

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Her geçen gün artan enerji talebinin karşılanması için yeni enerji kaynakları bulunması ve bunların özellikle sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olması bakımından çok önem arz etmektedir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile termal enerji yöntemleri kullanılarak hem elektrik üretimi hem de ısı üretimi yapılmaktadır. Ayrıca yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri ile ısı depolama yapılarak üretilen enerjinin sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

Öncelikli alanlar içerisinde Doktora Projesi olan YÖK 100/2000 burs desteklerinden dolayı YÖK'e ve 2211C bursiyeri olarak TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezi çalışması sürecinde öncelikle maddi ve manevi olarak destekleyen sevgili eşime, aileme ve bana verdiği değerli fikir ve görüşleri ile yardımını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Ali Kemal ÖZCAN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile eritilen inorganik tuzlarla termal enerji depolamanın teorik ve deneysel olarak incelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/04/2024

Ali Kemal ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Yenilenebilir Enerjisi Kaynakları.....	2
1.2. Güneş Enerjisi.....	3
1.3. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri.....	3
1.3.1. Parabolik Oluk Tipi Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri.....	3
1.3.2. Doğrusal Fresnel Reflektör ile Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri.....	4
1.3.3. Merkezi Alıcı (Kule Tipi) Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri	5
1.3.4. Parabolik Çanak Tipi Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemler.....	6
1.3.5. Noktasal Fresnel Lens Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri.....	7
1.3.6. Halka Dizisi Tipi Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri.....	8
1.4. Enerji Depolama Sistemleri.....	9
1.4.1. Mekanik Yöntemler ile Enerji Depolama.....	9
1.4.2. Kimyasal Yöntemler ile Enerji Depolama.....	10
1.4.3. Biyolojik Yöntemler ile Enerji Depolama.....	10
1.4.4. Manyetik Yöntemler ile Enerji Depolama.....	10
1.4.5. Termal Enerji Depolama Sistemleri.....	11
1.5. Literatür Taraması.....	12
1.6. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı.....	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	23
2.1. Deneysel Çalışmalar.....	23
2.1.1. Deney Düzenineğinin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı.....	23

2.1.2.	Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı Modeli Deney Düzenekinin Kurulumu.....	25
2.1.3.	Halka Dizisi Yoğunlaştırıcının Yansıtıcı Yüzey İmalatı ve Hazırlanması.....	27
2.1.4.	Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı Modeli İçin Güneş Takip Sisteminin Kurulumu.....	27
2.1.5.	Güneş Fırını için Faz Değişim Malzemesinin Hazırlanması.....	28
2.1.6.	Isı Depolama Tankı İçin Faz Değişim Malzemesinin Hazırlanması.....	31
2.1.7.	Fırın ve Helisel Boru Eşanjörün Boyutlarının Belirlenmesi.....	32
2.1.8.	Isı Transfer Akışkanı için Pompa Hesabı	33
2.1.9.	HDY ₂ Sistemi ile Güneş Altında Deneylerin Yapılması.....	34
2.1.10.	HDY Isı depolama Entegre Sistemin Çalışma Prensipleri.....	37
2.2.	Laboratuvar ortamında kalibrasyon Testlerinin Yapılması.....	39
2.2.1.	İnfrared Lamba ile Yapılan Isı Depolama Testleri.....	39
2.2.2.	Dirençli Isıtıcı ile Fırında Yapılan Isı Depolama Testleri.....	40
2.3.	Analitik Hesaplamalar.....	41
2.3.1.	Anlık Işınım Değerinin Analitik Olarak Hesabı.....	41
2.3.2.	Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı Sisteminde Termal Enerji Dönüşümü Hesaplamaları.....	43
2.3.3.	Güneş Fırındaki Sıcaklığın Dağılımı ve Eritme Devisinin Hesaplanması.....	47
2.3.4.	Güneş Fırını Üzerinde Yapılan Isıl Hesaplamalar.....	48
2.3.5.	Isı Depolama Tankı Üzerinde Yapılan Isıl Hesaplamalar.....	50
2.3.6.	HDY, Güneş Fırını ve Isı Depolama Tankının Belirsizlik Analizi.....	51
2.4.	Sayısal Yöntemde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği HAD Çözümlemesi.....	53
2.4.1.	Güneş fırınında HAD Modellemesi	53
2.4.2.	HAD Modellenmede Kullanılan Denklemler.....	54
2.4.3.	Güneş Fırınının Üç Boyutlu HAD Modellemesi.....	55
2.4.4.	Üç Boyutlu Olarak Fırındaki FDM Ağ Yapılarının Denetlenmesi.....	56
2.4.5.	Güneş Fırınının İki Boyutlu HAD Modellemesi.....	57
2.4.6.	Fırındaki Helisel Boruda Akışın HAD Modellemesi.....	59
2.4.7.	Isı Depolama Tankı HAD Modellemesi.....	60
2.5.	Tezde Çalışılan Entegre Sistemin Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasa Analizleri.....	60
2.5.1.	Halka Dizisi Yoğunlaştırıcının Ekserji Analizi.....	60

2.5.2. Güneş Fırınının Ekserji Analizi.....	61
2.5.3. Isı Depolama Tankının Ekserji Analizi.....	63
2.5.4. Kurulan tüm Sistemin Termoekonomik Analizi.....	63
2.5.5. Tüm Sistemin Eksergoekonomik Analizi.....	65
2.5.6. Ekserji Maliyet Eşitliğinin Sistem Bileşenlerine Uygulanması.....	66
3. BULGULAR.....	70
3.1. Analitik Bulgular.....	70
3.1.1. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcıların Optik Verim ve Odak Sıcaklığı Sonuçları.....	70
3.1.2. Analitik Olarak Fırındaki Ortalama FDM Sıcaklık ve Termal Verim Sonuçları.....	73
3.2. Sayısal Bulgular.....	75
3.2.1. HDY1 Sistemi ile Fırındaki Solar Tuz İçin HAD Modelleme Sonuçları.....	75
3.2.2. HDY2 Sistemi ile Fırında Solar Tuz İçin Sayısal Sonuçlar.....	77
3.2.3. Uyarlamalı fırında Hitec tuzu için HAD Modelleme Sonuçları.....	78
3.2.4. Fırındaki Helisel Borudaki Akışın Sayısal Modelleme Sonuçları.....	82
3.2.5. Isı Depolama Tankı İçin HAD Modelleme Sonuçları.....	83
3.3. Deneysel Bulgular	85
3.3.1. Güneş Şiddeti ve Odak Alanı Sıcaklık Ölçümü Deneysel Verileri.....	85
3.3.2. HDY ₂ Sistemi ile Yapılan Isı Depolama Deneysel Verileri.....	86
3.3.3. Solar Tuz ile Yapılan Isı Depolama Deneyinden Elde Edilen Veriler.....	86
3.3.4. Hitec Tuz ile Yapılan Isı Depolama Deneyinden Elde Edilen Veriler.....	88
3.3.5. Isı Transferi Arttırılan Fırında Hitec Tuzu Isı Depolama Deneysel Verileri.....	91
3.3.6. Uyarlamalı Fırın ve Isı Depolama Tankı için ilk Deneysel Veriler.....	93
3.3.7. Uyarlamalı Fırın ve Isı Depolama Tankı İçin İkinci Deneysel Veriler.....	95
3.3.8. Uyarlamalı Fırın İçin Son Yapılan Deneysel Veriler.....	102
3.3.9. Güneş Fırını İçin Sayısal Model ile Deneysel Verilerin Karşılaştırılması.....	104
3.3.10. Laboratuvarında Dirençli Isıtıcı ile Yapılan Kalibrasyon Sonuçları.....	106

3.3.11. Uyarlamalı Fırında İnfrared Lamba ile Yapılan Kalibrasyon Sonuçları.....	107
4. TARTIŞMA.....	111
4.1. Deneysel, Analitik, Sayısal ve Kalibrasyon Verilerin Karşılaştırılması.....	111
4.2. HDY ₂ Sisteminin Literatürdeki Yoğunlaştırıcı Sistemler ile Karşılaştırılması.....	117
5. SONUÇLAR.....	119
6. ÖNERİLER.....	122
7. KAYNAKLAR.....	124
8. EKLER.....	135
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ERİTİLEN İNORGANİK TUZLARLA TERMAL ENERJİ DEPOLAMANIN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ali Kemal ÖZCAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji kaynakları/Teknolojileri Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ
2024, 129 Sayfa, 10 sayfa ek

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri ile enerji üretimi ve ısı depolama yapmanın önemi gittikçe artmaktadır. Bu çalışma, literatürde ilk defa tasarlanan ve imalatı yapılan yeni halka dizisi tipi güneş yoğunlaştırıcıları ile gizli ve duyulur ısı enerji depolama üzerinde yapılan teorik, sayısal hesaplama ve deneysel çalışmaları içermektedir. Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcı üzerinden ışınlar tek yansıma yaparak, odakta bulunan güneş fırınına gün boyunca ergonomik olarak aktarılması çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Güneş fırınında Solar ve Hitec tuzlarının kullanılabilirliği incelenirken, ısı depolama tankı için daha düşük sıcaklık uygulamalarında çalışan yeni Hitec XL üçlü tuz karışımları incelenmiştir. Deneysel, analitik, sayısal ve kalibrasyon testlerinde fırın ortalama sıcaklıkları sırasıyla 437 K, 444 K, 455 K ve 442 K olarak elde edilmiştir. Ortalama fırın termal verimleri ise deneysel, analitik, sayısal ve kalibrasyon testlerinde sırasıyla % 27,7, % 28,3, % 30 ve % 27,3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca şarj durumunda 7 saatte güneş fırınında tüm Hitec tuzu eritilirken, deşarj durumunda 4 saat daha ısı depolama yapılması ile günde 11 saat ısı depolama yapılmıştır. Ek olarak, kurulan ısı depolamalı HDY sisteminin ekonomik analizi yapılmıştır. Son olarak, uyarlamalı güneş fırını sayesinde fırın içinde ısı transferi arttırılarak termal performans arttırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Halka dizisi yoğunlaştırıcı, Güneş fırını, Isı depolama, İnorganik tuz

