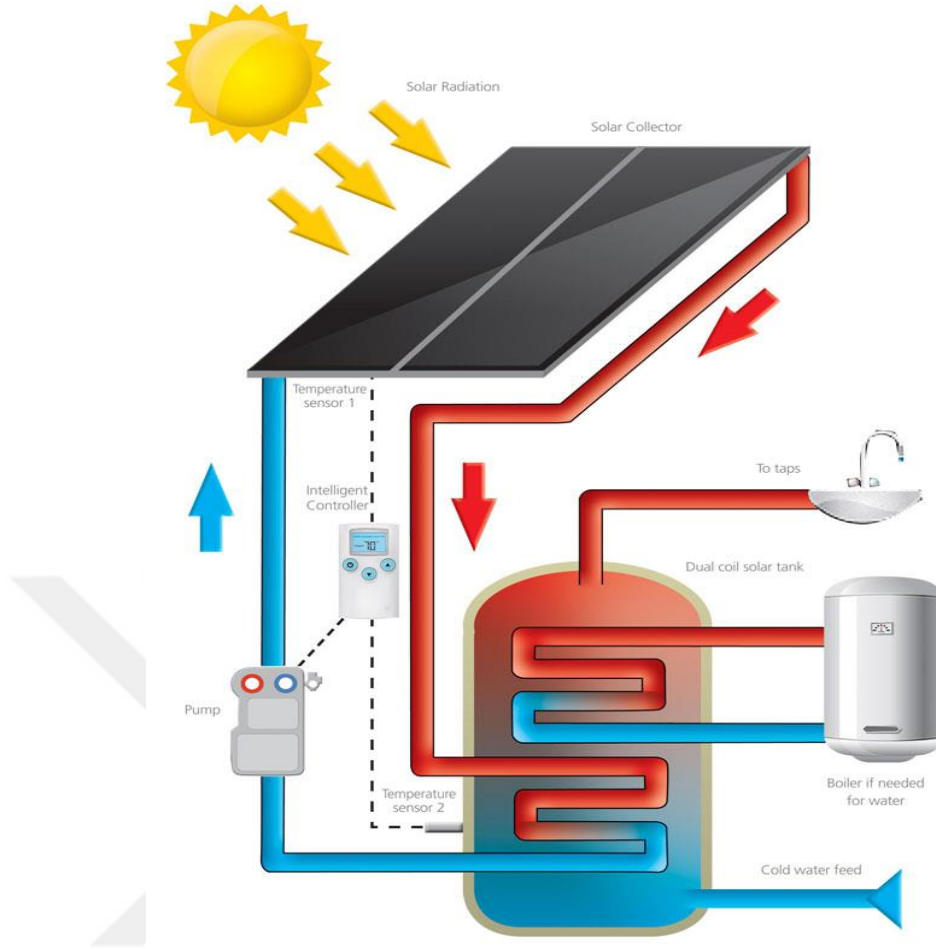
Sıvı ortamda depolama malzemesi olarak kullanılan en yaygın malzeme sudur. Ucuz ve yaygın olarak bulunan su, kaya ve toprağın yaklaşık iki katı ısı kapasiteye sahiptir. Şekil 5.1’de sıvı ortamda duyulur ısı depolamanın şematik resmi verilmiştir. Ayrıca, suyun dışında depolama ortamları olarak lityum, etilen glikol, etilen glikol karışımı su da kullanılabilmektedir[44].

Depolama malzemesi olarak su kullanımının bazı avantajları şu şekildedir;

- Mükemmel bir ısı transferi ve akış dinamik karakteristiklerine sahiptir.
- Ucuzdur, kolay taşınır, zehirleyici ve yanıcı değildir ve yeryüzünde bolca bulunmaktadır.
- Isı kapasitesi, diğer sıvılardan büyüktür.
- Pompa enerjisine gerek olmadığı zaman sistem zorlanmış konveksiyon yerine doğal konveksiyonla çalışabilir.
- Teknik, fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikleri olan bir maddedir[45].

Isı depolayıcı madde olarak su kullanmanın dezavantajları;

- Su donabilir veya kaynayabilir. Çoğu bölgelerde donmayı önleyici tedbir gereklidir. Bu nedenle, genelde kolektör döngüsünde bir ısı değiştirici ile birlikte antifriz maddesine ihtiyaç vardır.
- Çok fazla korozyon bir yapıya sahip olduğundan korozyonu önlemek için sisteme kimyasal katkı maddeleri koymak gerekmektedir.
- Su içinde ısıyı, tabaka halinde depolamak zor olduğundan bu tür sistemlerde depoda tabakalaşma pek olmaz[45].



Şekil 5.1 Duyulur ısı depolama sistemin şematik resmi

5.1.2 Katı Ortamda Depolama

Katı bir ortamda duyulur ısı depolama sistemi, ısı depolayıcı katı malzemenin tutulduğu büyük bir depo ve ısı transfer akışkanının (su, yağ, hava vb.) giriş ve çıkış kontrolünü sağlayan cihazlarından oluşmaktadır. Depoda, zamana bağlı bir sıcaklık değişimin olması istenir. Duyulur ısı depolama maddeleri, depolama süresince faz değişimine uğramazlar ve belirli bir sıcaklık aralığında çalışırlar.

Isı depolama malzemesinin, makul bir ısı depolama kabiliyetinin olması için, ρc_p nin istenilen düzeyde olması gerekir. Suyun, yüksek ρc_p değeri vardır ve ucuzdur; fakat sıvı olduğu için katı depolayıcılara göre daha yüksek kalitedeki depolarda saklanmalıdır. Bazı yaygın ısı depolama materyalleri ve onların özellikleri Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Isı depolama uygulamalarının yararlı olması için, depolama malzemesi ucuz olmalı ve iyi bir

ısıl kapasiteye sahip olmalıdır. Duyulur ısı depolamada başka bir önemli parametre ısının alınıp verilme oranıdır. Bu karakteristikler ısı geçişinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, demir çoğu katı malzemelere göre daha iyi bir ısı depolama malzemesidir. Aynı zamanda demir yüksek ısı kapasitesi ve ısıl iletkenliğine sahiptir.

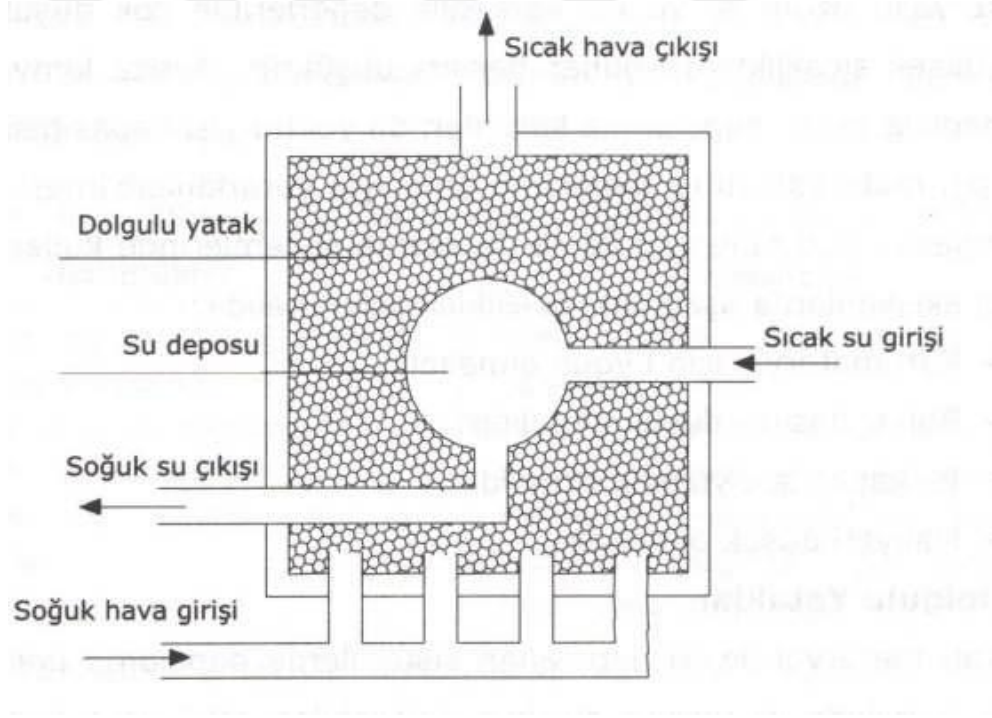
Kaya, maliyet açısından iyi bir termal depolama malzemesidir. Bazen de beton, düşük maliyet, kolay ve istenilen şekilde düzenlenmesinden dolayı seçilir. Fakat onun hacimsel termal kapasitesi suyunun sadece yarısıdır. Fakat kaya termal depolamanın, suya göre en önemli avantajı 100 °C'nin üzerinde ısı depolanması için kolayca kullanılabilmesi ve deponun sızdırma probleminin olmamasıdır[46].

Tablo 5.1 Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler

Depolama maddesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı, c (J/kg.K)	Isı kap. $c \cdot 10^{-6}$ (J/m ³ .K)	Isıl iletken. (W/m.K)	Isıl yayılma $\alpha = k/c \cdot 10^6$ (m ² /s)
Alimünyum	2707	896	2.4255	204 20 °C de	84.10
Alimünyum oksit	3900	840	3.2760		
Alimünyum sülfat	2710	750	2.0325		
Tuğla	1698	840	1.4263	0.69 29 °C de	0.484
Beton	2240	1130	2.5310	0.9-1.3	0.35-0.51
Dökme demir	7900	837	6.6123	29.3	4.431
Saf demir	7897	452	3.5694	73.0 20 °C de	20.45
Kalsiyum klörür	2510	670	1.6817		
Bakır	8954	383	3.4294	385 20 °C de	112.3
Toprak (yaş)	1700	2093	3.5581	2.51	0.705
Toprak (kuru)	1260	795	1.0017	0.25	0.250
Magnezyum oksid	3570	960	3.4272		
Potasyum klörür	1980	670	1.3266		
Potasyum sülfat	2660	920	2.4472		
Sodyum karbonat	2510	1090	2.7359		
Sodyum klörür	2170	920	1.9964		
Sodyum sülfat	2700	920	2.4840		
Granit	2640	820	2.1648	1.73-3.98	0.79-1.84
Kumtaşı	2200	710	1.5620	1.83	0.56-0.59
Kireçtaşı	2500	900	2.2500	1.26-1.33	0.99-1.41
Mermer	2600	800	2.0800	2.07-2.94	1.72

5.1.3 İkili Ortamda Depolama

İkili ortamda ısı depolama, güneş enerjisi depolama uygulamalarında, etrafı taş parçalarından oluşan malzemeyle çevrelenmiş su tankından oluşan ve Harry Thomason tarafından geliştirilmiştir. Bu sistem Şekil 5.2'deki gibidir ve şu şekilde çalışır; güneş toplayıcıdan gelen sıcak su, sağ taraftan tank içerisine girer. Sıcak su, sol taraftan ayrılarak tekrar güneş toplaçlarına geri döner. Sıcak su depolama tankının etrafı, depolanan ısıнын kullanılacağı ortama iletilmesi için, içerisinde hava dolaşımı olan ve çakıl taşlarından oluşan dolguyla çevrelenmiştir. Bu tip ısı depolama sistemlerinin üstünlüğü, suyun depolama kapasitesinin yüksek olması ve iç kısımda bulunan su tankının, yüzey alanının geniş olmasıdır. Bu sebeple, ısı geçişi ısı taşıyıcı akışkana olan hızı yüksektir[43].



Şekil 5.2 Sıvı ve katılarda birlikte duyulur ısı

5.2 Gizli Isı Depolama

Maddelerin faz değişimi esnasında, iç enerjilerindeki artış ile birlikte sabit sıcaklıkta faz değiştirerek ısı depolama olayıdır. Faz değiştiren maddeler, duyulur ısı depolayan maddeler ile kıyaslandığında daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olduğu görülür.

FDM’lerde sabit sıcaklıktaki faz değişiminden yararlanılarak büyük oranda enerji alışverişinin mümkün olduğu görülür. Bu yöntemin avantajlardan bir tanesi de, gizli ısı depolama malzemesinin faz değiştirmesi (donma-erime), sınırlı sıcaklık aralığında ve hemen hemen sabit basınçta gerçekleşmesidir. Ayrıca, FDM’lerin küçük sıcaklık değişimlerinden dolayı bir miktar duyulur ısı da depolanabilir. Fakat depolanan bu enerji, faz değişim gizli ısısı yanında oldukça düşük kalır. Bu sistemler, çakıl taşı ve suya göre daha pahalı sistemlerdir[43].

Gizli ısı depolama yönteminin diğer uygulamalara göre bazı üstünlükleri şunlardır:

- Isı depolama kapasitesi oldukça yüksektir ve ısı deposu olarak kullanılacak bölümün hacmi oldukça küçüktür.
- FDM’nin birim hacimdeki ısı depolama yoğunluğu yüksektir.
- FDM’lerin erime sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta ısı depolama ve ısıyı geri kazanmak için uygundur.
- Büyük ısı depolama sistemlerinde ekonomik olarak uygulanabilir[43].

Bu avantajlarının yanı sıra, ticari değeri yüksek olan inorganik maddeler açısından bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- Uygulamalarda ihtiyaç duyulan sıcaklık aralıklarında kullanılabilecek inorganik FDM sayısı azdır.
- Uzun süre kullanımlarda istikrarlı yapılarını koruyamazlar. Sistemden en yüksek verimi alabilmek için çevrim sayısını azaltmak gerekebilmektedir.
- Kapsüllendiklerinde, çok yavaşta olsa çevresine madde salınımı yapmaktadır. Bu nedenle termal özelliklerinin değişmesi kaçınılmazdır[43].

Çok sayıda organik ve inorganik faz değiştiren malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemeler 0-140°C arasındaki çalışma alanlarında termodinamik ve kinetik gereksinimi karşılar. Fakat birçok kimyasal denge sorunları, zehirlenme, aşınma, hacim değişimi ve uygun karşılığının değerli olması vs. gibi nedenler yüzünden kullanılamazlar.

Faz değiştiren maddeler üç ana gruba ayrılırlar.

- Tuz hidratlar
- Parafinler
- Parafin olmayan organikler

Ayrıca bu maddelerin birbiri ile oluşturdukları ötektik karışımlarda kullanılabilir. Gizli ısı depolama yönteminde depolama; katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Faz değişim ısısının, büyüklüğüne göre sıralanışı aşağıdaki gibidir;

- Katı $\leftrightarrow$ Gaz
- Sıvı $\leftrightarrow$ Gaz
- Katı $\leftrightarrow$ Sıvı
- Katı $\leftrightarrow$ Katı

Katı halden gaz haline geçmenin gizli ısısı, erime ve buharlaşmanın gizli ısılarının toplamı kadardır. Katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümleri, gizli ısıları en yüksek olmasına rağmen, gazların hacimlerinin büyük olmasından dolayı enerji depolama için genelde kullanılmazlar. Hacimdeki büyük değişimler, sistemi, büyük, karmaşık ve elverişsiz yapar[47].

Katı-sıvı dönüşümleri; katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümleriyle kıyaslandığında, daha küçük gizli ısıları vardır. Buna rağmen, bu dönüşümler hacimde küçük bir değişim (yüzde 10 ya da daha az) meydana gelir. Dolayısıyla, faz değişimiyle enerji depolama işlemlerinde her yönüyle elverişlidirler. Katı-katı geçişlerinde ise madde bir kristal şeklinden diğerine dönüşürken ısı depolanır. Bu geçişler genellikle küçük gizli ısılar ve küçük hacim değişimlerine sahiptirler[48].

6. FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİYLE ISI DEPOLAMA

6.1 Faz Değiştiren Maddeler

Bir malzemenin veya maddenin, gerek ısı alarak gerek ısı vererek moleküler düzeydeki yapısının düzenli bir yapı veya düzensiz bir yapı dönüşmesi olayına faz değişmesi denir. Faz değişmesi sırasında eğer madde saf ise ısı alıp-verme olayı izotermal olarak gerçekleşmektedir. FDM'lerin ısı depolamalarında kullanılması için maddenin hacminde ufak değişimler ve faz değişim esnasında FDM'den homojenlik istenmektedir[49].

Faz değişimi esnasında, maddeye verilen veya maddeden alınan ısı enerjisine 'Gizli ısı veya Faz değişim ısı' adı verilir. Isı depolama uygulamalarında katı-sıvı dönüşümünde kullanılmak üzere birçok organik ve anorganik FDM'ler vardır[50].

FDM'lerin en çok kullanım alanları şunlardır;

- Binaların ısıtma soğutma yükünün azaltılması için, çeşitli yapı malzemelerinde,
- Elektronik aletlerin çok fazla ısınmasını engellenmesinde,
- Tekstil endüstrisinde,
- Gıdaların uzun süren taşımalarında,
- Medikal alanda, kan ve organ taşınmasında kullanılmaktadır[51].

6.2 Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması

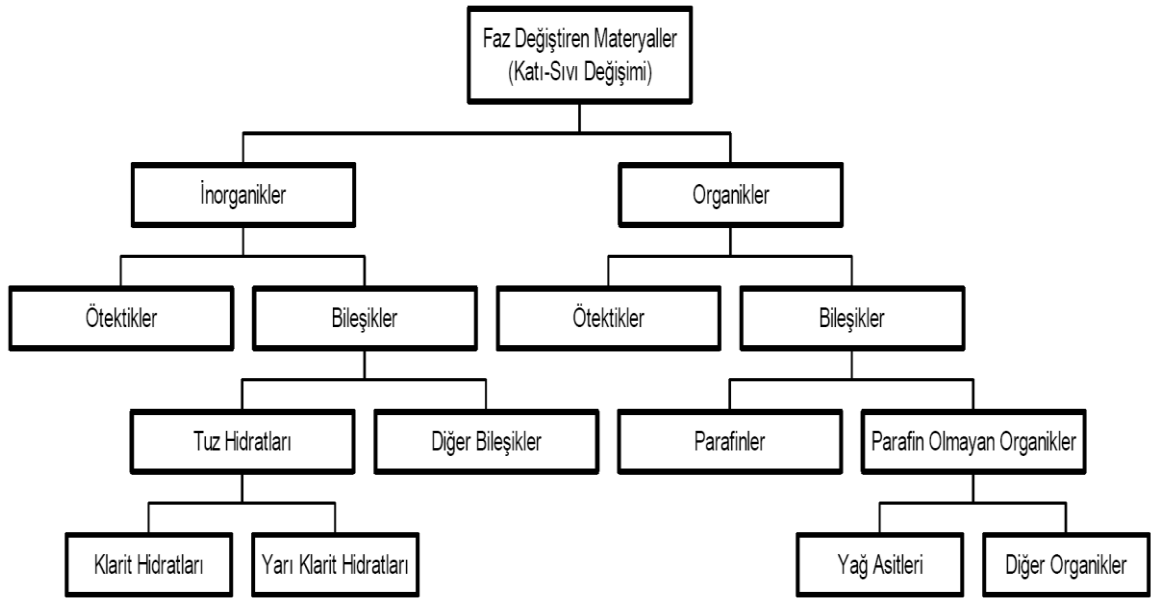
Şimdiye dek yapılan çalışmalarda, hiçbir materyal tek başına ısıyı depolama açısından istenilen özellikleri sağlayamamaktadırlar. Dolayısıyla FDM seçileceği zaman uygulamada istenilen sıcaklık bölgesinde faz değişimi görülmesine dikkat edilir. 0–120 °C faz değişimi gösterenler, FDM olarak kullanılabilirler. Bunlar; inorganik bileşikler, organik bileşikler, ve bu bileşiklerin karışımları olacak şekilde sınıflandırılırlar. Ayrıca kendi içlerinde alt sınıflara ayrılırlar[42].

Şekil 6.1'de gösterilen FDM olarak kullanılabilen madde gruplarının çokluğunu göstermektedir. Fakat pratikte her bir seçeneğin bazı olumlu ve olumsuz yanları

bulunmaktadır. Dolayısıyla en uygun FDM'yi seçerken önemli birkaç özelliği göz önünde tutulması gerekir;

- Sıvı ve katı termal iletkenliği
- Erime ısısı
- Sıvı ve katı yoğunluğu
- Sıvı ve katı haldeki ısı kapasitesi[52]

Bu özellikler ilk aşamada önemlidir. Fakat tek başına yeterli olmayabilir sonraki aşamalar için Bölüm 6.3'teki kriterler de dikkate alınmalıdır.



Şekil 6.1 Faz değiştiren materyallerin sınıflandırılması

Organik bileşiklerle ısı depolamada gerekli depolama hacminin büyük olması, organik maddelerin yanıcı olması ve düşük ısı iletkenlikleri gibi olumsuz durumları olsa da; organik bileşiklerin homojen olarak erimeleri, kendiliğinden kristalleşebilmeleri, aşırı soğuma olmadan donabilmeleri ve şimdiye dek tasarlanmış sistemlerde uygun olarak kullanılabilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. İnorganik FDM'ler grubunda bulunan tuz hidratların yapılan çalışmalarda çoğunlukla kullanılmasının sebebi uygun erime aralığı, erime gizli ısısının yüksek olması ve düşük hacim değişimi olmasıdır[42].

6.2.1 Tuz Hidratlar

Tuz hidratların en önemli özellikleri, birim hacimdeki yüksek erime gizli ısı, diğer FDM'lere göre yüksek ısı iletkenlik ve erime gerçekleşirken hacim değişiminin düşük olmasıdır. Erimiş tuzların düzenli, yarı düzenli ve düzensiz olmak üzere üç çeşit davranışı tanımlanabilir. Düzenli erime gerçekleşirken susuz tuz, erime noktasında hidratlama suyu içerisinde tamamıyla çözünebilir. Düzensiz erimede ise tamamıyla çözünemediği durumda gerçekleşir. Yarı düzenli erimede ise su kaybıyla hidratın daha düşük hidratlı bir malzemeye dönüştürülmesinden kaynaklanan, bir faz geçişi esnasındaki sıvı ve katı fazların dengesinde oluşan farklı bir erime niteliğidir. Tuz hidratlarının kullanılmasındaki asıl sorun ise düzensiz erimedir. Erime sıcaklığındaki çözelti aşırı doymuş haldedir. Katı tuz, yüksek yoğunluğundan dolayı bulunduğu ortamın altına yerleşir ve donma esnasında tersi işlemde su ile yeniden birleşme için kullanılamaz[53].

Tuz hidratlarda faz değişim özelliklerine etki edecek diğer durumlar, birçok metale karşı aşındırıcı etki göstermesi ve aşırı soğuma durumudur[54]. Aşırı soğuma, erimiş FDM sıcaklığının erime sıcaklığının altında olmasına rağmen faz değişimi olayının hemen gerçekleşmemesidir. Aşırı soğuma anında FDM yarı dengeli bir haldedir diğer bir ifadeyle termodinamik dengede değildir. Aşırı soğuma hali, FDM'nin ısıyı geniş bir sıcaklık aralığında absorbesine neden olur. Bu durumun azaltılması ya da önlenmesi için çekirdeklenmeyi başlatacak maddeler kullanılmalıdır[55]. Tablo 6.1'de bazı tuz hidratların termal özellikleri verilmiştir.

Uygun yöntemlerle aşırı soğuma, yok edilmeli veya en aza indirilmelidir. Dolayısıyla yapılabilecek işlemler şunlardır;

- Kullanılacak FDM'nin yapısına benzer bir yapıya sahip çekirdekletiriciler kullanmak.
- FDM'ye krsital aşısı yapmak.
- Isı değıştiricinde pürüzlü metal yüzeyi kullanmak, tuz hidratlarda heterojen çekirdekleşmenin oluşumunu sağlamaktadır[42].

