

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAZ DEĞİŞİMLİ ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTESİNİN GÜNEŞ
ENERJİLİ SICAK SU ISITMA SİSTEMİNE ENTEGRESİNİN
SAYISAL İNCELEMESİ

SÜLEYMAN ŞİŞMAN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

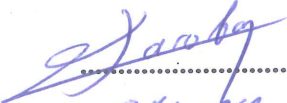
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FAZ DEĞİŞİMLİ ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTESİNİN GÜNEŞ
ENERJİLİ SICAK SU ISITMA SİSTEMİNE ENTEGRESİNİN
SAYISAL İNCELEMESİ

SÜLEYMAN ŞİŞMAN

Doç.Dr. Müslüm ARICI
Danışman, Kocaeli Üniv.
Prof.Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Doç.Dr. Ümit ÜNVER
Jüri Üyesi, Yalova Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.10.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında sabırla sorularımı cevaplayan, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, değerli hocam Doç. Dr. Müslüm ARICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yine bu çalışmada bana yardımcı olan Muhammed İkbâl ŞİŞMAN'a ve Türk-Alman Üniversitesi'nden çalışma arkadaşlarım, Dr. İsmail Doğan KÜLCÜ, Ali Osman SUIÇMEZ, Fatih ÇÖĞEN, Ferruh İLHAN, Taha Osman KÜTÜK ve Ozan SUBAŞI'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her anında desteğini yanımda hissettiğim annem, babam ve kardeşlerime, varlığıyla hayatıma anlam katan değerli eşime teşekkür eder, bu çalışmayı ilmin önemini bana kavratan, torunu olmaktan şeref duyduğum aziz dedem Süleyman ŞİŞMAN'a ithaf ederim.

Kasım – 2018

Süleyman ŞİŞMAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLOLAR DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	2
1.1. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri	6
1.1.1. Sıvılarda enerji depolama.....	6
1.1.2. Katılarda enerji depolama	7
1.1.3. Mevsimsel enerji depolama.....	7
1.1.4. Kimyasal enerji depolama.....	7
1.1.5. Faz değiştiren maddelerde enerji depolama.....	7
1.1.5.1. Organik faz değiştiren malzemeler	10
1.1.5.2. İnorganik faz değiştiren malzemeler	10
1.1.5.3. Metal ve metal alaşımlarından oluşan faz değiştiren malzemeler	11
1.2. Önceki Çalışmalar	12
2. YÖNTEM.....	20
2.1. Sayısal Modelin Doğrulanması	24
3. BULGULAR	29
3.1. Hızın Faz Değişimi Üzerine Etkisi	31
3.2. Uygun Faz Değiştiren Malzeme Seçimi İçin Faz Değiştirme Sıcaklığının Faz Değişimine Etkisi	38
3.3. Boru Çapı ve FDM Tabakası Kalınlıklarının Enerji kapasitesine etkisi.....	45
3.4. Boru Uzunluğunun Enerji Kapasitesi Üzerine Etkisi.....	50
3.5. Farklı Coğrafi oşullar için Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Karşılaştırması.....	54
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	67
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Küresel Birincil Enerji Tüketimi (1989-2014) Milyon TEP.....	4
Şekil 1.2.	Desertec projesi haritası.....	5
Şekil 1.3.	Güneş enerjisi potansiyel haritası	5
Şekil 1.4.	Gizli Isının Depolanması	8
Şekil 1.5.	Suyun duyulur ısı depolama kapasitesi ile faz değiştiren malzemenin depoladıkları enerji miktarlarının kıyası	9
Şekil 1.6.	Günün bölümlerine göre enerji talebi	9
Şekil 1.7.	Gong ve arkadaşlarının çalışmalarında inceledikleri geometri.....	13
Şekil 1.8.	Mazman ve arkadaşlarının inceledikleri geometri	15
Şekil 1.9.	Fang ve arkadaşlarının inceledikleri geometri	18
Şekil 2.1.	FDM entegreli güneş kolektörünün çalışma prensibi	22
Şekil 2.2.	Isı depolama ünitesi	22
Şekil 2.3.	Doğrulama çalışmasında incelenen geometri ve sınır şartları	24
Şekil 2.4.	Farklı çözüm ağları için sıcaklığın zamanla değişimi ($T_e=50^{\circ}\text{C}$).....	25
Şekil 2.5.	Doğrulama çalışması için sıcaklığın zamanla değişimi ($T_e=50^{\circ}\text{C}$).....	25
Şekil 2.6.	ANSYS Fluent yazılımından elde edilen sonuç ile sayısal modelin kıyası	26
Şekil 2.7.	Parabolik hız profili girilerek incelenen geometri ve sınır şartları.....	27
Şekil 2.8.	ANSYS Fluent çözümünde 10 dakikalık süre sonunda incelenen geometrideki sıcaklık dağılımı	27
Şekil 2.9.	ANSYS Fluent çözümünde 10 dakika sonundaki sıvı oranı değişimi	28
Şekil 2.10.	400 saniye sonunda boru boyunca ortalama sıcaklık değerleri kıyası	28
Şekil 3.1.	İncelenen geometri.....	29
Şekil 3.2.	Su hızının şarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi.....	32
Şekil 3.3.	Su hızının şarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ve sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi	33
Şekil 3.4.	Su hızının deşarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi.....	34
Şekil 3.5.	Su hızının deşarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ve sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi	35
Şekil 3.6.	Deşarj periyodunda 1800 saniye sonunda farklı su hızları için katılan bölge kalınlıkları a) 0,01 m/s b) 0,13 m/s	36
Şekil 3.7.	Farklı su hızlarında, suyun sıcaklığının boru uzunluğu boyunca değişimi (Şarj periyodu).....	37
Şekil 3.8.	Farklı su hızlarında, suyun sıcaklığının boru uzunluğu boyunca değişimi (Deşarj periyodu).....	37
Şekil 3.9.	Farklı hız değerlerine göre depolanan ve açığa çıkan enerji	

	miktarları	38
Şekil 3.10.	Şarj sürecinde erime sıcaklığının sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi	40
Şekil 3.11.	Şarj sürecinde erime sıcaklığının hacimsel sıvı oranı ve sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi	42
Şekil 3.12.	Deşarj sürecinde erime sıcaklığının sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi	43
Şekil 3. 13.	Deşarj sürecinde erime sıcaklığının hacimsel sıvı oranı ve sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi	44
Şekil 3.14.	Şarj periyodunda erime sıcaklıklarına göre boru boyunca su sıcaklığının değişimi	45
Şekil 3.15.	Deşarj ve şarj periyotlarında açığa çıkan enerjilerin erime sıcaklıklarına göre değişimi	45
Şekil 3.16.	FDM tabakası kalınlığının şarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi.....	47
Şekil 3.17.	FDM tabakası kalınlığının şarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi	48
Şekil 3.18.	Şarj periyodunda farklı boru çaplarına göre sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimi	49
Şekil 3.19.	720 saniye sonunda farklı boru çapları için D/d oranlarının depolanan enerji ile kıyası.....	50
Şekil 3.20.	3600 saniye sonunda farklı boru çapları için D/d oranlarının depolanan enerji ile kıyası.....	50
Şekil 3.21.	Boru uzunluğunun şarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi.....	51
Şekil 3.22.	Farklı boru uzunluklarında, şarj periyodunda suyun soğuması	52
Şekil 3.24.	2m uzunluğundaki borunun şarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi	53
Şekil 3.25.	Boru uzunluğuna göre depolanan enerji miktarları	53
Şekil 3.26.	Kocaeli ve İzmir için hava sıcaklığı ve güneş radyasyonunun zamanla değişimi [54]	54
Şekil 3.27.	Kocaeli ve İzmir için 0.5 m uzunluktaki boru için saat 10:00'da alınan sıvı oranları (D/d=1.6, Te=40°C)	55
Şekil 3.28.	Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimi (D/d=1.6, Te=40°C)	55
Şekil 3.29.	Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi (D/d=1.6, Te=40°C, L=0.5 m)	56
Şekil 3.30.	Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimi (D/d=1.6, Te=45°C)	57
Şekil 3.31.	Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi (D/d=1.6, Te=45°C, L=0.5 m)	58
Şekil 3.32.	Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimi (D/d=1.6, Te=45°C, L=1.0 m)	58

Şekil 3.33. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi ($D/d=1.6$, $T_e=45^\circ\text{C}$, $L=1.0$ m)	59
Şekil 3.34. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimi ($D/d=2.0$, $T_e=40^\circ\text{C}$)	60
Şekil 3.35. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi ($D/d=2.0$, $T_e=40^\circ\text{C}$)	60



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Farklı organik FDM'lerin termofiziksel özellikleri	10
Tablo 1.2. Farklı inorganik FDM'lerin termofiziksel özellikleri	11
Tablo 1.3. Farklı metalik FDM'lerin termofiziksel özellikleri	12
Tablo 3.1. Deşarj ve şarj periyotları için başlangıç ve sınır koşulları.....	30
Tablo 3.2. İncelenen faz değıştiren malzeme ve boru çapları.....	30



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c_p	: Özgöl ısı (J/kg K)
D	: FDM tabakası çapı (m)
D	: Boru çapı (m)
F	: Sıvı oranı
H	: Toplam özgöl entalpi (J/kg)
H	: Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
K	: Isı iletim katsayısı ($W/m K$)
L	: Boru uzunluğu (m)
L_h	: Gizli ısı özgöl entalpisi (J/kg)
L_l	: Yerel boylam
L_s	: Standart boylam
$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
Q	: Isı akısı (J/m^2)
R	: Dış boru yarıçapı (m)
r_0	: İç boru yarıçapı (m)
S	: Duyulur ısı özgöl entalpisi (J/kg)
T_e	: Erime sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_f	: Akışkan sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_i	: FDM bölgesindeki düğüm sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{inf}	: Su giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_m	: Erime Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{r0pcm}	: Boru cidar sıcaklığı ($^{\circ}C$)
μ	: Dinamik viskozite (Pa s)
P	: Yoğunluk (kg/m^3)

Kısaltmalar

FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
Nu	: Nusselt Sayısı
Pr	: Prandtl Sayısı
Re	: Reynolds Sayısı
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol

FAZ DEĞİŞİMLİ ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTESİNİN GÜNEŞ ENERJİLİ SICAK SU ISITMA SİSTEMİNE ENTEGRESİNİN SAYISAL İNCELEMESİ

ÖZET

Ev kullanımı için sıcak su ısıtma sistemlerinde güneş kolektörleri yaygın olarak kullanılır. Ancak sıcak su güneş enerjisine bağlıdır, güneş radyasyonundan faydalanılamadığı gece periyodunda da güneş enerjisinden faydalanmak için faz değiştiren malzeme kullanılır. Bu da en uygun malzeme ve tasarım koşullarının sağlanmasıyla gerçekleşir. Bu çalışmada farklı FDM erime sıcaklıkları, boru uzunlukları, boru çapları ve faz değiştiren malzeme tabaka kalınlığının, su sıcaklığı ve depolanan/açığa çıkan enerji üzerindeki etkisi incelenmiştir. Erime/katılaşma sürecini analiz etmek amacıyla sonlu farklar metodu kullanılarak bir kod geliştirilmiştir. Analizler 0,01 m/s ile 0,2 m/s arasında değişen su hızları, 40-60°C aralığında değişen FDM erime sıcaklıkları, 1-8 m aralığında değişen farklı boru uzunlukları, farklı boru çapları ve farklı faz değiştiren malzeme tabaka kalınlıkları için yapılmıştır. Sonuç olarak uygun boru uzunluğu, boru çapının, faz değişim malzemesinin sıcaklığının ve su debisinin güneş enerjili su ısıtma sistemin kurulduğu bölgeye ve çalışma şartlarına göre seçilmesi gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama, Erime, Faz Değişimi, Katılaşma, Su Isıtma Sistemi.

NUMERICAL INVESTIGATION OF SOLAR HOT WATER HEATING SYSTEM WITH PHASE-CHANGED ENERGY STORAGE UNIT

ABSTRACT

Solar collectors are widely used in domestic hot water heating systems. However, the availability of hot water strongly depends on the availability of solar energy. Domestic hot water system uses phase change material to utilize solar energy for long term benefits and this way solar energy can be used during the night period also. Thus it is necessary to determine appropriate material and design conditions. A code based on the finite difference method is developed to analyze the melting solidification processes. The effect of different PCM melting temperatures, pipe lengths, pipe diameters, and PCM layer thickness on the water temperature and stored/released energy is investigated. The analyses were carried out with water velocities ranging from 0.01 m/s to 0.2 m/s, PCM melting temperatures varying from 40°C to 60°C, different pipe lengths in the range of 1-8 m, different pipe diameters, and different PCM layer thicknesses. As a result, it was concluded that the appropriate pipe length, pipe diameter, the PCM melting temperature of the material that can be used, and the mass flow rate of water must be selected depending on the climate region and working conditions of the solar hot water heating system.

Keywords: Storing Energy, Melting, Phase Change, Solidification, Hot Water System.

GİRİŞ

Enerji canlılığın devam edebilmesi için temel gereksinimdir. Enerji elde edebilme yolları ise kısıtlıdır. Geleneksel enerji kaynaklarının en temel özelliği, yeni rezervlerin bulunması yoluyla miktarları arttırılsa bile, tükenir kaynaklar olmalarıdır [1]. Nüfus artışı, enerji talebindeki artış, enerji arz güvenliği ile ilgili endişeler ve geleneksel enerji kaynaklarının sebep olduğu iklim değişikliği gibi faktörler dünya genelinde yenilenebilir enerji teknolojileri için yeni ve elverişli bir dönem başlatmıştır [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi, geleneksel enerji kaynaklarının yerini alacak en ümit verici alternatif olarak kabul edilmektedir [3].

Güneş enerjisinin en büyük problemi ise kesintili bir enerji kaynağı olmasıdır [3]. Günün yalnızca güneş ışınımından yararlanılabilen vakitlerinde enerji temin edilebilir. Bu durum enerji depolamayı gerekli kılmaktadır. Enerji temin zamanı ile enerji talebi arasında doğabilecek fark enerjinin depolanması ile giderilebilir [4].

Birçok ısı enerjisi depolama yöntemi mevcuttur. En yaygını ise, izole edilmiş tank içerisinde sıvının muhafaza edilmesidir [3,5,6]. Sıvının sıcaklığının değişimi yoluyla enerjisinin değişmesi ve ısı depolanması, duyulur ısı depolanması olarak tanımlanır. Alternatif olarak, faz değiştiren malzemeler (FDM) ile malzemenin faz değiştirirken depoladığı ısıyı kullanarak ısı enerjisi depolanması son yıllarda daha popüler olmuştur [7]. Özellikle ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su ısıtma sistemlerinde faz değiştiren malzeme entegresi avantaj sağlamaktadır [8].

Bu çalışmada ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su ısıtma sisteminin faz değiştiren malzeme ile entegresi sayısal olarak analiz edilmiştir. Uygun faz değiştiren malzeme kalınlığı, uygun boru çapı ve uzunluğu, seçilebilecek su hızı ve faz değiştiren malzeme seçiminde yardımcı olacak uygun erime noktasının belirlenmesi incelenen parametrelerdir. Bu amaçla, 40-60°C aralığında farklı erime sıcaklıkları, 0,01-0,2 m/s aralığında su hızları, 1-8 m aralığında boru uzunlukları, 7 farklı boru çapı ve 8 farklı faz değiştiren malzeme tabaka kalınlığı üzerinden sayısal analizler yapılmıştır. Bu şekilde sistemi kurmadan önce karar verme aşamasında en yüksek performansı

verebilecek doğru tasarım parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre İzmir ve Kocaeli illeri için anlık güneş radyasyonu, rüzgâr hızı ve ortam sıcaklığı verileri dikkate alınarak incelemeler yapılmıştır. Her iki il için tercih edilebilecek erime sıcaklıklarının farklı olduğu bu yüzden farklı faz değiştiren malzemenin seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak sistemi kurmadan önce sayısal inceleme yapmak ve uygun parametrelerin belirlenmesi, yüksek performans alabilmek için gereklidir.



1. GENEL BİLGİLER

Enerji, ısı, mekanik, kinetik, potansiyel, elektrik, manyetik, kimyasal, nükleer gibi değişik formlarda olabilir. Tüm enerji formlarının toplamı, sistemin toplam enerjisini oluşturur. Dünyanın enerji kaynakları geleneksel olarak kömür, petrol, doğalgaz, nükleer enerji olarak sıralanabilir. Geleneksel enerji kaynakları hem sınırlı olmaları hem de çevresel etkileri sebebiyle insanlığı alternatif aramaya itmiştir. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı oluşan ilgi, geleneksel enerji kaynaklarından kurtulma arayışının sonucudur [1,9].

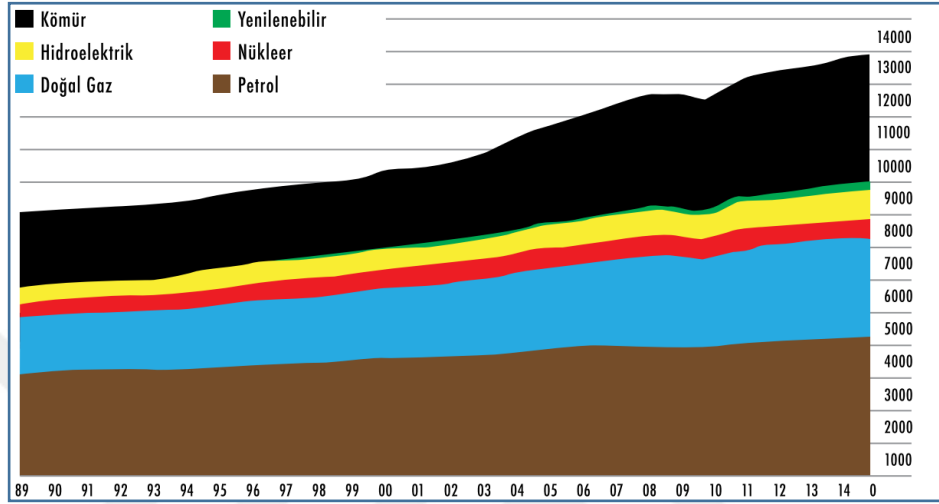
Geleneksel enerji kaynakları yıllarca sınırsız olarak varsayılmış ve tüketimleri de o nispetle umursanmaz olmuş ve hala daha sıkıntısı çekilen çevresel etkileri doğurmuştur. Son yüzyıl içerisindeki çevre kirliliği, küresel ısınma ve enerji krizleri yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çalışmayı zorunlu kılmaktadır [6,9,10].

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan gelen enerji olarak tanımlanır [6]. Bu kaynaklar, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, su gücü, okyanus dalgaları, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerjidir.

Yenilenebilir enerji teknolojisi temelde güneşten gelen enerjiyi kullanır [11]. Ya doğrudan güneş radyasyonunu kullanır ya da güneşin oluşmasında dolaylı olarak etkisi olan kaynakları kullanır. Örnek vermek gerekirse, su gücünün oluşmasını sağlayan su döngüsü, güneş sayesinde oluşabilmektedir. Rüzgâr, basınç farkından dolayı meydana gelen hava akımıdır. Basınç farkları ise güneş ışınlarının eşit şekilde yeryüzü tarafından emilmemesi sonucunda oluşur. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinin de temel kaynağı güneştir. Biyokütle enerjisi, güneşten gelen ışık enerjisi ile fotosentez sonucu oluşur. Yerçekimi kuvvetleri (gelgitler) ve dünyanın çekirdeğinin ısısı (jeotermal) dolaylı olarak güneş kaynaklıdır [11].

Dünya’da yenilenebilir enerjinin kullanımı her yıl artmakla birlikte, diğer enerji kaynaklarına kıyasla kullanımı çok düşüktür. Yakın gelecekte yenilenebilir enerjinin birincil enerji tüketimindeki oranının fosil yakıtlarla eş oranda olacağını ifade eden

görüşler olsa da, günümüz tüketim oranları bu beklentinin çok altındadır. Şekil 1.1’de nükleer enerji dışında tüm enerji kaynaklarının kullanımındaki artış gösterilmiştir. Dünya’da birincil enerji tüketiminin seyrine bakıldığında, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının payında artış görülmekle beraber 2014 yılında toplam birincil enerji tüketimindeki payları sırasıyla %6,8 ve %2,45 olmuştur [6,12].



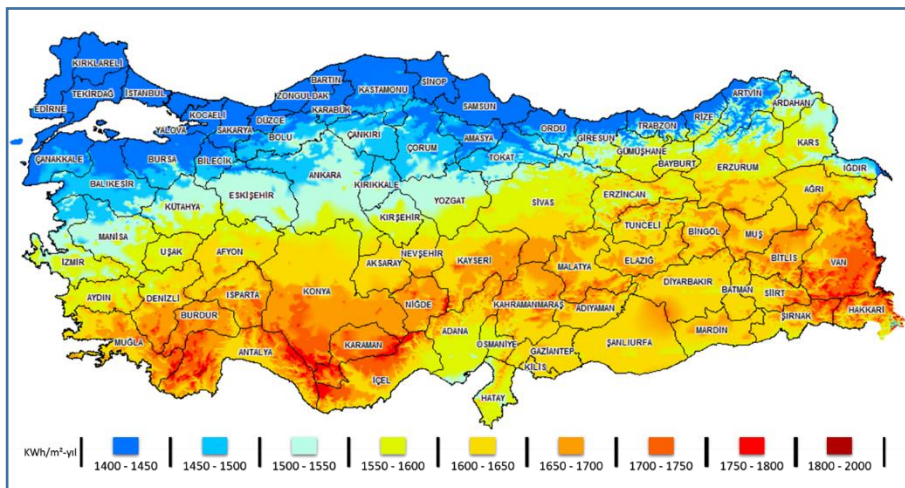
Şekil 1.1. Küresel Birincil Enerji Tüketimi (1989-2014) Milyon TEP [12]

2015 yılı verilerine göre Dünya’daki toplam enerji tüketiminin %35,3’ünü hizmet sektörü ve ev kullanımı oluşturmaktadır. Bu tüketim miktarının %75’i ise alan ve su ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır [13]. 2016 yılı verileri itibariyle elektrik talebinin %74’ünü yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayan Almanya’da güneş enerjisinin kullanımı tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında %40’lık bir pay ile ikinci sıradadır [14]. Türkiye ise enerjide dışa bağımlı bir ülkedir. Bu bağımlılık %75 civarında gerçekleşmiştir. 2012 yılı itibariyle Türkiye’de birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazındaki dağılımında %32’lik pay ile doğal gaz, %31’lik pay ile petrol ve %23’lük pay ile kömür en çok kullanılan enerji kaynakları olmuşlardır [12]. Bütün olumsuz tabloya rağmen, Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir ülkedir [2]. Türkiye, Almanya’dan %60 daha fazla güneş ışığı almaktadır ve enerji talebi her sene yaklaşık %10 artmaktadır [12]. Türkiye coğrafyası ve güneşlenme süreleri itibariyle güneş enerjisinden faydalanma imkânına sahip ülkeler arasındadır. Finans ve enerjinin lider firmalarının oluşturduğu Desertec isimli girişim grubu Şekil 1.2’deki haritadan görülebileceği üzere Türkiye için rüzgâr, su gücü, biyokütle, jeotermal ve güneş enerji santrallerini önermektedir [15].



Şekil 1.2. Desertec projesi haritası [15]

Türkiye, güneş kuşağı adı verilen ve solar radyasyondan enerji üretimi potansiyeline sahip bir bölgede olmasına rağmen, yeterli ölçüde bu imkândan faydalanamamaktadır [16]. Enerji talebindeki artışın karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanması ve ihtiyacı karşılayacak en uygun dönüşümlerin geliştirilmesi yararlı olacaktır [13]. Ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltmak, coğrafi imkânını değerlendirmek, çevreye zararı olmayan temiz bir enerji üretimi için güneş enerjisi değerlendirilmesi gereken bir enerji kaynağıdır. Şekil 1.3'deki güneş enerjisi potansiyel haritasında görüleceği gibi Türkiye'nin güneş enerjisini kullanma potansiyeli yüksektir.[2]



Şekil 1.3. Güneş enerjisi potansiyel haritası [17]

Jeotermal, hidroelektrik, güneş, rüzgâr ve biyokütle gibi kaynakları kapsayan yenilenebilir enerjinin toplam enerji tüketimindeki payı ise %7 civarındadır.

Ülkemizin Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payını en az %30'a yükseltme hedefi bulunmaktadır [2,12].

1.1. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri

Isıl enerji depolanması aralıklı yenilebilir enerji ve sabit çıkışlı nükleer enerji alanlarında çok önemli bir rol oynar [11]. Enerji arzının talep edilenden fazla olduğu durumlarda depolanan enerji, arzın talepten düşük olduğu durumlarda kullanılır. Isı enerjisi, birçok ev tipi sıcak su ısıtıcısında olduğu gibi, iyi yalıtılmış bir kap içerisine sıcak sıvı doldurularak depolanabilir. Isı enerjisinin depolanması, kullanım süresine göre veya depolama yöntemlerine göre sınıflandırılabilir.

Isı depolaması yapılırken uygun yöntem biraz da yapılacak işlem türüyle ilgilidir. Örneğin su ısıtmasında duyulur ısı veya faz değiştiren malzeme kullanılırken, hava ısıtma sisteminde çakıl taşı yatakları daha etkindir. Genellikle güneş enerjisi sıvı, katı veya faz değiştiren malzemeler ile depolanır [11,18,19]. Depolama süresini uzatmak için faz değiştiren malzeme kullanımı daha etkin bir sonuç verir [3,6]. Örneğin İspanya'da bir güneş enerjisi santralinde, enerji depolama tankına faz değiştiren malzeme entegre edilmiş, sonuç olarak bir hafta yetecek kadar enerji depolanmıştır. Bu sistem ile saatlik elektrik üretimi iki katına çıkmış ve yalnızca %5 oranında maliyet artışı gerçekleşmiştir [6].

Isıl enerji depolama yöntemleri beş bölümde incelenebilir. Bu yöntemler, sıvılarda enerji depolama, katılarda enerji depolama, mevsimsel enerji depolama, kimyasal enerji depolama ve faz değiştiren malzemelerle enerji depolamadır [19].

1.1.1. Sıvılarda enerji depolama

Sıvılarda enerji depolama yöntemi en temel haliyle, izole edilmiş bir tank içerisinde sıvının muhafazası şeklinde yapılan ısıl enerji depolama yöntemidir [3,5,6]. Temel amaç kullanım suyunun soğumasını olabildiğince önlemektir. Genellikle kullanılan alışkan sudur. Bununla beraber etilen glikol, su ve bazı alkoller de kullanılmaktadır. Sıvılarda enerji depolanması, güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde yaygın olarak

kullanılır. Bu yöntemde tank içerisinde ve suyun aktarımı esnasında ısı kaybı olmaktadır [19,20].

1.1.2. Katılarda enerji depolama

Yöntemin temelinde ısı depolama amacıyla genelde çakıl taşları kullanılır. Taşınım ile ısı geçişi temelinde hava veya benzeri bir akışkan depolama hacminden geçerken enerjisini çakıl taşlarına aktarır. Taşların birbirine temas eden yüzey alanlarının küçük olması, iletimle ısı kaybını da azaltmaktadır [19].

1.1.3. Mevsimsel enerji depolama

Yeraltında 10-20 m derinlikten sonra sıcaklık, mevsimsel değişimlerden etkilenmeyip kararlı bir hal almaktadır. Daha derinlere inildikçe sıcaklık artar. Depolama ortamı için toprak veya kaya içlerine kanallar içinde enerji depolaması yapılır. Sondajla açılan kanala uygun boru sistemi içinde ısı taşıyan akışkan dolaştırılarak depolama yapılır. Düşey kanallarda depolama, doğrudan veya ısı pompası sistemine dâhil edilerek yapılır [19].

1.1.4. Kimyasal enerji depolama

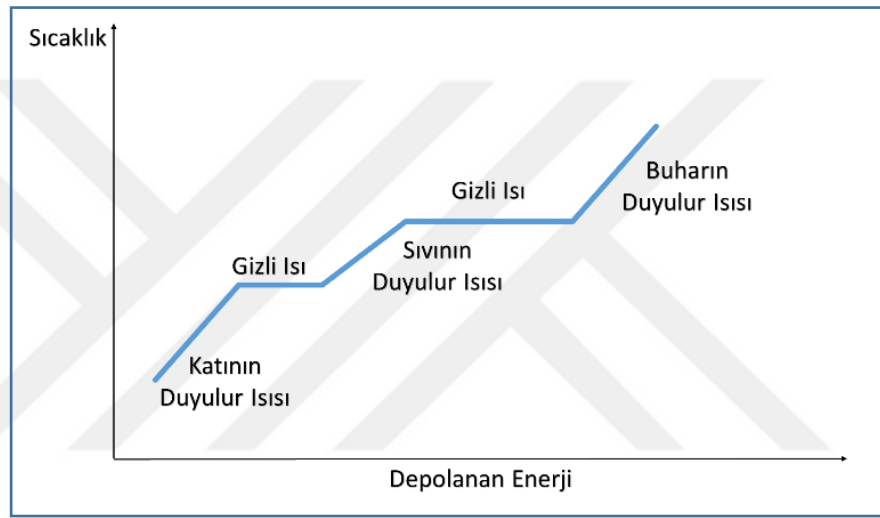
Bileşiklerin kimyasal bağlarında depolanan, kimyasal bağ enerjisi ekzotermik (ısı açığa çıkaran) reaksiyon ile açığa çıkar. Amonyak ve hidrojen gazı bu yöntemde sık kullanılan iki gazdır. Örneğin, hidrojen gazı elektroliz yoluyla sudan elde edilebilir. Gaz depolanabilir, taşınabilir ve oksijenle tepkimeye sokulur (yakılır). Yanma reaksiyonu ekzotermik (ısı açığa çıkaran) reaksiyondur. Suyun hidrojen ve oksijen olarak bileşenlerine ayrıldığı elektroliz aşamasında kimyasal bağları koparmak için verilen ısı, yanma reaksiyonu ile açığa çıkar. Yanma işlemi tıpkı doğalgazı yakmak gibi olsa da reaksiyon sonunda tek ürün su olduğu için bu yöntemde son derece temiz bir yanma gerçekleşir [3,4].

