

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EŞ EKSENLİ ÜÇ BORULU ISI EŞANJÖRLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MADDE
KULLANARAK ISIL ENERJİ DEPOLANMASININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Birol BAŞAL

**AĞUSTOS 2007
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EŞ EKSENLİ ÜÇ BORULU ISI EŞANJÖRLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MADDE
KULLANARAK ISIL ENERJİ DEPOLANMASININ İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Birol BAŞAL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Makina Yüksek Mühendisi"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30.07.2007
Tezin Savunma Tarihi : 28.08.2007**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Tahir YAVUZ
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümünde hazırlamış olduğum bu çalışmada Eş Eksenli Üç Borulu Isı Eşanjörlerinde Faz Değiştiren Madde Kullanarak Isıl Enerji Depolanmasının İncelenmesi konusu sayısal olarak incelenmiştir.

Bu konuda çalışma imkânı vermesinden ve çalışmanın yürütülmesi sırasında yardımını esirgememesinden dolayı danışman hocam sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Biol BAŞAL
Trabzon 2007

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	X
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Duyulur Isı Depolama.....	2
1.2.1. Sıvı Bazlı Duyulur Isı Depolama Maddeleri.....	3
1.2.2. Katı Bazlı Duyulur Isı Depolama Maddeleri	3
1.3. Gizli Isı Depolama.....	4
1.3.1. Organik FDM'ler	9
1.3.1.1. Organik Bileşikler.....	9
1.3.1.1.1. Parafinler	10
1.3.1.1.2. Parafin Olmayan Organik Bileşikler.....	11
1.3.1.2. Organik Ötektikler	11
1.3.2. İnorganik FDM'ler.....	12
1.3.2.1 İnorganik Bileşikler	12
1.3.2.2. İnorganik Ötektikler.....	14
1.4. FDM'lerin Ömürleri	15
1.5. Gizli Isı Depolama Sistemlerinin Analizi	15
1.5.1. Tam Analitik Çözümler	16
1.5.2. İntegral Metot.....	16
1.5.3. Hareketli Isı Kaynağı Yöntemi.....	16
1.5.4. Pertürbasyon Yöntemi	16
1.5.5. Sayısal Yöntemler.....	17

1.6.	Literatür Araştırması.....	17
1.7.	Tezin Amacı ve Kapsamı	20
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	21
2.1.	Problemin Tanımı	21
2.2.	Problemin Matematiksel Olarak Modellenmesi.....	22
2.2.1.	Faz Değiştiren Maddenin Isıl Davranışı	22
2.2.2.	Isı Transfer Akışkanının Isıl Davranışı.....	26
2.3.	Denklemlerin Ayrıklaştırılması	30
2.3.1.	Faz Değiştiren Maddenin Isıl Davranışını İfade Eden Denklemlerinin Ayrıklaştırılması	33
2.3.2.	Isı Transfer Akışkanının Isıl Davranışını İfade Eden Enerji Denkleminin Ayrıklaştırılması.....	36
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	37
3.1.	Kütleli Debinin Isı Deposunun Performansı Üzerindeki Etkisi.....	40
3.1.1.	Maddenin Yerleştirildiği Halkasal Aralığın Kalınlığının 1 cm Olması Durumu	41
3.1.2.	Maddenin Yerleştirildiği Halkasal Aralığın Kalınlığının 2 cm Olması Durumu	51
3.1.3.	Maddenin Yerleştirildiği Halkasal Aralığın Kalınlığının 3 cm Olması Durumu	59
3.2.	Geometrinin Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi.....	67
4.	SONUÇLAR	81
5.	ÖNERİLER	83
6.	KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Günümüzde birincil konumdaki fosil enerji kaynaklarının bir yandan tükeniyor olması ve diğer yandan da bu kaynaklardan sağlanan enerjinin pek çok çevre sorunlarına yol açıyor olması hem mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanımı hem de yeni ve yenilenebilir kaynakların araştırılması ile ilgili çalışmaları önemli hale getirmiştir. Enerjinin verimli kullanılmasında enerji depolamanın, özellikle de ısıl enerji depolamanın önemli bir yeri vardır. Isıl enerji depolama seçenekleri arasında da, yüksek yoğunlukta ve neredeyse sabit sıcaklıkta enerji depolayabilme gibi üstünlükleri nedeniyle faz değiştiren maddelerin (FDM) kullanıldığı gizli ısı depolama sistemleri birinci sırada yer almaktadır.

Bu çalışmada, ısı deposu olarak eş eksenli üç borulu bir ısı eşanjörü göz önüne alınmış ve bu eşanjörde en içteki boru ile ikinci boru arasındaki halkasal aralığa yerleştirilmiş olan FDM'nin, en içteki borudan ve dıştaki halkasal aralıktan geçen bir ısı transfer akışkanını aracılığıyla eritilerek ısı depolanması sırasındaki ısıl davranışı sayısal olarak incelenmiştir.

Çalışmada ısı transfer akışkanının kütleli debisi ve eşanjöre giriş sıcaklığı ile eşanjörün karakteristik geometrik büyüklüklerinin ısı deposunun performansına etkileri detaylı olarak incelenmiş ve buna bağlı olarak en uygun çalışma koşulları ve geometrik büyüklükler belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca, eş eksenli üç borulu ısı eşanjörü şeklindeki bir ısı deposunun şarj edilme süresi bakımından uygulamada mevcut olan iki borulu eşanjör şeklindeki ısı depolarından kat kat üstün olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz Değiştiren Maddeler, Gizli Isı Depolama, Isı Eşanjörleri, Hareketli Sınır Problemleri, Entalpi Metodu, Sonlu Farklar Yöntemi, Değişken Doğrultulu İmplicit Metot.

SUMMARY

An Investigation on Thermal Energy Storage in Triple Concentric-Tube Heat Exchangers by Using Phase Change Materials

Fossil fuels serving as primary energy sources today are not unlimited in the amount. Furthermore, the emissions related to the use of fossil fuels result in so many environmental problems. For these reasons, studies on both energy efficiency enhancement of current energy sources and improvement of renewable energy utilization systems have become very important. Using thermal energy storage systems can be considered as one of the important ways of efficient energy utilization. Among the thermal energy storage systems, latent heat storage systems are superior because of their high density energy storage capacity at a nearly constant phase change temperature.

In this study, a triple concentric-tube heat exchanger type heat storage system is considered. In the apparatus it is assumed that the phase change material (PCM) located in the annulus formed by the innermost tube and the middle tube melts by exchanging heat with a fluid flowing in the innermost tube and in the outer annulus and the energy storage is accomplished in this way and the thermal behavior of energy storage system under consideration is investigated numerically.

In the present study, the effects of the inlet temperature and the mass flow rate of heat transfer fluid and the characteristic geometrical parameters of the heat exchanger on the storage performance is investigated in detail. Based on these detailed parametric studies, the most convenient operating conditions and geometric characteristics of the heat exchanger are determined. Furthermore, the charging rates of the triple concentric-tube heat exchanger type storage system considered in this study and the classical double concentric-tube heat exchanger type storage system are compared and it is obtained that the former performs several times better than the latter.

Key Words: Phase Changing Materials, Latent Heat Storage, Heat Exchangers, Moving Boundary Problems, Enthalpy Method, Finite Difference Method, Alternating Direction Implicit Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık entalpi değişimi (a) İzotermal faz değiştirme (b) Bir sıcaklık aralığında faz değiştirme	5
Şekil 2.	Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması[8].....	9
Şekil 3.	Kullanılan ısı deposunun şematik gösterimi.....	21
Şekil 4.	Boru yüzeylerindeki ısı akıları.....	26
Şekil 5.	Akışkan için seçilen bir kontrol hacmi.....	27
Şekil 6.	Eş eksenli üç borulu ısı deposu kesitinin gösterimi	37
Şekil 7.	İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	42
Şekil 8.	İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	43
Şekil 9.	Çeşitli debilerde akışkan giriş sıcaklığının deponun şarj edilme süresi üzerindeki etkisi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$ için)	43
Şekil 10.	İç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	44
Şekil 11.	Çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	44
Şekil 12.	Ara yüzlerin çeşitli zamanlarda eksenel doğrultudaki konumu ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	48
Şekil 13.	$Fo_r = 80$ için çeşitli debilerde ara yüzlerin radyal konumlarının eksenel doğrultu ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	48
Şekil 14.	$Fo_r = 20$ için çeşitli eksenel konumlarda sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	49
Şekil 15.	Çeşitli debiler için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	49
Şekil 16.	Depolanan enerji bileşenlerinin zamanla değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	50
Şekil 17.	Depolanan toplam enerjinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)	50
Şekil 18.	İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02 \text{ m}$)	53

Şekil 19.	İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	54
Şekil 20.	Çeşitli debilerde akışkan giriş sıcaklığının deponun şarj edilme süresi üzerindeki etkisi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	54
Şekil 21.	İç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	55
Şekil 22.	Çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	55
Şekil 23.	Ara yüzlerin çeşitli zamanlarda eksenel doğrultudaki konumu ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	56
Şekil 24.	$Fo_r = 300$ için çeşitli debilerde ara yüzlerin radyal konumlarının eksenel doğrultu ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	56
Şekil 25.	$Fo_r = 100$ için çeşitli eksenel konumlarda sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	57
Şekil 26.	Çeşitli debiler için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	57
Şekil 27.	Depolanan enerji bileşenlerinin zamanla değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	58
Şekil 28.	Depolanan toplam enerjinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)	58
Şekil 29.	İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	61
Şekil 30.	İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	62
Şekil 31.	Çeşitli debilerde akışkan giriş sıcaklığının deponun şarj edilme süresi üzerindeki etkisi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	62
Şekil 32.	İç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	63
Şekil 33.	Çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	63
Şekil 34.	Ara yüzlerin çeşitli zamanlarda eksenel doğrultudaki konumu ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	64
Şekil 35.	$Fo_r = 600$ için çeşitli debilerde ara yüzlerin radyal konumlarının eksenel doğrultu ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	64
Şekil 36.	$Fo_r = 200$ için çeşitli eksenel konumlarda sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	65
Şekil 37.	Çeşitli debiler için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	65
Şekil 38.	Depolanan enerji bileşenlerinin zamanla değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)	66

- Şekil 39. Depolanan toplam enerjinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m) 66
- Şekil 40. Farklı r_1 değerleri için deponun şarj olma süresinin kütleli debi ile değişimi
(a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m 68-69
- Şekil 41. Farklı r_1 değerleri için deponun şarj olma süresinin akışkanın giriş sıcaklığı ile değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m,
(c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m 71-72
- Şekil 42. Farklı r_1 değerleri için iç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişleri
(a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m 72-73
- Şekil 43. Farklı r_1 değerleri için ara yüzlerin radyal konumlarının aksel doğrultu ile değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m ve $For = 80$ için,
(b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m ve $For = 300$ için, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m ve
 $For = 600$ için 74-75
- Şekil 44. Farklı r_1 değerleri için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m ve $For = 20$ için,
(b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m ve $For = 100$ için, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m ve
 $For = 200$ için 77-78
- Şekil 45. Farklı r_1 değerleri için depolanan toplam enerjinin zamanla değişimi
(a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m 78-79
- Şekil 46. Depolanabilecek maksimum toplam enerjinin r_1 'e göre değişimi 80

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Duyulur ısı depolama maddelerinin termofiziksel özellikleri [3].	4
Tablo 2. Duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerinin enerji depolama kapasitesi bakımından karşılaştırılması [2].	5
Tablo 3. FDM'lerin dönüşüm sıcaklıklarına göre kullanıldıkları bazı uygulamalar [1,5].	7
Tablo 4. Bazı parafinlerin termofiziksel özellikleri [4,8,9].	10
Tablo 5. Bazı parafin olmayan organik bileşiklerin termofiziksel özellikleri [4,8,10].	11
Tablo 6. Bazı organik ötektik bileşiklerin termofiziksel özellikleri [8].	12
Tablo 7. Bazı hidrat tuzlarının termofiziksel özellikleri [4,8].	12
Tablo 8. Kalınlaştırıcı ve çekirdeklendirici madde kullanımının bazı FDM'lerin aşırı soğumaya maruz kaldıkları sıcaklık aralığı üzerindeki etkisi [4].	14
Tablo 9. Bazı inorganik ötektik bileşiklerin termofiziksel özellikleri[8].	14
Tablo 10. Seçilen $r_2 - r_1$ kalınlıkları ve r_1 yarıçap değerleri	39
Tablo 11. Isı depolama maddesi olarak kullanılan RT 52'nin termofiziksel özellikleri	40
Tablo 12. Suyun termofiziksel özellikleri.....	40

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Yüzey alanı
c	: Özgül ısı
D	: Çap
h	: Isı taşınım katsayısı
H	: Entalpi
H_s	: Doyma entalpisi
k	: Isı iletim katsayısı
L	: Eşanjörün uzunluğu
\dot{m}	: Akışkanın kütleli debisi
M	: Eksenel doğrultudaki ağ sayısı
N	: Radyal doğrultudaki ağ sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
q''	: Isı akısı
Q_D	: Depolanan duyulur ısı
Q_G	: Depolanan gizli ısı
$Q_{T,max}$: Depolanan maksimum toplam ısıl enerji
r	: Radyal doğrultu
R	: Boyutsuz radyal doğrultu
Re	: Reynolds sayısı
Ste	: Stefan sayısı
t	: Zaman
T	: Faz değiştiren maddenin sıcaklığı
T_b	: Faz değiştiren maddenin ve akışkanın başlangıç sıcaklığı
T_f	: Akışkanın sıcaklığı
T_m	: Faz değiştiren maddenin dönüşüm sıcaklığı
T_g	: Akışkanın giriş sıcaklığı
U	: Akışkanın ortalama hızı
z	: Eksenel doğrultu
Z	: Boyutsuz eksenel doğrultu

α	: Isı yayılım katsayısı
ε	: Faz değiştirme aralığının yarısı
λ	: Gizli ısı
ϕ	: Boyutsuz sıcaklık
ψ	: Boyutsuz entalpi
\forall	: Hacim

Alt indisler

f	: Isı transfer akışkanı
h	: Hidrolik ap
i,k	: Koordinat indisi
p	: Faz değiştiren madde

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyadaki fosil enerji kaynakları artan sanayileşme ve konfor ihtiyacı nedeniyle hızla azalmaktadır. Ayrıca soğuk savaş döneminin sona ermesiyle tek kutuplu hale gelen yerkürede “enerji kaynaklarının paylaşımı” uluslar arası anlaşmazlıkların ve hatta savaşların temel kaynağı haline gelmiştir. Fosil enerji kaynaklarının çevre üzerindeki zararlı etkileri de göz önüne alındığında mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Fizikte enerji “iş yapabilme yeteneği” ya da benzer bir ifadeyle “değişiklik yapabilme yeteneği” olarak tanımlanmakta, ancak biz onu günlük yaşantıda hayatımızı ne denli kolaylaştırdığını görerek daha iyi anlamaktayız. Enerjinin her türlü üretim, dönüşüm, iletim ve kullanım faaliyeti küresel anlamda kirlenmeye, bu kirlenmenin en önemli sonuçlarından birisi olan iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu konuda, bilim insanlarına ve mühendislere büyük sorumluluklar düşmektedir. Bu sorumlulukların başında temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin teknolojilerin geliştirilmesi ve mevcut enerji dönüştürme sistemlerinin verimlerinin yükseltilmesi için çaba harcanması sayılabilir. Bunlar kadar önemli ve öncelikli bir konu da, toplumların gelişmişlik düzeyi ölçütünün yeniden tanımlanmasıdır. Bu ölçüt belki de tüketilen her birim enerjinin maliyetinin yanı sıra, birincil kaynaklardan başlayarak kullanılmasına kadar her aşamada çevreye verilen zararı da içerecek şekilde tanımlanan bir “akıllı enerji kullanım faktörü” şeklinde olabilir.

Birincil kaynaklar olarak fosil yakıtlarda kimyasal enerji, bazı radyoaktif elementlerde nükleer enerji, güneşte ışınım enerjisi, rüzgâr, akarsular ve gelgit olayları gibi doğal kaynaklarda hareket enerjisi formundaki tüm enerji türleri; çeşitli enerji dönüşüm sistemleri aracılığıyla mekanik enerji, elektrik enerjisi ya da ısı enerjisi şekline dönüştürüldükten sonra günlük yaşantımıza girmektedir.

Doğadaki güneş ve rüzgâr gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları yapıları gereği süresizdir. Örneğin güneş enerjisi yalnızca gündüz saatlerinde mevcuttur. Enerji depolama bu mevcut enerjinin daha sonra ihtiyaç duyulduğu zamanlarda kullanılmak üzere fazla olduğu durumlarda korunması ve kullanılabilirliğinin yükseltilmesinde önemli bir rol

oyun. Enerjinin depolanması, enerjinin kullanılacağı sistemlerde yük dengelemesi sağlayacağından sistem performansını iyileştirir. Fazla enerjinin depolanması enerji giderlerinin azaltılmasını sağlar. Bunun yanında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması fosil yakıtlara dayanan enerji kaynaklarının daha az kullanılmasına yol açacağından hava kirliliğinin azalmasına önemli katkı sağlar. Enerji depolama yöntemleri genel olarak mekanik, kimyasal, manyetik, biyolojik ve ısı enerjinin depolanması şeklinde sınıflandırılabilir [1].

Isıl enerji depolama sistemleri bir maddenin ısıtılması (veya soğutulması) veya faz değiştirmesi yoluyla enerji depolar. Isıl enerji depolama, binaların ısıtılmasında ve soğutulmasında veya atık ısıdan faydalanılan çeşitli endüstriyel alanlara kadar çok sayıda uygulamada kullanılan bir enerji depolama şeklidir. Bina ısıtma uygulamasında güneş enerjisinden yararlanır. Güneş enerjisi gündüz bir kollektör vasıtasıyla toplanıp depolanır ve gece olduğunda bu depolanan ısı ortama verilerek binanın ısıtılması sağlanır. Güneş enerjisi bahsedilen örnekte olduğu gibi kısa dönemli (birkaç saat) olarak depolanabileceği gibi uzun dönemli olarak (mevsimlik) da depolanabilir [1].

Isı geri kazanım sistemlerinde atık ısının mevcut olduğu ve kullanıldığı periyotlar farklıdır. Bu tür endüstriyel uygulamalarda atık ısı depolanır ve ihtiyaç duyulduğu anda sisteme verilerek enerji giderlerinde önemli bir tasarruf sağlanır.

Soğu depolama önemli ısı enerjisi depolama uygulamalarından biridir. Bina iklimlendirilmesi, gıda ve ilaç sektörü gibi alanlar soğu depolama uygulamalarına örnek olarak verilebilir.

Isıl enerji depolama genel olarak duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama olmak üzere ikiye ayrılır. Enerji, duyulur ısı depolamada maddenin sıcaklığının değişmesi yoluyla depolanırken, gizli ısı depolamada maddenin faz değiştirmesi yoluyla depolanır.

1.2. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama sistemleri en yaygın olarak kullanılan ısı enerjisi depolama sistemleridir. Bu sistemlerde maddenin ısı kapasitesinin yüksek olması, uzun süre (10-15 yıl) özelliklerini koruyabilmesi, korozif olmaması, kolay elde edilebilir ve ucuz olması istenir [2]. Duyulur ısı depolama maddeleri sıvı bazlı ve katı bazlı maddeler olarak ikiye ayrılabilir.

1.2.1. Sıvı Bazlı Duyulur Isı Depolama Maddeleri

Bu tür maddelere su, petrol bazlı yağlar ve erimiş tuzlar örnek olarak verilebilir. Su güneş enerjisi depolama sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan maddedir. Suyun bir ısı depolama maddesi olarak avantajları şunlardır [2,3]:

- Yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptir.
- Ucuzdur ve kolay temin edilir.
- Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir (25-90 °C).
- Enerji depolanmasından yararlandığı gibi enerji taşıyıcı akışkan olarak da kullanılabilir.
- Fiziksel, kimyasal ve termodinamik özellikleri çok iyi bilinmektedir.
- Zehirleyici ve yanıcı değildir.
- Korozyon etkisini azaltan teknolojiler geliştirilmiştir.

Suyun dezavantajları ise şunlardır:

- Yüksek sıcaklıklarda enerji depolamak zordur.
- Donduğu zaman genişlediğinden donmaya karşı önlem alınmalıdır.
- Korozyon yapıcı özelliğinden dolayı depo içine korozyon önleyici madde konmalıdır.

1.2.2. Katı Bazlı Duyulur Isı Depolama Maddeleri

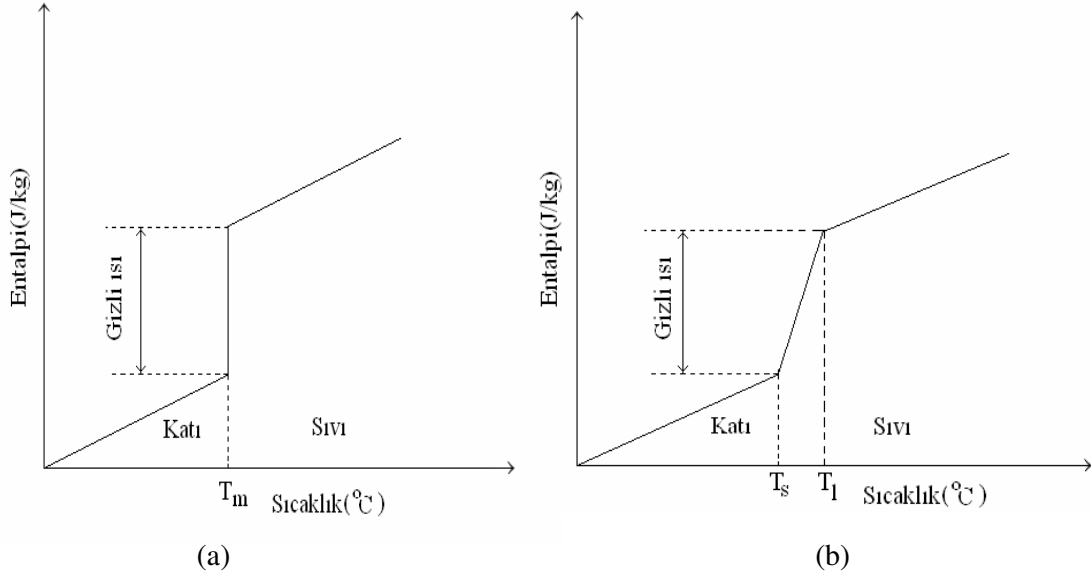
Başlıca katı bazlı duyulur ısı depolama maddeleri; kayalar, beton, kum, dökme demir ve metallerdir. Bu tür maddelerde donma ve kaynama meydana gelmediğinden düşük ve yüksek sıcaklıklarda enerji depolamaya elverişlidirler. Suda ve diğer sıvı bazlı depolama maddelerinde, yüksek buhar basınçları nedeniyle oluşan sınırlamalar bu tür maddelerde oluşmaz. Dökme demir bu gruptaki en yüksek ısıl kapasiteye sahip madde olmakla birlikte diğer maddelere göre daha pahalıdır. Düşük maliyetleri nedeniyle kayalar ve çakıl taşları daha çok tercih edilir. Yüksek ısıl iletkenliğin gerekli olduğu ve maliyetin ikincil önem arz ettiği durumlarda alüminyum, magnezyum ve çinko gibi metaller tercih edilir [2]. Tablo 1’de bazı duyulur ısı depolama maddelerinin termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Duyulur ısı depolama maddelerinin termofiziksel özellikleri [3].

Madde	Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	Isı iletim katsayısı, k(W/mK)	Özgül ısı, c(J/kgK)	Isı yayılım katsayısı, α (10 ⁶ m ² /s)	Isı kapasitesi, (10 ⁻⁶ J/m ³ K)
Oğun	721	0.159	1260	0.17	0.91
Beton	1600	0.790	840	0.59	1.34
Ateş tuğlası	1920	0.900	790	0.59	1.52
Cam	2710	0.760	837	0.33	2.27
Alüminyum	2702	237.0	903	97.13	2.44
Karbon çeliği (Mn ≤ %1, Si < %0.1)	7854	60.5	434	17.75	3.41
Saf demir	7870	80.2	447	22.8	3.52
Çakıl taşı	2050	1.73	1840	0.46	3.77
Su	996	0.615	4178	0.15	4.16

1.3. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan depolama maddelerine faz değiştiren maddeler (FDM) denir. Gizli ısı depolama maddeleri enerjiyi, Şekil 1a'da gösterildiği gibi sabit bir T_m sıcaklığında veya Şekil 1b'deki gibi çok küçük bir $\Delta T = T_1 - T_s$ sıcaklık aralığında faz değiştirerek depolarlar. Saf maddeler sabit sıcaklıkta faz değiştirirken, karışımlar, alaşımlar ve saf olmayan maddeler belli bir sıcaklık aralığında faz değiştirirler. Dolayısıyla oluşan ara yüz iki fazlı olur. Ayrıca, duyulur ısı depolama sistemlerine göre çok daha yüksek miktarda enerji depolama yoğunluğuna sahiptirler. Tablo 2'de bu iki ısı depolama sistemiyle ilgili bir karşılaştırma verilmiştir.



Şekil 1. Gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık entalpi değişimi (a) İzotermal faz değişimi (b) Bir sıcaklık aralığında faz değişimi

Tablo 2. Duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerinin enerji depolama kapasitesi bakımından karşılaştırılması [2].

Termofiziksel özellikler	Kaya	Su	Faz değiştiren maddeler	
			Organik	İnorganik
Yoğunluk(kg/m ³)	2240	1000	800	1600
Özgül ısı(kJ/kgK)	1.0	4.2	2.0	2.0
Gizli ısı(kJ/kg)	-	-	190	230
Gizli ısı(kJ/m ³)	-	-	152	368
10 ⁶ J enerji depolamak için gerekli kütle(kg)	67	16	5.26	4.35
10 ⁶ J enerji depolamak için gerekli hacim(m ³)	30	16	6.6	2.7
Bağlı kütle	15	4	1.25	1.0
Bağlı hacim	11	6	2.5	1.0

Tablo 2’de bazı duyulur ve gizli ısı depolama maddelerinin termofiziksel özellikleri verilerek 10⁶ J’lük enerji depolamak için hacimsel ve kütleli olarak ne kadar madde gerektiği inorganik FDM referans alınarak oransal olarak gösterilmiştir. Kütleli olarak karşılaştırma yapıldığında 1 kg inorganik FDM’nin depolayabildiği enerjiyi 4 kat daha fazla su veya 15 kat daha fazla kayanın depolayabileceği, hacimsel olarak karşılaştırma

yapıldığında ise 1 m³ inorganik FDM'nin sağladığı enerjiyi 11 m³ kayanın veya 6 m³ suyun sağlayabildiği görülür.

Gizli ısı yoluyla ısı enerji depolamanın yukarıda sözü edilen üstünlüklerinin yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir [4]:

- FDM'lerin düşük ısı iletkenliği
- Depolama sırasında meydana gelen yoğunluk değişimi
- Uzun süreli kullanım sonucunda maddenin yapısında ortaya çıkan kararsızlıklar
- Faz ayrılması ve aşırı soğuma¹

Katı-katı, sıvı-gaz ve sıvı-katı olarak üç değişik şekilde faz değiştiren FDM'ler mevcuttur. Katıdan katıya faz değişimi geçiren FDM'lerin çok azı ısı enerjisi depolama uygulamaları için uygundur. Sıvı-gaz faz değişimi geçiren FDM'ler yüksek ısı depolama kapasitelerine sahip olmakla birlikte faz değiştirme sırasında büyük hacim değişimlerine maruz kalırlar. Dolayısıyla pratik uygulamalar için uygun değildirler. Sıvı-katı faz değiştiren FDM'ler oldukça yüksek ısı depolama kapasitelerine sahiptirler ve faz değişimi sırasında hacimlerinde büyük değişimler olmaz. Gizli ısı depolama sistemlerinde çoğunlukla bu tür FDM'ler kullanılır [2].

Bir mühendislik uygulaması için hangi FDM'nin seçileceğiyle ilgili en önemli parametre FDM'nin dönüşüm sıcaklığıdır. Tablo 3'te bazı FDM'lerin faz değiştirme sıcaklıklarına göre kullanıldıkları uygulamalar verilmiştir.

¹ Faz ayrılması ve aşırı soğuma kavramları Bölüm 1.3.2.1'de açıklanmıştır

Tablo 3. FDM'lerin dönüşüm sıcaklıklarına göre kullanıldıkları bazı uygulamalar [1,5].

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

Faz değiştiren maddelerin kaldırım ve köprülerde gece buzlanmasını minimize ederek yüzeyin daha az zarar görmesini sağlamak amacıyla kullanılması [6] ve özellikle fazla efor gerektiren işlerde çalışan insanlara yönelik, vücudun ürettiği fazla ısıyı çeken soğutucu yelek ve kask üretimi gibi uygulamaları da mevcuttur [7].

Bir faz değiştiren maddede aranan özellikler; termodinamiksel, fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikler olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir [8]:

a) Termodinamik özellikler:

- Kullanılacağı yere uygun faz değiştirme sıcaklığına sahip olma
- Yüksek gizli ısı kapasitesine sahip olma
- Sıvı ve katı fazda yüksek ısı iletkenliğine sahip olma

b) Fiziksel özellikler:

- Faz değişimi sırasındaki yoğunluk değişiminin düşük olması
- Yüksek yoğunluğa sahip olma
- Katılaşma sırasında aşırı soğumaya uğramama

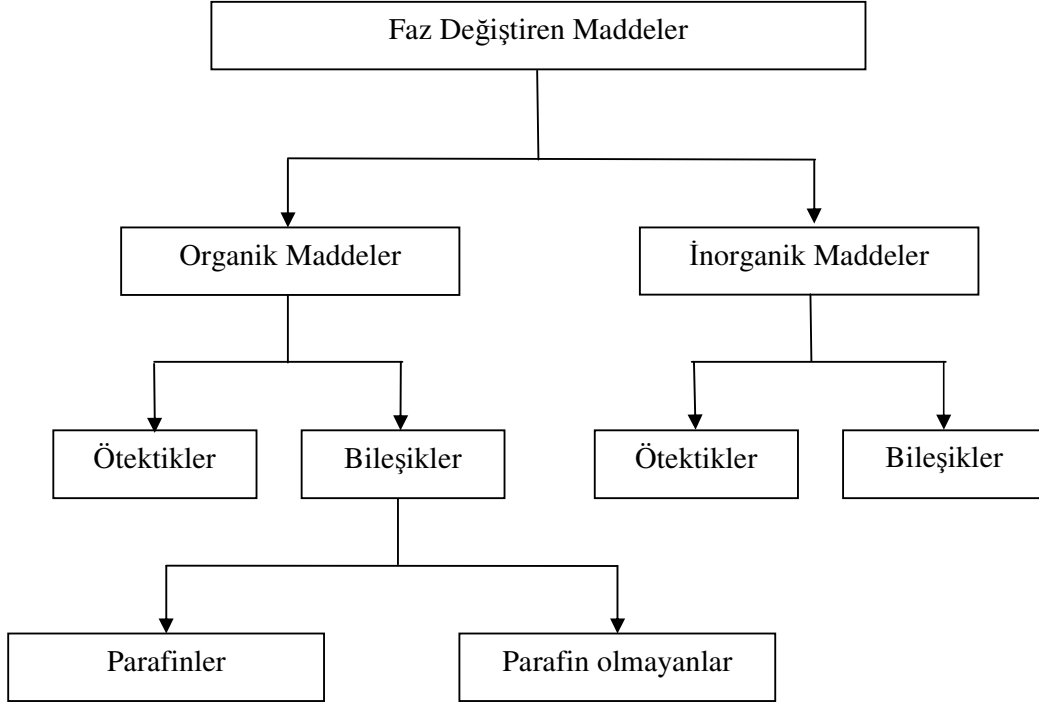
c) Kimyasal özellikler:

- Kararlı olma
- Faz ayrılmasına uğramama
- İçine konulduğu deponun malzemesi ile kimyasal reaksiyona girmeme
- Yanıcı ve zehirleyici olmama

d) Ekonomik özellikler:

- Ucuz olma
- Bol miktarda elde edilebilir olma

Faz değiştiren maddeler Şekil 2'de Şematik olarak gösterildiği gibi organik ve inorganik maddeler olarak iki gruba ayrılabilirler.