Tablo 6.1 FDM olarak kullanılabilen bazı tuz hidratları [42]

Tuz Hidratları	Ergime Sıcaklığı	Ergime ısısı	Yoğunluk (kg/dm ³)	Özgül ısı
CaCl ₂ . 6H ₂ O	29,7	171	1,710	1,45
NaSO ₄ . 10H ₂ O	32,4	254	1,485	1,93
Na ₂ S ₂ O ₃ . 5H ₂ O	48,0	201	1,730	1,46
NaHPO ₄ . 12H ₂ O	35,0	281	1,520	1,70
Zn(NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	36,4	147	2,065	1,34
Ba(OH) ₂ . 8H ₂ O	78,0	267	2,180	1,17
MgCl ₂ . 8H ₂ O	116,0	165	1,570	1,72

6.2.2 Yağ Asitleri

Yağ asitleri, kimyasal formülleri CH₃(CH₂)_{2n}COOH şeklinde olan ve parafinlere çok benzer özelliklere sahip olan organik FDM'lerdir. Yağ asitleri, trigliserit adı verilen yağlardan elde edildiklerinden dolayı bu şekilde isimlendirilmişlerdir. Bütün yağ asitleri, bir tarafta bir metil grubu, diğer tarafta ise karboksil grubu içeren uzun hidrokarbon zinciri şeklindedirler[56].

Düşük karbon sayısına sahip olanlar oda sıcaklığında sıvı haldedirler. Karbon sayıları arttıkça viskoziteleri de artar ve daha yüksek karbon sayılı olanlar ise katı halde bulunurlar. Düşük karbon sayısına sahip olan yağ asitleri suda çözünürler ve zayıf asit özelliği gösterirler[57]. Tablo 6.2'de bazı yağ asitlerin termal özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.2 Bazı yağ asit maddelerin özellikleri

Yağ Asidi	Ergime sıcaklığı (°C)	Ergime ısısı (kJ/kg)	Yoğunluk (kg/dm ³)	Özgül ısı (kJ/kgK)	Isı İletimi (W/mK)
Kaprik Asit	31,5	153	0,886	-	0,149
Laurik Asit	42-44	178	0,870	1,6	0,147
Palmitik Asit	63	187	0,847	-	0,165
Stearik Asit	70	203	0,941	2,35	0,172

Yağ asitleri, yenilenebilir erime ve donma özelliklerine, çok az veya hiç aşırı soğuma olmadan donma özelliğine sahip olmalarıyla FDM olarak kullanılmasında uygun özelliklere sahiptirler. Yağ asitlerinin en önemli olumsuzluğu, maliyetinin parafinlerden 2-2,5 kez daha pahalı olmasıdır[58].

6.2.3 Parafinler

Parafinler organik FDM sınıfına aittirler. Çok sayıda alkandan oluşan, ham petrolden elde edilerek doymuş hidrokarbon karışımlardır. Yapıları mumsudur. Bu FDM'ler arıtma sürecinden sonra kokusuz, tatsız ve toksik olmayan maddelere dönüşürler. Parafinler, düz zincirli ve dallanmış zincirli olmak üzere basit bir yapıdadırlar. Genellikle, düz zincirli alkan karışımlarından oluşan parafinler kristallenmeleri sırasında ortama yüksek miktarda gizli ısı yayarlar. Parafinlerde zincir uzunluğu artar ise erime ve donma sıcaklığı ile erime ısılarında artış gözlenir.

Termal enerji depolama uygulamaları için, yüksek ısı depolama nedeniyle parafinler en çok kullanılan FDM'ler arasında yer alır. Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir. Parafinlerin belirli bir erime aralığında erimeleri, ısı depolama kullanımındaki avantajıdır. Parafinler ucuz, bol ve kimyasal olarak kararlı olduklarından, genellikle ısı depolama için kullanılır. Korozif ve zehirli etkiye neden olmazlar. Yüksek düzeyde aşırı soğuma göstermezler ve kendiliğinden çekirdekleşebilirler. Tablo 6.3'de bazı parafinlerin termal özellikleri gösterilmiştir. Parafinler, kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından çeşitli uygulamalar için uygundur[42, 59-61].

Parafinlerin katı hallerindeki yapıları, gözenekli olmasından dolayı ısı iletim katsayıları düşüktür. Bu durum, katılaşma sırasında yüksek ısı transfer hızları gerektiğinden dolayı sorun teşkil eder[62]. Bu sorunun kanatçıklı kaplar ve metalik dolgu maddeleri veya gizli-duyulur ısı kombinasyonu kullanılarak kısmen azaltılabileceğini belirtilmiştir. Parafinler, katı-sıvı faz değişimleri esnasında yüksek hacim değişimine sahiptir. Bu durum, depo dizaynında dikkate alınmalıdır. Parafinler yanıcı olduğundan yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağına direkt temas ettirilmemelidir[46].

Tablo 6.3 Bazı parafinlerin termal özellikleri [47, 58, 63, 64, 65, 66]

Bileşik İsmi	“C” atomu sayısı	Erime Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)
n-Dodekan	12	-12	750	0,21 ^K	-
n-Tridekan	13	-6	756		-
n-Tetradekan	14	4,5-5,6	771		231
n-Pentadekan	15	10	768	0,17	207
n-Hekzadekan	16	18,2	774	0,21 ^K	238
n-Heptadekan	17	22	778		215
n-Oktadekan	18	28,2	814 ^K , 775 ^S	0,35 ^K , 0,149 ^S	245
N-Nonadekan	19	31,9	912 ^K , 769 ^S	0,21 ^K	222
n-Eikosan	20	37			247
n-Heneikosan	21	41			215
n-Dokosan	22	44			249
n-Trikosan	23	47			234
n-Tetrakosan	24	51			255
n-Pentakosan	25	54			238
Parafin wax	-	32	785 ^K , 749 ^S	0,514 ^K , 0,224 ^S	251
n-Hekzakosan	26	56	770	0,21	257
n-Heptakosan	27	59	773		236
n-Oktakosan	28	61	910 ^K , 765 ^S		255
n-Nonakosan	29	64			240
n-Triakontan	30	65			252
n-Hentriakontan	31		930 ^K , 830 ^S		-
n-Dotrikontan	32	70			-
n-Tritrikontan	33	71			189

K: katı; S: sıvı

6.3 Faz Değiştiren Malzemelerin Seçimindeki Kriterler

0 ile 120 °C sıcaklık arasında yüksek erime ısıyla eriyen çok fazla organik ve inorganik malzeme bulunmaktadır. Gizli ısıyı depolamak için organik ve inorganik malzemeleri kinetik, termodinamik ve kimyasal yönlerden belirli özelliklerin bulunması gerekmektedir. Ayrıca maliyeti düşük ve gerektiğinde bol miktarda bulunabilmelidir.

Isıyı depolamak için FDM seçiminde; zehirli etki, korozyon etki, erime noktası, kimyasal kararlılık, faz diyagramları ve yanıcılık gibi diğer özelliklerin de göz önünde bulundurulmalıdır[42].

➤ Termodinamik Kriterler;

- Erime noktası, istenilen sıcaklık bölgesinde olmalıdır.
- Birim hacminin erime ısısı yeterince yüksek olmalıdır. Böylece gerekli enerji miktarı sağlamak için daha az malzeme kullanımına olanak sağlamaktadır.
- Yoğunluğunu yüksek olması gerekir böylece depo hacminin boyutu küçük olabilmektedir.
- Isı iletim katsayısı yüksek olmalıdır. Böylece ısıнын, FDM’de şarj ve deşarj edilmesi için gerekli olan süre kısılacaktır.
- Malzeme tamamıyla eriyerek homojen erime göstermelidir. Yoksa sıvı ve katı bölgeler arasında yoğunluk farkı oluşur ve faz ayrışması gerçekleşir ve malzemenin kimyasal yapısının kararlılığı değişir.
- Faz değiştirme sonucunda hacimdeki değişim az olmalıdır. Bu şekilde, basit bir depo ve ısı değiştiricisi kullanılabilir[42, 52, 58].

➤ Kinetik Kriterler;

- Donma esnasında aşırı soğuma etkisi çok az göstermeli veya hiç göstermemelidir.
- Erimiş malzemenin kristalleşmesi, malzemenin donma noktasında gerçekleşir. Bunun sorunsuz gerçekleşmesi için kristal oluşum hızı büyük ve çekirdekleşme hızı yüksek olması gerekmektedir.
- Aşırı soğumayı önlemek için, FDM’ye uygun çekirdekleştirici eklenerek engellenebilir[42, 52, 58].

➤ Kimyasal Kriterler;

- Kimyasal özelliklerinde değişme görülmemelidir.
- Kimyasal bozulma görülmemelidir.
- Depo malzemesinde korozyon etkisi göstermemelidir.
- Patlayıcı, zehirli ve yanıcı özellikler göstermemelidir[42, 52, 58].

➤ Ekonomik Kriterler;

- Bol miktarda bulunmalıdır.
- Pahalı olmamalıdır[42, 52, 58].

6.4 FDM'lerin Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Sistemde kullanılacak uygun FDM'nin seçilmesinde çekirdekleşme, erime-donma süreleri, ısı çevrim süresince kararlılık, aşırı soğuma, paketlenebilme ve sisteme uygunluk gibi özelliklerinin irdelenmesi gerekmektedir[42].

6.4.1 Faz Değişim Isısı

FDM'lerde istenilen en önemli özellik, yüksek faz değişim ısısına sahip olmalarıdır. Tuz hidratlar, diğer FDM'lere göre daha fazla faz değişim ısısına sahiptirler. Fakat erime ve donma sırasında meydana gelebilecek faz ayrımı veya aşırı soğuma gibi olumsuz durumlardan dolayı düşük erime ısısına sahip olup fakat düzenli eriyen bir madde de kullanılabilir[63].

6.4.2 Erime-Donma

Çoğu FDM, erime-donma özelliklerinin uygun olmayışlarında dolayı kullanıma uygun değildir. Bazıları düzensiz donarken bazılarının ise kristal oluşum hızları çok düşüktür. Bu sorunları azaltmak için ortama çeşitli çekirdekleştiriciler ilave edilir. Bu çekirdekleştiriciler depo ortamında fazladan bir hacim kaplarlar. Bunlar, gerek erime aralığında gerekse ana malzemenin erime ısısında değişime neden olurlar[42].

6.4.3 Aşırı Soğuma

Katı haldeki maddeler, atomların periyodik olarak tekrar ettiği düzenli kristal yapıda bulunur. Ancak sıcaklığın belirli bir değerin altına düşmesi kristallerin oluşmaya başlayacağı anlamına gelmez. Bazen kristallerin oluşması gecikir ve sıvının sıcaklığı donma noktasının altına düşer. Böylece aşırı soğumuş sıvılar ortaya çıkar. Örneğin bazı durumlarda suyun 0°C'nin altında sıvı halde bulunması mümkündür. Bu duruma aşırı soğuma denir. Aşırı soğumuş sıvılar kararsızdır, başka bir deyişle uzun süre sıvı halde kalamazlar. Örneğin aşırı soğumuş suyun içine küçük buz parçacıkları atıldığında, sıvı, buz parçalarının etrafında hızla katılaşır. Bu problem, sistem tasarlanırken beklenen sıcaklık bölgesinin aşılmasına ve ısı depolamanın istenmeyen bir sıcaklık aralığında olmasına neden olmaktadır[67].

6.4.4 Çekirdekleşme

Aşırı soğuma gösteren FDM'lerdeki sorunu ortadan kaldırmak için FDM'nin yapısına benzer çekirdekleştiriciler eklenebilir. Yalnız FDM ile karıştırılacak çekirdekleştiricinin aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlar;

- Erime aralığında çalışılan (sistemin maksimum en yüksek sıcaklığı) sıcaklık değerin üstünde olmalıdır.
- Hiçbir sıcaklıkta suda çözünmemelidir.
- Tuz hidratlarıyla katı bir çözelti oluşturmamalıdır.
- Birlikte kullanılan tuz hidratıyla aynı kristal örgüde olmalıdır.
- Tuz hidratları ile kimyasal reaksiyona girmemelidir[42].

6.4.5 Isıl Çevrim Boyunca Kararlılık

Birçok madde sürekli ısıl çevrimler sonucunda kararlılığını kaybeder. Bazı maddeler düşük çevrim sayılarında yapısal özelliklerinde ciddi değişimler görülürken bazılarında ise bu sorun yüksek çevrim sayılarında ortaya çıkmaktadır. Bu kriter dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Fakat malzemelerin kararlılıkları maliyetlerine yansıdığı için en uygun FDM seçilmesine dikkat edilmelidir.

Örneğin; Lane (1988)'de çalışmasında, doğal şartlarda beyaz renkli palmitik asitin 95°C'den 20°C'ye ısıtılmasında 21. çevrimden sonra renginin sarardığını ve erime sıcaklığının 2 °C düştüğünü belirtmiştir. Ayrıca propaniamid-palmitik asit (%25.1-74.9) ötektik karışımın aynı çalışmada malzemenin renginin önce sarardığı sonra turuncu ve en son siyah renge dönüştüğünü belirtmiştir[42].

6.4.6 Paketlenme ve Sistem Bileşenlerine Uygunluk

Isı depolamada kullanılması istenen FDM'lerin ısı transferinde aktif olmaları ve sisteme uygun şekilde (akmayacak, bozulmayacak, sisteme bulaşmayacak vb.) ilave edilmesi için paketlenmesi gerekir. FDM'ler uygulamalarda polietilen ve polipropilen şişelere, plastik şişelere, çelik kaplara, esnek paketleme filmlerine, yüksek yoğunluklu polietilen borulara ve plastik tüplere koyularak sisteme eklenir. Bunun yanında mikro kapsülleme ya da jel içinde hapsetmeyle FDM'nin polimer yapı içinde sisteme ilave edilmesi de mümkündür[68, 69, 70].

Paketleme şekli seçilirken FDM'lere uygunluğu dikkate alınmalıdır. FDM'nin koyulacağı sisteme olası etkileri; korozyon etkisi gösterme, kimyasal reaksiyona girme ya da sistemden dışarı sızma tarzında olacaktır. Örneğin inorganiklerin koroziv olduğu, organik FDM'lerin organik kapların şekillerini değiştirdiği bilinmektedir. Depo ortamı seçimi yapılırken bu sorunlar dikkate alınmalıdır[42].

7. MATERYAL ve METOT

Mühendislik hesaplamalarında ısı sistemleri ile ilgili problemler sayısal ve deneysel yöntemler kullanılarak çözülürler. Bu çalışmada, U borulu bir ısı değiştiricisinin gövde kısmına ısı depolamak için FDM olarak kalsiyum klorür heksahidrat yerleştirilerek erime süreci sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Gövde kısmının boyutları 745 mm uzunluğunda ve 150 mm çapında olan gövde borulu bir ısı değiştiriciden oluşan deney setinde FDM'nin erimesi incelenmiş ve ANSYS 17.2 Student yazılımı kullanılarak sistem sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

7.1 Deney Düzenegi

Bu tezin hazırlanmasında deney seti; ısı değiştirici, ısı değiştiricisine sabit sıcaklıkta su temini sağlayan sıcak su deposu, debi ölçümünü gösteren rotametre ve ısı değiştiricisine içinde belirli noktalara yerleştirilen 12 termokupul ve bu termokupul ölçümlerini veren dataloggerdan oluşmaktadır. Sıcaklıklar, Almemo 5990-0 model data loggerdan -200 ile +400 °C arasında 0,1 K kararlılıkta ve $\pm 0,1$ hata ile sıcaklık ölçümü yapabilen T tipi (Cu-Co) ısı çiftleri yardımıyla ölçülmüştür. Deney düzenegindeki ısı değiştirici, sabit sıcaklıktaki su deposundan elde edilen ısı enerjisini depolamak için kullanılmıştır. Kimyasal maddenin içine konulduğu silindirik ısı değiştirici içine cidardan itibaren radyal ve eksenel yönde sıcaklık ölçümü için ısı çiftleri yerleştirilmiştir.

Uygun FDM seçimi için Bölüm 6'da gerekli noktalara değinilmiştir. Bu çalışmada, tuz hidratlar kategorisinde yer alan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın kullanılmasının sebepleri ve uygun FDM seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalara literatürdeki bilgiler ışığında aşağıda ayrıca değinilmiştir. FDM kullanmadan önce bu bilgilerin dikkatle incelenmesi, üzerinde gerekli incelemelerin yapılması gerekmektedir.

Sharma ve Sagara, tuz hidratların en eski ve üzerinde en çok çalışılan ısı depolama maddesi olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca 15 °C ile 117°C arasında geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir olduğunu ifade etmişler[71].

Sharma ve Sagara, tuz hidratların avantajlarını ve dezavantajlarını şu şekilde sıralamışlar;

Avantajlar;

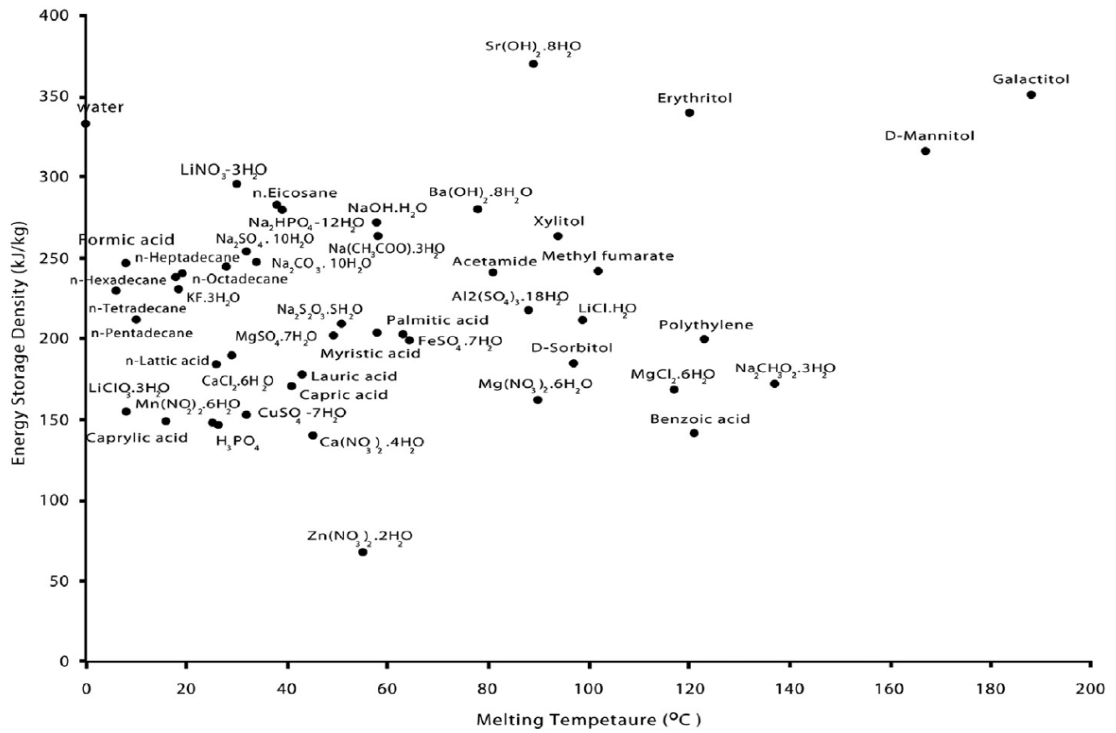
- Düşük maliyetli ve kolay erişilebilir olmaları, tuz hidratları ısı depolama için cazip kılmaktadır.
- Ucuz ve en çok bulunan tuz hidratların ikisi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dur.
- Tuz hidratlar, diğer ısı depolama FDM'lerine kıyasla net bir erime noktasına ve yüksek ısı iletkenliğine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde ısının depolandığı üniteden ısı transferine olanak sağlamaktadır.
- Depolama sisteminin gerekli boyutunu azaltan yüksek bir füzyon ısısına sahiptirler.
- Tuz hidratlar, diğer FDM'lere göre daha düşük hacim değişimi gösterir. Bu da hacim değişimine uyum sağlamak için kap tasarımını kolaylaştırır.
- Ayrıca 15°C ile 117°C arasında geniş bir sıcaklık aralığına da sahiptirler[71].

Dezavantajlar;

- 1000 erime-donma döngüsünden sonra $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'da %73'ün üzerinde füzyon ısısında azalma olduğunu ve bu sorunun jelleşmiş veya koyulaştırılmış karışımlar kullanılarak belli bir dereceye kadar ortadan kaldırılabilceğini belirtmişlerdir. Ancak bu işlemin belli bir süre sonra ısı depolama özelliğini bozduğunu da ifade etmişler.
- Tuz hidratlar, aşırı soğuma gösterirler. Bu problemi de ortadan kaldırmak için uygun çekirdekletiriciler kullanılması gerektiğini söylemişler.
- $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın hava ile temas etmesi sonucunda iki döngüden sonra malzemedede bozunmalar olduğunu bu probleminde kapalı kaplar kullanılarak ortadan kalkabileceğini belirtmişler.
- Tuz hidratların termal depolama sistemlerinde metal kaplarda korozyona neden olabileceğini bu sorun içinse FDM ile depo malzemesinin uygunluğunun araştırılması gerektiğini vurgulamışlar[71].

V.V. Tyagi ve D. Buddhi, yaptıkları çalışmada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ı hızlandırılmış bir şekilde 1000 kez erime-donma işlemine tabi tutmuşlar. Bir yılda yaklaşık 300 erime-donma döngüsünü varsaydıklarında 3,5 yıllık bir süreçte $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime sıcaklığının kabul edilebilir bir değişim gösterdiğini ifade etmişler. Tekrar tekrar hızlandırılmış termal çevrimlerden sonra, deneysel sonuçlarda, termal özelliklerin iyi bir stabilitesinin olduğunu belirtmişler. Yaptıkları testlerde $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın bina uygulamalarında ısıtma ve soğutma için gelecek vaat eden bir FDM olduğunu ifade etmişler[30].

FDM seçiminde, birim kütledeki enerji depolama miktarı önemli bir kriter olduğundan Şekil 7.1'de 50 farklı FDM'nin erime noktasındaki enerji depolama yoğunluğunun grafiği verilmiştir. Bu grafik yardımıyla çalışılması istenen sıcaklıktaki FDM'leri ilk aşamada tayin etmek için fikir vermesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.1 50 farklı FDM'nin erime noktası ve enerji depolama yoğunluğu [72]

Ayrıca FDM'nin hal değişim sıcaklığı da önemli parametrelerdendir. Tablo 7.1'de farklı değişim sıcaklıklarına sahip FDM'lerin hangi uygulamalarda kullanılacağı ile ilgili bilgiler verilmiştir[73]. Bu tabloda T_m faz değiştirme sıcaklığını ifade etmektedir.