1.1.5. Faz değiştiren maddelerde enerji depolama

Malzeme katı fazdan sıvı faza geçişte çevreden ısı alırken, sıvı fazdan katı faza geçişte ise çevreye ısı verir. Faz değişim sürecinde sıcaklık sabit ya da neredeyse sabittir [20]. Şekil 1.4'te görüldüğü üzere, bir noktadaki erime süreci için sıcaklık arttıkça atom ve

moleküllerin titreşimleri artar, faz değiştirme sıcaklığında ise atomik bağlar gevşemektedir ve sıcaklık sabittir. Böylece katıdan sıvıya geçişte çevreden enerji alınır [3,20]. Katılaşma ise bu sürecin tam tersi bir süreçtir. Faz değişimi anındaki alınan/verilen bu ısıya gizli ısı denir [3].

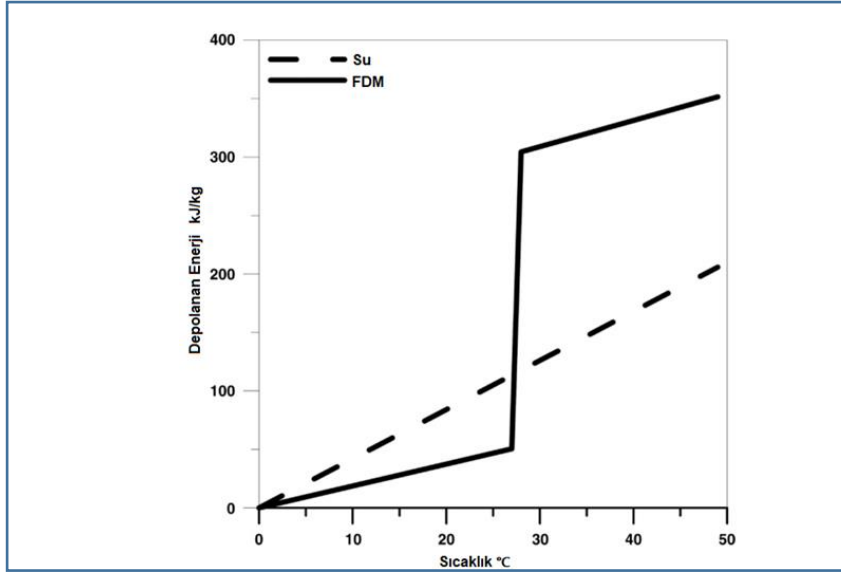
Faz değiştiren malzemeler, tuz hidratları, parafinler, yağ asitleri ve ötektik bileşikler olarak sınıflandırılabilir [20]. FDM'lerin genellikle ısı iletim katsayısı düşüktür [21]. Küçük sıcaklık aralığında, gizli ısı depolama malzemeleri, en iyi duyulur ısı depolama malzemelerini geride bırakabilir [3].



Şekil 1.4. Gizli Isının Depolanması [3]

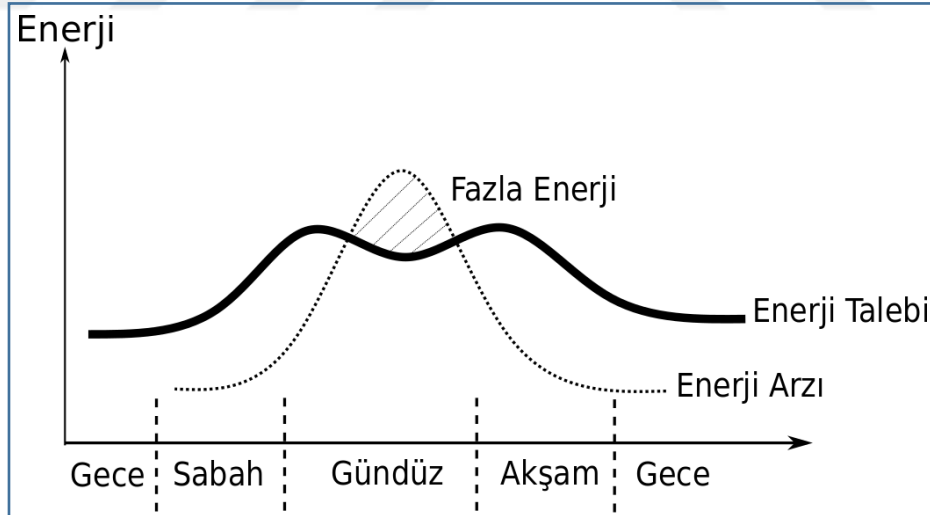
Prensip olarak faz değiştiren malzemeler herhangi bir faz geçişinde kullanılabilirler ancak katı faz ile sıvı faz arasındaki geçiş en yaygın olanıdır. Katı fazdan gaz fazına ya da sıvı fazdan gaz fazına geçişlerde çok büyük bir hacim artışı olduğundan pratik değildir [3].

Her faz değiştiren malzemenin gizli ısı değeri o malzemeye özgüdür [20]. Yalnızca duyulur ısı enerjisinin kullanılmasıyla, ısıl enerji depolama yöntemiyle duyulur ısı ve gizli ısı kullanarak enerji depolama arasındaki kıyas Şekil 1.5'te verilmiştir. Şekil 1.5'deki faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığı 28°C 'dir. Duyulur ısı depolaması ile 200 kJ/kg depolanabilecekken FDM kullanımı ile 350 kJ/kg enerji depolanabilmiştir [3].



Şekil 1.5. Suyun duyulur ısı depolama kapasitesi ile faz değıştiren malzemenin depoladıkları enerji miktarlarının kıyası [3]

Şekil 1.6'da görüldüğü üzere, güneş enerji sistemlerinde, güneş ışıınının fazla olduğı saatlerde enerji arzı günün diğeri bölümlerine göre daha fazladır. Enerji talebi ise günün, enerji arzının düşük miktarlarda olduğı bölümünde fazladır. Fazla enerji depolanabilir [3].



Şekil 1.6. Günün bölümlerine göre enerji talebi [3]

Faz değıştiren malzemeler, organik, inorganik ve sıvı metaller olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [3]. Genel olarak FDM sınıfına girebilecek malzemelerden yüksek gizli ısı kapasitesi ve yüksek özgül ısı değeri beklenir [3,6].

1.1.5.1. Organik faz değiştiren malzemeler

Organik faz değiştiren malzemeler en yaygın kullanılan faz değiştiren malzemelerdir. Alkanlar “ C_nH_{2n+2} ” (parafin) ve yağ asitleri “ $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ ” bu gruba girer. Organik faz değiştiren malzemelerin temin edilmesi kolaydır, nispeten daha ekonomiktir. Alkanlar ve yağ asitlerinin fiziksel özellikleri birbirine yakındır. Hidrokarbon yapısına göre 35°C ile 70°C arasında erime sıcaklıkları değişir. Yağ asitlerinin erime noktası parafinlerden daha düşüktür, iklimlendirme uygulamalarında tercih edilirler [3]. Tablo 1.1’de organik FDM’ler ve bunların termofiziksel özellikleri sunulmuştur.

Tablo 1.1. Farklı organik FDM’lerin termofiziksel özellikleri [3]

İsim	Tip	Gizli Isı Kapasitesi [kJ/kg]	T _e [°C]	ρ [kg/m ³]	k [W/mK]
Octadecane	Parafin	244	29	814 (k) 724 (s)	0,358 0,152
Heneicosane	Parafin	294,9	41	773	0,145
Tricosane	Parafin	302,5	48,4	777,6	0,124
Tetracosane	Parafin	207,7	51,5	773,6	0,137
IGI 1230A	Parafin (karışım)	278,2	54,4	880 (k) 770 (s)	0,25 0,135
Oleic asit	Yağ asidi	75,5	13	871	0,103
Capric asit	Yağ asidi	153	32	1004 (k) 878 (s)	0,153
Luric asit	Yağ asidi	178	44	1007 (k) 965 (s)	0,147
Palmitic asit	Yağ asidi	185	64	989 (k) 850 (s)	0,162
Stearic asit	Yağ asidi	202	69	965 (k) 848 (s)	0,172

1.1.5.2. İnorganik faz değiştiren malzemeler

İnorganik faz değiştiren malzemeler tuzlar ve tuz hidratlarıdır. Tuzlar ve tuz hidratlarının erime noktaları 10°C ile 900°C arasında çok geniş bir aralıktadır. İnorganik tuzlar genellikle yüksek sıcaklıklara çıkılan güneş enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılır.

İnorganik faz değiştiren malzemeler katılaşma esnasında aşırı soğuma (katılaşma olmadan önce sıvı malzemenin, faz değiştirme sıcaklığının altına inmesi)

eğilimindedir. Bu sebeple katılaşma noktalarında donmaya başlamazlar. Bu durum, bir sonraki termal döngü için erimiş faz değiştiren malzemenin katılaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum inorganik faz değiştiren malzemelerin termal uygulamalarda kullanımında bir dezavantajdır. Çekirdekleşmeyi sağlayan partiküller ekleyerek katılaşmada aşırı soğumanın önüne geçilebilmektedir [3]. Tablo 1.2’de inorganik FDM’ler ve bunların termofiziksel özellikleri sunulmuştur.

Tablo 1.2. Farklı inorganik FDM’lerin termofiziksel özellikleri [3]

Kimyasal Formül	İsim	Gizli Isı Kapasitesi [kJ/kg]	T _e [°C]	ρ [kg/m ³]	k [W/mK]
MgCl ₂ .6H ₂ O	Magnezyum klorid heksahidrat	168,6	117	1450 (s) 1569 (k)	0,579 0,694
CaCl ₂ .6H ₂ O	Kalsiyum klorid heksahidrat	170-192	29	1562 (s) 1802 (k)	0,561 1,008
NaSO ₄ .10H ₂ O	Glauber tuzları	251	32	1485	0,544
NaNO ₃	Sodyum nitrat	172	307	2260	0,5
KNO ₃	Potasyum nitrat	266	333	2110	0,5
MgCl ₂	Magnezyum klorat	452	714	2140	NA
NaCl	Sodyum klorür	492	802	2160	5,0
KF	Potasyum florür	452	857	2370	NA

1.1.5.3. Metal ve metal alaşımlarından oluşan faz değiştiren malzemeler

Metal ve metal alaşımları düşük gizli ısı nedeniyle faz değiştiren malzemeler arasında en az kullanılan türdür. Buna rağmen metaller bazı uygulamalarda ümit vadetmektedir. Sezyum, galyum, indiyum, kalay ve bizmut düşük sıcaklık uygulamalarında tercih edilen faz değiştiren malzemelerdir.

Yüksek sıcaklık uygulamalarında ise çinko, magnezyum, alüminyum ve alaşımları tercih edilmektedir. Tercih sebepleri genellikle yüksek ısı iletkenlikleri ve yüksek sıcaklıklardaki fiziksel ve kimyasal stabilitelerinden dolayıdır. Yüksek erime sıcaklığı olan metaller, inorganik tuzların kararlılık sorunları nedeniyle güneş santrallerinde

tercih edilmektedir [3]. Tablo 1.3'te metal ve metal alaşımlarından oluşan faz değiştiren malzemeler ve bunların termofiziksel özellikleri sunulmuştur.

Tablo 1.3. Farklı metalik FDM'lerin termofiziksel özellikleri [3]

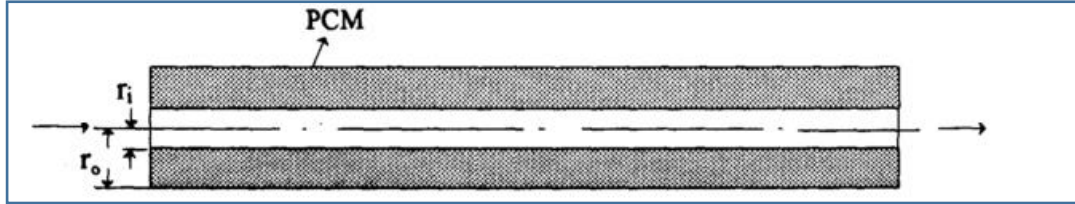
İsim	Gizli Isı Kapasitesi [kJ/kg]	T _e [°C]	ρ [kg/m ³]	C _p [kJ/kg]	K [W/mK]
Sezyum	16,4	28,65	1796	0,236	17,4
Galyum	80,1	29,8	5907	0,237	29,4
İndiyum	28,59	156,8	7030	0,23	36,4
Kalay	60,5	232	730	0,221	15,08
Bizmut	53,3	271,4	979	0,122	8,1
Çinko	112	419	7140	0,39 0,48	116
Al59- 35Mg-6Zn	310	443	2380	1,63 1,46	NA
Al54- 22Cu- 18Mg-6Zn	305	520	3140	1,51 1,13	NA
Al65- 30Cu-5Si	422	571	2730	1,3 1,2	NA
Al88-Si12	560	576	2700	1,038 1,741	160
Mg	365	648	1740	1,27 1,37	156
Al	388	661	2700	0,9 0,9	237

1.2. Önceki Çalışmalar

Faz değiştiren malzemeler üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar, faz değiştiren malzemelerin etkinliklerin ortaya konması, yeni faz değiştiren malzemelerin geliştirilmesi ve en önemlisi artan bilgisayar hızlarıyla sayısal yöntemler kullanılarak deney yapmadan etkinliklerinin incelenebilmesi sebebiyle artış göstermiştir.

Borulu ısı değiştirgecinde termal enerji depolanması amacıyla, ısı transfer akışkanının aktığı borular etrafına FDM doldurarak ısı geçişi incelenmiştir [22]. İncelenen geometri Şekil 1.7'de görülmektedir. Şarj ve deşarj durumları için ısı transfer akışkanının borudan aynı yönlü geçişiyle şarj durumu ve deşarj durumunda ısı transfer akışkanının farklı yönlü geçişleri arasındaki ısı performansları incelenmiştir. İki boyutlu olarak faz değişim malzemesindeki ısı geçişini ve bir boyutlu olarak suyun akışı sonlu elemanlar yöntemi ile ayrıştırılmış çözümler sayısal olarak yapılmıştır.

Sonuç olarak sıcak ve soğuk akışkanın ısı depolama eşanjörünün aynı ucundan gönderilmesinin, sıcak ve soğuk akışkanın depolama eşanjörünün farklı ucundan gönderilmesinden daha etkin olduğu gösterilmiştir [22].



Şekil 1.7. Gong ve arkadaşlarının çalışmalarında inceledikleri geometri

2003 yılında yapılan bir çalışmada ev kullanımı için güneş enerjili su ısıtıcısı sisteminde 20 cm çapında 120 cm uzunluğundaki silindirik su tankına, tankın üst konumunda olacak şekilde faz değiştiren malzeme entegre edilmiştir. 10 cm çapında 30 cm uzunluğunda silindirik pirinç boru içerisi faz değiştiren malzeme ile doldurulmuş olup, bu yolla termal enerji depolaması sağlanmıştır. Silindirik geometriye sahip faz değiştiren malzemenin sistem performansına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal inceleme sonlu farklar explicit metodu ile yapılmıştır. Sonuç olarak faz değiştiren malzemenin tankın üst konumuna entegrasyonu ile tank üst tabakasının ısı kaybının telafi edilmesine olanak sağladığı görülmüştür [23].

TRNSYS programı üzerinden 2006 yılında sayısal olarak yapılan çalışmada depolanan enerjiyi azaltmadan tank boyutlarını küçültmeyi hedeflenmiştir. Silindirik modül içindeki faz değiştiren malzeme tank içerisine, tankın üst tabanına yakın dikey olarak konumlandırılmış olup, faz değiştiren malzeme kütlesi 2,1 kg ve hacmi iki adet 1,5 litrelik iki modül halinde tank içerisinde kullanılmıştır. Faz değiştiren malzemelerin toplam hacmi tank hacminin %2,05'i kadar tutulup, su depolanmasında önemli bir dezavantaj oluşturmaması sağlanmıştır. Çalışma sonunda faz değiştiren malzeme modüllerini bu şekilde konumlandırmanın tank performansı açısından faydalı olduğu belirtilmiştir [24].

2007 yılında yapılan çalışmada bir su tankına daldırılan faz değişim malzemesinin performansı, entalpi tekniği kullanılarak TRNSYS yazılımı üzerinden sayısal olarak incelenmiştir. Çeşitli malzeme grupları ve geometriler (plaka, silindir, küre) denenmiştir. Yapılan incelemelerde geliştirdikleri sayısal modelin simülasyon süresini

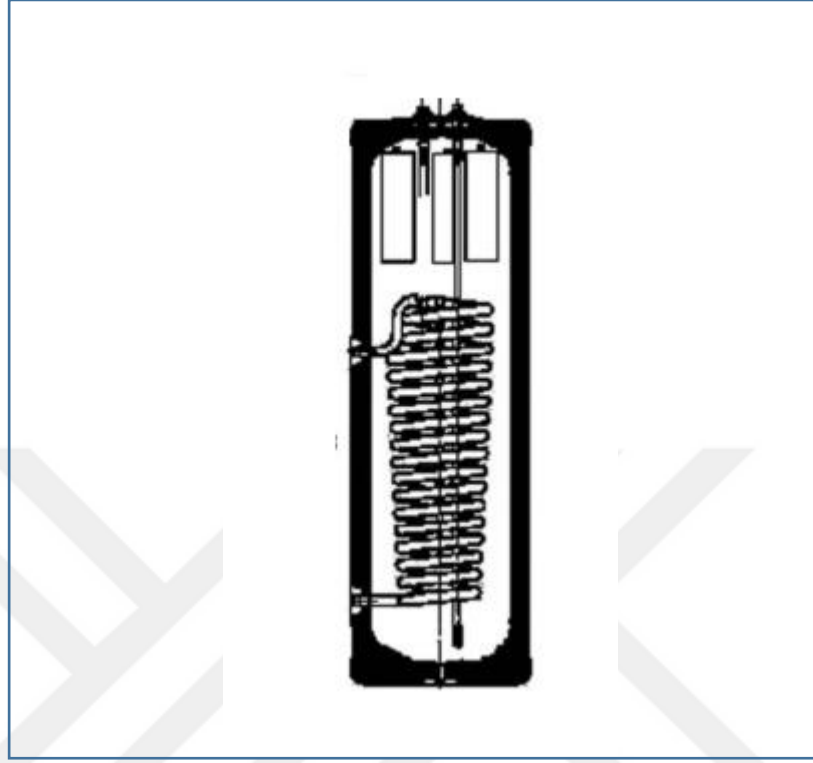
çok arttırmadan uygun sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca hesaplamalarda yüksek viskoziteli faz değiştiren malzemeler hariç, parafin gibi düşük viskoziteli malzemeler için yapılacak hesaplamalarda faz değiştiren malzemenin kendi içerisindeki konveksiyonunu dikkate almanın gerekli olduğu sonucuna varmışlardır [25].

2009 yılında yapılan çalışmada faz değiştiren malzeme kullanıldığındaki ve faz değiştiren malzeme kullanılmadığındaki durumlarda ev kullanımı için güneş enerjili su ısıtıcısı sistemleri hakkında geçmişte yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Yapılan inceleme sonucunda güneş enerjili su ısıtıcısı sistemlerinde kullanılabilecek potansiyel faz değiştiren malzemeler tanımlanmıştır. Termal enerji depolaması ile kullanılan (faz değiştiren malzemeli) tankların, geleneksel sistemlere göre daha az maliyet etkinliği ile alternatif olabileceğini belirtmişlerdir [26].

2009 yılında yapılan başka bir çalışmada çeşitli organik faz değiştirme malzemelerinin belirli oranlarda karıştırılıp yeni faz değişim malzemesi geliştirmesi ve bu malzemelerin sıcak su tankının termal performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 1.8’de görülebileceği üzere tankın üst bölümünde FDM bulunmaktadır. Farklı oranlarda FDM kullanarak geliştirilen üç organik faz değişim malzemesi güneş enerjili su ısıtıcısı sistemleri üzerinde test edilmiştir. Yapılan soğutma ve yeniden ısıtma deneyleri sonucunda, faz değişim malzemesi olmaksızın 54°C’den 48°C’ye 23,5 saatte soğuyan silindirik su tankının, faz değişim malzemesi kullanılarak 54°C’den 48°C’ye 33,5 saatte soğuduğunu gözlemlemişlerdir. Tüm incelemeler sonunda geliştirilen faz değişim malzemeleri arasında güneş enerjili su ısıtıcısı sistemlerinde en iyi performansı veren malzeme belirlenmiştir [27].

2011 yılında yapılan çalışmasında ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su ısıtıcısı sistemi için literatürde tartışılan faz değişim malzemesinin kullanımının gerçekçi hava koşulları altında faydalı olup olmadığı sorusuna cevap bulma amacıyla sayısal inceleme yapmışlardır. Silindirik bir tank içerisine içi faz değiştiren malzeme ile doldurulmuş silindirik geometride ısı enerji depolamasının gerçekçi hava koşulları altında bir boyutlu sayısal analiz sonucunda faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığının son derece önemli olduğu bu yüzden uygun faz değiştiren malzemenin uygun ortam için seçilmesi gerektiğini göstermişlerdir. Ayrıca tasarım sürecinin ilk

aşamalarında matematiksel hesaplamaların ve optimizasyonun dâhil edilmesiyle faydalı bir sonuç alabilmenin mümkün olduğu belirtilmiştir [8].



Şekil 1.8. Mazman ve arkadaşlarının inceledikleri geometri [27]

2011 yılında yapılan başka bir çalışmada 5 cm poliüretan ile yalıtılmış elektrikli ısıtıcılı su tankına pvc boru demeti içine faz değiştiren malzeme doldurarak tankın ısı depolama kapasitesini artırılmıştır. Matematiksel model şarj ve deşarj durumları için geliştirilmiş olup sonlu hacimler metodu kullanılarak sayısal inceleme yapmışlardır. Sonuç olarak suyun en çok kullanıldığı zaman dilimlerinde, faz değiştiren malzeme kullanımının elektrik maliyetini düşürdüğü görülmüştür [28].

Güneş kolektöründe uygulanacak kompozit seçimi üzerine bir çalışma grubunun yaptığı çalışmada, ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su sisteminde güneş kolektörü içine doğal grafit ve faz değiştiren malzemeden oluşan kompozit malzeme yerleştirilmiştir. Sonuç olarak, bakır esaslı geleneksel güneş emiciler yerine kullanılması amacıyla geliştirdikleri malzeme ile maksimum solar toplayıcı sıcaklığının sınırlandırılması ve depolama tankı hacminin azaltılabileceği sonucuna ulaşmışlardır [29].

Aynı çalışma grubunun 2012 yılında yaptıkları çalışma öncekinin devamı niteliğinde olup geliştirilen kompozit malzemenin ev kullanımı için güneş enerjili su ısıtma sisteminde güneş kolektöründe kullanımını ve bir yıllık performansını nümerik olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak kış mevsimindeki düşük verim sebebiyle ilk hedeflenen performansa ulaşamamış olup, kompozit FDM kullanımının genel olarak verimliliği arttırdığını bildirmişlerdir [30].

2013 yılında yapılan deneysel çalışmada et kalınlığı 1 mm olan uzunluğu 1,5 m ve dış çapı 80 mm altı adet bakır boru kullanılarak, güneş kolektörü tasarlanmış olup, kolektörün alt tabakasına faz değiştiren malzeme yerleştirilmiştir. Faz değiştiren malzeme entegresiyle güneş kolektörü termal enerji depolama ortamı oluşturarak bir depolama tankı işlevi görmüş, yapılan testler sonunda sistem için faydalı olduğu belirtilmiştir [31].

2013 yılında yapılan başka bir çalışmada yeni bir teknik olan dinamik eritme tekniğinin deneysel incelemesi yapılmıştır. Faz değişim malzemesi doldurulmuş bir tank içerisindeki su dolu borularla termal enerji depolayan bir sistemde, boru demeti arasına ön eritme tüplerinde ergitilen faz değişim malzemesinin su borusu içinden başka bir boru ile faz değiştiren malzemenin sirkülasyon pompası ile akıtılması esasına dayanan dinamik eritme işlemi deneysel olarak incelenmiştir. Isı transferini arttırıp faz değişiminin daha kısa sürede tamamlanması esasına dayanan bu sistemin etkinliği incelenmiş olup sonuç olarak, tank içi ısı geçişinin etkili bir biçimde arttığı gözlemlenmiş, faz değişim malzemesinin sürekli sirkülasyon halinde olması sebebiyle bozulma potansiyelinin önüne geçilmiş ve sistemin enerji depolama etkinliğinin arttığı gözlemlenmiştir [32].

2014 yılında yapılan deneysel çalışmada ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su ısıtma sistemine harici bir gizli ısı depolama ünitesi tasarlanmıştır ve bu şekilde sistem performansını deneysel olarak incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada yalıtımlı silindirik geometri içine faz değiştiren malzeme doldurulmuş olup ısıtıcı akışkan borularla faz değiştiren malzeme içerisinden geçirilmektedir. Tank ve ısı depolama ünitesinin deşarj ve şarj süreçlerinin eş zamanlı olduğu bu sistemde termal ısı depolandığı görülmüştür. Sonuç olarak düşük tasarım maliyetli bir sistem tercih edilmesi ve üretime geçilmeden önce sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi tavsiye edilmiştir [33].

2014 yılında yapılan başka bir çalışmada ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su ısıtma sisteminde tank içerisinde termal enerji depolama amacıyla faz değıştiren malzeme kullanımının faydalı olup olmasını araştırılmıştır. Ayrıca duyulur ısı ile termal enerji depolamanın hacmini azalttığı için faydasız olup olmadığı yönündeki sorulara cevap bulmak amacıyla ESP-r yazılımı üzerinden sayısal inceleme yapmışlardır. Tank içerisine konan içi dolu silindirik faz değışim malzemesi modülleri ile inceleme yapılmıştır. Sonuç olarak parafin ile beklenen iyileşmenin görülmeyişi belirtilmiştir. Faz değıştiren malzeme olarak tuz hidrat kullanımı ile daha iyi sonuç verdiğı belirtilmiştir [34].

2015 yılında yapılan çalışmada ev kullanımı için su ısıtıcısı sistemlerinde enerji depolama uygulamaları üzerine yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Faz değıştiren malzemenin, sıcak su sisteminin farklı bileşenlerinde kullanım durumları göstermişlerdir, ayrıca FDM ve güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin sera gazı emisyonu ve elektrik tüketimi üzerindeki etkisini gösteren araştırmalar sunulmuştur. Sonuç olarak, depolama tanklarında ve güneş kolektörlerinde faz değıştiren malzeme entegrasyonunun enerji kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı bildirilmiştir [13].

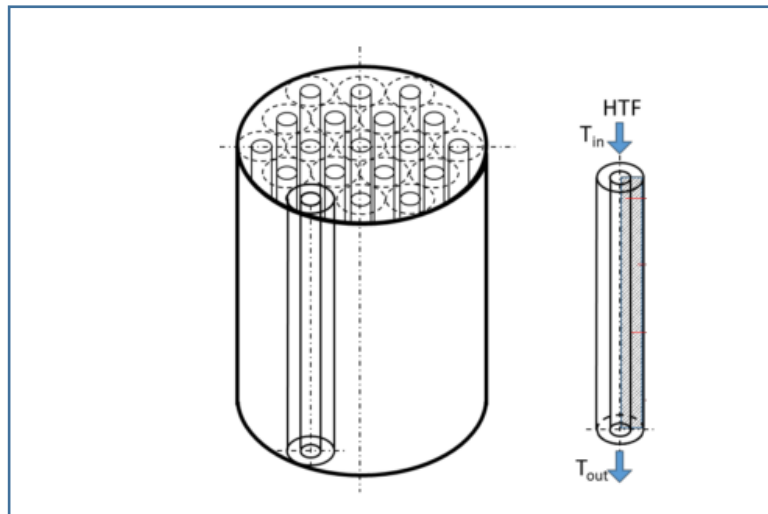
2016 yılında yapılan çalışmada iki boru arası faz değışim malzemesi doldurulmuş boru demetinden oluşan borulu ısı değıştirgecinin güneş enerji santrali ile entegrasyonu nümerik olarak incelenmiştir. Yaptıkları incelemeler sonucunda tasarım ve uygulama parametreleri, optimum boru uzunluğu ve çap oranları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda suyun soğuması iki boyutlu, faz değışimi bir boyutlu olarak incelenmiştir. Denklemler sonlu farklar metodu ile ayrıklaştırılarak sayısal çözüm yapılmıştır. Sonuç olarak optimum ısı transfer yüzey alanı belirlenmiştir. Ayrıca seçilen faz değışim malzemesine göre maliyet tahminleri yapılmıştır [35].

2017 yılında yapılan çalışmada iç içe üç boru olmak üzere en içte ısıtıcı akışkan en dışta soğutucu akışkan ve arada kalan bölgede faz değıştiren malzeme olmak üzere üç kademeli silindirik geometriyi ANSYS Fluent ile doğal taşınımı da dikkate alarak nümerik olarak incelenmiştir. Farklı başlangıç şartlarında şarj ve deşarjın birlikte olduğu durumlar için yapılan incelemeler neticesinde faz değıştiren malzemenin doğal taşınım etkisinin ihmal edilmemesi gerektiğı bildirilmiştir [36].

2017 yılında yapılan başka bir çalışmada türlerdeki ısı pompalarının faz değişim malzemeleri ile birlikte kullanıldığı sistemlerin performanslarını geliştirmek için çözümler üreten nümerik ve deneysel çalışmaları derlenmiştir. Sonuç olarak faz değişim malzemesi kullanımı ile kompresörlerin çalışma ve durma sayılarının azaldığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca faz değişim malzemeleri kullanımı ile ısı kayıplarının en aza indiğini ve klimaların yoğunlaşma ünitelerinin tankın şarjı için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Elektrik tüketiminin yoğun olmadığı dönemlerde kompresörü çalıştırıp enerji depolayarak, elektrik tüketiminin yoğun olduğu dönemlerde depolana enerjinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir [37].

2017 yılında yapılan çalışmada ev kullanımı için güneş enerjili su ısıtıcısı sistemlerinin ekonomik fizibilitelerini gösteren çalışmaları incelemişlerdir. Geri ödeme süresi fosil yakıtların fiyatı, sübvansiyon oranı gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğundan, her durum için farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, temel bileşenler, küresel senaryo öngörüler ve termoekonomik analizler üzerine yapılan önceki çalışmalar derlenmiştir. Sonuç olarak sistem performanslarının iyileştirilmesinin araştırmacıların odak noktası olmadığı belirtilmektedir. Ayrıca teknik fizibilite kadar ekonomik fizibilitenin de önemli olduğu belirtilmiştir [38].