Şekil 2. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması [8].

1.3.1. Organik FDM'ler

Organik FDM'ler kimyasal olarak kararlı olup uzun ömürlüdürler. Bu maddelerde aşırı soğuma ve faz ayrılması gibi sorunlarla hemen hiç karşılaşmaz. Korozif değildir, içine konuldukları deponun malzemesi ile uyumlu çalışırlar. Buna karşılık faz değıştirme entalpileri ve ısı iletkenlikleri inorganik FDM'lere göre daha düşüktür. Yanıcı ve daha pahalıdır. Organik FDM'ler ötektik FDM'ler ve bileşik FDM'ler olarak ikiye ayrılırken, bileşik FDM'ler de parafinler ve parafin olmayan bileşikler olarak ikiye ayrılır. En yaygın olarak kullanılan organik FDM'ler parafinlerdir.

1.3.1.1. Organik Bileşikler

Bu gruptaki FDM'ler parafinler ve parafin olmayan organik bileşikler olarak iki gruba ayrılabilir.

1.3.1.1.1. Parafinler

Parafinler C_nH_{2n+2} formülü ile gösterilen, petrolden elde edilen mumsu yapıda hidrokarbon bileşikleridir. Bir ısı depolama maddesi olarak avantajları şunlardır [2,4]:

- Isı depolama kapasiteleri yüksektir (yaklaşık 200 kJ/kg veya 150MJ/m³).
- Kimyasal olarak kararlıdırlar.
- Eriyik halde buhar basınçları düşüktür.
- Aşırı soğuma ihmal edilebilecek düzeydedir.
- Faz ayrılması sorunu yoktur.
- Kolay elde edilebilirler.

Dezavantajları arasında ise şunlar sayılabilir:

- Düşük ısı iletkenliğine sahiptirler.
- Faz değiştirme sırasında nispeten büyük hacim değişikliğine uğrarlar.
- Pahalıdırlar.

Parafinlerin ısı iletkenliklerini yükseltmek için metalik dolgular, alüminyum talaşlar ve metal yapılı kalıplar kullanılır [2].

Tablo 4'te bazı parafinlerin termofiziksel özellikleri verilmiştir. Bu tablodan da görüldüğü üzere parafinlerin ısı iletim katsayıları oldukça düşüktür.

Tablo 4. Bazı parafinlerin termofiziksel özellikleri [4,8,9].

Madde	Dönüşüm sıcaklığı, T_m (°C)	Gizli ısı, λ (kJ/kg)	Isı iletim katsayısı, k(W/mK)		Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	
			Katı Faz	Sıvı faz	Katı Faz	Sıvı faz
Parafin wax	64	173.6	0.346	0.167	916	790
Parafin(C ₁₈ H ₃₈)	28	244	0.150	0.148	814	774
RT 27	28	179	0.2		810	
RT 35	35-36	157	0.2		820	
RT 52	52	167	0.2		835	
RT 80	80-81	175	0.2		845	
RT 100	99-102	168	0.2		855	

Burada RT Rubitherm firmasının üretmiş olduğu ticari parafinlerin kısaca gösterilişi olup yanlarındaki rakamlar bu parafinlerin ortalama dönüşüm sıcaklıklarıdır.

1.3.1.1.2. Parafin Olmayan Organik Bileşikler

Bu gruptaki maddelere yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikoller örnek olarak verilebilir. Bu maddeler içinde ısı depolama maddesi olarak en uygun olanı yağ asitleridir.

Yağ asitleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ formülü ile karakterize edilirler. Isı depolama için uygun faz değiştirme entalpileri vardır. Erime ve donma davranışları çok iyidir. Aşırı soğuma görülmez. Fakat fiyatları uygun değildir. Örneğin parafinlere göre 2-3 kat daha pahalıdırlar.

Tablo 5'te bazı parafin olmayan organik bileşiklerin termofiziksel özellikleri verilmiştir. Bu tablodaki ilk beş madde yağ asididir.

Tablo 5. Bazı parafin olmayan organik bileşiklerin termofiziksel özellikleri [4,8,10].

Madde	Dönüşüm sıcaklığı, T_m (°C)	Gizli ısı, λ (kJ/kg)	Isı iletim katsayısı, k(W/mK)		Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	
			Katı faz	Sıvı faz	Katı faz	Sıvı faz
Palmitik asit	64	185.4	-	0.162	989	850
Kaprik asit	32	152.7		0.153	1004	878
Kaprilik asit	16	148.5	-	0.149	981	901
Stearik asit	69	202.5	-	0.172	965	848
Laurik asit	44	177.4	-	0.147	1007	862
Poliglikol E400	8	99.6	-	0.187	1128	1125
Poliglikol E600	22	127.2	-	0.189	1232	1126
Naftalin	80	147.7	0.341	0.132	1145	976

1.3.1.2. Organik Ötektikler

Organik ve inorganik ötektik bileşikler sabit erime/donma sıcaklığına sahip olan maddelerdir [11].

Bir ısı depolama maddesi için en önemli parametrelerden biri de faz değiştiren maddenin kimyasal kararlılığıdır. Bir FDM'nin çok sayıda çevrimden sonra faz değiştirme sıcaklığının kararlı olması ve gizli ısı kapasitesinin düşmemesi istenir. Bu durumu sağlamak için FDM'ler arasında ötektik bileşikler oluşturma yoluna gidilmiştir [12]. Tablo 6'da bazı organik ötektik bileşiklerin termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 6. Bazı organik ötektik bileşiklerin termofiziksel özellikleri [8].

Madde	Dönüşüm sıcaklığı, T_m (°C)	Gizli ısı, λ (kJ/kg)	Isı iletim katsayısı, k(W/mK)	
			Katı faz	Sıvı faz
% 63.5 asetamit + % 37.5 üre	63	-	-	-
% 67.1 naftalin + % 32.9 benzoik asit	57	123.4	0.282(38 °C) 0.257(52 °C)	0.136(78.5 °C) 0.130(100 °C)

1.3.2. İnorganik FDM'ler

İnorganik FDM'lerin faz değiştirme entalpileri ve ısı iletim katsayıları organik FDM'lere nazaran daha yüksektir. Genellikle daha ucuzdurlar. Fakat bunun yanında aşırı soğumaya ve faz ayrılmasına eğilimlidirler. Kimyasal kararlılıkları iyi değildir ve koroziftirler. Bu dezavantajların giderilmesi için ek önlemlerin alınması gerekir. İnorganik FDM'ler de organik FDM'ler gibi ötektik FDM'ler ve bileşik FDM'ler olarak ikiye ayrılır.

1.3.2.1. İnorganik Bileşikler

En çok bilinen inorganik FDM'ler hidrat tuzlarıdır. Hidrat tuzları, hacimsel depolama yoğunluklarının (yaklaşık 350 MJ/m³) ve ısı iletkenliklerinin (yaklaşık 0.5 W/mK) nispeten yüksek olması nedeniyle ısı depolama maddesi olarak oldukça uygundur [4]. Ayrıca parafinlerden daha ucuzdurlar. Tablo 7'de bazı hidrat tuzlarının termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 7. Bazı hidrat tuzlarının termofiziksel özellikleri [4,8].

Madde	Dönüşüm sıcaklığı, T_m (°C)	Gizli ısı, λ (kJ/kg)	Isı iletim katsayısı, k(W/mK)		Yoğunluk, ρ (kg / m ³)	
			Katı faz	Sıvı faz	Katı faz	Sıvı faz
MgCl ₂ .6H ₂ O	117	168.6	0.694	0.570	1569	1450
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	89	162.8	0.611	0.490	1636	1550
Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	48	265.7	1.225	0.653	2070	1937
CaCl ₂ .6H ₂ O	29	190.8	1.088	0.540	1802	1562
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32.4	254	0.544	0.544	1458	1458
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	36	146.9	-	0.464	1937	1828

Hidrat tuzlarının en büyük dezavantajı erime davranışının iyi olmamasıdır. Bu durum faz ayrılması ve aşırı soğuma gibi problemlere yol açar.

Hidrat tuzları eridiğinde biri doymuş sıvı faz diğeri de katı faz olmak üzere iki fazlı bir yapı ortaya çıkar. Bu iki faz arasındaki yoğunluk farkından dolayı katı faz deponun tabanına çöker. Donma sırasında katı faz sıvı fazla birleşmez. Yani bu olay geri dönüşümsüzdür [11]. Bu olaya faz ayrılması denir.

Hidrat tuzları ile ilgili diğeri önemli problem de aşırı soğumadır. Akışkan yatağındaki tıkanmanın ve susuz tuz oluşumunun önüne geçmek için hidrat tuzlarına fazladan su verme prensibi uygulanır. Bunun sonucunda maddenin sıvı fazında sulanma meydana gelir ve her şarj/deşarj devrinin sonrasında maddenin katılaşma sıcaklığı sürekli olarak azalır [4]. Bu duruma aşırı soğuma denir.

Hidrat tuzlarının kimyasal kararlılığının zayıf olması nedeniyle ortaya çıkan bu tür sorunlar maddenin ısı depolama yoğunluğunun düşmesine neden olur. Bu durumu engellemek için FDM'ye çekirdeklendirici ve kalınlaştırıcı maddeler katılır [4].

Tablo 8'de çekirdeklendirici ve kalınlaştırıcı maddelerin, FDM'nin faz değiştirme sıcaklığı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Örneğin dönüşüm sıcaklığı 36°C olan $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ tuzuna herhangi bir kalınlaştırıcı ve çekirdeklendirici madde katılmazsa, bu maddenin dönüşüm sıcaklığı çok sayıda şarj/deşarj devrinin sonunda 20°C kadar düşmektedir. Eğer bu maddeye SAP kalınlaştırıcısı ve Borax katılırsa bu düşüş 6-9°C kadar olmaktadır. Aynı FDM'ye karbon veya TiO_2 katılırsa aşırı soğuma probleminin hemen hemen önüne geçilmiş olmaktadır [4].

Tablo 8. Kalınlaştırıcı ve çekirdeklendirici madde kullanımının bazı FDM'lerin aşırı soğumaya maruz kaldıkları sıcaklık aralığı üzerindeki etkisi [4].

FDM	Kalınlaştırıcı	Dönüşüm sıcaklığı (°C)	Çekirdeklendirici madde	Aşırı soğuma	
				Madde katılmadan önce	Madde katıldıktan sonra
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	SAP	32	Borax	15-18	3-4
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	SAP	36	Borax Karbon TiO_2 Bakır Alüminyum	20	6-9 0-1 0-1 0.5-1 3-10
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	CMC	46	Na_2SO_4 SrSO_4 Karbon	20	4-6 0-2 4-7
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	CMC	57	K_2SO_4 $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	30	0-3 0-2

1.3.2.2. İnorganik Ötektikler

Ötektik maddeler sabit bir erime/donma noktasına sahip karışımlar olarak nitelendirilirler [11]. Tablo 9'da bazı inorganik ötektik maddelerin termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 9. Bazı inorganik ötektik bileşiklerin termofiziksel özellikleri [8].

Madde	Dönüşüm sıcaklığı, T_m (°C)	Gizli ısı, λ (kJ/kg)	Isı iletim katsayısı, k (W/mK)		Yoğunluk, ρ (kg / m ³)	
			Katı faz	Sıvı faz	Katı faz	Sıvı faz
% 61.5 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + % 38.5 NH_4NO_3	52	125.5	0.552(36 °C)	0.494(65 °C) 0.515(88 °C)	1596(20 °C)	1515(65 °C)
% 58.7 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + % 41.3 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	59	132.2	0.678(38 °C) 0.678(53 °C)	0.510(65 °C) 0.565(85 °C)	1630(24 °C)	1550(50 °C)
% 66.6 üre + % 33.4 NH_4Br	76	161	0.649(39 °C) 0.682(65 °C)	0.331(80 °C) 0.324(93 °C)	1548(24 °C)	1440(85 °C)

1.4. FDM'lerin Ömürleri

Bir FDM'nin ömrü, o FDM'nin tekrarlayan şarj/deşarj çevrimleri sonunda faz değiştirme sıcaklığı ve gizli ısı depolama kapasitesi gibi özelliklerinin ne kadar süre kararlı olarak kalabileceği ile ilgili bir kavramdır. FDM'ler laboratuvar ortamında çeşitli sayılarda erime/katılaşma çevrimine maruz bırakılır ve yukarıda bahsedilen özelliklerinin çevrim sayısı ile nasıl değiştiği belirlenir. Organik FDM'ler inorganik FDM'lere göre kimyasal olarak daha kararlı oldukları için ömürleri de daha uzundur. Örneğin faz değiştiren madde olarak bir organik FDM olan parafinlerin kullanıldığı ısı depolama sistemlerinin ömürleri 2000 şarj/deşarj çevrimini bulabilirken [13] bir hidrat tuzu olan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nin kullanıldığı sistemlerde bu ömür 1000 şarj/deşarj çevrimi kadar olmaktadır [4].

1.5. Gizli Isı Depolama Sistemlerinin Analizi

Erime ve katılaşma içeren geçici rejimde ısı transferi problemleri literatürde genel olarak hareketli sınır problemleri veya Stefan problemleri olarak adlandırılır. Bu problemlerde katı-sıvı ara yüzü, ortamdan çekilen veya ortama verilen ısıya bağlı olarak yer değiştirir. Katı-sıvı ara yüzünün (hareketli uç) yerinin önceden bilinmemesi bu tür problemlerin çözümünü zorlaştırır.

Tam analitik çözümlerin bulunamadığı durumlar için, yaklaşık, yarı analitik ve sayısal yöntemler kullanılmıştır.

Hareketli sınır problemleri için kullanılan bazı çözüm yöntemleri şunlardır [14]:

- Tam analitik çözümler
- İntegral metot
- Hareketli ısı kaynağı yöntemi
- Pertürbasyon yöntemi
- Sayısal yöntemler

1.5.1. Tam Analitik Çözümler

Hareketli sınır problemleri yapısı gereği lineer olmadığından, bu problemlerin tam analitik çözümleri sadece idealize edilmiş yarı sonsuz veya sonsuz ortamlar için, basit sınır ve başlangıç koşulları altında elde edilebilmektedir [14].

1.5.2. İntegral Metot

Pohlhausen ve von Karman'ın sınır tabaka denklem analizlerine dayanan yaklaşık bir yöntem olup, tek boyutlu faz değiştirme problemleri için uygun sonuç verir. Bu yöntemde elde edilen integral denklemin çözülebilmesi için gerekli sıcaklık profilinin problem geometrisine uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu yöntemin iki boyutlu problemlere uygulanması için diğer çözüm yöntemleriyle birlikte kullanılması gerekmektedir [15].

1.5.3. Hareketli Isı Kaynağı Yöntemi

Bu yöntemde probleme; faz değişimi sırasında ortama verilen veya ortamdan çekilen ısıya hareketli bir ısı kaynağı neden oluyormuş gibi düşünülerek yaklaşmaktadır. Problem bu şekilde, zamana bağlı faz değişimi problemi yerine, hareketli bir ısı kaynağı içeren zamana bağlı ısı iletimi problemi haline dönüşmektedir. Böylece katı ve sıvı fazlar ile ara yüzey için geçerli olan tek bir diferansiyel denklem elde edilir. Bu denklemin integral dönüşüm tekniği veya Green fonksiyonu yöntemiyle çözümü ve ara yüzey koşulunun sağlanması sonucu ara yüzeyin konumunu veren bir integral denklem elde edilir. Bu denklem basit bazı problemler için analitik olarak çözülebilmekle birlikte, çoğunlukla yarı analitik veya sayısal yöntemlerin kullanımı gerekmektedir [15].

1.5.4. Pertürbasyon Yöntemi

Bu yöntemde, sıcaklık dağılımı ve ara yüzey diferansiyel denklemleri, bir pertürbasyon parametresi (faz değiştirme problemleri için Stefan sayısı) içerecek şekilde boyutsuz hale getirilir ve bu parametre için seriye açılır. Bu işlem boyunca bağımsız değişkenler genellikle ara yüzeyi zamandan bağımsız, başka bir deyişle hareketsiz kılan

yeni bir ortama aktarılırlar. Bu yöntemin kullanılması, değişik koordinatlar ve koşullar için farklı formülasyonlar gerektirir [15].

1.5.5. Sayısal Yöntemler

Faz değiştirme problemlerinde analitik çözümler sınırlı koşullar altında elde edilebildiğinden, bu problemlerin çözümünde daha çok sayısal yöntemler kullanılır. Bu sayısal yöntemler ara yüz izleme ve bölge sabitleştirme sayısal yöntemleri olarak iki grupta toplanabilir.

Birinci gruptaki sayısal yöntemlerde sıcaklık tek bağımlı değişken olarak alınır ve enerjinin korunumu denklemi katı ve sıvı fazlar için ayrı ayrı yazılır. Katı-sıvı ara yüzü ve sıcaklık dağılımının her zaman adımında izlenmesi gerekir. Bu nedenle bu yöntemlerin çok boyutlu problemlere uygulanması oldukça zordur.

İkinci gruptaki sayısal yöntemlerde, ara yüzün değişiminin her zaman adımında izlenmesine gerek yoktur. Ayrıca çok boyutlu problemlere kolaylıkla uygulanabilir. Bu grupta en yaygın olarak kullanılan yöntem entalpi metodudur. Bu metotta, entalpi sıcaklığa bağlı bir değişken olarak tanımlanarak enerji denklemi her iki bölge (katı, sıvı) ve ara yüz için uygulanabilir hale getirilir. Böylece problem sabit bir bölgede çözülmüş gibi hareket edilebilir. Bu yöntem, faz değişiminin hem sabit sıcaklıkta hem de bir sıcaklık aralığında meydana geldiği problemlere uygulanabilir [16].

1.6. Literatür Araştırması

Faz değiştirme problemlerinin analitik çözümleri ile ilgili ilk çalışmalar 1831'de Lame ve Claperyon ve 1891'de Stefan tarafından yapılmıştır. Fakat bu analitik çözümler, faz değiştirme problemlerinin yapısındaki non-lineerlik nedeniyle, basit sınır ve başlangıç koşulları altında, sonsuz veya yarı sonsuz geometriler için elde edilebilmiştir [14]. Çok boyutlu faz değiştirme problemlerinin çözümleri için en çok kullanılan yöntem entalpi metodudur. Bu yöntemde entalpi, sıcaklığa bağlı bir değişken olarak tanımlanır. Shamsundar ve Sparrow [16] çok boyutlu faz değiştirme problemlerini tam implisit olarak entalpi yöntemine dayanarak çözmüşlerdir. Bu yöntemde, her noktadaki entalpi değerleri, maddenin o noktada bulunduğu faza bağlı olarak ifade edilmiştir. Voller [17] faz değiştirme sıcaklığında eriyik kısmın, duyulur entalpiye bağlı olarak her zaman adımında

sürekli güncellenmesine dayanan yeni bir implisit yöntem geliştirmiştir. Geliştirdiği yöntemin, bilgisayar hesaplama süresi bakımından diğer yöntemlere göre 1.4 ile 10 kat daha hızlı olduğunu ve herhangi bir relaksasyon faktörünün kullanılmasına gerek kalmadığını belirtmiştir. Date [18] katı-sıvı ara yüzünde sıcaklığın zamanla değişmemesinden hareketle, bu durumu yeni bir sınır şartı olarak tanımlayarak ayrıklaştırılmış entalpi formülünün çözümünde yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Ayrıca bu ayrıklaştırılmış denklemin çözümü üç bantlı matris algoritması ile elde edilebildiğinden diğer çözüm yöntemlerinde ortaya çıkabilecek kararsızlıkların elenmiş olacağını belirtmiştir. Velraj vd. [19] Date'in kullandığı yöntemi bir sıcaklık aralığında faz değiştiren maddelere uyarlamışlardır.

Voller ve Cross [20] silindirik bir depodaki FDM'nin erime ve katılaşma zamanını pratik olarak veren bir bağıntı geliştirmişlerdir. Bu bağıntıdan elde ettikleri sonuçların sayısal olarak elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğunu, ancak geliştirilen bağıntının her türlü geometri için geçerli olduğunun iddia edilmediğini, sadece iki boyutlu silindirik problemlerin karmaşıklığı nedeniyle daha çabuk sonuç elde etmenin amaçlandığını belirtmişlerdir. Toplam katılaşma süresini basit bir bağıntıyla ifade etmeyi amaçlayan diğer bir çalışma Bilir ve İlken [21] tarafından yapılmıştır. Bilir ve İlken silindirik ve küresel kaplar içerisinde katılaşma problemini incelemişlerdir. Ele aldıkları problemde aksel yöndeki ısı iletimi ve duvarlarda ısı direnç ihmal edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlardan, toplam katılaşma zamanını Biot sayısının, Stefan sayısının ve boyutsuz sıcaklığın bir fonksiyonu olarak veren bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Isı eşanjörlerinin bir ısı depolama aracı olarak kullanılması ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve sonuçları literatürde yer almıştır. Cao ve Faghri [22] bir ısı eşanjöründe erime problemini incelemişlerdir. FDM iki boru arasındaki konsantrik aralığa yerleştirilirken, iç borudan akışkan geçirilerek maddenin faz değiştirmesi sağlanmıştır. FDM'nin yerleştirildiği konsantrik aralığın yan duvarları ve dış duvar yalıtılmıştır. Akışkanın sıcaklığının hiçbir zaman tam gelişmiş rejime ulaşamayacağı düşüncesinden hareketle, FDM'nin faz değiştirmesi problemi ile iç borudaki zorlanmış taşınım problemi bağlaşımlı olarak çözülmüştür. Cao ve Faghri, elde ettikleri verilerden, küçük boyutlardaki silindirlere ve sıvı metal gibi düşük Prandtl sayısına sahip akışkanlarda akışkan sıcaklığı için literatürdeki ampirik bağıntıları kullanmanın önemli hatalara yol açabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca Reynolds sayısının FDM'nin erime süresi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Her ne kadar ele aldıkları problemde Reynolds sayısı 2200

iken 1000 olan boyutsuz erime süresinin, Reynolds sayısı 1700 iken 773 olduğunu ve Reynolds sayısı 1200'e düşürüldüğünde de 545 olduğunu belirtmişlerse de, ilgili grafikte artan Reynolds sayısı ile deponun şarj olma süresinin azaldığı görülmektedir.

Zhang ve Faghri [23] aynı erime problemini FDM içindeki eksenel ısı iletimini ihmal ederek integral metodu kullanmak suretiyle yarı analitik olarak çözmüşlerdir. Taşınımı ve FDM'deki iletim problemini bağımlı bir şekilde göz önüne alarak, boru uzunluğu boyunca, radyal yöndeki katı-sıvı ara yüzünün ilerleyiş davranışını incelemiş, borunun giriş bölgesinde Nusselt sayısının büyük değerler almasına bağlı olarak bu bölgede ara yüzün daha fazla ilerlediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, artan Peclet sayısı ile ara yüzün daha hızlı ilerlediğini göstermişlerdir. Çeşitli uzunluk/çap oranları için Nusselt sayısını hesaplayarak küçük uzunluk/çap oranlarında boru boyunca Nusselt sayısının önemli ölçüde değiştiğini ancak uzunluk/çap oranlarının artması ile bu değişimin önemini kaybettiğini göstermişlerdir.

Bellecci ve Conti [24] de konsantrik aralıkta katılama problemini incelemişlerdir. FDM'nin konduğu halkasal aralığın yan duvarlarını adyabadik kabul edip dış duvarda ısıtım sınır şartını uygulamışlardır. Eşanjörün duvar kalınlığını, FDM içindeki doğal taşınımı ve akışkanın radyal yöndeki hız değişimini ihmal etmişlerdir. İç borudaki akışın ısı taşınım katsayısı için literatürdeki ampirik bağıntıları kullanmışlardır. Elde ettikleri verileri Cao ve Faghri'nin verileri ile karşılaştırdıklarında, çok küçük uzunluk/çap oranları dışında, akışkan için ampirik bağıntıları kullanmanın sonuçlar üzerinde önemli bir hataya yol açmadığını göstermişlerdir. Bellecci ve Conti ayrıca Peclet sayısının ve değişik geometrilerin akışkanın çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Peclet sayısının artmasıyla akışkan çıkış sıcaklığının daha düşük değerler aldığı, uzunluk/çap oranının artmasının akışkan çıkış sıcaklığını artırdığını belirlemişlerdir.

Zivković ve Fujii [25] aynı hacimde biri silindirik diğeri dikdörtgen iki depoyu, FDM'nin erime zamanı açısından karşılaştırmışlardır. Problemi, FDM'deki doğal taşınımı ve eksenel yönde olan ısı iletimini ihmal ederek, entalpi metodu ile çözmüşlerdir. Küçük boyutlardaki silindirik ve dikdörtgen depolar için, FDM'nin erime zamanlarının arasındaki farkın küçük olduğu, ancak boyutların büyümesi ile dikdörtgen depodaki maddenin çok daha çabuk eridiği sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, ısı transferi akışkanı olarak hava gibi küçük ısı taşınım katsayılarının ortaya çıkmasına neden olan akışkanlar kullanıldığında, FDM içindeki eksenel yöndeki ısı iletiminin ihmal edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Isı depolama sisteminin erime ve katılaşma süresinin azaltılması için birden fazla FDM'nin kullanıldığı çalışmalar da yapılmıştır. Fang ve Chen [26] iki borulu silindirik bir ısı deposunda, iç borudan hava geçirerek konsantrik aralığa yerleştirdiği FDM'lerin erime davranışını incelemişlerdir. Bunun için, dönüşüm sıcaklıklarının ortalaması 50°C olan üç farklı FDM kullanmış ve bunlardan dönüşüm sıcaklığı 50°C olanını referans FDM'si olarak seçmişlerdir. Diğer iki FDM'nin depo içerisindeki miktarları eşit olacak şekilde, referans FDM'sini değişik oranlarda depoya yerleştirmişlerdir. Şarj işleminin başlangıcında, referans FDM'sinin oranının az olduğu durumlar için ara yüzün daha çabuk ilerlediği görülmüş ve bu durum, düşük sıcaklıkta eriyen maddenin oranının artmasıyla açıklanmıştır. Şarj işleminde zaman ilerledikçe kullanılan referans FDM'si ile ilgili bir optimum oranın ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulacak üçlü FDM grubunda, FDM'lerin dönüşüm sıcaklığı farklarının daha yüksek olması halinde daha yüksek miktarda enerji depolanabileceği görülmüştür.

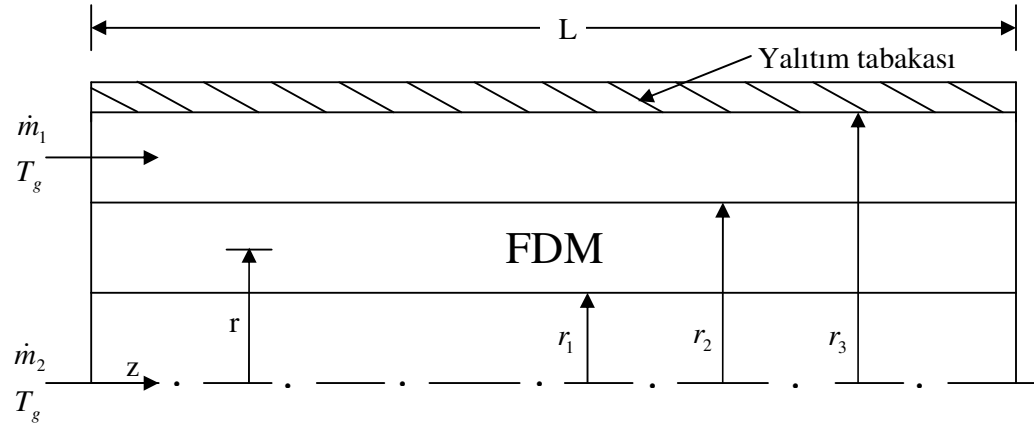
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, ısı deposu olarak eş eksenli üç borulu bir ısı eşanjörü göz önüne alınmış ve bu eşanjörde en içteki boru ile ikinci boru arasındaki halkasal aralığa yerleştirilmiş olan FDM'nin, en içteki borudan ve dıştaki halkasal aralıktan geçen bir ısı transfer akışkanını aracılığıyla eritilerek ısı depolanması sırasındaki ısıl davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Literatür araştırması bölümünde de bahsedildiği gibi, iki borulu ısı eşanjörleri ısıl enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tezin amacı; ısı deposu olarak kullanılan ısı eşanjörünü üç borulu olarak dizayn ederek faz değiştiren maddenin erime/katılaşma süresi üzerinde ne gibi bir iyileştirilmenin elde edilebileceğinin belirlenmesidir. Ayrıca tezin kapsamı içinde ısı eşanjörüne giren ısı transfer akışkanının kütleli debisi ve sıcaklığı ile ısı deposunun bazı karakteristik geometrik büyüklüklerinin sistemin performansını nasıl etkiledikleri de incelenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada, konsantrik (eş eksenli) üç borulu ısı eşanjörü kullanılarak ısı enerji depolanması konusu incelenmiştir. Isı deposu olarak göz önüne alınan eşanjör Şekil 3'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Kullanılan ısı deposunun şematik gösterimi

Şekilden görüldüğü gibi üç borulu ısı eşanjörü, iç içe eş eksenli olarak yerleştirilmiş üç borudan oluşmaktadır. Bunlardan r_1 yarıçaplı iç boru ile r_2 yarıçaplı ikinci boru arasındaki halkasal aralığa yerleştirilmiş olan faz değıştiren maddeye, iç borudan ve $r_3 - r_2$ halkasal aralığından akan akışkanlar aracılığıyla ısı alınıp verilerek ısı enerji depolanması sağlanmaktadır. Hem sistemin kullanılma amacı bakımından uygun olması, hem de modellemede kolaylık sağlaması nedeniyle eşanjörün dış yüzeyinin mükemmel bir şekilde yalıtılmış olduğu kabul edilmektedir. Gizli ısı depolama sistemlerinde, ısı depolama kapasitesinin yanı sıra deponun şarj/deşarj edilme süresi de önemli bir performans parametresidir. Bu bakımdan, bu çalışmanın yapılmasındaki en önemli motivasyon unsuru, maddenin konulduğu aralığın her iki yüzeyinden ısı alınması/verilmesi nedeniyle şarj/deşarj süresinin hatırı sayılır derecede kılınmasının beklenmesidir. Çalışmada ayrıca;

sabit tutulan bir r_3 için değişik r_1 yarıçapları ve farklı $r_2 - r_1$ kalınlıklarının şarj/deşarj süresine ve sıvı-katı ara yüzünün davranışına etkileri de araştırılmıştır.

2.2. Problemin Matematiksel Olarak Modellenmesi

Faz değiştiren maddeler aracılığıyla ısı depolanması konusunda geçmişten günümüze çok sayıda çalışma yapılmış olup bunların sonuçları literatürde geniş bir şekilde yer almıştır [16-26]. Şekil 3'teki şemadan da görüldüğü gibi, ısı transfer akışkanı/akışkanları ile FDM'nin ısı etkileşimi, hem ısının depolanması ve hem de çekilmesi sırasında; zamana bağlı bir süreçte bağlaşımli olarak gerçekleşmekte ve ayrıca proses sırasında FDM'nin içerisinde faz değişimi meydana gelmesi nedeniyle maddenin ısı davranışı lineer olmamaktadır. Bu nedenle, problemin hem modellenmesinde hem de çözümünde zorluklar ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu konuda literatürde verilen bilgilere bakıldığında, problemi kolaylaştırmak için genel olarak şu kabullerin yapıldığı görülmektedir:

1. Kolay uygulanabilir olması nedeniyle, entalpi metodu çok boyutlu faz değiştirme problemleri için en uygun metottur.
2. Büyük uzunluk/çap oranlarında ısı transfer akışkanı için termal olarak gelişmiş akış kabulü yapmak sonuçlar üzerinde önemli hatalara yol açmamaktadır.
3. FDM içerisindeki doğal taşınım ve depo cidarlarının ısı direnci ihmal edilebilir.