Tablo 7.1 Faz değiştirme sıcaklığının uygulanması [73]

Faz değiştirme sıcaklığı (°C)	Uygulamalar
$5 \leq T_m \leq 25$	Binalarda iklimlendirme amacıyla kullanılırlar. Bu maddeler gece katılaşır ve gündüz ortamdan ısı çekerek ortamın soğutulmasını sağlarlar.
$25 \leq T_m \leq 30$	Binaların duvarlarına emdirilerek ortamın sıcaklığının gün içindeki evre sıcaklığı değişimlerinden etkilenmemesi sağlanır. Bu tür maddeler ayrıca hava bazlı (ısı transfer akışkanı olarak havanın kullanıldığı) gizli ısı depolama sistemlerinde geceleyin ve gündüz erken saatlerde ortama ısı sağlamak amacıyla da kullanılabilirler.
$40 \leq T_m \leq 60$	Hava bazlı ısı depolama sistemlerinde gece ve gündüz ortam ısıtma uygulamalarında kullanılırlar.
$55 \leq T_m \leq 70$	Konutlarda kullanım suyunun önceden ısıtılmasında kullanılırlar.
$60 \leq T_m \leq 95$	Isı transfer akışkanı olarak suyun kullanıldığı gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılırlar.
$25 < T_m$	Elektrik ihtiyacının düşük olduğu dönemlerde elektrik enerjisinden yararlanılarak faz değiştiren maddenin eritilerek daha sonra ortam ısıtılması uygulamalarında kullanılırlar.
$90 < T_m$	Soğurmalı soğutma sistemleri gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar.
$0 < T_m$	Süt ve gıda endüstrisi, şişeleme ve bira fabrikaları, mezbaha, rafineriler, laboratuvarlar, büyük mutfaklarda, ilaç ve kimya sanayisi.

Kenisarin ve Mahkamov, tuz hidratların termofiziksel özellikleri ve fiyatları hakkında aşağıdaki şu bilgileri vermişlerdir;

“ Gizli ısı depolama için FDM maliyeti, uygulanabilirlik açısında önemli faktördür. Tablo 7.2’de www.alibaba.com (Çin) ‘daki ilgili üreticiler tarafından listelenen tuz ve tuz hidratlarının toptan satış fiyatlarını göstermektedir. Gösterilen tuzların çoğunun yüksek miktarlarda satın alınması durumunda nispeten düşük fiyatlara sahip olduğu görülebilir. Bununla birlikte, ulaşım maliyetleri, bu ürünlerin fiyatlarını mesafeye ve coğrafi bölgeye

bağlı olarak iki kat arttırabilir. Çin'in dışındaki ülkelerdeki satıcıların tuz hidratların satış fiyatı önemli ölçüde yüksektir. Tablo 7.3'te faz değişim ısı depolama ürünleri olan tuz hidratlar ve organik FDM'lerin Birleşik Krallık, İsveç, Almanya, ABD ve Hindistan'daki fiyatlarının karşılaştırılması verilmiştir. Bu fiyatların Çinli üreticilerin fiyatlarından yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Çinli üreticiler kadar yüksek ölçekli bir üretim olmadığını göstermektedir.”[74]

Tablo 7.2 Çin ve Hindistan'daki tuz ve tuz hidratların toptan fiyatları [74]

Salt	Purity (%)	Minimal order (Metric ton)	Company (country)	FOB price USD/ton
Pure salts				
Potassium fluoride	98	1	Shanghai Sungro Technology & Trade Co., Ltd. (China)	2800-3000
	99.3	25	Wuhan Xingzhengshun Import & Export Co., Ltd. (China)	1500-1600
	99	5	Tianjin Tiger International Trade Co., Ltd.	1500-1600
Calcium chloride	95	20	Weifang Dahe Snow-Melting Products Co., Ltd.	225-230
	94	5	Foodchem International Corporation	250-500
Lithium nitrate	99	1	Jiangxi Royal Import & Export Co., Ltd.	8350-9850
	99	0.001	Wuhan Rison Trading Co., Ltd.	7000-10000
Sodium sulphate	99	0.001	Haihang Industry (Jinan) Co., Ltd.	1000-3000
	99	25	Tianjin Credit International Co., Ltd.	98-110
	99	26	J&C Industry Corporation, Ltd.(nanjing)	87-90
Sodium carbonate	99.7	200	Sichuan Union Xinli Chemicals Co., Ltd.	70-200
	99.2	21	Zhengzhou Mahaco Trading Co., Ltd.	160-250
Disodium hydrogenphosphate	99.2	20	Weifang Ruidesheng Chemical Co., Ltd.	203-208
	99.2	10	Wuhan Golden Fortune Technology & Trade Co., Ltd.	100-250
	97-99	10	Sichuan Mianzhu Ronghong Chemical Co., Ltd.	390-600
Calcium nitrate	99	10	DEE PEE CHEM INDUSTRIES	350-380
Sodium thiosulphate	99	25	Henan Eastar Chemicals Co., Ltd.	220-300
	98	20	Tianjin Xibeier International Co., Ltd.	160-200
Sodium acetate	99	22	Ningbo V&S International Trade Shipping Co., Ltd.	220-280
	99	25	Weifang Ocean Trading Co., Ltd.	950-1300
	99	25	Zouping Changshan Town Zefeng Fertilizer Factory	700-1100
Sodium hydroxide	99	1	ULTRA CHEMICAL WORKS (India)	1000
	99	27	Tianjin Shengxinhai Chemical Co., Ltd.	300-400
	99	2	Tianjin Yuanlong Chemical Industry Co., Ltd.	350-437
Barium hydroxide	99	10	Wuhan Well Sailing Industry And Trade Co., Ltd.	400-600
	99	5	Richin International Trade (Dalian) Co., Ltd.	1000-2000
	99	10	Qingdao Yingfengyuan Industrial & Trading Co., Ltd.	755-936
Magnesium nitrate	99	10	Tianjin Topglobal Technology Co., Ltd.	700-800
	99	50	Sichuan Yimin Fertilizer Co., Ltd.	245-300
	98	20	Xiamen Vastland Chemical Co., Ltd.	200-300
Ammonium alum	98	1	Shanxi Wencheng Chemicals Co., Ltd.	290-340
	99.3	25	Gansu Jinshi Chemical Co., Ltd.	100-200
	99.7	25	Zibo Zichuan Chengpeng Chemical Factory	160-193
Calcium chloride	99.3	20	Humate (Tianjin) International Limited	150-300
	98	20	Shouguang Jinlei Chemical Co., Ltd.	350-390
	99	5	Dalian All World I/E Co., Ltd.	250-630
Salt hydrates	99.8	20	Liaoning Metals & Minerals Enterprise Co., Ltd.	150-300
Calcium chloride hexahydrate	94-97	15	Zhengzhou Macro Imp. & Exp. Co., Ltd.	220-340
Sodium sulphate decahydrate	99.5	25	Zhengzhou Clean Chemical Co., Ltd.	70-120
Sodium carbonate decahydrate	99	20	Wuhan Guotai Hongfa Commodity Co., Ltd.	200-230
Calcium nitrate tetrahydrate	99	25	Shanxi Jiaocheng Tianlong Chemical Industry Co., Ltd.	255
Sodium thiosulphate pentahydrate	99	25	Dahua Group Dalian Guanlin International Trade Co.,	160-180
Sodium acetate trihydrate	99	5	Changsha Weichuang Chemical Co., Ltd.	285
	99.8	5	Foodchem International Corporation	500-600
	99	1	Tianjin Flourish Chemical Co., Ltd.	400-892
Barium hydroxide octahydrate	99	10	Richin International Trade (Dalian) Co., Ltd.	700-800
Magnesium nitrate hexahydrate	98	25	Tianjin Crown Champion Industrial Co., Ltd.	230-250
Ammonium alum dodecahydrate	98-99	1	Shanxi Wencheng Chemicals Co., Ltd.	240-280
	99.5	25	Henan Allrich Chemical Co., Ltd.	300-500
	99.5	12	Chance Sun Import & Export (Dalian) Co., Ltd.	177-300
Calcium chloride hexahydrate	98	20	Weifang Bell Chemical Co., Ltd.	90-120
	99	10	Weifang Mengjie Chemicals Co., Ltd.	110-300

Tablo 7.3 Bazı gizli ısı FDM’lerin toptan fiyatları [74]

PCM manufacturer	Kind of PCM	Minimal order (ton)	FOB price (US\$/ton) ^a
PCM Solutions (UK)	Inorganic salt solutions	1	2250–3750
	Organic compounds	1	3750–7500
Climator AB (Sweden)	Inorganic salt solutions	1	6900–78200
Rubitherm (Germany)	Organic compounds	1	5750–17250
Entropy Solutions Inc. (USA)	Organic compounds	0.5	4400–8800
RGEES LLC (USA)	Inorganic salt solutions	1	4000
PCM Energy P. Ltd. (India)	Inorganic salt solutions	1	3450

Sharma ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada bazı FDM’lerin farklı materyallerden üretilen ısı depolarda zamana bağlı olarak (300 dakika sonunda) erime oranlarını hesaplamışlar. Bu değerlere Tablo 7.4’te yer verilmiştir. Bu çalışmalarında 2 mm’den oluşan farklı malzemelerden üretilmiş ısı depolarını kullanmışlardır. FDM’nin erime sıcaklığı ile başlangıç sıcaklığı arasındaki farkı 5°C’de, duvar sıcaklığı ile FDM’nin erime sıcaklığı farkını 15°C kabul ederek Tablo 7.4’teki değerleri elde etmişler. Elde ettikleri sonuçlarda, farklı özelliklere sahip kaplarda FDM’lerin daha hızlı eridiğini belirtmişler. Buradaki t^* dakikayı f erime oranını göstermektedir[53].

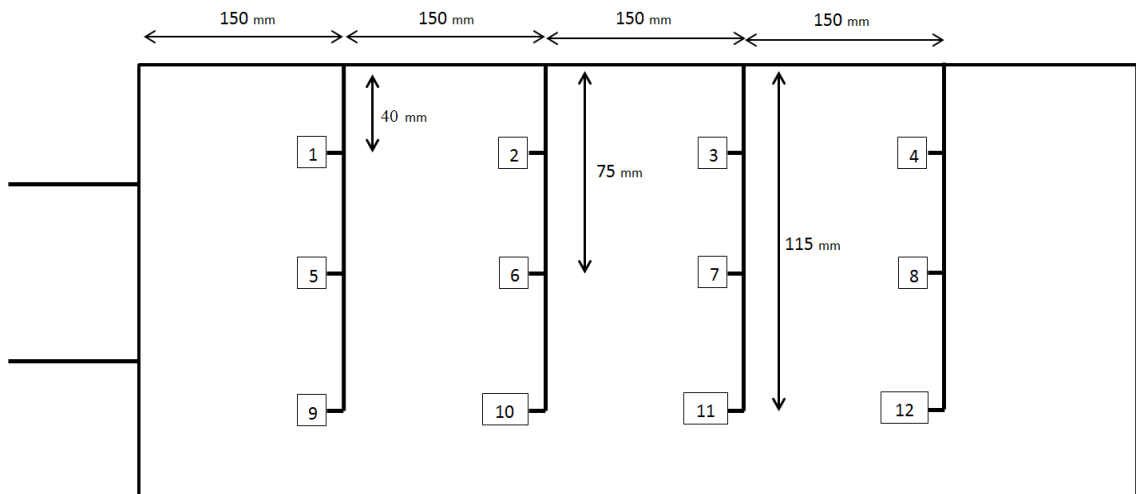
Tablo 7.4 300 dakika içinde çeşitli depo malzemelerindeki FDM’lerin erime oranları

Materials	Capric acid		Lauric acid		Myristic acid		Palmitic acid		Stearic acid		CaCl ₂ ·6H ₂ O	
	t^*	f	t^*	f	t^*	f	t^*	f	t^*	f	t^*	f
Glass	300	0.47	300	0.43	300	0.41	300	0.40	300	0.41	300	0.45
Stainless steel	300	0.87	300	0.80	300	0.78	300	0.77	300	0.77	300	0.76
Tin	300	0.98	300	0.92	300	0.90	300	0.89	300	0.90	300	0.94
Aluminum	246	1.00	300	1.00	300	1.00	300	0.98	300	0.99	264	1.00
Aluminum mixed	230	1.00	282	1.00	300	1.00	300	1.00	294	1.00	242	1.00
Copper	169	1.00	207	1.00	220	1.00	230	1.00	215	1.00	172	1.00
	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O		N-Octadecane		Paraffin wax		Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O		Acetamide		Acetanilide	
	t^*	f	t^*	f	t^*	f	t^*	f	t^*	f	t^*	f
Glass	300	0.39	300	0.46	300	0.66	300	0.57	300	0.77	300	0.80
Stainless steel	300	0.72	300	0.83	260	1.00	300	1.00	202	1.00	184	1.00
Tin	300	0.88	300	0.95	183	1.00	235	1.00	139	1.00	127	1.00
Aluminum	300	0.98	265	1.00	129	1.00	165	1.00	93	1.00	86	1.00
Aluminum mixed	300	1.00	248	1.00	119	1.00	153	1.00	85	1.00	78	1.00
Copper	223	1.00	181	1.00	87	1.00	110	1.00	60	1.00	55	1.00

Deney setindeki ısı değiştirici gövdesi içine, ısı enerjisiini gizli ısı şeklinde depolamak için tuz hidrat olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ konulmuştur. Akışkan ile FDM arasında ısı transferinin daha hızlı gerçekleşmesi için altı adet *u* şeklindeki bakır borular yerleştirilmiştir. Hacim değişimini tespit etmek için ölçekli genleşme kabı konulmuştur. Gövde tarafındaki FDM'nin erimesini görebilmek için demir kabuk yerine pleksiglasdan imal edilmiş boru yerleştirilmiştir. Deneyde 60 °C sıcaklıkta 1.75 l/dk debide su girişi sağlanmış ve FDM'nin erimesi gözlenmiştir. Deney setinin fotoğrafı şekil 7.2'de gösterilmiştir. Isı değiştiricinin içine yerleştirilmiş termokupulların yerleri de şekil 7.3'te belirtilmiştir.



şekil 7.2 Deney seti görünüşü



şekil 7.3 Termokupul yerleşim şekli

Bu çalışmada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın seçimindeki temel sebep; kolay temin edilebilmesi, ısı iletkenlik katsayısının diğer FDM'lere göre daha yüksek olması ve depoladığı enerjinin yüksek olmasıdır. Kenisarin ve Mahkamov, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın soda üretimi de dahil olmak üzere bir çok kimyasal işlemlerde yardımcı atık ürün olarak üretildiğini belirtmişlerdir[74]. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın atık ürün olarak elde edilmesinin diğer FDM'lere göre en önemli avantajı olduğu söylenebilir. Bunun yanında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın korozyon etki göstermesinden dolayı uygulamalarda kullanılmadan önce gerekli depo malzemenin uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir.

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın FLUENT programında analizinin yapılabilmesi için termofiziksel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın termofiziksel özelliklerinin, çalışmalar arasında farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu çalışmalar dikkate alınarak gerekli termofiziksel özellikler, gerek interpolasyon gerekse enterpolasyon yapılarak erime sıcaklığı bölgesindeki değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 7.5'de gösterilmiştir. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın genel fiziksel özellikleri de Tablo 7.6'de verilmiştir.

Tablo 7.5 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa göre değişimi [30, 53, 75, 76]

Sıcaklık (T) K	Yoğunluk (ρ) kg/m^3	Özgül Isı (C_p) J/kg.K	Isı transfer katsayı (k) W/m.K	Dinamik Viskozite (μ) kg/m.s
298	1710	1661	0,626	0,0238
303	1630	1702	0,523	0,0196
308	1550	2254	0,504	0,0165
313	1500	2259	0,480	0,0136
318	1470	2264	0,464	0,0113

Tablo 7.6 CaCl₂.6H₂O'n genel özellikleri [72, 77, 78, 79]

Erime sıcaklığı	29-31 °C
Yoğunluk (katı)	1710 kg /m ³
Yoğunluk (sıvı)	1530 kg /m ³
Depoladığı gizli ısı	190800 j/kg
Aşırı soğuma derecesi	1°C (çekirdekleştirici ilavesiyle)
Isı iletim katsayısı (katı)	1.08 W /m K
Isı iletim katsayısı (sıvı)	0.54 W /m K
Gözlenen ısı çevrim sayısı	Literatürde 5000
Fiyat	3.5 ₺/kg
Yanıcılık ve zehirleyicilik	Yok
C _p k (katının özgül ısısı)	1400 j /kg K
C _p s (sıvının özgül ısısı)	2200 j /kg K

Çalışmada, FDM'de ısı enerjisini depolamak için sabit sıcaklık ve debide ısı değiştiricisine su gönderilmiştir. Su ile ilgili gerekli termofiziksel özellikler FLUENT'in kendi veritabanında mevcut olduğundan bu bilgiler program tarafından tanıtılmıştır. Ayrıca modellenmiş ısı değiştiricinin ön kapak ve aynanın malzeme özellikleri için gerekli bilgiler de bu şekilde girilmiştir. Akışkanın giriş sıcaklığı 60 °C (333.15 K) ve debisi 1.75 l/dk olarak tanımlanmıştır. Akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığını belirlemek için Reynolds (Re) sayısı kullanılmıştır. Reynolds sayısını hesaplamak için denklem 7.1 kullanılır. Burada ρ yoğunluk, u hız, D dairesel çap ve μ dinamik viskozitedir.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (7.1)$$

$\dot{V}$ hacimsel debi, A_c ise borunun giriş kesit yüzey alanı olup hız aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır.

$$\dot{V} = u A_c \quad (7.2)$$

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad (7.3)$$

Isı değiştirici dūřey ekseninde simetri alınıp analiz yapıldığından normal çap yerine hidrolik çap kullanılmıştır. Hidrolik ap ise denklem 7.4'te ifade edilmiştir.

$$D_H = \frac{4A_c}{\zeta} \quad (7.4)$$

Burada A_c , akışın geçtiği kesitin alanı, ζ ise ıslak evre uzunluğudur.

Yukarıda ifade edilen denklemler için gerekli sayısal bilgiler Tablo 7.7'den alınarak Reynolds sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 7.7 Reynolds sayısı için gerekli bilgiler

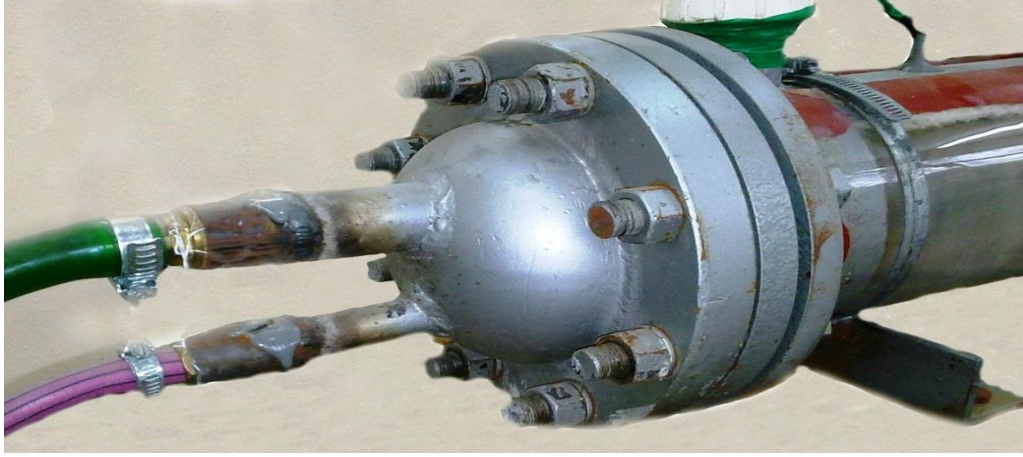
Boru giriş çapı	20 mm
Boru hidrolik çapı	0.012m
Suyun yoğunluğu (60 �C)	983,3 kg/m ³
Suyun dinamik viskozitesi (60 �C)	0,467x10 ⁻³ kg/m.s
Hacimsel debi	1,75 l/dk

Gerekli hesaplamalar yapılarak akışkanın giriş hızı u , 0,09337 m/s olarak bulunmuştur. Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra Reynolds sayısı 2359 olarak hesaplanmıştır. Reynolds sayısı 2300'den küçük olduğu durumlarda laminar, 4000'den b  k olduğu durumlarda türbülanslı, bu iki değer arasında olduğu durumlarda ise geçiş bölgesi olarak tanımlanmıştır. Hesaplanan Reynolds sayısı geçiş bölgesinde olup ve laminar bölgeye yakın olduğunda FLUENT'de akış türü laminar olarak kabul edilmiştir.

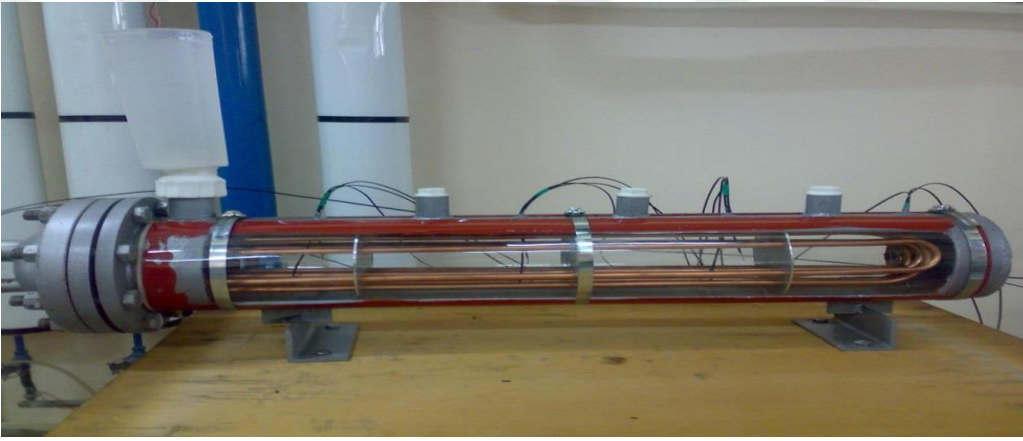
7.2 Metot

Öncelikle FDM'nin erimesi Ansys Fluent programında incelendi. Sonrasında ise deneysel olarak çalışıldı. Daha önceden gerekli hesaplamalar ve boyutlandırmaları yapıp uygun bir ısı değiştiricisi tasarlandı. Tasarlanmış bu ısı değiştiricinin Ansys'de analizinin yapılması için CAD (Computer aided Design) programında üç boyutlu olarak çizilip çözümün daha kolay ve uzun süre gerektirmeden çözülebilmesi için CAD programında ısı değiştirici üzerinde bazı değişiklikler yapıldı. Bu yapılan değişiklikler çözümün doğruluğunu doğrudan etkilemeyip sadece kabul edilebilir hata oranında kalmasına sebep olmuştur. Bu değişiklikler şunlardır;

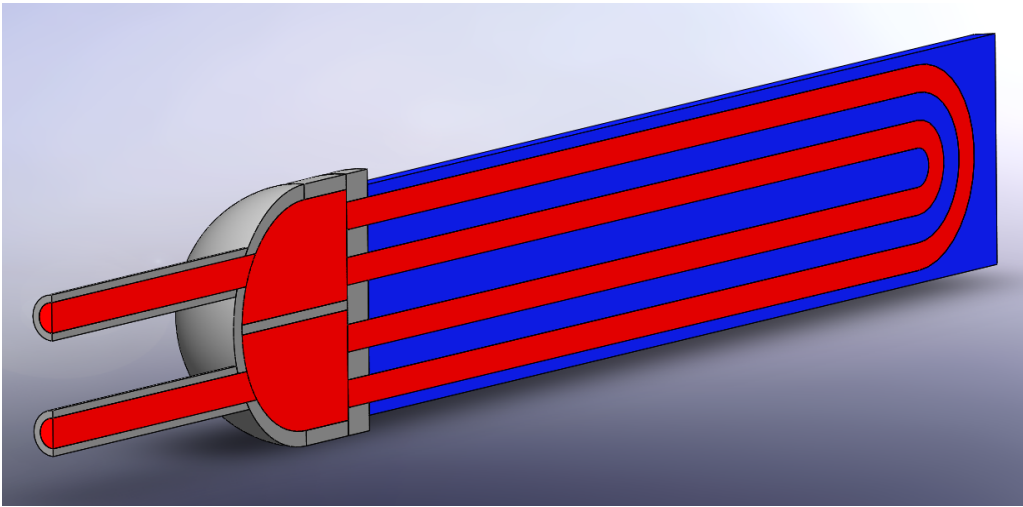
- ANSYS'de çözümün uzun sürmesini doğrudan etki eden mesh(ağ-örgü) sayısını azaltmak için Şekil 7.4'deki flanşın dış tarafı çizilmemiştir. Bu sebeple daha az mesh elde edilerek daha hassas yerlere mesh atmak için bu mesh sayısındaki azalma, avantaj olarak kullanılmıştır.
- Isı değiştiricindeki pleksiglasdan imal edilmiş kabuk bölümü çizilmemiştir. Sistem adyabat olarak kabul edildiğinden FDM'nin dış tarafındaki bu kabuk bölümdeki ısı transferinin gözlenmesi istenmemiştir. (Şekil 7.5)
- Akışkan ile FDM arasındaki ısı transferini sağlayan bakır boruların et kalınlıkları 0.5 mm olduğundan, buradaki akışkandan FDM'ye olan ısı transferi maksimum olduğundan ve analizin hızlı çözümüne olumsuz etki edeceğinden ihmal edilmiştir. (Şekil 7.5)
- Isı değiştirici düşey ekseninde simetrik olması sebebiyle Ansys'de modeli simetrik olarak tanımlamanın mümkün olmasından daha az mesh sayısı ile daha hızlı çözüme kavuşmak için modelin simetrisi alınmıştır. Ayrıca istenilen şekillerde mesh işlemi yapmak için bazı bölümler kendi içinde parçalanmıştır. Şekil 7.6'da modellenmiş ısı değiştiricinin bazı parçaları renklendirilmiştir. Mavi renk ile gösterilen bölüm FDM, kırmızı ile gösterilen bölüm sıcak su ve gri ile gösterilen bölüm ise ısı değiştiricinin ayna kısmı ile ön kapağıdır.