PhD. Thesis

SUMMARY

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL ENERGY STORAGE WITH INORGANIC SALTS MELTED WITH CONCENTRATED SOLAR ENERGY

Ali Kemal ÖZCAN

Karadeniz Technical University
Graduate Institute of Natural and Applied Sciences
Renewable Energy Sources Technologies Department
Supervisor: Assoc. Prof. Cevdet DEMİRTAŞ
2024, 129 pages, 10 pages Appendix

The importance of energy production and heat storage is increasing day by day with concentrated solar energy systems which is one of the renewable energy sources. This study includes theoretical, numerical calculations and experimental studies on latent and sensible heat energy storage with new ring array type solar concentrators which are designed and manufactured for the first time in the literature. The original value of the study is that the rays are transferred ergonomically to the solar furnace located in the focus by making a single reflection through the ring array type concentrator throughout the day. The usability of Solar and Hitec salts in the solar furnace is examined, also new Hitec XL triple salt mixture is examined for the heat storage tank which works in lower temperature applications. In experimental, analytical, numerical and calibration tests the average furnace temperatures are obtained as 437 K, 444 K, 455 K and 442 K, respectively. The average furnace thermal efficiencies are calculated as 27.7%, 28.3%, 30% and 27.3% in experimental, analytical, numerical and calibration tests, respectively. In addition, while all the Hitec salt is melted in the solar furnace in 7 hours in the charging state, heat storage is achieved for 4 more hours in the discharge state, providing heat storage for 11 hours per day. Besides, an economic analysis of installed heat storage with RAC system is made. Finally, thanks to adaptive the solar furnace, thermal performance is improved by increasing heat transfer inside furnace.

Keywords: Ring Array Concentrator, Solar furnace, Heat storage, Inorganic salt

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Parabolik oluk tipi yoğunlaştırıcıların bir görüntüsü	4
Şekil 2. Doğrusal Fresnel reflektörlü güneş enerjisi sisteminin şematik görüntüsü.....	5
Şekil 3. Kaliforniya'daki merkezi alıcı tesisi	6
Şekil 4. Eurodish parabolik çanak yoğunlaştırıcının bir fotoğrafı.....	7
Şekil 5. CENIMS'te kurulan bir Fresnel lens görüntüsü	8
Şekil 6. Halka dizisi yoğunlaştırıcı sistemin şematik görüntüsü	8
Şekil 7. Halka dizisi yoğunlaştırıcıların çizimleri ve boyutlarının görüntüsü	24
Şekil 8. HDY2 sisteminden fırına odaklanan ışınların iki boyutlu görünümü.....	25
Şekil 9. HDY2 sistemi ve iki eksenli güneş takip sisteminin 3B montaj görüntüsü	26
Şekil 10. Güneş takip sistemi kontrolörü, ışın sensörü ve rüzgâr ölçüm cihazı	28
Şekil 11. Yoğunlaştırıcı sistemin doğu batı eksenindeki hareket kolunun yerleşimi	29
Şekil 12. Deney anındaki HDY ₂ sistemi ile ısı depolama sisteminin genel görünüşü	36
Şekil 13. Isı depolama sisteminin şarj esnasındaki şematik görünümü	38
Şekil 14. Isı depolama sisteminin deşarj esnasındaki şematik görünümü	38
Şekil 15. İnfrared lamba ile yapılan ısı depolama deneyi ve şematik görüntüsü	40
Şekil 16. Elektrikli ısıtıcının test anındaki fırın ile resmi ve şematik görüntüsü	40
Şekil 17. Trabzon için ışıınım değerlerinin alındığı konum	42
Şekil 18. Kartezyen koordinatlarda ısı iletimi çözümü için fırın diferansiyel kontrol hacmi.....	48
Şekil 19. Tasarlanan güneş fırınının ağ yapılı FDM hacminin şematik diyagramı	56
Şekil 20. Ağ yapısı analizi için uyarlamalı fırın içindeki FDM sıcaklık değerleri	57
Şekil 21. Ağ yapısı analizi için uyarlamalı fırın içindeki FDM erime oranları	57
Şekil 22. Uyarlamalı fırının Fluentte oluşturulan ağ yapısının iki boyutlu görüntüsü	58
Şekil 23. Yoğunlaştırıcı yüzey alanı ile yoğunlaştırma oranı değişimi	71

Şekil 24.	Kenar açısı ve optik verimin yoğunlaştırıcı yüzey alanına göre değişimi.....	71
Şekil 25.	Yoğunlaştırıcı yüzey alanı göre sıcaklık ve yoğunlaştırma oranı değişimi.....	72
Şekil 26.	Yoğunlaştırıcı yüzey alanı ve güneş gücünün artması ile alıcı verim değişimi.....	72
Şekil 27.	Yoğunlaştırıcı yüzey alanı ile optik, alıcı, Carnot ve toplam termal verim değişimi.....	73
Şekil 28.	Analitik olarak odadaki ısı akısı değerlerine göre HDY2 uyarlamalı fırın iç ve dış yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi.....	74
Şekil 29.	Analitik olarak hesaplanan fırın içindeki FDM sıcaklık dağılımı	74
Şekil 30.	Fırında ortalama Hitec tuzu sıcaklığı ve termal verimin zamanla değişimi.....	75
Şekil 31.	HDY1 düz fırında 36 saat içindeki inorganik tuz erime kontörleri	76
Şekil 32.	HDY1 düz fırında İnorganik solar tuzun a) 1 Saat ve b) 36 Saatteki 2 Boyutlu sıcaklık kontörleri.....	76
Şekil 33.	HDY1 düz fırındaki odak, ortalama PCM sıcaklığı ve termal verimin zamana göre değişimi.....	77
Şekil 34.	HDY2 fırındaki inorganik solar tuz için; a) 1 Erime ve b) Sıcaklık kontörleri.....	77
Şekil 35.	HDY2 düz fırında sayısal programlar ile elde edilen Solar tuz sıcaklık ve erime değerleri	78
Şekil 36.	Hitec tuzun erime kontörleri; a) 1 Saat, b) 2 saat, c) 4 saat d) 7 saat	79
Şekil 37.	Hitec tuzun sıcaklık kontörleri; a) 1 Saat, b) 2 saat, c) 4 saat d) 7 saat	80
Şekil 38.	Sayısal olarak HDY2 uyarlamalı fırındaki FDM sıvı kısmının ve ortalama sıcaklığının zaman ile değişimi	81
Şekil 39.	HDY2 uyarlamalı fırındaki Hitec tuzu ortalama sıcaklığı ve termal veriminin zamanla değişimi	81
Şekil 40.	HDY2 uyarlamalı fırında sıcaklık kontörleri a) Helisel eşanjördeki yağ, b) Eşanjör yağ çıkış yüzeyi.....	82
Şekil 41.	Fırındaki helisel borudan yağ çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi.....	82
Şekil 42.	HDY2 sistemli ısı depolama tankının sıcaklık kontörleri; a) 1,5 h, b) 3 h ve c) 10 h	83
Şekil 43.	HDY2 ısı depolama tankı için erime kontörleri; a) 1,5 h, b) 3 h ve c) 10 h	84
Şekil 44.	HDY2 sistemli ısı depolama tankındaki yeni Hitec XL tuzun erime miktarının zamanla değişimi	84

Şekil 45.	HDY sistemli ısı depolama tankındaki FDM2'nin ortalama sıcaklığı ve erime miktarının zaman ile değişimi	85
Şekil 46.	Gün içindeki güneş şiddetine göre odak ve fırın sıcaklıklarının zamanla değişimi.....	87
Şekil 47.	Gün boyunca güneş şiddetine göre odak ve düz fırındaki Hitec tuzu sıcaklıklarının zamanla değişimi	89
Şekil 48.	Deşarj durumunda yağ çıkış sıcaklığı ve Hitec tuzu iç sıcaklık değişimi	89
Şekil 49.	Şarj durumunda düz fırındaki alıcı Hitec tuzu ile yapılan enerji ve ekserji analizi.....	90
Şekil 50.	Şarj durumunda düz fırındaki helisel eşanjörün enerji ve ekserji verimi değişimi.....	90
Şekil 51.	Deşarj durumunda düz fırındaki helisel eşanjörün enerji ve ekserji verimleri	91
Şekil 52.	Fırında ısı transferinin artırılması ile elde edilen sıcaklık verileri	92
Şekil 53.	Fırın içi ısı transferi arttırılmış Hitec tuzu deşarj durumu sıcaklık eğrileri	93
Şekil 54.	Güneş şiddeti bağlı olarak uyarlamalı fırın ve odak sıcaklıklarının gün içindeki değişimi	94
Şekil 55.	25 Hazirandaki deneyde güneş şiddetine bağlı odak sıcaklıkları değişimi	96
Şekil 56.	25 Hazirandaki deneyde uyarlamalı fırın içinde FDM1 sıcaklıklarının değişimi.....	97
Şekil 57.	Şarj durumu için depolama tankı FDM2 ve eşanjör yağ giriş-çıkış sıcaklıkları	98
Şekil 58.	Şarj durumunda fırın sıcaklığı ile helisel eşanjör enerji ve ekserji verimleri	99
Şekil 59.	Isı depolama tankı sıcaklıkları ile helisel eşanjör enerji ve ekserji verimlerinin zamanla değişimi.....	99
Şekil 60.	Deşarj süresince uyarlamalı fırın içindeki FDM1 sıcaklıkları zamanla değişimi.....	100
Şekil 61.	Deşarj durumu için depolama tankında FDM2'nin zaman ile sıcaklık ilişkisi	101
Şekil 62.	16 Saat deşarj durumunda uyarlamalı fırın ve ısı depolama tankı FDM sıcaklıklarının zamanla değişimleri	101
Şekil 63.	27 Eylüldeki deneyde 11:30-14:30 saatleri arası ölçülen güneş şiddeti değerleri	102
Şekil 64.	Güneşli bir günde yapılan deneyde fırın üzerinde elde edilen veriler	103
Şekil 65.	Deneysel olarak elde edilen ortalama sıcaklık, enerji ve ekserji verimleri	103