Yukarıda sözü edilen genel varsayımlar altında, gerçekte birbiri ile iç içe olan FDM'nin ısı davranışı ve ısı transfer akışkanının ısı davranışı ayrı ayrı ele alınıp incelenebilir.

2.2.1. Faz Değiştiren Maddenin Isıl Davranışı

Faz değiştirme problemleri yapısı gereği lineer değildir. Birinci bölümde de bahsedildiği gibi, bu maddelerin sıcaklıkları dönüşüm sıcaklığına kadar yaklaşık lineer olarak değişirken, faz değiştirme esnasında maddenin sıcaklığı ya sabit kalır ya da küçük bir miktar değişim gösterir. Bu durum, ısı iletimi problemleri için kullanılan denklemlerin bu tür problemler için geçerliliğini yitirmesine neden olur. Bu çalışmada, FDM'nin ısı davranışı modellenirken, yukarıda sözü edilen genel varsayımlara ek olarak şu kabuller de yapılmıştır:

1. Isı iletimi radyal ve aksenal doğrultular olmak üzere iki doğrultuda gerçekleşmekte, açısal doğrultudaki iletim ihmal edilmektedir.
2. FDM'nin termofiziksel özellikleri sıcaklıkla değişmemektedir.

Şekil 3'te gösterildiği gibi, halkasal aralıkta depolanmış bulunan FDM için geçerli ısı iletimi denklemi

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

olarak yazılabilir. Bu denklem lineer ısı iletimi problemleri için geçerlidir. Entalpi metodu, faz değiştirme problemlerinin yapısından kaynaklanan non-lineerliği ortadan kaldırıp (1) eşitliğinin bu tür problemler için de kullanılmasına olanak sağlar. Bu yöntem sayesinde FDM'nin ısı depolanması ve çekilmesi sırasındaki ısıl davranışı, her bir faz bölgesi için geçerli olmak üzere, bir ısı iletimi problemine indirgenmiş olur.

Entalpi Formülasyonu

Entalpi metodu temel olarak, içinde ısı üretimi (kaynağı) olmayan ve ısı geçişinin sadece iletimle olduğu bir ortam için, enerji dengesi denkleminin kurulması ve sınır ile başlangıç koşulları göz önüne alınarak bu denklemin çözülmesi esasına dayanır. Bu yöntemin kullanılmasıyla elde edilen enerji dengesi denklemi hem katı hem sıvı hem de ara yüz için geçerlidir. Yöntemin uygulanmasına, \forall hacmi içerisinde depolanan enerjiyi \forall hacmini çevreleyen yüzeyler boyunca hacim içerisine giren net ısı akısı miktarına eşitlemek suretiyle

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{\forall} \rho H d\forall \right] = \int_A \vec{q} n dA \quad (2)$$

ifadesinin yazılmasıyla başlanır. Bu eşitlikte A, \forall hacmini çevreleyen yüzey alanını, n yüzeye ait normal vektörü, \vec{q} ısı akısı vektörünü, H ortamın entalpisini ve ρ 'da yoğunluğunu göstermektedir. Denklemin sağ tarafını Gauss'un "Divergence" teoremini kullanarak

$$\int_{\forall} \left[\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} \right] d\forall = 0 \quad (3)$$

şeklindeki hacim integraline dönüştürmek mümkündür. Hacmin sifıra gitmesi ($\forall \rightarrow 0$) limit durumunda ise bu eşitlik

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \vec{q} = 0 \quad (4)$$

halini alır. Isı geçişinin yalnızca iletimle olduğu ve yoğunluğun sabit kaldığı kabulleri de eklendiğinde denklemin en son şekli

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = k(\nabla^2 T) \quad (5)$$

olur. Entalpi denklemi olarak adlandırılan bu eşitliğin faz değiştirme problemlerine uygulanabilmesi için öncelikle entalpinin sıcaklığa göre değişimini belirleyen bir bağıntıya ihtiyaç vardır. Bu bağıntı (5) denkleminde yerleştirildiğinde sıcaklığın zamanla değişimini veren bir diferansiyel denklem elde edilir. Bu denklemin çözümü ile de herhangi bir zaman için sıcaklık dağılımını ve ara yüzün konumunu elde etmek mümkündür [15].

Katı, sıvı ve ara yüz fazları için sıcaklık ve entalpi arasındaki ilişki

$$T < T_m - \varepsilon \quad \text{için} \quad H(T) = c_p T \quad (\text{katı faz}) \quad (6a)$$

$$T - \varepsilon \leq T_m \leq T + \varepsilon \quad \text{için} \quad H = c_p T + \frac{\lambda}{2\varepsilon} (T - T_m + \varepsilon) \quad (\text{ara yüz}) \quad (6b)$$

$$T > T_m + \varepsilon \quad \text{için} \quad H(T) = c_p T + \lambda \quad (\text{sıvı faz}) \quad (6c)$$

bağıntıları ile verilebilir [19]. Burada ε faz değiştirme aralığının yarısıdır ($\varepsilon = \Delta T / 2$). Bir erime problemi için yukarıdaki bağıntılar şöyle açıklanabilir. Maddenin sıcaklığı, faz değiştirme sıcaklığına ulaşana kadar zamanla lineer olarak artar. Bu noktaya ulaştığında ise madde, faz değiştirme entalpisini (λ) karşılayacak ısıyı dışarıdan çekmeye başlar ve bu süre boyunca sıcaklığı ancak 2ε kadar artar. Bu ısı çekildikten sonra madde, tamamen sıvı hale geçer ve sıcaklığı yine zamanla lineer olarak artmaya devam eder.

İzotermal olarak faz değiştiren maddeler için ε değeri sıfırdır. Bu çalışmada sabit bir T_m sıcaklığında faz değişiminin gerçekleştiği göz önüne alınmış olup bu durum için sıcaklık-entalpi ilişkisi

$$T < T_m \quad \text{için} \quad H(T) = c_p T \quad (\text{kati faz}) \quad (7a)$$

$$T = T_m \quad \text{için} \quad H = c_p T + \frac{\lambda}{2} \quad (\text{ara yüz}) \quad (7b)$$

$$T > T_m \quad \text{için} \quad H(T) = c_p T + \lambda \quad (\text{sıvı faz}) \quad (7c)$$

bağıntıları ile verilebilir.

Çalışmada ele alınan halkasal aralıktaki FDM'ye burada sözü edilen entalpi formülasyonu uygulandığında, problemi temsil eden diferansiyel denklem

$$\rho_p \frac{\partial H}{\partial t} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{k_p}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k_p \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (8)$$

olarak elde edilir. Problemin tam bir matematiksel modeli, (8) denkleminin yanı sıra, problemin fiziğine uygun olarak tanımlanmış başlangıç ve sınır Őartlarını da içermelidir.

Çalışmada, hem faz değiştiren maddenin hem de ısı transfer akışkanlarının başlangıçta aynı bir üniform T_b sıcaklığında buldukları kabul edilerek, ilgili başlangıç Şartları

$$t = 0 \text{'da} \quad T = T_b \quad \text{ve} \quad T_{f1} = T_{f2} = T_b \quad (8a)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Faz değiştiren madde ile ısı transfer akışkanlarını ayıran boru cidarlarının olduğa ince olduğu kabul edilerek, FDM'nin iç borudaki akışkan ve dış aralıktaki akışkanla ısı alış verişine ilişkin sınır Şartları, T_{f1} ve T_{f2} bu akışkanların kesit üzerinden ortalama sıcaklıkları olmak üzere, sırasıyla

$$r = r_1 \text{ 'de } h_1(T - T_{f1}) = k_p \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{ve} \quad r = r_2 \text{ 'de } h_2(T - T_{f2}) = -k_p \frac{\partial T}{\partial r} \quad (8b)$$

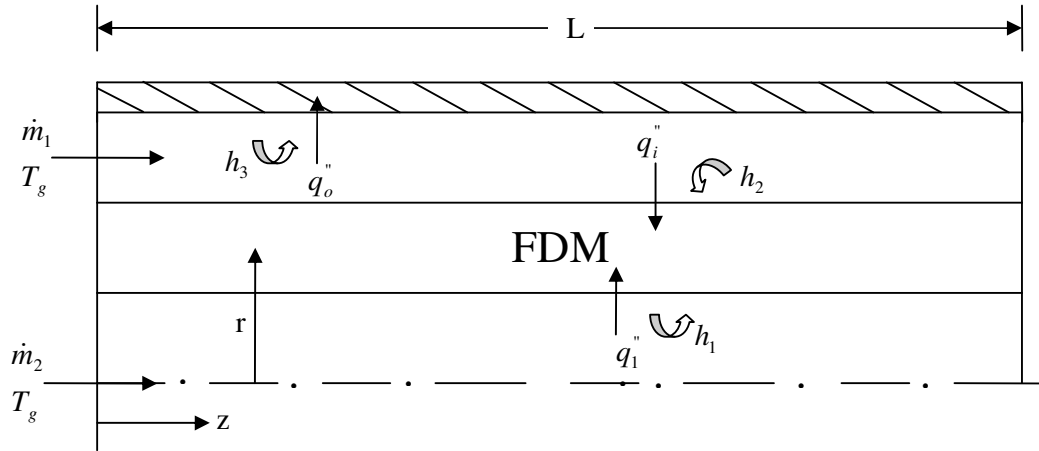
olarak ifade edilirken, FDM'nin konulduğu aralığın $z = 0$ ve $z = L$ 'deki iki alın yüzeyinin mükemmel bir şekilde yalıtılmış oldukları göz önüne alınarak bu uçlar için de sınır şartları

$$z = 0 \text{ 'da } \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{ve} \quad z = L \text{ 'de } \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (8c)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

2.2.2. Isı Transfer Akışkanının Isıl Davranışı

Bölüm 2.2.1'de de bahsedildiği gibi, iç içe yerleştirilmiş eş eksenli bir ısı eşanjörü şeklindeki ısı deposunda ısı transferi akışkanı hem içteki borudan hem de dıştaki halkasal aralıktan akmaktadır.



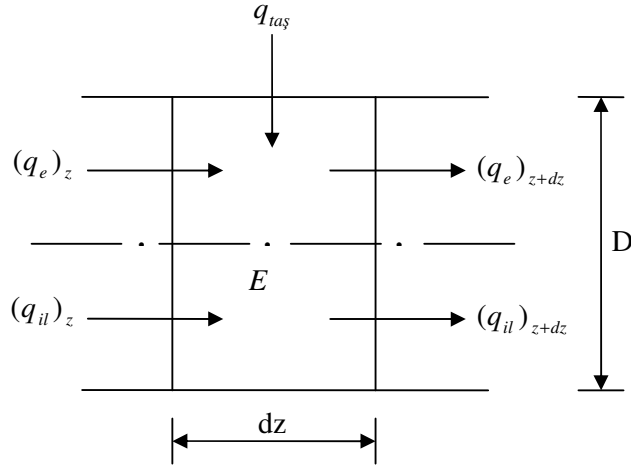
Şekil 4. Boru yüzeylerindeki ısı akıları

Şekil 4'te de gösterildiği gibi, eşanjöre T_g sıcaklığıyla giren akışkan, z -doğrultusunda akarken, boru yüzeyleri aracılığıyla FDM ile ısı alış verişinde bulunmakta,

bu nedenle de akışkan sıcaklığı hem zamanla hem de radyal ve aksenal doğrultularda yerel olarak değişmektedir. Problemi kolaylaştırmak için gerek içteki ve gerekse dış aralıktaki akışın tam gelişmiş olarak kabul edildiğini daha önce belirtmiştik. Buna ek olarak, akışkanların akmakta oldukları kesit alanları üzerinden tanımlanan ortalama sıcaklıkların dikkate alındığı bir formülasyon işimizi biraz daha kolaylaştırmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 5'te gösterilen dz uzunluğundaki bir kontrol hacmine; \dot{E}_g ve $\dot{E}_ç$ sırasıyla denetim hacmine birim zamanda giren ve çıkan toplam enerjiyi, E 'de denetim hacminin sahip olduğu toplam enerjiyi göstermek üzere genel enerji dengesi uygulanarak

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (9)$$

denklemini yazılabilir.



Şekil 5. Akışkan için seçilen bir kontrol hacmi

Şekil 5'te işaretlendiği gibi, kontrol hacmine enerji giriş çıkışları başlıca; boru çidarı ile akışkan arasındaki ısı taşınımı q_{tas} , akışkan içerisinde aksenal doğrultudaki ısı iletimi q_{il} ve hareket halindeki akışkan tarafından akış doğrultusunda taşınan enerji q_e terimlerinden oluşmaktadır. Böylece, Eşitlik (9)'da yer alan \dot{E}_g ve $\dot{E}_ç$ terimleri sırasıyla

$$\dot{E}_g = (q_{il})_z + (q_e)_z + q_{tas} \quad (10)$$

$$\dot{E}_\zeta = (q_{il})_{z+dz} + (q_e)_{z+dz} \quad (11)$$

olarak verilebilir. Buradaki iletim ve taşınım terimlerinin $z + dz$ konumundaki değerleri de Taylor serisi açılımından yararlanılarak

$$(q_{il})_{z+dz} = (q_{il})_z + \frac{\partial(q_{il})_z}{\partial z} dz \quad (12)$$

$$(q_e)_{z+dz} = (q_e)_z + \frac{\partial(q_e)_z}{\partial z} dz \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Fourier ısı iletimi yasasından yararlanarak akış doğrultusunda iletilen ısıyı

$$(q_{il})_z = -k_f \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{\partial T_f}{\partial z} \quad (14)$$

şeklinde ifade edebilirken, T_f ortalama sıcaklığındaki akışkanın akış doğrultusunda taşıdığı ısıyı

$$(q_e)_z = \dot{m} c_f T_f \quad (15)$$

bağıntısıyla ve akışkanla FDM arasındaki ısı alışverişini de

$$(q_{tas}) = h(\pi D dz)(T - T_f) \quad (16)$$

bağıntısıyla verebiliriz. Yoğunluğu ρ_f , özgül ısıyı c_f ve ortalama sıcaklığı T_f olan, $(\pi D^2 / 4) dz$ hacmindeki akışkan elemanının bir t anında sahip olduğu toplam enerjiyi ise

$$E = \rho_f \left(\frac{\pi D^2}{4} dz \right) c_f T_f \quad (17)$$

bağıntısıyla ifade edebiliriz. Bütün bu terimleri genel enerji dengesi ifadesinde yerlerine yazıp gerekli düzenlemeleri yaparak, akışkan için geçerli enerji denklemini

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + U \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = \frac{4h}{D} (T - T_f) + k_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \quad (18)$$

olarak elde ederiz. Problemin çözümü için gerekli başlangıç şartı, daha öncede belirtildiği gibi

$$t = 0 \text{ 'da} \quad T_f = T_b \quad (19)$$

olarak tanımlanırken; sınır şartları olarak, girişte bilinen bir T_g sıcaklığı

$$z = 0 \text{ 'da} \quad T_f = T_g \quad (20)$$

şeklinde göz önüne alınmış, çıkışta ise lineer bir sıcaklık dağılımı kabulü yapılmıştır.

Eşitlik (18) hem iç borudaki akışa hem de dış aralıktaki akışa, ilgili ısı taşınım katsayısı kullanılmak suretiyle uygulanmıştır. Çalışmada, her iki akışın da tam gelişmiş olduğu kabul edildiğinden daha önce bahsedilmiştir. Buna ilave olarak burada, hem iç boru akışı için hem de aralık akışı için ısı taşınım katsayılarının belirlenmesinde

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^n \quad (21)$$

şeklindeki Dittus-Boelter eşitliğinden yararlanılmıştır. Burada n, ısı deposunun şarj veya deşarj edilmesi durumları için sırasıyla 0.3 ve 0.4 değerlerini alır. İç boru akışı için Reynolds ve Nusselt sayıları boru çapına bağlı olarak

$$Re_D = \frac{UD_1}{\nu_f} \quad \text{ve} \quad Nu_D = \frac{h_1 D_1}{k_f} \quad (22)$$

olarak tanımlanırken, halkasal aralıktaki akış için aynı sayılar

$$D_h = \frac{4 * (\text{akış kesit alanı})}{\text{Islak çevre}} = \frac{4\pi(D_3^2 - D_2^2)/4}{\pi D_2 + \pi D_3} = D_3 - D_2$$

şeklinde verilen hidrolik çapa bağlı olarak

$$\text{Re}_{Dh} = \frac{UD_h}{\nu_f} \quad \text{ve} \quad \text{Nu}_{Dh} = \frac{h_2 D_h}{k_f} \quad (23)$$

olarak tanımlanmıştır.

2.3. Denklemlerin Ayrıklaştırılması

Faz değiştirme problemlerinin lineer olmayan yapıları nedeniyle analitik olarak çözümünün zor olduğundan ve bu problemlerin sayısal olarak çözülmesinin daha uygun olduğundan bahsedilmiştir. Sayısal yöntemlerin temelinde, çözülecek denklemlerdeki türev ifadelerinin cebrik ifadeler haline dönüştürülmesi yatmaktadır. Bu çalışmada denklemlerin cebrik ifadelerine dönüştürülmesi için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Türev ifadelerinin sonlu farklara açılmasıyla elde edilen cebrik ifadelerin çözümü için genel olarak eksplisit ve implisit yöntem olarak adlandırılan iki yöntem kullanılır.

Eksplisit yöntemde, boyut terimleri içeren türevler n. zaman adımında sonlu farklara açılır. Zaman terimi içeren türevden gelen (n+1)'li terim ve boyut terimi içeren türevlerden gelen n.'li terimler eşitliğin ayrı taraflarında toplanırlar. Böylece yeni zaman adımındaki değerinin bulunması istenen nokta, kendisinin ve komşu noktalarının önceki zaman adımındaki değerlerine göre tanımlanmış olur. Elde edilen denklemler iteratif bir yöntemle çözülür. Ancak eksplisit yöntemle yazılan programlar her koşul altında kararlı değildir. Seçilecek zaman adımının ve ağ noktası sayısının belli bir kararlılık kriterini sağlaması gerekir. Bu kararlılık kriteri çoğu zaman ağ yapısının daha sık ya da zaman adımının daha büyük seçilmesini engeller.

İmplicit yöntemde bütün boyut terimi içeren türevler (n+1). zaman adımında sonlu farklara açılır. Cebrik ifadelerde n. zaman adımından bilinen terimlerle (n+1). zaman adımındaki terimler eşitliğin ayrı taraflarında toplanırlar. Yeni zaman adımındaki ifadelerin katsayıları bir katsayılar matrisine yerleştirilerek bütün denklemler anlık olarak çözülür. İmplicit yöntem her koşul altında kararlıdır.

Bu çözüm yöntemleri dışında, implicit ve eksplisit yöntemlerin eşit ağırlıkta kullanıldığı Crank-Nicolson Metodu ve çok boyutlu problemler için uygulanması daha kolay olan Değişken Doğrultulu İmplicit Metot da mevcuttur. Bu çalışmada bu yöntem kullanılmıştır.

Değişken Doğrultulu İmplicit Metot: İmplicit yöntemler geçici rejim problemlerinde her koşulda kararlı oldukları için daha çok tercih edilirler. Fakat çok boyutlu problemlerde, her zaman adımında çok sayıda anlık denklem çözülmesi gerektiği için sayısal program çok hantal bir yapıya sahip olmaktadır. Örneğin üç boyutlu problemlerde her bir doğrultuda N sayıda ağ noktası olduğu düşünüldüğünde toplam N^3 sayıda ağ noktası oluşur. Bunun sonucunda her zaman adımı için çözülmesi gereken $N^3 \times N^3$ 'lük bir matris meydana gelir. Bu durum bilgisayar hesaplama zamanının oldukça artmasına neden olur [14].

Değişken Doğrultulu İmplicit Metot, Pacerman ve Rachford tarafından çok boyutlu geçici rejim problemlerinin çözümündeki bu dezavantajları azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu metot iki boyutlu bir düzlem için yazılabilecek bir ısı iletimi denklemi üzerinden şu şekilde açıklanabilir:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (24)$$

İlk önce x'i içeren türevler (n+1). zaman adımında y'i içeren türevler ise n. zaman adımında sonlu farklara açılır. Önceden bilinen n. zaman adımındaki terimlerle (n+1). zaman adımındaki terimler eşitliğin ayrı taraflarında toplanırlar. Yeni zaman adımındaki terimlerin katsayıları katsayılar matrisinin uygun yerlerine yerleştirilir. Her bir adımda elde edilen matris

$$[A].[X] = [C] \quad (25)$$

şeklinde. Burada; A katsayılar matrisini, C önceki zaman adımından bilinen sıcaklıkları X ise sıcaklıkların yeni zaman adımındaki değerlerini göstermektedir. Bu metotla A matrisi, çözümü kolay bir şekilde elde edilebilecek üç bantlı diyagonal bir matris olarak ortaya çıkar.

Bir sonraki zaman adımına geçildiğinde ise bu sefer y'i içeren terimler (n+2)., x'i içeren terimler de (n+1). zaman adımında sonlu farklara açılır ve aynı işlemler tekrarlanarak sıcaklığın (n+2). zaman adımındaki değeri bulunur. Bu işlemler ardışık olarak devam ettirilerek belli bir zaman sonraki sıcaklık dağılımı elde edilir.

Denklemlerin Boyutsuzlandırılması

Ayrıklaştırmaya geçilmeden önce iletim denklemleri boyutsuzlandırılmıştır. Denklemleri boyutsuzlandırmak için kullanılan parametreler şu şekilde seçilmiştir:

$$\phi = \frac{c_p (T - T_m)}{\lambda}, \quad \psi = \frac{H - H_s}{\lambda}, \quad Ste_1 = \frac{c_p (T_m - T_{f1})}{\lambda}, \quad Ste_2 = \frac{c_p (T_m - T_{f2})}{\lambda} \quad (26)$$

$$R = \frac{r}{r_2}, \quad Z = \frac{z}{L}, \quad \tau = \frac{\alpha_p t}{r_2^2}, \quad Bi_1 = \frac{h_1 r_2}{k_p}, \quad Bi_2 = \frac{h_2 r_2}{k_p} \quad (27)$$

Burada H_s maddenin tamamen faz değiştirmesi için gerekli olan entalpiyi gösterip

$$H_s = c_p T_m \quad (28)$$

olarak tanımlanır. Yukarıdaki bağıntılarda geçen ϕ , boyutsuz sıcaklık ve ψ ise boyutsuz entalpi olarak adlandırılabilir. Boyutsuzlandırma sonucunda, problemin genel ifadesini veren (7a), (7b), (7c) ve (8) denklemleri sırasıyla

$$\psi < 0 \quad \text{için} \quad \phi = \psi \quad (\text{katı faz}) \quad (29a)$$

$$0 \leq \psi \leq 1 \quad \text{için} \quad \phi = 0 \quad (\text{ara yüz}) \quad (29b)$$

$$\psi > 1 \quad \text{için} \quad \phi = \psi - 1 \quad (\text{sıvı faz}) \quad (29c)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \phi}{\partial R} + \left(\frac{r_2}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \quad (30)$$

haline dönüşür. Boyutsuzlandırma sonucunda; (8a)'da verilen başlangıç şartı

$$\tau = 0 \text{ 'da} \quad \phi = \frac{c_p (T_b - T_m)}{\lambda} \quad \text{ve} \quad T_{f1} = T_{f2} = T_b \quad (31a)$$

şeklinde yazılabilirken, (8b) ve (8c)'de verilen sınır şartları ise

$$R = \frac{r_1}{r_2} \text{ 'de} \quad \frac{\partial \phi}{\partial R} = Bi_1 (Ste_1 + \phi), \quad R = 1 \text{ 'de} \quad \frac{\partial \phi}{\partial R} = -Bi_2 (Ste_2 + \phi) \quad (31b)$$

$$Z = 0 \text{ 'da} \quad \frac{\partial \phi}{\partial Z} = 0 \quad \text{ve} \quad Z = 1 \text{ 'de} \quad \frac{\partial \phi}{\partial Z} = 0 \quad (31c)$$

olarak yazılabilir.

2.3.1. Faz Değiştiren Maddenin Isıl Davranışını İfade Eden Denklemlerinin Ayrıklaştırılması

Eşitlik (30)'daki boyut terimi içeren türevler

$$\frac{\partial \phi}{\partial R} = \frac{\phi_{i+1,k} - \phi_{i-1,k}}{2\Delta R} \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial R^2} = \frac{\phi_{i-1,k} + -2\phi_{i,k} + \phi_{i+1,k}}{(\Delta R)^2} \quad (33)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} = \frac{\phi_{i,k-1} - 2\phi_{i,k} + \phi_{i,k+1}}{(\Delta Z)^2} \quad (34)$$

şeklinde merkezi farka açılırken, zaman terimi içeren türev

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\psi_{i,k}^{n+1} - \psi_{i,k}^n}{\Delta \tau} \quad (35)$$

olarak ileri farka açılmıştır. FDM'deki ısı iletimi iki boyutlu olarak gerçekleştirildiğinden bu problemin çözümünde Değişken Doğrultulu İmplicit metodun kullanılması daha uygundur. Buna göre, radyal doğrultuda boyut terimleri içeren (32) ve (33) denklemleri (n+1)., aksenal doğrultuda boyut türevi içeren (34) denklemi ise n. zaman adımında sonlu farklara açılıp (35)'te verilen zaman terimi içeren ifade ile birlikte bu dört denklem (30)'da yerlerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\Delta R_3 (f_1 \phi_{i-1,k}^{n+1} - 2\phi_{i,k}^{n+1} + f_2 \phi_{i+1,k}^{n+1}) + \Delta Z_3 (\phi_{i,k-1}^n - 2\phi_{i,k}^n + \phi_{i,k+1}^n) = w_1 (\psi_{i,k}^{n+1} - \psi_{i,k}^n) \quad (36)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede

$$\Delta R_3 = \frac{1}{(\Delta R)^2}, \quad \Delta Z_3 = \left(\frac{r_2}{\Delta Z.L} \right)^2 \quad (37)$$

$$f_1 = \left[1 - \frac{1}{2 \left(\frac{r_1}{\Delta r} + i - 1 \right)} \right], \quad f_2 = \left[1 + \frac{1}{2 \left(\frac{r_1}{\Delta r} + i - 1 \right)} \right] \quad \text{ve} \quad w_1 = \frac{1}{\Delta \tau} \quad (38)$$

olarak tanımlanmıştır. Eşitlik (38)'de yer alan i terimi, radyal yöndeki ağ numarasını göstermektedir.

Eşitlik (36)'nın sol tarafında boyutsuz sıcaklık terimleri sağ tarafında ise boyutsuz entalpi terimleri bulunmaktadır. Boyutsuz sıcaklık terimlerini boyutsuz entalpi cinsinden tanımlayarak bu denklem homojen hale getirilmelidir. Bunu sağlamak için boyutsuz sıcaklık

$$\phi = \psi + \psi' \quad (39)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada ψ' , ψ 'nin bir önceki zaman adımındaki değerine bağlı olarak her iki faz ve ara yüz için

$$\psi < 0 \quad \text{için} \quad \psi' = 0 \quad (\text{katı faz}) \quad (40a)$$

$$0 \leq \psi \leq 1 \quad \text{için} \quad \psi' = -\psi \quad (\text{ara yüz}) \quad (40b)$$

$$\psi > 1 \quad \text{için} \quad \psi' = -1 \quad (\text{sıvı faz}) \quad (40c)$$

değerlerini alır [18]. Eşitlik (39) Eşitlik (36)'da yerine konulup gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\begin{aligned} & \Delta R_3 f_1 \psi_{i-1,k}^{n+1} - (2\Delta R_3 + w_1) \psi_{i,k}^{n+1} + \Delta R_3 f_2 \psi_{i+1,k}^{n+1} \\ &= -\Delta Z_3 \psi_{i,k-1}^n + (2\Delta Z_3 - w_1) \psi_{i,k}^{n+1} - \Delta Z_3 \psi_{i,k+1}^n - \Delta Z_3 \psi_{i,k-1}^n \\ & \quad + (2\Delta Z_3 - w_1) \psi_{i,k}^{n+1} - \Delta Z_3 \psi_{i,k+1}^n - \Delta R_3 f_1 \psi_{i-1,k}^{n+1} + 2\Delta R_3 \psi_{i,k}^{n+1} - \Delta R_3 f_2 \psi_{i+1,k}^{n+1} \end{aligned} \quad (41)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade, çözüm bölgesinde $i=2, N-1$, $k=2, M-1$ olarak gösterilen ara noktalar için geçerlidir.

Sınır şartlarının uygulanması sonucunda ara noktalar için oluşturulan denklemlerle birlikte sol ve sağ yüzeyler için de iki ayrı ifade daha elde edilir. Her kolon için oluşan N sayıdaki denklem takımının katsayıları, Eşitlik (25)'te sembolize edilen matrisin uygun yerlerine yerleştirilip elde edilen üç bantlı diyagonal matrisler kolon kolon çözülür ve (n+1). zaman adımı tamamlanır. Bir sonraki zaman adımına geçildiğinde ise eksenel yöndeki türevler (n+2). zaman adımında, radyal yöndeki türevler (n+1). zaman adımında sonlu farklara açılır. Benzer şekilde iç yüzey, dış yüzey ve ara noktaların her biri için M sayıda denklem elde edilir. Bu denklemlerin oluşturduğu matrisler satır satır çözülür ve bu yöndeki taramalar da tamamlanır. Eksenel ve radyal yöndeki bu taramalar ardışık olarak devam ettirilerek malzemedeki ısı iletimi probleminin çözümü elde edilir.