Şekil 7.4 Isı değıştiricinin ön kısmı



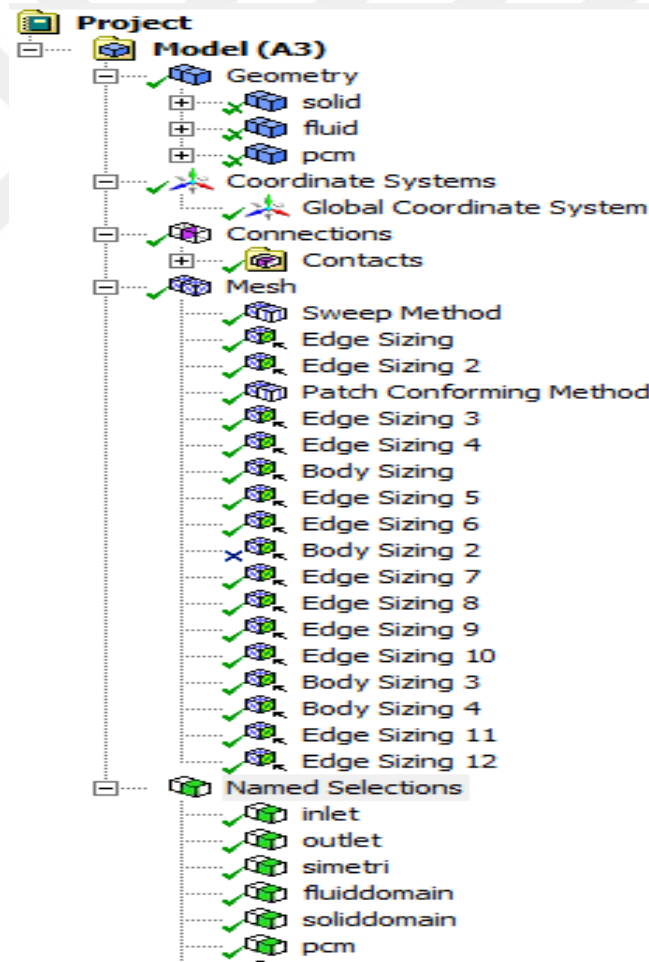
Şekil 7.5 Isı değıştiricisi



Şekil 7.6 3 boyutlu düşey olarak simetrik bire bir ölçekteki modellenen ısı değıştirici

7.2.1 Isı Değiştiricinin Sonlu Elemanlara Dönüştürülmesi ve Programa Tanıtılması

CAD programında çizilen ısı değiştirici gerekli ayarlamalar yapılarak Ansys programına tanıtılmıştır. Sistemi daha rahat kontrol edebilmek için ilgili parametrelerin değişimini görebilmek ve ilgili grafikleri yazdırabilmek için isimlendirilmesi gerekmektedir. 3 boyutlu modelin sonlu elemanlara(mesh) dönüştürebilmek için ve daha az mesh daha kaliteli elemanlar oluşturmak için bazı kısımlar bölünmüştür. Model üç parçadan oluşmaktadır. Bunlar; katı parça, akışkan bölgesi ve FDM bölgesidir. Bu bölgeler de analiz sonuçlarında ciddi hatalar oluşturmamak için kendi içlerinde parçalara ayrılmıştır. En son haline gelen sistemde elemanlar arasında gerekli bilgilerin transferini sağlamak için Fluent programında “Mesh interface” komutunda elemanlar arası yüzeyler birleştirilmiştir.



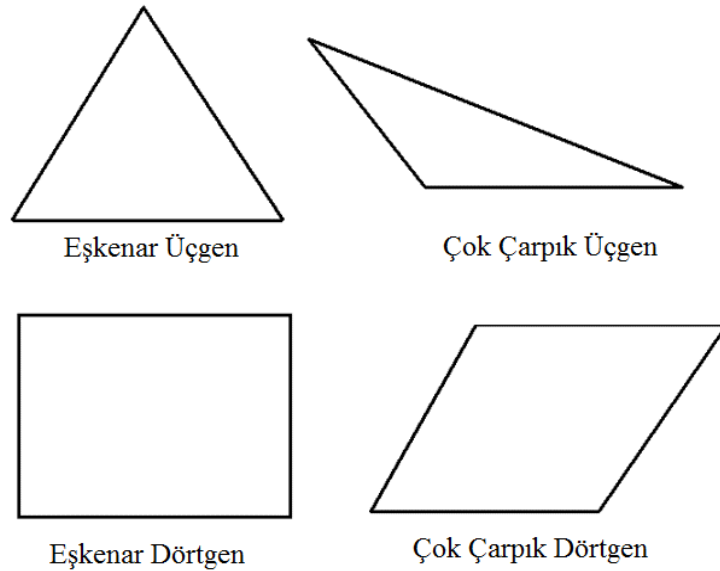
Şekil 7.7 Modelin isimlendirilmesi ve mesh işlemleri

Şekil 7.7’de Fluent programına geçiş yapmadan önce Design Modeler’de gerekli tüm tanımlamalar ile yapılan mesh işlemler gösterilmiştir.

Mesh işlemleri yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı kriterler vardır. Öncelikle modelin hem yeteri kadar sonlu elemana dönüştürülmesi gerekir hem de gereğinden fazla elemanlara ayırarak çok uzun süren hesaplama sürelerinin oluşması istenmez. Bunun için farklı mesh sayılarında çözüm yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ilk önce asgari düzeyde mesh işlemi yapılarak analiz gerçekleştirilmiş elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında çok büyük farklar olmadığı için mesh sayısı artırımına gidilmemiştir.

Analizi yapılacak sistemin sonlu elemanlara dönüştürüldükten sonra bazı kontrollerin yapılması gerekir. Bunlardan en temeli üç tanedir; “skewness”, “orthogonal quality” ve “aspect ratio” dur.

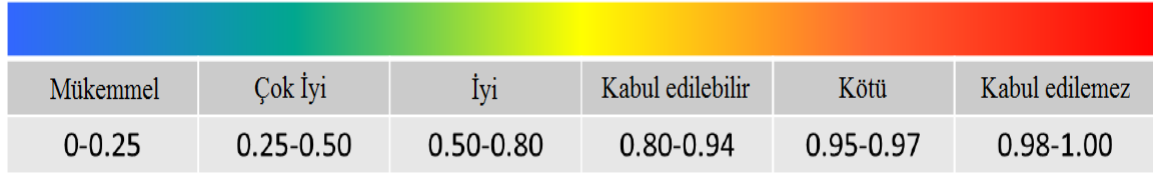
Skewness yani çarpıklık, bir yüzün veya hücrenin idealine yakın olduğunu belirtir. Sistemdeki hücrelerin, olması gereken biçimden şeklinin değişmesiyle oluşan çarpıklıktır. Bu çarpıklığın belli bir değerden yüksek olması durumunda analizi sonucunu doğrudan etkileyip çözümün ıraksamasına ve çeşitli hatalar alınmasına neden olmaktadır. Şekil 7.8’de çarpıklık (skewness) durumu belirtilmiştir.



Şekil 7.8 İdeal ve çarpıklık durumu

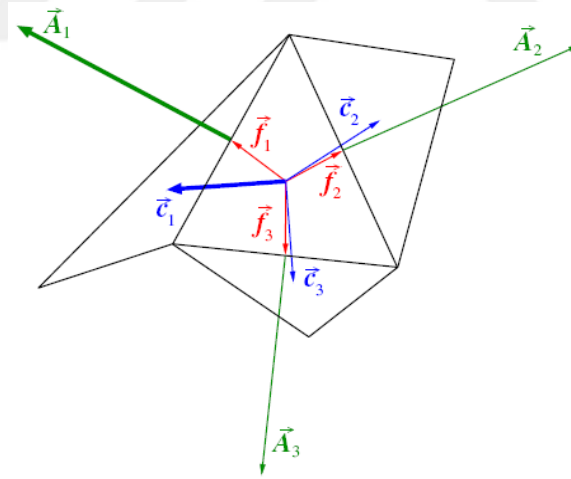
Ansys’de yapılan mesh işlemi sonunda, her bir parçanın veya gövdenin gerek ayrı gerekse bütününde skewness değerinin kabul edilebilir aralıkta olması istenir. Bütün

sistemin skewness değeri 0.98'den küçük olması istenir. Eğer bu sağlanmışsa analiz sonucunda skewness'den kaynaklanan hata yoksa ayrı ayrı parçaların skewness değeri dikkate alınmayabilir. Ama yine de mümkün olduğunca 0.95'i aşmaması istenir. Şekil 7.9'da skewness mesh metrik spektrumu gösterilmiştir[80].



Şekil 7.9 Skewness mesh metrik spektrumu

“Orthogonal quality”; hücreler için ortogonal kalite, yüz normal vektörü ($\vec{A}_i$ vektörü), hücre merkezinden her komşu hücrenin merkezine kadar olan vektör ($\vec{c}_i$) ve hücre merkezinden yüzlerin her birine olan vektör ($\vec{f}_i$) kullanılarak hesaplanır[81]. Şekil 7.10'da bu vektörlerin gösterimine yer verilmiştir.



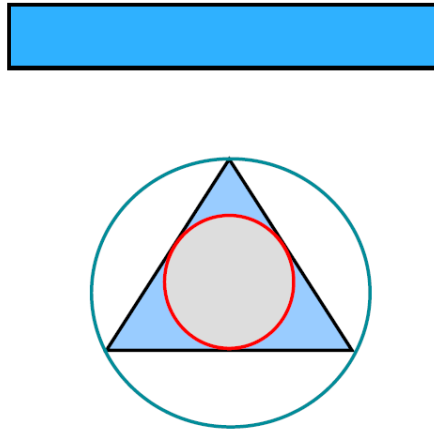
Şekil 7.10 Bir hücrenin ortogonal kalitesini hesaplamak için kullanılan vektörler

Ortogonal kalite, sistemin toplamında ve her bir parçasında 0.1 değerinin altına düşmemesi istenir. Yine de bazı durumlarda hücrelerin durumuna ve fiziki şartlarına göre farklılık gösterebilir. Şekil 7.11 'da ortogonal kalite mesh metrik spektrumu gösterilmiştir[80].

Kabul edilemez	Kötü	Kabul edilebilir	İyi	Çok İyi	Mükemmel
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Şekil 7.11 Ortogonal kalite metrik spektrumu

“Aspect ratio”; en-boy oranı olup bu kriter de önemlidir. En-boy oranının çok yüksek olması durumunda akış analizinin ırsamasına ve incelenen parametrenin ani en-boy oranı değişiminden kaynaklı hatalar alınmasına neden olacaktır. İki boyutlu hücrelerde uzunluk-genişlik oranı, üç boyutlu dörtgen hücrelerde alanlar oranı veya prizma hücrelerde ise dış teğet ve iç teğet çemberin yarıçap oranı dikkate alınmaktadır. Şekil 7.12’de gösterilmiştir[80].



Şekil 7.12 Aspect ratio’nun farklı hücre tiplerinde gösterimi

Bu kriter için istenilen değer, 10 ile 100 arasında olması gerekmektedir. Bazı durumlarda, (sınır tabakanın mesh işleminde) baskın bir şekilde büyük değişimler yoksa yüksek en-boy oranı kabul edilebilir[80].

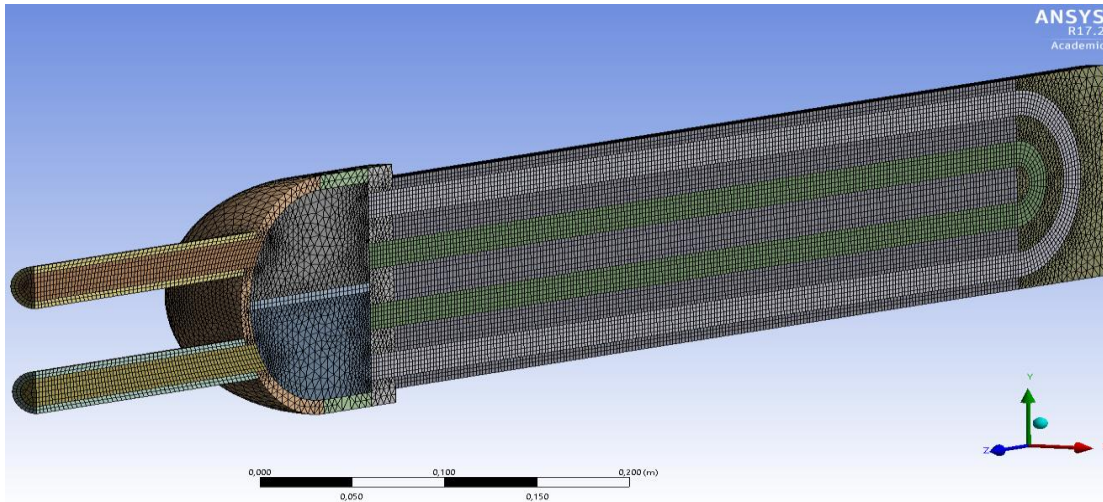
Tüm bu kriterler dikkate alınarak yapılacak olan analizde mesh işlemi üzerinde titizlikle mesh atılmaya çalışılmıştır. Kullanılan Ansys Student 17.2 sürümünde eleman sayısındaki kısıtlama nedeniyle (maksimum 512000 eleman sayısı) önceden de bahsedildiği üzere sisteme olumsuz etki etmeyecek parçalar çıkarılıp temel kriterlerin daha iyi olması için

hassas ve küçük boyutlu mesh işlemi yapılmıştır. Mesh işlemi sonucunda Şekil 7.13'te minumum ortogonal kalite 0.20, maksimum çarpıklık 0.86, maksimum en-boy oranı 11, ortalama ortogonal kalite 0.91, ortalama çarpıklık 0.19, ortalama en-boy oranı 1.96 ve toplam eleman sayısı ise 511706 gibi değerler elde edilmiştir.

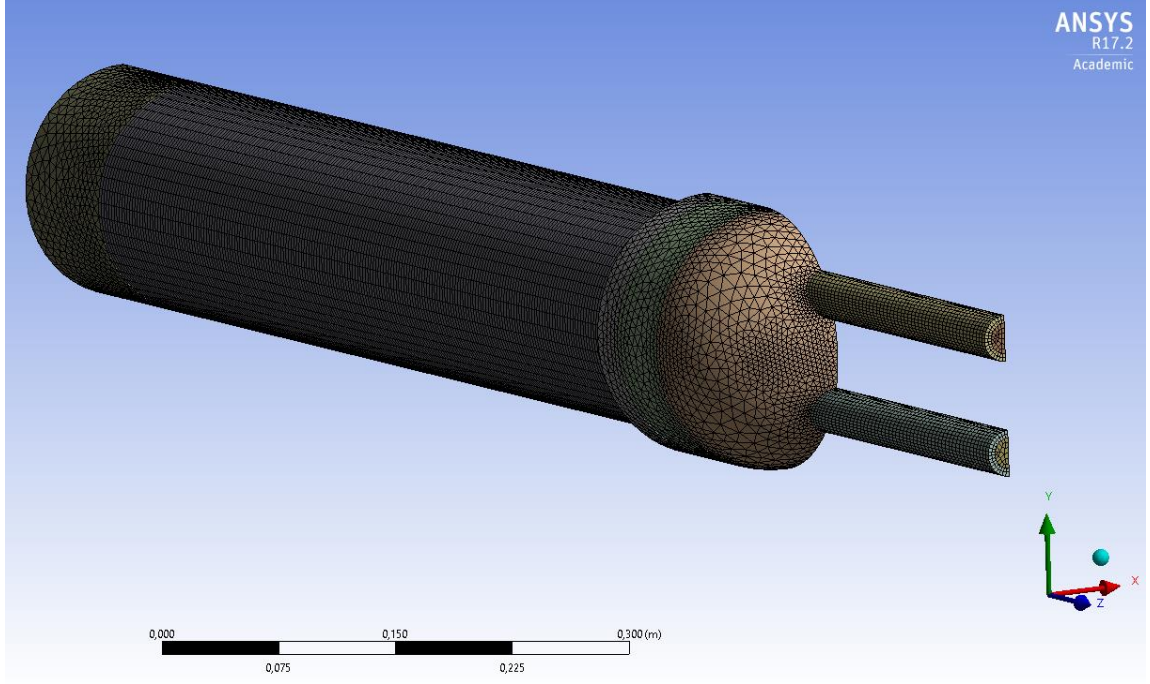
Details of "Mesh"	Details of "Mesh"	Details of "Mesh"
☐ Display Display Style Body Color ☒ Defaults ☒ Sizing ☒ Inflation ☒ Assembly Meshing ☒ Advanced ☒ Statistics ☐ Nodes 275430 ☐ Elements 511706 ☒ Mesh Metric Orthogonal Quality ☐ Min 0,20739 ☐ Max 0,99999 ☐ Average 0,9179 ☐ Standard Deviation 8,1482e-002	☐ Display Display Style Body Color ☒ Defaults ☒ Sizing ☒ Inflation ☒ Assembly Meshing ☒ Advanced ☒ Statistics ☐ Nodes 275430 ☐ Elements 511706 ☒ Mesh Metric Skewness ☐ Min 2,5839e-006 ☐ Max 0,86575 ☐ Average 0,19962 ☐ Standard Deviation 0,10879	☐ Display Display Style Body Color ☒ Defaults ☒ Sizing ☒ Inflation ☒ Assembly Meshing ☒ Advanced ☒ Statistics ☐ Nodes 275430 ☐ Elements 511706 ☒ Mesh Metric Aspect Ratio ☐ Min 1,0396 ☐ Max 11,117 ☐ Average 1,9623 ☐ Standard Deviation 0,4927

Şekil 7.13 Mesh istatistikleri

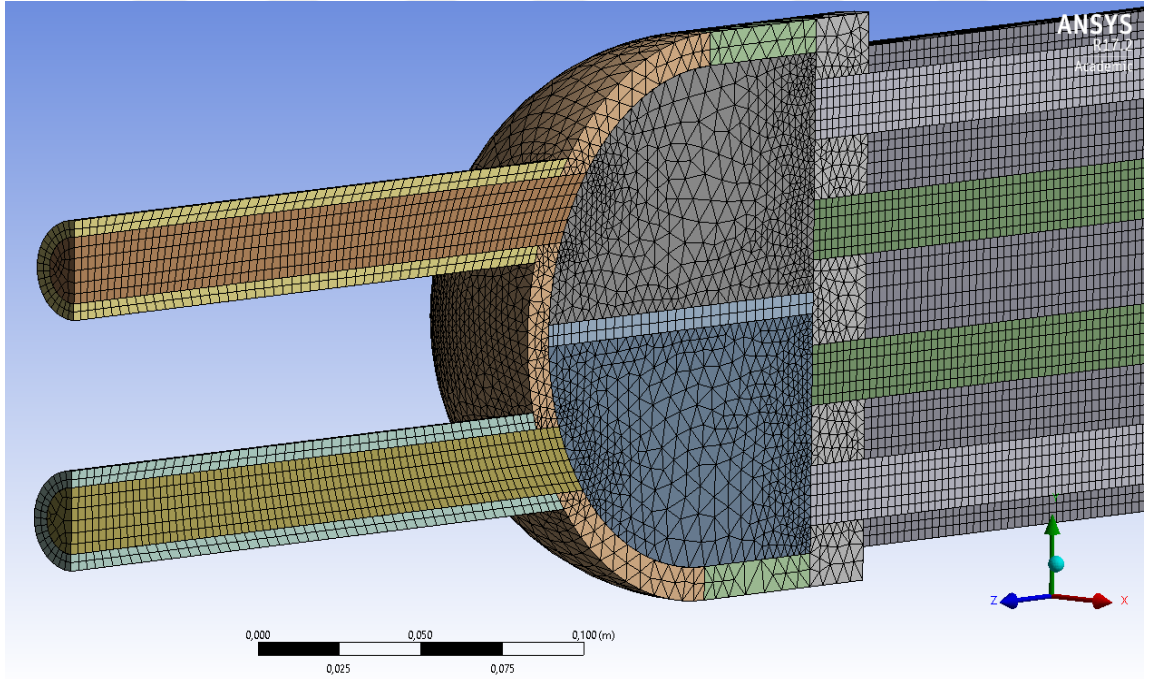
Aşağıdaki şekillerde bazı bölgelerdeki mesh işlemi sonrasındaki bazı detaylar gösterilmiştir. Bazı bölgelerde farklı eleman tiplerinin kullanılmasının nedeni gerek akışkanın gerekse diğer bölgelerin durumuna göre daha az, daha fazla veya daha kompleks mesh kullanılmasından kaynaklanmaktadır.