Veri depolama merkezlerinin soğutulmasında FDM kullanımı üzerine yapılan çalışmada Şekil 1.9'da görüldüğü üzere, iki boru arasındaki hacim faz değiştiren malzeme ile doldurulmuş olup, doğal taşınım altında su ile olan ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir.



Şekil 1.9. Fang ve arkadaşlarının inceledikleri geometri [39]

Kademeli su tankının faz değişim malzemesi ile entegrasyonu, faz değişim malzemesi içine ısı transferi yüzey alanını arttıran yapılar (grafit matris vb.) ile kullanımı ve tüm bu sistemlerin enerji depolama kapasitesini karakterize etmeyi amaçlayan yeni bir çalışma yapılmıştır. İncelemeler ANSYS Fluent ile yapılmıştır. Sonuç olarak faz değiştiren malzemenin yalnızca duyulur ısı depolanması ile çalışan kademeli su tankına entegrasyonun daha efektif olduğunu belirtmişlerdir [39].



2. YÖNTEM

Zamana bağılı ısı transferi problemleri arasında erime-katılaşma genellikle faz değişimi ya da hareketli sınır problemleri olarak tanımlanır ve birçok mühendislik uygulamasında karşılaşılmaktadır. Buz oluşumu, gıdaların dondurulması, döküm esnasında metallerin katılaşması, büyük kütleli kayaların dondurulması, termal enerji depolaması, kimyasal süreçler ve plastikler, kristalleştirme, kaynak ve döküm uygulamaları ve birçok örnek sayılabilir. Hareketli katı-sıvı ara yüzeyi faz değişimi olan bölgeyi ifade eder. Bu esnada malzemenin termofiziksel özellikleri değişir ve sıcaklık sabit ya da nerdeyse sabit kalır [40,41] .

Faz değişim problemleri üzerine ilk analitik çalışmalar Lamé ve Clapeyron tarafından 1831 yılında ve Stefan tarafından 1891 yılında yapılmıştır [41]. Stefan problemi terimi, genellikle katı-sıvı faz geçişinin olduğu ısı transferi problemlerini tanımlamakta kullanılır [42]. Aynı zamanda, faz değişim problemleri hareketli sınır değer problemi olarak da adlandırılır [40].

Faz değişim problemleri idealize edilmiş şartlar altında analitik ya da yarı analitik yöntemlerle çözülebilmektedir. Örneğin yarı sonsuz silindir veya sonsuz uzunlukta bir levha için basit sınır ve başlangıç koşulları altında çözümler mevcuttur [41]. Faz değişim problemleri için kullanılan çözüm yöntemleri şunlardır:

İntegral metot: Tek boyutlu faz değişim problemlerinin yaklaşık analizi için bir yaklaşım sağlar. Von Karman'ın sınır tabaka analizlerine dayanan yaklaşık bir çözüm yoludur [41,42].

Pertürbasyon yöntemi: Katı-sıvı ara yüzeyini belirleyen diferansiyel denklemler genellikle boyutsuz hale getirilir ve seri çözüm ile açılır. Yüksek mertebeden çözümler için bu analiz çok karmaşık olmaktadır [41].

Öz değer yaklaşımı: Tek boyutlu faz değişim problemlerini çözmek için zamana bağılı sınır koşulu parametrelerini içeren ısı iletim problemlerinin çözümü ile bağlantılı

olarak geliştirilen yöntemdir. Bu yöntemin dezavantajı fiziksel olmayan sanal öz değerler verebilmesi olsa da silindirik veya küresel simetriye sahip problemleri çözmek için uygulanmaktadır [43,44].

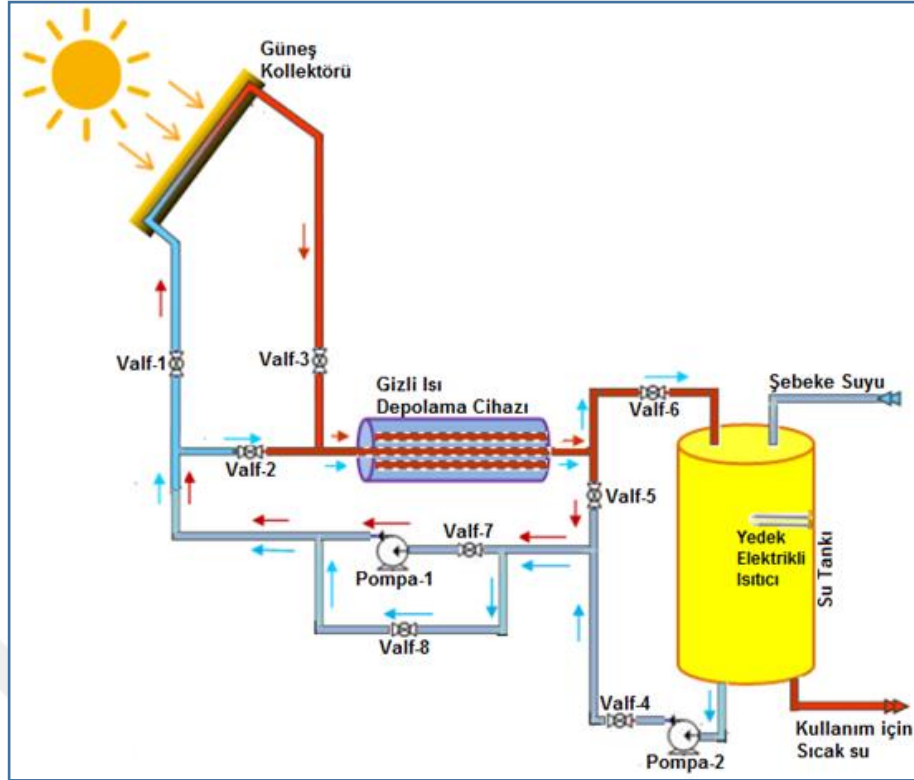
Analitik çözümler sınırlı koşullar altında yapılabildiğinden, fiziksel koşullar altında faz değişimi sayısal yöntemler kullanılarak çözülmektedir [40,41]. Gelişen teknoloji ile yüksek işlem hızlı bilgisayarların kullanılması sayısal yöntemlerin tercih edilmesine imkân sağlamıştır. Sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler metotları faz değişim problemlerini çözerken en sık kullanılan metotlardandır [22,34,41,45].

Sayısal çözüm için tercih edilebilecek metotlardan biri entalpi-porozite metodudur. Birçok kaynağa göre diğer sayısal modellerden daha iyi bir kararlılığa sahiptir [46–49]. Bu metot toplam entalpi miktarıyla ilgilenir, çözümdeki denklemler hem duyulur ısı hem de gizli ısı bileşeni içerir [50].

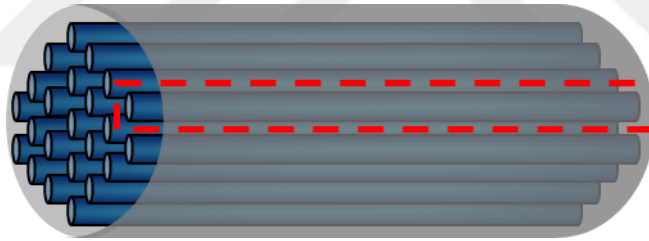
Kesintili enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin en büyük dezavantajı gece periyodunda güneş radyasyonundan faydalanılamamasıdır. Bu problemi ev kullanımında aşmak için sıcak su ısıtma sisteminde faz değiştiren malzeme kullanılabilmektedir. Bu yolla, gizli ısının depolanarak güneş radyasyonun kullanılamadığı zamanlarda, depolanan ısının kullanılmasıyla sistemin performansı artırılır.

Güneş olduğu zamanlarda güneş kolektörüne giden soğuk su, orada ısınarak önce ısı deposunu şarj eder ardından tankta toplanır. Güneş enerjisi olmadığında ise, soğuk su, gizli ısı depolama cihazından geçerek sıcaklığı artar ve bu şekilde faz değiştiren malzeme ısı enerjisini suya aktarmış olur.

Şekil 2.1’de görülebileceği üzere, incelenen sistemde mevcut olan gizli ısı depolama cihazı, silindirik bir tank ve içerisinde bakır borulardan oluşur. Tank içi faz değiştiren malzeme ile doldurulmuş olup, bakır boruların içerisinden ısı transfer akışkanı geçirilmektedir. Yapılan sayısal inceleme için gizli ısı depolama cihazı içerisindeki bakır borulardan bir tanesi alınıp çevrelediği faz değiştiren malzeme kütlesi kontrol hacmi olarak belirlenmiştir. Şekil 2.2’de kontrol hacmi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. FDM entegreli güneş kolektörünün çalışma prensibi [51]



Şekil 2.2. Isı depolama ünitesi

Matematiksel model kurulurken aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Faz değiştiren malzeme homojen ve izotropiktir.
- FDM'deki değişim radyal doğrultudadır.
- Malzemenin termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir.
- Faz değişimi esnasında sıcaklığın sabit kaldığı kabul edilmiştir.
- Eriyik FDM içinde taşınım ihmal edilmiştir.
- Tanktan çevreye olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.
- Tam gelişmiş akış kabulü yapılmıştır.

Entalpi tekniği, toplam entalpinin sabit olması temelinde geliştirilmiştir. Denklem 2.1'de ve Denklem 2.2'de verilen toplam entalpi, duyulur ısı entalpisi ve gizli ısı entalpisinin toplamıdır. " L_h " gizli ısı değeri kilogram başına malzemenin faz değişim anında ortamdan çektiği ya da ortama yaydığı ısı enerjisidir. Kütlesinin tamamı katı

fazda olan bir malzemenin sıvı oranı “f” değeri sıfırdır. Faz değişim sürecinde bu değer artar ve sıvı faza geçildiğinde ise bir olur. Bu yüzden gizli ısı entalpisi, gizli ısı değeri ve sıvı oranının çarpımı olarak ifade edilir. Denklem 2.3’deki sıvı oranının zamanla değişimi faz değişim sürecini ifade etmektedir. Gizli ısı entalpisi ve duyulur ısı entalpisi toplamı toplam entalpiye eşittir.

$$H=S+L_h f \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial t} + L_h \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$f = \begin{cases} 1 & T_i > T_m \\ f(t) & T_i = T_m \\ 0 & T_i < T_m \end{cases} \quad (2.3)$$

Faz değişiminin olmadığı durumda yönetici denklem, Denklem 2.4’deki diferansiyel denklemdir. Denklem 2.4’deki α ifadesi ısı yayılım katsayısıdır ($\alpha=k/\rho c_p$). Isı yayılım katsayısı değeri, sıvı ya da katı fazda maddenin termofiziksel özellikleri değişeceğinden, sıvı fazda ve katı fazda birbirinden farklıdır.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.4)$$

Faz değişim sürecinde ise yönetici denklem, Denklem 2.5’deki diferansiyel denklemdir.

$$\left(\frac{\rho L_h}{k} \right) \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.5)$$

Faz değişimi olduğunda sıcaklık sabit ya da hemen hemen sabit olup, sıvı oranı değişmektedir. Diferansiyel denklemler sonlu farklar metodu kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Denklemler ayrıklaştırılırken birinci dereceden terimler içerisinde; zamana bağlı terimler ileri farklar ile ayrıklaştırılmış olup, konum değişkenine bağlı terimler ise merkezi farklar ile ayrıklaştırılmıştır.

Bakır boru içinden geçen ısı transferi akışkanının sıcaklık değişimi Denklem 2.6 ile hesaplanmıştır [35]. Burada h, ısı taşınım katsayısı, T_{r0} pcm eksenel doğrultuda incelenen hücrenin gerisindeki hücre sıcaklığıdır.

$$\rho c_p \pi r_0^2 \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\dot{m} c_p \frac{\partial T_f}{\partial z} + h(T_{r0_PCM} - T_f) 2\pi r_0 \quad (2.6)$$

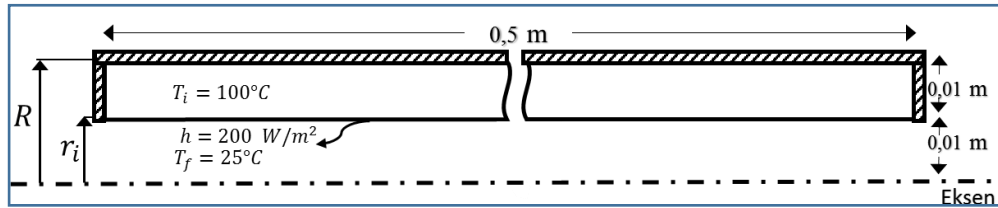
Boru içinde ısı taşınım katsayısı Denklem 2.7'deki korelasyonlar ile hesaplanmıştır [18,53].

$$Nu = \begin{cases} 3.66 & Re < 2300 \\ 0.024 Re^{0.8} Pr^{0.4} & 2300 < Re < 10000 \text{ Isınma} \\ 0.026 Re^{0.8} Pr^{0.3} & 2300 < Re < 10000 \text{ Soğuma} \end{cases} \quad (2.7)$$

Diferansiyel denklemler sonlu farklar metodu ile ayrıklaştırılarak, explicit yöntem kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür.

2.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

Tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılımın doğrulanması ANSYS Fluent programı ile 2 boyutlu olarak yapılmıştır. Doğrulama çalışması için incelenen problem sabit taşınım sınır şartı ve parabolik hız profili girilerek iki ayrı inceleme yapılmıştır. İncelenen geometri ve sınır şartları Şekil 2.3'de görülmektedir. Başlangıçta 100°C olan FDM kütlelerinin faz değiştirme sıcaklığı 50°C'dir. 25°C'de 200 W/m² K sabit ısı taşınım katsayısı olacak şekilde soğuması zamana bağlı olarak incelenmiştir. İncelemede eksenel doğrultuda z=0, radyal olarak ilk hücredeki zamana bağlı sıcaklığın değişimi geliştirilen sayısal model ile kıyaslanmıştır.

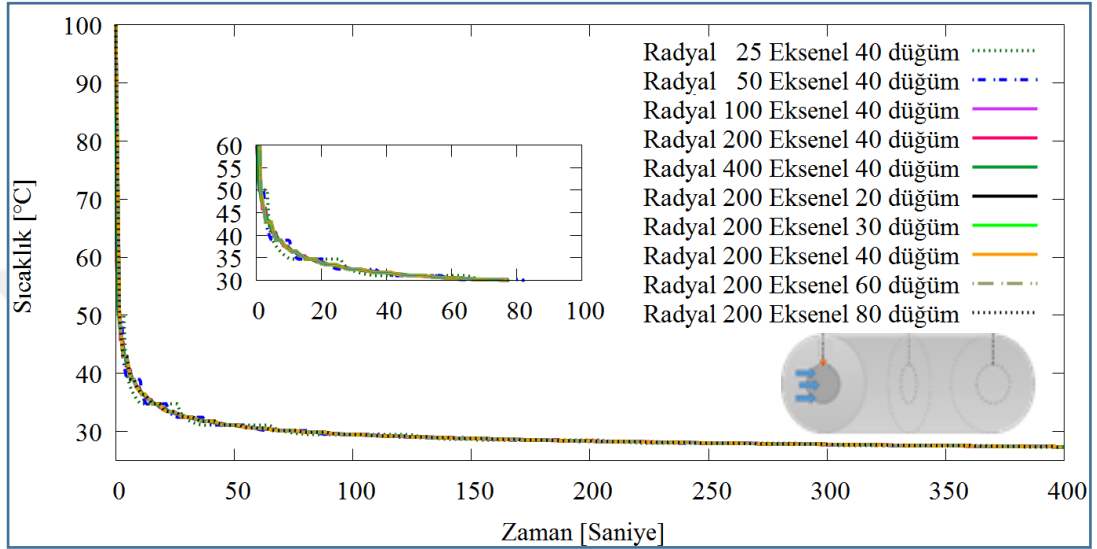


Şekil 2.3. Doğrulama çalışmasında incelenen geometri ve sınır şartları

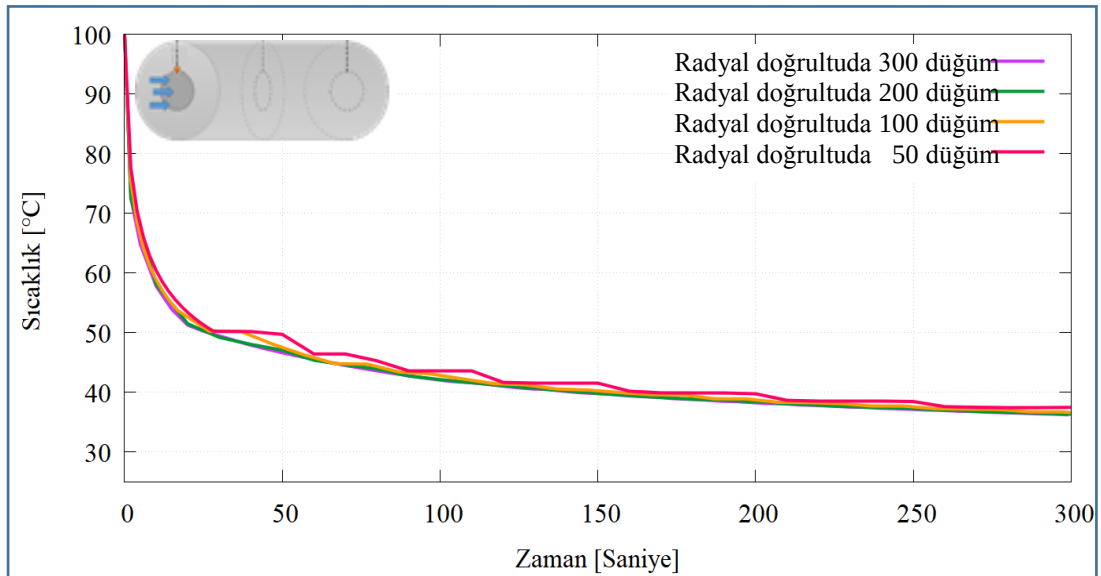
Geliştirilen yazılımdan alınan sonuçların çözüm ağından bağımsız olması için 0,01 m yarıçap değeri için radyal yönde sırasıyla 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 düğüm noktası, eksenel yönde 20, 40, 60, 80, 100 düğüm noktası olacak şekilde çözüm ağı oluşturulmuştur.

Şekil 2.4'te sunulduğu üzere, radyal yönde 200 ve eksenel yönde 40 düğüm noktasından sonra çözüm ağından bağımsız olduğu görülmüştür. ANSYS Fluent programdan alınan sonuçların çözüm ağından bağımsız olması için farklı çözüm ağı

sıklığı ile analizler yapılmıştır. 0,01 m yarıçap değeri için radyal yönde sırasıyla 50, 100, 200 ve 300 düğüm noktası olacak şekilde kare çözüm ağları oluşturulmuş olup, sonuç olarak 200 ve 300 düğüm noktasına ayrılmış çözüm ağlarından alınan sonuçların tam örtüştüğü Şekil 2.5'te görülmektedir. Bu sonuçlar göstermiştir ki 200 düğüm noktası sayısından sonra sonuçlar çözüm ağından bağımsızdır.



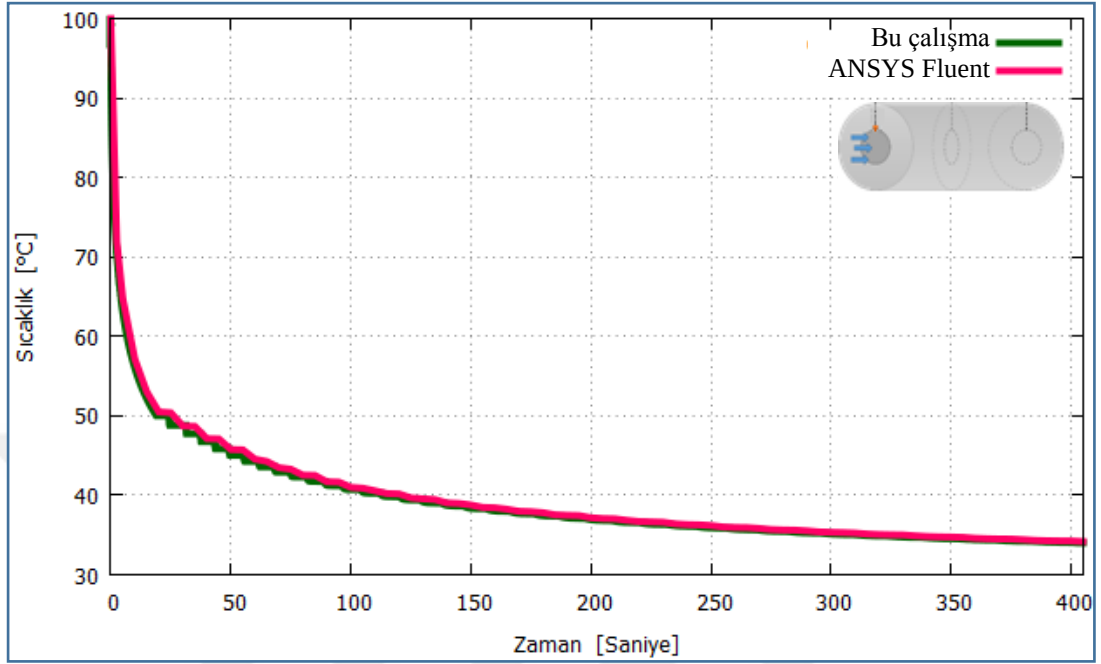
Şekil 2.4. Farklı çözüm ağları için sıcaklığın zamanla değişimi (T_e=50°C)



Şekil 2.5. Doğrulama çalışması için sıcaklığın zamanla değişimi (T_e=50°C)

İki boyutlu ANSYS Fluent çözümü ile tez kapsamında geliştirilen bir boyutlu sayısal model ile elde edilen sonuçlar Şekil 2.6'da karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere sonuçların örtüşmektedir. Çözüm süresi ANSYS Fluent ile iki gün sürerken aynı

bilgisayarda Fortran programında koşturulan 1-D modelin çözüümü birkaç dakikayı aşmamaktadır.



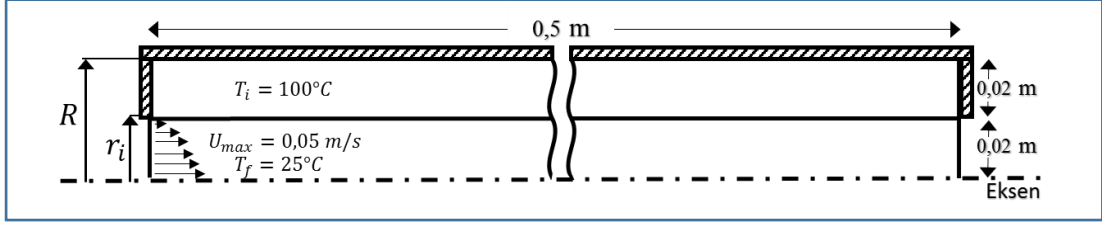
Şekil 2.6. ANSYS Fluent yazılımından elde edilen sonuç ile sayısal modelin kıyası

Tez kapsamında geliştirilen yazılımın hesapladığı su sıcaklığı, ortalama sıcaklık olduğundan, Tam gelişmiş laminar akış için parabolik hız profili belirleyip ANSYS Fluent’de ikinci bir doğrulama yapılmıştır.

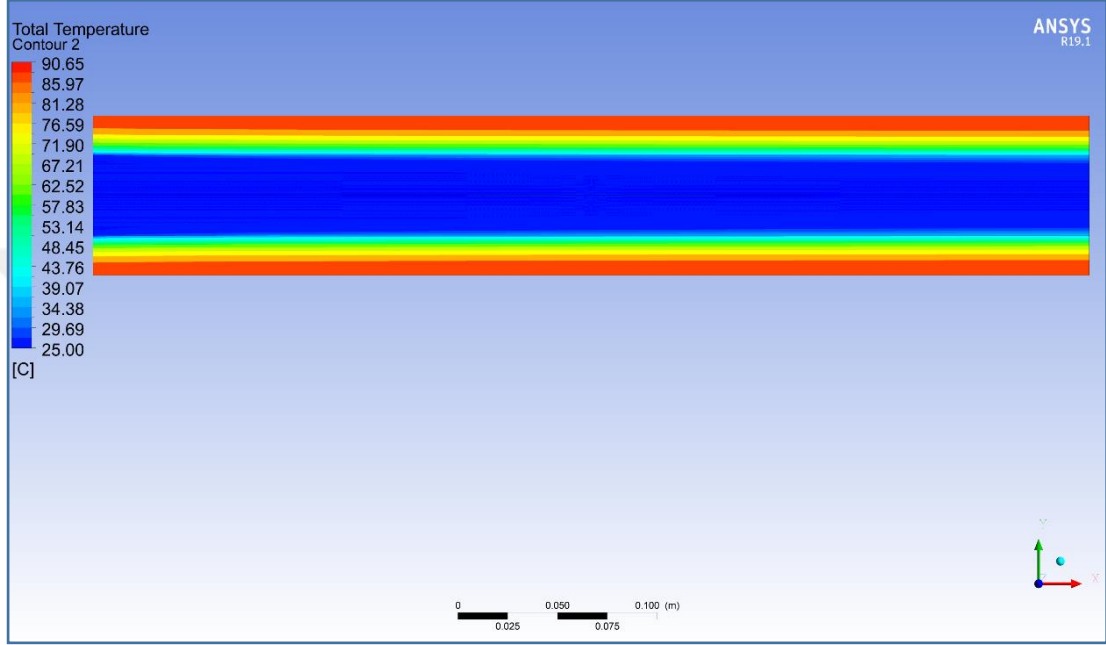
Şekil 2.7’de doğrulama için incelenen alan gösterilmiştir. Laminar akış için maksimum hız 0,05 m/s olacak şekilde, Denklem 2.8’deki fonksiyon girilmiş olup, enerji ve akış birlikte çözdürülmüştür. 10 dakikalık bir sürenin sonunda, çözüm alanındaki sıcaklık dağılımı Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

$$v(r)=v_{\max} \left(1-\frac{r^2}{0,02^2} \right) \quad (2.8)$$

Akış 0,04 m çapında bir boru içinde olmaktadır. Faz değıştiren malzeme kalınlığı 0,02 m olup, 0,5 m uzunluğundaki bir çözüm alanı incelenmiştir. Faz değıştirme sıcaklığı 50°C olup, başlangıçta faz değıştiren malzeme sıcaklığı 100°C olarak belirlenmiştir. 25°C’de gelen suyla soğutulan faz değıştiren malzemenin katılaşması incelenmiştir.



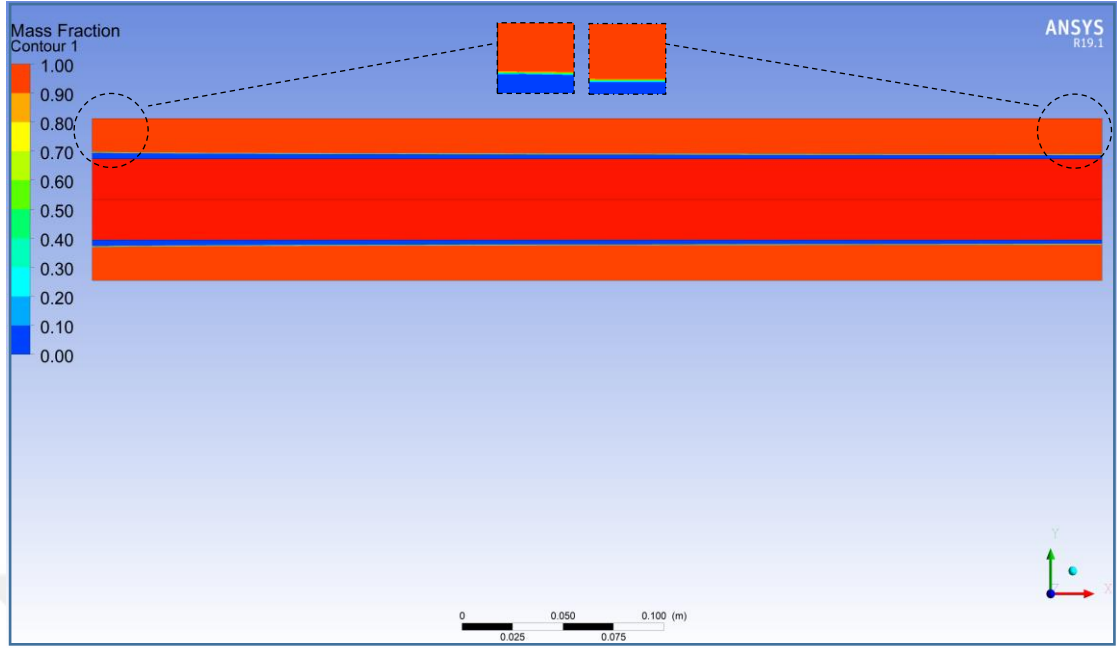
Şekil 2.7. Parabolik hız profili girilerek incelenen geometri ve sınır şartları



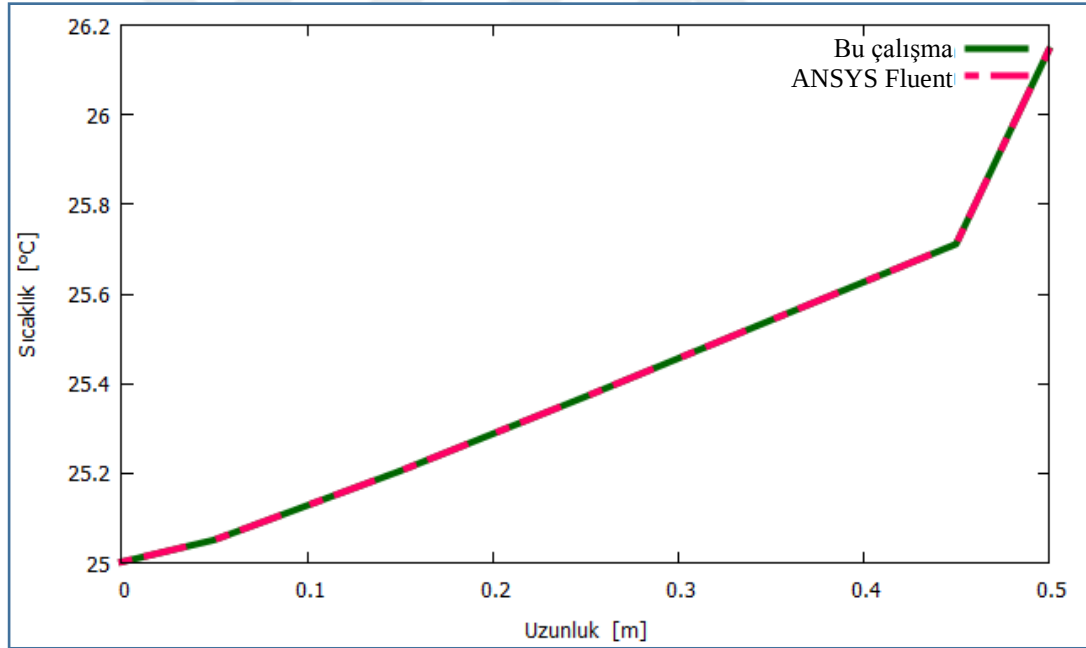
Şekil 2.8. ANSYS Fluent çözümünde 10 dakikalık süre sonunda incelenen geometrideki sıcaklık dağılımı

Sıvı oranının 10 dakikalık süre sonundaki değerleri Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Başlangıçtaki katılaşan bölge kalınlığı, borunun bitimindeki katılaşan bölge kalınlığından daha fazladır. Su borudan ısınarak geçtiği için başlangıç aşamasında sıcaklık farkı fazladır, boru çıkışına gelindiğinde ise sıcaklık farkı daha azalır. Bu yüzden katılaşan bölge kalınlığı, borunun çıkış bölgesindeki katılaşan bölge kalınlığından daha fazladır.