2.3.2. Isı Transfer Akışkanının Isıl Davranışını İfade Eden Enerji Denkleminin Ayrıklaştırılması

Eşitlik (18)'de verilen enerji denkleminin ayrıklaştırılmasında tam implisit metot kullanılmıştır. Buna göre türev terimleri

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{T_{f_i}^{n+1} - T_{f_i}^n}{\Delta t} \quad (42)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{T_{f_{i+1}}^{n+1} - T_{f_{i-1}}^{n+1}}{2\Delta z} \quad (43)$$

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} = \frac{T_{f_{i-1}}^{n+1} - 2T_{f_i}^{n+1} + T_{f_{i+1}}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \quad (44)$$

şeklinde sonlu farklara açılmıştır. Bu sonlu fark terimlerinin Eşitlik (18)'de yerlerine yazılması ve gerekli düzenlemelerin yapılmasıyla

$$-(\beta + Fo_h)T_{f_{i-1}}^{n+1} + (1 + \gamma + 2Fo_h)T_{f_i}^{n+1} + (\beta - Fo_h)T_{f_{i+1}}^{n+1} = \gamma T - T_{f_i}^n \quad (45)$$

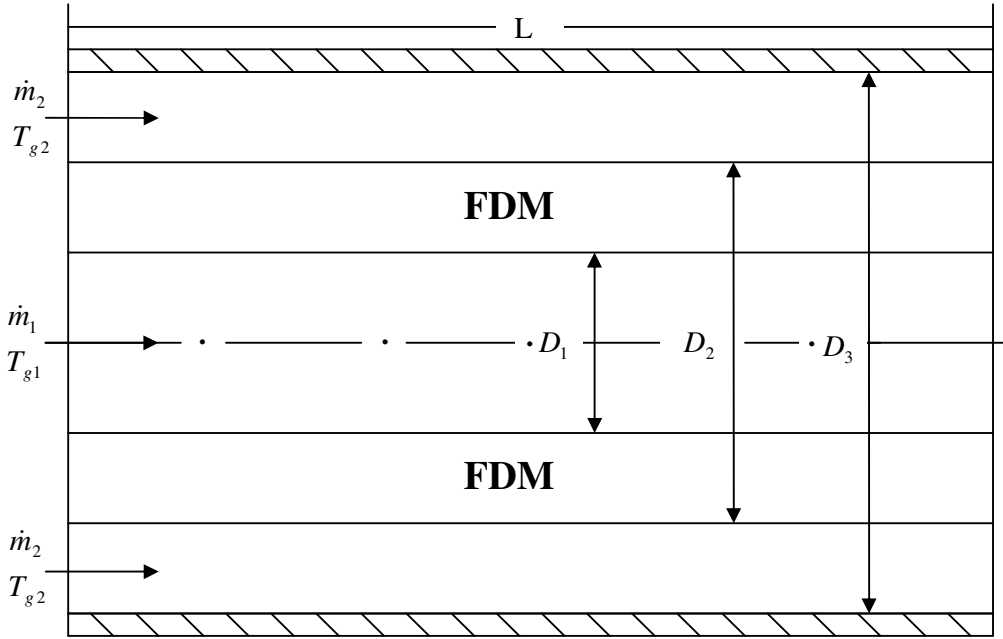
ifadesi elde edilmiştir. Burada

$$Fo_h = \alpha_f \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2}, \quad \beta = \frac{U\Delta t}{2\Delta z} \quad \text{ve} \quad \gamma = \frac{4h\Delta t}{\rho_f c_f D} \quad (46)$$

olarak tanımlanmıştır. Eşitlik (45) ara noktalar için geçerlidir. Bu denklemin katsayıları ile birlikte, sınır şartlarının uygulanmasıyla elde edilen diğer denklemlerin katsayıları, oluşturulan üç bantlı diyagonal matrise yerleştirilip denklem takımları çözüldüğünde akışkan içerisindeki sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak bulunur.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışmanın literatür araştırması kısmında da bahsedildiği gibi, ısı eşanjörleri, faz değiştiren madde kullanarak ısı enerji depolanması uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür ısı depolarında, iç borudan bir akışkan geçirilerek iç ve dış boru arasındaki halkasal aralığa yerleştirilen maddenin faz değiştirmesi sağlanır ve böylelikle ısı deposu şarj/deşarj edilmiş olur. Deponun şarj/deşarj edilme süresi, yani maddenin tamamen faz değiştirmesi için gerekli olan süre, ısı depolama uygulamaları için en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada esas olarak, bu türden bir ısı deposunun Şekil 6'da şematik olarak gösterilen üç borulu bir ısı eşanjörü şeklinde imal edilmesi durumunda, maddenin faz değiştirme süresinde dikkate değer bir değişimin elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır.



Şekil 6. Eş eksenli üç borulu ısı deposu kesitinin gösterimi

Bu çalışmada, ısı deposunun şarj/deşarj edilme süresi üzerinde etkili olabilecek parametreler; ısı transfer akışkanının kütleli debisi, çeşitli geometrik düzenlemeler ve akışkanların eşanjöre giriş sıcaklıkları olarak belirlenmiştir.

Geometrinin sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılırken, değişik r_1 yarıçapları ve farklı $r_2 - r_1$ kalınlıkları seçilmiş ve elde edilen farklı geometrilerin deponun şarj/deşarj süresini nasıl etkilediği belirlenmiştir. Bunun için, üç farklı $r_2 - r_1$ kalınlığı ve her bir $r_2 - r_1$ kalınlığı için üç farklı r_1 yarıçapı seçilerek toplam dokuz farklı geometri elde edilmiştir. Seçilen geometrik düzenlemeler Tablo 10'da verilmiştir. Isı deposunun dış yarıçapı $r_3 = 0.05$ m ve uzunluğu $L = 2$ m olarak seçilmiştir.

Tablo 10. Seçilen $r_2 - r_1$ kalınlıkları ve r_1 yarıçap değerleri

$r_2 - r_1$ (m)	0.01			0.02			0.03		
r_1 (m)	0.01	0.02	0.03	0.01	0.015	0.02	0.005	0.01	0.015

Isı deposunun şarj/deşarj edilme süresi üzerinde etkisi olan diğer bir parametre ısı transfer akışkanının kütleli debisidir. Bu çalışmada ısı deposunun yalnızca şarj edilmesi durumu çalışılmıştır. İç borudan ve $r_3 - r_2$ halkasal aralığında eşit debilerde su geçirilerek maddenin eritilmesi sağlanmıştır. Çeşitli akışkan debilerinde çalışılarak debinin maddenin faz değiştirme süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Debinin şarj süresi üzerindeki etkisi çalışılırken akışkanın giriş sıcaklığı $T_g = 80^\circ\text{C}$ olarak seçilmiştir. Bütün çalışma boyunca faz değiştiren maddenin başlangıç sıcaklığı $T_b = 20^\circ\text{C}$ 'dir. Ayrıca farklı akışkan giriş sıcaklıklarının ısı deposunun şarj olma süresi üzerindeki etkileri de belirlenmiştir.

Bütün bu bahsedilen parametrelerin ısı deposunun performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen verilerden en çok hangi geometrik düzenlemenin daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, iki borulu ısı eşanjörü şeklindeki ısı depolarının performansı ile karşılaştırılmıştır. Bunların dışında, seçilen farklı geometriler için depolanan toplam enerji ve bu depolanan enerjinin zamanla nasıl değiştiği de belirlenmiştir.

Çalışmada, faz değiştiren madde olarak Rubitherm firması tarafından üretilen ticari bir parafin olan RT52, ısı transfer akışkanı olarak ise su kullanılmıştır. Isı depolama maddesi olarak kullanılan RT 52'nin ve suyun termofiziksel özelliklerinin bu çalışmada göz önüne alınan sıcaklık limitleri arasındaki ($20^\circ\text{C} \div 80^\circ\text{C}$) ortalama değerleri sırasıyla Tablo 11'de ve Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 11. Isı depolama maddesi olarak kullanılan RT 52'nin termofiziksel özellikleri

Dönüşüm sıcaklığı, T_m (°C)	Gizli ısı, λ (J/kg)	Isı iletim katsayısı, k_p (W/mK)	Özgül ısı, c_p (J/kgK)	Yoğunluk, ρ_p (kg/m ³)
52	167000	0.2	2100	835

Tablo 12. Suyun termofiziksel özellikleri

Isı iletim katsayısı, k_f (W/mK)	Özgül ısı, c_f (J/kgK)	Yoğunluk, ρ_f (kg/m ³)	Dinamik viskozite, μ (kg/ms)
0.6	4182	998.2	0.001003

Çalışmada göz önüne alınan ısı depolama sisteminde, Şekil 6'da gösterildiği gibi, halkasal aralığa yerleştirilen madde, hem iç borudan hem de $r_3 - r_2$ halkasal aralığından geçen akışkanla ısı alışverişinde bulunmaktadır. Gerçekleşen bu ısı transferi nedeniyle, madde belli bir süre sonra faz dönüşüm sıcaklığına ulaşmakta ve iki ayrı sıvı-katı ara yüzü ortaya çıkmaktadır. Bu iki ara yüz zamanla ilerleyerek halkasal aralığın radyal olarak orta noktasına yakın bir yerde birbirleriyle çakışarak tek bir sıvı-katı bölgesi oluşturmaktadır. Bu bölgenin entalpisi zamanla doyma noktasına ulaşınca maddenin faz değişimi tamamlanmış olmaktadır.

Bu çalışmada ara yüzlerin ilerleyişinin kütleli debiyle, zamanla ve geometrik büyüklüklerle nasıl değiştiği de incelenmiş ve sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi maddenin boyutsuz entalpi değerinin (ψ) 0 ile 1 arasında değiştiği bölgeler ara yüz olarak tanımlanmıştır. Ara yüzlerin konumları grafiklere aktarılırken boyutsuz entalpi değerinin 1 olduğu yani faz değişiminin tamamen bittiği ilk nokta dikkate alınmıştır. Yine bununla ilgili grafikler çizilirken, maddenin yerleştirildiği halkasal aralık için radyal koordinat; 0 aralığın iç yüzeyini, 1 ise dış yüzeyi göstermek üzere

$$R_s = \frac{r - r_1}{r_2 - r_1} \quad (47)$$

şeklinde boyutsuzlandırılmış ve böylece boyutsuz radyal koordinatın değişim aralığının $0 \leq R_s \leq 1$ ($r = r_1$ için $R_s = 0$ ve $r = r_2$ için $R_s = 1$) şeklinde olması sağlanmıştır. İç ve dış ara yüzlerin konumları da sırasıyla

$$s_a = \frac{r_a - r_1}{r - r_1} \quad \text{ve} \quad s_{ii} = \frac{r_{ii} - r_1}{r - r_1} \quad (48)$$

olarak gösterilmiştir. Burada, r_a ve r_{ii} iç ve dış ara yüzlerin radyal doğrultudaki konumlarını göstermektedir.

Ayrıca grafiklerde zamana göre değişimler çizilirken, Fourier sayısı olarak adlandırılan ve

$$Fo_r = \frac{\alpha_p t}{[(r_3 / (N - 1))]^2} \quad (49)$$

şeklinde tanımlanan bir boyutsuz zaman ifadesi kullanılmıştır.

3.1. Kütleli Debinin Isı Deposunun Performansı Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmada maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın kalınlığı $(r_2 - r_1)$ için 1 cm, 2 cm ve 3 cm olarak üç farklı değer göz önüne alınmıştır. Kütleli debinin sistem performansı üzerindeki etkisi bu üç farklı aralık için ayrı ayrı incelenirken iç boru yarıçapı $r_1 = 1$ cm olmak üzere sabit alınmıştır. İç borudaki ve $r_3 - r_2$ halkasal aralığındaki akışın türbülanslı akış rejiminde olmasına özen gösterilmiştir. Çalışmada seçilen yarıçap değerleri göz önüne alındığında, hem iç boruda hem de dış halkasal aralıkta akışın türbülanslı olması için kütleli debinin en düşük değerinin 0.5 kg/s civarında olması gerektiği görülmüştür.

3.1.1. Maddenin Yerleştirildiği Halkasal Aralığın Kalınlığının 1 cm Olması Durumu

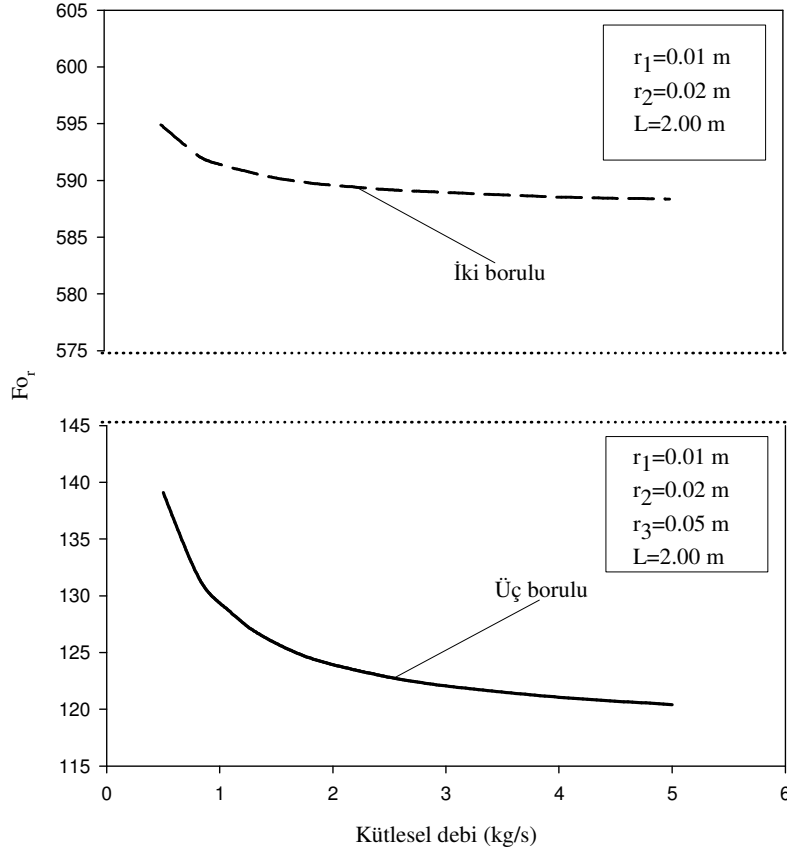
Halkasal aralığın 1 cm olması durumu için kütleli debinin sistemin performansı üzerindeki etkileri incelenirken ısı deposunun boyutları; $r_1 = 0.01$ m, $r_2 = 0.02$ m, $r_3 = 0.05$ m, $L = 2$ m olarak seçilmiştir.

Şekil 7’de iki borulu ve üç borulu ısı eşanjörlerinde $T_g = 80^\circ\text{C}$ için faz değıştiren maddenin erime süresinin kütleli debi ile değışimi gösterilmiştir. Her iki durum için de kütleli debinin küçük değerlerinde, maddenin erime süresinin kütleli debiden oldukça fazla etkilendiği görülmektedir. Kütleli debinin maddenin erime süresi üzerindeki etkisi belirli bir değerden sonra azalmaktadır. Yine şekilden de görülebileceği gibi üç borulu ısı eşanjörü kütleli debiden daha fazla etkilenmektedir. Üç borulu ısı eşanjörü şeklindeki ısı deposu iki borulu sisteme göre çok daha hızlı şarj olmaktadır. Örneğin $\dot{m} = 0.5$ kg/s koşullarında maddenin tamamen erimesi iki borulu eşanjör durumunda 2037 saniye alırken, bu süre üç borulu eşanjör durumunda 476 saniyeye düşmektedir. Dolayısıyla söz konusu durumda, üç borulu eşanjör kullanıldığında ısı deposunun şarj edilme süresi 4.28 kat azaltılmış olmaktadır.

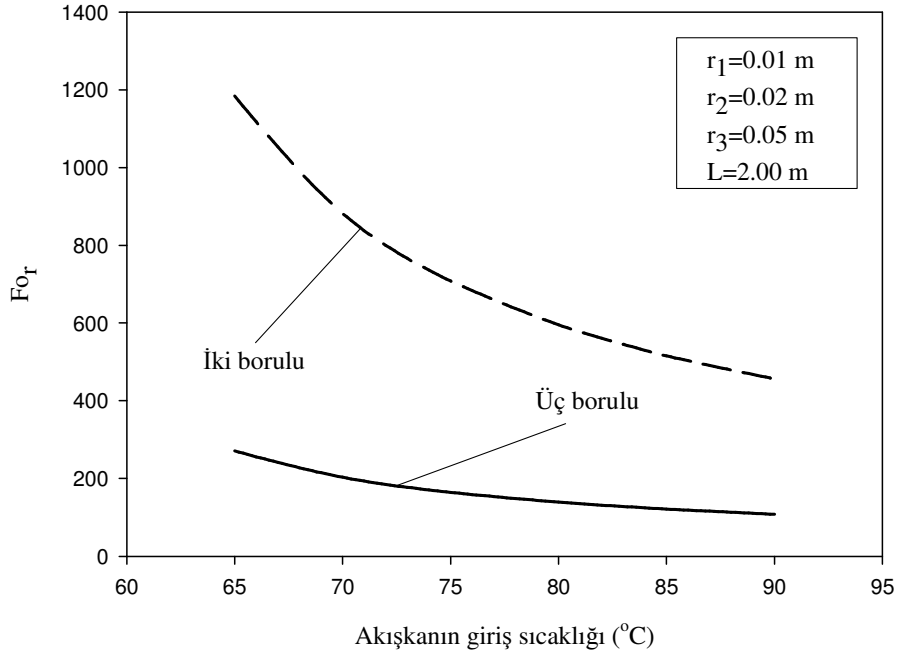
Şekil 8’de, yine iki borulu ve üç borulu ısı eşanjörleri için $\dot{m} = 0.5$ kg/s koşullarında deponun şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değışimi gösterilmiştir. Şekilden, akışkanın giriş sıcaklığının maddenin erime süresi üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Akışkanın giriş sıcaklığı düştükçe deponun şarj edilme süresi artmakta ve beklendiği gibi bu sıcaklığın maddenin faz değıştirme sıcaklığına yaklaşması durumunda deponun şarj edilme süresi asimptotik olarak sonsuza gitmektedir. Oransal olarak bakıldığında, iki tip ısı eşanjöründe de akışkan giriş sıcaklığının maddenin erime süresi üzerinde benzer bir etki yaptığı anlaşılmaktadır. Her iki sistemde de akışkan sıcaklığı 65°C yerine 90°C seçildiğinde deponun şarj olma süresi %60 civarında azalmaktadır.

Şekil 9’da değışik kütleli debiler için maddenin erime süresinin akışkanın giriş sıcaklığı ile değışimi gösterilmiştir. Şekildeki eğrilerden bütün kütleli debilerdeki değışimin karakteristik olarak aynı olduğu, erime süresinin akışkanın giriş sıcaklığının düşük olduğu bölgede bu sıcaklıktaki değışmeden önemli ölçüde etkilendiği gözlenmektedir.

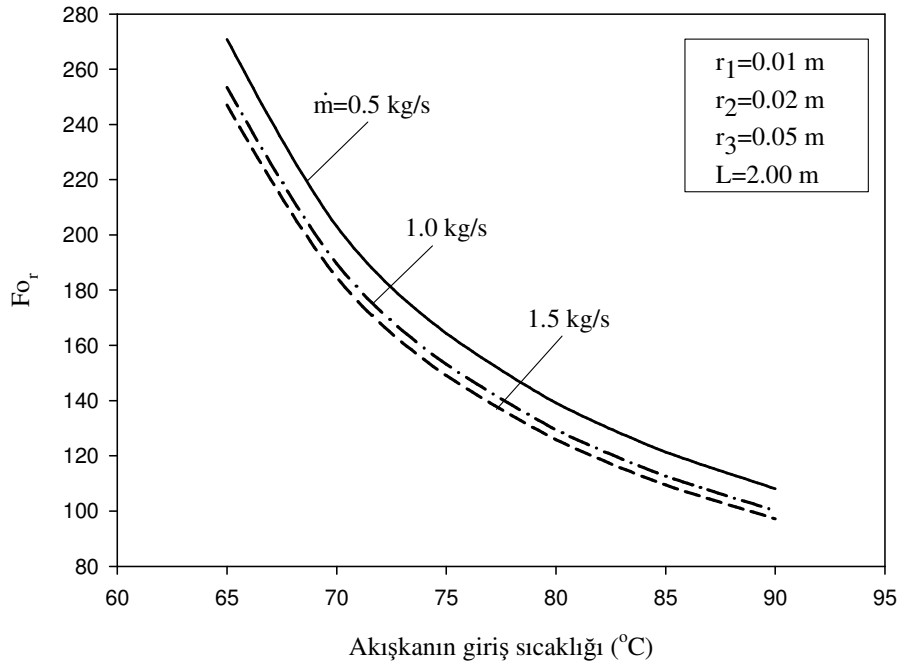
Şekil 10'da iki borulu ve üç borulu ısı eşanjörlerinde $z/D_3 = 10$ 'da yani eşanjörün aksenal olarak orta kesitinde, $T_g = 80^\circ\text{C}$ ve $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$ koşullarında ara yüzlerin radyal doğrultuda zamanla ilerleyişleri gösterilmiştir. Üç borulu sistemde oluşan iç ve dış ara yüzler $Fo_r \cong 135$ 'de radyal yönde halkasal aralığın tam orta noktasına yakın bir yerde çakışmaktadır. Isı taşınım katsayısının iç borudaki akışta çok daha yüksek değerler alması nedeniyle başlangıçta iç ara yüz daha hızlı ilerlemiştir. Hızı çok daha yüksek olan iç borudaki akış kısa sürede T_g sıcaklığında ısıl dengeye ulaşırken, zaman ilerledikçe iç borudaki ve dış aralıktaki akışkanların sıcaklıkları arasındaki fark azalmaktadır. Ayrıca dış yüzeyde birim derinlikteki iletim direnci iç yüzeye nazaran daha az olduğundan zamanla iç ve dış ara yüzlerin ilerleme miktarları dengelenmektedir. İki borulu sistemde ise içten dışa doğru ilerleyen tek bir ara yüz ortaya çıkmaktadır. Bu ara yüz $Fo_r \cong 593$ anında halkasal aralığın dış yüzeyine ulaşmaktadır.



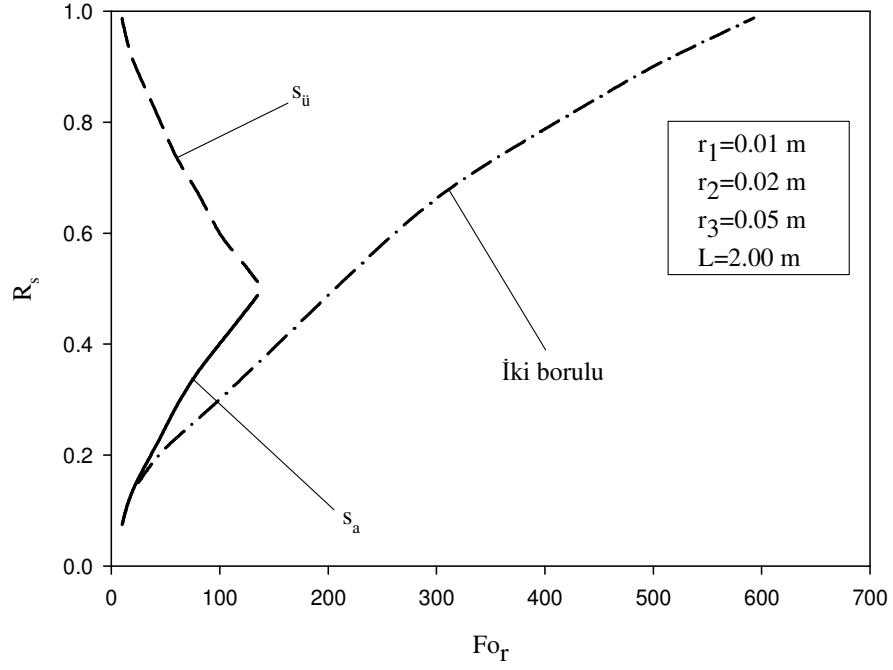
Şekil 7. İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$)



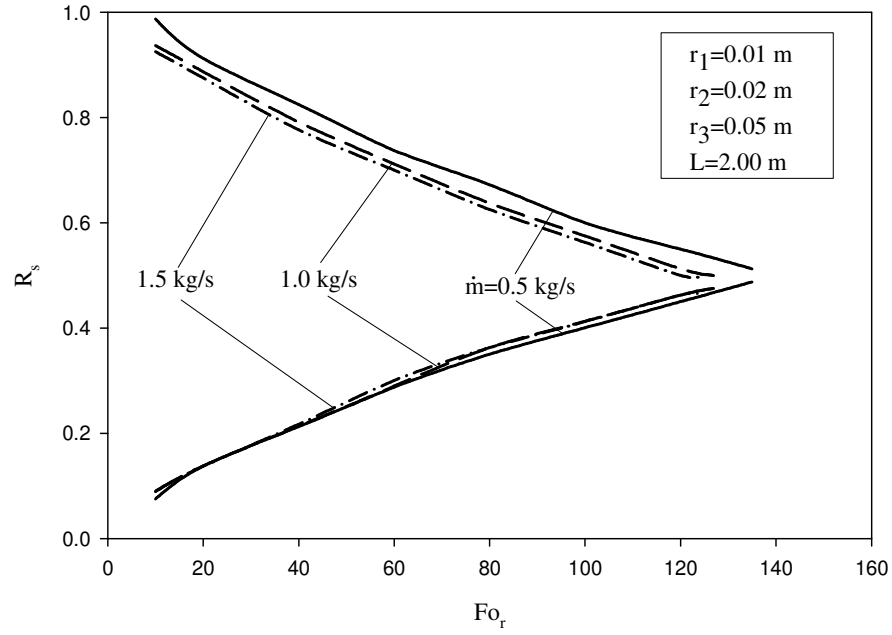
Şekil 8. İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



Şekil 9. Çeşitli debilerde akışkan giriş sıcaklığının deponun şarj edilme süresi üzerindeki etkisi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



Şekil 10. İç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



Şekil 11. Çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)

Şekil 11’de çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi gösterilmiştir. Debi büyüdükçe ara yüzlerin ilerleme miktarları artmaktadır. Her üç kütleli debi için de ara yüzlerin davranışları benzer karakterdedir. Şekilden dış ara yüzün debi artışından daha fazla etkilendiği görülmektedir.

İç akış ve dış akış etkisiyle oluşan katı sıvı ara yüzlerinin davranışını izlemek üzere Şekil 12 dizayn edilmiştir. Bu şekilde, çeşitli zamanlarda (çeşitli Fo_r sayılarında) katı-sıvı ara yüzlerinin aksel doğrultu boyunca konumları görülmektedir. Küçük Fo_r sayılarında alt ara yüz daha hızlı ilerlerken, Fo_r sayısı daha büyük değerler aldığı anda iki ara yüzün ilerledikleri noktalar simetrik bir hal almaktadır. Belirli bir anda, boru girişinde ara yüzler radyal yönde daha fazla ilerlerken, z/D_3 büyüdükçe dış ara yüz boru cidarına iç ara yüz de eşanjörün aksine daha yakın olmaktadır. Bu durum ısı transfer akışkanının sıcaklığının boru boyunca düşüyor olmasından kaynaklanmaktadır. Yine de, akışkan çıkış sıcaklığı, kısa süre içinde akışkanın giriş sıcaklığına yakın değerler aldığından boru boyunca ara yüzlerin konumu çok fazla değişmemektedir. Türbülanslı akış koşulunu sağlamak için seçilmesi gereken minimum kütleli debi değerleri 0.5 kg/s civarında olmakta ve bu debi değerlerine karşılık gelen Reynolds sayıları ve ısı taşınım katsayıları özellikle iç boru için yüksek değerler almaktadır. İç borudaki akışkan daha hızlı bir şekilde ısı dengeye yaklaştığı için de alt ara yüzün boru boyunca radyal doğrultudaki konumu neredeyse sabit olmaktadır. Bu durum Şekil 13’te daha açık olarak görülmektedir. Bu grafikte $Fo_r = 80$ ’de iki ayrı debide ara yüzlerin konumları gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi alt ara yüzün radyal konumu aksel doğrultuda hemen hemen hiç değişmemektedir. Düşük Reynolds sayısı nedeniyle, $r_3 - r_2$ halkasal aralığında akan akışkanın sıcaklığı boru boyunca daha fazla değiştiğinden, üst ara yüzün konumu z/D_3 arttıkça boru cidarına yaklaşmaktadır. Ancak kütleli debi büyüdükçe üst ara yüzün değişimi de sabitleşmektedir.

Şekil 14’te, $T_m = 52^\circ\text{C}$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$ ve $Fo_r = 20$ için, eşanjörün girişinde ($z/D_3 = 0$), orta noktasında ($z/D_3 = 10$) ve çıkışında ($z/D_3 = 20$) sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi sıcaklık dağılımı paraboliktir ve maddenin dönüşüm sıcaklığı olan 52°C ’de bir kırılma meydana gelmektedir. Madde faz değişimini tamamladıktan sonra sıcaklık daha hızlı bir şekilde ve lineer olarak artmaktadır. Eşanjör girişindeki kesitte en düşük sıcaklık $R_s \cong 0.5$ ’te 37°C

olarak tespit edilirken, eşanjör çıkış kesitinde en düşük sıcaklığın 31°C civarında olduğu ve bu değere $R_s \cong 0.54$ 'te erişildiği görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi $0 \leq R_s \leq 0.1$ aralığında, eşanjör girişi ve çıkışı arasında çok az bir sıcaklık farkı oluşurken borunun dış yüzeyini gösteren $R_s = 1$ civarında boru eksenine boyunca nispeten daha fazla bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu anda ($For = 20$ 'de) giriş kesitinde ($z/D_3 = 0$ 'da) $R_s < 0.15$ ve $R_s > 0.88$ bölgelerinde faz değişimi tamamlanmış, $0.15 \leq R_s \leq 0.88$ aralığı katı fazındadır. Yine aynı anda, eşanjör çıkış kesitinde ise tamamen erimiş bölgeler $R_s < 0.13$ ve $R_s > 0.93$ bölgeleri ve henüz katı fazda olan bölge de $0.13 \leq R_s \leq 0.93$ bölgesi olarak gözükmektedir. Yine aynı grafikte $0.3 \leq R_s \leq 0.9$ arasında eşanjör girişi ve çıkışı arasında önemli bir sıcaklık farkı olduğu görülmektedir. Çünkü madde içerisinde bazı noktaların faz değiştirmesi tamamlandıktan sonra sıcaklıkları hızla artarken komşu noktaların faz değiştirmesi henüz bitmemiştir.

Şekil 15'te, $For = 20$ için, çeşitli debilerde eşanjör çıkış kesitinde sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden, maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın ara noktalarında sıcaklık dağılımının kütesel debiden oldukça etkilendiği görülmektedir. Debinin artmasıyla minimum sıcaklık noktasının daha küçük R_s değerlerine kaydığı ve minimum sıcaklığın değerinin arttığı görülmektedir. Maddenin faz değişimini tamamlamasından sonra ise sıcaklık farkları azalmaktadır.

Şekil 16'da depolanan ısı enerjisinin zamanla değişimi; duyulur ısı, gizli ısı bileşenleri ve toplam ısı olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, başlangıçta duyulur ısı olarak depolanan ısı enerji daha fazladır. Zaman ilerledikçe, madde içerisindeki bazı bölgeler dönüşüm sıcaklığına ulaşmakta ve dolayısıyla bölgeler arası sıcaklık farkı azalmaktadır. Bu durum duyulur ısının artış hızının düşmesine neden olmaktadır. Gizli ısı olarak depolanan enerji miktarı ise depo şarj olana kadar lineer olarak artmaktadır. Belirli bir anda, ($For \cong 140$) madde faz değişimini tamamlamakta ve dolayısıyla bundan sonra maddede gizli ısı depolanması söz konusu olamayacağından bu bileşende herhangi bir artış meydana gelmemektedir. Faz değişiminin tamamlanmasından sonra, madde içerisinde yeniden bir sıcaklık farkı meydana gelmekte ve bu da duyulur ısı bileşeninde yeniden önemli bir artışın ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Toplam enerjideki artış her noktada maddenin sıcaklığının akışkan giriş sıcaklığına erişmesiyle birlikte $For = 250$ civarında son bulduğu için sistemin bu anda ısı dengeye ulaştığı sonucu çıkarılabilir.

Şekil 17’de çeşitli debilerde depolanan toplam enerjinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi ısı dengeye erişmezden evvelki aynı For sayılarında, büyük debilerde daha fazla enerji depolanmaktadır. Ancak belli bir debi değerinden sonra debinin etkisinin azaldığı görülmekte ve sonuçta ısı dengeye erişildiğinde, akışkan debisine bağlı olmaksızın tek bir toplam ısı değerine ulaşılmaktadır. Şekilden bu değer yaklaşık 461.162 kJ civarında olduğu söylenebilir.