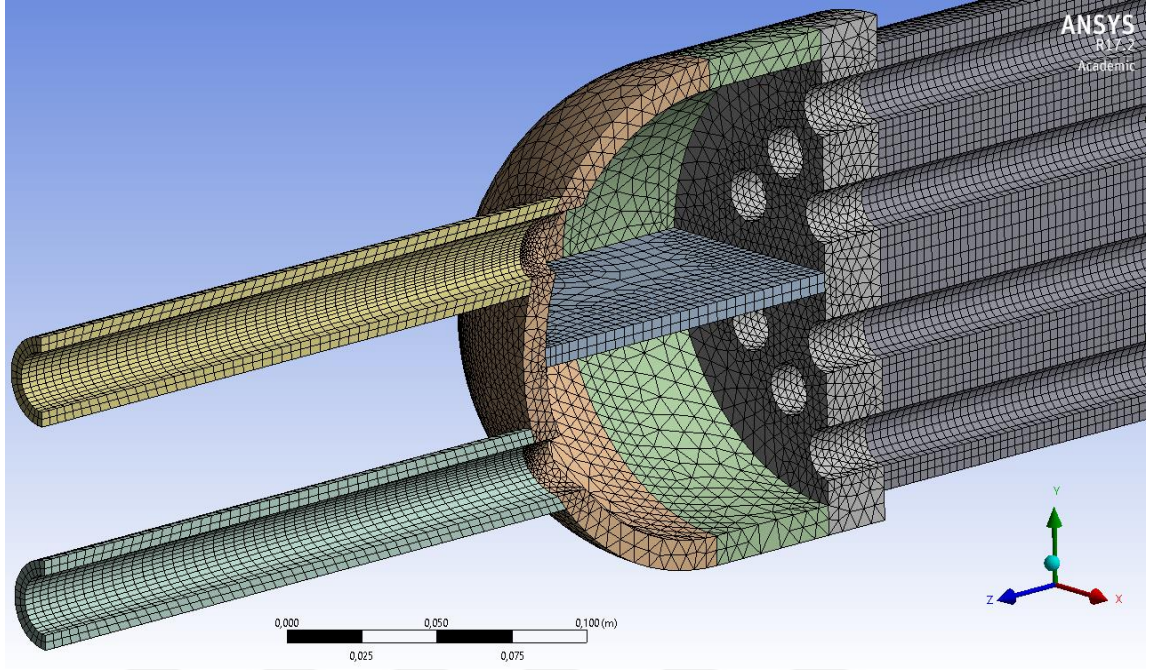
Şekil 7.14 Mesh detay görüntüsü



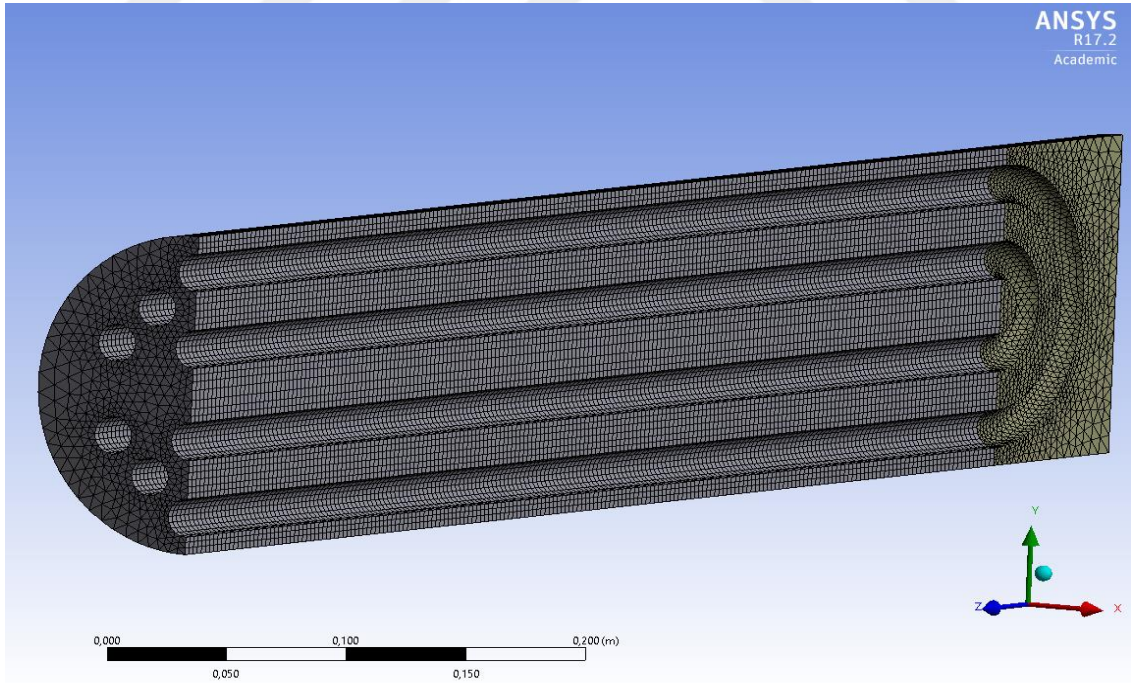
Şekil 7.15 Mesh detay görüntüsü



Şekil 7.16 Mesh detay görüntüsü



Şekil 7.17 Mesh detay görüntüsü



Şekil 7.18 Mesh detay görüntüsü

Model üzerinde gerekli mesh işlemi ve kontroller yapıldıktan sonra mesh işlemi yapılmış model, ANSYS FLUENT programına otomatik olarak aktarılmıştır. Fluent arayüzünde sınır şartlar girilmeden önce ilk olarak mesh yapılmış model “Check” yapılarak negatif hacim kontrol edilmelidir. Eğer negatif hacim varsa mesh işleminde hata yapılmış demektir dolayısıyla program çözüm hatası verecektir. Daha sonrasında ise Fluent içinde de mesh kalitesinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için genel ayarlarda “Report Quality” komutuna tıklanarak mesh kalitesi ölçülüp mesh kalite kriterleri tekrardan kontrol edilmelidir. FLUENT, sonlu elemanlara ayrılmış tüm akış problemlerin çözümü için korunum denklemlerini referans alarak çözme işlemini gerçekleştirmektedir.

FLUENT tarafından yönetici denklemler şunlardır;

S_m , kaynak terimi, t , zaman ρ , yoğunluk, $\vec{u}$, hız, olmak üzere süreklilik denklemi 7.5’de gösterilmiştir[82].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m \quad (7.5)$$

p , statik basınç, $\vec{F}$, ilave kuvvet, $\rho \vec{g}$, yer çekimi kuvveti, $\bar{\tau}$, gerilme tensörü, olmak üzere FLUENT tarafından çözülen momentum denklemi 7.6’da belirtilmiştir[82].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (7.6)$$

E , enerji, k_{eff} , efektif iletim katsayısı, S_h , kimyasal reaksiyon ısısı, h , duyulur ısı, $\vec{J}_j$, j türündeki difüzyon ısısı, h_j , j türündeki duyulur entalpi, $\bar{\tau}_{ref}$, duyulur entalpi hesaplamalarında kullanılan değer olmak üzere FLUENT ile çözülen enerji denklemi 7.7’de ifade edilmiştir[82].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{u}(\rho E) + p)) = \nabla \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{ref} \vec{u}) \right) + S_h \quad (7.7)$$

Malzemenin entalpisi H , duyulur entalpi h ile gizli ısının ΔH toplamı şeklinde hesaplanır.

$$H = h + \Delta H \quad (7.8)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (7.9)$$

$$T_f < T_{katılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = 0$$

$$T_f > T_{sıvılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = 1$$

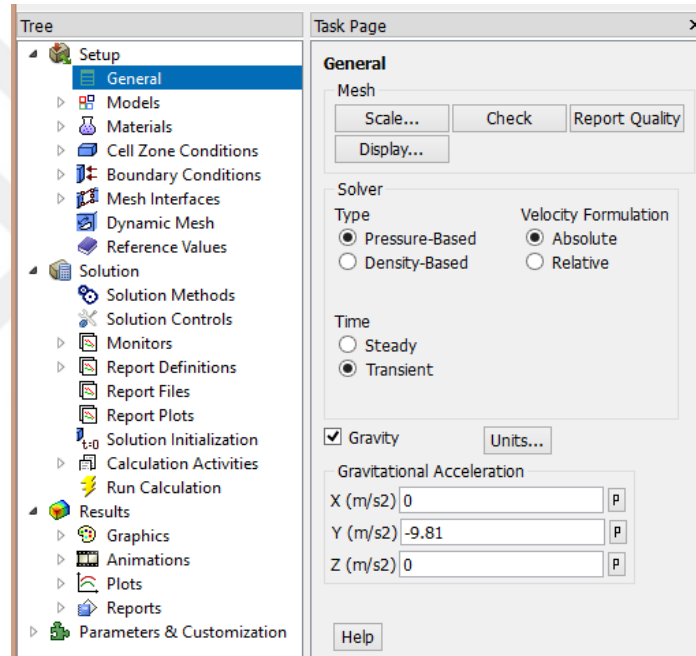
$$T_{katılaşma} < T_f < T_{sıvılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}}$$

Buradaki β sıvı hacim oranını göstermektedir. T_f , ΔT 'nin altında olduğu durumda tüm bölge β 'sı sıfıra eşit olmaktadır ve sistemde erimiş malzeme bulunmamaktadır. Eğer bu değer ΔT 'nin üstünde ise sistemdeki hücrelerin tamamının sıvı fazda olduğu anlaşılır. T_f , her iki değer arasında ise bu bölgede sıvı ve katının bir arada bulunduğu gösterilmektedir. Bu bölge “mushy zone” diye adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak “mushy zone” için uygun değer yazılarak çözülmüştür.

Gerekli çözücü ayarları girilmeden önce FDM'nin erimesini modellemek için aşağıdaki bazı kabuller yapılmıştır;

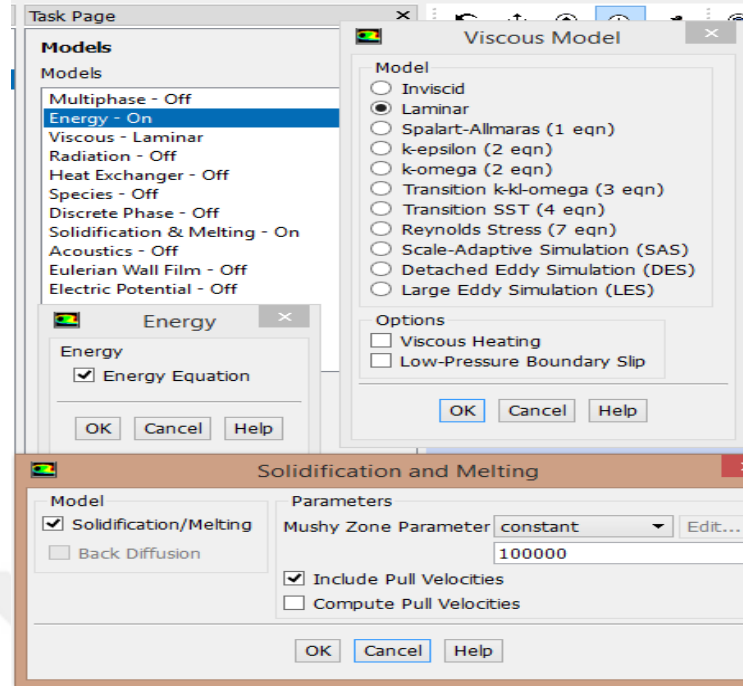
- Akış 3 boyutlu düşey ekseninde simetrik ve laminardır.
- Sistem yeterince yalıtılmış ve çevresiyle olan ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Radyasyon etkileri ihmal edilmiştir.
- Sıvı faz, Newtonian olarak kabul edilmiştir.
- Isı iletim katsayısı k , özgül ısı c , yoğunluk ρ , ve dinamik viskozite μ gibi değerler sıcaklığın bir fonksiyonu olarak alınmıştır.
- Başlangıç t zamanında FDM durağan bir şekildedir. FDM düşey ekseninde simetrik olduğundan simetrisi alınmıştır.

Şekil 7.19’da FLUENT’de genel ayarlar gösterilmiştir. Mach sayısının 0.3’den küçük olduğu durumlarda akış sıkıştırılamaz olarak kabul edildiğinden Solver kısmında sıkıştırılamaz akışlar için “Pressure-Based” tercih edilmiştir. FDM’nin erimesi zamana bağımlı olduğundan ve erimenin zaman içindeki değişimi incelenmek istendiğinden “Transient” seçilmiştir. Fakat analiz başlatılmadan önce ilk başlangıçta 30-40 iterasyon zamandan bağımsız olarak (steady) çözdürülmüş sonrasında transient seçilip çözüme devam edilmiştir. Sistemde yer çekimin etkisi olacağından “Gravity” aktif edilip –y yönünde yerçekimi ivmesi 9.81 m/s^2 olarak yazılmıştır.



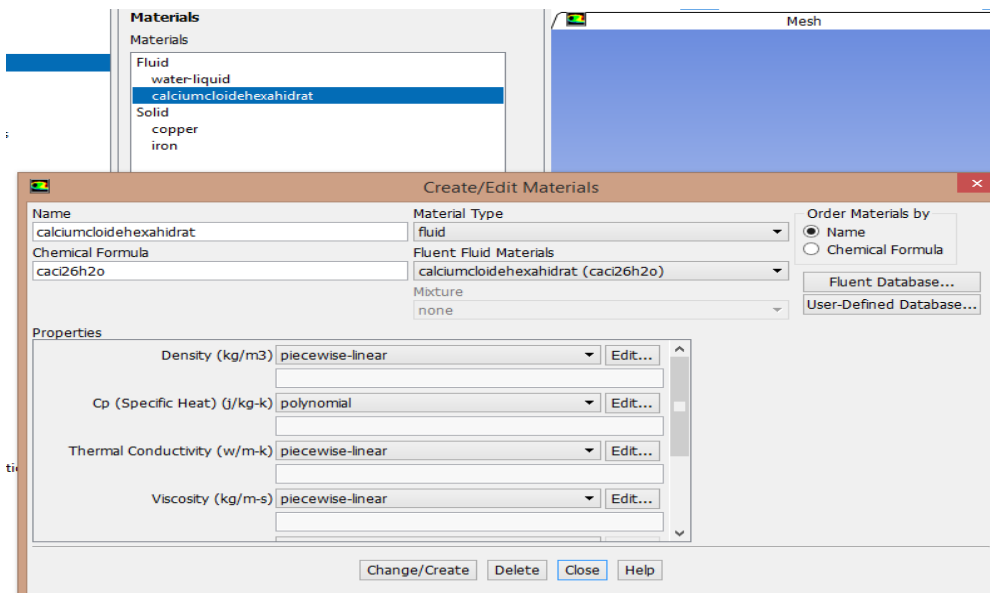
Şekil 7.19 FLUENT genel ayarlar arayüzü

“Models” sekmesinden gerekli olan denklemlerin aktif edilmesi gerekir. Bunlar enerji, akış karakteristiği ve erime-katılaşma denklemleridir. Mushy-zone için girilen değer varsayılan değer olarak tanımlandığından çoğu uygulamada ise kabul edilmiş bir değer olduğundan değiştirilmemiştir. Şekil 7.20’de bu denklemlerin aktif edildiği gösterilmiştir.



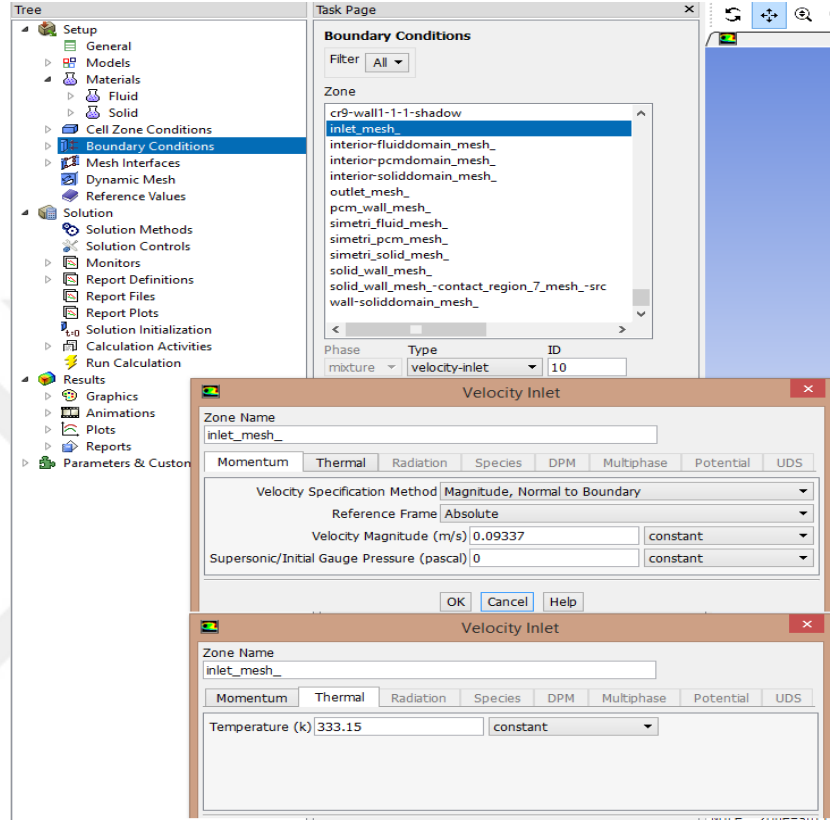
Şekil 7.20 Aktif edilmiş denklemlerin gösterilişi

“Materials” sekmesinde FDM, su ve demir ile ilgili daha önceden bahsedilen termofiziksel özelliklerin girilmesi gerekmektedir. Tablo 7.1 ve 7.2’deki bu değer gerekli yerlere girilmiştir. Fluent’in kendi veri tabanında olan değerler aynen kullanılmıştır. Şekil 7.21’de arayüzde malzeme bilgilerinin tanıtılması gösterilmiştir.



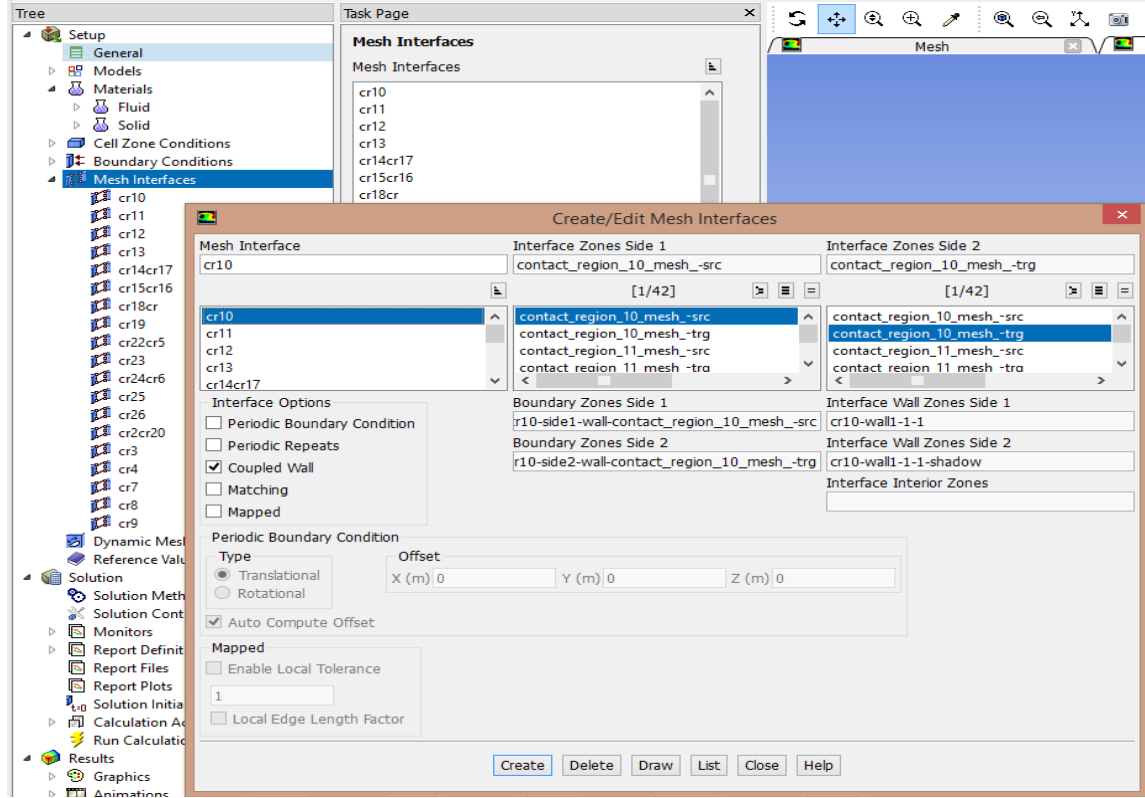
Şekil 7.21 Malzeme tanıtma arayüzü

“Boundary Conditions” bölümünde gerekli sınır şartların yazılması gerekmektedir. Bunlar sırasıyla şunlardır; akışkanın giriş hızı ve sıcaklığı, simetri yüzeyler, akışkanın çıkış şartları ve ısı değiştiricinin duvar şartları gibi. Şekil 7.22’de akışkanın giriş şartlarının girilmesi gösterilmiştir.



Şekil 7.22 Akışkan giriş şartlarının girilmesi

Daha önceden bahsedildiği üzere istenilen parçalara daha fazla veya daha az mesh yapabilmek için modelde bazı kısımların bölündüğünden bahsedilmişti. Bu parçalanmış kısımlar ile ayrıca akışkan bölgesi, FDM bölgesi ve ısı değiştiricinin ön kısmı farklı malzemelerden olduğundan, analiz yapılırken bu bölgeler ve kısımlar arasında çözülen denklemlerdeki bilgilerin aktarılabilmesi için ara yüzeylerin birbirine bağlanması gerekmektedir. Bunun için “mesh interface” sekmesinde bu ayarların yapılması gerekmektedir. Şekil 7.23’te bunun bir örneği gösterilmiştir ve 19 adet ara yüzeyin sınır şartının tanımlanması bu şekilde yapılmıştır.

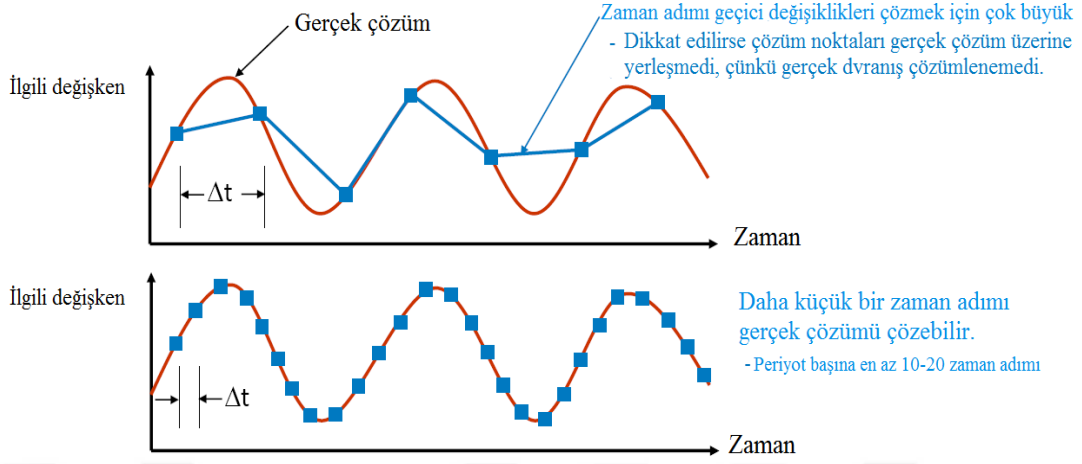


Şekil 7.23 Ara yüzey sınır şartının gösterimi

Fluent’de çözme metodu olarak basınç-hız ikilisinden coupled şeması kullanılmıştır. Nümerik ayrıklaştırma metodu olarak enerji, momentum ve zaman bağlı denklemlerin birinci dereceden hesaplanması yapılmıştır. Süreklilik denkleminin yakınsama kriteri 1×10^{-3} , enerji denkleminin yakınsama kriteri 1×10^{-6} olarak ayarlanmıştır. Daha sonra modelin başlangıçtaki sıcaklığı $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ayarlanarak FDM ile ısı değiştiricinin ön kısmının tamamına homojen olarak tanımlanmıştır. En son olarak çözümün başlayabilmesi için her bir zaman adımındaki iterasyon sayısının, zaman adımının büyüklüğünün ve zaman adımının sayısının girilmesi gerekmektedir. Çeşitli denemeler yapılarak gerek mesh sayısının gerekse çözücü ayarlarının uygun değerler seçilmesi ve problemin çözülebilmesi için bu değerler titizlikle seçilmiştir. Analiz çözülürken uygun olan zamanlarda durdurulup gerekli kontroller yapılarak çözüme kaldığı yerden devam ettirilmiştir. Fluent’te zaman bağımlı çözümler yapılırken iterasyon sayısının artırılmasından çok zaman adımı boyutunun düşürülmesi gerektiği Fluent eğitim notlarında belirtilmiştir[83]. Bu yaklaşım şekil 7.24’te gösterilmiştir.