Şekil 66.	Kuvars cam ve uyarlamalı fırının deneysel enerji ve ekserji verimlerinin zamanla değişimi.....	104
Şekil 67.	Sayısal sıcaklık kontörlerinin deneysel ölçümler ile karşılaştırılması	105
Şekil 68.	Sayısal yöntem ve deneylerdeki fırın iç sıcaklıklarının karşılaştırılması	105
Şekil 69.	Laboratuvarda yapılan dirençli ısıtıcı deneyinde fırında elde edilen veriler	106
Şekil 70.	Kalibrasyondaki uygulamada fırındaki FDM ortalama sıcaklığının ve termal verimin zamanla değişimi.....	108
Şekil 71.	İnfrared lamba uygulamasında odak ve uyarlamalı fırın iç sıcaklığının zaman ile değişimi	109
Şekil 72.	İnfrared lamba uygulaması sonrası deşarj sürecinde fırın iç sıcaklık değerleri.....	109
Şekil 73.	Tüm yöntemlere göre güneş şiddetinin zamanla değişimi.....	112
Şekil 74.	Tüm yöntemler ile odakta oluşan ısı akısının zamanla değişimi	112
Şekil 75.	Deneysel, sayısal, analitik ve kalibrasyondaki odak sıcaklıklarının zamanla değişimi.....	113
Şekil 76.	Farklı yöntemlere göre uyarlamalı fırındaki Hitec tuzu ortalama sıcaklıklarının zamanla değişimi	114
Şekil 77.	Deneysel, sayısal, analitik ve kalibrasyonda eritilen uyarlamalı fırındaki Hitec tuzunun zamanla değişimi.....	114
Şekil 78.	Deneysel, sayısal, analitik ve kalibrasyondaki eritilen FDM'nin kütleli debileri	115
Şekil 79.	Deneysel, sayısal, analitik ve kalibrasyonda oluşan uyarlamalı fırın termal enerji verimlerinin zamanla değişimi	116
Şekil 80.	Literatürdeki ve bu tezdeki sayısal uygulamalardaki ısı akısına bağlı olarak Hitec tuzu erime oranlarının zamanla değişimi	118
Şekil 81.	Literatürdeki sayısal uygulamalarda ve bu tezdeki fırın ortalama sıcaklıklarının zamanla değişimleri	118
Ek Şekil 1.	Solar ve Hitec tuzlarının hazırlanmasında kullanılan elektrikli fırın	130
Ek Şekil 2.	Isı depolama tankında FDM ₂ 'nin ve termoelemanların yerleştirilmesine ait görüntüler; solda orta, sağda üst bölgesi	130
Ek Şekil 3.	Halka dizisi yoğunlaştırıcı odağına yerleştirilen fırının bir fotoğrafı.....	131
Ek Şekil 4.	Odak açıklığı alanı hesabında yoğunlaştırma oranına bağlı odak sıcaklıkları	131

Ek Şekil 5.	2023 Ocak ayında ısı depolama sisteminin bağlantılarına ait bir görüntüsü	132
Ek Şekil 6.	Ocak 2023'te yapılan HDY2 sisteminin ilk deneyindeki bir görüntüsü	132
Ek Şekil 7.	Deşarj durumunda fırında solar tuzun soğuma grafiği.....	133
Ek Şekil 8.	Şarj durumunda depolama tankında FDM2 ve eşanjör yağ giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi	133
Ek Şekil 9.	Deşarj durumu içi fırındaki FDM1'in zamanla sıcaklıklarının değişimi	134
Ek Şekil 10.	Deşarj durumunda ısı depolama tankında FDM2 ve eşanjör yağ giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi	134
Ek Şekil 11.	Haziranda şarj deneyinde görüntüsü alınan Termometredeki sıcaklık verileri.....	135
Ek Şekil 12.	Haziran ayında fırın ve ısı depolama tankı bağlantısına ait bir görüntüsü	135
Ek Şekil 13.	27 Eylül 2023'te yapılan deneyde fırın kabından çıkarılan eriyen Hitec tuzunun görüntüsü.....	136
Ek Şekil 14.	Alternatif güneş enerjili ısı depolama sisteminin şematik görüntüsü	136

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	9
Tablo 2. Tasarlanan Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı-1 (HDY ₁) modelin özellikleri.....	24
Tablo 3. Tasarlanan Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı-2 (HDY ₂) modelin özellikleri.....	24
Tablo 4. Hitec tuzun (%53 KNO ₃ , %40 NaNO ₂ ve %7 NaNO ₃) bazı fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 5. Solar tuzun (%60 NaNO ₃ ve %40 KNO ₃) bazı fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 6. Ötektik solar tuzun (%50 NaNO ₃ , %50 KNO ₃) bazı fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 7. İnorganik üçlü tuz karışımının (FDM ₂) bazı fiziksel özellikleri.....	31
Tablo 8. Dijital termometre ve K tipi termokupul teknik özellikleri.....	35
Tablo 9. PCE-SPM1 Solarimetre'nin teknik özellikleri.....	36
Tablo 10. Yoğunlaştırıcı ve fırın tasarımı kullarılan özellikler ve değeri.....	44
Tablo 11. Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcı için bazı hata türleri ve oranları.....	52
Tablo 12. Isı transfer akışkanı motor yağının bazı fiziksel özellikleri.....	59
Tablo 13. HDY ₂ ısı depolama sisteminin maliyet hesabı.....	64
Tablo 14. HDY, fırın v ısı depolama tankı yatırım maliyetleri ve Termodinamik oranları.....	68
Tablo 15. Yüzey alanlarına (1.5 m ² ve 3.5 m ²) göre yoğunlaştırıcıların özellikleri.....	70
Tablo 16. 31 Aralık 2022 tarihindeki odak sıcaklığı ölçümüne ait deneysel veriler.....	86
Tablo 17. 10 Ocak 2023 tarihindeki solar tuz ile ısı depolama deneysel veriler.....	87
Tablo 18. 11 Ocak 2023 tarihindeki Hitec tuzu ile ısı depolamaya ait deneysel veriler.....	88
Tablo 19. 25 Hazirandaki şarj deneyinde fırındaki FDM ₁ ve odak sıcaklıkları Verileri.....	97
Tablo 20. Laboratuvarda dirençli ısıtıcı ile yapılan Hitec tuzu eritme deneyi verileri.....	107
Tablo 21. İnfrared lamba ile uyarlamalı fırında şarj deneyi verileri.....	108
Tablo 22. HDY ₂ sisteminde tüm yöntemler ile elde edilen ortalama sonuçlar.....	111
Ek Tablo 1. Lutron BTM-4208SD 12 kanal sıcaklık kayıt cihazı teknik özellikleri.....	137
Ek Tablo 2. 27 Ocak tarihinde yapılan Hitec tuzu şarj deneyinden elde edilen veriler....	138

Ek Tablo 3. 27 Ocak tarihindeki deneyin Hitec deşarj durumunda elde edilen verileri....	138
Ek Tablo 4. 24 Haziran deneyinde şarj durumundaki veriler.....	139
Ek Tablo 5. Uyarlamalı fırında deşarj durumunda infrared lamba deneyi verileri.....	139



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>SEMBOL</u>	<u>AÇIKLAMA</u>	<u>BİRİM</u>
A_H	: Tek bir halka dik izdüşümü alanı	(m ²)
A_{HDY}	: Yoğunlaştırıcının açıklık alanı	(m ²)
A_{ks}	: Kısmi katı-sıvı bölge sabiti	
A_s	: Helisel boru eşanjörün dış yüzey alanı	(m ²)
$R_{üst}$	: Yoğunlaştırıcının üstten odak eksenine uzaklığı	(m)
R_{alt}	: Yoğunlaştırıcının alttan odak eksenine uzaklığı	(m)
A_r	: Odak alanı	(m ²)
A_{lens}	: Lens yüzey alanı	(m ²)
C_R	: Yoğunlaştırma oranı	
C_{H1}	: Tek bir halkanın yoğunlaştırma oranı	
$C_{p,FDM(k)}$	: Faz değişimi malzemesi katı haldeki sabit basınç özgül ısısı	(J/kgK)
$C_{p,FDM(s)}$	: Faz değişimi malzemesi sıvı haldeki sabit basınç özgül ısısı	(J/kgK)
$c_{p,ITA}$	: Isı transfer akışkanının sabit basınç özgül ısısı	(J/kgK)
D	: Helisel boru çapı	(m)
$\dot{E}_{de,g}$	: Isı depolama tankına giren birim zamandaki ekserji	(W)
$\dot{E}_{de,\zeta}$	: Isı depolama tankından çıkan birim zamandaki ekserji	(W)
$\dot{E}_{x,g}$	: Fırına giren birim zamandaki ekserji	(W)
$\dot{E}_{x,\zeta}$	: Fırından çıkan birim zamandaki ekserji	(W)
$\dot{E}_{x,depo}$	: Fırında depolanan birim zamandaki ekserji	(W)
e_{sl}	: Yüzey eğimi	Derece (°)
e_{sen}	: Takip sistemi ışın alıcısı	Derece (°)
e_{dr}	: DC motor sürücüsü	Derece (°)
e_{foc}	: Alıcıya odaklanma	Derece (°)
e_{ref}	: Yüzey yansıması	Derece (°)
e_{in}	: Gelen ışın açısı	Derece (°)
f	: Odak uzunluğu	(cm)
F_1	: Atalet direnci	
F_B	: Bozulma faktörü	