Seçilen geometri büyüklükleri; $r_1 = 0.01$ m, $r_2 = 0.02$ m, $r_3 = 0.03$ m, $L = 2$ m ve diğer ısı depolama koşulları $T_m = 52$ °C, $T_b = 20$ °C, $T_g = 80$ °C, $\rho_p = 835$ kg/m³, $\lambda = 167000$ J/kg için faz değiştiren maddede depolanabilecek toplam ısı enerjinin değeri $Q_{T,max}$; Q_D duyulur ısı ve Q_G gizli ısı olmak üzere

$$Q_{T,max} = Q_D + Q_G \quad (50)$$

bağıntısından kolayca hesaplanabilir. Duyulur ve gizli ısı bileşenleri

$$m = \rho_p \nabla = \rho_p \pi (r_2^2 - r_1^2) L \quad (51)$$

bağıntısından belirlenen FDM kütesine bağlı olarak sırasıyla

$$Q_D = mc_p (T_g - T_b) \quad \text{ve} \quad Q_G = m\lambda \quad (52)$$

eşitliklerinden hesaplanabilir. Şekil 16 ve 17 için göz önüne alınan sayısal değerler kullanıldığında bulunan ara değerler ve depolanan toplam ısı enerjinin değeri şunlardır:

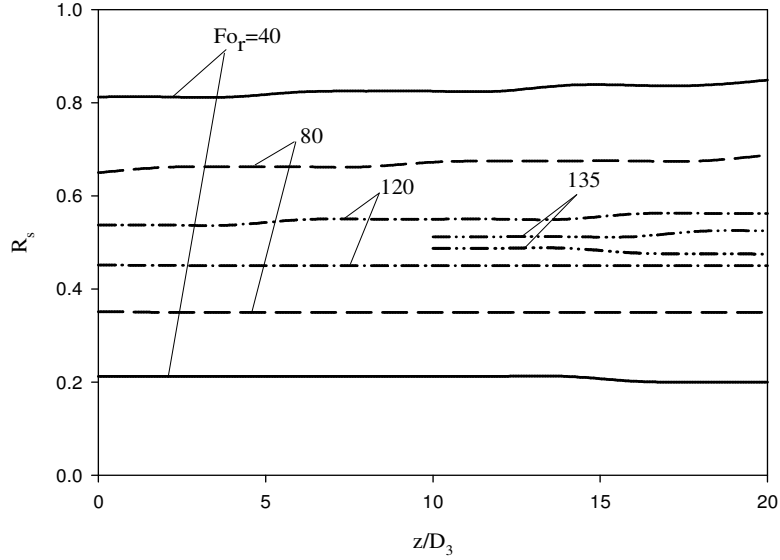
$$m = 835 \text{ kg/m}^3 \times \pi (0.02^2 - 0.01^2) \text{m}^2 \times 2 \text{ m} = 1.574 \text{ kg}$$

$$Q_D = 1.574 \text{ kg} \times 2100 \text{ kJ/kgK} \times (80 - 20) \text{K} = 198.316 \text{ kJ}$$

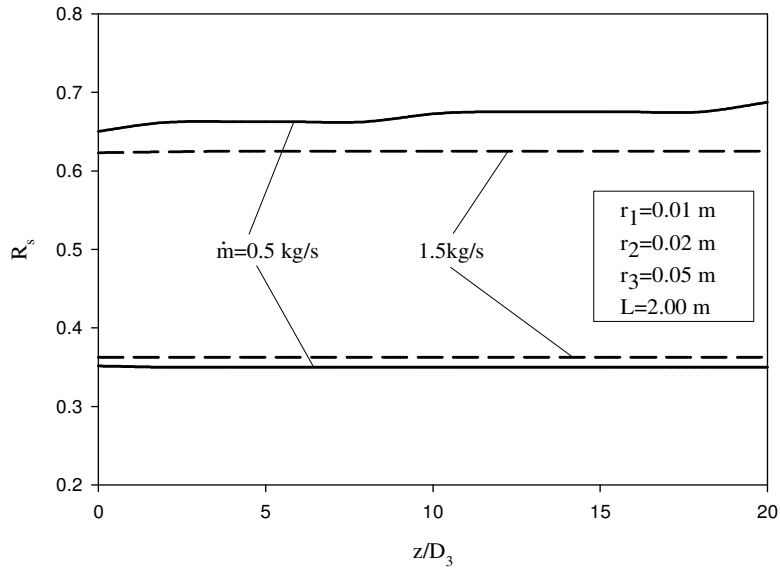
$$Q_G = 1.574 \text{ kg} \times 167000 \text{ kJ/kg} = 262.846 \text{ kJ}$$

$$Q_{T,max} = (198.316 + 262.846) \text{ kJ} = 461.162 \text{ kJ}$$

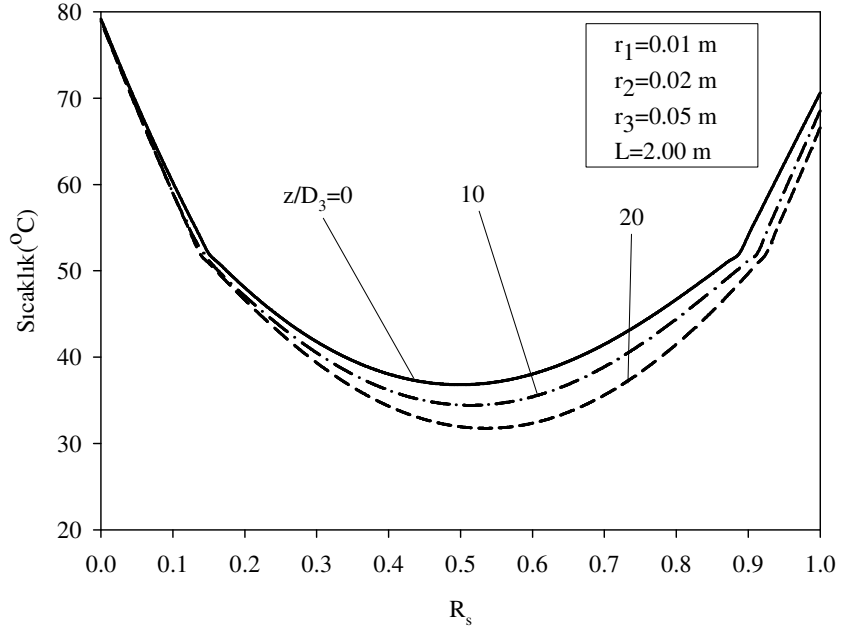
Bu şekilde elde edilen toplam ısı değerinin Şekil 17'den $Fo_r \rightarrow \infty$ için okunan değerle aynı olduğu görülmektedir. Bu basit işlem bir bakıma sayısal çalışmanın doğruluğunun kontrolü olarak değerlendirilebilir.



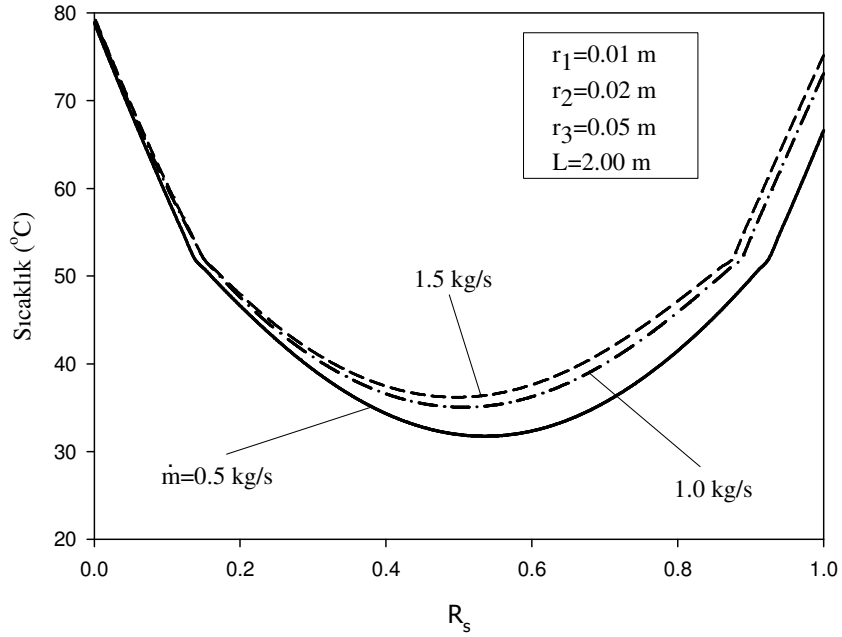
Şekil 12. Ara yüzlerin çeşitli zamanlarda aksenal doğrultudaki konumu ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



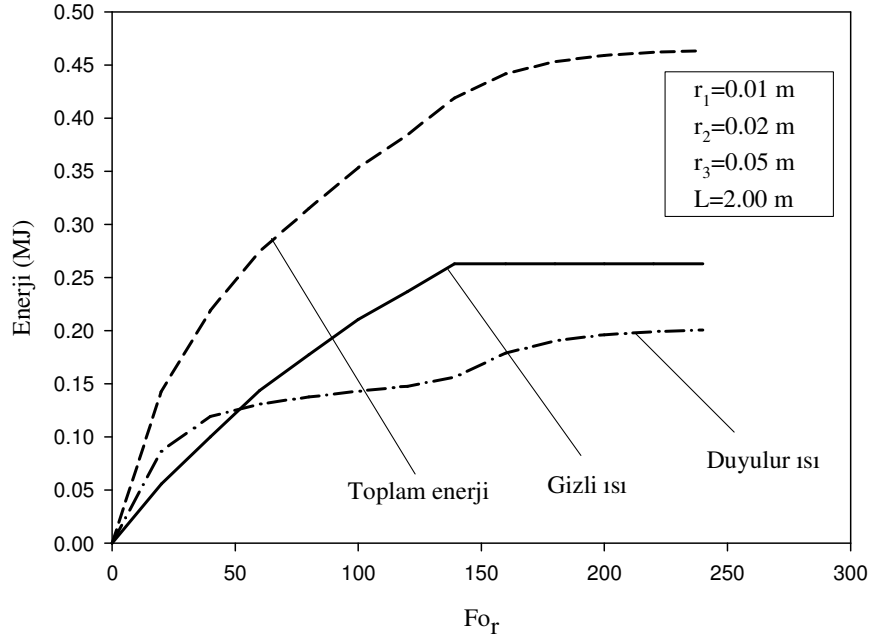
Şekil 13. $Fo_r = 80$ için çeşitli debilerde ara yüzlerin radyal konumlarının aksenal doğrultu ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



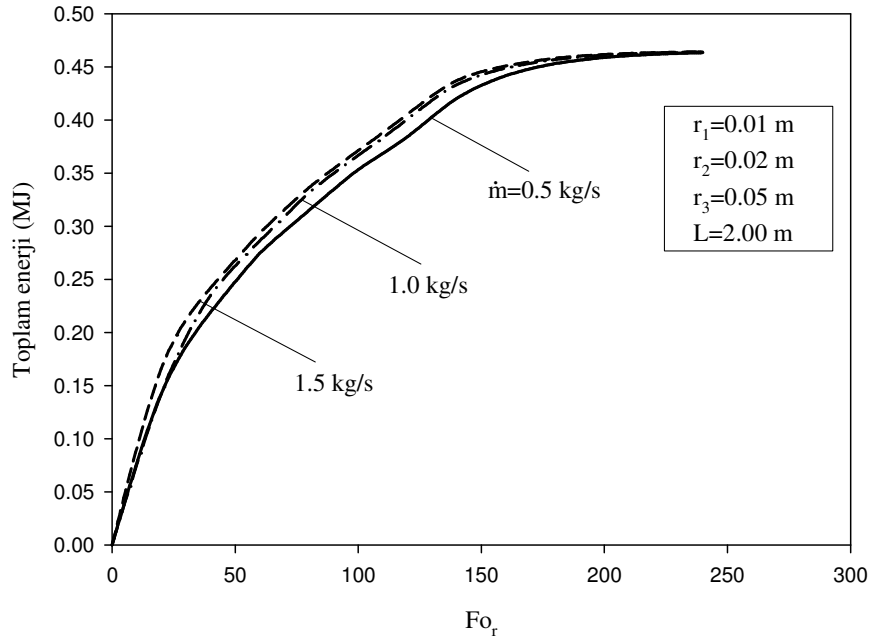
Şekil 14. $Fo_r = 20$ için çeşitli eksenel konumlarda sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



Şekil 15. Çeşitli debiler için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



Şekil 16. Depolanan enerji bileşenlerinin zamanla değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)



Şekil 17. Depolanan toplam enerjinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.01$ m)

3.1.2. Maddenin Yerleştirildiği Halkasal Aralığın Kalınlığının 2 cm Olması Durumu

Halkasal aralığın 2 cm olması durumu için kütleli debinin sistemin performansı üzerindeki etkileri incelenirken ısı deposunun boyutları; $r_1 = 0.01$ m, $r_2 = 0.03$ m, $r_3 = 0.05$ m, $L = 2$ m olarak seçilmiştir.

Şekil 18’de iki borulu ve üç borulu ısı depolarının şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi gösterilmiştir. Kütleli debinin 0.5 kg/s değerinde, iki borulu ısı eşanjöründe maddenin erimesi 9368 saniye alırken, bu süre üç borulu ısı eşanjörlerinde 1751 saniyeye düşmektedir. Yani aynı miktardaki madde üç borulu ısı eşanjörlerinde 5.35 kat daha hızlı eritilmektedir. Yine şekilden her iki durum için de maddenin tamamen erimesi için gereken sürenin kütleli debinin artmasıyla eksponansiyel olarak azaldığı görülmektedir. Özellikle üç borulu eşanjörde kütleli debinin 2 kg/s değerine kadar deponun şarj olma süresi debiden önemli ölçüde etkilenirken, bu değerden sonra debi artışının etkisi azalmaktadır. Kütleli debinin üç borulu eşanjörlerde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin üç borulu eşanjörlerde kütleli debinin 0.5 kg/s yerine 2 kg/s seçilmesi durumunda maddenin erime süresi %4.41 azalırken, iki borulu eşanjörlerde bu azalma %0.5 kadar olmaktadır. Maddenin yerleştirildiği $r_2 - r_1$ halkasal aralığının 1 cm olduğu üç borulu ısı eşanjörlerinde ise aynı koşullarda deponun şarj olma süresi %10.92 oranında azalmaktadır. Buradan $r_2 - r_1$ ’nin büyümesiyle kütleli debinin etkisinin azaldığı sonucu çıkarılabilir.

Şekil 19’da iki borulu ve üç borulu ısı eşanjörlerinde $\dot{m} = 0.5$ kg/s için akışkanın giriş sıcaklığının deponun şarj olma süresi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Akışkanın giriş sıcaklığının sistem performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Her iki tip eşanjörde de akışkanın giriş sıcaklığı 65°C’den 90°C’ye çıkarıldığında maddenin erime süresi yaklaşık olarak %60 oranında azalmaktadır. Şekil 20’de akışkanın giriş sıcaklığının sistem üzerindeki etkisinin farklı debilerde çalışılması durumunda nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekilden bütün kütleli debi değerleri için deponun şarj olma süresindeki değişimin benzer karakterde olduğu görülmektedir.

Şekil 21’de, iki borulu ve üç borulu ısı eşanjörlerinde $z/D_3 = 10$ ’da, $T_g = 80^\circ\text{C}$ ve $\dot{m} = 0.5$ kg/s koşullarında ara yüzlerin konumlarının zamanla değişimi görülmektedir. Üç borulu sistemde iç ve dış ara yüzler $For_s \cong 506$ anında $R_s \cong 0.46$ ’da birbirleriyle çakışmaktadır. Başlangıçta bu iki ara yüz eşit miktarda ilerlerken zaman arttıkça dış ara

yüzün ilerleyişi daha fazla olmaktadır. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi dış yüzeydeki ısı iletim direncinin daha düşük olması ve bu yüzeyden eritilen madde miktarının zamanla azalıyor olmasından kaynaklanmaktadır. İki borulu ısı eşanjöründe ise bir tek ara yüz oluşmakta ve bu ara yüz $For \cong 2732$ 'de halkasal aralığın üst yüzeyine ulaşmaktadır. Şekil 22'de çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişleri gösterilmiştir. Bu şekilden, dış ara yüzün debideki değişimden daha fazla etkilendiği ancak genelde ara yüzlerin ilerleme hızlarının debiye çok fazla duyarlı olmadığı görülmektedir. Bu durum FDM'nin ısı iletim katsayısının oldukça düşük olması nedeniyle madde içerisinde ısının oldukça yavaş yayılmasına ($\alpha_p = k_p / \rho_p c_p = 1.141 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$) bağlanabilir.

Şekil 23'te $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$ için çeşitli For sayılarında ara yüzlerin eksenel doğrultudaki konumları görülmektedir. Seçilen For sayılarında iç ara yüzün konumunun eksenel doğrultuda neredeyse sabit olduğu görülmektedir. Yine bu grafikten dış ara yüzün iç ara yüzüne göre daha hızlı ilerlediği tespit edilebilmektedir. $For = 300$ için ara yüzlerin farklı debilerdeki konumlarının verildiği Şekil 24'te de bu durum görülmektedir.

Şekil 25'te , $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$ ve $For = 100$ için, eşanjörün girişinde, orta noktasında ve çıkışında sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi görülmektedir. Bu anda her üç kesitte de $R_s < 0.16$ ve $R_s > 0.82$ bölgelerinde faz değişimi tamamlanmıştır. Halkasal aralığın iç yüzeyine yakın bölgelerde ($R_s < 0.16$) eşanjör giriş ve çıkış kesitleri arasındaki sıcaklık farkının dış yüzeye yakın bölgelere nazaran daha az olduğu görülmektedir. Bu durum iç borudaki akış hızının çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Faz değişiminin tamamlanmadığı $0.16 \leq R_s \leq 0.82$ bölgesinde eşanjör girişi ve çıkışı arasında bir sıcaklık farkı oluşmuştur. Bu sıcaklık farkı, maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın kalınlığının 1 cm olması durumunda oluşan sıcaklık farkına göre çok daha azdır. Bu durum halkasal aralığın kalınlığının artmasıyla madde içerisindeki ısı iletiminin daha hâkim bir mekanizma haline gelmesiyle açıklanabilir. Şekil 26'da $For = 100$ için, çeşitli debilerde eşanjör çıkış kesitinde sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi gösterilmiştir. Debinin artmasıyla birlikte minimum sıcaklık değerinin arttığı görülmektedir.

Şekil 27'de depolanan ısı enerjisinin zamanla değişimi; duyulur ısı, gizli ısı bileşenleri ve toplam ısı olarak gösterilmiştir. Başlangıçta duyulur ısı depolaması daha etkin iken zaman ilerledikçe gizli ısı depolaması baskın bileşen haline gelmektedir. Depo, $For \cong 510$ civarında şarj olmakta ve dolayısıyla gizli ısı bileşenindeki artış durmaktadır. Şekilden

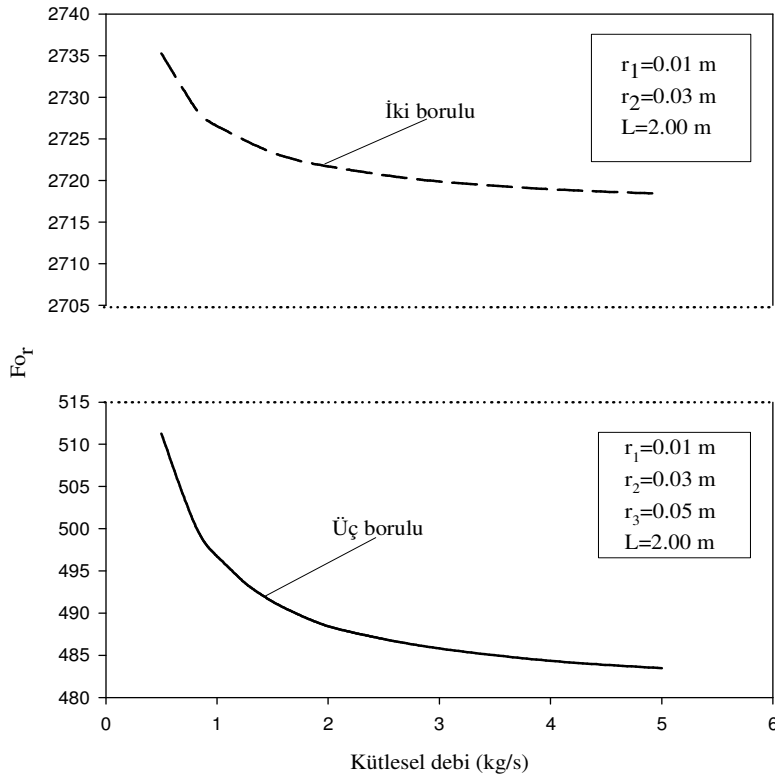
deponun $Fo_r \cong 1200$ civarında ısı dengeye ulaştığı görülmektedir. Isıl denge durumuna erişinceye kadar depolanan toplam ısı enerjinin değeri, şekilden 1229.771 kJ olarak belirlenebilir.

Kontrol amacıyla, bu durumda FDM’de depolanabilecek maksimum toplam enerji miktarı yine Eşitlik (50)’den hesaplanabilir. Bu durum için bulunan ara değerler ve toplam ısı enerjinin değeri şöyledir:

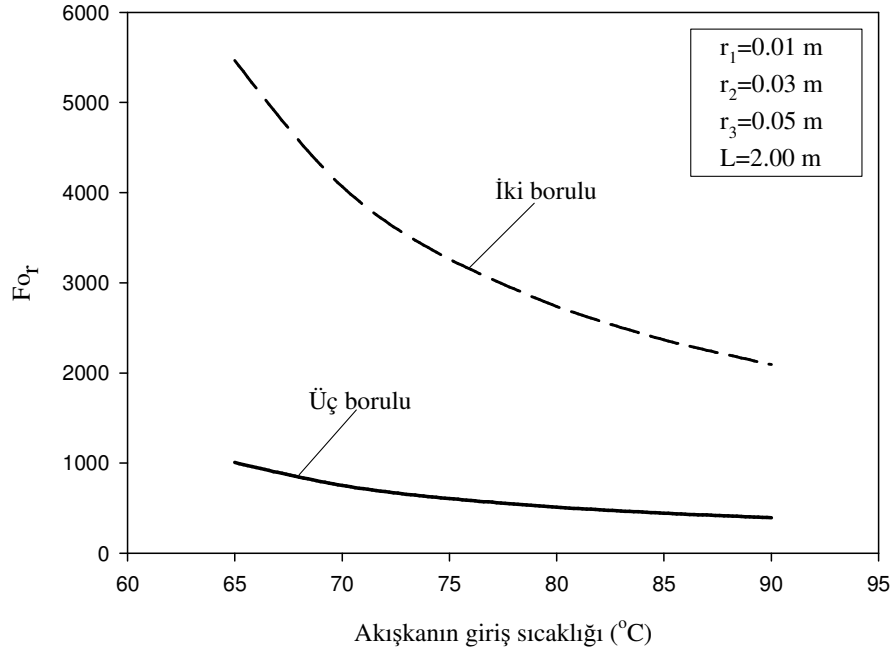
$$m = 4.197 \text{ kg}, \quad Q_D = 528.443 \text{ kJ}, \quad Q_G = 700.927 \text{ kJ}, \quad Q_{T,\max} = 1229.771 \text{ kJ}$$

Bu şekilde elde edilen toplam ısı değerinin Şekil 28’den $Fo_r \rightarrow \infty$ için okunan değerle aynı olduğu görülmektedir.

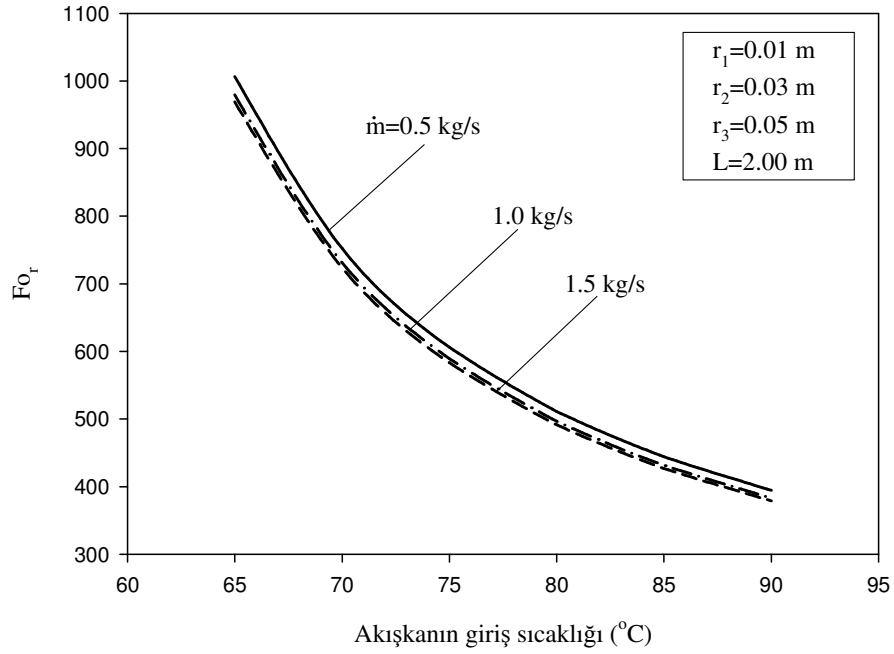
Maddenin yerleştirildiği $(r_2 - r_1)$ halkasal aralığın kalınlığının 1 cm ve 2 cm olması durumları bu çalışma koşullarında karşılaştırıldığında; $r_2 - r_1$ ’in 2 cm olması durumunda depolanabilecek madde miktarının ve dolayısıyla depolanabilecek maksimum ısı miktarının 2.67 katına çıktığı, buna karşılık deponun şarj olma süresinin ise 3.68 katına çıktığı görülmektedir.



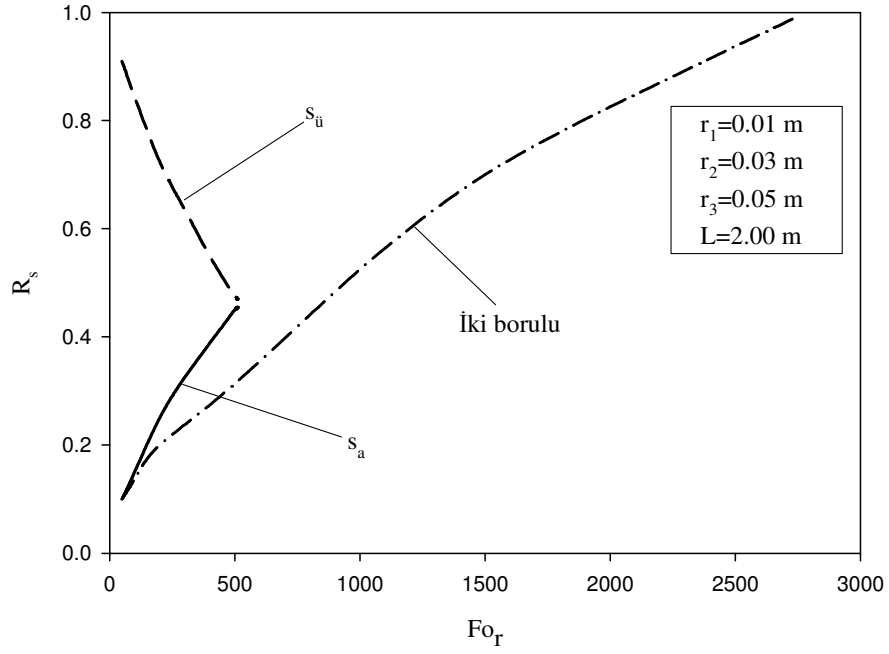
Şekil 18. İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



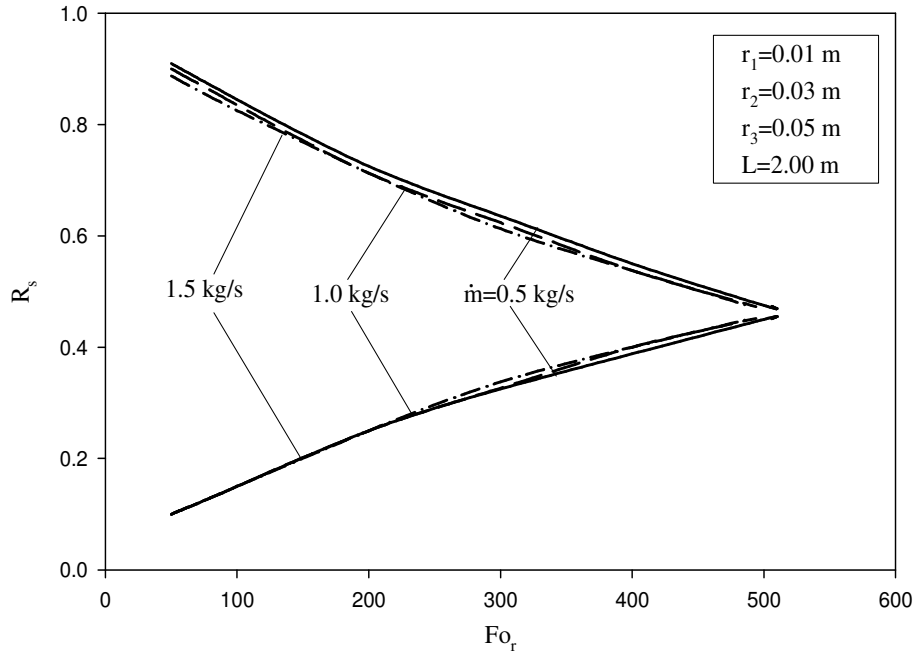
Şekil 19. İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



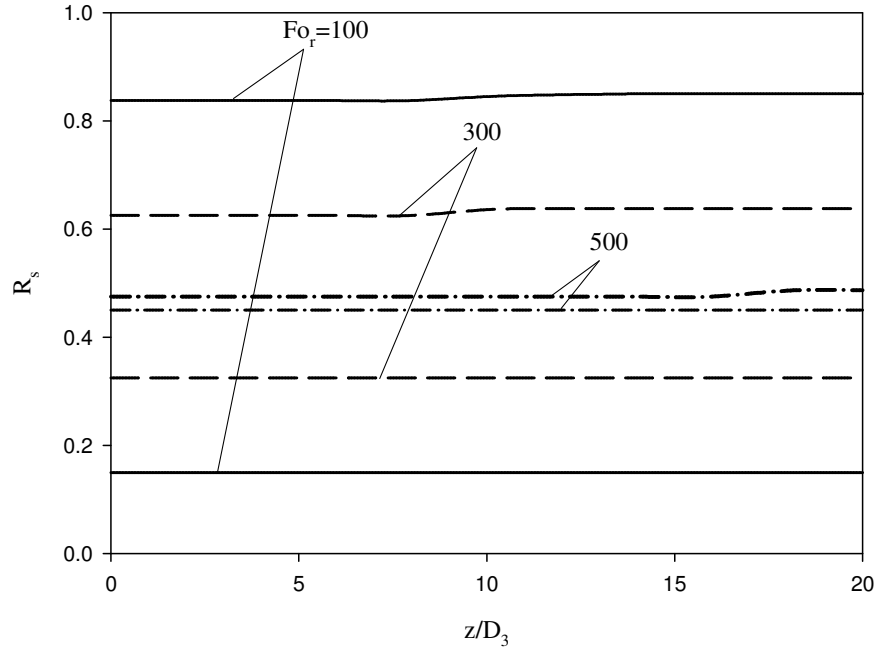
Şekil 20. Çeşitli debilerde akışkan giriş sıcaklığının deponun şarj edilme süresi üzerindeki etkisi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



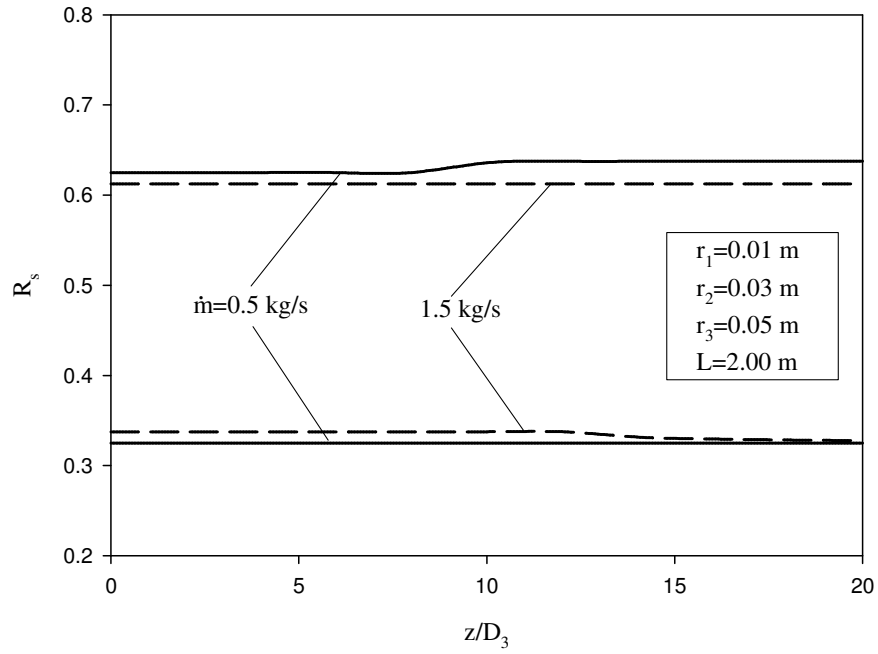
Şekil 21. İç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