Tez kapsamında geliştirilen kod kullanılarak hesaplanan boru boyunca ortalama sıcaklık değeri ile ANSYS Fluent sonuçlarıyla hesaplanan boru boyunca ortalama sıcaklık değeri kıyası Şekil 2.10’da verilmiştir. 400 saniye sonundaki boru boyunca ortalama sıcaklık değerlerinin ticari yazılım ile tez kapsamında hesaplanan değerlerle son derece uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 2.9. ANSYS Fluent çözümünde 10 dakika sonundaki sıvı oranı değişimi



Şekil 2.10. 400 saniye sonunda boru boyunca ortalama sıcaklık değerleri kıyası

3. BULGULAR

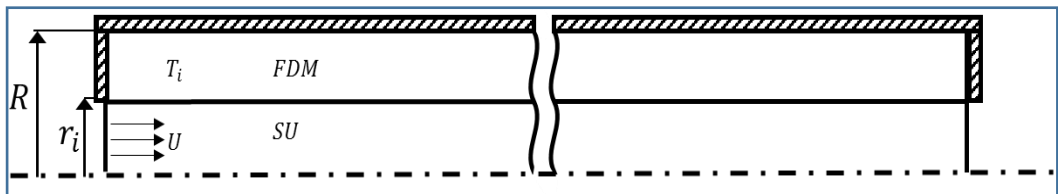
Bu çalışmada ev kullanımı için güneş enerjili sıcak su ısıtma sisteminin faz değıştiren malzeme ile entegrasi farklı tasarım ve işletme parametreleri üzerinden sayısal olarak incelenmiştir. Sistem kurulmadan önce karar verme aşamasında en uygun performansı verecek parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Faz değıştiren malzemenin su ile ısındığı şarj periyodu ve faz değıştiren malzemenin suyu ısıttığı deşarj periyodu için sayısal incelemeler yapılmıştır. Sayısal incelemelerin yapıldığı geometri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Faz değıştiren malzemenin iç kısmı taşınım sınır şartı, dış kısmında ise simetri sınır şartı kullanılmıştır. Şarj ve deşarj periyotları için başlangıç ve sınır koşulları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Güneş enerjisinden gizli ısı depolama cihazına gelen su hızı, 0,01 m/s ile 0,2 m/s aralığına kadar 0,01 artışla 20 farklı su hızı değeri için inceleme yapılmıştır. Bu sayede seçilebilecek en uygun su hızı aralığı belirlenmiştir. Ayrıca erime sıcaklığı tayini, faz değıştiren malzeme seçiminde önemli bir parametre olduğundan 40°C ile 60°C arasında 1°C artışla 21 farklı durum incelenmiş olup uygun erime sıcaklığı tayin edilmiştir. Bu yolla, faz değıştiren malzeme seçimi yapılabilmektedir. Diğer incelemeler ise boyut parametreleriyle alakalıdır.

Standart çap değerlerinde 7 farklı bakır boru için 8 farklı oranda faz değıştiren malzeme kalınlıkları üzerinden 56 farklı durum sayısal olarak incelenmiştir. Boru ve faz değıştiren malzeme çapları ile yarıçap oranları Tablo 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İncelenen geometri

Tablo 3.1. Deşarj ve şarj periyotları için başlangıç ve sınır koşulları

DEŞARJ		ŞARJ	
Başlangıç Koşulları			
FDM sıcaklığı	65 °C	FDM sıcaklığı	35 °C
Su sıcaklığı	25°C	Su sıcaklığı	65°C
FDM faz değişim sıcaklığı	50°C	FDM faz değişim sıcaklığı	50°C
Sınır Koşulları			
r=R	Simetri sınır şartı $\partial T/\partial r=0$	r=R	Simetri sınır şartı $\partial T/\partial r=0$
r=r _i	Taşınım sınır şartı -k $\partial T/\partial r =h(T_f-T_{ri})$	r=r _i	Taşınım sınır şartı -k $\partial T/\partial r =h(T_f-T_{ri})$
Su giriş sıcaklığı	T _f =25°C	Su giriş sıcaklığı	T _f =65°C

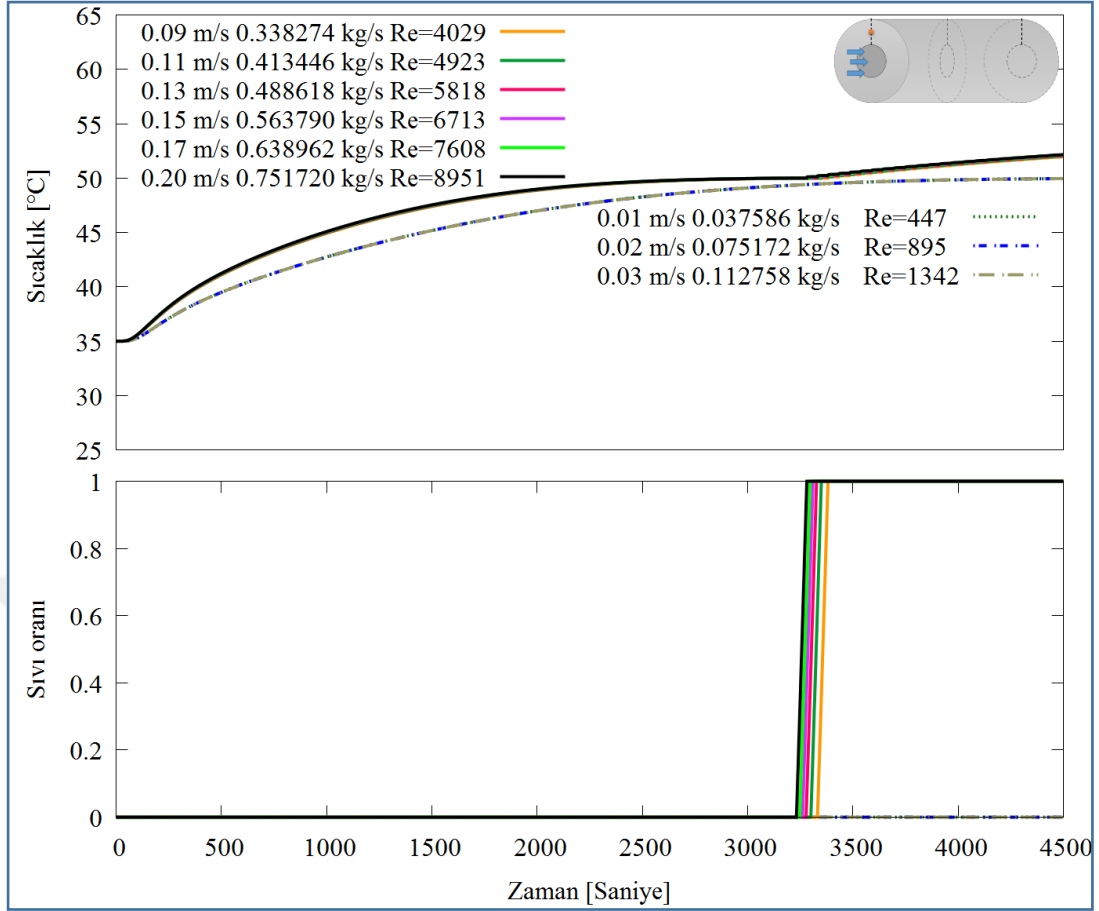
Tablo 3.2. İncelenen faz değıştiren malzeme ve boru çapları

D/d Oranı	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]
1,4	0,00476	0,006664	0,00952	0,013328	0,00635	0,00889	0,00794	0,011116
1,6	0,00476	0,007616	0,00952	0,015232	0,00635	0,01016	0,00794	0,012704
1,8	0,00476	0,008568	0,00952	0,017136	0,00635	0,01143	0,00794	0,014292
2	0,00476	0,00952	0,00952	0,01904	0,00635	0,0127	0,00794	0,01588
2,2	0,00476	0,010472	0,00952	0,020944	0,00635	0,01397	0,00794	0,017468
2,4	0,00476	0,011424	0,00952	0,022848	0,00635	0,01524	0,00794	0,019056
2,6	0,00476	0,012376	0,00952	0,024752	0,00635	0,01651	0,00794	0,020644
2,8	0,00476	0,013328	0,00952	0,026656	0,00635	0,01905	0,00794	0,022232
D/d Oranı	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]	Boru Çapı [d]	PCM Çapı [D]
1,4	0,0127	0,00889	0,01587	0,022218	0,01904	0,026656		
1,6	0,0127	0,01016	0,01587	0,025392	0,01904	0,030464		
1,8	0,0127	0,01143	0,01587	0,028566	0,01904	0,034272		
2	0,0127	0,0127	0,01587	0,03174	0,01904	0,03808		
2,2	0,0127	0,01397	0,01587	0,034914	0,01904	0,041888		
2,4	0,0127	0,01524	0,01587	0,038088	0,01904	0,045696		
2,6	0,0127	0,01651	0,01587	0,041262	0,01904	0,049504		
2,8	0,0127	0,01778	0,01587	0,044436	0,01904	0,053312		

Ayrıca 1 m boru uzunluğundan 8 m uzunluğuna kadar 0,5 m artışla 15 boru uzunluğu için analizler yapılmıştır. Güneşlenme süresi, yıllık ortalama sıcaklık değerleri her bölge için farklıdır, yazılan program ise malzeme, ortam ve akışkan özelliklerinin girilmesiyle faz değişim problemini ticari yazılımlardan çok daha hızlı olarak çözebilmektedir. Yapılan inceleme içerisinde her aşamada uygun parametre değeri seçilmiş ve sonraki aşamaya o şekilde geçilmiştir. Son olarak Kocaeli ve İzmir koşulları incelenmiş, FDM kütlesinin gerçek güneş ışıınımı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri üzerinden şarj süreleri incelenmiştir.

3.1. Hızın Faz Değişimi Üzerine Etkisi

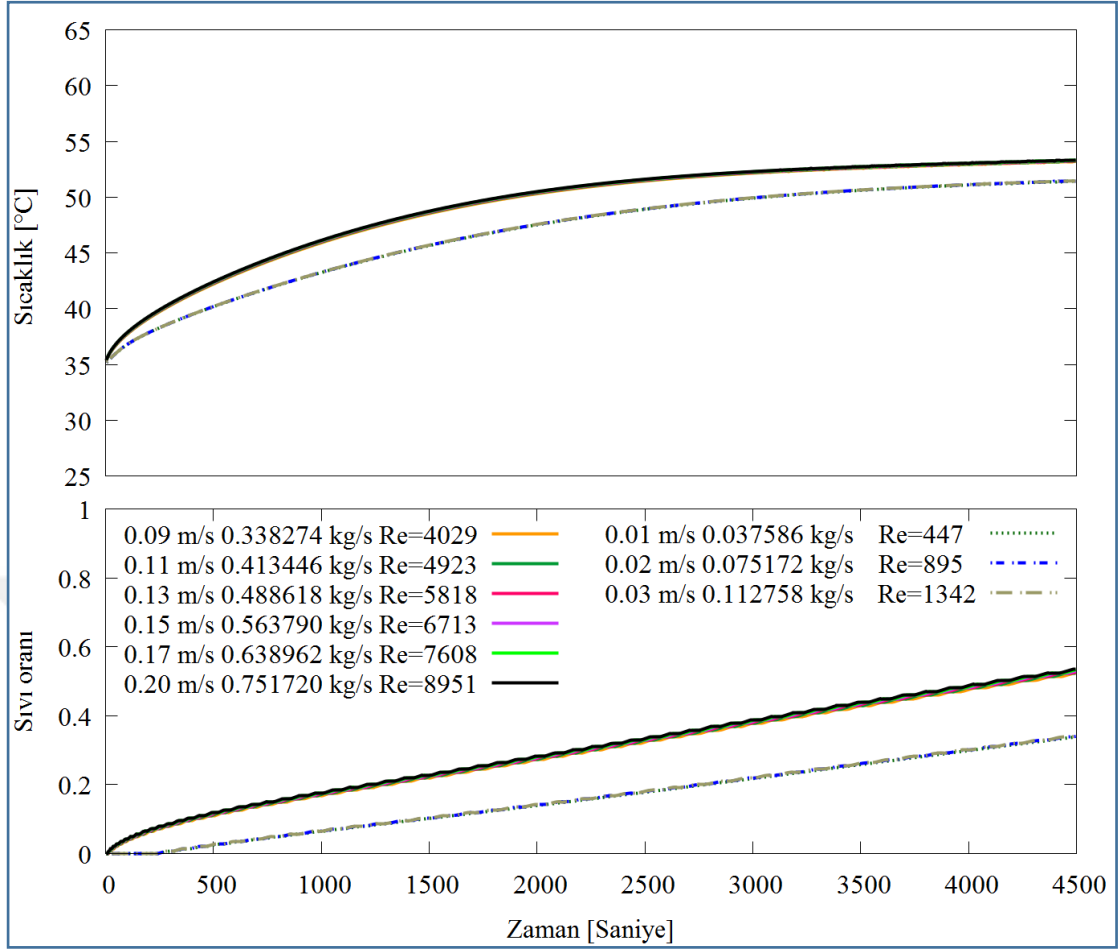
Borudan akan su hızının faz değişimi üzerine etkisini belirlemek için farklı hız değerlerine göre ısı geçişi incelenmiştir. İncelenen su hızları, 0,01 m/s ile 0,2 m/s aralığına kadar 0,01 artışla 20 farklı değerdir. Isı taşınım katsayısı her hız değeri için akışın türüne göre değişen korelasyonlarla bulunmuştur. Bilindiği üzere hız değeri ile Reynolds sayısı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Boru içindeki akış için kritik Reynolds sayısı 2300'dür. 2300 değerinin altı laminar akıştır ve ısı taşınım katsayısı laminar akışta sabittir. Reynolds sayısı 2300' ile 4000 arası geçiş bölgesidir. Reynolds sayısı 4000'den sonrasında ise Türbülanslı akıştır ve hız arttıkça ısı taşınım katsayısı da artmaktadır. Şekil 3.2'de borunun girişinde FDM kütlesinin orta noktasında, FDM'in şarj sürecinde farklı su hızları için sıvı oranının zamanla değişimi verilmektedir. Grafiğin eğimi tüm hız değerlerinde aynıdır. Eğim başlangıçta yüksek olup, erime noktasına yaklaştıkça azalmaktadır ve faz değişimi anında sıfır olmaktadır. Akışın laminar olması durumunda ısı taşınım katsayısı sabit olduğundan 0,01 m/s, 0,02 m/s, 0,03 m/s su hızı değerlerinde sıcaklığın zamanla değişimi aynıdır. Bu yüzden eğriler üst üste gelmiştir. Laminar su hızı değerlerinde sıvı oranı, incelenen hücrede faz değişimi olmadığından sıfırdır. Akışın türbülanslı olduğu hız değerlerinde, su hızı arttıkça ısı taşınım katsayısı arttığından, FDM kütlesinin ısınması daha çabuk gerçekleşmiştir. 0,09 m/s su hızı değeri için erime 3330. saniyede başlayıp 3384. saniyede tamamlanmıştır. 0,20 m/s su hızı değeri için erime 3231. saniyede başlayıp 3281. saniyede tamamlanmıştır. Hız değerinin 0,09 m/s'den 0,20 m/s değerine çıkmasına karşın, erime süreleri yalnızca 4 saniye değişmiştir. Türbülanslı hız değerlerinde, su hızının artmasının FDM sıcaklığına etkisi çok düşüktür.



Şekil 3.2. Su hızının şarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi

FDM hacminin ortalama sıcaklık ve ortalama sıvı oranının zamanla değişimi Şekil 3.3'te verilmiştir. 4500 saniye sonunda tüm hacim için erimenin tamamlanmadığı görülmektedir. Akışın laminar olduğu su hızı değerlerinde erime hep aynı anda gerçekleşmiştir. 4500 saniye sürenin sonunda akışın laminar olduğu su hızları için tüm FDM kütlelerinin sıvı oranı 0,34'dür. Akışın türbülanslı olduğu su hızı değerlerinde ise akışın laminar olduğu hız değerlerinden farklı olarak 4500 saniye sürenin sonunda sıvı oranı 0,53'e ulaşmıştır. Bu durum faz değişiminin türbülanslı su hızı değerlerinde daha hızlı olduğunu göstermektedir.

Akışın laminar olduğu hız değerlerinde sıcaklığın zamanla değişiminde iki hız değeri içinde eğriler üst üste çakışıktır. Akışın türbülanslı olduğu hız değerlerinde ise sıcaklık eğrileri arasındaki fark güçlükle görülebilmektedir. Ortalama FDM sıcaklığının zamanla değişimi incelendiğinde türbülanslı su hızlarının FDM sıcaklığına etkisi çok azdır. Bu sebeple su hızı seçilirken öncelikle akışın türüne bakılmalıdır.



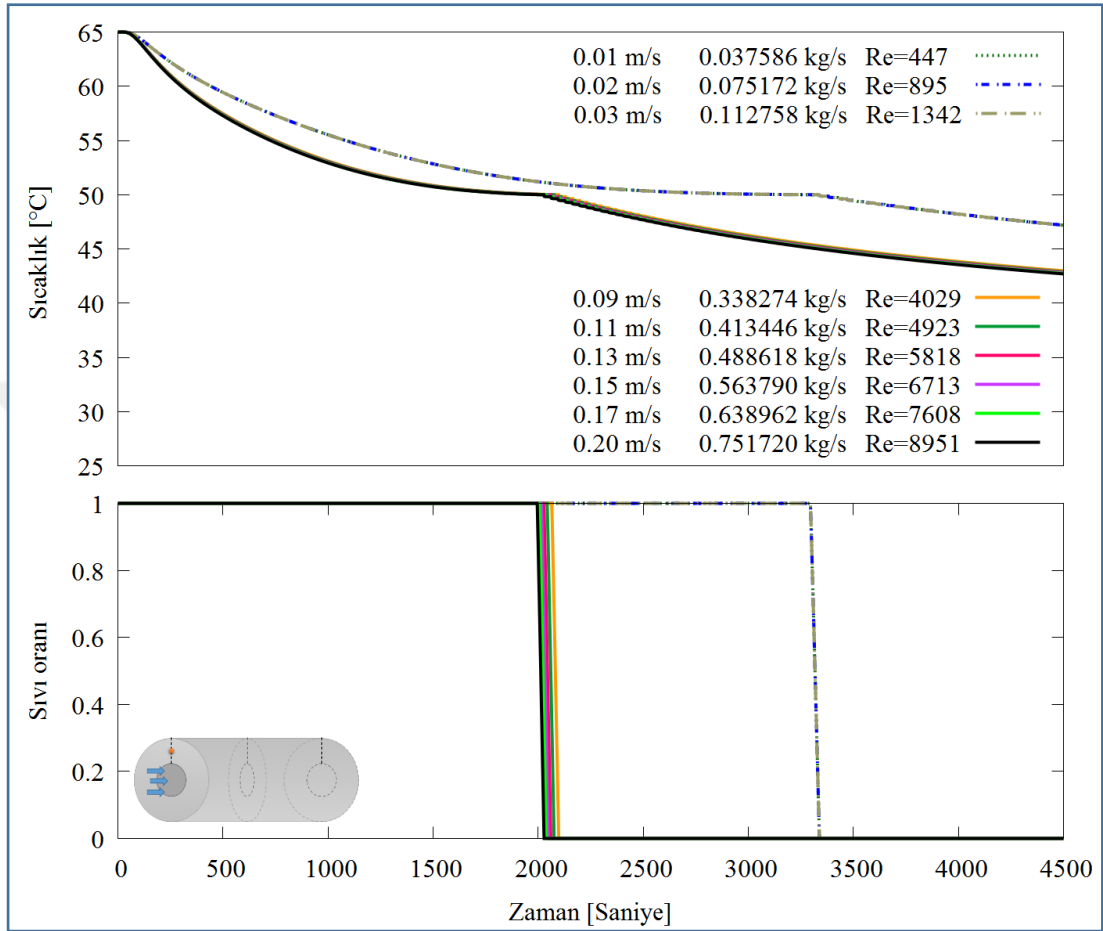
Şekil 3.3. Su hızının şarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi

Şekil 3.4'te görülebileceği üzeredeşarj periyodunda elde edilen sonuçlar şarj periyodu ile benzer bir davranış göstermektedir. Laminar su hızı değerlerinde ısı taşınım katsayısı aynı olduğundan 0,01 m/s, 0,02 m/s, 0,03 m/s su hızı değerlerinde faz değişimi 3295. saniyede başlamış 3338. saniyede bitmiştir.

Akışın türbülanslı olduğu, 0,09 m/s ve daha yüksek su hızı değerlerinde hız arttıkça faz değişimi daha erken gerçekleşmiştir. 0,09 m/s için faz değişimi 2064. saniyede başlamış 2098. saniyede bitmiştir. 0,2 m/s için ise faz değişimi 1995. saniyede başlamış 2028. saniyede bitmiştir. Türbülanslı su hızı değerlerinde, hızlar iki katına çıkmasına rağmen erime sürelerindeki farkın sıcaklığa etkisi çok düşüktür.

Deşarj sürecinde FDM hacminin ortalama sıvı oranı ve sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir. 4500 saniye sonunda bile faz değişiminin tüm kütle için tamamlanmadığı görülmektedir. Başlangıçta su sıcaklığı ile FDM sıcaklığı arasındaki

farkın yüksek olmasından dolayı, FDM'deki sıcaklık düşüşünün yüksek olduğu ve artan zamanla su sıcaklığı ile FDM arasındaki sıcaklık farkının azalmasıyla, FDM'deki sıcaklık düşüşünün daha az olduğu görülmektedir.

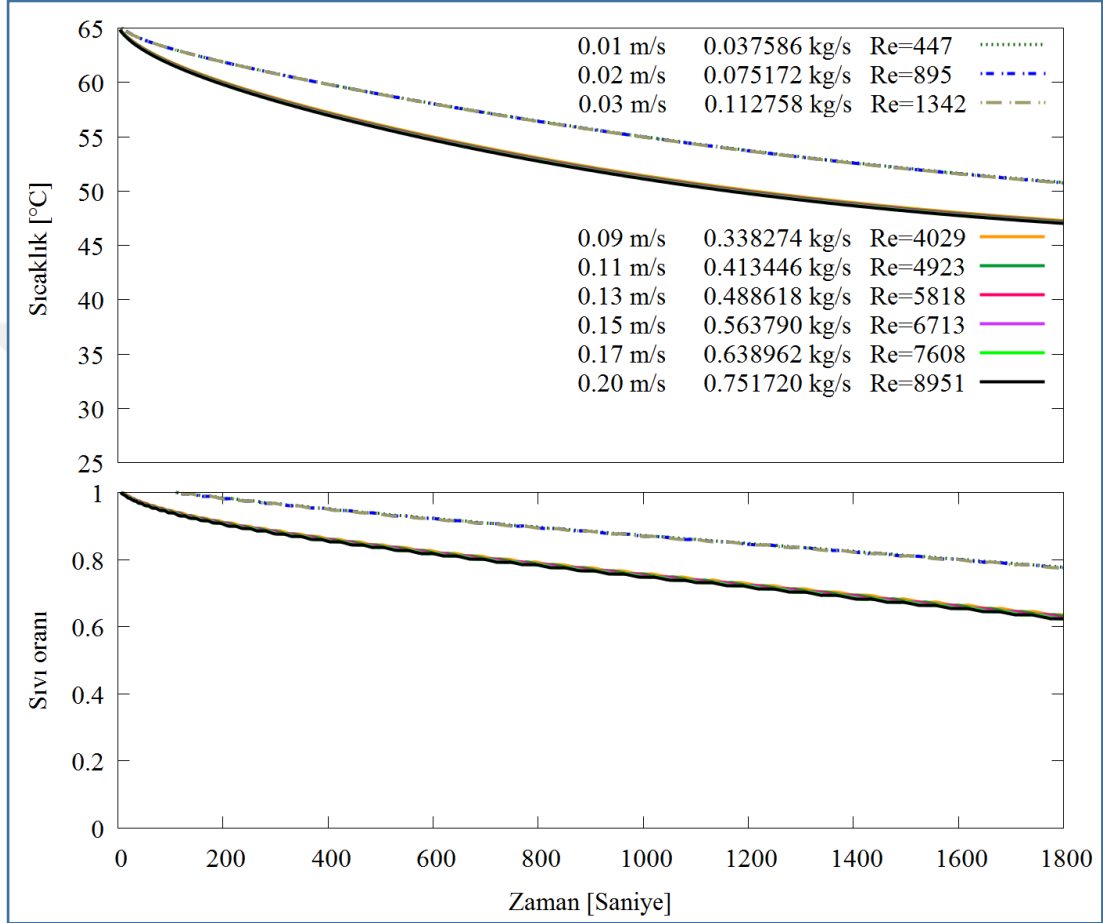


Şekil 3.4. Su hızının deşarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi

Şarj ve deşarj periyotlarının incelendiği analizler sonucunda, laminar hız değerlerinde faz değişimi aynı anda başlayıp aynı anda bittiği görülmektedir. Hız neredeyse iki katına çıkmasına rağmen sıcaklığın değişimi bir dereceden de az olduğundan etkisinin büyük olmadığı söylenebilir.

Hızın faz değişimi üzerine etkisi Şekil 3.6'da verilmiştir. Boru girişinde radyal doğrultuda sıvı oranı dağılımı 0,01 m/s su hızı değeri ve 0,13 m/s su hızı değeri için karşılaştırılmıştır. Su hızı attıkça, laminar bölgenin dışında, ısı taşınım katsayısı artacağından ısı geçişi, yüksek su hızı değerinde daha fazla olmuştur. 1800 saniye sonunda FDM kütlesinin katılaşması 0,01 m/s ve 0,13 m/s hız değerleri için

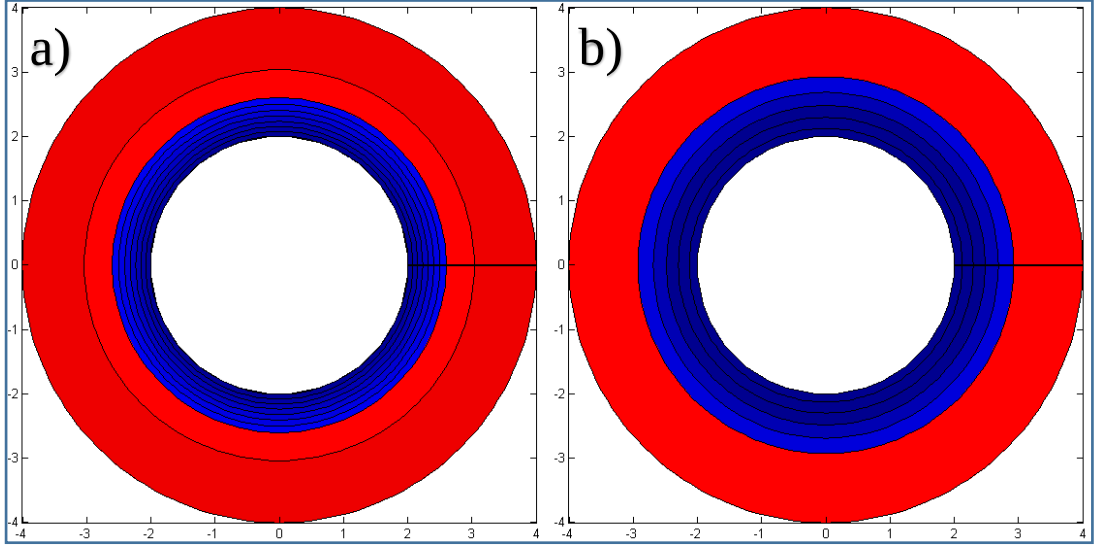
karşılaştırıldığında 0,13 m/s su hızı değeriyle soğuması incelenen FDM'in daha çabuk katılaştığı görülmektedir. Bu yüzden katılaştıran bölge kalınlığı 0,01 m/s su hızı değerinden daha fazladır. Laminar hız değerlerinde faz değişimi çok daha geç olacağından çok düşük hız değerleri seçilmemelidir.



Şekil 3.5. Su hızının deşarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi

Faz değiştiren malzemede erime sürecine hızın etkisi, akışın türü değişmedikçe önemli seviyede olmamaktadır. Dikkate alınabilecek parametre şarj periyodunda sıcak suyun kaç derece soğuduğu ya da deşarj periyodunda soğuk suyun kaç derece ısındığıdır.