- Zamana bağılı simülasyonlarda zaman adımı boyutu önemli bir parametredir.

– Δt , zamana bağılı özellikleri çözecek kadar küçük olmalıdır.



Şekil 7.24 Zaman adımının seçilmesi[83]

Zaman adımın belirlenebilmesi için ön fikir verme açısından denklem 7.10 kullanılması ilk başlangıç için yeterlidir.

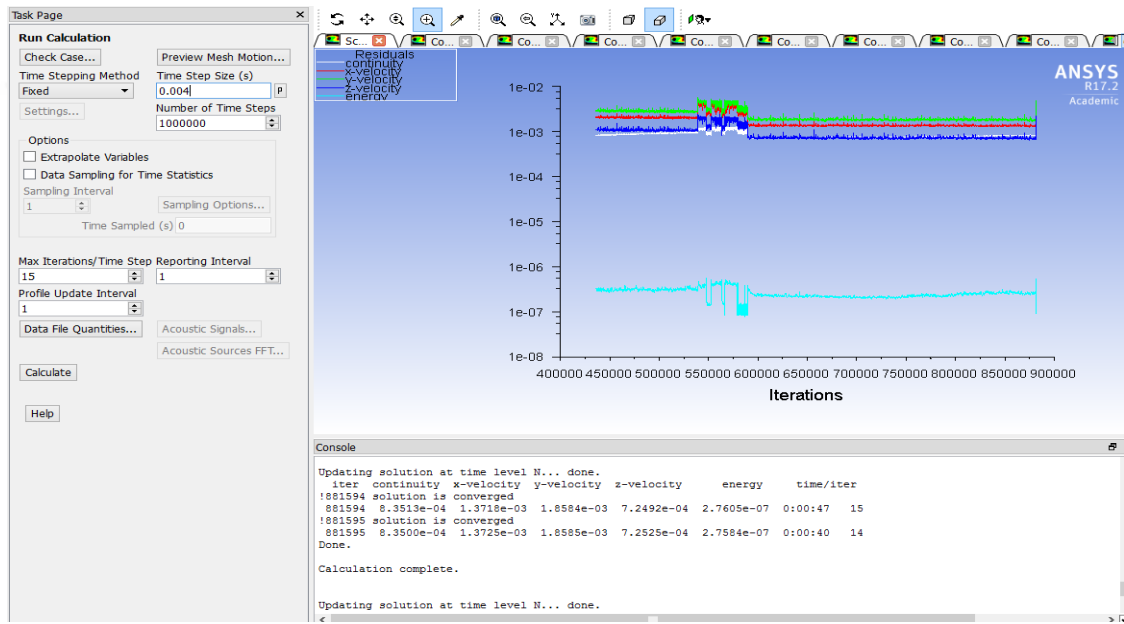
$$\Delta t = \frac{1}{3} \times \frac{L}{V} \quad (7.10)$$

Buradaki L oluşturulan sonlu elemanın karakteristik boyutu, V ise akışkanın hızıdır. Burada gerekli hesaplama yapılarak uygun bir değer bulunabilmektedir. Gerekli görüldüğünde bu değerın üstüne çıkılmasında problemin çözümüne herhangi bir olumsuz etkisi görülmediği kanısına varılmıştır. Dolayısıyla analiz için gerekli zaman adımı 0.004, her bir zaman adımındaki iterasyon sayısı 15 ve zaman adımı sayısı 1 milyon olarak girilmiştir ve çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Fluent'te analiz gerçekleştirildikten sonra deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasının yapılması için önceden bahsedildiği üzere deney setinde gerekli çalışmalar yapılmıştır. Deneyde ısı değiştiricisine gönderilen sıcak suyun özelliklerinin Fluent'teki değerler ile aynı olması için gereken hassasiyete dikkat edilmiştir.

8. SAYISAL ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ

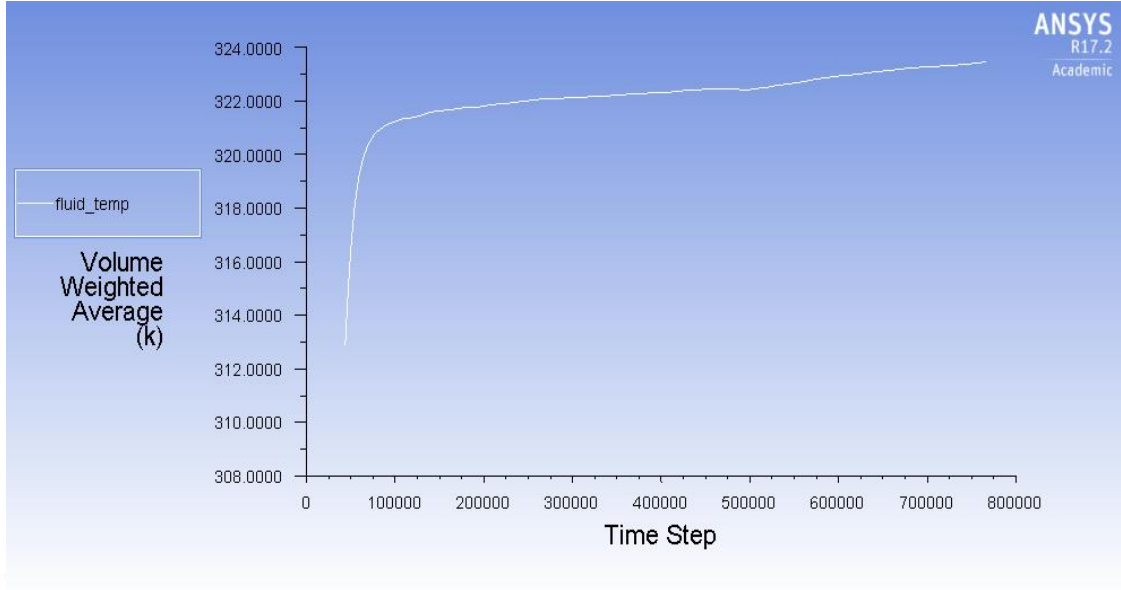
Analiz için kabul edilen tüm sınır şartları tanımlandıktan sonra Fluent'ten belirli bir süre çözüm işlemi gerçekleştirilmiş sonra istenilen yakınsama elde edilmiş olup istenilen sonuçlar elde edilinceye kadar çözüm devam ettirilmiştir. Şekil 8.1'de iterasyon bazında süreklilik ve enerji denklemlerinin yakınsadığı ve kararlı durumda çözmeye devam ettiği görülmektedir.



Şekil 8.1 Fluent arayüzünde çözümün gösterilişi

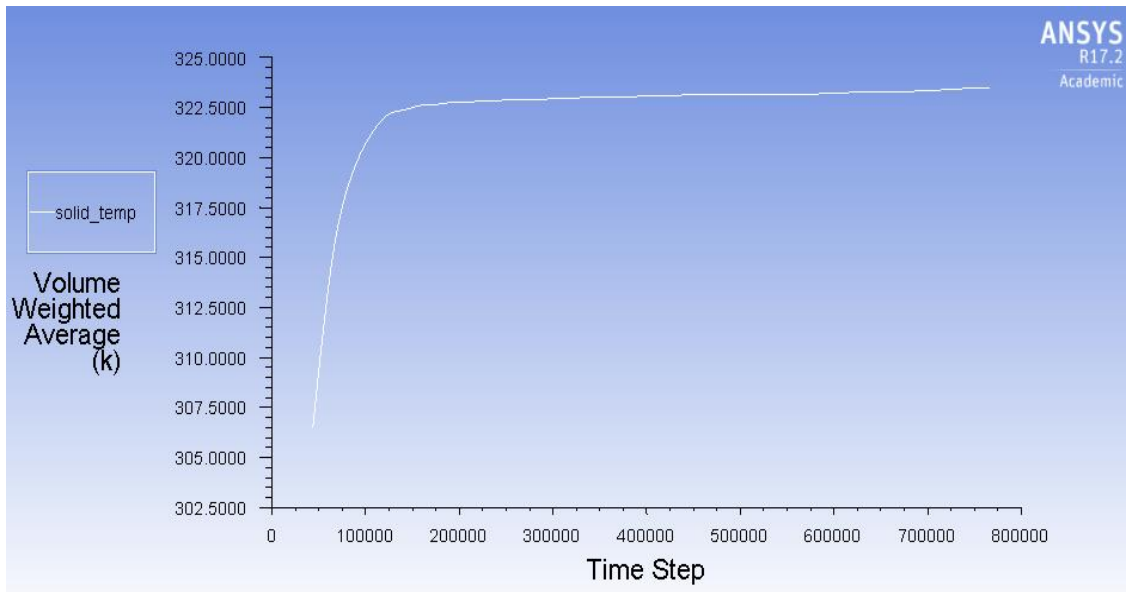
Şekil 8.1 yaklaşık 65 dakikalık analiz sonucundaki son 30 dakikaya ait sistemin yakınsama cevabını göstermektedir. Bu grafikte bazı durumlarda sistemin ıraksamaya eğilim gösterdiği görülmektedir. Bu durumda gerekli kontroller (zaman adımının düşülmesi gibi) yapıp sistemin ıraksamasına izin verilmemiştir.

Şekil 8.2'de ısı değiştiricisine giren sıcak suyun zamana göre ortalama sıcaklık değişiminin Kelvin cinsinden grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte başlangıçta 333 K sıcaklıkta gönderilen sıcak suyun, sistemi terketmeye başlamasıyla ısı değiştiricindeki toplam akışkan hacminin ortalama sıcaklığının zaman içinde arttığı görülmektedir. Sistemde dolaşan sıcak su yaklaşık 460 (115000 Time-step) saniyeden itibaren kararlı duruma eritmiş ve ısısını FDM'ye aktarırken ortalama hacimdeki sıcaklığı sabit kalmıştır.



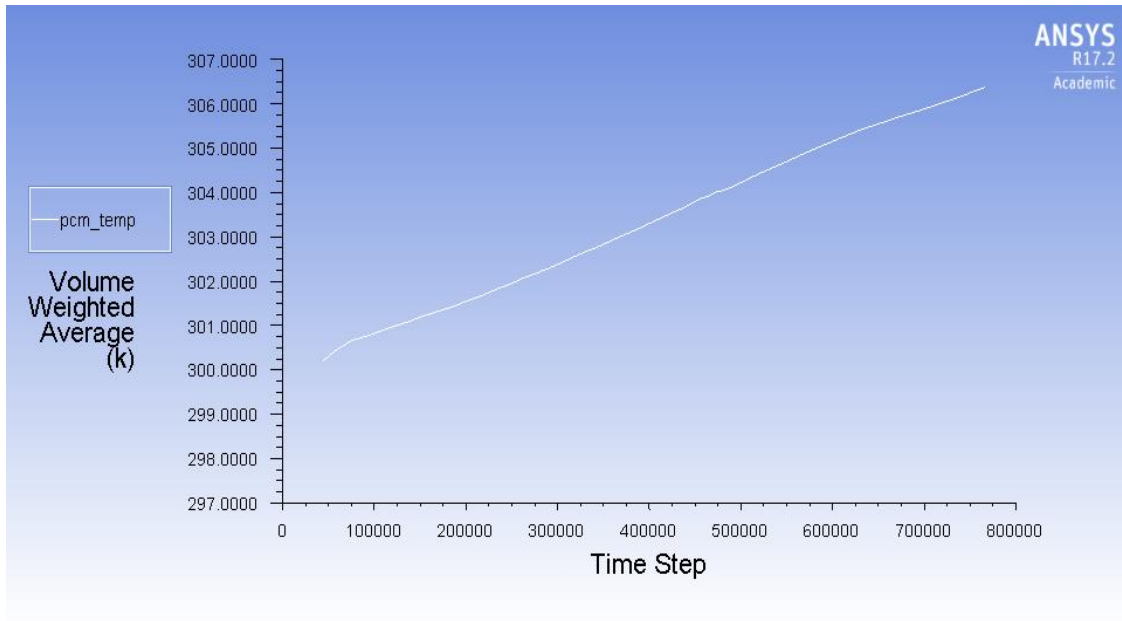
Şekil 8.2 Akışkan bölgenin kararlı durum incelemesi

Şekil 8.3'te ısı değiştiricinin demirden imal edilmiş ayna ve ön kapağın ortalama hacmindeki sıcaklığının zaman göre değişim grafiği verilmiştir. Bu grafikte, başlangıçta 300 K sıcaklığında tanımlanan ayna ve ön kapak, sıcak suyun gönderilmesiyle zamanla ısınmaya başlamış yaklaşık 600 (150000 Time-step) saniyeden itibaren sıcaklığı kararlı duruma erişmiş ve sabit kalmıştır.



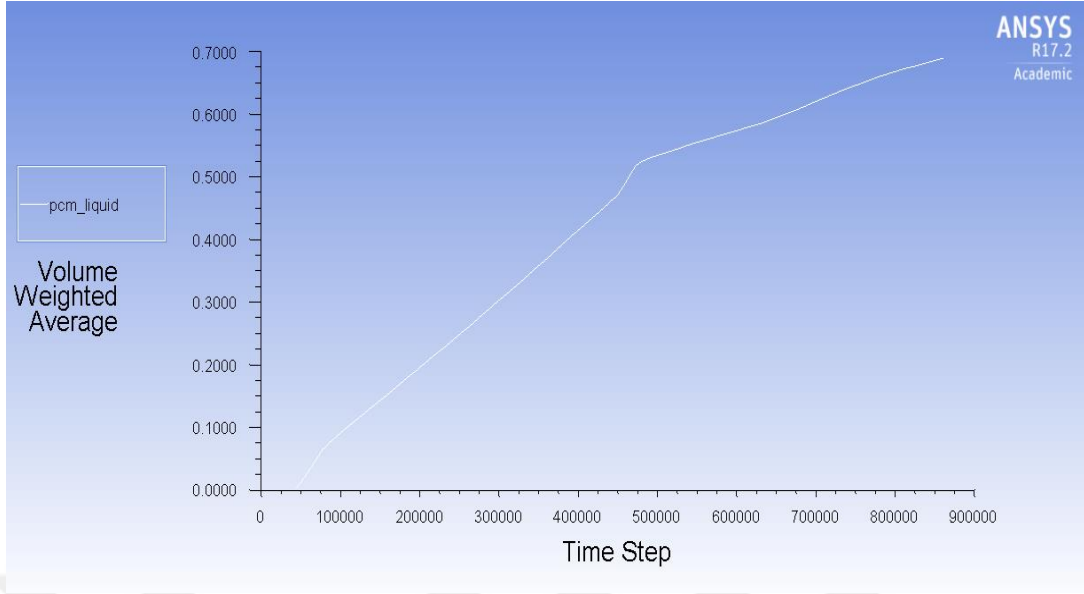
Şekil 8.3 Katı bölgenin kararlı durum incelemesi

Şekil 8.4'te FDM'nin zamana bağlı olarak ortalama sıcaklığının zamana göre değişim grafiği verilmiştir. Bu grafikte FDM hacminin ortalama sıcaklığının geçen süre içinde sıcaklığının artmamasının nedeni ısı iletim katsayısının düşük olması ve kararlı duruma erişmek için daha fazla süre geçmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. FDM'nin ortalama sıcaklığının kararlı duruma erişmesine sayısal çalışmada ulaşılamamıştır. Bunun nedenine 9. bölümde ayrıca değinilmiştir.



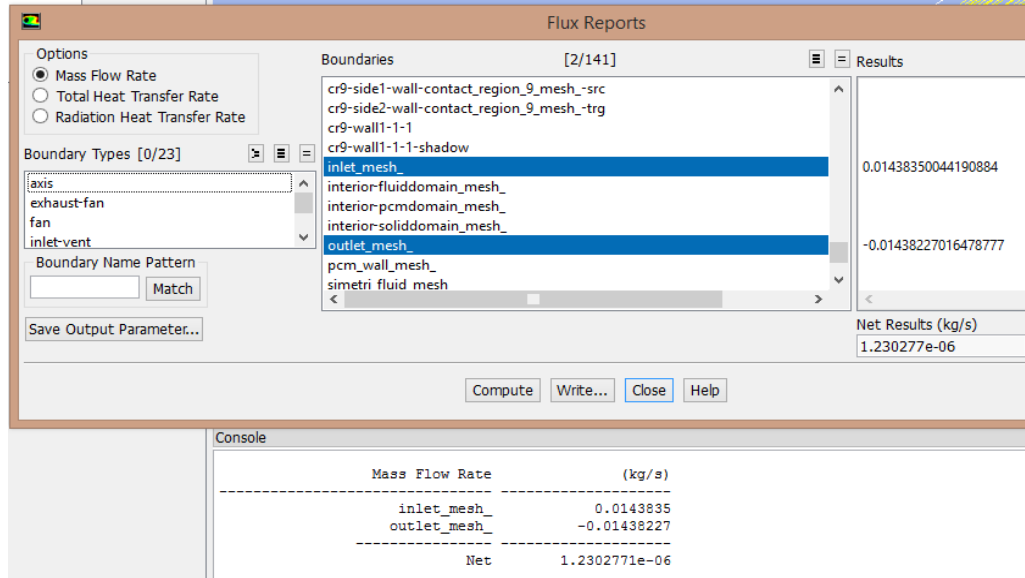
Şekil 8.4 FDM bölgenin kararlı durum incelemesi

Şekil 8.5'te FDM'nin ortalama hacimdeki sıvılaşma oranı gösterilmiştir. Bu oran 0 ile 1 bir arasında olup 0 iken FDM tamamen katı haldedir 1 iken tamamen sıvı haldedir. Bu grafikte en son zaman adımında FDM'nin yaklaşık %70'in eridiği görülmektedir.



Şekil 8.5 FDM'nin zaman göre erime oranı

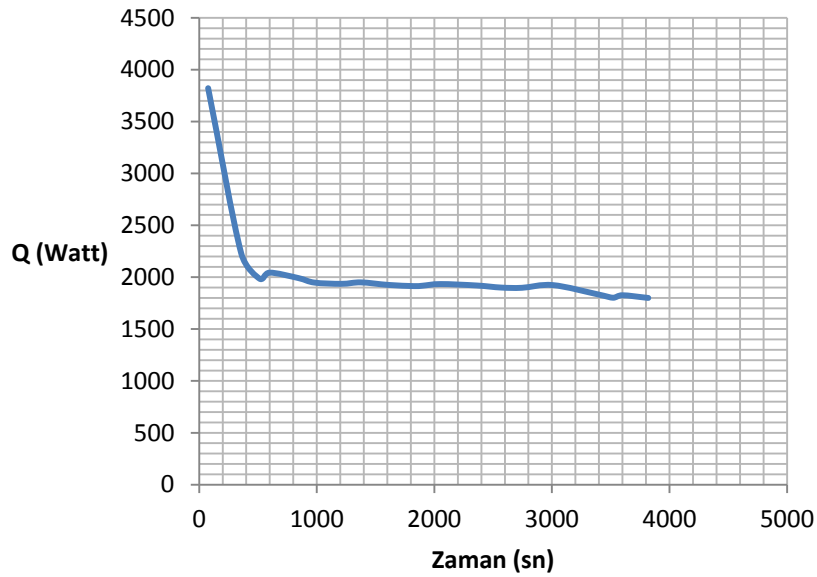
Şekil 8.6'da Fluent'te sisteme giren ve çıkan akış kütleindeki değişim gösterilmiştir. Analizin sonucunda sistemde biriken akışkan kütlesi 1.23×10^{-6} kg/s olup ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 8.6 Akışkanın giriş ve çıkıştaki kütle değişim miktarı

Şekil 8.7' de Fluent'te zamana göre sistemde depolanan enerjinin değişim grafiği verilmiştir. Normal şartlarda grafikte Q'nun zamanla artması gerekirken bu grafikte zamanla azaldığı görülmektedir. Burada herhangi bir yanlışlık söz konusu değildir. Sadece grafiğin şu şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir;

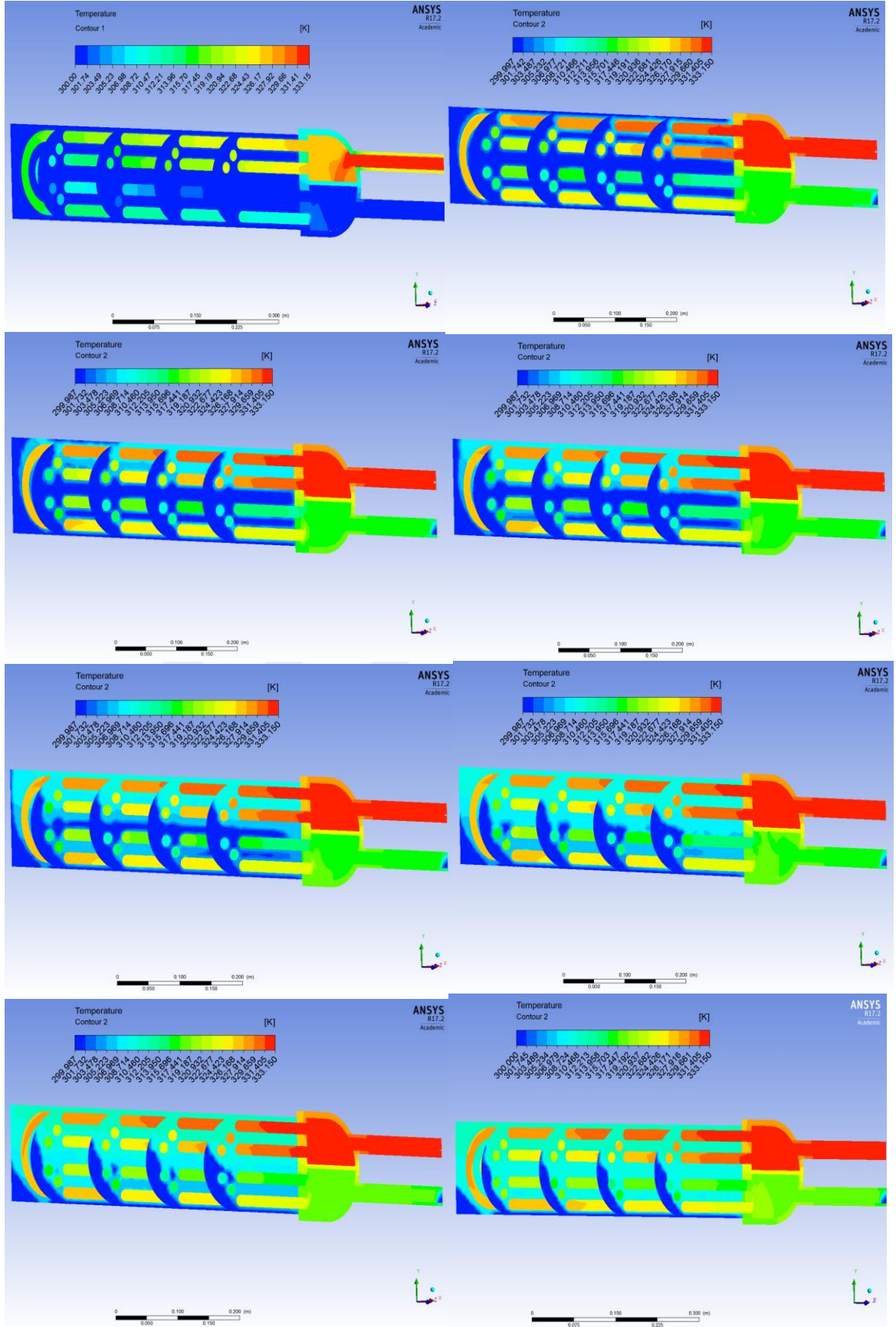
Fluent'te başlangıç şartlarında ($t=0$ sn) girişteki akışkanın sıcaklığı 60 °C olarak tanımlanmıştı. Program ($t=0$ sn) çıkıştaki akışkanın sıcaklığını çevre şartlarına bağlı kalarak otomatik olarak 27 °C olarak tanımladı. Zaman içinde girişteki akışkan, ısısını FDM'ye transfer edeceğinden başlangıç çıkış sıcaklığından (27 °C) daha yüksek bir sıcaklıkta çıkacağı bilinmektedir. Elde edilen sonuçlarda çıkış sıcaklığın 40 °C olduğu görülmüştür. Başlangıçta giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki farktan kaynaklanan ısının ısı değiştiricinde depolandığı Şekil 8.7'de 3800 Watt olduğu görülmektedir. Fakat zaman içinde giriş-çıkış sıcaklık farkının kararlı duruma ulaşmasıyla sistemde depolanan ısının yaklaşık 1800 Watt olduğu görülmektedir.