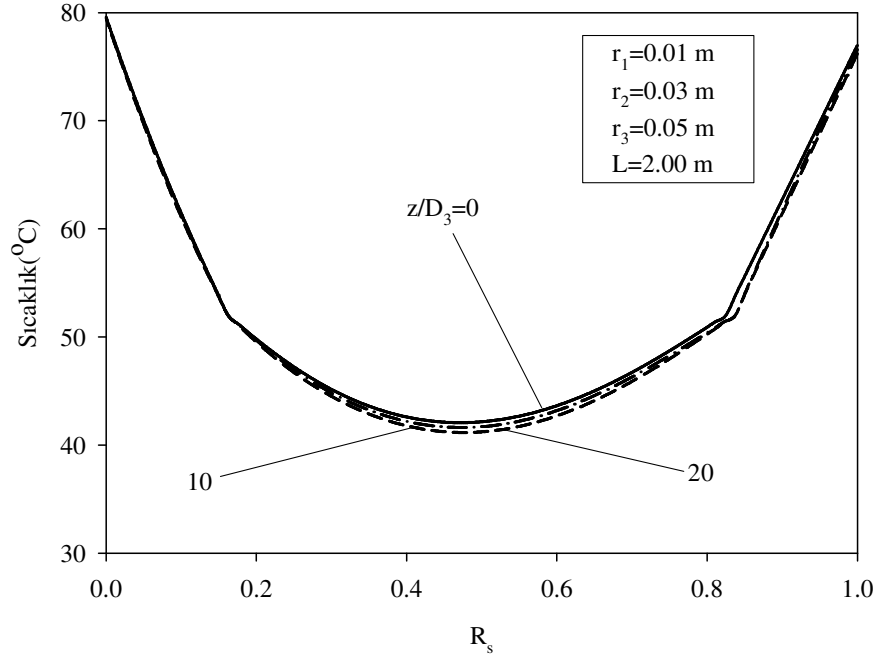
Şekil 22. Çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



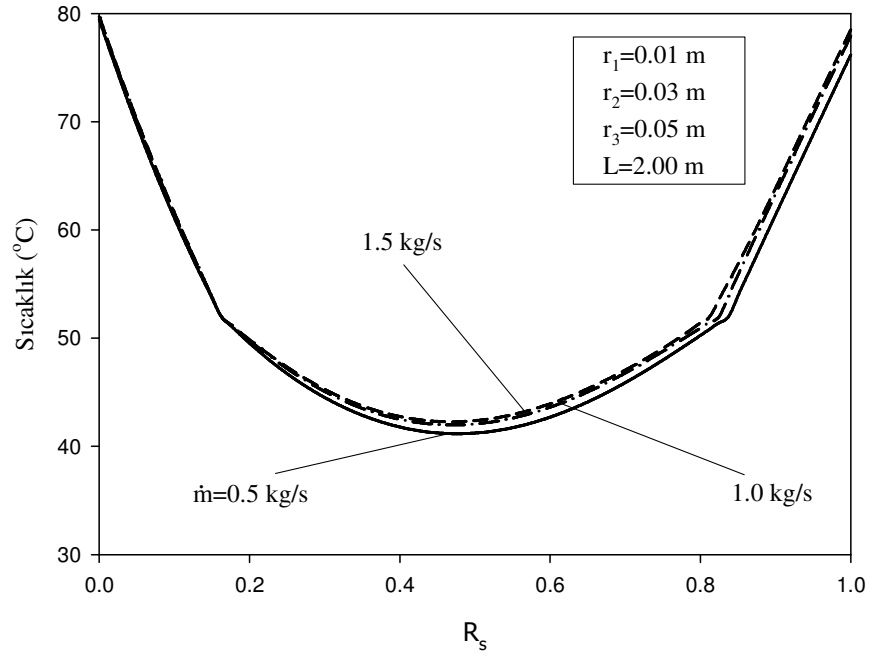
Şekil 23. Ara yüzlerin çeşitli zamanlarda aksenal doğrultudaki konumu ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



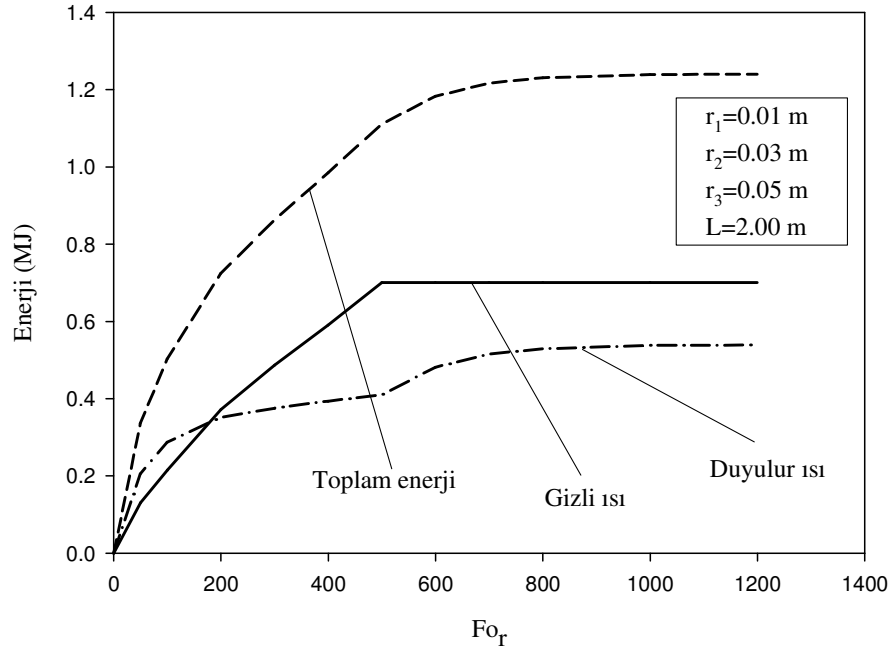
Şekil 24. $Fo_r = 300$ için çeşitli debilerde ara yüzlerin radyal konumlarının aksenal doğrultu ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



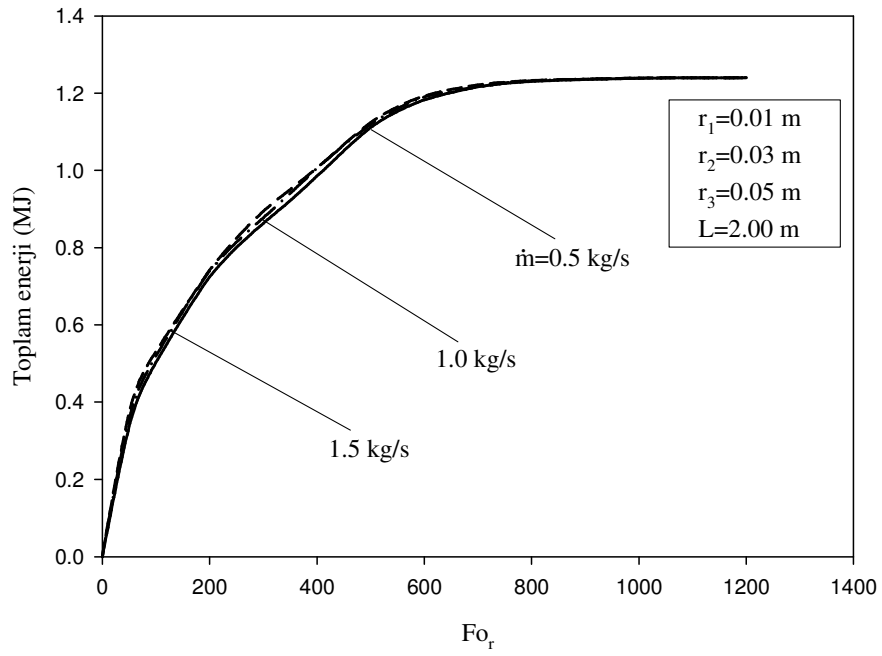
Şekil 25. $Fo_r = 100$ için çeşitli eksenel konumlarda sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



Şekil 26. Çeşitli debiler için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



Şekil 27. Depolanan enerji bileşenlerinin zamanla değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)



Şekil 28. Depolanan toplam enerjinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.02$ m)

3.1.3. Maddenin Yerleştirildiği Halkasal Aralığın Kalınlığının 3 cm Olması Durumu

Bu durum için kütleli debinin etkisi çalışılırken sistemin büyüklükleri $r_1 = 0.01$ m , $r_2 = 0.04$ m , $r_3 = 0.05$ m , $L = 2$ m olarak seçilmiştir.

Şekil 29'da iki borulu ve üç borulu ısı eşanjörlerinde faz değıştiren maddenin erime süresinin kütleli debi ile değışimi gösterilmiştir. Kütleli debinin 0.5 kg/s değerinde, iki borulu sistemde depo 23317 saniyede şarj olurken, bu süre üç borulu sistemde 3868 saniyeye düşmektedir. Yani aynı miktardaki FDM üç borulu ısı deposunda 6.03 kat daha hızlı erimektedir. Yine şekilden görüleceğı gibi deponun şarj olma süresi kütleli debiyle eksponansiyel olarak azalmaktadır. Kütleli debinin etkisi bu $r_2 - r_1$ değeri için oldukça azalmıştır. Örneğın üç borulu sistemde kütleli debi 0.5 kg/s seçildiğinde maddenin tamamen erimesi $For \cong 1129$ anında gerçekleşirken, 2 kg/s seçildiğinde madde erimesini $For \cong 1107$ 'de tamamlamakta yani deponun şarj olma süresinde ancak %1.95'lik bir azalma meydana gelmektedir. Aynı karşılaştırma iki borulu eşanjör için yapıldığında deponun şarj olma süresindeki azalmanın yaklaşık %0.4 olduğu görülmektedir. İki borulu ve üç borulu ısı eşanjörlerinde $\dot{m} = 0.5$ kg/s koşullarında akışkanın giriş sıcaklığının deponun şarj olma süresi üzerindeki etkisi Şekil 30'da verilmiştir. Her iki sistemde de akışkan giriş sıcaklığının 65°C yerine 90°C seçilmesi durumunda deponun şarj olma süresinde %60'ın üzerinde bir azalma meydana gelmektedir. Şekil 31'de akışkanın giriş sıcaklığının bu etkisi farklı debilerde incelenmiştir. Şekilden de görülebileceğı gibi debi artışının sistem üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır.

Şekil 32'de iki borulu ve üç borulu eşanjörlerde $\dot{m} = 0.5$ kg/s ve $T_g = 80^\circ\text{C}$ koşullarında eşanjörün aksnel olarak orta kesitinde ara yüzlerin radyal doğrultuda zamanla ilerleyişleri gösterilmiştir. Üç borulu sistemde oluşan iç ve dış ara yüzler $For \cong 1123$ anında $R_s \cong 0.44$ 'te birbirleriyle çakışmaktadır. Maddenin yerleştirildiği $r_2 - r_1$ halkasal aralığının kalınlığı artırıldıkça dış ara yüzün iç ara yüz göre daha fazla ilerlediğı görülmektedir. Bu durum $r_2 - r_1$ 'in dış yüzey alanının artması ve birim derinlik başına karşılaşılan iletim direncinin azalmasından kaynaklanmaktadır. İki borulu sistemde ise bir tek ara yüz oluşmakta ve bu ara yüz $For \cong 6804$ anında halkasal aralığın üst yüzeyine ulaşmaktadır. Eşanjörün aksnel olarak orta kesitinde ara yüzlerin farklı

debilerde nasıl değiştiği ise Şekil 33'te verilmiştir. Şekilden debi artışının i ve dış ara yüzün konumlarını çok fazla etkilemediği görülmektedir.

Şekil 34'te ara yüzlerin sabit debide ($\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$) farklı For sayılarındaki aksenal doğrultudaki konumları verilmiştir. İ ara yüz her üç For sayısında da sabit kalırken dış ara yüzde çok hafif bir değişim ortaya çıkmaktadır. Bu grafikten de dış ara yüzün i ara yüze göre daha fazla ilerlediği ve ilerleme miktarlarındaki farkın zamanla arttığı görülmektedir. Şekil 35'te $For = 600$ anında farklı debilerde ara yüzlerin konumları verilmiştir. Kütlesel debinin seçilen bu $r_2 - r_1$ kalınlığı için ara yüzlerin konumlarını fazla değiştirmedeği bu Şekilden de görülmektedir.

Şekil 36'da $For = 200$ anında eşanjörün aksenal olarak girişinde, orta noktasında ve çıkışında sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi verilmiştir. Özellikle halkasal aralığın i yüzeyinde bahsedilen  kesit arasında neredeyse hiç sıcaklık farkı oluşmadığı görülmektedir. İletim mekanizmasının artık iyece hâkim mekanizma haline geldiğini gösteren bu durum, $For = 200$ anında ve farklı debilerde eşanjörün çıkışında sıcaklığın radyal doğrultudaki değişiminin verildiği Şekil 37'den de tespit edilebilmektedir.

Şekil 38'de $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$ için depolanan ısıl enerjinin zamanla değişimi; duyulur ısı, gizli ısı bileşenleri ve toplam ısı olarak gösterilmiştir. Bu bileşenlerin zamanla değişimi seçilen diğer iki $r_2 - r_1$ kalınlığındaki davranışlarına benzerdir. Bu grafikten de deponun $For \cong 1129$ civarında şarj olduğu ve ayrıca $For \cong 2000$ 'de ısıl dengeye ulaştığı görülmektedir. Isıl denge konumuna erişinceye kadar depolanan toplam ısıl enerjinin değeri, Şekil 38'den 2305.818 kJ olarak belirlenebilir.

Kontrol amacıyla, bu durumda FDM'de depolanabilecek maksimum toplam enerji miktarı yine Eşitlik (50)'den hesaplanabilir. Bu durum için bulunan ara değerler ve toplam ısıl enerjinin değeri şöyledir:

$$m = 7.870 \text{ kg}$$

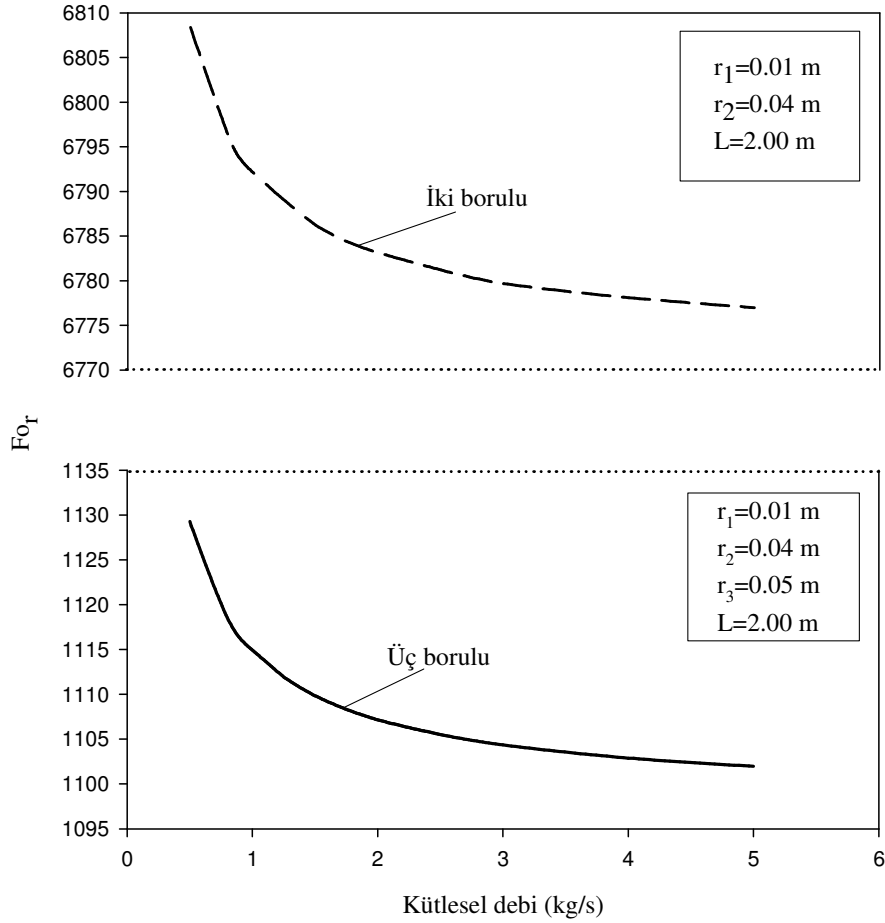
$$Q_D = 991.581 \text{ kJ}$$

$$Q_G = 1314.238 \text{ kJ},$$

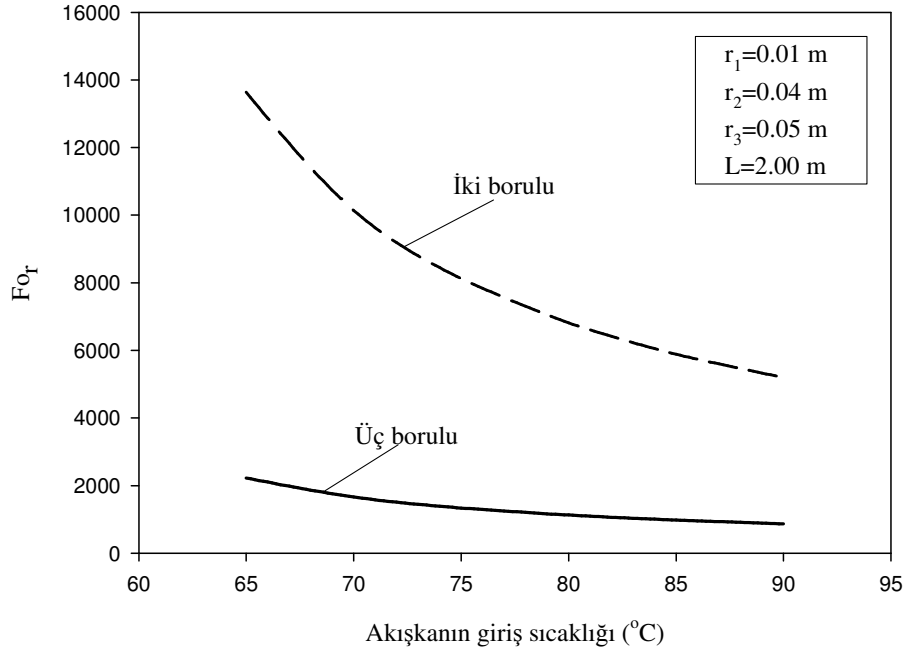
$$Q_{T,\max} = 2305.818 \text{ kJ}$$

Maddenin yerleştirildiği ($r_2 - r_1$) halkasal aralığın kalınlığının 3 cm olması durumu diğer iki durumla karşılaştırıldığında; $r_2 - r_1$ 'in 1 cm olması durumuna göre depolanabilecek FDM miktarının 5 katına, 2 cm olması durumuna göre ise 1.88 katına

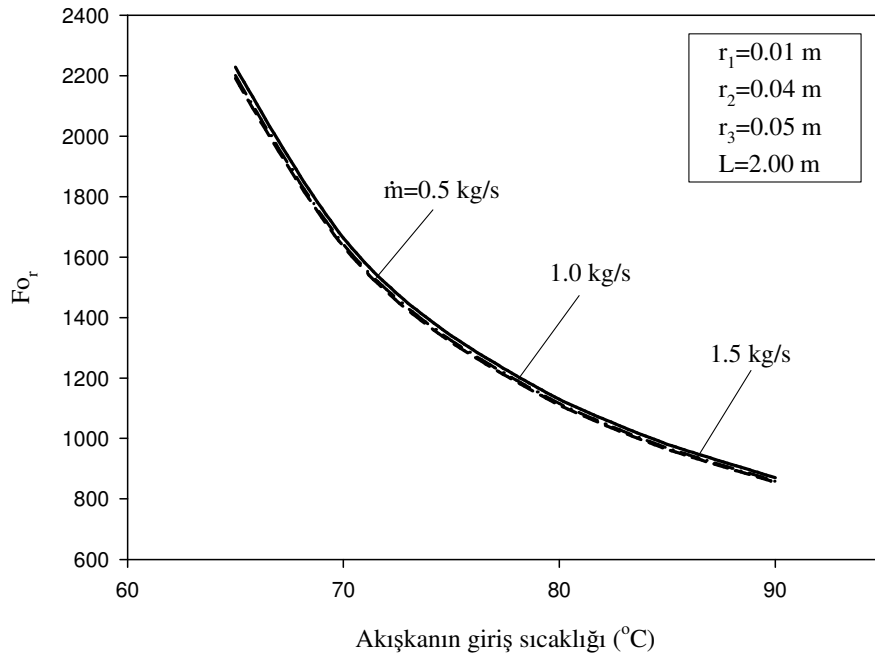
çıkacağı, buna karşılık deponun şarj olma süresinin ise $r_2 - r_1$ 'in 1 cm olması duruma göre 8.12 katına, 2 cm olması durumuna göre ise 2.21 katına çıktığı görülmektedir.



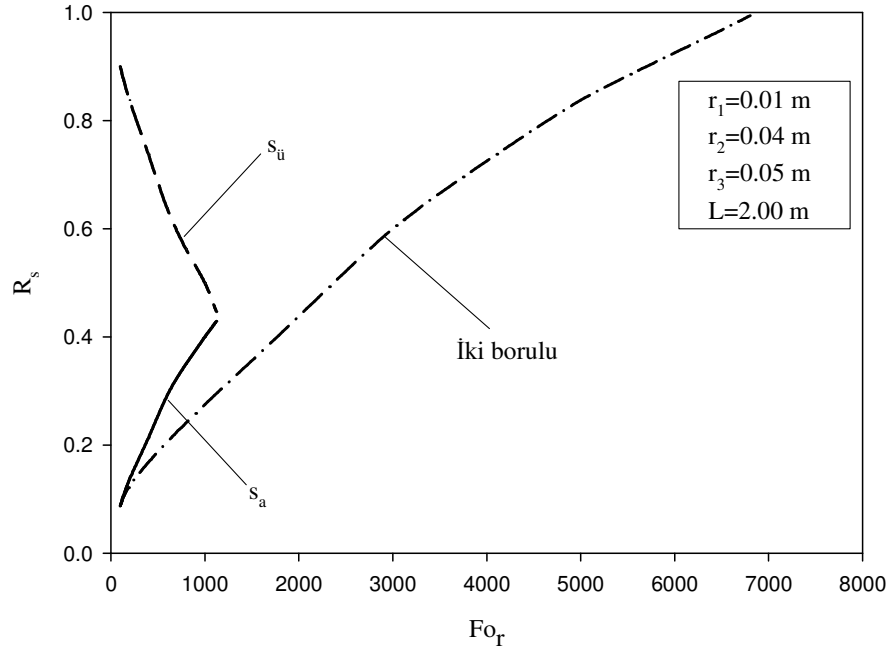
Şekil 29. İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



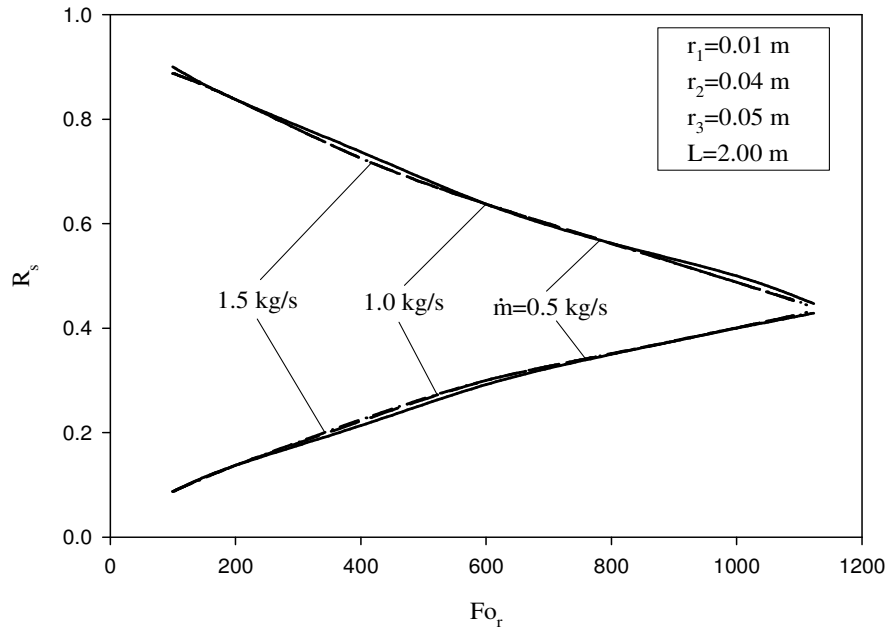
Şekil 30. İki borulu ve üç borulu ısı depolarında şarj edilme süresinin akışkanın giriş sıcaklığına göre değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



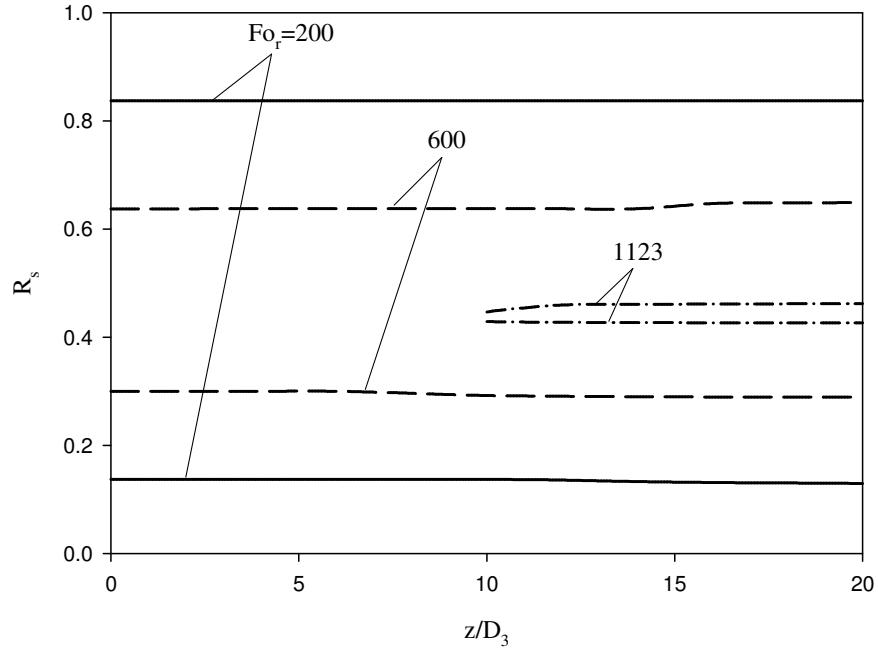
Şekil 31. Çeşitli debilerde akışkan giriş sıcaklığının deponun şarj edilme süresi üzerindeki etkisi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



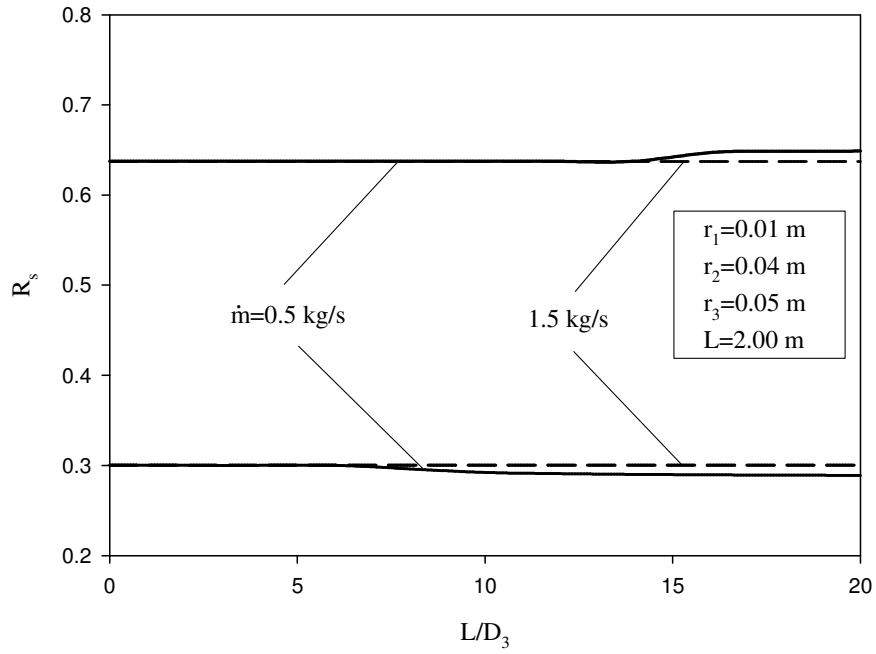
Şekil 32. İç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



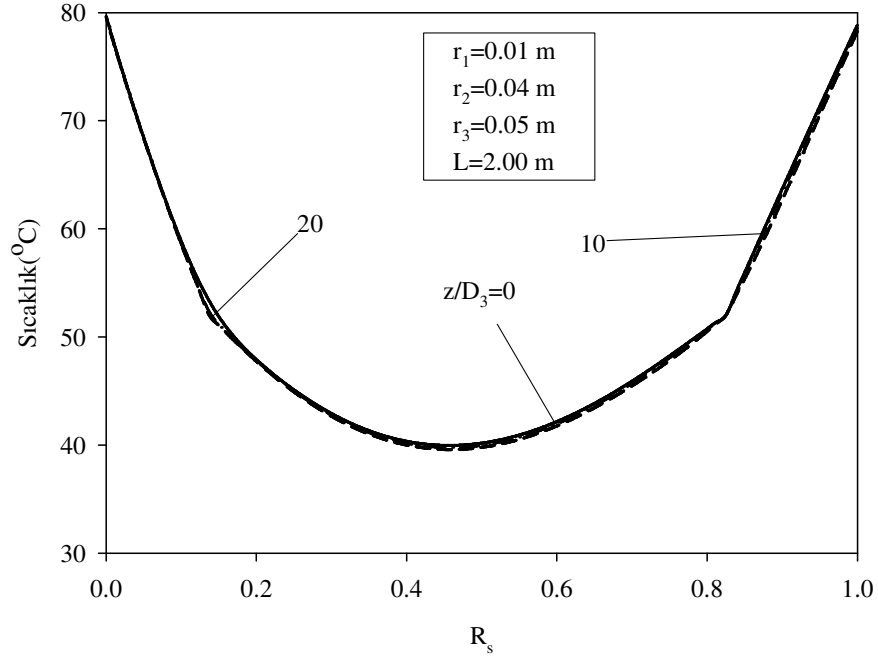
Şekil 33. Çeşitli debilerde ara yüzlerin zamanla ilerleyişi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