Şarj periyodunda yapılan sayısal incelemede Şekil 3.7'de görüldüğü üzere 4500 saniye sonunda 65°C'de giren su, 0,5 m uzunlukta 0,0375 kg/s su debisinde 0,34 °C soğumuştur. Buna mukabil 0,7517 kg/s debi için soğuma 0.04 °C' mertebesinde. Böyle durumda akan su tekrar devreye girip ısı depolama ünitesinden geçirileceğinden her girişte kaç derece soğuması önemlidir. Bu yüzden debi seçimi çok yüksek değerler seçilmemelidir.



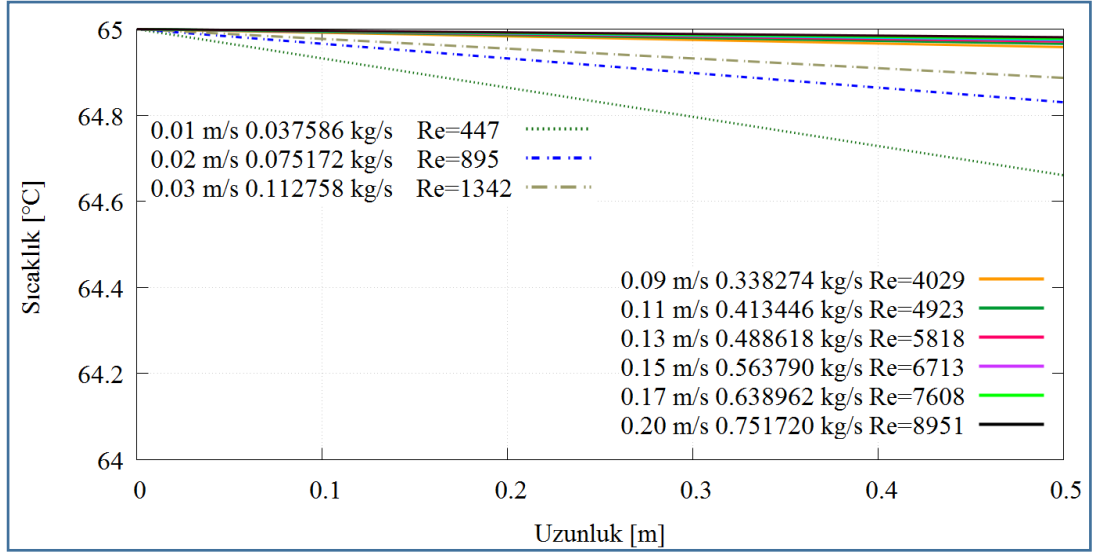
Şekil 3.6. Deşarj periyodunda 1800 saniye sonunda farklı su hızları için katılan bölge kalınlıkları a) 0,01 m/s b) 0,13 m/s

Deşarj periyodunda yapılan sayısal incelemede 4500 saniye sonunda 25 °C’de giren suyun ısınması farklı su hızı değerlerine göre hesaplanmış ve Şekil 3.8’de sunulmuştur. Şarj periyodundaki sonuçlara benzer şekilde yüksek hız değerleri seçildiğinde sıcaklık değişiminin az olduğu görülmektedir.

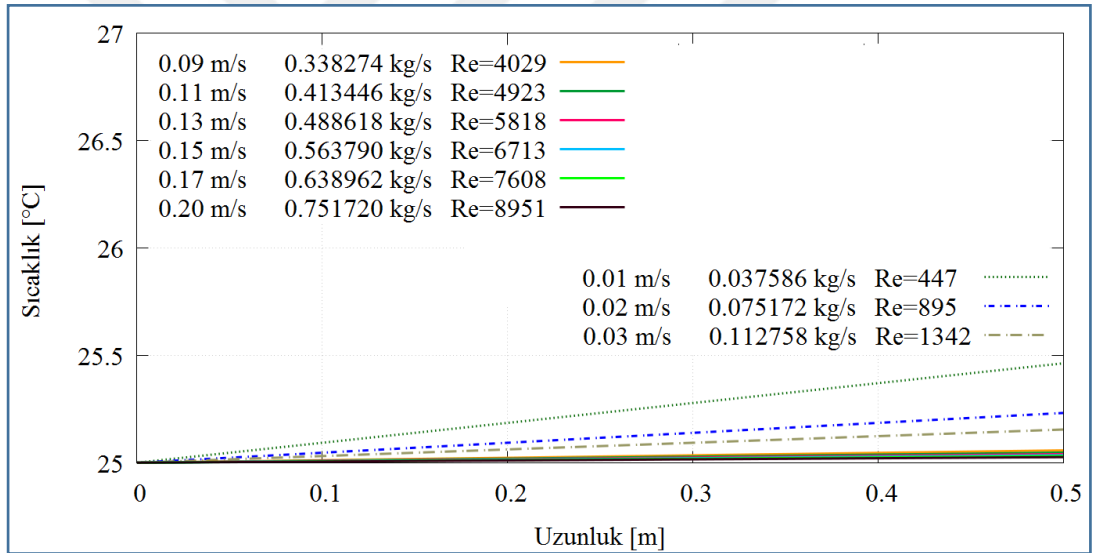
Çeşitli hız değerlerine göre, 4500 saniyelik süre sonunda şarj ve deşarj periyotlarında ne kadar enerji depolandığı ya da ne kadar enerjinin açığa çıktığı, su hızı seçimi yapabilmek için önemlidir. Enerji miktarlarının hız ile değişimi Şekil 3.9’da görülebilmektedir. Su ve FDM arasındaki sıcaklık farkı deşarj ve şarj periyotlarında birbirlerinden farklı olduğu için depolanan ve açığa çıkan enerji miktarları farklıdır.

Hız değerlerine göre depolanan enerji miktarları, şarj ve deşarj periyotlarında benzer davranış sergilemiştir. Laminar su hızı değerleri için enerji miktarları deşarj periyodunda 157 kJ, şarj periyodunda 126 kJ’dür.

Türbülanslı su hızı değerlerinde ise hız arttıkça depolanan enerji artmıştır. 0,09 m/s su hızı değeri için deşarj periyodunda 202 kJ, şarj periyodunda 169 kJ’dür. 0,02 m/s su hızı için ise deşarj periyodunda 205 kJ, şarj periyodunda 171 kJ’dür. Türbülanslı su hızı değerlerinde su hızı depolanan ve açığa çıkan enerji miktarları büyük ölçüde değişmemiştir.

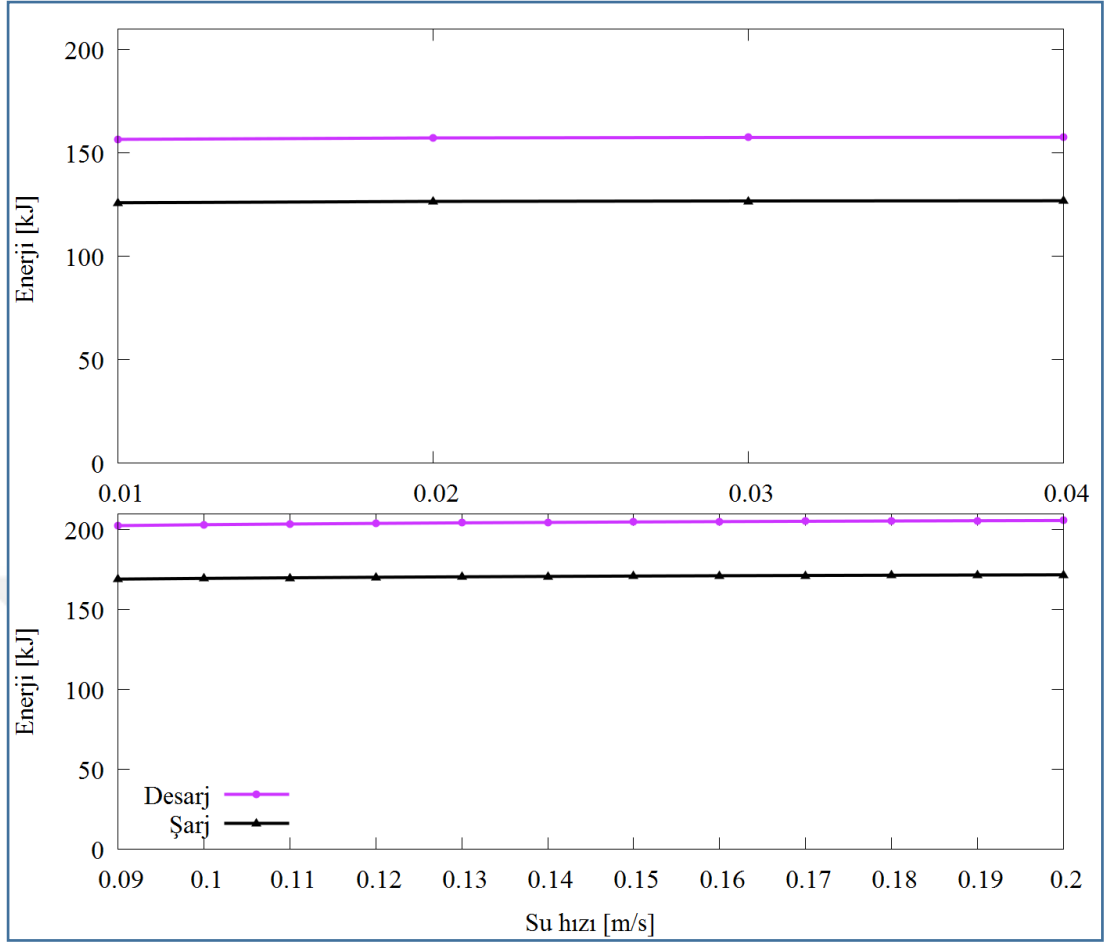


Şekil 3.7. Farklı su hızlarında, suyu sıcaklığının boru uzunluğu boyunca değişimi (Şarj periyodu)



Şekil 3.8. Farklı su hızlarında, suyu sıcaklığının boru uzunluğu boyunca değişimi (Deşarj periyodu)

Bu şartlar altında hem debi değerinin çok yüksek olmaması hem de depolanan ve açığa çıkan enerji miktarlarının yüksek olması tercih edilmelidir. Deşarj ve şarj periyotlarında incelenen bu sistem için tercih edilebilecek debi değerini veren su hızları 0,09-0,13 m/s aralığındadır.



Şekil 3.9. Farklı hız değerlerine göre depolanan ve açığa çıkan enerji miktarları

3.2. Uygun Faz Değiştiren Malzeme Seçimi için Faz Değiştirme Sıcaklığının Faz Değişimine Etkisi

Uygun faz değişim sıcaklığının belirlenmesi, uygun faz değiştiren malzemenin seçilmesinde en önemli parametredir. Çalışma şartları her coğrafi bölgede farklılık arz edeceğinden, çalışma şartlarına göre malzeme ve boyut seçimi yapmak, sistemden yüksek performans elde edebilmenin yoludur. Gizli ısı depolama cihazından şarj ve deşarj periyotlarında depolanan ve açığa çıkan enerji değerlerinin birbirine yakın olması beklenir. Yapılan incelemelerde şarj ve deşarj periyotlarında enerji değerlerinin dengeli olduğu nokta erime noktası olarak belirlenir ve bu erime noktasına göre faz değiştiren malzeme seçimi yapılabilir. Erime sıcaklığı yüksek ve ya düşük olan sistemlerde, faz değiştiren malzeme kullanımının yüksek performans vermemesi, faz değiştiren malzeme ile gizli ısı depolanan sistemlerin düşük performanslı görülmesine sebep olmuştur [34]. Hâlbuki bölgelere göre değişen çalışma şartları ve bu şartlara

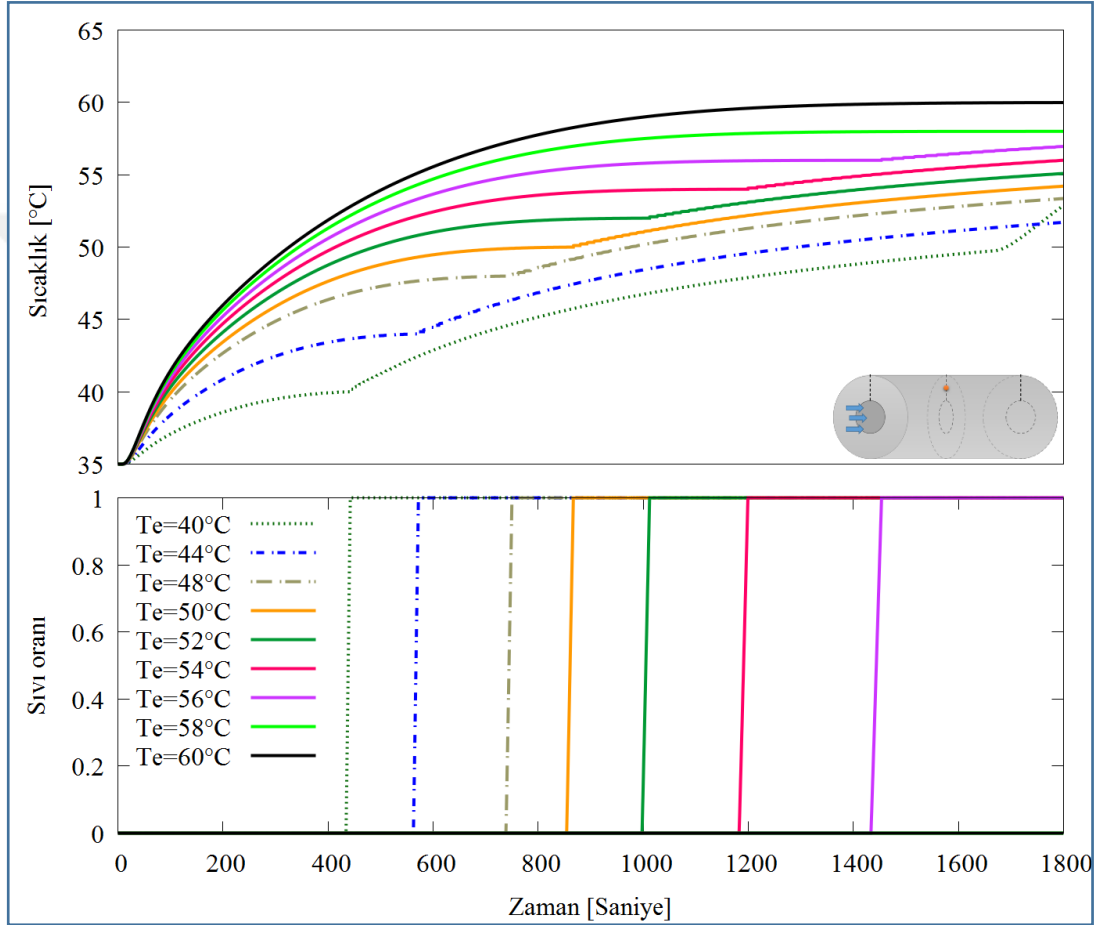
uygun malzeme seçimi ile faz değıştiren malzeme kullanarak gizli ısı depolanması, sistemin performansını arttırmaktadır [8].

Bu durumu inceleme adına, aynı sistemde, aynı termofiziksel özellikleri koruyarak, aynı başlangıç ve sınır koşulları altında, yalnızca faz değıştirme sıcaklığını değıştirerek sayısal inceleme yapılmıştır. Erime sıcaklığı 40°C ile 60°C arasında 1°C derece artış yapılarak analizler incelenmiştir. Su akış hızı 0,13 m/s olarak belirlenmiştir.

Farklı erime sıcaklıkları için ısı depolama ünitesinde eksenel doğrultuda $z=L/2$ 'de radyal doğrultuda $r/2$ konumundaki hücrede sıcaklığın zamanla değışimi Şekil 3.10'daki gibidir. İncelenen malzemenin yoğunluğu katı fazda 880 kg/m³, sıvı fazda ise 770 kg/m³ değerindedir. Katı faz yoğunluğunun sabit ve sıvı fazdan yüksek olması ve sıcaklık farkının fazla olması sebebiyle başlangıçta eğim fazla iken, faz değışim sürecine gelindiğinde eğim azalmış ve sabit kalmıştır. Faz değışimi tamamlanıp ısınma devam ettiğinde ise daha düşük bir eğim görülmektedir. 1800 saniye sonunda 58°C ve 60°C faz değıştirme sıcaklığına sahip malzemeler için erime daha başlamamıştır. 50°C ile 40°C erime sıcaklıklarına sahip malzemeler için erime süreleri incelendiğinde 7 saniyelik fark görülmektedir. FDM'in 50°C erime sıcaklığına sahip olması durumunda toplam faz değıştirme süresi 11 saniye iken, 40°C olması durumunda 4 saniyedir. 40°C erime sıcaklığına sahip malzeme için faz değışiminin başlangıcı 437. saniye iken, 50°C erime sıcaklığına sahip malzeme için faz değışiminin başlangıcı 854. saniyedir. Sonuçlar analiz edildiğinde erime sıcaklığının değışmesi ile erimenin başladığı zamanın önemli ölçüde değıştiği sonucuna ulaşılmıştır. FDM'in 40°C erime sıcaklığına sahip olması durumunda FDM hacminin tümü Şekil 3.11'de görüldüğü üzere 1665 saniye sonunda erimektedir. Şekil 3.10 incelendiğinde ise 1665. saniyeden sonra ısının yalnızca duyulur ısı yoluyla depolanması eğimin artmasına sebep olmuştur.

Tüm FDM hacminin ortalama sıcaklık, ortalama sıvı oranı ve depolanan enerjinin zamanla değışimi Şekil 3.11'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde FDM kütlesinin zamana bağlı olarak ortalama faz değıştirme karakteristiği ortaya çıkmaktadır. 1800 saniye sonunda yalnızca erime sıcaklığı 40°C olan FDM kütlesi için erimenin tamamlandığı Şekil 3.11'de görülmektedir. 60°C erime sıcaklığına sahip FDM için ortalama sıvı oranı, 0,26 değerine ulaşabilmiştir. Tüm kütlenin depolayabileceği gizli

ısı değeri belli olduğundan, depolanan enerjinin gizli ısı bileşeninin zamanla değişimi sıvı oranının zamanla değişimi verir. Tüm FDM hacminin yalnızca %26'sı erimiştir. Erime sıcaklığının 40°C olması durumunda ise hacmi dolduran tüm FDM kütlesi erimiştir. Burada dikkat edilmesi gereken durum ise, faz değiştiren malzemelerin çalışma sıcaklığıdır. FDM yapısını bozacak sıcaklık değerine çıkılması durumundan kaçınılması gerekmektedir.



Şekil 3.10. Şarj sürecinde erime sıcaklığının sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi

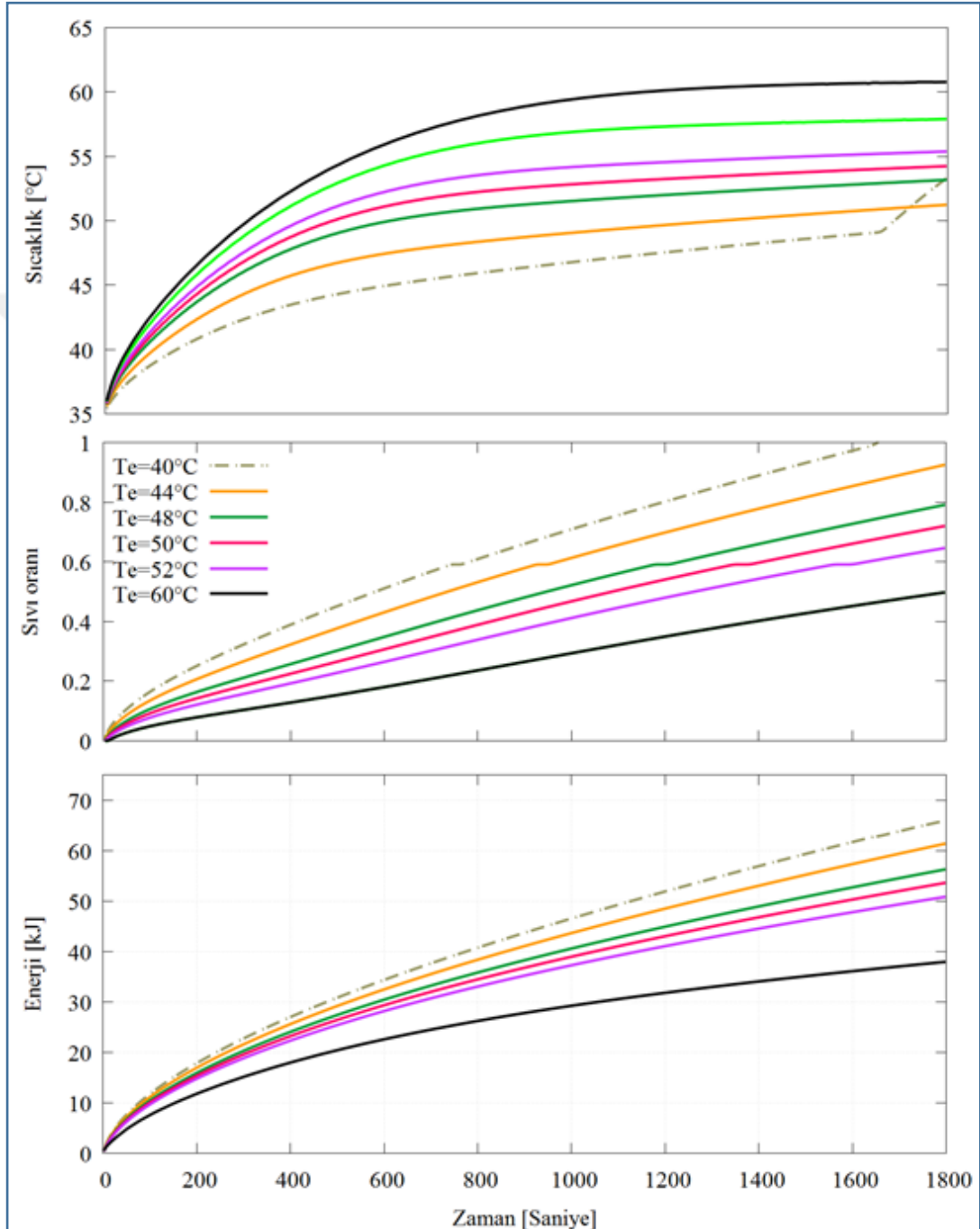
Te=40°C durumu ile Te=60°C durumu, ortalama sıcaklık zaman grafiği üzerinde incelendiğinde, 60°C faz değiştirme sıcaklığına sahip olan malzemenin duyulur ısısının 40°C faz değiştirme sıcaklığına sahip olan malzemeden daha yüksek olduğu görülmektedir. Düşük erime sıcaklığına sahip malzemelerin depoladıkları enerji miktarının büyük olmasının sebebi, faz değişimini tamamlamış ya da tamamlamaya yakın olmalarından dolayı diğer sıcaklıklardan daha fazla gizli ısı yoluyla enerji depolayabilmiş olmalarındandır. Faz değişiminin olduğu bölge ortalama sıcaklık

zaman grafiğinde çok küçük bir alanda bulunmasına rağmen, verdiği enerji özgül ısı değerinin bu malzeme için 61,75 katı olduğundan depolanan enerji miktarına etkisi çok büyüktür. Bu sebeple ortalama sıvı oranının zamanla değişimi grafiği ile depolanan enerji miktarının zamanla değişimi benzer davranış göstermiştir.

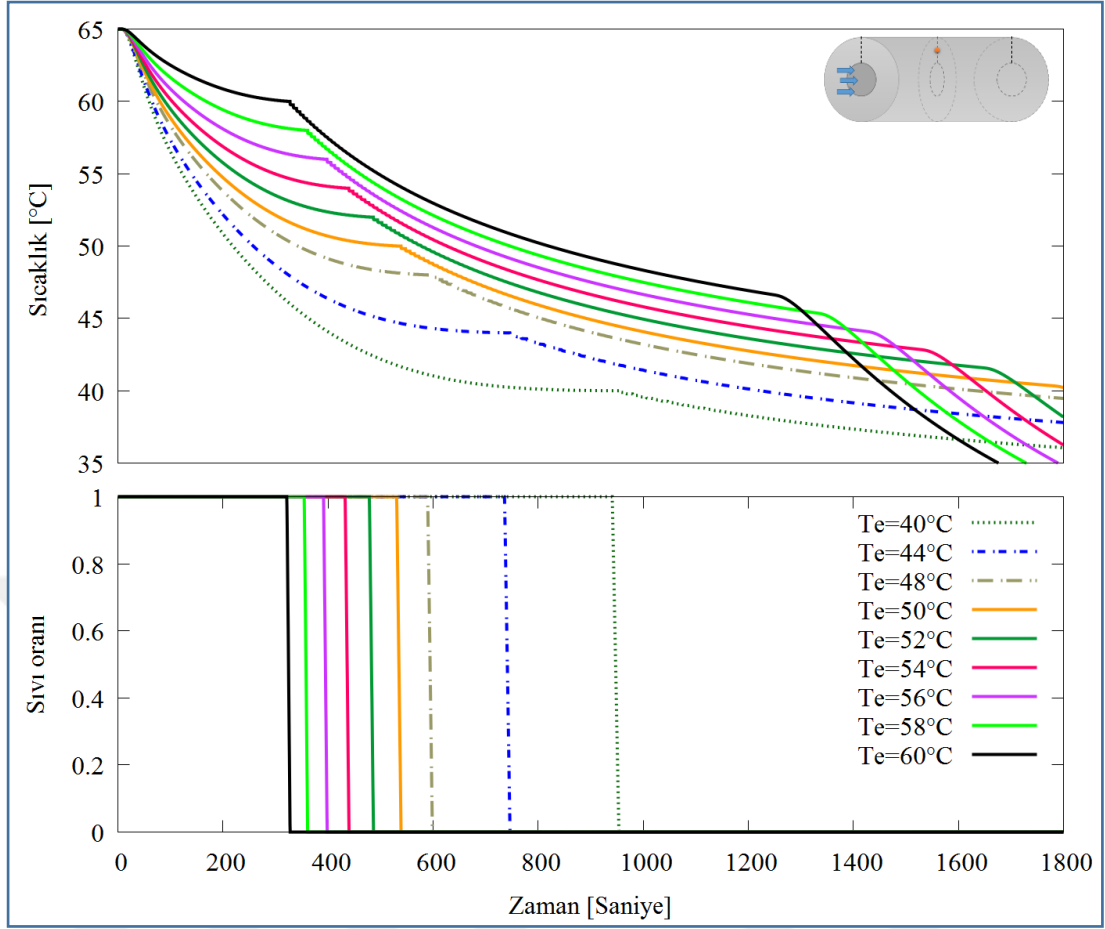
Deşarj periyodunda ise faz değiştiren malzeme dışarıya ısı verir. Şekil 3.12'den görülebileceği üzere ısı davranış şarj periyoduna benzerdir. Başlangıçta yüksek bir eğim gözlemlenirken, erime noktasına yaklaştıkça eğim azalır ve faz değişim anında sıfıra iner. Faz değişimi tamamlandığında ise değişen yoğunluğun etkisiyle daha düşük bir eğim gözlemlenir. Tüm FDM kütlesinde faz değişimi tamamlandığında ise, eğim birden artar. Faz değişim sıcaklığının 60°C olduğu durum için FDM kütlesinin tümü 1247 saniye sonunda erimiştir. Bu süreden itibaren yalnızca duyulur ısı yoluyla ısı açığa çıkmaktadır. Faz değiştiren malzemenin 40°C faz değişim sıcaklığına sahip olması durumu ile 60°C erime sıcaklığına sahip olması durumu kıyaslandığında faz değişiminin başlama süreleri arasında büyük fark vardır. 40°C'den 44°C'ye faz değişim sıcaklığının 4°C artması faz değişiminin başladığı süre, 203 saniye daha erken olmaktadır. Ancak bu süre faz değişim sıcaklığı arttıkça daha kısalmış ve 56°C'den 60°C'ye gelindiğinde 71 saniyeye gerilemiştir. Faz değişim süreleri ise 40°C için 14 saniye iken, 60°C için 7 saniyedir. 50°C ile 60°C arası faz değişim süresi birbirine çok yakındır. Faz değişim sıcaklığı çok düşük olması durumunda, faz değişimi deşarj periyodunda daha geç olmaktadır. Faz değişim süresi ise uzundur. Gerçek bir sisteme uygulandığında bu durum, bir sonraki şarj periyoduna geçişte problem yaratacağından çok düşük faz değişim sıcaklığı değerine sahip malzeme seçilmemelidir.

Tüm FDM hacminin zamanla ortalama sıcaklık, ortalama sıvı oranı ve depolanan enerji miktarları değişimleri incelendiğinde, deşarj durumunda 50°C faz değiştirme sıcaklığı durumuna kadar tüm değerlerde faz değişiminin tamamlandığı Şekil 3.13'de görülmektedir. 40°C faz değişim sıcaklığına sahip durum için sıvı oranı düşük bir eğimle değişirken, 60°C durum için eğim değeri daha yüksektir. Sıcaklığın zamanla değişimi incelendiğinde ise, sıcaklık farkından ötürü yüksek başlayan eğim, zamanla azalmış faz değişim sürecinde sıfıra inmiştir. Faz değişiminin sonunda azalan yoğunluğun etkisiyle başlangıçtan daha düşük bir eğim gözlemlenirken faz değişiminin tüm hacim için tamamlandığı sürelerden sonra eğim artmıştır. Bu süreler 60°C için 1248 saniye, 56°C için 1425 saniye, 52°C için 1647. saniye, 50°C için 1781.

saniyedir. Uzun deşarj sürelerinde, aşırı soğumayı engelleme adına, FDM kütlesi artırılarak tüm kütlenin eridiği süre uzatılabilir. Enerji miktarının zamanla değişimi ile sıvı oranının zamanla değişimi birlikte incelendiğinde en kısa sürede faz değiştiren $T_e=60^\circ\text{C}$ durumunun en fazla enerji miktarını açığa çıkardığı görülmektedir.