Şekil 8.7 Isı değiştiricinde depolanan ısının zamana göre değişimi

Şekil 8.8'de ısı değiştiricinin sırasıyla 1., 10., 20., 30., 40., 50., 60 ve 70. dakikalardaki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Model 3 boyutlu simetrik olduğundan hacim gösterimi yerine belli yerlere düzlemler tanımlanıp o şekilde sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Sıcaklıkları gösterilen düzlemler, -z yönünde art arda yerleştirilmiş termokupullar ve düşey ekseninde simetrisi alınmış ısı değiştiricinin düzlemidir. Sıcak akışkan sağ üst taraftaki

borudan girip iç bölgede 6 adet U borudan giriş yapıp FDM'yi ısıttıktan sonra tek bir bölgede birleşip sağ alt taraftaki borudan çıkış yapmaktadır. Başlangıç sıcaklığı 27°C iken yavaş yavaş ısınmaya başlayan FDM zamanla erimiştir. Sonuçlar incelendiğinde FDM üst bölgesinin sıcaklığının alt bölgeye göre daha hızlı arttığı görülmektedir. Isı değiştiricin ön bölümünün demir olması sebebiyle giren sıcak akışkan bu bölgenin de sıcaklığını arttırmıştır. Bu bölge FDM'yi iletim yoluyla ısınmasına ve zamanla erimesine sebep olmuştur. Sistemi terk eden sıcak akışkanın sıcaklığı ise 40 °C olarak ölçülmüştür. Isı değiştiricindeki U boruların gönderilen sıcak akışkan U bölgesinden geçerken o bölgedeki FDM'yi daha hızlı bir şekilde erittiği görülmüştür. Bunun sebebinin o bölgeye atılan mesh yapısının farklılığından veya çalkantılı bir akış sergileyip ısı transferinin arttırdığı tahmin edilmektedir. Gönderilen sıcak akışkanın laminar olduğu kabul edildiğinden türbülanslı bir akışta daha iyi bir sonuç alınabileceği tahmin edilmektedir.

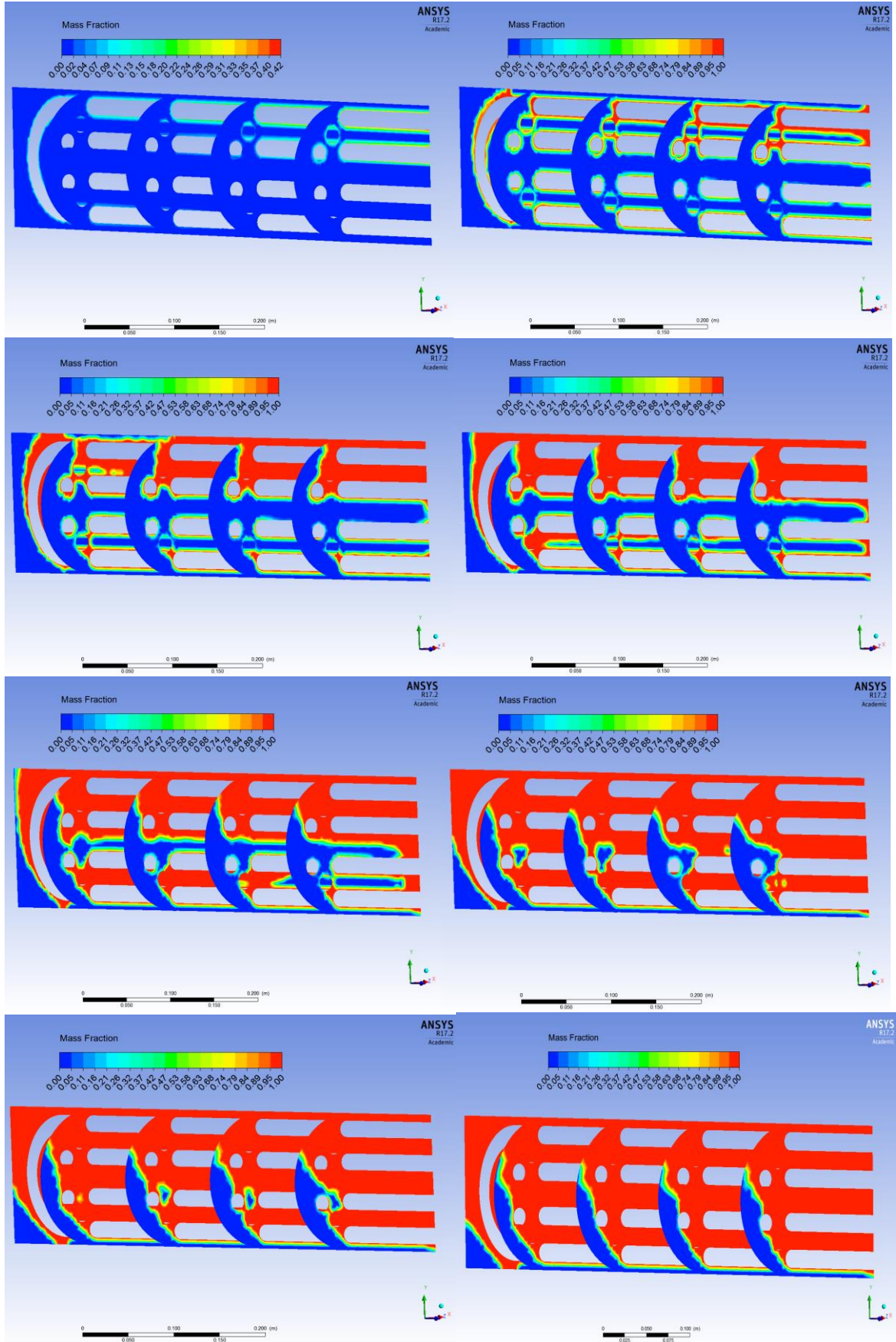


Şekil 8.8 Isı değıştircinin farklı zamanlardaki sıcaklık değeri

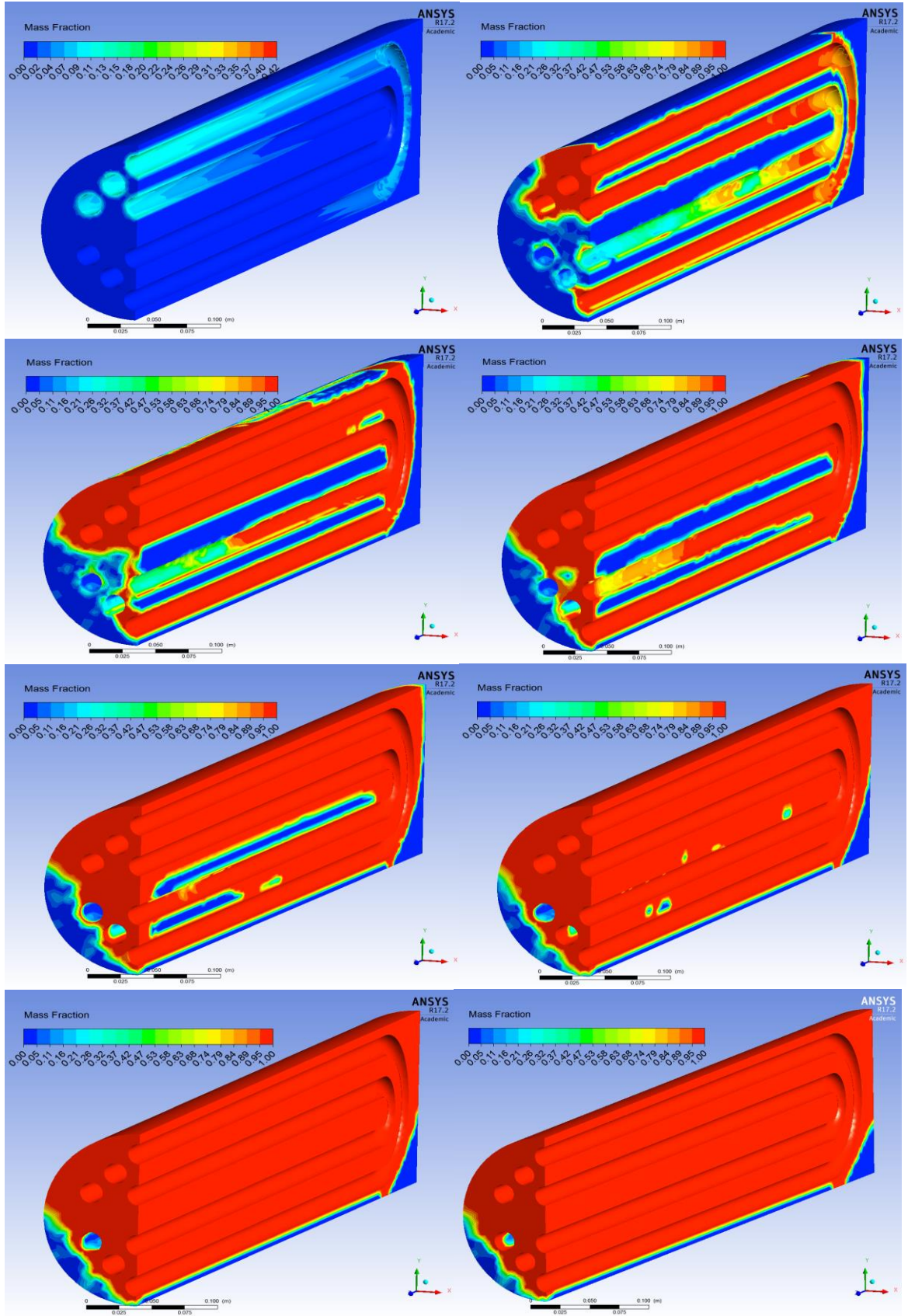
Şekil 8.9’de FDM’nin 1., 10., 20., 30., 40., 50., 60 ve 70. dakikalardaki erime yüzdeleri gösterilmiştir. Burada da gösterilen düzlemler, termokupulların bulunduğu düzlem ve simetri düzlemidir. Bu sonuçlarda mavi renk ile gösterilen bölge FDM’nin tamamen katı olduğu, kırmızı ile gösterilen bölgenin ise tamamen sıvı olduğu yerlerdir. Yeşil-sarı renklerin olduğu bölge ise “mushy zone” diye adlandırılan bölgedir. Ayrıca Şekil 8.10’da düşey ekseninde simetrisi alınmış FDM’nin 3 boyutlu olarak zamana içindeki erimesi gösterilmiştir.

Bu sonuçlara bakıldığında ısı değiştiricisine gönderilen sıcak akışkanın üst borudan değil de alt borudan gönderilmesi durumunda FDM’nin daha hızlı bir şekilde eriyeceği sonucu çıkarılabilir ya da yerleştirilen U boruların farklı şekillerde dizayn edilmesiyle de erime süresinde ciddi farklar olacağı düşünülmektedir. Elde edilen erime resimlerine bakıldığında sistemi terk eden akışkanın çıkış bölgedeki FDM’yi eritmede zaman aldığı görülmektedir. FDM’nin daha kolay, hızlı ve homojen bir şekilde erimesi için uygun boru dizilimleri veya boru dışına ısı transferini arttırıcı kanatlar eklenmesinin fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

Bu yapılan analiz adyabatik olarak kabul edilmiştir. Çevresiyle ısı transferi olmamasına rağmen FDM’nin merkezden uzak bölgelerin erimesinin çok geç sürdüğü görülmektedir. FDM’nin uygulamalarda kullanılması durumunda bu etkinin göz ardı edilmemesi gerektiği düşünülmektedir.



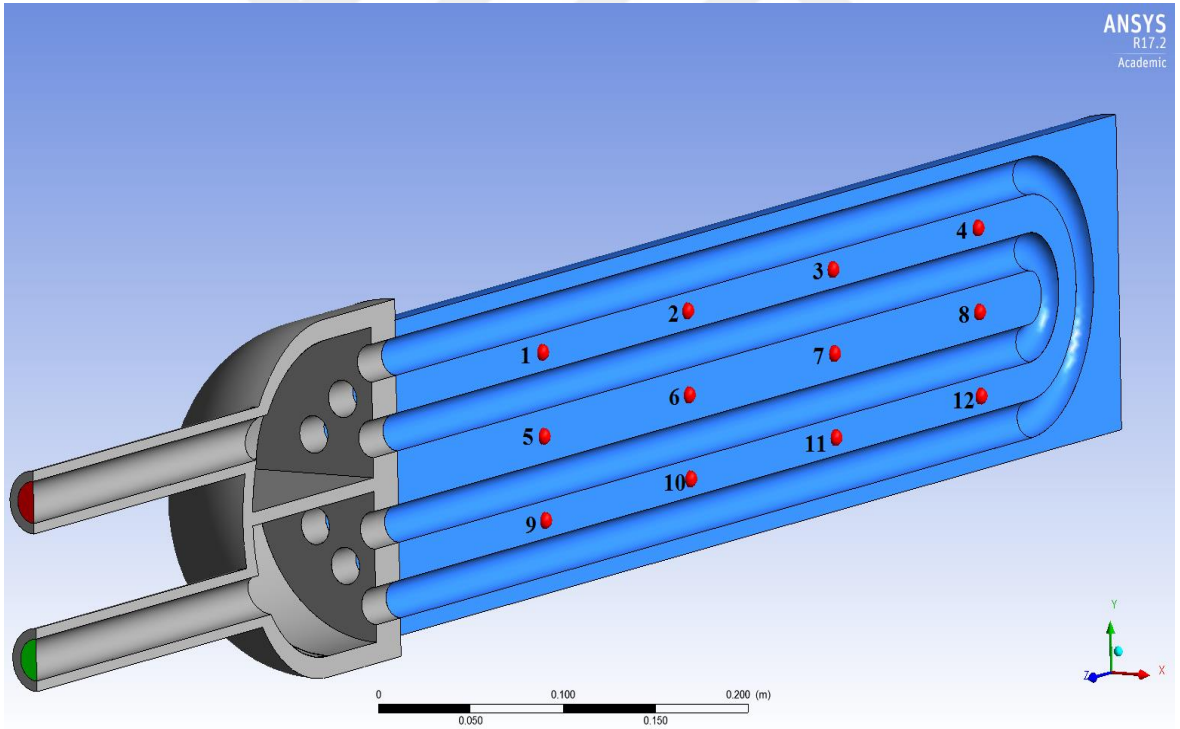
Şekil 8.9 FDM'nin farklı zamanlardaki erime durumunun gösterilişi



Şekil 8.10 3 boyutlu FDM'nin zaman içindeki erimesinin gösterilişi

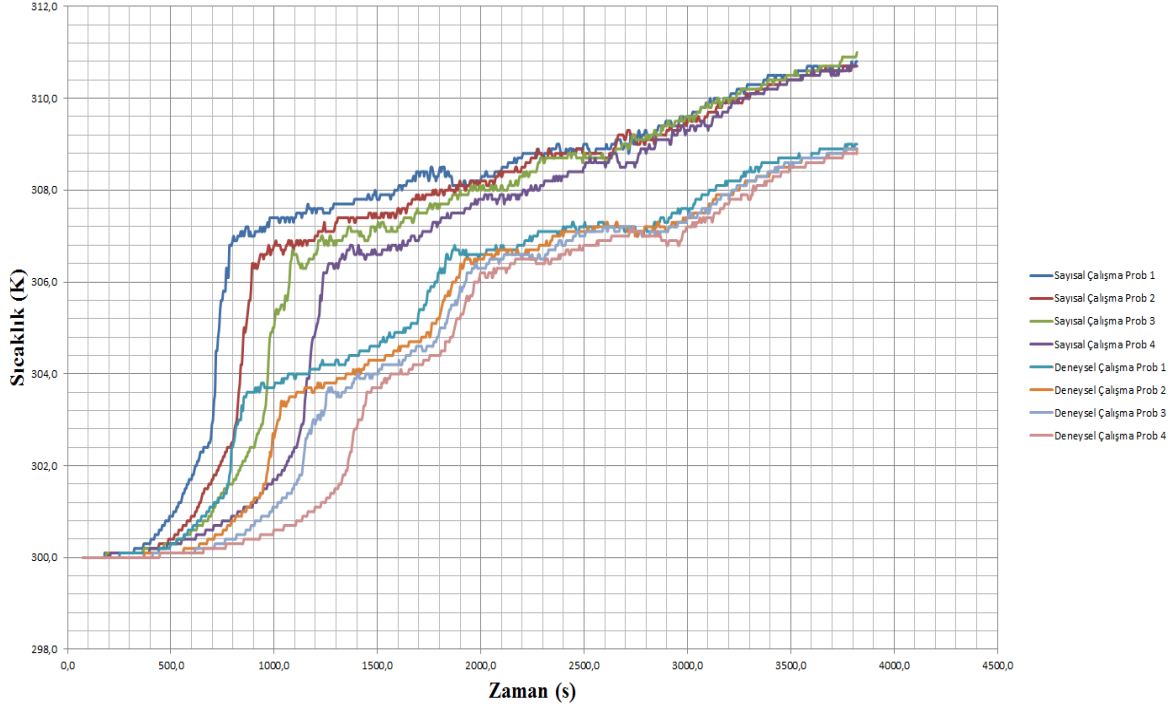
9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada özellikle atık ısı enerjisinden faydalanmak üzere kullanılan ısı değiştiricilerinde FDM kullanılarak ısı depolanmıştır. Ayrıca yapılan deneysel çalışma ANSYS FLUENT programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözülmüş ve deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 9.1’de ANSYS FLUENT’te problemlerin FDM üzerindeki konumları gösterilmiştir. Bu şekildeki modelde kırmızı noktalar problemlerin konumu, kırmızı yüzey akışkanın girişi, yeşil yüzey akışkanın çıkışı, gri renkteki hacim ısı değiştiricinin ön kısmı ve aynası, mavi renkteki hacim ise FDM’dir. Deneydeki ısı değiştiricinin gövde kısmındaki FDM içine yerleştirilen problemlardan alınan veriler (Şekil 8.2) ile FLUENT’te yapılan analizde yaklaşık olarak aynı yerlerdeki problemlardan (Şekil 9.1) alınan veriler aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir.



Şekil 9.1 Model üzerindeki problemlerin konumu

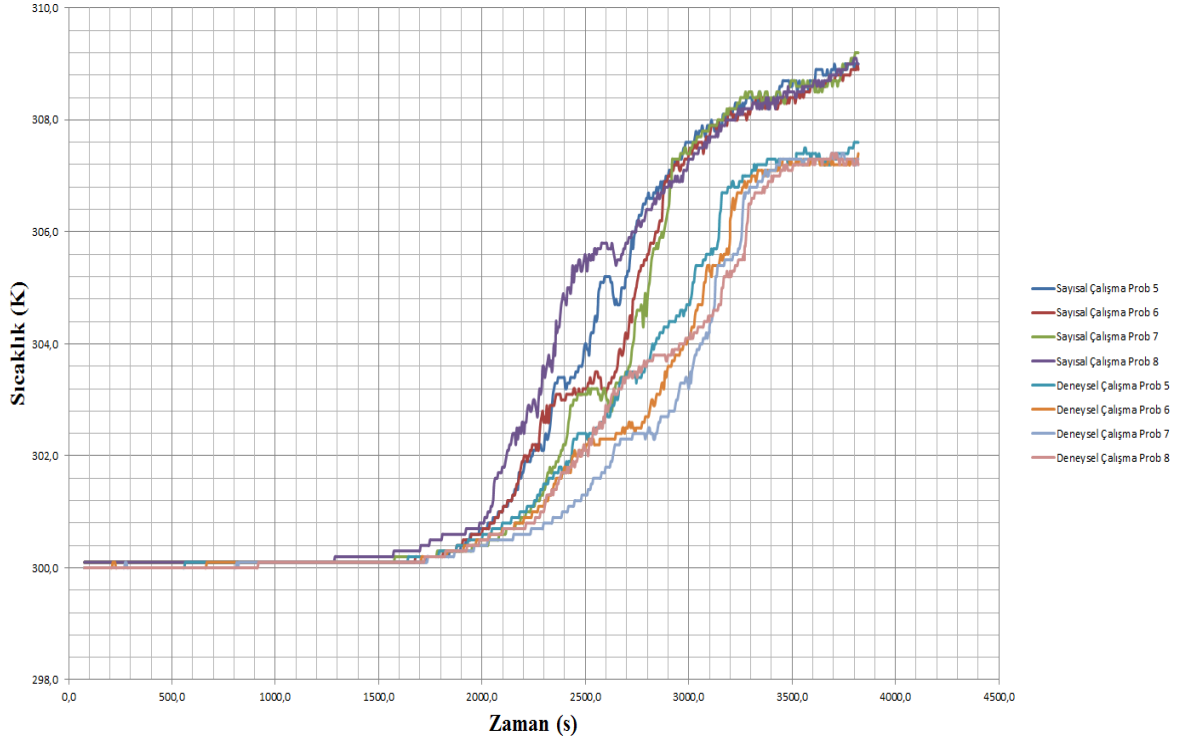
1, 2, 3 ve 4 nolu problemlerin hem deneysel hem de sayısal çalışmadaki grafikleri Şekil 9.2’de gösterilmiştir.