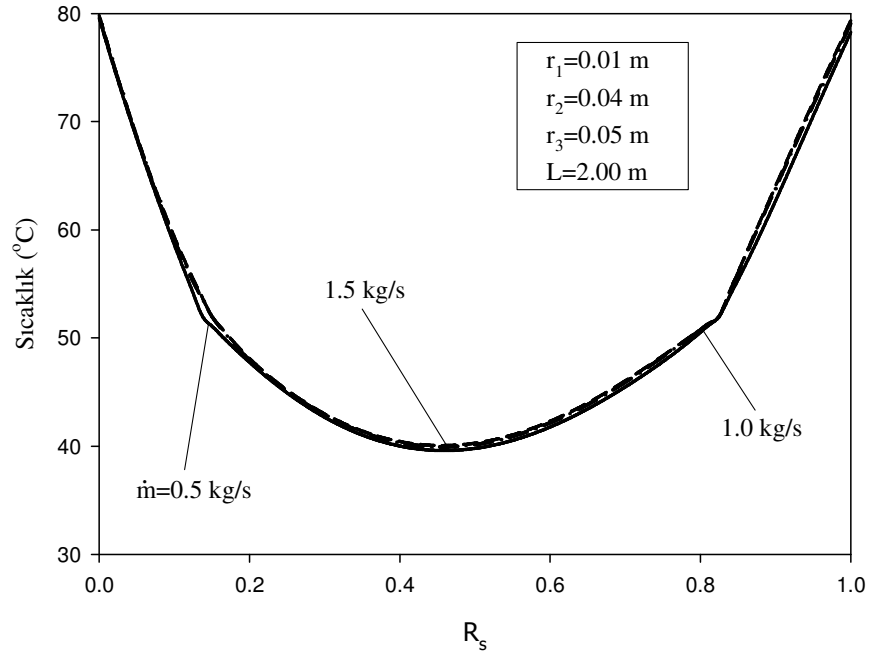
Şekil 34. Ara yüzlerin çeşitli zamanlarda aksel doğrultudaki konumu ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



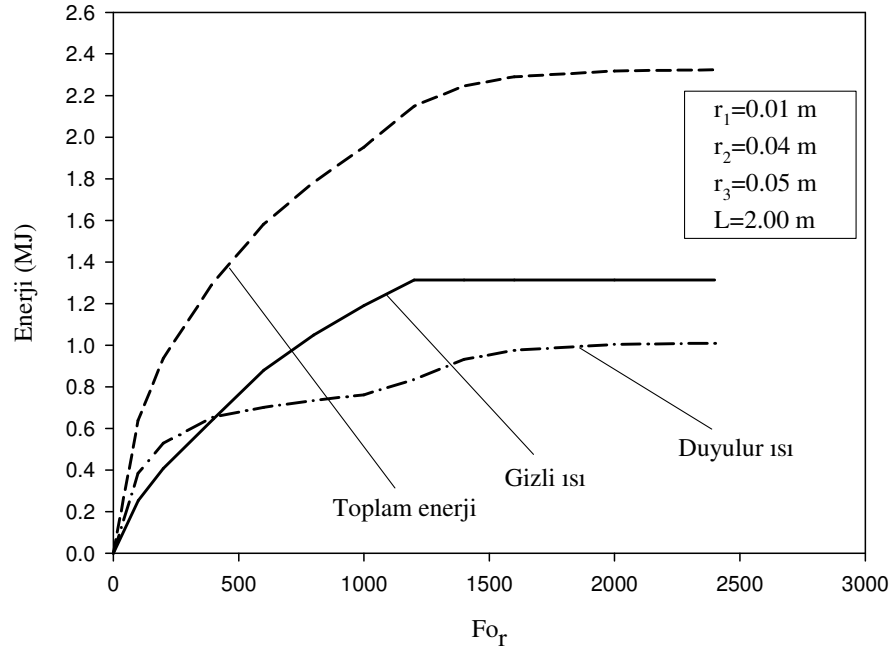
Şekil 35. $Fo_r = 600$ için çeşitli debilerde ara yüzlerin radyal konumlarının aksel doğrultu ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



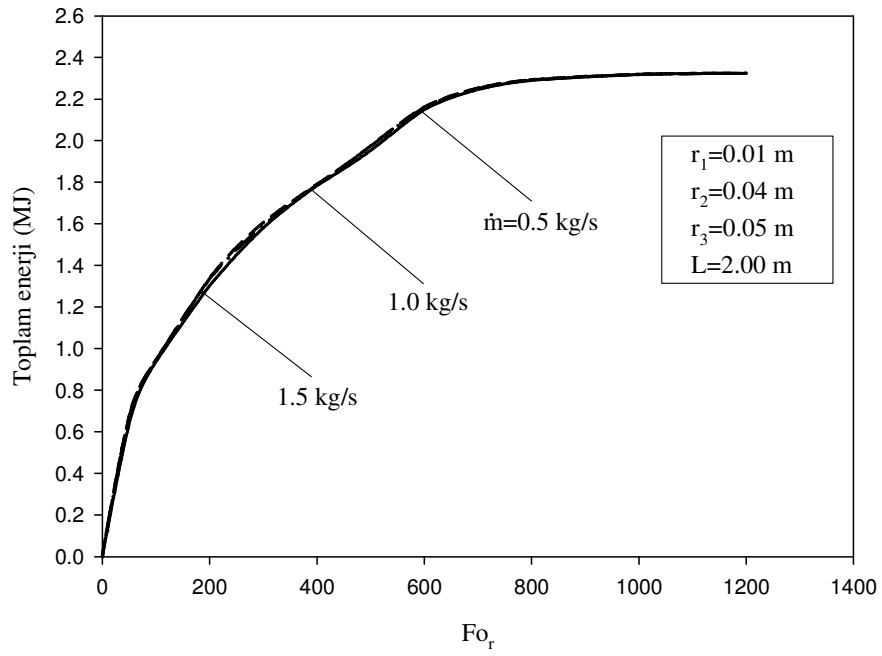
Şekil 36. $Fo_r = 200$ için çeşitli eksenel konumlarda sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



Şekil 37. Çeşitli debiler için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



Şekil 38. Depolanan enerji bileşenlerinin zamanla değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)



Şekil 39. Depolanan toplam enerjinin kütleli debi ile değişimi ($r_2 - r_1 = 0.03$ m)

3.2. Geometrinin Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmada maddenin yerleştirildiği halkasal aralık olarak; 0.01 m, 0.02 m ve 0.03 m olmak üzere üç farklı $r_2 - r_1$ kalınlığının seçildiğinden bahsedilmiştir. Bu bölümde, Tablo 10'da da verildiği üzere her $r_2 - r_1$ kalınlığı için üç farklı r_1 seçilerek oluşturulan değişik geometrilerin sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu inceleme boyunca kütleli debi, değişken parametre olarak seçildiği durumlar hariç 0.5 kg/s olarak alınmıştır.

Şekil 40a'da $r_2 - r_1 = 0.01$ m olmak şartıyla farklı r_1 değerleri için ısı deposunun şarj olma süresinin kütleli debi ile değişimi gösterilmiştir. Şekilden iç borunun yarıçapı büyüdükçe maddenin erime süresinin azaldığı görülmektedir. Bu etkiye neden olan en önemli faktörlerden biri, iç borunun yarıçapı büyüdükçe $r_2 - r_1$ halkasal aralığının iç ve dış yüzey alanlarının da büyüyor olmasıdır. İç boru yarıçapının farklı değerlerde seçilmesi iç boruda ve halkasal aralıktaki akışların ısı taşınım katsayılarının da değişmesine neden olmaktadır. Kütleli debinin sabit kalması koşuluyla Reynolds sayısı ve çap arasındaki ilişki iç borudaki ve dış aralıktaki akışlar için sırasıyla

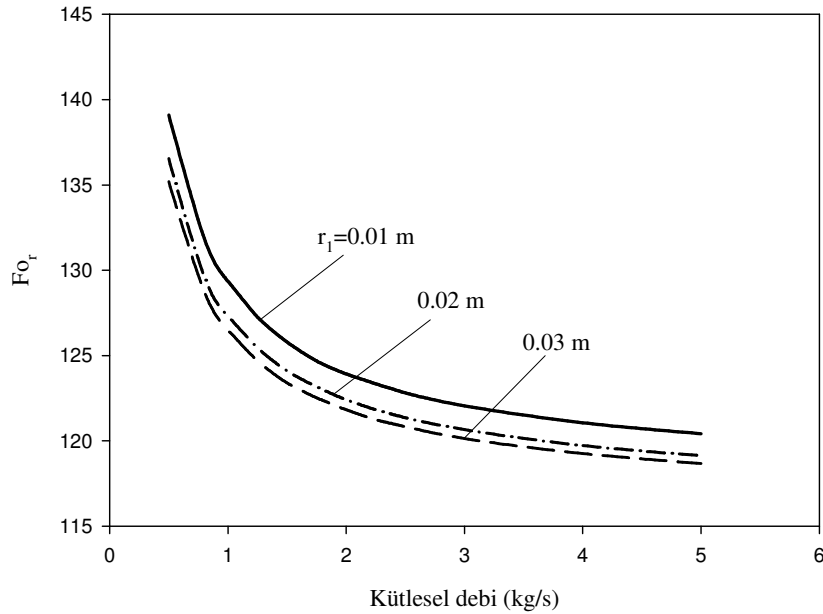
$$\text{Re}_D = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D_1} \quad \text{ve} \quad \text{Re}_{Dh} = \frac{2\dot{m}}{\mu\pi(r_3 + r_2)} \quad (53)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliğe göre, iç borunun yarıçapı r_1 büyüdükçe iç borudaki akış için geçerli Reynolds sayısı küçülmekte ve buna bağlı olarak ısı taşınım katsayısı düşmektedir. Dış aralıktaki akışta da Reynolds sayısı r_1 büyüdükçe küçülmektedir. Buna karşılık Eşitlik (53), Eşitlik(21) ve Eşitlik(23) ile birlikte göz önüne alındığında ısı taşınım katsayısı ile geometri arasındaki ilişkinin

$$h_2 \approx \frac{1}{(r_3 + r_2)^{4/5} (r_3 - r_2)} \quad (54)$$

şeklinde olduğu görülmektedir. Bu ifadeye göre r_1 büyüdükçe dış aralıktaki akış için ısı taşınım katsayısı da büyümektedir. Ayrıca iç boru büyüdükçe iç ve dış yüzeyde birim derinlikteki iletim direnci de azalmaktadır. Bütün bu faktörler sisteme birlikte etki

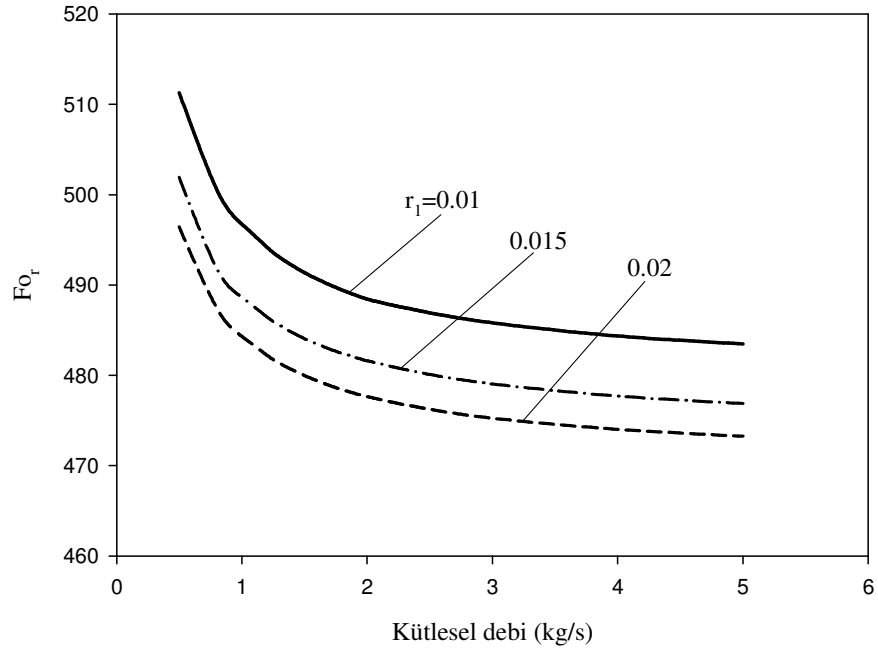
ettiklerinde faz değiştiren maddenin erime süresinin kısalmasına neden olmaktadır. Şekil 40b'de ve Şekil 40c'de sırasıyla $r_2 - r_1$ 'in 0.02 m ve 0.03 m olması durumunda farklı r_1 yarıçap değerlerinde kütlelel debinin deponun şarj olma süresi üzerindeki etkisi verilmiştir. Yine bu grafiklerden de $r_2 - r_1$ 'in 0.01 m olması durumuna benzer olarak, iç boru yarıçapı r_1 'in büyümesi ile deponun şarj olma süresinin kısaldığı görölmektedir. Ayrıca maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın kalınlığı büyüdükçe r_1 'in konumunun deponun şarj olma süresi üzerindeki etkisinin arttığı anlaşılmaktadır. Örneğin $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$ ve $T_g = 80^\circ\text{C}$ koşullarında, $r_2 - r_1 = 0.02 \text{ m}$ için, r_1 yarıçapı 0.01 m yerine 0.015 m seçildiğinde deponun şarj olma süresi 1751 saniyeden 1719 saniyeye düşmektedir. Halkasal aralığın kalınlığının 0.03 m olması durumunda ise yine r_1 yarıçapı 0.01 m yerine 0.015 m seçildiğinde deponun şarj olma süresi 3868 saniyeden 3781 saniyeye düşmektedir. İlk durum için deponun şarj olma süresinde %1.83 bir azalma ortaya çıkarken ikinci durumda bu azalma % 2.23 kadar olmaktadır.



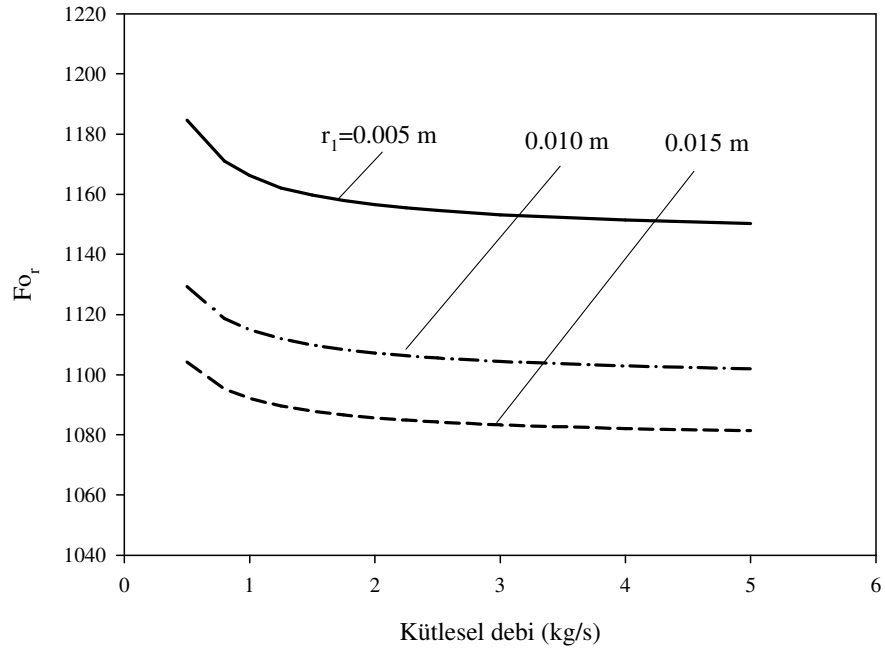
(a)

Şekil 40. Farklı r_1 değerleri için deponun şarj olma süresinin kütlelel debi ile değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01 \text{ m}$, (b) $r_2 - r_1 = 0.02 \text{ m}$, (c) $r_2 - r_1 = 0.03 \text{ m}$

Şekil 40'ın devamı;



(b)



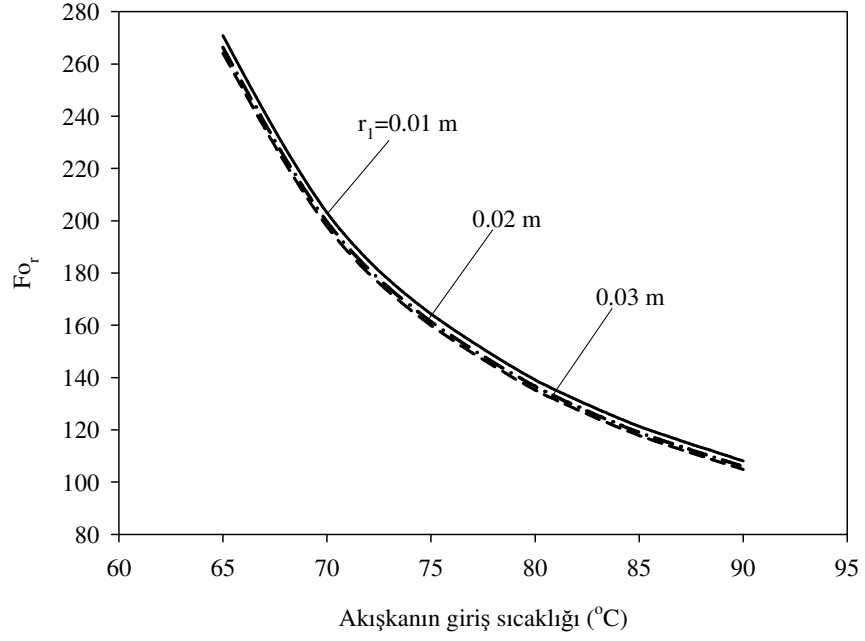
(c)

Şekil 41a, Şekil 41b ve Şekil 41c'de sırasıyla $r_2 - r_1$ 'in 0.01 m 0.02 m ve 0.03 m olduğu durumlar için farklı r_1 değerlerinde akışkanın giriş sıcaklığının deponun şarj olma süresi üzerindeki etkisi verilmiştir. Her üç durum için de iç boru yarıçapı r_1 'in daha büyük seçilmesinin deponun şarj olma süresini kısalttığı görülmektedir.

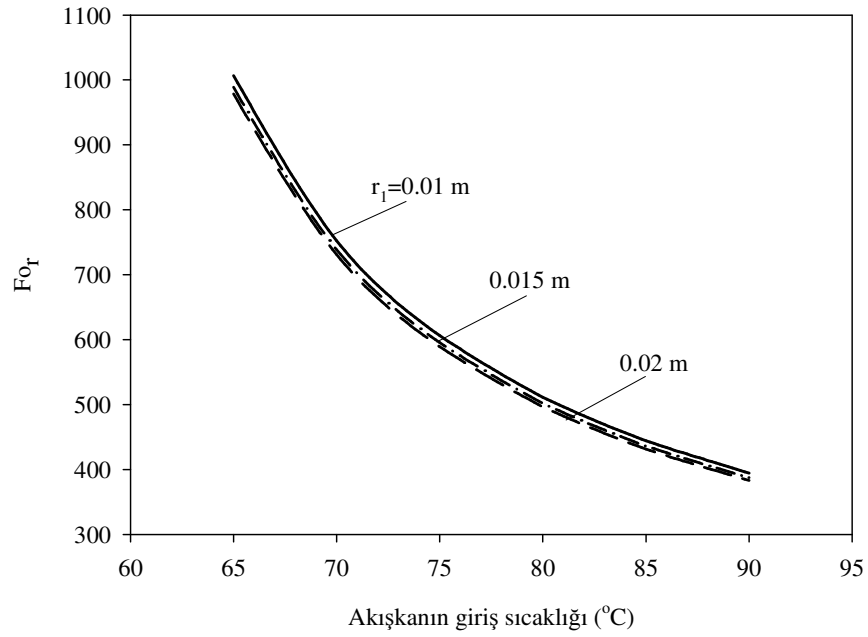
Şekil 42a'da $r_2 - r_1 = 0.01$ m olması durumunda farklı r_1 değerleri için $z/D_3 = 10$ 'da iç ve dış ara yüzlerin radyal doğrultuda zamanla ilerleyişleri verilmiştir. İç borunun yarıçapının değiştirilmesi iç ve dış ara yüzlerin ilerleme davranışını farklı yönde etkilemektedir. Örneğin $r_1 = 0.03$ m seçildiğinde dış ara yüz diğer r_1 seçimlerine göre daha fazla ilerlerken, iç ara yüz yine diğer r_1 seçimlerine göre daha az ilerlemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, iç boru yarıçapı r_1 büyüdükçe iç borudaki akış için ısı taşınım katsayısı düşmekte fakat buna karşılık $r_2 - r_1$ 'in iç yüzey alanı büyümektedir. Bu $r_2 - r_1$ kalınlığı için ısı taşınım katsayısındaki düşüş yüzey alanındaki büyümeden daha etkili olduğu için r_1 büyüdükçe iç ara yüzün ilerleme miktarı azalmaktadır. Dış aralıktaki akışın ise hem ısı taşınım katsayısı hem de $r_2 - r_1$ 'in dış yüzey alanı büyüdüğünden dış ara yüz r_1 büyüdükçe daha fazla ilerlemektedir. Zaman ilerledikçe, $r_1 = 0.01$ m seçilmesi durumu için iç ara yüzün ilerleyiş miktarı diğer r_1 yarıçaplarına göre daha az olmaktadır. Bu durum, iç ve dış ara yüzün ilerleme davranışlarının birbirinden bağımsız olmadıklarını göstermektedir. Yani $r_1 = 0.03$ m seçildiğinde, bahsedilen nedenlerle dış ara yüz hem diğer geometrik seçimlere göre daha fazla ilerlemekte hem de iki ara yüz giderek birbirlerine yaklaştıkça iç ara yüzün ilerleme hızının artmasına neden olmaktadır.

Şekil 42b'de $r_2 - r_1 = 0.02$ m durumunda farklı r_1 değerleri için iç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişleri verilmiştir. Dış ara yüz daha büyük r_1 seçildiğinde daha hızlı ilerlemektedir. İç ara yüz ise farklı r_1 değerleri için başlangıçta aynı miktarda ilerlerken zaman ilerledikçe büyük r_1 değerleri için daha fazla ilerleme kaydetmektedir. Bu durum hem dış ara yüzün etkisi hem de ısı transfer yüzey alanının büyümesiyle açıklanabilir.

Şekil 42c'de $r_2 - r_1 = 0.03$ m durumunda farklı r_1 değerleri için iç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişleri verilmiştir. Dış ara yüz geometrik değişimlerden hemen hiç etkilenmezken, iç ara yüz daha büyük r_1 seçilmesi durumunda daha fazla ilerlemektedir.



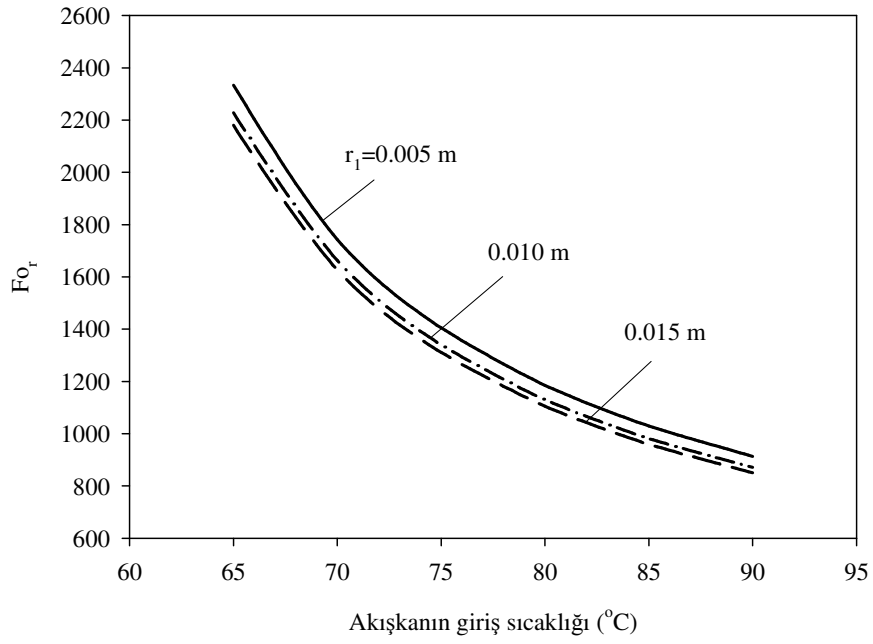
(a)



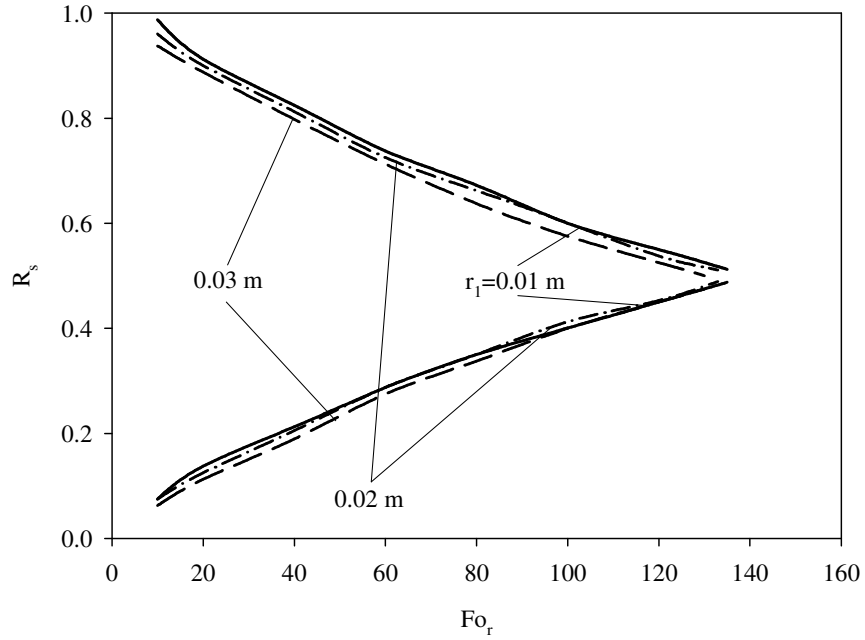
(b)

Şekil 41. Farklı r_1 değerleri için deponun şarj olma süresinin akışkanın giriş sıcaklığı ile değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m

Şekil 41'in devamı;



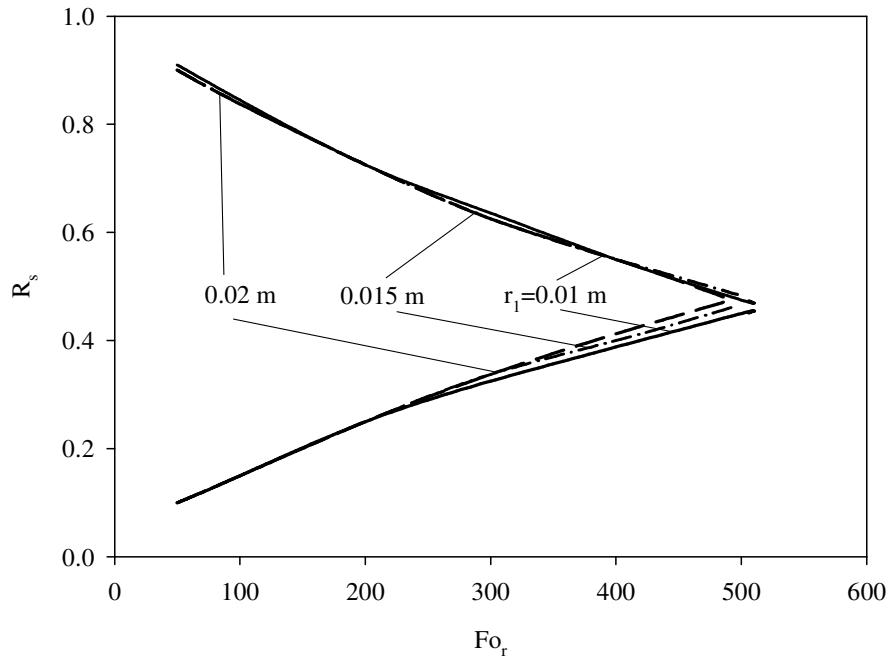
(c)



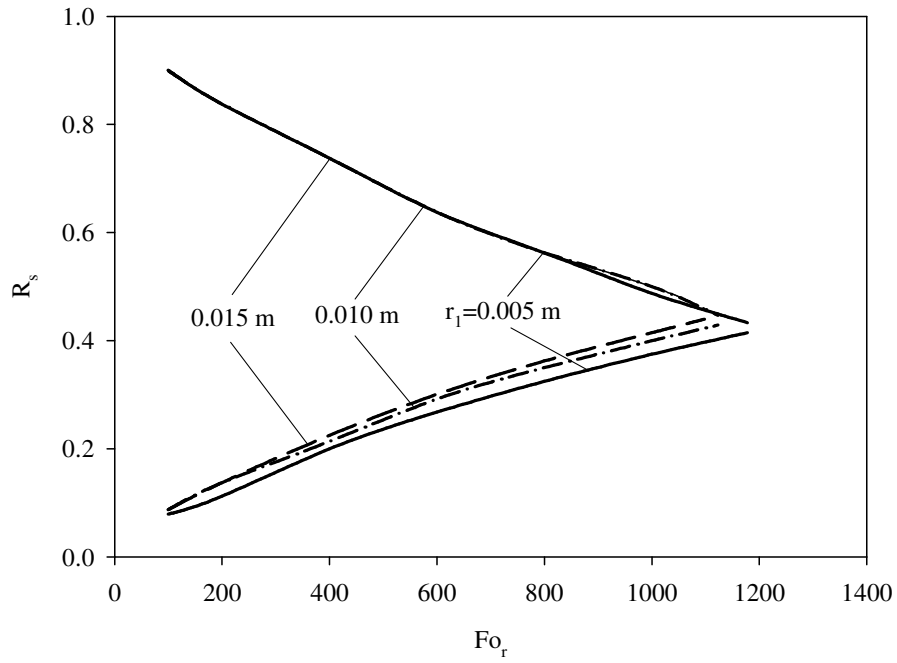
(a)

Şekil 42. Farklı r_1 değerleri için iç ve dış ara yüzlerin zamanla ilerleyişleri
 (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m

Şekil 42'nin devamı;

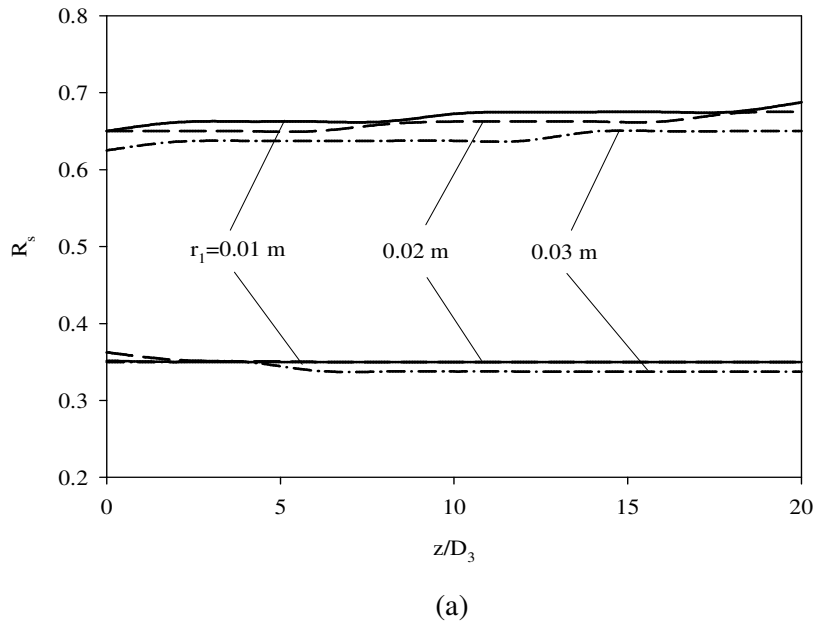


(b)



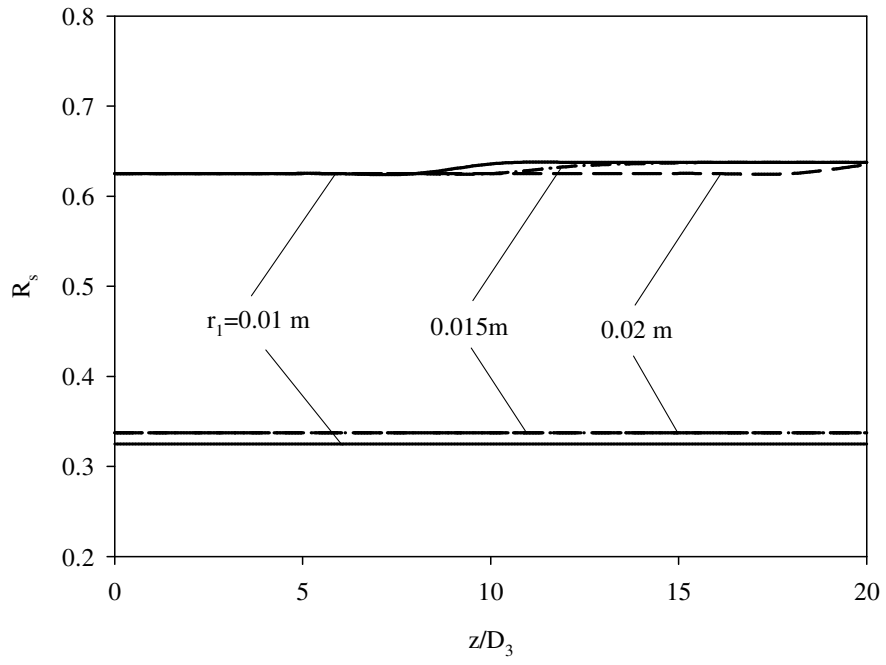
(c)

Şekil 43a'da $r_2 - r_1 = 0.01$ m için $Fo_r = 80$ anında, farklı r_1 değerlerinde ara yüzlerin aksenal doğrultudaki konumları verilmiştir. Dış ara yüzün bu $r_2 - r_1$ kalınlığı için geometri değişimlerinden daha fazla etkilendiği görülmektedir. Her iki ara yüzün de aksenal doğrultudaki konumları, ısı alış verişinde buldukları akışkanların geçtiği iç boru ve $r_3 - r_2$ halkasal aralığının kalınlığı daraldıkça daha az değişmektedir. Şekil 42b'de $r_2 - r_1 = 0.02$ m için iç ve dış ara yüzün $Fo_r = 300$ anındaki konumları verilmiştir. Maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın 0.01 m seçilmesi durumundan farklı olarak bu kez iç ara yüz geometrik değişikliklerden daha fazla etkilenmektedir. Daha büyük r_1 değerlerinde çalışıldığında daha büyük bir iç yüzey alanı oluşmakta ve dolayısıyla iç ara yüz daha fazla ilerlemektedir. Oransal olarak bakıldığında r_1 arttıkça, $r_2 - r_1$ halkasal aralığının dış yüzeyinin alanı iç yüzeyin alanına göre daha az artmakta ve dolayısıyla dış ara yüzün ilerleme miktarlarındaki artış daha az olmaktadır. Şekil 43c'de $r_2 - r_1 = 0.03$ m için $Fo_r = 600$ anında farklı r_1 yarıçap değerlerinde ara yüzlerin aksenal doğrultudaki konumları gösterilmiştir. Bu grafikten de bu $r_2 - r_1$ kalınlığı için iç ara yüzün dış ara yüze oranla geometrik değişimlerden daha fazla etkilendiği tespit edilebilmektedir.