Şekil 3.11. Şarj sürecinde erime sıcaklığının hacimsel sıvı oranı ve sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi



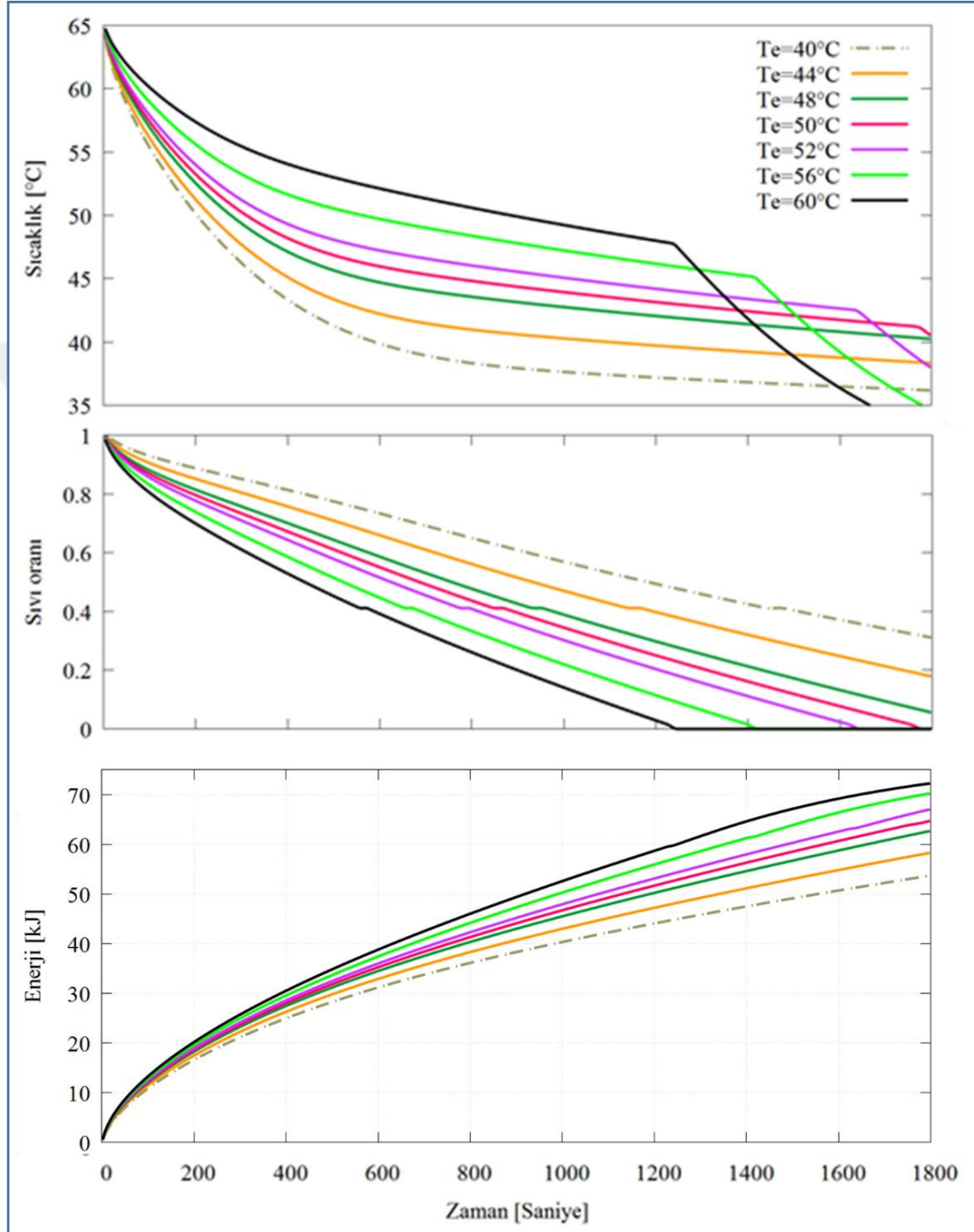
Şekil 3.12. Deşarj sürecinde erime sıcaklığının sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi

Şarj (faz değiştiren malzemenin ısı alması) periyodunda, borudan akan suyun erime sıcaklıklarına göre soğuması incelendiğinde, erime sıcaklığı düşük olan faz değiştiren malzemenin daha çabuk ısı aldığı Şekil 3.14’de görülmektedir. Bu şartlar altında malzeme seçerken yüksek erime sıcaklığına sahip malzeme seçmemeye dikkat edilmelidir.

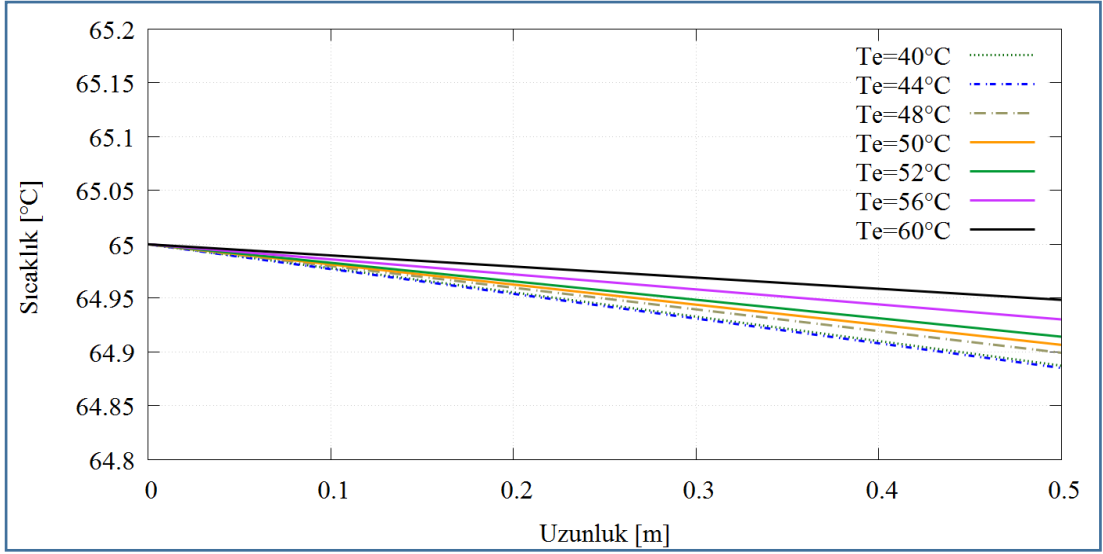
Şarj (faz değiştiren malzemenin ısı alması) ve deşarj (faz değiştiren malzemenin ısını suya aktarması) periyotlarında 1800 saniyelik bir süreç sonunda farklı erime sıcaklıklarına göre depolanan ve açığa çıkan enerji miktarları Şekil 3.15’deki gibidir.

Talep edilen miktardaki gizli ısı enerjisini deşarj periyodunda kullanabilmek, şarj periyodunda talep edilen miktarda enerjiyi alabilmek için depolanan ve açığa çıkan ısının denk olduğu noktadaki sıcaklık değerine sahip faz değiştiren malzeme bu şartlar için tercih edilebilir. Faz değiştiren malzemenin erimesi ile şarj periyodu tamamlanır. Bu yolla gizli ısı depolanmış olur. Ancak malzeme tekrar katılaşır deşarj olabilmelidir

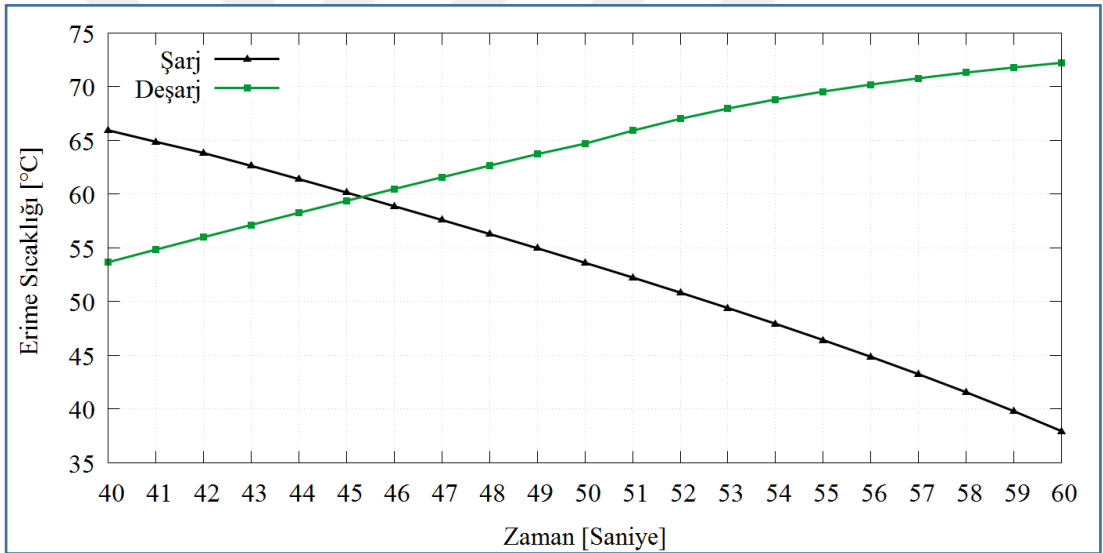
ki, depoladığı gizli ısı enerjisi açığa çıksın. Bu yüzden dengeli bir şarj/deşarj periyotları sağlayabilecek malzeme seçildikten sonra, gizli ısı depolama cihazının boyutları değiştirilerek talep edilen enerji miktarına ulaşılabilir.



Şekil 3.13. Deşarj sürecinde erime sıcaklığının hacimsel sıvı oranı ve sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi



Şekil 3.14. Şarj periyodunda erime sıcaklıklarına göre boru boyunca su sıcaklığının değişimi



Şekil 3.15. Deşarj ve şarj periyotlarında açığa çıkan enerjilerin erime sıcaklıklarına göre değişimi

3.3. Boru çapı ve FDM tabakası kalınlıklarının enerji kapasitesine etkisi

Gizli ısı enerjisini kullanabilmek için faz değişiminin olması gerekmektedir. Gizli ısının aktif olduğu durumda faz değiştiren malzemenin depolayabileceği enerji miktarını FDM kütlesi belirlemektedir. FDM kütlesinin doldurduğu hacim üzerinden elde edilebilecek maksimum gizli ısı enerjisi miktarı belirlenebilir.

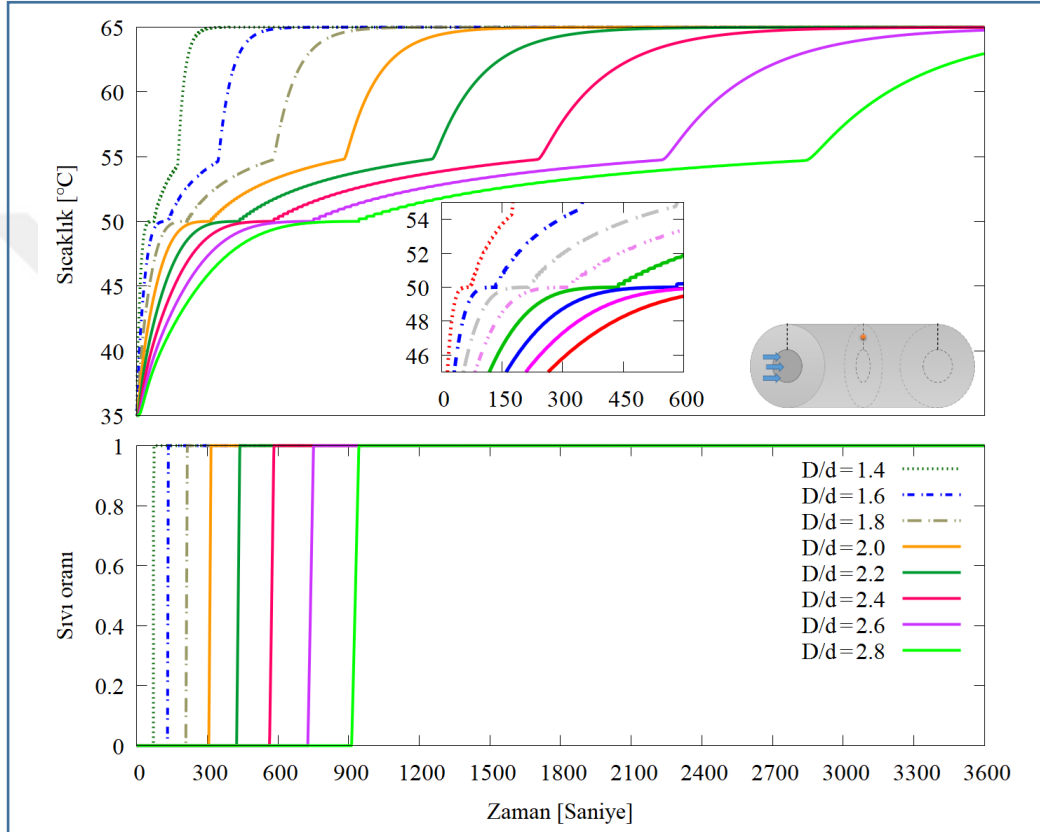
Gizli ısı depolama ünitesinden beklenen, şarj periyodunda olabildiğince kısa sürede yüksek miktarda ısı çekip depolaması, deşarj periyodunda ise depoladığı ısıyı açığa

çıkarmasıdır. Her çalışma şartı kendisine uygun boyut değerleri gerektirir. Her bölgeye ve mevsime göre suyun ortalama sıcaklığı farklılık arz eder. Dikkat edilmesi gereken ulaşılabilecek ortalama bir sıcaklık değerinde en yüksek ısı depolama kapasitesini verebilecek boyutları tercih etmektir. Örneğin soğuk olan bölgelerde çok geniş çap içine faz değiştiren malzeme doldurulduğunda, bu malzemenin büyük bir kısmı erimeyecek ve fazladan maliyet artışına sebep olacaktır. Çok sıcak olan bölgelerde ise yanlış seçilen çok küçük çap içine faz değiştiren malzeme doldurduğunda oluşan hacim çabuk ısındığından faz değiştiren malzeme beklenildiği üzere gizli ısıyı depolayacaktır. Bunun yanında gelen ısı enerjisi fazla olduğundan duyulur ısı da depolayıp sıcaklığı artacaktır. Eğer sıcaklık artışı FDM çalışma sıcaklık aralığının üstüne çıkarsa, faz değiştiren malzemenin yapısı bozulacaktır. Tasarım kısıtları belirlenirken öncelikle, faz değiştiren malzemenin yapısının bozulmayacağı uygun çalışma sıcaklığının üstüne çıkmayacak kadar kütlenin doldurulabileceği boyutta bir hacimdir öte yandan hacim içerisinde faz değiştirmeyen FDM bölgesi bulundurup fazladan maliyet artışına sebep olacak şekilde büyük olmamalıdır. Sonuç olarak ne faz değiştiren malzeme yapısı bozulacak kadar aşırı ısınmalı, ne de erimeyip gizli ısı depolayamayacak kadar büyük olmalıdır.

Yapılan sayısal incelemelerde, çeşitli boru çaplarına ve bu boruların etrafındaki faz değiştiren malzeme kalınlıklarına göre gösterdikleri termal performans incelenmiş, seçilebilecek boy ve çap değerleri belirlenmiştir. Kolaylıkla temin edilebilecek farklı çapta ince cidarlı bakır boru kullanılmıştır. 3/16", 1/4", 5/16", 3/8", 1/2", 5/8", 3/4" olmak üzere yedi adet çap dikkate alınmıştır. Her bir boru için diğer borularla aynı oranı verecek sekiz farklı çap belirlenmiştir.

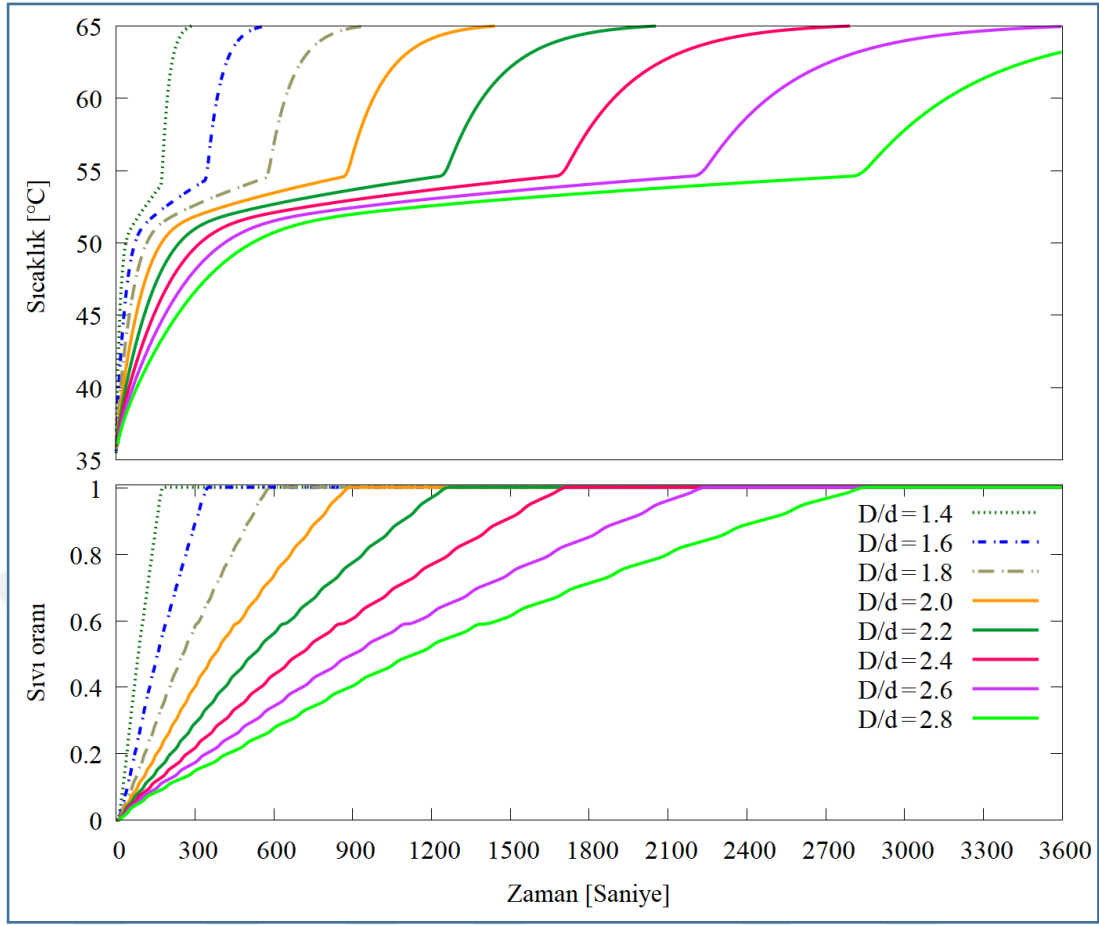
Oluşan hacmi dolduran faz değiştiren malzeme kütlesi elbette depolanan enerji miktarını belirlemektedir. Bu yüzden performansları kıyaslarken birim kütle başına depolanan enerjiyi dikkate almak daha doğru olacaktır. En uygun tasarım şartlarını bulabilmek için yapılan sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, $2r=3/8"$ çaplı boru için $z=L/2$ konumunda radyal doğrultuda $r/2$ konumundaki hücreden alınan veriler Şekil 3.16'da gösterilmiştir. D/d oranı arttıkça erimenin tamamlanma süresinin arttığı aşikârdır. D/d oranı 1,4 için erime süresi 4,4 saniye iken 2,8 için bu süre 34 saniyedir. D/d oranı arttığında FDM kütlesi arttığından depolanan gizli ısı enerjisi D/d oranı ile doğru orantılıdır. Faz değişiminden sonra sıcaklık grafiğinde ani eğim artışının olduğu

nokta tüm kütlenin faz değişimini tamamladığı noktadır. Tüm FDM kütlelerinin faz değişimini tamamlama süresi en yüksek olan D/d oranı beklendiği gibi 2,8'dir. Tüm FDM hacminin zamanla ortalama sıcaklık ve ortalama sıvı oranı değişimleri Şekil 3.17'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, düşük FDM kalınlıkları için faz değişimi kısa sürede olduğundan sıvı oranının zamanla değişimi grafiği üzerinde eğim yüksektir. FDM kalınlığı arttıkça eğim azalmıştır, tüm kütlenin erime süresi artmıştır.



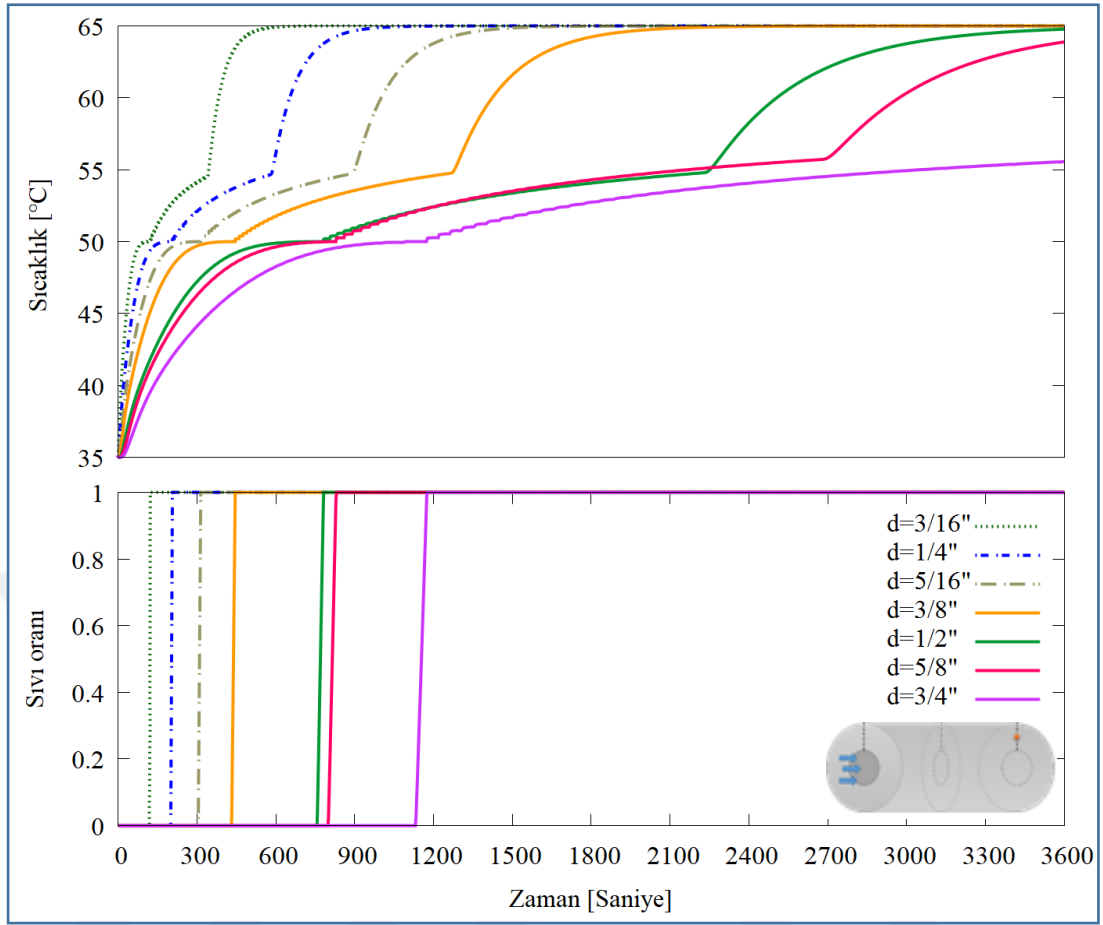
Şekil 3.16. FDM tabakası kalınlığının şarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi

Boru çaplarına göre $D/d=2,4$ için sıcaklığın ve sıvı oranının zamanla değişimi Şekil 3.18'de verilmiştir. Boru çıkışında FDM kalınlığının orta noktasında yapılan inceleme sonucunda, şarj süresi olarak gündüz vakti, bir saat gibi bir süre bulunduğu ve bu sürenin kullanım suyunun ısınmasına aksi tesiri olmadığı varsayılırsa, şarj süresinin 15 dk'dan fazla olması halinde çap değeri artsa da erimeyen faz değiştiren malzeme kütlesi olmayacaktır. Bu yüzden FDM tabakası kalınlığı belirlenirken faz değişiminin tamamlanmadığı bölgelerin olmaması için ortam koşulu içerisinde şarj süresine dikkat edilmelidir.



Şekil 3.17. FDM tabakası kalınlığının şarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimine etkisi

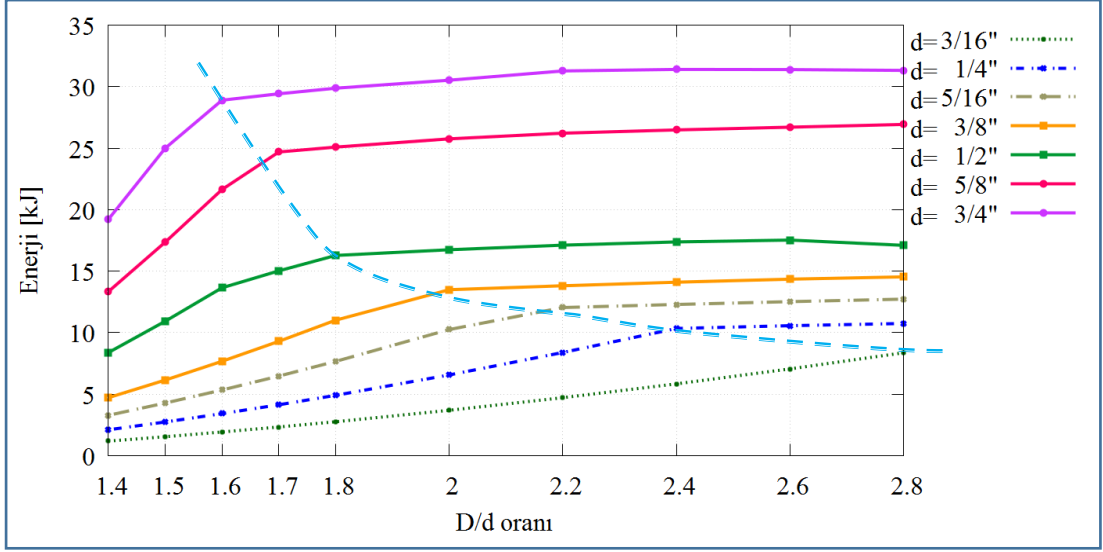
FDM tabakası kalınlığının farklı boru çaplarında enerji depolama kapasiteleri incelendiğinde, şarj süresi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar. Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de sıcaklığı 65°C, hızı 0,13 m/s olan suyla 35°C sıcaklığında FDM kütlesinin ısıtılması ile depolanan enerji miktarları gösterilmiştir. Şekil 3.19’da 720 saniye sonunda depolanan enerji miktarları incelendiğinde D/d oranı 2,0 ve sonrasındaki D/d oranlarında eğim artış göstermemiş, depolanan enerji miktarları neredeyse sabit kalmıştır. Bunun sebebi tüm FDM hacminin 720 saniye içinde faz değişimini tamamlayamamış olmasıdır. Grafiğin üstünde mavi renk ile gösterilen mavi eğri, farklı boru çapları için 720 saniye şarj süresi içinde, tüm FDM kütlesinin gizli ısı depolayabileceği D/d oranlarını göstermektedir. Bu eğrinin üstünde kalan FDM tabaka kalınlıklarında faz değişimi tüm kütle için tamamlanmadığından, depolanan enerji miktarları D/d oranı arttıkça, fazla artmamış neredeyse sabit kalmıştır.



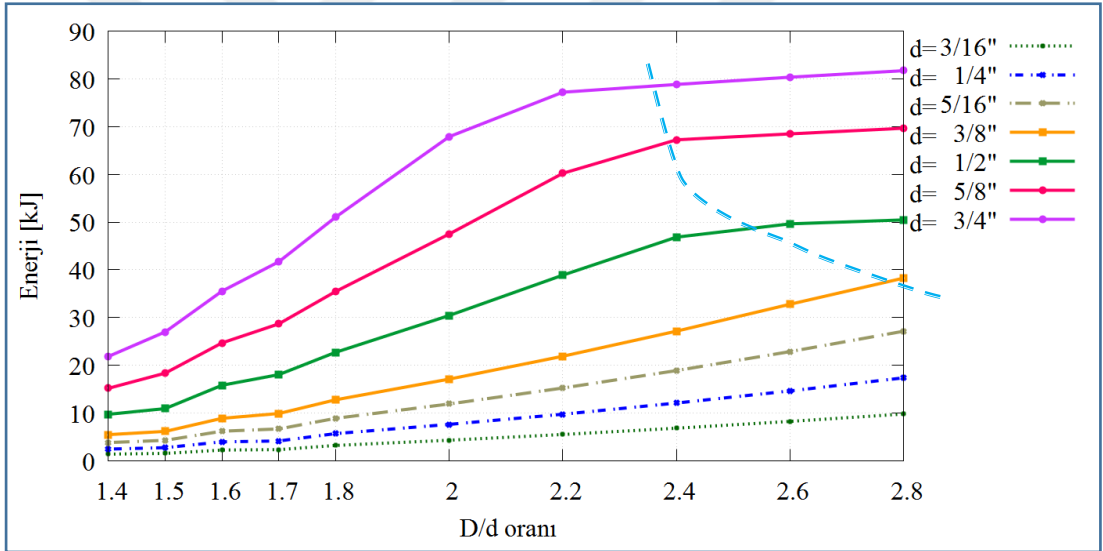
Şekil 3.18. Şarj periyodunda farklı boru çaplarına göre göre sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimi

Şekil 3.20’de ise 3600 saniye sonunda depolanan enerji miktarları gösterilmiştir. Faz değişiminin tamamlandığı oranlarda enerji değerleri artmıştır. Çap değeri 5/16" ve daha büyük olduğu değerlerde eğim daha yüksektir.

1/2" çapından küçük boru çapı değerlerinde tüm FDM tabakası kalınlıklarında erimenin tamamlandığı bu yüzden depolanan enerji miktarının arttığı söylenebilir. Şarj süresi arttıkça tercih edilebilir bölge alanı da artmıştır. FDM tabaka kalınlığı belirlenirken, FDM kütlesinin tümünün faz değiştirmesine dikkat edilmelidir. Aksi takdirde faz değiştirmeyen bölgeleri dolduran FDM kütlesi yatırım maliyetini arttıracak, ancak gizli ısı depolanmasına katkı sunmayacaktır.