<u>SEMBOL</u>	<u>AÇIKLAMA</u>	<u>BİRİM</u>
FDM	: Faz değişim malzemesi	
$f_s \times \Gamma$	: Gölgeleme ve karşıtlık faktörü	
H	: Eriyik malzeme entalpisi	(J/kg)
HDY	: Halka dizisi yoğunlaştırıcı	
H_{HDY}	: Halka yüksekliği	(cm)
$\bar{h}$	: Ortalama ısı taşınım katsayısı	(W/m ² K)
h	: Odak alanındaki ısı taşınım katsayısı	(W/m ² K)
h_p	: Pompa yükü	(m)
h_f	: Sürtünme yükü	(m)
h_s	: Saat açısı	(°)
h_{ss}	: Güneş batış saat açısı	(°)
I	: Güneş ışıınım şiddeti	(W/m ²)
I_B	: Eğik yüzeye gelen direkt ışıınım	(W/m ²)
I_g	: Küresel ışıınım miktarı	(W/m ²)
I_d	: Yatay bir yüzeye gelen saatlik ortalama difüz ışıınım	(W/m ²)
I_D	: Eğik yüzeye gelen yayılı ışıınım	(W/m ²)
I_R	: Eğik yüzeye gelen yansıyan ışıınım	(W/m ²)
I_t	: Toplam ışıınım miktarı	(W/m ²)
İGDAŞ	: İstanbul Gaz ve Doğalgaz Dağıtım A.Ş	
k	: Isı iletim katsayısı	(W/mK)
K	: Sayısal hesaplamada geçirgenlik direnci	
k_T	: Saatlik gökyüzü açıklık indeksi	
k_f	: Faz değişimi malzemesi sıvı haldeki ısı iletkenlik katsayısı	(W/mK)
L_e	: Erime gizli ısı	(J/kg)
m	: İnorganik tuz kütlesi	(kg)
$\dot{m}$	: Erime kütleli debi	(kg/s)
$\dot{m}_G$	: Güneş fırınından geçen akışkan kütleli debisi	(kg/s)
$\dot{m}_D$	: Depolama ve eşanjörden geçen kütleli debi	(kg/s)
$\dot{m}_E$	: Eşanjörden geçen kütleli debi	(kg/s)
$\dot{m}_{ITA}$	: Isı transfer akışkanının kütleli debisi	(kg/s)
Nu	: Nusselt sayısı	
P	: Helisel boru iç basıncı	(N/m ²)

<u>SEMBOL</u>	<u>AÇIKLAMA</u>	<u>BİRİM</u>
Pr	: Prandtl sayısı	
Re	: Reynolds sayısı	
R _S	: Soğuma katsayısı	
S	: Sayısal hesaplama için kaynak terim	
$\dot{Q}_{gir}$	: Birim zamanda sisteme giren enerji	(W)
$\dot{Q}_{çık}$	: Birim zamanda sistemden çıkan enerji	(W)
$\dot{Q}_{de}$	: Birim zamanda sistemde depolanan enerji	(W)
$\dot{Q}_{ür}$	: Birim zamanda üretilen enerji	(W)
$\dot{Q}_{güneş}$	: Birim zamanda gelen güneş enerjisi	(W)
$\dot{Q}_{deş}$	: Birim zamanda sistemdendeşarj olan enerji	(W)
$\dot{Q}_{deş}$	: Fırından kaybedilen birim zamandaki enerji	(W)
$\dot{Q}_{FDM, g}$	: Birim zamanda ısı depolama tankına giren enerji	(W)
$\dot{Q}_{FDM, ç}$	: Birim zamanda depolama tankından çıkan enerji	(W)
$\dot{Q}_{konv}$	: Taşınım ile olan ısı geçişi miktarı	(W)
$\dot{q}$	: Odağa gelen sabit ısı akısı	(W/m ²)
Q _u	: Birim zamanda kullanılan enerji	(W)
T _s	: Helisel boru yüzey sıcaklığı	(K)
T _ç	: Helisel boru çıkış sıcaklığı	(K)
T _g	: Helisel boru giriş sıcaklığı	(K)
T _i	: İnorganik tuzun ilk sıcaklığı	(K)
T _f	: İnorganik tuzun son sıcaklığı	(K)
T _a	: Ortam sıcaklığı	(K)
T _{gün}	: Güneş yüzey sıcaklığı	(K)
T _m	: Tuzun erime sıcaklığı	(K)
ΔT_{lm}	: Logaritmik sıcaklık	(K)
ΔT_g	: Helisel boru çıkışındaki sıcaklık farkı	(K)
$\Delta T_ç$	: Helisel boru girişindeki sıcaklık farkı	(K)
T _{odak}	: Teorik maksimum odak sıcaklığı	(K)
V	: Helisel boru iç akış hızı	(m/s)
We	: Genel belirsizlik oranı	
Z	: Helisel boru yüksekliği	(m)

<u>SEMBOL</u>	<u>AÇIKLAMA</u>	<u>BİRİM</u>
α_s	: Güneş yükseklik açısı	(°)
α	: Termal yayılım katsayısı	(m ² /s)
α_y	: Alıcı yüzeyinin yutunum oranı	
β	: Alıcı yüzeyi eğim açısı	(°)
β	: $\beta=1$ için inorganik tuzun erimiş sıvı kısmı	
β_{te}	: Termal genleşme katsayısı	(1/K)
ε_s	: Yayılım katsayısı	
ε	: Gözeneklilik katsayısı	
$\dot{\varepsilon}$	: Sıfıra bölmeyi önlemek için çok küçük bir sayı	
λ	: Hedef açısı	(°)
μ	: Dinamik viskozite	(kg/ms)
μ_f	: İnorganik tuzun dinamik viskozitesi	(kg/ms)
η_{Carnot}	: Carnot verimi	(%)
η_d	: Isı depolama tankı enerji verimi	(%)
$\eta_{Fır}$	: Alıcının termal verimi	(%)
η_{op}	: Yoğunlaştırıcı optik verimi	(%)
ρ_f	: İnorganik tuzun sıvı haldeki yoğunluğu	(kg/m ³)
ρ_{ch}	: Yüzey yansıtma katsayısı	
ρ_{gr}	: Beton zemin için yansıtma katsayısı	
θ_R	: Yoğunlaştırıcı kenar açısı	(°)
θ_i	: Işın kayma açısı	(°)
θ_{min}	: Gölge açısı	(°)
τ	: Geçirgenlik katsayısı	
σ	: Stefan - Boltzmann sabiti	(W m ⁻² K ⁻⁴)
σ_x	: X düzleminde standart sapma	
σ_z	: Z düzleminde standart sapma	
ψ_f	: Güneş fırını ekserji verimi	(%)
ψ_d	: Isı depolama tankı ekserji verimi	(%)
$\vec{v_p}$	: Katılaşma durumunda katı hızı	(m/s)
ν	: Kinematik viskozite	(m ² /s)
ω_s	: Güneş doğuş açısı	(°)

1. GENEL BİLGİLER

Enerji üretimine olan talep her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini oluşturan güneş enerjisi bilinen en eski enerji kaynağıdır. Çevresel tahribatlardan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan önem her geçen gün daha da artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, temiz, çevre dostu ve sürdürülebilir enerjiler olarak adlandırılmaktadır. Konvansiyonel enerji kaynaklarından olan fosil yakıtlı santraller ve nükleer santraller yenilenemez enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları gelecekte enerji üretiminde ön sıralarda yer alacaktır. Ülkelerin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltan bu sistemler, konvansiyonel enerji kaynakları ile yapılan enerji üretimini geçebileceği ön görülmektedir. Sürekliliği olmayan güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, geliştirilen ısı depolamalı hibrit enerji sistemleri ile enerjinin sürekliliği sağlanabilmektedir.

Güneş enerjisi yoğunlaştırıcı sistemler, her geçen gün geliştirilerek yeni modeller ve teknolojiler ortaya çıkmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile direkt termal enerji üretimi yapan teknolojiler yaygınlaşmaktadır. Bu sistemler, ilk kurulum dışında oldukça düşük maliyetlidir. Güneş enerjisinden termal enerji üretmenin birçok çeşidi vardır. Bunlar; yansıtıcı yüzey eğimlerine göre oluk tipi, çanak tipi, merkezi alıcı ve Fresnel lens sistemleri olarak çeşitlendirilmektedir.

Sanayide tüketilen enerjinin büyük bir bölümü elektrik ve fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır. Birçok özel firmanın üretimde enerji maliyetlerini düşürmek için arayış içinde olduğu bilinmektedir. Düşük sıcaklık güneş enerjisi sistemlerinden olan foto-voltaj sistemlerde elektrik üretimi sağlanmaktadır. Ancak erime ve buhar oluşturma gibi yüksek sıcaklık gerektiren işlemler için, daha büyük termal güçler gerekmektedir. Günümüzde foto voltaj teknolojileriyle termal enerji depolama yapmanın daha maliyetli olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, güneş enerjisini yüksek sıcaklık gerektiren termal teknolojiler alanında verimli ve ekonomik bir şekilde kullanabilmek için, yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerine ihtiyaç vardır. Bunun yanında güneşten kesikli sağlanan enerji, ısı depolama yöntemleri kullanılarak sürekli hale getirebilmektedir. Özellikle ülkemizde inorganik tuzların eritilerek ısı depolamada kullanılması oldukça yenidir. İnorganik tuzlar ile ısı depolama teknolojisi alanlarında, gizli ve duyulur ısıların ekonomik ve çevreci bir yaklaşımla ısı depolama

yapılabilmesi için, yüksek sıcaklıklı bir güneş fırınına ve ısı depolama tanklarına ihtiyaç olduğu ortaya çıkmaktadır.

Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcı kullanılarak güneş ışınlarının tek bir bölgede toplanmasıyla termal enerji üretimi sağlanmaktadır. Işınların yoğunlaştığı odak noktasına bir güneş fırını yerleştirilir. Bu yoğunlaştırılmış ışınlar sayesinde fırın içinde faz değişim malzemesi olarak kullanılan inorganik tuzlar eritilir. Fırın ile ısı depolama tankı arasında ısı transfer akışkanı olan termal yağlar kullanılarak ısı geçişi sağlanır. Tasarlanan ısı depolama tankında farklı bir faz değişim malzemesi kullanılarak depolama miktarı artırılır. Böylece hem fırın hem de ısı depolama tankındaki faz değişim malzemesinde depolanan ısı, kullanım ihtiyacına göre bir eşanjör yardımıyla geri kazanılır.

1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Türkiye jeolojik ve engebeli coğrafi yapısı ile beraber yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu doğrultuda farklı yöntemler, sistemler ve tesisler ile üretilen enerji kaynakları, temiz bir çevre ve dünya anlayışını en iyi şekilde temsil etmesi gerekir.

Yenilenebilir kaynakları genellikle kısa sürelerde doğal olarak yeniden depolanabilirler. Beş ana yenilenebilir enerji kaynağı su, rüzgâr, jeotermal, biokütle ve güneştir. Güneş, jeotermal enerji dışında, yeryüzünde doğrudan veya dolaylı olarak geniş bir enerji yelpazesinin en önemli kaynağıdır. Petrol türevleri (petrol, gaz ve kömür), bir zamanlar yeryüzünde yaşayan ve güneş enerjisi sayesinde gelişen hayvan ve bitkilerin dönüşmüş türleridir. Güneş, fotosentetik süreç yoluyla biokütlenin gelişiminde önemli bir role sahiptir. Hidroelektrik enerjisi, yine güneş ışınımına bağlı olan su döngüsüne dayanır. Benzer şekilde dalga enerjisi, rüzgâr enerjisi ve gelgit enerjisi de dâhil olmak üzere diğer tüm yenilenebilir enerji türleri güneş ışığına dayanmaktadır (Hanif vd., 2021).

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde önemli yere sahip güneş enerjisi, güneşten gelen ışınları fotovoltaik sistem ile elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Biokütle enerjisi, tarım ve hayvancılık ile beraber birçok atık ve çöp yakma, piroliz ve gazifikasyon gibi farklı termal işlemlerden geçirilerek ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Rüzgâr enerjisi, özel türbinleri sayesinde kinetik enerjiden mekanik enerjiye dönüştürülerek elektrik enerjisi üretimi sağlamaktadır (Hanif vd., 2021). Türkiye ve dünyada kurulmuş olan tesisler ve

sistemler sayesinde yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik ve termal enerji başta olmak üzere birçok farklı enerjiye dönüştürülebilmektedir.

1.2. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, çekirdeğindeki füzyon reaksiyonları sayesinde oluşur. Bu reaksiyonlar 4,5 milyar yıldır gerçekleşmekte ve 6,5 milyar yıl daha devam etmesi beklenmektedir. Güneş tarafından uzaya yayılan toplam güç yaklaşık $3,86 \times 10^{26}$ W'tır. Bu radyasyonun çoğu elektromanyetik spektrumun görünür ve kızılötesi kısmındadır ve %1'den daha az kısmı radyo, UV ve X ışını spektral bantlarında yayılır. Güneş enerjisi her yöne eşit olarak yayılır. Güneş Dünya'dan yaklaşık 150 milyon km uzakta olduğundan ve Dünya yaklaşık 6371 km yarıçapta olduğundan, güneşten gelen gücün yalnızca $4,5 \times 10^{-8}$ 'i gezegenimiz tarafından yakalanır. Bu hala devam etmekte ve oldukça büyük bir güce ($1,75 \times 10^{17}$ W) denk gelir. Güneş enerjisinin soğurulması amacıyla, Dünya'nın Güneş'ten normal uzaklığındaki durumda, dünya atmosferinde bir metre kareden geçen güneş ışığındaki güç miktarından söz edilir. Güneşin Dünya atmosferi üzerindeki metre kare başı gücüne Güneş Sabiti denir ve yaklaşık 1370 W/m^2 'dir (Kennewell ve McDonald, 2022; Corkish vd., 2016; Duffie ve Beckman, 2013).

1.3. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri, doğrusal odaklama yöntemi ve noktasal odaklama yöntemi olarak iki grupta incelenmektedir. Doğrusal odaklama yöntemleri, parabolik oluk ve doğrusal Fresnel yansıtıcı yoğunlaştırıcılar olarak ikiye ayrılmaktadır. Noktasal odaklama yöntemleri parabolik çanak, merkezi alıcı, Fresnel lens ve halka dizisi tipi yoğunlaştırıcılar olarak dört grup halinde sınıflandırılmaktadır.

1.3.1. Parabolik Oluk Tipi Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Parabolik oluk tipi sistemler, ticari olarak kanıtlanmış en yaygın yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerindendir. Şekil 1'de gösterildiği gibi parabolik oluk tipi sistemler, gün boyunca güneşi tek eksenli takip ederek, güneş ışığını termal olarak verimli alıcı tüpler veya

ısı toplama elemanları üzerine yoğunlaştırmıştır. Yoğunlaştırıcı, güneşi doğudan batıya takip edecek şekilde kuzey-güney yönünde konumlandırılmıştır (Moukhtar vd., 2021).

Bu sistemlerde Isı Transfer Akışkanı (ITA) tipik olarak sentetik yağ, erimiş tuz veya buhardan oluştuğu belirtilmiştir. Birden fazla ısı eşanjöründen geçmeden önce güneş ışınlarını absorbe eden tüplerde ısı transfer akışkanı olarak buhar dolaştırılmıştır. Parabolik oluk sistemlerinin çoğunda, ITA olarak 400 °C'ye kadar kararlı olan sentetik yağlar kullanılmıştır. Erimiş tuzun 540 °C'de ısı transferi akışkanı veya depolamada kullanımı ise tanıtım aşamasında olduğu belirtilmiştir (Moukhtar vd., 2021).

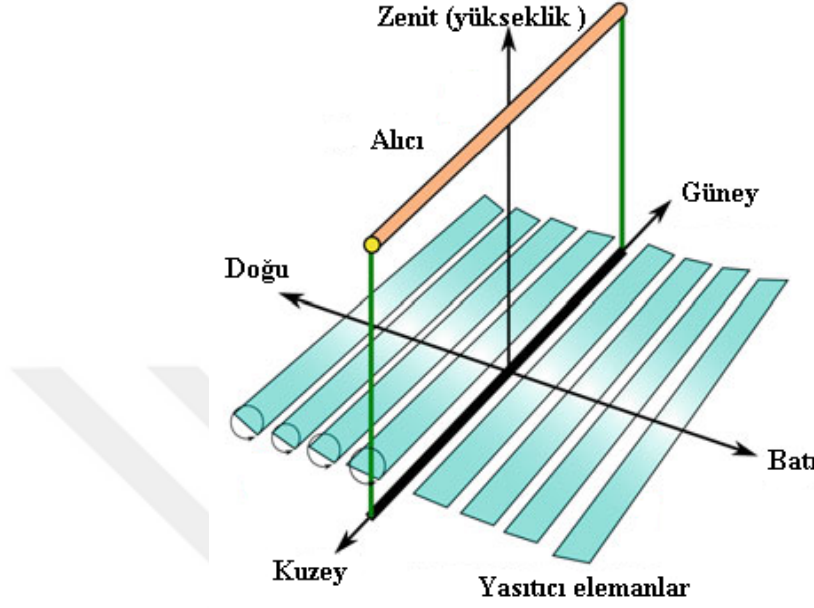


Şekil 1. Parabolik oluk tipi yoğunlaştırıcıların bir görüntüsü (Moukhtar vd., 2021)

1.3.2. Doğrusal Fresnel Reflektör ile Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Doğrusal Fresnel Reflektör ile yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemi, Fransız fizikçi Augustin-Jean Fresnel tarafından geliştirilmiştir. Bu geliştirilen sistem, yansıtıcı büyük bir yüzeyin, bölünerek optik odaklama kalitesinin düşürülmesine rağmen, bir dizi şeklindeki yansıtıcı yüzeylerin oluşturulması ilkesine dayandırılmıştır. Örneğin, bir parabolik çanak dairesel (halka dizisi tipi şeklinde) parçalara bölünerek, eş eksenli Fresnel reflektör sistemini

oluşturmuştur. Ayrıca doğrusal Fresnel reflektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemi Şekil 2'de görüldüğü gibi üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar doğrusal yansıtıcı elemanlar, doğrusal alıcı ve güneş takip sistemi olduğu belirtilmiştir (Karathanasis, 2019).



Şekil 2. Doğrusal Fresnel reflektörlü güneş enerjisi sisteminin şematik görüntüsü (Karathanasis, 2019)

1.3.3. Merkezi Alıcı (Kule Tipi) Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Termal güneş enerjisi sistemleri, güneşten gelen ışınlar odaklanarak ısı enerjisine dönüştürülmesini sağlayan bir teknolojiye sahiptir. Yoğunlaştırılmış güneş radyasyonu akışkan bir ortama yansıtılarak elektrik üretimi için kullanılacak ısının üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sistemler, bir ana alıcının etrafına yerleştirilen helyostat adı verilen izleme aynaları ile donatılmaktadır. Bu modelde alıcılar, helyostatların odak noktasında kulenin ise tepesine monte edilmiştir. Helyostatlar yoluyla alıcıdaki ısı transfer akışkanına ısı aktarılmıştır. Merkezi alıcılar, yüksek sıcaklıkların üretilmesi için çok etkili bir sistem olarak kabul edilmiştir (Shatnawi vd., 2018).