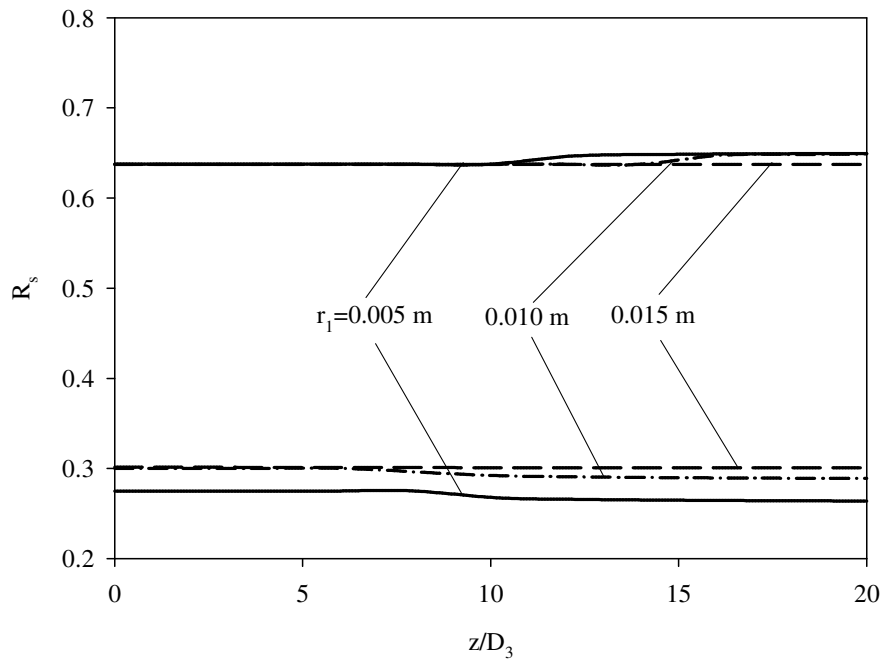


Şekil 43. Farklı r_1 değerleri için ara yüzlerin radyal konumlarının aksenal doğrultu ile değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m ve $Fo_r = 80$ için, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m ve $Fo_r = 300$ için, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m ve $Fo_r = 600$ için

Şekil 43'ün devamı;



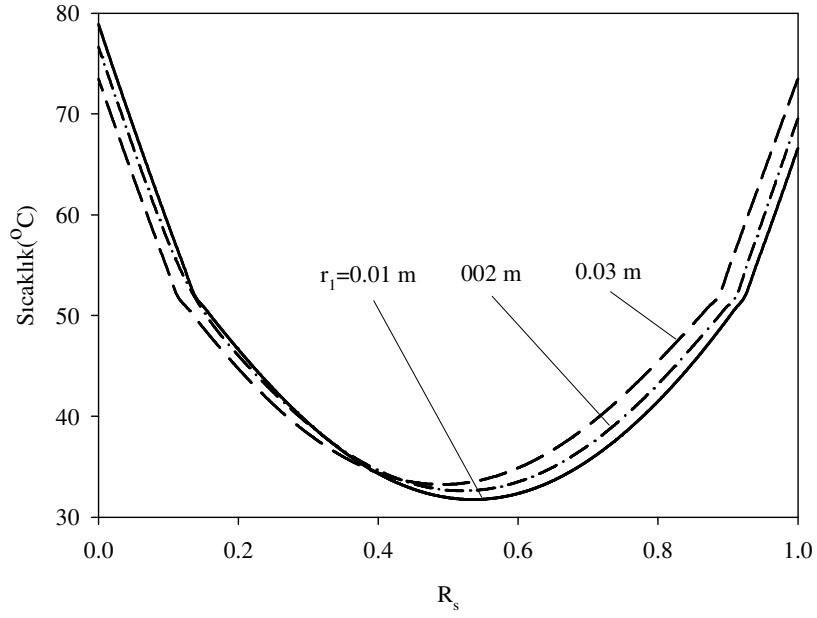
(b)



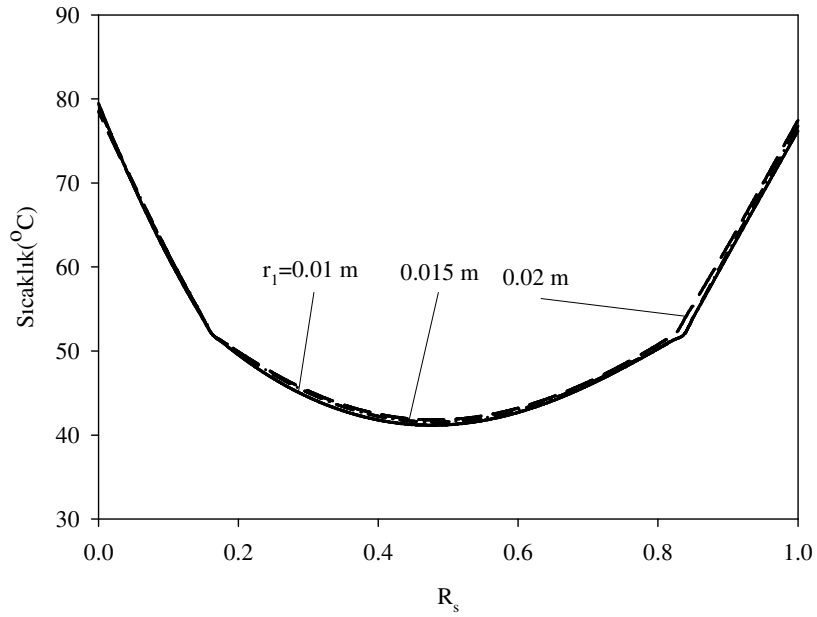
(c)

Şekil 44a'da $r_2 - r_1 = 0.01$ m durumunda $For = 20$ anında farklı r_1 değerleri için eşanjör çıkış kesitinde sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi gösterilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu $r_2 - r_1$ kalınlığı için r_1 'in konumu $r_2 - r_1$ halkasal aralığının iç ve dış yüzeyindeki sıcaklıkları farklı yönde etkilemektedir. Şekilden görüldüğü gibi $R_s \leq 0.39$ bölgesinde küçük r_1 değerlerinde sıcaklıklar daha yüksek değerler alırken bu noktadan itibaren daha düşük değerler almaktadır. İç boru yarıçapı r_1 büyüdükçe minimum sıcaklık noktası daha küçük R_s değerlerine kaymakta ve minimum sıcaklık değeri yükselmektedir. Şekil 44b ve Şekil 44c'de sırasıyla $r_2 - r_1 = 0.02$ m ve $r_2 - r_1 = 0.03$ m durumları için, $For = 100$ ve $For = 200$ anlarında, farklı r_1 değerleri için eşanjörün çıkış kesitinde sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi verilmiştir. Maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın kalınlığının 0.02 m olması durumunda r_1 'in konumu sıcaklık değerlerini fazla değiştirmezken, 0.03 m olması durumunda özellikle iç yüzeye yakın bölgelerde büyük r_1 değerleri için daha yüksek sıcaklık değerlerinin ortaya çıktığı görülmektedir.

Şekil 45a, Şekil 45b ve Şekil 45c'de sırasıyla $r_2 - r_1$ 'in 0.01 m 0.02 m ve 0.03 m olduğu durumlarda farklı r_1 değerleri için depolanan toplam enerjinin zamanla değişimi verilmiştir. İç borunun yarıçapı r_1 daha büyük seçildiğinde aynı $r_2 - r_1$ kalınlığı için hacim ve dolayısıyla FDM kütlesi büyüdüğünden depolanan enerji miktarı da artmaktadır. Örneğin $r_2 - r_1 = 0.01$ m olmak koşuluyla $r_1 = 0.01$ m seçildiğinde 461.162 kJ ısı enerjisi depolanırken $r_1 = 0.02$ m seçildiğinde 768.605 kJ, $r_1 = 0.03$ m seçildiğinde ise 1076.045 kJ ısı enerjisi depolanmaktadır. Deponun şarj olma ve ısı dengeye ulaşma süresi ise r_1 'in konumundan fazla etkilenmemektedir. Her üç $r_2 - r_1$ kalınlığı için depolanabilecek maksimum toplam enerji miktarları $r_2 - r_1 = 0.01$ m için 1076.045 kJ, $r_2 - r_1 = 0.02$ m için 1844.669 kJ, $r_2 - r_1 = 0.03$ m için ise 2766.991 kJ olmaktadır.



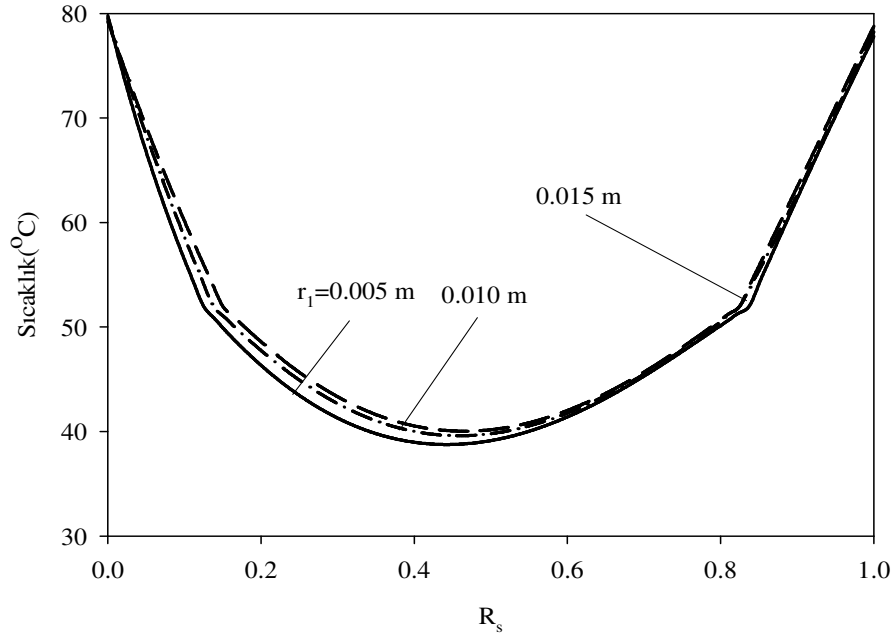
(a)



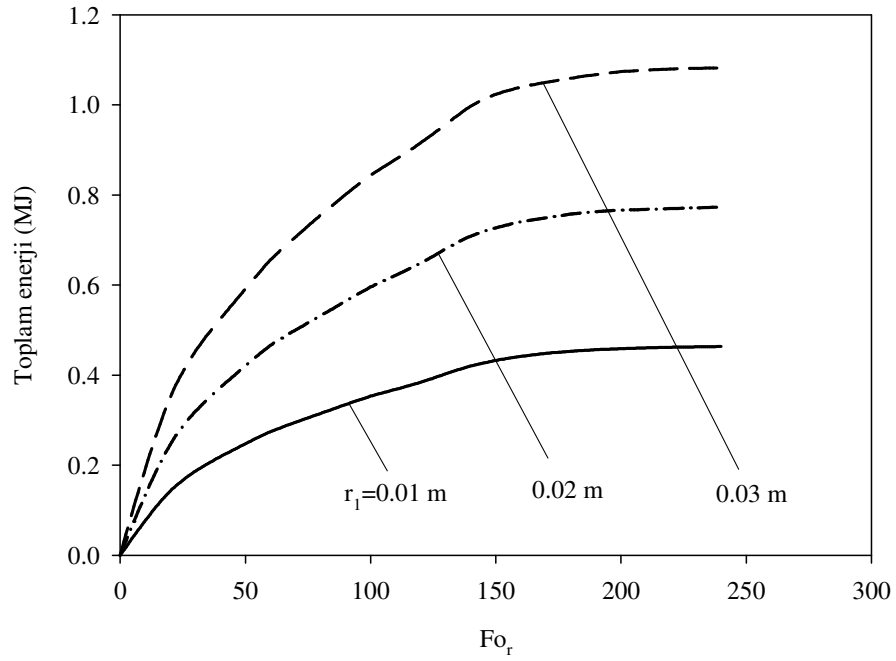
(b)

Şekil 44. Farklı r_1 değerleri için $z/D_3 = 20$ 'deki kesitte sıcaklığın radyal doğrultudaki değişimi (a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m ve $For = 20$ için, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m ve $For = 100$ için, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m ve $For = 200$ için

Şekil 44'ün devamı;



(c)

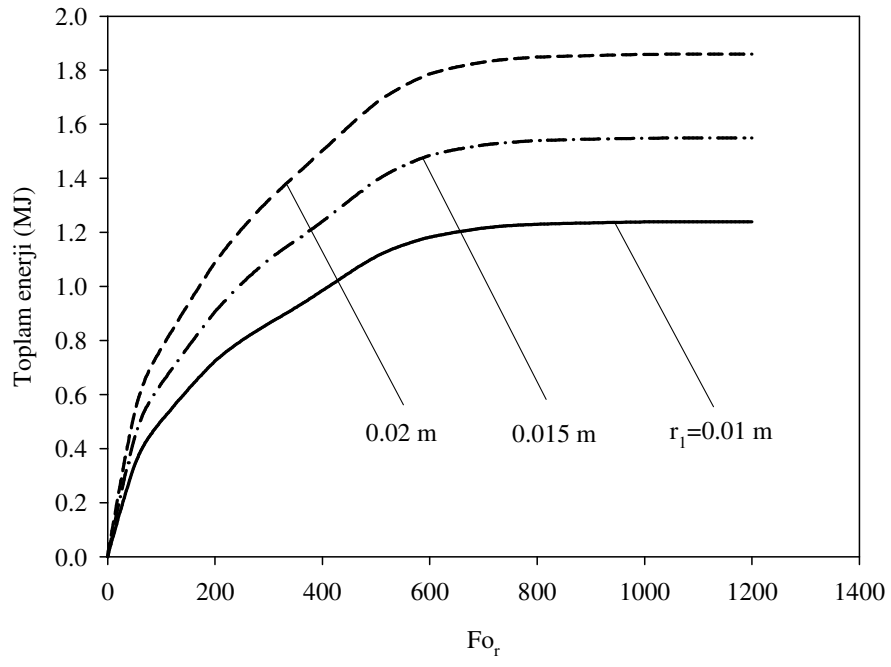


(a)

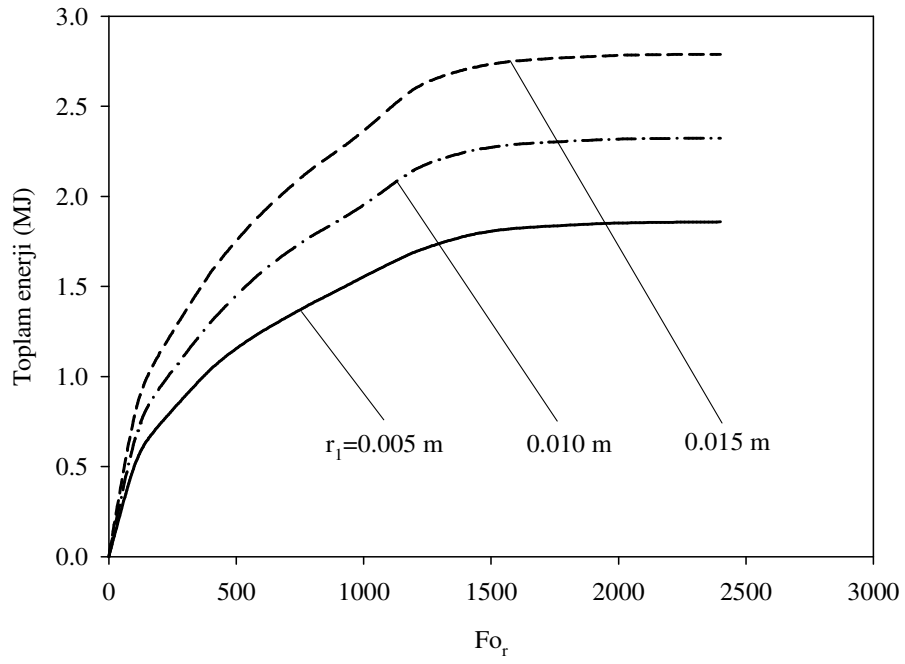
Şekil 45. Farklı r_1 değerleri için depolanan toplam enerjinin zamanla değişimi

(a) $r_2 - r_1 = 0.01$ m, (b) $r_2 - r_1 = 0.02$ m, (c) $r_2 - r_1 = 0.03$ m

Şekil 45'in devamı;

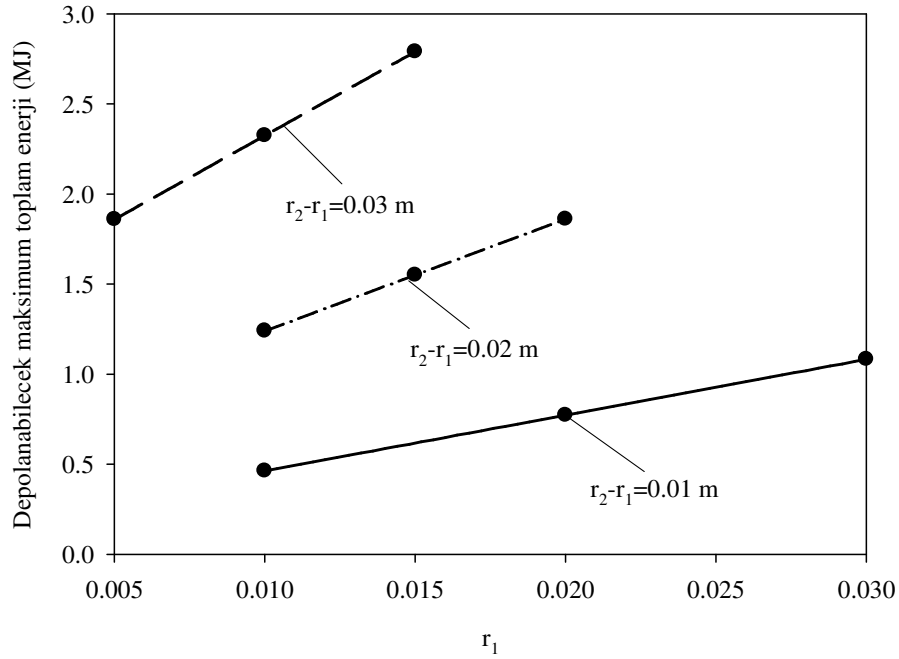


(b)



(c)

Şekil 46'da her üç $r_2 - r_1$ kalınlığı için de depolanabilecek maksimum toplam enerji miktarının r_1 ile değişimi verilmiştir. Maddenin yerleştirildiği halkasal aralık büyüdükçe depolanabilecek ısı enerjisinin geometrik değişimlerden daha fazla etkilendiği görülmektedir. Ayrıca şekilden $r_2 - r_1 = 0.02$ m ve $r_1 = 0.02$ m durumu ile $r_2 - r_1 = 0.03$ m ve $r_1 = 0.005$ m durumlarında eşit miktarda enerji depolanacağı görülmektedir. Ancak $\dot{m} = 0.5$ kg/s ve $T_g = 80^\circ\text{C}$ koşullarında depo ilk durumda 1700 saniyede şarj olurken ikinci durum için deponun şarj olma süresi 4057 saniye olmaktadır.



Şekil 46. Depolanabilecek maksimum toplam enerjinin r_1 'e göre değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada eş eksenli olarak iç içe yerleştirilmiş üç borudan oluşan bir ısı eşanjörü şeklindeki bir gizli ısı deposunun ısıl davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, ısı deposunun karakteristik geometrik büyüklüklerinin ve ısı transfer akışkanının eşanjöre giriş sıcaklığı ve kütleli debisi gibi parametrelerin ısı deposunun şarj edilme süresi ve ısı depolama kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmış ve varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Sabit bir depo dış yarıçapı r_3 için, maddenin yerleştirildiği aralığın kalınlığı $(r_2 - r_1)$ 'in artmasıyla akışkanın kütleli debisinin depo performansı üzerindeki etkisinin azalmakta olduğu belirlenmiştir.
- Maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın büyümesi ile deponun ısıl kapasitesinin arttığı, fakat buna karşılık deponun şarj olma süresindeki artışın daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Örneğin iç borunun yarıçapı $r_1 = 0.01$ m olmak üzere, $T_g = 80^\circ\text{C}$ ve $\dot{m} = 0.5$ kg/s koşullarında maddenin yerleştirildiği aralığının kalınlığı 0.01 m yerine 0.02 m ve 0.03 m seçildiğinde deponun ısı kapasitesi sırasıyla 2.67 ve 5 katına çıkmakla birlikte, şarj süreleri yine sırasıyla 3.68 ve 8.12 katına çıkmaktadır.
- İç borunun yarıçapı r_1 'in daha büyük değerlerde seçilmesinin, göz önüne alınan her üç $r_2 - r_1$ kalınlığı için de ısı deposunun daha kısa sürelerde şarj olmasını sağladığı görülmüştür. Maddenin yerleştirildiği halkasal aralığın kalınlığı arttıkça deponun şarj olma süresinin geometrik değişikliklerden daha fazla etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca daha büyük r_1 değerlerinde daha fazla madde depolanabileceği de düşünüldüğünde, ısı deposunun iç boru yarıçapının büyük seçilmesi sistem performansı açısından daha uygun olmaktadır.
- Bu çalışmada göz önüne alınan koşullarda ve geometrik düzenlemelerde, aynı miktardaki FDM'nin kullanıldığı iki borulu ve üç borulu ısı depoları karşılaştırıldığında, üç borulu ısı deposunun çok daha kısa sürelerde şarj edilebileceği görülmüştür. Örneğin $r_3 = 0.05$ m, her üç $r_2 - r_1$ kalınlığı için çalışılan en büyük r_1 değerinde, $T_g = 80^\circ\text{C}$, kütleli debinin en uygun değeri olarak göz önüne alınan 1.5 kg/s koşullarında, üç borulu ısı deposunun iki boruluya göre; $r_2 - r_1 = 0.01$ m için 4.26

kat; 0.02 m için 4.93 kat, 0.03 m için 5.64 kat daha kısa sürede şarj olduğu belirlenmiştir.

- Isı transfer akışkanının eşanjöre giriş sıcaklığının ısı deposunun şarj olma süresi üzerinde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Akışkan giriş sıcaklığı ısı depolama maddesinin faz değiştirme sıcaklığına yaklaşırken şarj süresi asimptotik olarak artarken deponun ısı depolama kapasitesi doğrusal olarak düşmektedir. Buna karşılık akışkan giriş sıcaklığının artmasıyla hem şarj süresi azalmakta hem de ısı depolama kapasitesi artmaktadır. Örneğin, burada üzerinde durulan her üç $r_2 - r_1$ kalınlığı için de, akışkanın eşanjöre giriş sıcaklığı 65°C yerine 90°C seçildiğinde ısı deposunun şarj olma süresi yaklaşık %60 oranında kısalmaktadır.

5. ÖNERİLER

- Isı depolama enerjisi daha yüksek olan faz değiştiren maddeler kullanılarak depolanabilecek toplam maksimum ısıl enerji miktarları ve deponun şarj olma süreleri karşılaştırılabilir.
- İç borudaki ve dış halkasal aralıktaki akışların zıt yönde olması durumu çalışılarak, elde edilen sonuçlar akışların aynı yönde olması durumu ile karşılaştırılabilir.
- Birden fazla FDM'nin kullanıldığı bir ısı deposu dizayn edilerek, bu çalışmada göz önüne alınan çalışma koşulları için bu iki sistem karşılaştırılabilir.
- Madde içerisindeki ısı iletimi probleminin üç boyutlu olarak göz önüne alındığı, ayrıca madde içerisinde ortaya çıkan doğal taşınım mekanizmasının dikkate alındığı ve ısı transfer akışkanının ve faz değiştiren maddenin içerisindeki sıcaklık dağılımlarının bağlaşımli olarak çözüldüğü bir matematiksel model kurularak bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.
- Buradan elde edilen sayısal bulguların geçerliliğinin deneysel yolla kanıtlanması son derecede önemli olabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Dinçer, İ. ve Rosen, M.A., Thermal Energy Storage: Systems and Applications, John Wiley&Sons, West Sussex, 2002.
2. Hasnain, S.M., Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques, Energy Conversion and Management, 39, 11 (1998) 1127-1138.
3. Günerhan, H., Duyulur Isı Depolama ve Bazalt Taşı, Mühendis ve Makina, 530 (2004) 12-17.
4. Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K. ve Al-Hallaj, S., A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, Energy Conversion and Management, 45 (2004) 1597-1615.
5. Lenotre, C., Sub-Zero Thermal Energy Storage for Process Cooling, <http://www.irc.wisc.edu/ASHRAE-TC101/programs/Annual%202003%20Lenotre.pdf>, 11 Şubat 2007.
6. <http://www.cseng.org.uk/pdf/PCMs%20-%20Overview.prn.pdf>, Phase Change Materials: Overview, 11 Şubat 2007.
7. <http://www.coolvest.com/phaseChangeTech.htm>, Phase Change Technology, 14 Şubat 2007.
8. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F. ve Mehling, H., Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering, 23, 3 (2003) 251-283.
9. <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>, Latent Heat Paraffins, 6 Şubat 2007.
10. Sharma, A., Won, L.D., Buddhi, D. ve Park, J.U., Numerical Heat Transfer Studies of the Fatty Acids for Different Heat Exchanger Materials on the Performance of a Latent Heat Storage System, Renewable Energy, 30, 14 (2005) 2179-2187.
11. Abhat, A., Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, Solar Energy, 30, 4 (1983) 313-332.
12. Sarı, A., Eutectic Mixtures of Some Fatty Acids for Low Temperature Solar Heating Applications: Thermal Properties and Thermal Reliability, Applied Thermal Engineering, 25 (2005) 2100-2107.
13. Akgün, A., Aydın, O. ve Kaygusuz, K., Experimental Study on Melting/Solidification Characteristics of a Paraffin as PCM, Energy Conversion and Management, 48, 2 (2007) 669-678.

14. Özışık, M.N., Heat Conduction, John Wiley&Sons, Kanada, 1980.
15. Esen, M., Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompasındaki Faz Değiştiren Madde İçeren Silindirik Enerji Deposunun Bilgisayarda Simülasyonu ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
16. Shamsundar, N. ve Sparrow, E.M., Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Method, Journal of Heat Transfer, 97, 3 (1975) 333-340.
17. Voller, V.R., Fast Implicit Finite-Difference Method for the Analysis of Phase Change Problems, Numerical Heat Transfer: Part B, 17 (1990) 155-169.
18. Date, A.W., A Strong Enthalpy Formulation for the Stefan Problem, International Journal of Heat and Mass Transfer, 34, 9 (1991) 2231-2235.
19. Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner B., Faber, C. ve Schwarzer K., Experimental Analysis and Numerical Modelling of Inward Solidification on a Finned Vertical Tube for a Latent Heat Storage Unit, Solar Energy, 60, 5 (1997) 281-290.
20. Voller, V.R. ve Cross M., Estimating the Solidification/Melting Times of Cylindrically Symmetric Regions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24, 9 (1981) 1457-1462.
21. Bilir, L. ve İlken, Z., Total Solidification Time of a Liquid Phase Change Material Enclosed in Cylindrical/Spherical Containers, Applied Thermal Engineering, 25,10 (2005) 1488-1502.
22. Cao, Y. ve Faghri, A., Performance Characteristics of a Thermal Energy Storage Module: A Transient PCM/Forced Convection Conjugate Analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, 34, 1 (1991) 93-101.
23. Zhang, Y. ve Faghri, A., Semi-Analytical Solution of Thermal Energy Storage System with Conjugate Laminar Forced Convection, International Journal of Heat and Mass Transfer, 39, 4 (1996) 717-724.
24. Bellecci, C. ve Conti M., Phase Change Thermal Storage: Transient Behaviour Analysis of a Solar Receiver/Storage Module Using the Enthalpy Method, International Journal of Heat and Mass Transfer, 36, 8 (1993) 2157-2163.
25. Zivkovic, B. ve Fujii, I., An Analysis of Isothermal Phase Change of Phase Change Material within Rectangular and Cylindrical Containers, Solar Energy, 70, 1 (2001) 51-61.
26. Fang, M. ve Chen, G., Effects of Different Multiple PCMs on the Performance of a Latent Thermal Energy Storage System, Applied Thermal Engineering, 27 (2007) 994-1000.

ÖZGEÇMİŞ

Birol BAŞAL, 1982 yılında Trabzon'un Dernekpazarı ilçesinde doğdu. 2000 yılında Bayrampaşa Rıfat Canayakın lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği bölümünü kazandı. Temmuz 2004'te bu bölümden mezun oldu. Eylül 2004'te Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. Mayıs 2005'te Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsüne araştırma görevlisi olarak atandı. Halen aynı görevine devam etmektedir. İngilizce bilmektedir.