Şekil 3.19. 720 saniye sonunda farklı boru çapları için D/d oranlarının depolanan enerji ile kıyası



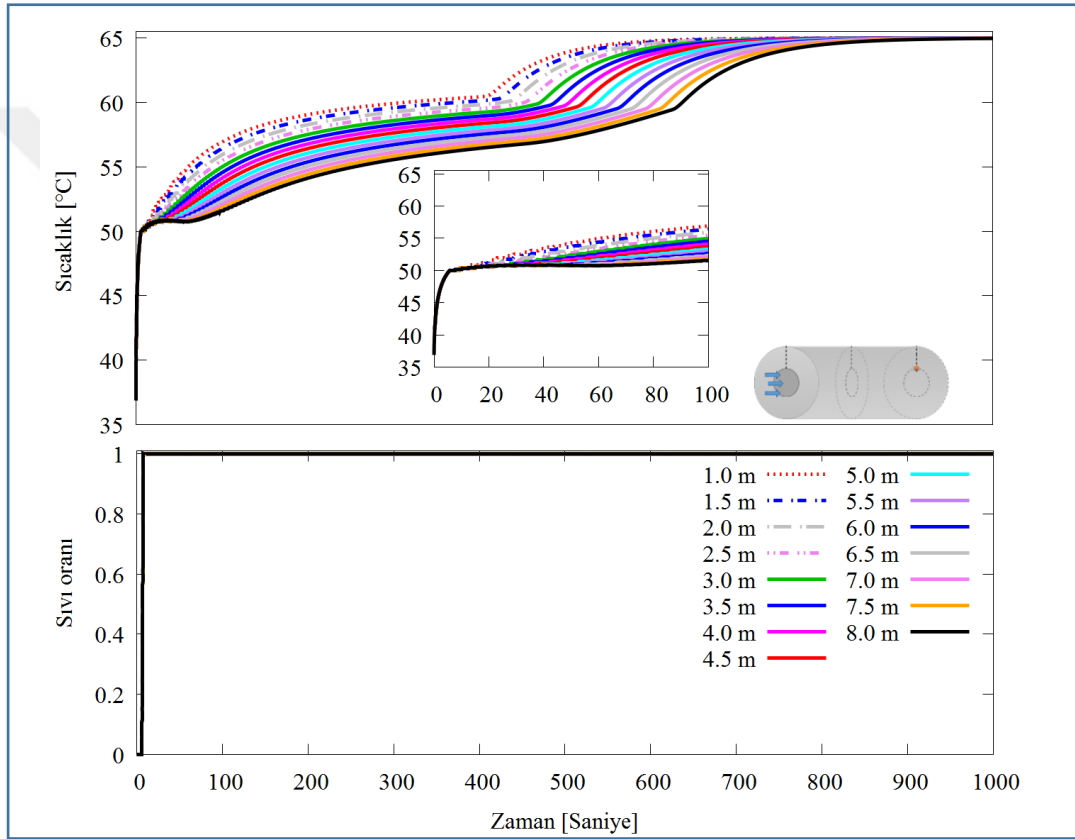
Şekil 3.20. 3600 saniye sonunda farklı boru çapları için D/d oranlarının depolanan enerji ile kıyası

Büyük yarıçap değerlerin faz değişimini tamamlamaları daha uzun süre gerektirdiğinden ortalama şarj süresine çalışma şartları içinde dikkat edilerek boru çapı ve FDM kalınlığı belirlenmelidir.

3.4. Boru uzunluğunun enerji kapasitesi üzerine etkisi

Hacmi oluşturan bileşenlerden biri de uzunluktur. Birim uzunluk üzerinden depolanan ya da açığa çıkan enerji miktarı belirlenerek talep edilen enerji miktarına göre uzunluk seçimi yapılabilir. Uzunluğun değişiminin enerji kapasitesi üzerine etkisini inceleme

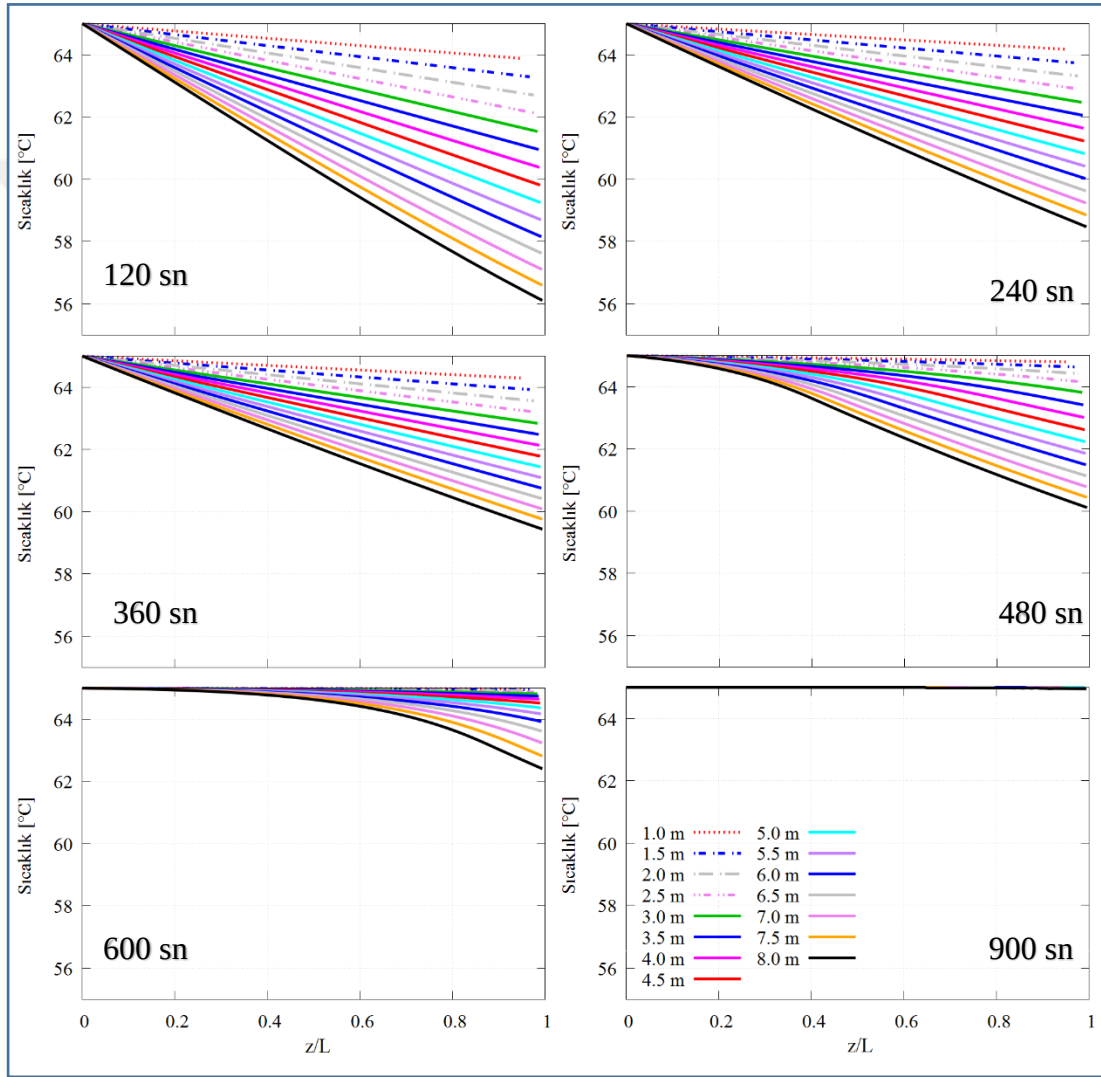
adına, 1 m uzunluktan 8 m uzunluğa kadar, 0,5 m artışla 14 farklı boru uzunluğu için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Su hızının 0,13 m/s, boru çapının 5/16" ve D/d oranının 1,64 olduğu ısı depolama ünitesinin farklı boru uzunluklarına göre faz değişimi Şekil 3.21'de gösterilmektedir. Eksenel doğrultuda borunun en sonunda iç cidarla temas eden noktada, sıvı oranının zamanla değişimi incelendiğinde, önce yalnızca duyulur ısı bileşeni olduğundan sıcaklık tüm boru uzunluklarında neredeyse aynı eğimle artmıştır, fark gözle görülmeyecek kadar azdır. Sıvı oranlarının zamanla değişimi incelendiğinde erime sürelerinin 7 saniye olduğu görülmektedir.



Şekil 3.21. Boru uzunluğunun şarj sürecinde FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimine etkisi

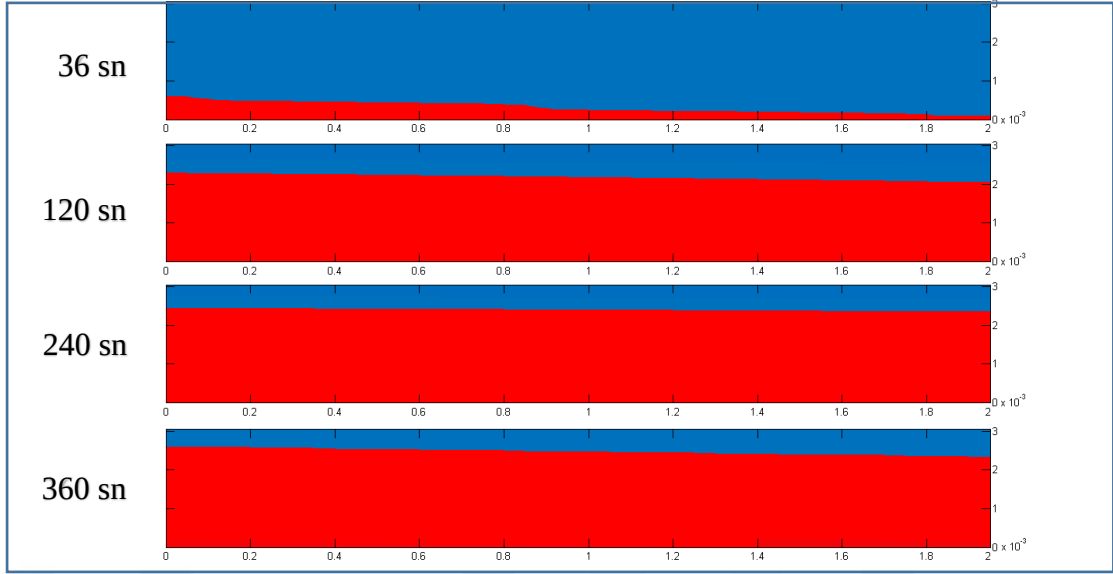
Faz değişiminden hemen sonra eğimin arttığı, sonrasında sıcaklık farkının azalmasıyla azaldığı ve eğimin tekrar arttığı görülmektedir. İkinci eğim artışının sebebi malzemenin tümünün faz değiştirmiş olmasıdır. Bu süreden sonra gizli ısı depolanmadığından yalnızca duyulur ısı depolaması gerçekleşmektedir. Boru uzunluklarının değişimine göre, uzunluk arttıkça sıcaklık daha geç yükselmiştir. Bu durumun sebebi ise boruya 65°C'de giren suyun, boru boyunca ısı kaybederek soğumasıdır. Boru uzunluğunun erime karakteristiğine etkisini görme adına, 36, 360,

540, 3600 saniye sonundaki birim uzunluk boyunca suyun soğuması incelendi. Aynı şartlar altında yalnızca boru uzunluğunu değiştirerek yapılan sayısal inceleme Şekil 3.22’de gösterilmektedir. 36 saniye sonunda boru boyunca soğuma 8 m uzunluğundaki boru için 8°C iken, 1 m uzunluğundaki boru için 1,8°C’dir. 360 saniye sonunda ise, suyun soğuması 6°C’ 1 m uzunluğundaki boru için 0,8°C’dir. Zaman arttıkça suyun soğuması azalmakta FDM kütlesi tümüyle eriyip, FDM sıcaklığı 65°C’a ulaştığında ise denge durumuna gelmektedir.



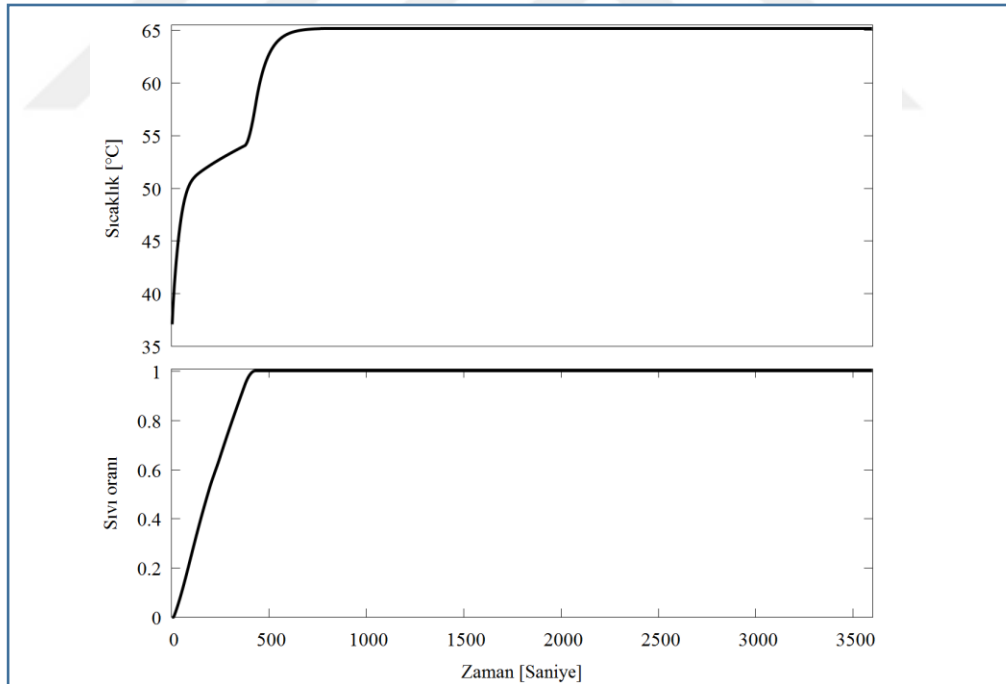
Şekil 3.22. Farklı boru uzunluklarında, şarj periyodunda suyun soğuması

2 m uzunluğundaki boru çevresindeki FDM kütlesinin, 36, 120, 240 ve 360. saniye sonunda sıcaklık değişimleri Şekil 3.23’de verilmiştir. Eriyen bölge kalınlığı borunun başlangıcında daha fazla iken, suyun ısı vererek soğuması sebebiyle borunun sonuna doğru daha incedir. 360. saniye sonunda FDM kütlesinin büyük bölümü erimiştir.



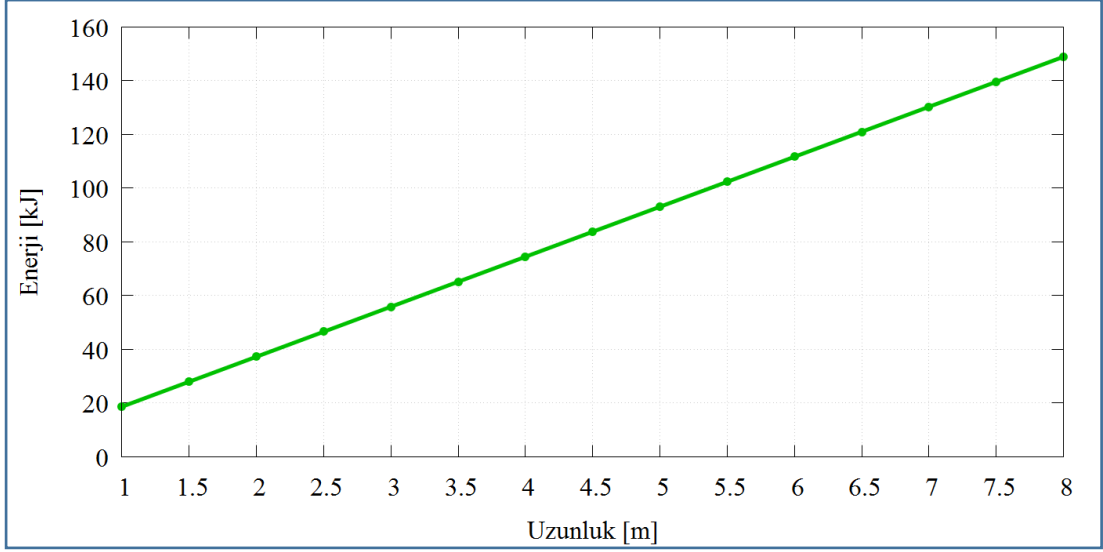
Şekil 3.23. Borunun farklı zamanlardaki sıvı oranının dağılımı (Su hızı 0,13 m/s, $d=5/16''$, $D/d= 1,64$, $L=2$ m)

Şekil 3.24 hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi verilmiştir, buna göre tüm kütlenin eridiği süre 417. saniyedir.



Şekil 3.24. 2 m uzunluğundaki borunun şarj sürecinde FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi

Şekil 3.25'te faz değiştiren malzemenin depoladığı enerjinin miktarı boru uzunluğuna göre doğrusal olarak artmaktadır. Şekil 3.25'deki doğrusal ilişkiyi kullanarak birim uzunluk başına depolanan/açığa çıkan enerji bulunduğundan sonra talep edilen enerjiye ulaşmak için boru uzunluğu belirlenebilir.



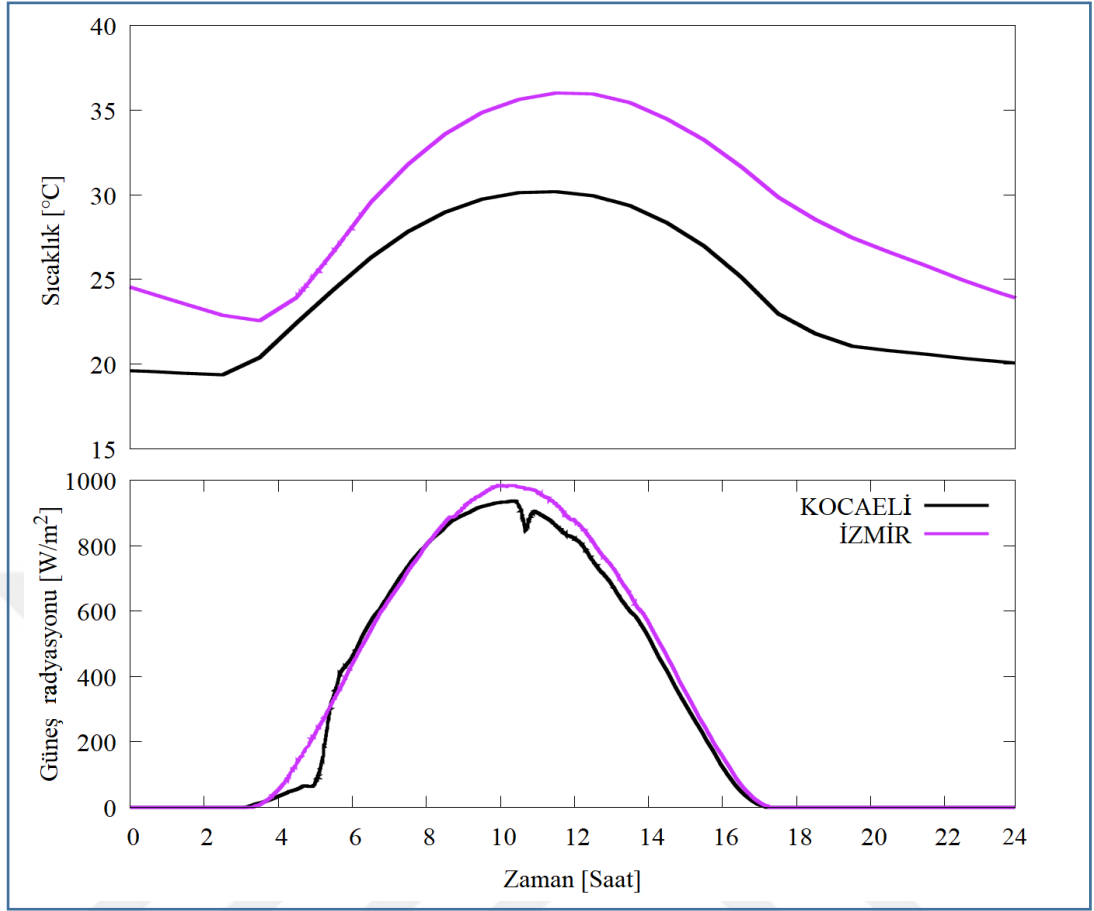
Şekil 3.25. Boru uzunluğuna göre depolanan enerji miktarları

3.5. Farklı Coğrafi Koşullar için Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Karşılaştırması

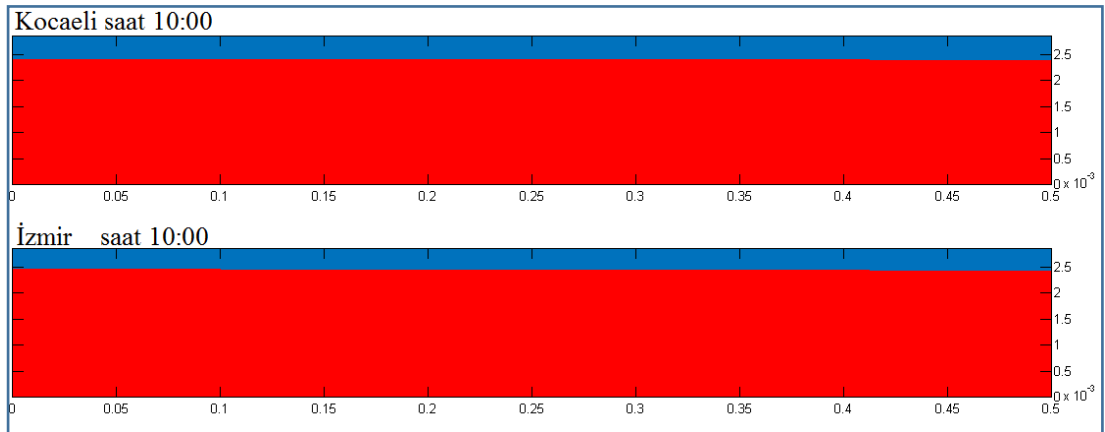
Bölgesel şartların, faz değiştiren malzemenin şarj süresine etkisini görme adına ölçüm verileri kullanılarak farklı faz değiştirme sıcaklıkları, farklı D/d oranları, farklı boru uzunlukları kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizler 1 Ağustos gününe ait rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu değerleri üzerinden İzmir ve Kocaeli illeri için yapılmıştır.

İzmir ve Kocaeli illeri için ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonun zamanla değişimi Şekil 3.26'da verilmiştir. 0,5 m uzunluğunda, D/d oranı 1,6 olan 3/8" çaplı boru için yapılan incelemede başlangıçta faz değiştiren malzeme kütlesi ve su sıcaklığı 35°C olarak alınmıştır. Yapılan incelemede 08:00 ile 14:00 arası faz değiştiren malzeme kütlesinin ısınma süreci incelenmiştir.

Şekil 3.27'de saat 10:00 için faz değiştiren malzeme kütlesindeki fazlar verilmiştir. İzmir'de sıvı fazda olan bölge Kocaeli'den daha fazladır. Boru çıkışına doğru sıvılaştan bölge kalınlığı her iki il sonucu için de daha azdır. Bunun sebebi giren sıcak suyun, soğuyarak enerjisini FDM kütlesine aktarmasıdır.



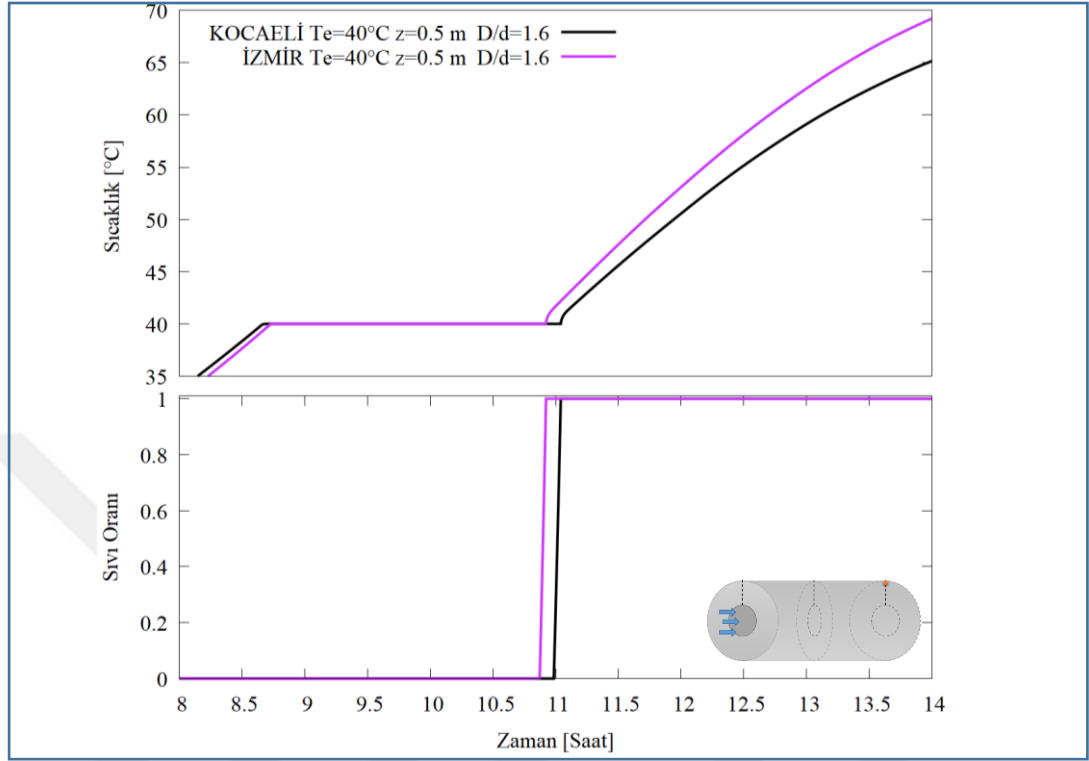
Şekil 3.26. Kocaeli ve İzmir için hava sıcaklığı ve güneş radyasyonunun zamanla değişimi [54]



Şekil 3.27. Kocaeli ve İzmir için 0,5 m uzunluktaki boru için saat 10:00’da alınan sıvı oranları ($D/d=1,6$, $T_e=40^\circ\text{C}$)

$T_e=40^\circ\text{C}$ olması durumunda saat 14:00’da her iki il için de tüm hacimde erime tamamlanmıştır. Bu durum Şekil 3.28’de verilmiştir. Isınma devam ederken Kocaeli için saat 08:40, İzmir için saat 08:45 civarında malzeme $39,9^\circ\text{C}$ ’ye ulaşmıştır. Bir süre eğim sıfıra çok yakın değerde azalmış ve 10:50 İzmir için 11:00 Kocaeli için faz

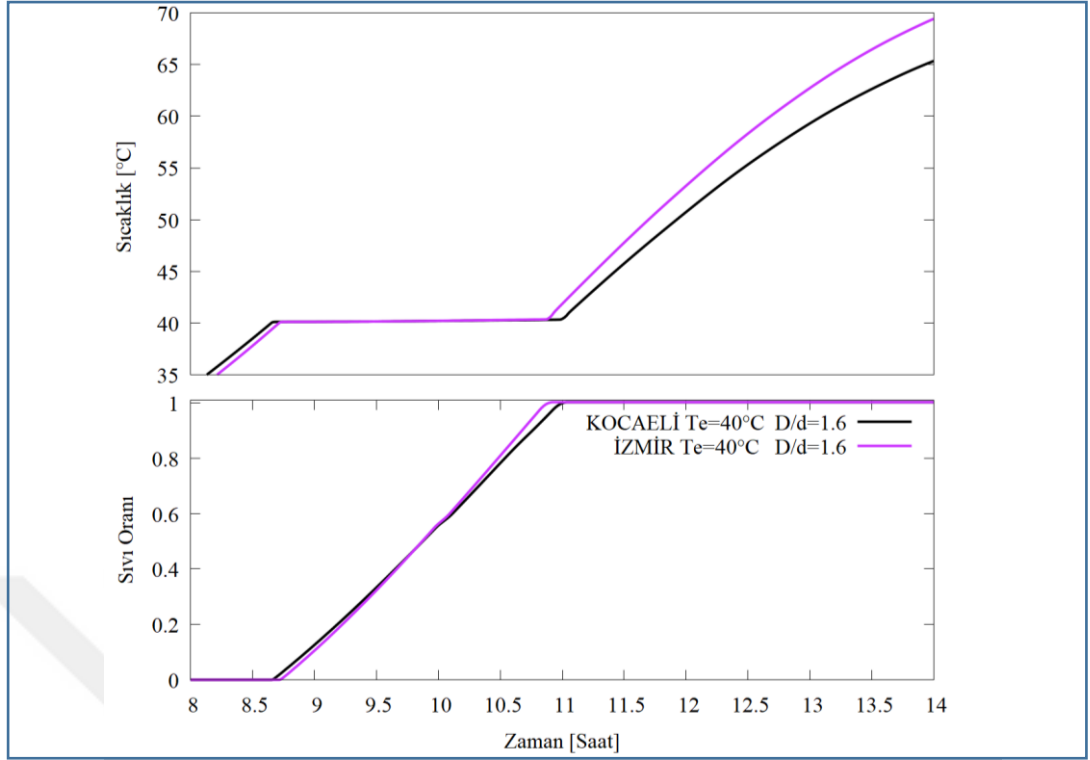
değişimi başlamıştır. Radyasyon şiddeti ve sıcaklık değerleri benzer olduğundan, faz değişimi İzmir için 10:48'de tamamlanırken, Kocaeli için 11:00'da tamamlanmıştır.