Şekil 3'te gösterildiği gibi, merkezi alıcı sistemler güneşi iki eksen mekanizması ile izlemektedir. Bu sistemlerde, bir kule etrafına konumlanan çok sayıda bilgisayar destekli ayna (helyostat) kullanılmaktadır. Helyostat alanlarındaki aynalar, güneş ışığını bir kulenin tepesinde sabit olan merkezi alıcıya doğru yansıtarak yoğunlaştırılmıştır (Gielen, 2012; Moukhtar vd., 2021). Alıcı, yansıyan güneş ışınlarını absorbe ederek yüksek sıcaklık

seviyesinde ısıya dönüştürmektedir. Bu sistemlerde termal enerjiyi, geleneksel elektrik santrallerinde olduğu gibi elektrik enerjisine dönüştürebilen bir güç dönüştürme sistemi kullanılmıştır. Bu sistem ile lineer odaklama sistemlerine kıyasla daha yüksek yoğunlaştırma oranları elde edilmekte ve aynı zamanda termal alıcıların daha düşük kayıplarla yaklaşık 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmasını sağlamıştır (Moukhtar vd., 2021).



Şekil 3. Kaliforniya'daki merkezi alıcı tesisi (Mendelsohn vd., 2012)

1.3.4. Parabolik Çanak Tipi Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Parabolik çanak yoğunlaştırıcı, güneş enerjisini çanağın odak noktasında bulunan bir alıcıya yoğunlaştırarak güneşi iki ekseninde izleyen nokta odaklı bir toplayıcıdır. Çanak yapısı, ışını termal alıcıya yansıtmak için, güneşi tam takip etmesi gerektiği belirtilmiştir. Bir Eurodish (Çanak/Stirling) parabolik çanak tipi yoğunlaştırıcı fotoğrafı Şekil 4'te gösterilmektedir. Alıcı, ışıyan güneş enerjisini absorbe ederek, onu ısı transfer akışkanı bir sıvıda termal enerjiye dönüştürmüştür. Termal enerji, daha sonra doğrudan alıcıya bağlı bir motor-jeneratör kullanılarak elektriğe dönüştürülmüştür veya borular aracılığıyla merkezi bir güç dönüştürme sistemine taşınmıştır. Bu tip yoğunlaştırıcının ana kullanımı parabolik çanak motorlar olduğu belirtilmiştir. Parabolik çanak motor sistemi, elektrik üretmek için ham petrol veya kömür yerine güneş ışığını kullanan bir elektrik jeneratör olduğu belirtilmiştir. Merkezi bir güç dönüştürücüsünden elektrik üreten parabolik çanak sistemler, absorbe edilen güneş ışığını her bir alıcıdan toplayarak, bir ısı transfer sıvısı yoluyla güç dönüştürme sistemlerine aktarılmıştır. Isı transfer akışkanını yoğunlaştırıcı alanları boyunca

dolaştırma ihtiyaçı, boru yerleşimi, pompalama gereksinimleri ve termal kayıplar gibi tasarım sorunları meydana gelmiştir (Kalogirou, 2014).

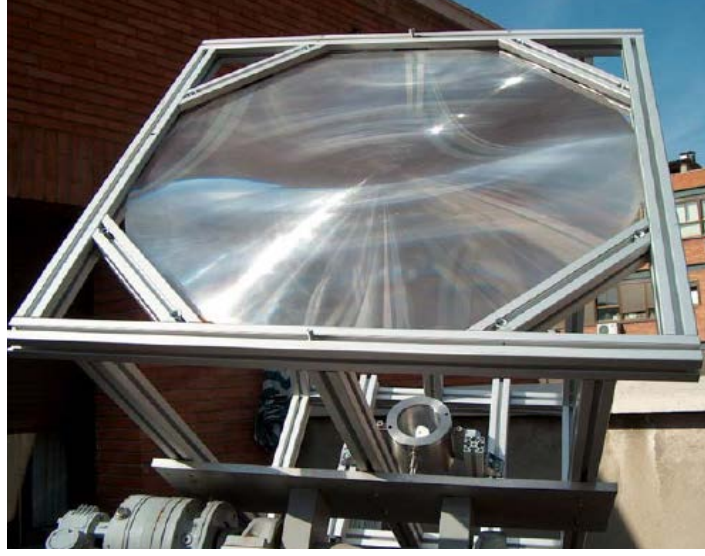


şekil 4. Eurodish parabolik çanak yoğunlaştırıcısının bir fotoğrafı (URL-1, 2022)

1.3.5. Noktasal Fresnel Lens Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Fresnel lens kurulumu ile elde edilen yüksek güneş enerjisi yoğunlaştırıcısı sayesinde çeşitli metalik malzemelerin yüzey işlemleri yapılmıştır. Bu sistem, çok yüksek sıcaklık (1500–2000 K) işlemlerinde yoğunlaştırılmış güneş enerjisini uygulamak için çok faydalı bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Bu sıcaklıklara birkaç saniye içinde ulaşılmıştır ve malzeme ısı işlemleri genellikle birkaç dakika içinde tamamlanmıştır (Sierra ve Vazquez, 2005).

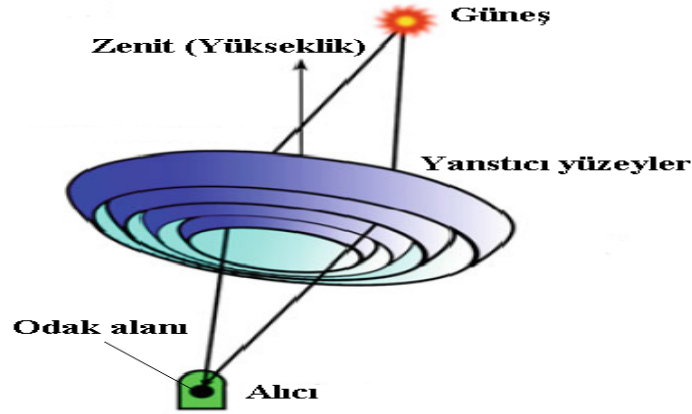
İşpanyadaki Ulusal Metalürji Araştırma Merkezinde (National Center for Metallurgical Research-CENIM) kurulan bir Fresnel lens sistemi, şekil 5’te görüldüğü gibi bir reaksiyon odası ile tasarlanmıştır. Bu reaksiyon odası paslanmaz elik malzemeden silindirik şeklinde yapılmıştır. Fresnel lensten gelen yoğunlaştırılmış güneş radyasyonu bir kuvars camdan geçerek reaksiyon odasına girmiştir. Numuneler, odanın içinde odak mesafesinde bulundurulmuştur. Reaksiyon odalarının, atmosferi kontrol etmek için gaz giriş ve çıkışına sahip olduğu belirtilmiştir (Sierra ve Vazquez, 2005).



Şekil 5. CENIMS'te kurulan bir Fresnel lens görüntüsü (Sierra ve Vazquez, 2005)

1.3.6. Halka Dizisi Tipi Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri

Halka dizisi yoğunlaştırıcılar, geleneksel Fresnel lenslere benzer şekilde ve parabolik çanak yüzeyinin dairesel şeklinde kesilmesiyle oluşan konik halka tipi yansıtıcı yüzeylerden oluşturulmuştur (Karathanasis, 2019). Şekil 6'da alıcının yansıtıcı halka yüzeylerin altında olması durumunda, Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcıların esas çalışmasını gösteren şematik görüntüsü verilmektedir.



Şekil 6. Halka dizisi yoğunlaştırıcı sistemin şematik görüntüsü (Karathanasis, 2010)

Parabolik çanak teknolojisinde ışıının odak noktası, yoğunlaştırıcının önünde olurken, halka dizisi yoğunlaştırıcılarda ise odak noktası yoğunlaştırıcının arkasında veya aşağısında oluşturulmuştur. Bu durum, gölgeleme sorununu, alıcının boyutu ve şekli üzerindeki tüm

sınırlamaları ortadan kaldırmaktadır. Buna ek olarak bu sistem ile alıcı güneş fırınları için, daha fazla tasarım esnekliği, montaj kolaylığı ve güneş takip sistemi için daha kolay hareket takibi gibi avantajlar sağlanabilmektedir.

Halka dizisi yoğunlaştırıcılar, diğer bazı yoğunlaştırıcılara göre, yüksek yoğunlaştırma oranına, yüksek optik performansa, yüksek ışın izleme özelliğine ve modüler ve kompakt tasarıma sahiptir. Ayrıca halka dizisi yoğunlaştırıcılar, güneş enerjisini çeşitli uygulamalarda verimli ve ekonomik bir şekilde kullanarak, yenilenebilir enerji teknolojilerinin ilerlemesine katkıda bulunacaktır.

1.4. Enerji Depolama Sistemleri

Enerji, bir depolama ortamı içerisinde enerjinin kimyasal, elektriksel veya termal sistemler gibi farklı formlarda depolanmaktadır. Tablo 1’de verilen genel enerji depolama yöntemleri 5 grup halinde sınıflandırılmıştır (Dinçer ve Rosen, 2011).

Tablo 1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması (Dinçer ve Rosen, 2011)

Enerji depolama yöntemleri				
Mekanik	Kimyasal	Biyolojik	Manyetik	Termal
Hidrolik, Sıkıştırılmış hava, Volanlar	Elektrokimyasal batarya, Organik molekül depolama	Glikojen, Nişasta	Süper İletken, Kapasitör	Duyulur ısı depolama, Gizli ısı depolama, Termokimyasal

1.4.1. Mekanik Yöntemler ile Enerji Depolama

Mekanik enerji, doğrusal veya dönme hareketinin kinetik enerjisi olarak, yükseltilmiş bir nesnede potansiyel enerji olarak, elastik bir malzemenin sıkıştırma veya gerinme enerjisi olarak ve bir gazda sıkıştırma enerjisi olarak depolanmaktadır. Büyük miktarlarda enerjiyi doğrusal hareket halinde depolamak oldukça zordur. Bu durumda, sürekli olarak doğrusal depolama ortamının peşinden itilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ancak dairesel kinetik enerjisi depolamak oldukça basit olduğu belirtilmiştir. Mekanik depolamaya örnek olarak hidrolik depolama, basınçlı hava depolama ve volanlar verilmiştir (Dinçer ve Rosen, 2011).