Şekil 9.2 1, 2, 3 ve 4 nolu problemlerin deneysel ve sayısal çalışmadaki sıcaklıklarının zamana göre değişim grafiği

Bu grafikte, deneysel ile sayısal çalışmadan elde edilen sıcaklık değerlerinde zaman kayması görülmektedir. Seçilen bazı zamanlarda iki çalışma arasında yaklaşık 3-4 Kelvin bazı zamanlarda ise yaklaşık 1 Kelvin sıcaklık farkı olduğu görülmektedir. İki çalışma arasındaki zaman kayması ve sıcaklık farklılıklarının, deneysel çalışmada ısı değiştirici mükemmel bir şekilde yalıtılmadığından ve yapılan bazı kabullerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. FDM’nin erime sıcaklığı aralığının 29-31 °C (302-304 K) olduğu kabul edildiğinden Şekil 9.2’de 302-304 K sıcaklık aralığı FDM’nin erime bölgesidir. 700 saniye ile 1200 saniye arasında 1, 2, 3 ve 4 nolu problemlerin sıcaklıklarının hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. 304 K sıcaklığından sonra FDM tamamen erimiş olduğundan, sıcaklığının zamana göre daha yavaş bir şekilde arttığı görülmektedir. Bunun nedeni FDM’nin katı haldeki ısı iletim katsayısının sıvı haldekine göre yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca 1, 2, 3 ve 4 nolu problemlerin bulundukları konumlar, FDM’nin ilk erimeye başladıkları bölge olduğu için sıcaklıklarının diğer problemlere göre daha düzenli bir şekilde arttığı görülmektedir.

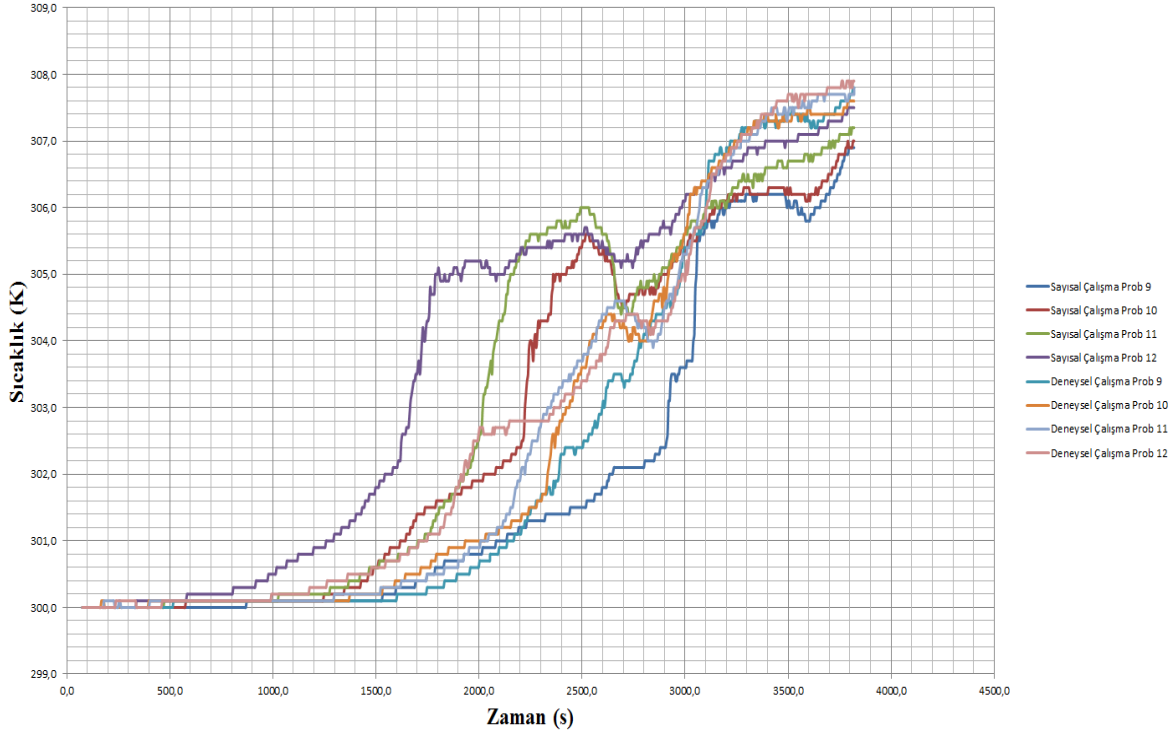
5, 6, 7 ve 8 nolu problemlerin hem deneysel hem de sayısal çalışmadaki grafikleri Şekil 9.3'te gösterilmiştir.



Şekil 9.3 5, 6, 7 ve 8 nolu problemlerin deneysel ve sayısal çalışmadaki sıcaklıklarının zamana göre değişim grafiği

Şekil 9.3'te deneysel ile sayısal çalışma arasında yine zaman kayması ve sıcaklık farkı görülmektedir. 5, 6, 7 ve 8 nolu problemler, FDM'nin tam orta bölgesinde yer aldığı için 1, 2, 3 ve 4 nolu problemlere göre sıcaklıklarının daha geç bir zamanda arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, ısı değiştiricisine gönderilen sıcak akışkanın sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 nolu problemlerin sıcaklığını arttırması daha sonra sırasıyla 12, 11, 10 ve 9 nolu problemlerin sıcaklığını arttırmasıdır. 5, 6, 7 ve 8 nolu problemler orta bölgede olduğu için ısının taşınım yoluyla yukarı doğru yönelmesi ile daha geç bir sürede sıcaklığının arttığı Şekil 8.10'da görülmektedir. Örneğin; sayısal çalışmadaki Şekil 9.2'de 1 nolu problem, 600. saniyedeki sıcaklıkta FDM'nin erimeye başladığı görülmektedir. Şekil 9.3'te 5 nolu problem ise 2220. saniyedeki sıcaklıkta FDM'nin erimeye başladığı görülmektedir. Buna benzer karşılaştırmalar gerek sayısal gerekse deneysel çalışma için yapılabilir.

9, 10, 11 ve 12 nolu problemlerin hem deneysel hem de sayısal çalışmadaki grafikleri Şekil 9.4'te gösterilmiştir.



Şekil 9.4 9, 10, 11 ve 12 nolu problemlerin deneysel ve sayısal çalışmadaki sıcaklıklarının zamana göre değişim grafiği

Şekil 9.4'teki grafikte, sayısal çalışma ile deneysel çalışma arasında 10, 11 ve 12 nolu problemler arasında zaman kayması görülmektedir. Bu zaman kayması diğer 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 nolu problemlerde de olduğu gibi sayısal çalışmada FDM'nin daha erken eridiği yönündedir. Fakat 9 nolu problemdeki zaman kayması, FDM'nin deneysel çalışmada daha erken eridiği görülmüştür. Bunun nedeninin, gönderilen akışkanın ısı değiştiricisine giriş yaptıktan sonra u borulardan dönerek terk ederken FDM'nin alt bölgesini düzensiz bir şekilde sıcaklığının değişmesine neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yaklaşık 2800. saniye ile 3100. saniye arasında 9, 10, 11 ve 12 problemlerin deneysel çalışmadaki sıcaklıklarının sayısal çalışmadakinden daha yüksek sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni de FDM'nin alt bölgesinin düzensiz bir şekilde sıcaklığının arttığı düşünülmektedir.

Sayısal çalışmada 60. dakika ile 70. dakika arasında FDM'nin erime yüzdesi yaklaşık %3 artmıştır. Başlangıçta hızlı bir şekilde eriyen FDM, belli bir zaman sonra tamamının erimesi için daha fazla süre geçmesi gerekmektedir. Bu süre için gerekli hesaplama zamanı tahmini olarak 30 gün süreceği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla simetri düzlemine yerleştirilen problemlerin oldukları yerlerde FDM tamamen eridiği için FDM'nin tamamının erimesi için gerekli hesaplama zamanı bazı teknik sorunlar nedeniyle yapılmamıştır. Şekil 8.4'te FDM'nin en son zamandaki erime oranı gösterilmiştir.

Her bir problemin ortalama hata payı hesaplanmış ve problemlerin hata paylarının ortalaması yaklaşık % 4 olarak bulunmuştur. Yapılan sayısal ve deneysel çalışmadan elde edilen bilgilere ve literatürdeki yapılan diğer FDM çalışmalara dayanılarak şu önerilerde bulunabilir;

- FDM'nin daha hızlı erimesi için akışkanın debisinin artırılması yerine akışkanın sıcaklığının artırılması FDM'yi daha hızlı bir şekilde eritebileceği gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmada, ısıнын yukarı doğru taşınımından dolayı, gönderilen sıcak akışkanın üst boru yerine alt borudan gönderilmesi durumunda FDM'nin daha hızlı bir şekilde eriyeceği sonucuna varılabilmektedir.
- FDM'lerin ısı iletim katsayıları oldukça düşük olduğundan FDM içinde ısı taşınımını engellemek için akışkanın geçtiği boruların etrafına uygun kanat profilleri yerleştirilerek FDM'nin daha hızlı bir şekilde eriyeceği düşünülmektedir.
- Isı değiştiricisinde kullanılan boruların yerleştirilme düzeni değiştirilerek veya daha fazla borular eklenerek FDM'nin daha hızlı bir şekilde eritebileceği tahmin edilmektedir.
- Isı depolamak için kullanılacak FDM titizlikle seçilmeli ve FDM'nin erime sıcaklığına ve FDM'nin ısı yalıtımına dikkat edilmelidir. Çünkü yapılan sayısal çalışmada model adyabatik olarak kabul edilmesine rağmen FDM'nin merkezden uzak alt bölgesinin 60. ile 70. dakikalar arasında erimemesi dikkat çekmiştir. Dolayısıyla bu etki göz ardı edilmemelidir.
- Bu çalışmada akış türü laminar olarak kabul edildiğinden, akışkanın sıcaklığı düşürülmeden türbülanslı bir akışla FDM'nin daha hızlı eriyeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Wang, X., Zeng, N., Liu, P., Liu, Z. and Liu, W.,** 2017. Numerical investigation of shell side performance of a double shell side rod baffle heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **108**, 2029-2039.
- [2] **Maakoul, A., Laknizi, A., Saadeddine, S., Abdellah, A., Meziane, M., and Metoui, M.,** 2017. Numerical design and investigation of heat transfer enhancement and performance for an annulus with continuous helical baffles in a double-pipe heat exchanger, *Energy Conversion and Management*, **133**, 76-86.
- [3] **Maakoul, A., Laknizi, A., Saadeddine, S., Metoui, M., Zaite, A., Meziane, M. and Abdellah, A.** 2016. Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole, helical and segmental baffles, *Applied Thermal Engineering*, 109, 175-185.
- [4] **Lyu, Z., Song, X., Li, G., Hu, X., Shi, Y. and Xu, Z.,** 2017. Numerical analysis of characteristics of a single U-tube downhole heat exchanger in the borehole for geothermal wells, *Energy*, **125**, 186-196.
- [5] **Ramos, J., Chong, A. and Jouhara, H.,** 2016. Experimental and numerical investigation of a cross flow air-to-water heat pipe-based heat exchanger used in waste heat recovery, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **102**, 1267-1281
- [6] **Skullong, S., Promvonge, P., Jayranaiwachira, N. and Thianpong, C.,** 2016. Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **109**, 164-177
- [7] **Lei, Y., Li, Y., Jing, S., Song, C., Lyu, Y. and Wang, F.,** 2017. Design and performance analysis of the novel shell-and-tube heat exchangers with louver baffles, *Applied Thermal Engineering*, **125**, 870-879.
- [8] **Ezra, M., Kozak, Y., Dubovsky, V. and Ziskind, G.,** 2016. Analysis and optimization of melting temperature span for a multiple-PCM latent heat thermal energy storage unit, *Applied Thermal Engineering*, **93**, 315-329.
- [9] **Álvarez, S., F. Cabeza, L., Ruiz-Pardo, A., Castell, A., and Antonio Tenorio, J.,** 2013. Building integration of PCM for natural cooling of buildings, *Applied Energy*, **109**, 514-522.
- [10] **Felinski, P. and Sekret, R.,** 2017. Effect of PCM application inside an evacuated tube collector on the thermal performance of a domestic hot water system, *Energy and Buildings*, **152**, 558-567.

- [11] **Elarga, H., Fantucci, S., Serra, V., Zecchin, R. and Benini, E.,** 2017. Experimental and numerical analyses on thermal performance of different typologies of PCMs integrated in the roof space, *Energy and Buildings*, **150**, 546-557.
- [12] **Wang, X., Yu, H., Li, L. and Zhao, M.,** 2016. Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room, *Energy Conversion and Management*, **120**, 81-89.
- [13] **Poshtiri, A. and Jafari, A.,** 2017. 24-hour cooling of a building by a PCM integrated adsorption system, *International Journal of Refrigeration*, **79**, 57-75.
- [14] **Yang, Y.K., Kang, I.S., Chung, M.H., Kim, S. and Park, J.C.,** 2017. Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon, *Building and Environment*, **122**, 411-421.
- [15] **Bakhshipour, S., Valipour, M.S. and Pahamli, Y.,** 2017. Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger, *International Journal of Refrigeration*,
- [16] **Stropnik, R. and Strith, U.,** 2016. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM, *Renewable Energy*, **97**, 671-679.
- [17] **Saffari, M., Gracia, A., Fernandez, C. and Cabeza, L.F.,** 2017. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings, *Applied Energy*, **202**, 420-434.
- [18] **Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A. and Bahrampoury, R.,** 2016. Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in PCM-filled single-pass shell and tube heat exchangers, *Renewable Energy*, **97**, 344-357.
- [19] **Eslamnezhad, H. and Rahimi, A.B.,** 2017. Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins, *Applied Thermal Engineering*, **113**, 813-821.
- [20] **Abdulateef, A., Mat, S., Sopian, K., Abdulateef, J. and Gitan, A.A.,** 2017. Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins, *Solar Energy*, **155**, 142-153.
- [21] **Al-Abidi, A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M.Y. and Mohammad, A.T.,** 2014. Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins, *Energy and Buildings*, **68**, 33-41.
- [22] **Raj, V.A.A. and Velraj, R.,** 2011. Heat transfer and pressure drop studies on a PCM-heat exchanger module for free cooling applications, *International Journal of Thermal Sciences*, **50**, 1573-1582.

- [23] **Chen, C., Zhang, H., Gao, X., Xu, T., Fang, Y. and Zhang, Z.,** 2016. Numerical and experimental investigation on latent thermal energy storage system with spiral coil tube and paraffin/expanded graphite composite PCM, *Energy Conversion and Management*, **126**, 889-897.
- [24] **Qi, D., Pu, L., Sun, F., Li, Y.,** 2016. Numerical investigation on thermal performance of ground heat exchangers using phase change materials as grout for ground source heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, **106**, 1023-1032.
- [25] **Esapour, M., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Pahanli, Y. and Bahrampoury, R.,** 2016. Phase change in multi-tube heat exchangers, *Renewable Energy*, **85**, 1017-1025.
- [26] **Allouche, Y., Varga, S., Bouden, C. and Oliveira, A.,** 2016. Validation of a CFD model for the simulation of heat transfer in a tubes-in-tank PCM storage unit, *Renewable Energy*, **89**, 371-379.
- [27] **Meng, Z. N. and Zhang, P.,** 2017. Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM, *Applied Energy*, **190**, 524-539.
- [28] **Darzi, A. A. R., Jourabian, M. and Farhadi, M.,** 2016. Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus, *Energy Conversion and Management*, **118**, 253-263.
- [29] **Sheikholeslami, M., Lohrasbi, S. and Ganji, D. D.,** 2016. Numerical analysis of discharging process acceleration in LHTESS by immersing innovative fin configuration using finite element method, *Applied Thermal Engineering*, **107**, 154-166.
- [30] **Tyagi, V.V. and Buddhi, D.,** 2008. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **92**, 891-899.
- [31] **Yıldız, C.,** 2003. İleri ısı değıştirgeçleri ders notları, Elazığ.
- [32] **Top, Y.,** 2010. Gövde borulu ısı değıştiricisi tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] **Aydın, A.,** 2014. Gövde borulu tip ısı değıştiricilerin optimizasyonu ve CFD analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [34] **Milli Eğitim Bakanlığı,** 2013. Isı değıştiriciler, Ankara.
- [35] **Karaali, R.,** 2002. Isı değıştiricilerinin bilgisayar destekli optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- [36] **Dağsöz, A. K.,** 1998. Sıcak Sulu Kalorifer Tesisatı, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.

- [37] **Balbay, A.**, 2001. Gövde borulu ısı değiştiricilerinin bilgisayar destekli tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [38] **Genceli, O.**, 1999. Isı değiştiricileri, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [39] **Bestel, Tekin S.**, 2006. Gövde boru tipi ısı değiştiricilerin bilgisayar destekli tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [40] **Beşergil, B.**, http://www.bayar.edu.tr/besergil/6_isi_degistirici_cihazlar.pdf , Isı Değiştirici Cihazlar, 17 Ekim 2017.
- [41] **Dikici, D.**, 2004. Doğal soğuk kaynaklardan yararlanan yer altı kanallarında termal enerji depolaması (KTED), *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [42] **Mazman, M.**, 2006. Gizli ısı depolaması ve uygulamaları, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [43] **Arabacıgil, B.**, 2011. Gizli ısı depolamalı güneş enerjili ısıtıcı analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [44] **Yüksel, N.**, 2003. Enerji depolama sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [45] **Takgil, F.**, 1999. Düşük sıcaklıktaki enerjinin faz değişim malzemesi kullanılarak depolanmasında erime ve katılaşma süresine etki eden parametrelerin deneysel olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [46] **Akgün, M.**, 2006. Parafınle gizli ısı depolamada depo geometrisi optimizasyonu üzerine deneysel bir alışma, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [47] **Garg, H., Mullick, S., Bhargava, A.**, 1985. Solar Thermal Energy Storage. D. Reidel publishing company. Dordrecht, Boston. 547-557.
- [48] **Garg, H.**, 1987. Advances in Solar energy Technology Volume 1. Collection and storage systems. D.Reidel Publishing company, 473-484.
- [49] **Bykbıakcı, E.**, 2006, Faz değiştirici maddelerin transformatörlerin soğutulmasında kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, İstanbul.
- [50] **Sarı, A.**, 2000. Bazı yağ asitleri ve ötektik karışımlarının enerji depolayıcı madde olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

- [51] **Özonur, (Konuklu) Y.**, 2004. Düşük sıcaklıkta termal enerji depolamasına uygun faz değiştiren maddelerin mikrokapsüllenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [52] **Dinçer, I. and Rosen, M.A.**, 2002. Thermal energy storage, Systems and applications, John Wiley & Sons. Chicheser England.
- [53] **Sharma, A. , Tyagi, V. V. , Chen, C. R. and Buddhi, D.**, 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 318–345.
- [54] **Bruno, F.**, 2005. Using Phase Change Materials (PCMs) for Space Heating and Cooling in Buildings, *EcoLibrium, Journal of Australian Institute of Refrigeration, Air conditioning and Heating*, 4(2): 26-31pp.
- [55] **Mehling, H. and Cabeza, F. L.**, 2007. Phase change materials and their basic properties, *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design*, ed: Paksoy, H. Ö. , NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry Vol. 234, Springer, The Netherlands, 257–277pp.
- [56] **Üçok, T.**, 2012. Faz değişim malzemeli panel radyatörün deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [57] **Karaipekli, A. ,** 2006. Faz değişimli enerji depolama maddelerinde ısı iletkenliğinin zenginleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- [58] **Abhat, A.**, 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage materials, *Solar Energy*, **30** (4), 313-332.
- [59] **Gök, Ö.**, 2005. Faz değiştiren maddelerin destekleyici maddelerde tutuklanması ve termal performansı, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [60] **H,e B. , Gustaffson, M. E. , Setterwall, F.**, 1999. Tetradecane and Hexadecane Binary Mixtures as Phase Change Materials (PCMs) for Cool Storage District Cooling Systems, *Energy*, **24**, 1015-1028.
- [61] **Yılmaz, S.**, 2008. Soğutma uygulamaları için faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [62] **Velraj, R. , Seeniraj, B. , Hafner, B. , Faber, C. and Schwarzer, K. ,** 1998. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*, **65**, 171–180.
- [63] **Lane, G. A.**, 1983. Solar Heat Storage, Latent Heat Materials, Vol. I. Boca Raton, Florida, CRC Press.

- [64] **Buddhi, D. And Sawhney, R. L.**, 1994. Proceeding of thermal energy storage and energy conversion, School of energy and environmental studies, Devi Ahilya University, Indore, India, February 24–25.
- [65] **Hale, D. V., Hoover, M. J. and O’neill, M. J.**, 1971. Phase Change Materials Hand Book, Report No. HREC-5183-2LMSC-HREC D225138, NASA, Marshal Space Flight Center. Alabama.
- [66] **Sharma, S. D.** , 1999. Study of thermal energy storage in phase change materials for low temperature solar applications, Ph.D. Dissertation, Devi Ahilya University, Indore, India.
- [67] **Ocak, M.E.**, <http://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/asiri-soguma-nedir> , Aşırı Soğuma Nedir? , 02 Kasım 2017.
- [68] **Gök, Ö.** , 2005. Faz değıştiren maddelerin destekleyici maddelerde tutuklanması ve termal performansı, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [69] **Özonur, Y., Mazman, M. ve Paksoy H.**, 2003. Termal enerji depolama için parafinin mikrokapsüllenmesi, Türkiye 9. Enerji Kongresi, İstanbul, 24-27 Eylül, 223-230.
- [70] **Özonur, Y., Mazman, M., Paksoy, H.Ö. ve Evliya, H.**, 2005. Microencapsulation of Coco Fatty Acid Mixture for Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, *International Journal of Energy Research*, accepted for publication.
- [71] **Sharma, S. D. and Sagara, K.**, 2005. Latent heat storage materials and systems: a review, *International Journal of Green Energy*, **2**, 1-56.
- [72] **Jradi, M., Gillott, M. and Riffat, S.**, 2013. Simulation of the transient behaviour of encapsulated organic and inorganic phase change materials for low-temperature energy storage, *Applied Thermal Engineering*, **59**, 211-222.
- [73] **Okcu, M.**, 2011. Faz değıştiren maddelerde erime ve katılaşma sürecinin sayısal olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [74] **Kenisarin, M. and Mahkamov, K.**, 2016. Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermophysical properties and costs, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **145**, 255-286.
- [75] **Yanadori, M. and Masuda, T.**, 1989. Heat transfer study on a heat storage container with a phase change material, *Solar Energy*, **42**, 27-34.
- [76] **Carlsson, B., and Wettermark, G.**, 1980. Heat-transfer properties of a heat-of-fusion store based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, *Solar Energy*, **24**, 239-247.

- [77] **Veerappan, M., Kalaiselvam, S., Iniyan, S. and Goic, R.**, 2009. Phase change characteristic study of spherical PCMs in solar energy storage, *Solar Energy*, **83**, 1245-1252.
- [78] **Hasnain, S. M.**, 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management*, **39**, 1127-1138.
- [79] **B[ilid]len, K., Takgil, F. and Kaygusuz K.**, 2008. Thermal energy storage behavior of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ during melting and solidification, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Enviromental Effects*, **30**, 775-787.
- [80] **ANSYS**, 2016. ANSYS Mesh Quality and Advanced Topics for Version 17.0.
- [81] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_orthogonal_quality.html, Orthogonal Quality, 27 Kasım 2017.
- [82] **ANSYS**, 2015. Fluent Theory Guide for Version 15.0.
- [83] **ANSYS**, 2016. Fluent Introduction Module Transient for Version 17.0.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Abdulhamit ERDOĞAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya 09.05.1988
E-posta : erdoganabdulhamit@gmail.com

Öğrenim Durumu:

Lisans : 2008-2013, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : 2013, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Termodinamik Anabilim Dalı

Mesleki Deneyim:

Makine Mühendisi : (2015-2016) Malatya Detay İnşaat Mühendislik Müteahhit Taahhüt Sanayi

Makine Mühendisi : (2016-2018) Malatya İmar Yapı Denetim Limited Şirketi