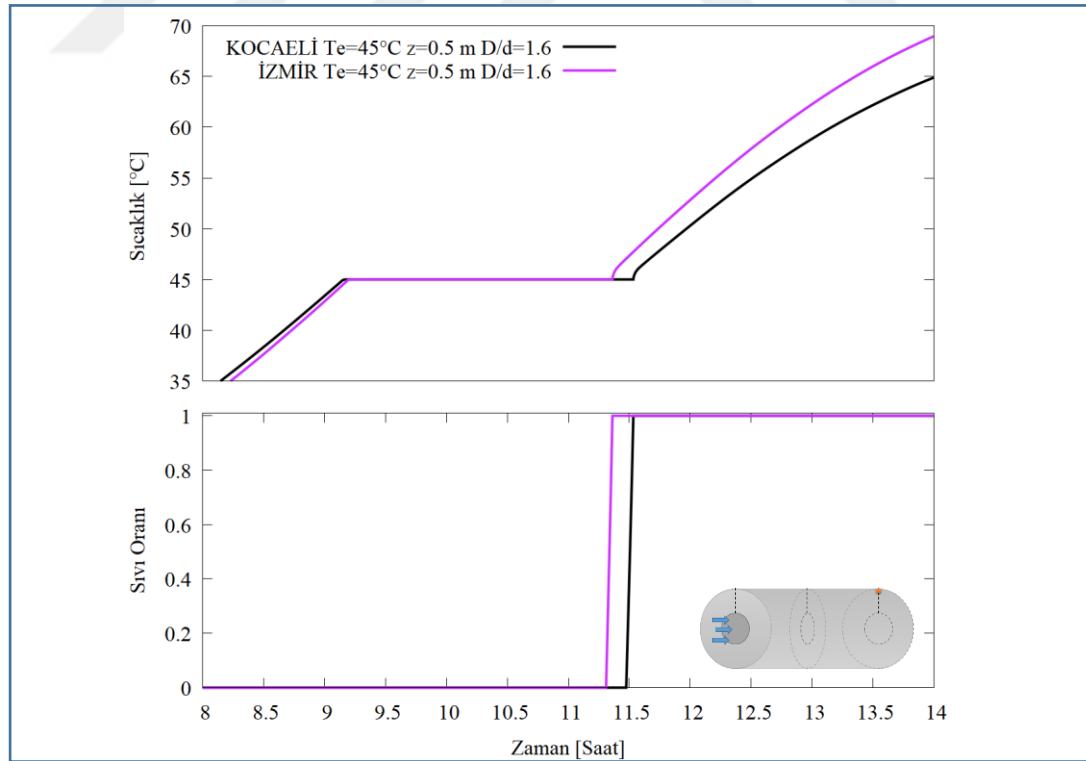
Şekil 3.28. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimi ($D/d=1,6$, $T_e=40^\circ\text{C}$)

Faz değişim süreleri Kocaeli için 3,5 dakika, İzmir için 3 dakikadır. Şekil 3.29'da verilen FDM hacminin ortalama sıcaklık ve ortalama sıvı oranının zamanla değişimi incelendiğinde, tüm FDM'in erimesi Kocaeli için 10:45 İzmir için 11:00 saatlerinde gerçekleşmiştir.

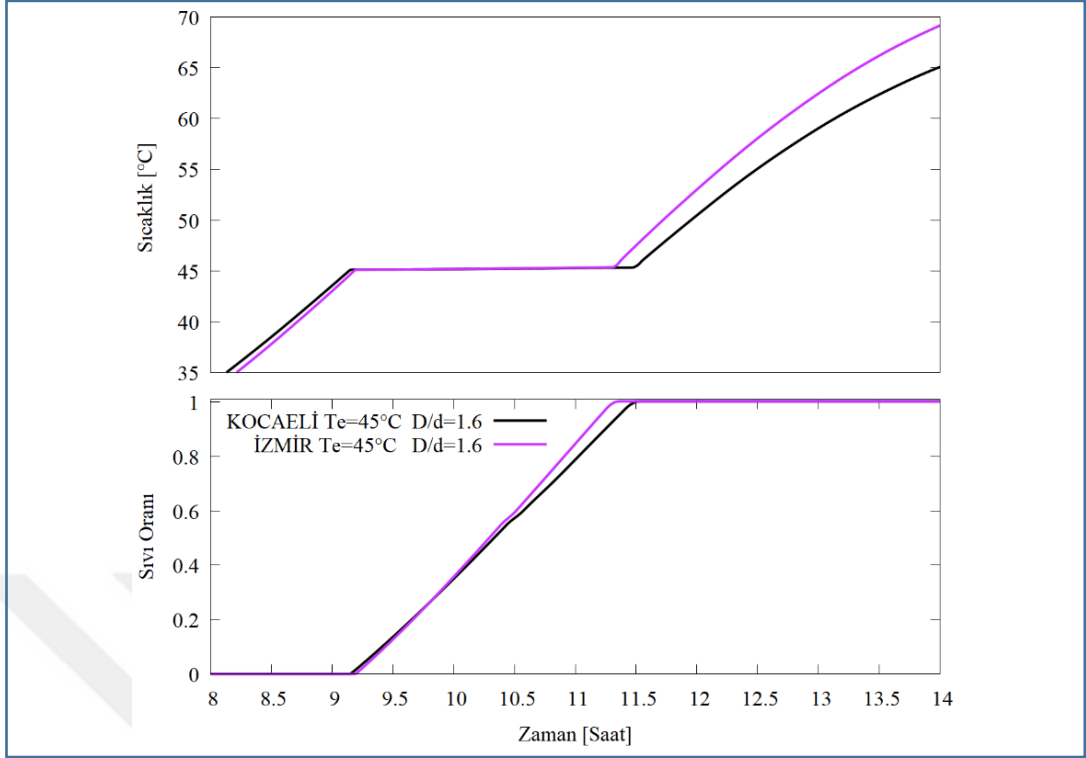
Erime sıcaklığının 45°C D/d oranının 1,6 olduğu durum incelendiğinde, Kocaeli ve İzmir için faz değişimi 11:30-12:00 arasında gerçekleşmiştir. Şekil 3.30'da en yüksek sıcaklık değeri İzmir için 73°C , Kocaeli için 67°C 'dir. Tüm kütlenin eridiği süreler Şekil 3.31'de verilmiştir. Kocaeli'de FDM kütlesinin tamamı saat 11:30 civarında erirken, İzmir'de tüm FDM kütlesi 11:10 civarında erimektedir. İzmir'de en yüksek sıcaklık değerinin fazla olması, daha yüksek erime sıcaklıklarına da çıkılabileceği anlamına gelmektedir. Kocaeli'de ise bu durum daha sınırlıdır.



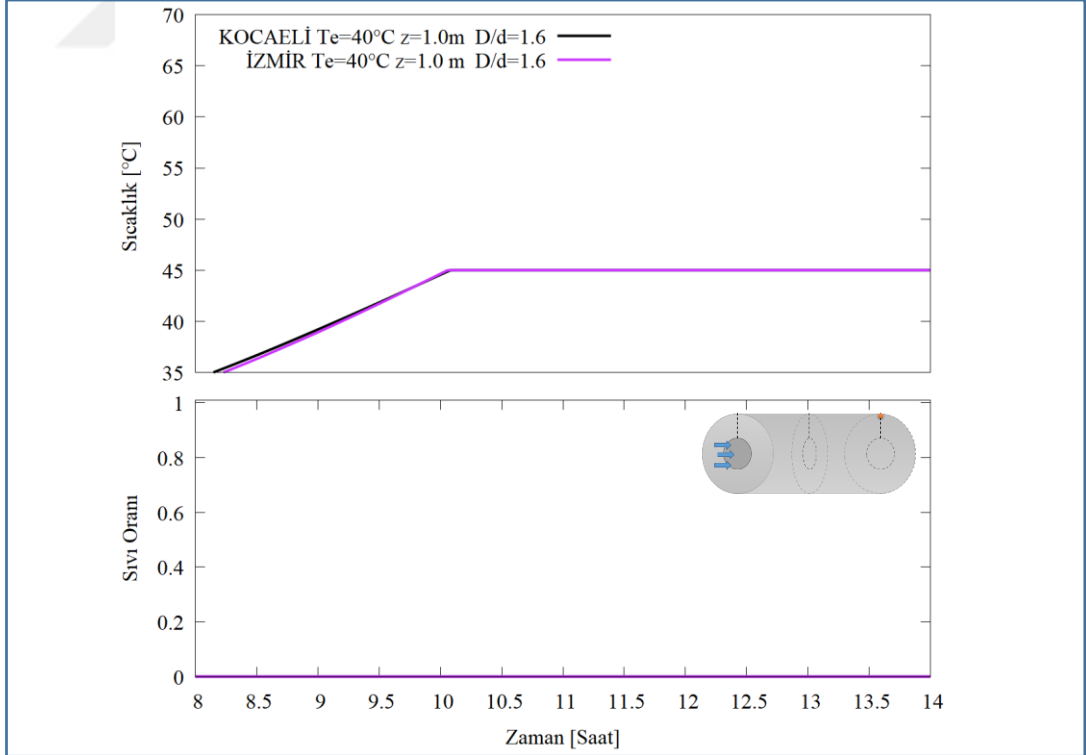
Şekil 3.29. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi ($D/d=1,6$, $Te=40^{\circ}C$, $L=0,5$ m)



Şekil 3.30. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimi ($D/d=1,6$, $Te=45^{\circ}C$)

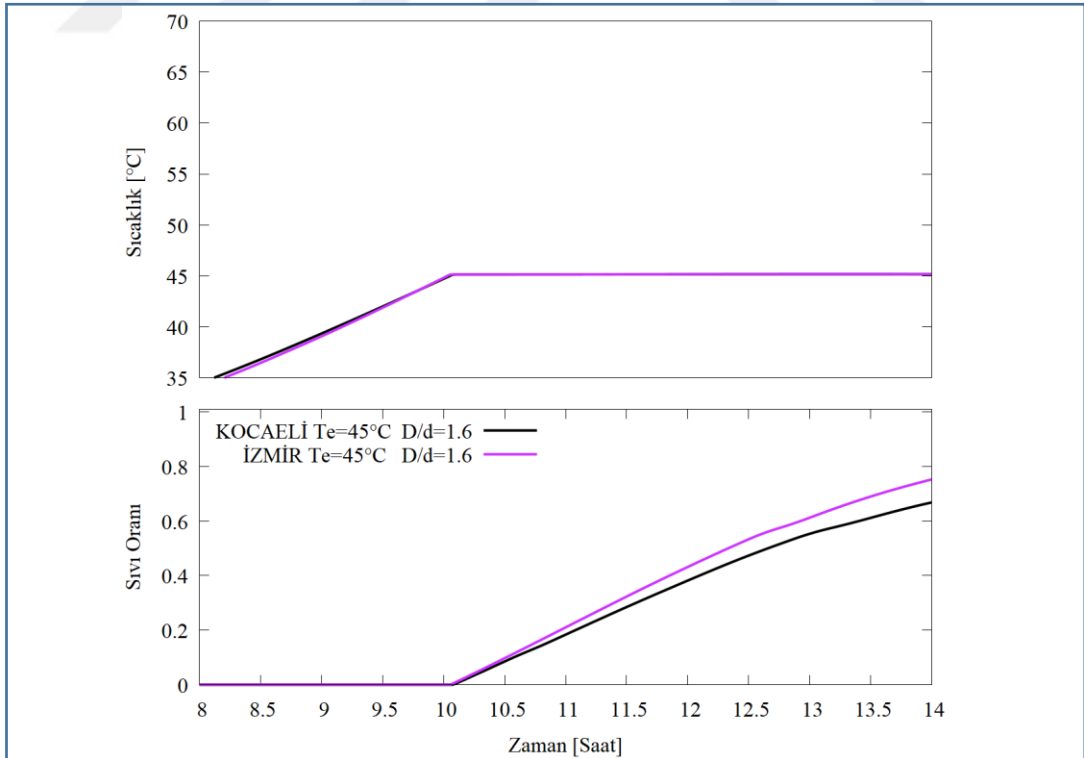


Şekil 3.31. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi ($D/d=1,6$, $T_e=45^{\circ}\text{C}$, $L=0,5$ m)

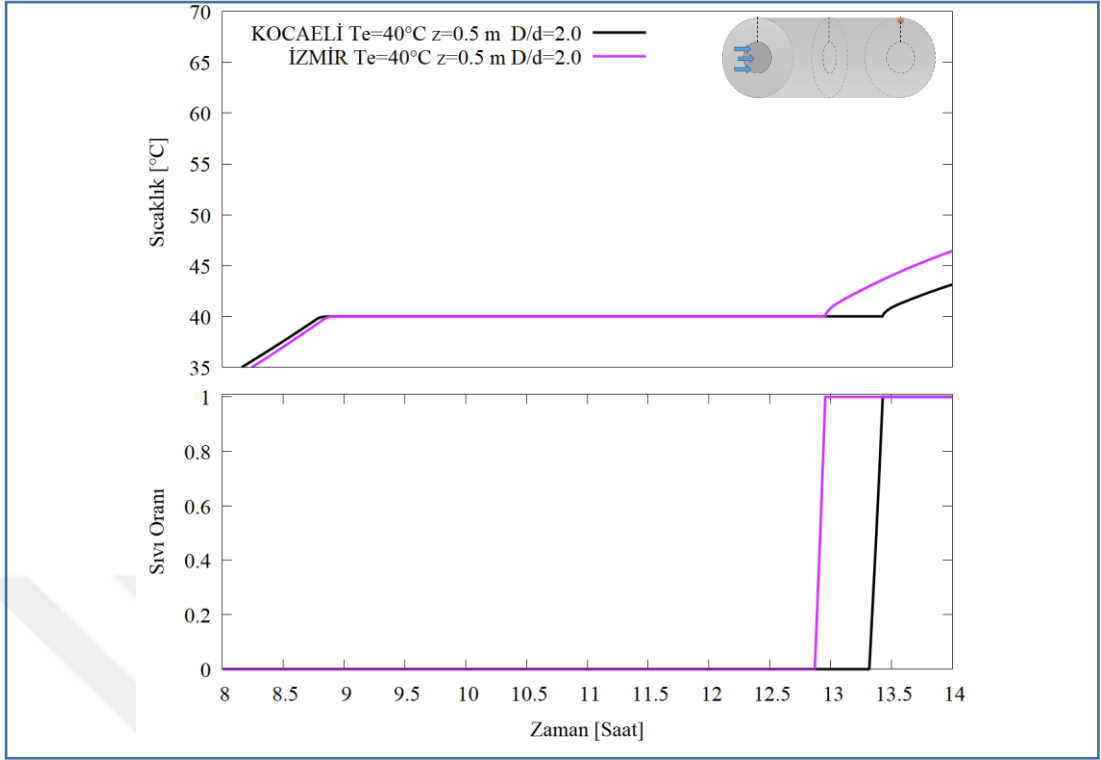


Şekil 3.32. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranının ve sıcaklığın zamanla değişimi ($D/d=1,6$, $T_e=45^{\circ}\text{C}$, $L=1,0$ m)

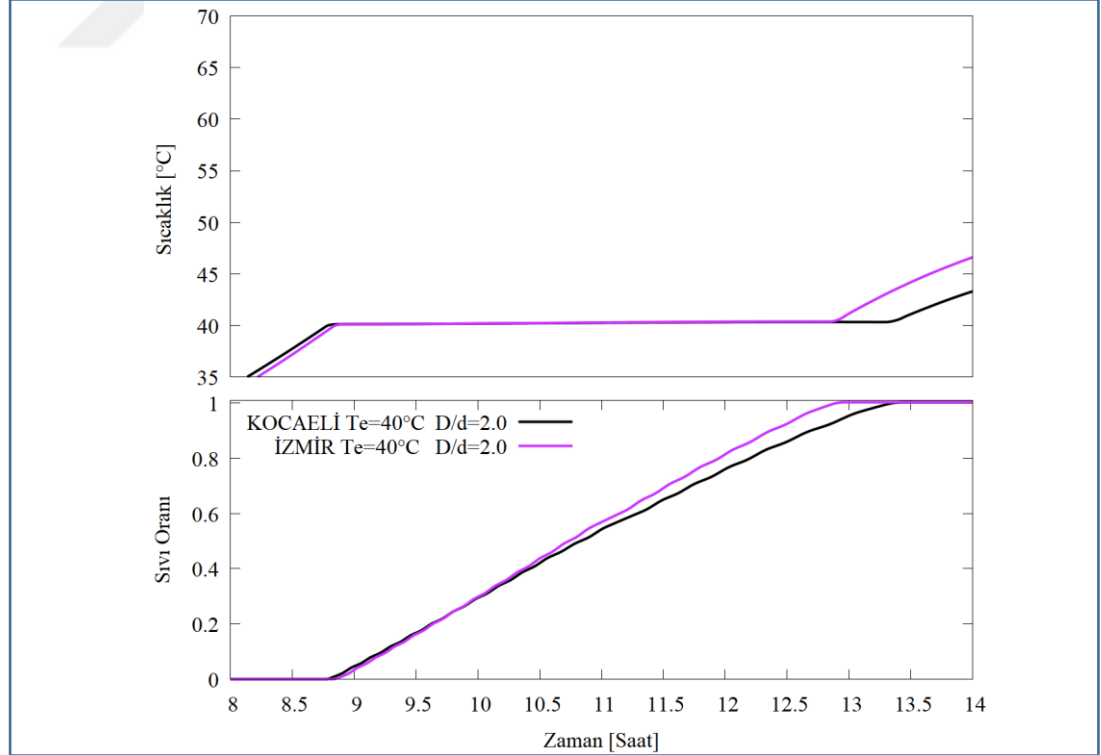
$T_e=45^\circ\text{C}$, D/d oranı 1,6 için boru uzunluğu 1,0 m olacak şekilde uzatılması durumundaki analiz Şekil 3.32’de verilmiştir. Şarj olması beklenen, 08:00-14:00 saat aralığında faz değişimi tamamlanamamıştır. Eksenel doğrultuda $z=1,0$ m’de radyal doğrultuda en dış hücrede sıcaklık değeri 45°C ’ye yaklaştıkça eğim azalmış ama faz değişim sıcaklığı olan $45,0^\circ\text{C}$ ’ye ulaşamamıştır. Şekil 3.33’de verilen ortalama sıcaklık ve sıvı oranı grafiklerinde boru girişinde faz değişiminin gerçekleştiği, ancak tüm kütle için tamamlanmadığı, toplam kütlenin Kocaeli için %63’ü İzmir için %75’inin faz değiştirdiği görülmektedir. $T_e=40^\circ\text{C}$ olan FDM için D/d oranı 2,0 olacak şekilde FDM kütlesi arttırıp inceleme yapılması durumunda sonuçlar Şekil 3.34’de verilmiştir. FDM kütlesinin eksenel doğrultuda $z=0,5$ ’de radyal doğrultuda en dış hücrede faz değişimi daha geç başlamış ve bitmiştir. İzmir’de FDM sıcaklığı 48°C ’ye ulaşmışken, Kocaeli’de bu değer 42°C ’de kalmıştır. Yıl içinde daha düşük sıcaklık ve güneş radyasyonu olacağından, D/d kalınlığı, uzunluk ve erime sıcaklığı tayini yapılacağından yüksek değerlerden kaçınılmalıdır. Şekil 3.35’te görüldüğü üzere, faz değişimi 12:58’de İzmir için, 13:25’de Kocaeli için tamamlanmıştır. İzmir’de FDM kütlesi ortalama sıcaklığının Kocaeli’den daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.33. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi ($D/d=1,6$, $T_e=45^\circ\text{C}$, $L=1,0$ m)



Şekil 3.34. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde sıvı oranın ve sıcaklığın zamanla değişimi ($D/d=2,0$, $T_e=40^\circ\text{C}$)



Şekil 3.35. Kocaeli ve İzmir için, FDM üzerinde hacimsel sıvı oranı ortalaması ve hacimsel sıcaklık ortalamasının zamanla değişimi ($D/d=2,0$, $T_e=40^\circ\text{C}$)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Erime katılaşma olayı temelinde yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen bulgular ışığında, güneş enerjili su ısıtma sisteminde faz değişim malzemesi kullanımı ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sonlu farklar metodu kullanılarak yapılan 1 boyutlu sayısal çözüm, ANSYS Fluent ticari yazılımı ile yapılan 2 boyutlu çözümden çok daha hızlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Çözümlerin 1 boyutlu olarak yapılmasının uygun olduğu görülmüştür.
- Depolama ünitesini oluşturan boru uzunluğu ve depolanan/açığa çıkan enerji arasında lineer bir ilişki vardır.
- Boru çapları büyüdükçe, ısı transferi daha hızlı gerçekleşmekte ve daha büyük enerji depolama kapasitesine sahip, yüksek kütlenin faz değişimi daha hızlı olmaktadır.
- En iyi termal enerji performansını alabilmek adına, çalışma şartlarına uygun olarak en uygun faz değişim malzemesi erime sıcaklığı tayini ile en uygun faz değişim malzemesinin seçimine pozitif etki edilebilmektedir.
- Boru içerisinde ortalama su akış hızının belirlenmesinde çalışma şartları için en uygun değere ulaşılmıştır. Bu yolla seçilen debi değerine ulaşılabilmektedir.
- Faz değiştiren malzeme kullanımının suyun soğumasını geciktirmiştir.
- Bölgelere göre uygun parametrelerin değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Çalışma koşulları ve uygun su hızı belirlenmeden, faz değiştiren malzeme seçimi yapılmamalıdır.

Yukarıda sunulan sonuçlar, faz değişim malzemesi kullanımında sistemin fiziki olarak imal edilip kurulmasından önce, simülasyonunun yapılmasını iyi performans alabilme adına zorunlu kılmaktadır. Faz değişim malzemesi entegre edilmiş güneş enerjili sıcak su ısıtma sistemlerinde kullanılabilecek olan bu program sayesinde değişken bölgesel şartlar için optimum malzeme, hız ve boyut seçimini imkanı oluşturmuştur.

İleride tüm yıl boyunca analizler yapılarak incelenen parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Termoeconomik optimizasyon yapılarak, sistemde elde edilen kullanılabilir enerji maliyetinin azaltılması sağlanabilir. Ayrıca farklı geometriler incelenebilir ve bu sonuçlar farklı sayısal yöntemlerle karşılaştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Doğanay H., Coşkun O., *Enerji kaynakları*, 3. baskı, Pegem Akademi, Ankara, 2017.
- [2] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı., Türkiye ulusal yenilenebilir enerji eylem planı, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, 1-40, 2014.
- [3] Trevor M. L., *Storing Energy with Special Reference to Renewable Energy Sources*, Elsevier, Cambridge, 2016.
- [4] Kozak M., Kozak Ş., Enerji Depolama Yöntemleri, *SDU Int Technol Sci*, 2012, 4(2), 17–29.
- [5] Mazman M., Gizli Isı Depolaması ve Uygulamaları, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2011, 183617.
- [6] Ehrlich R., Geller H. A., *Renewable Energy a First Course*, CRC Press, New York, 2018.
- [7] Raoux S., Wuttig M., *Phase Change Materials*, Springer, New York, 2009.
- [8] Kousksou T., Bruel P., Cherreau G., Leoussoff V., Rhafiki T. El., PCM storage for solar DHW From an unfulfilled promise to a real benefit, *Sol Energy*, 2011, 85(9), 2033–40.
- [9] Kumbur H., Özer Z., Özsoy H.D., Avcı E.D., Türkiye’de geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması, *III. Ulusal Yenilenebilir Enerji Sempozyumu*, Mersin, 19-21 Ekim 2005.
- [10] Maczulak A., *Renewable Energy: Sources and Methods*, Facts On File Inc., New York, 2010.
- [11] Kalogirou S.A., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Elsevier, California, 2009.
- [12] Yaprak Kutsal, Güneş Enerjisinin Bugünü ve Yarını: Türkiye İçin Çıkarımlar, *Zorlu Enerji*, 1-32, 2016.
- [13] Sharif M. K.A., Al-Abidi A.A., Mat S., Sopian K., Ruslan M. H., Sulaiman M.Y., Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems, *Renew Sustain Energy*, 2015, 42, 557–568.
- [14] Bundesnetzagentur, EEG in Zahlen 2016 Inhaltsverzeichnis, *Bundesnetzagentur*, 5-43, 2017.

- [15] Kapluhan E., Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme Güneş Enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu, *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, 2014, 29, 1-12.
- [16] Tuncalp B.K., SUCU M., Oğuz Y., Değişik İklim Şartlarında Bina İçerisinde Pasif Isıtma Ve Soğutma Sistemlerinin Kullanılabilirliği, *IV Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 16-18 Ekim 2002.
- [17] <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx/>, (Ziyaret tarihi: 5 Haziran 2018).
- [18] Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I., *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 2008.
- [19] Yılmaz M.Ö., Atık Isının Değerlendirilmesi İçin Termal Enerji Depolama Sistemleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2012, 304700.
- [20] Zeki M., Thermal Energy Storage Methods and Application in Buildings, *Politek Dergisi*, 2010, 10, 33–42.
- [21] Fleischer A.S., *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications*, Springer, New York, 2015.
- [22] Fang Y., Niu J., Deng S., Optimizing LHS system using PCM in a tube-in-tank design for emergency cooling, *Energy Procedia*, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.474.
- [23] Gong Z., Majumdar A., Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a shell-and-tube latent heat energy storage exchanger, *Appl Therm Eng*, DOI: 10.1016/S1359-4311(96)00054-3.
- [24] Mehling H., Hippeli S., Hiebler S., Cabeza L.F., PCM-module to improve hot water heat stores with stratification, *Renew Energy*, DOI: 10.1016/S0960-1481(02)00108-8.
- [25] Ibáñez M., Cabeza L.F., Solé C., Roca J., Nogués M., Modelization of a water tank including a PCM module, *Appl Therm Eng*, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.022.
- [26] Bony J., Citherlet S. Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials, *Energy Build*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.10.017.
- [27] Shukla A., Buddhi D., Sawhney R. L., Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium A review, *Renew Sustain Energy*, DOI: 10.1016/j.rser.2009.01.024.
- [28] Mazman M., Cabeza L.F., Mehling H., Nogues M., Evliya H., Paksoy H. O., Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Renew Energy*, DOI: 10.1016/j.renene.2008.10.016.

- [29] Gracia A. De, Oró E., Farid M. M., Cabeza L.F., Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder, *Appl Therm Eng*, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.043.
- [30] Haillot D., Goetz V., Py X., Benabdelkarim M., High performance storage composite for the enhancement of solar domestic hot water systems Part 1: Storage material investigation, *Sol Energy*, DOI:10.1016/j.solener.2011.02.016.
- [31] Haillot D., Nepveu F., Goetz V., Py X., Benabdelkarim M. High performance storage composite for the enhancement of solar domestic hot water systems Part 2: Numerical system analysis. *Sol Energy*, DOI:10.1016/j.solener.2011.09.006.
- [32] Khalifa A. J. N., Suffer K. H., Mahmoud M. S., A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material, *Exp Therm Fluid Sci*, DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.05.017.
- [33] Tay N. H. S., Bruno F., Belusko M., Experimental investigation of dynamic melting in a tube-in-tank PCM system, *Appl Energy*, DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.035.
- [34] Murray R.E., Groulx D., Experimental study of the phase change and energy characteristics inside a cylindrical latent heat energy storage system: Part 2 simultaneous charging and discharging, *Renew Energy*, DOI: 10.1016/j.renene.2013.10.004.
- [35] Padovan R., Manzan M., Genetic optimization of a PCM enhanced storage tank for Solar Domestic Hot Water Systems, *Sol Energy*, DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.034.
- [36] Tehrani S. S. M., Taylor R. A., Saberi P., Diarce G., Design and feasibility of high temperature shell and tube latent heat thermal energy storage system for solar thermal power plants, *Renew Energy*, DOI: 10.1016/j.renene.2016.04.036Get.
- [37] Joybari M., Haghighat F., Seddegh S., Numerical investigation of a triplex tube heat exchanger with phase change material: Simultaneous charging and discharging, *Energy Build*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.034.
- [38] Pardiñas Á., Alonso M. J., Diz R., Kvalsvik K. H., Fernández-Seara J. State of the art for the use of phase change materials in tanks coupled with heat pumps, *Energy Build*, DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.062.
- [39] Gautam A., Chamoli S., Kumar A., Singh S., A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system, *Renew Sustain Energy*, DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.104.
- [40] Fang Y., Niu J., Deng S., Numerical analysis for maximizing effective energy storage capacity of thermal energy storage systems by enhancing heat transfer in PCM, *Energy Build*, DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.12.006.

- [41] Jiji L. M., *Heat conduction*, 3rd ed., Springer, New York, 2009.
- [42] Ozisik M. N., *Heat Conduction*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [43] Gupta S. C., *The Classical Stefan Problem*, Elsevier, Amsterdam ,2003.
- [44] Khalid M. Z., Zubair M., Ali M., A Novel Method for Analytical Solution of Transient Heat Conduction and Stefan Problem in Cylindrical Coordinate, *Ieee Xplore*, DOI: 10.1109/IBCAST.2016.7429921.
- [45] Khalid M.Z., Zubair M., Ali M., An analytical method for the solution of two phase Stefan problem in cylindrical geometry. *Appl Math Comput*, DOI:10.1016/j.amc.2017.09.013.
- [46] Archibold A.R., Rahman M.M., Aguilar J.G., Goswami D.Y., Stefanakos E.K., Romero M., Phase change and heat transfer numerical analysis during solidification on an encapsulated phase change material, *Energy Procedia*, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.220.
- [47] Teamah H.M., Lightstone M.F., Cotton J.S., An alternative approach for assessing the benefit of phase change materials in solar domestic hot water systems, *Sol Energy*, 10.1016/j.solener.2017.10.033.
- [48] Teamah H.M., Lightstone M.F., Cotton J.S., Numerical Investigation and Nondimensional Analysis of the Dynamic Performance of a Thermal Energy Storage System Containing Phase Change Materials and Liquid Water, *J Sol Energy Eng*, DOI: 10.1115/1.4034642.
- [49] Bouadila S, Fteïti M, Oueslati MM, Guizani A, Farhat A. Enhancement of latent heat storage in a rectangular cavity: Solar water heater case study. *Energy Convers Manag*, 2014; 78: 904–12.
- [50] Cabeza L.F. , *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 1st ed., Elsevier, New York, 2015.
- [51] Kośny J., *PCM-Enhanced Building Components*, 1st ed., Springer, Boston, 2015.
- [52] Tabassum T. A., Numerical Study of a Double Pipe Latent Heat Thermal Energy Storage System, MSc Disertation, McGill University, 2009.
- [53] Çengel Y., Afshin J. G., *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 5th ed., New York, 2015.
- [54] <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>, (Ziyaret tarihi: 13 Kasım 2018).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Sisman S.**, Arıcı M., Secilmiş M, Karabay H., Numerical Investigation of the Integration of Phase Change Material on Solar Domestic Hot Water System, *International 100% Renewable Energy Conference*, İstanbul, Turkey, 7-9 May 2018.



ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Kocaeli’nde doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Kocaeli’nde tamamladı. 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2014 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2015-2018 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2017 yılından beri Türk-Alman Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