1.4.2. Kimyasal Yöntemler ile Enerji Depolama

Enerji, farklı bileşikler oluşturmak için reaksiyona girdiklerinde enerji yayan veya enerji alan bir veya daha fazla kimyasal bileşikten oluşan sistemlerde depolanabilir. En çok bilinen kimyasal enerji depolama cihazı pillerdir. Piller (Batarya) enerjiyi kimyasal olarak depolar ve talep üzerine elektrik enerjisi olarak serbest bırakır. Bazı kimyasal depolama sistemleri termal olarak depolanır ve deşarj olur. Birçok kimyasal reaksiyon endotermiktir ve termal enerjinin emilmesiyle ilerler. Bir sistemin sıcaklığı belirli bir değerin altına düştüğünde, reaksiyon tersine çevrilerek normal reaksiyon sırasında sistemde depolanan enerji açığa çıkar. Böylece enerji, kimyasal reaksiyonların ısılarından yararlanılarak depolanır. Bu tür kimyasal depolama sistemleri, güneş termal uygulamaları için araştırılmaktadır. Fotosentez süreci, endergonik fotoreaksiyonların ışınım enerjisini depolanabilir kimyasal enerjiye dönüştürebildiğini göstermektedir. Biyolojik sistemler ile güneş enerjisinin dönüştürülmesi için bazı girişimler devam etmektedir (Dinçer ve Rosen, 2011).

1.4.3. Biyolojik Yöntemler ile Enerji Depolama

Biyolojik depolama, enerjinin biyolojik süreçler aracılığıyla kimyasal formda depolanmasıdır ve uzun süreler boyunca önemli bir depolama yöntemi olarak kabul edilmektedir (Dinçer ve Rosen, 2011).

1.4.4. Manyetik Yöntemler ile Enerji Depolama

Enerji bir manyetik alanda depolanabilir. Süper iletken malzemeleri kullanan bir program taslağı geliştirilme aşamasındadır. Mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda, bazı metallerin neredeyse hiç elektrik direnci yoktur ve bu nedenle büyük akımlar neredeyse hiç kayıp olmadan içlerinde dolaşabilmektedir. Manyetik depolama iki ana amaç için düşünülür. İlk olarak, (1000–10.000 MWh) aralığında elektrik depolayabilen büyük süper iletken mıknatıslar, elektrik santrali merkezleri için yük dengeleme cihazları olarak daha elverişli ve ekonomik olabilmektedir. İkincisi, yaklaşık 10 kWh aralığında depolama kapasitelerine sahip daha küçük mıknatıslar, kısa vadeli müşteri taleplerini ve üretim onanım özelliklerini

daha iyi karşılamak için, iletim hattı yüklerini azaltmada kullanılmaktadır (Dinçer ve Rosen, 2011).

1.4.5. Termal Enerji Depolama Sistemleri

Termal enerji, bir maddenin sıcaklığını yükselterek veya düşürerek (duyulur ısı), bir maddenin fazını değiştirerek (gizli ısı) veya ikisi birlikte depolanabilmektedir. Bir malzemedeki duyulur ısı değişimleri, özgül ısı kapasitesine ve sıcaklık değişimine bağlıdır. Gizli ısı değişimleri, saf bir malzemenin faz değişimi ile ilişkili ve sabit bir sıcaklıkta meydana gelen ısı etkileşimleridir. Malzemelerin karışım (örneğin inorganik tuz karışımı) olduğu durumda ise faz değişimi süresince bir sıcaklık artışı meydana gelmektedir (Wu vd., 2017). Duyulur ısı depolama sistemleri genellikle depolama ortamı olarak kayaları (kaya, çakıl, tuğla ve seramik) ve ısı transfer akışkanı olarak suyu kullanır. Gizli ısı depolama sistemleri, çeşitli faz değiştiren malzemeleri kullanabilirken genellikle malzeme katıdan sıvı faza geçerken ısı depolanmaktadır (Dinçer ve Rosen, 2011).

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri (Concentrate Solar Power-CSP), foto voltaj (PV) ve rüzgâr enerjisi sistemlerinden sürekli faydalanılabilmesi için, kullanılan mevcut batarya tipi depolama sistemlerinden çok daha düşük maliyetle enerjinin termal olarak depolanması sağlanabilir. Günün 24 saati kesintisiz enerji kullanılabilmesi için, termal enerji depolama (TED) yönteminin, özellikle kesintili güç sistemleri ile birlikte kullanılması oldukça önemli hale gelmektedir.

İ- Enerji Depolama Sistemlerinin Avantajları

Enerji depolama sistemleri, bir çok farklı enerji sistemleri ve teknolojileri üzerinde avantajları vardır. Bunlar, enerji üretiminde işletim performansını artırır ve enerji tüketim esnekliğini sağlar. Depolama sistemleri güneş ve rüzgar gibi kesikli enerji kaynaklarının en büyük dezavantajı olan günün her saatinde elektrik üretememe sorununu azalttığından dolayı, bu kaynakların enerji üretimindeki payının artmasını sağlayarak, karbon salınımının düşürülmesine büyük katkı sağlar. Ek olarak bu sistemler, enerji arz ve talep periyotları arasındaki uyumsuzluğu düşürür. Enerji üretim sistemlerine ekonomik açıdan çok büyük katkı sağlayarak, santrallerin başlangıç ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlar. Bazı durumlarda depolama sistemleri atık enerjiyi geri sisteme kazandırdığından, enerji

sisteminin verimini artırır ve daha fazla yakıt kullanımının önüne geçebilir. Dağınık enerji üretiminde, talep çevrimlerinde değişikliklerin yol açtığı sistem emniyeti, ayarlanabilirlik ve dayanıklılık gibi sorunları azaltır. Ayrıca enerjinin sürdürülebilirliğini artırır. Enerji sistemlerinin verimini ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırdığından dolayı, iklim değişikliğinin zararlı etkilerini de azaltır (Leblebicioğlu, 2022).

İİ- Enerji Depolama Sistemlerinin Dezavantajları

Depolama sistemlerinin birçok avantajı olsa da, bazı dezavantajlarına bağlı olarak günümüzde hala istenilen düzeyde yaygınlaşamamıştır. Enerji depolama sistemlerinin bazı dezavantajları ise şunlardır: Enerjinin bir formdan başka bir forma dönüştürülüp depolanması verim kaybına yol açmaktadır. Bunun yanında depolama sistemlerinin enerji sistemlerine entegrasi yüksek oranlarda yatırım maliyeti gerektirmektedir. Yüksek güçlü enerji sistemlerine genellikle pompalanmış su ve sıkıştırılmış hava ile enerji depolaması entegre edilmektedir (Leblebicioğlu, 2022).

1.5. Literatür Taraması

Tez çalışması boyunca yapılan literatür araştırmaları ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile termal enerji depolamada kullanılan yöntemlerin bazıları aşağıda verilmektedir.

Parabolik oluk projelerinde, alıcı olarak genelde termal yağ kullanımının yanında erimiş tuz kullanılmakta iken, ısı depolamada ise genelde erimiş tuz kullanılmıştır. Örneğin, kapasitesi 250 MW (Solana Generating Station CSP) ve kapladığı alan 2,2 milyon m² olan, alıcı olarak termal yağ kullanılması durumunda ısı depolama süresi 6 saat ve odak sıcaklığı 393 °C üzerine çıkmıştır. Alıcı olarak tuz kullanılması durumunda örneğin kapasitesi 50 MW (Shenzhen Jinfa Akesai CSP) ve kapladığı güneş enerjisi alanı 2,5 milyon m², odak sıcaklığı 550 °C ve depolama süresi ise 12-15 saat aralığında belirlenmiştir (URL-2, 2021).

İki farklı ortamlı ısı depolama birimine olan ihtiyacı ortadan kaldıran tek tanklı ısı depolama teknolojileri, tüm tesisin maliyetini geleneksel iki tank teknolojisine kıyasla düşürmüştür (Reilly ve Kolb, 2001).

Parabolik oluk tipli “Solar Two” projesi, iki tanklı erimiş tuz sistemini esas almıştır. Üç farklı sıvı (termal yağ, erimiş tuz, buhar) döngüsünü içeren dolaylı bir sistem tasarlanmıştır. Termal yağ ve erimiş tuz arasındaki ısı transferi süreçleri nedeniyle, erimiş

tuzdaki döngüsel sıcaklık farkı yaklaşık 85 K'e düşürülmüştür. Bu durumda yaklaşık 70 kWh/m³ gibi bir hacimsel depolama kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca İspanyada kurulu olan Andasol tesislerinde dolaylı bir ısı depolama sisteminde, erimiş tuz döngüsü ile güneş kollektörleri alanından gelen sentetik yağ döngüsü arasında ısı geçişi sağlanmıştır. Bu tesisin termal kapasitesi 1010 kWh olmasının yanında sıcak ve soğuk erimiş tuz rezervuarı arasında yaklaşık 90 K'lık sıcaklık farkı oluşmuştur. Dolayısıyla 50 MW elektrik gücüne sahip bu tesisin depolamaya dayalı çalışması için, yaklaşık 7,5 saat boyunca 28.000 ton güneş tuzuna ihtiyaç olduğu belirtilmiştir (Lovegrove ve Stein, 2021).

Alıcı ve ısı depolama için, erimiş tuz kullanan kapasitesi 50 MW olan Lanzhou Dacheng Dunhuang Fresnel projesi, sıcaklık aralığı (290-550) °C ve yaklaşık 15 saat ısı depolama kapasitesine sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu lineer fresnel projesinden daha küçük kapasiteli olan Augustin Fresnel 1 projesinde ise alıcı olarak su kullanan ve 300 °C'de sıcaklıkta çalışan su buhar döngüsü ile 0,3 MW güç çıkışı elde edilmiştir ve 0,25 saat ısı depolama yapılabilmektedir. Erimiş tuz depolayan ve ticari olarak mevcut olan merkezi alıcıların (5 MW kapasiteli CRS Sales CPS Project ve 110 MW kapasiteli Atamaca 1/Cerro Dominador, Crescent Dunes Solar Energy Project) çalışma sıcaklıkları 290-565 °C olan ve projenin kapladığı alanlar ise (10560-1484000) m² arasında değiştiği belirtilmiştir (URL-2, 2021).

Parabolik çanak tipi sistemler ile elde edilen termal enerji üzerinde yapılan birçok araştırma bulunmaktadır. Bunlardan birinde, iki aşamalı (iki kez yoğunlaştırılan) 1,2 m çaplı parabolik çanak tipi sistemlerinde ısı depolamak için, solar tuz eritme işleminde yaklaşık 2,5 saatte 260 °C sıcaklığa ulaşılmıştır (Foong vd., 2011).

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisiyle metal ergitme alanında yapılan bir deneysel çalışmada, tek aşamalı 1,42 m çapa sahip parabolik çanak ile bir güneş fırınında ortalama odak sıcaklığı 750 °C elde edilmiştir. Alüminyum, çinko ve kurşun gibi metallerin ergitilmesi sağlanmıştır (Özcan, 2015). Güneşli bir günde yapılan deneylerde sıcaklık ve ışınlam ölçümlerine bağlı olarak fırının enerji analizleri yapılmıştır. Parabolik çanak tipi yoğunlaştırıcı ve güneş fırınından oluşan sistemin verimi, yaklaşık olarak %46 bulunmuştur. Ayrıca alüminyum ergitme işlemi için, toplam güneş enerjisi termal dönüşüm verimi %22 hesaplanmıştır (Demirtaş ve Özcan, 2021).

Erimiş tuz depolamalı parabolik çanak tipi bir yoğunlaştırıcı sistem 0,4 MW kurulum kapasitesine sahip ve ısı depolama gücü ise analitik yöntem ile yaklaşık olarak 0,1 MW olduğu belirtilmiştir (Li vd., 2013). Ayrıca yoğunlaştırıcı kapasitesi 1,5 MW gücünde olan

Maricopa Solar Projesi ve Tooele Army Depot projeleri Stirling motoru ile uygun çalışma sıcaklık aralığı (800-1100) °C olduğu belirtilmiştir (Alaphilippe vd., 2007; Howard and Harley, 2010; Cui vd., 2014; Zayed vd., 2021; URL-2, 2021).

Fresnel lens ile kullanılan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi uygulamalarında görüntülemeli (imaging) ve görüntüsü olmayan (non-imaging) sistemler üzerinde literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Görüntülemeli ve görüntüsü olmayan sistemler karşılaştırılırsa, dış bükey şeklindeki görüntüsü olmayan sistemler daha az hacim, daha kısa odak uzaklığı, daha yüksek yoğunlaştırma oranı ve daha yüksek optik verimlilik gibi avantajlara sahip olduğu belirtilmiştir (Xie vd., 2011).

Tek aşamalı (bir kez yoğunlaştırılan) güneş enerjisi yoğunlaştırma sistemi üzerinde yapılan literatür araştırmaları aşağıda sunulmaktadır.

Literatürdeki bu çalışmada, güneş ışını yoğunlaştırma sistemi çok katlı, iç içe geçmiş bir yansıtıcı içbükey yüzey kümelerinden oluşturulmuştur. Halka elemanların yansıtıcı yüzeyleri değişken eğim ve eğriliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Yansıtma elemanları, hem gelen güneş ışınlarını hem de yoğunlaştırılmış ışınların karşılıklı olarak taranmasını önleyecek şekilde eş eksenli olarak yerleştirilmiştir. Odak bölgesine, halka dizisi yoğunlaştırıcının arka kısmında ve yeterince uzak olan bir alıcı yerleştirilmiştir. Böylece sistem, mercek benzeri bir fonksiyon sağlamıştır (Vasylyev vd., 2002).

Halka dizisi yoğunlaştırıcı kullanılarak 1000 üzeri yoğunlaştırma yapılarak, akı homojenliği ile yeni bir yüksek yoğunlaştırıcı foto voltaj modülü oluşturulmuştur (Vasylyev vd., 2010).

Düşük maliyetli noktasal odaklı yoğunlaştırıcıların imalat ve montaj hataları, optik ve işaretleme hatalarına neden olduğu belirlenmiştir. Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcılarda, tasarım sorunlarından biri olan odak noktasındaki yayılmanın azaltılması ve yoğunlaştırma oranının optimize edilmesi ile hataların azaltılacağı vurgulanmıştır (Mouzouris vd., 2012).

Garcia ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada ise, bir halka dizisi yoğunlaştırıcısı, Zemax programı ile güneş akısı modellenmiştir. Ayrıca ANSYS programı ile ışın alıcıları sıcaklık açısından modellenmiştir. Işın toplama alanı $3,14 \text{ m}^2$ olan, iki yoğunlaştırma sistemi (Halka dizisi ve Parabolik ayna) sayısal olarak, neredeyse aynı güneş akısına (16 W/mm^2) ve 3800 K eşdeğer sıcaklığa ulaşmıştır. Küresel bir ışın alıcı halka dizisi yoğunlaştırıcı odağında beş farklı yönden ışınlar maruz bırakılmıştır. Halka dizisi yoğunlaştırıcı yoğunlaştırma oranı, parabolik aynadan 3,53 kat daha fazla olduğundan dolayı termal ve optik verime önemli ölçüde katkı sağlamıştır (Garcia vd., 2019). Benzer bir

çalışmada halka dizisi yoğunlaştırıcı, yedi eş merkezli parabolik yansıtıcı halkadan ve merkeze yerleştirilen bir Fresnel mercekten oluşturulmuştur. Bu model, halkaların genişliği ile tamamlanan ve her bir halka yüksekliğinin değiştirilmesine izin veren yeni bir halka yüksekliği değiştirici parametresi ile bütünleştirilmiştir (Garcia vd., 2021).

Kasaeian vd. tarafından yapılan çalışmada, silindirik, yarım küre, konik ve düz kenarlı helisel alıcılar detaylı olarak incelenmiştir. Alıcı giriş çalışma sıcaklığı 200 °C, konik şekilli alıcı ile termal verim yaklaşık %70, ekserji verimi %30 ve optik verim yaklaşık %87 olarak elde edilmiştir (Kasaeian vd., 2021).

Tiburcio vd. tarafından yapılan çalışmada, halka dizisi yoğunlaştırıcının çapı 1,5 m olup, 1,76 m²'lik etkin bir güneş radyasyonu sayesinde Fresnel merceğin merkezinden 0.89 m uzakta ve 5 mm genişliğindeki bir alana odaklandırılmıştır. Bu sistemler heliostat-parabolik ayna sisteminden farklı olarak lazer başlığı montajı sayesinde gölgelenme alanı oluşturmamıştır. Işınlardan kristal silindirik çubuğa daha fazla yoğunlaştırılması için bir asferik kaynaşmış silika lens kullanılmıştır (Tiburcio vd., 2018).

Yoğunlaştırılmış güneş ışınlarına alternatif olarak, laboratuvar ortamında kullanılan bir eliptik reflektörlü kızılötesi (infrared) ışınlarının odaklanması ile yüzey ısıtma endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Eliptik bir reflektör kullanarak odaklanan infrared ısıtmanın analizi için, ısı akısı dağılımını dikkate alan termal bir modelleme yapılmıştır (Lee vd., 2014).

Termal enerji depolama ile ilgili yapılan literatür araştırmaları aşağıda verilmektedir. Dağıtılabilirlik ve toplanabilirlik olarak iyi bir potansiyele sahip olan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, tüm farklı alternatifler yenilenebilir enerjiler arasında çok etkili bir enerji üretim sistemi haline gelmiştir. Bu durum ise verimli ve uygun maliyetli bir ısı depolama sistemi ile mümkün olduğu belirtilmiştir (Gil vd., 2010).

Termal enerji depolama (TED), yeni nesil enerji santrallerinin önemli bir bileşeni olacağı vurgulanmıştır. Bu santrallerin gündüz ve gece saatlerinde güvenilir ve sürekli enerji sağlamaları gerekeceği belirtilmiştir. TED ile ilgili olarak, yüksek sıcaklıkta kararlı olan, ısı kapasiteleri ve çoklu faz değişiklikleri nedeniyle depolanan enerji yoğunluğu artırılmıştır. Dolayısıyla yeni tip ısı transfer sıvıları ve ısı depolama malzemelerine gerek duyulacağı belirtilmiştir (Glatzmaier, 2011).

Duyulur ısı depolama, sıvı veya katı depolama ortamı (su, kum, erimiş tuzlar veya kayalar) ısıtılarak veya soğutularak termal enerji depolamayı esas alan basit bir yöntemdir. Yeraltı termal enerji depolama sistemi, enerjinin sıcak veya soğuk olarak depolandığı ve

ortam olarak toprak, kum, kaya ve kil kullanılan yaygın bir enerji depolama teknolojisi olduğu belirtilmiştir. Bu sistemde 100 °C'nin üzerindeki ısı depolama uygulamalarında yağlar, erimiş tuzlar ve sıvı metaller kullanılmıştır (Sarbu ve Sebarchievici, 2018).

Gizli ve duyulur ısı depolama yöntemlerine literatürden birçok uygulama sunulmaktadır. Bunlar; çoklu ve tekli tüp modelleri (Trp, 2005; Morisson vd., 2008), silindir tipi model ve boru tipi modeli (Han vd., 2017; Seddegh vd., 2018), silindirik kapta sarmal tüplü veya çift sarmal tüplü modeller (Zheng vd., 2018), çok kanallı tek tüplü modeller olduğu belirtilmiştir (Shrivastava ve Chakraborty, 2019).

Isı depolama yöntemleri üç çeşit olup, depodaki ısı eşanjörü ile toplu depolama, makro ve mikro kapsülleme olarak tanımlanmıştır. Isı depolamada yaygın olarak kullanılan farklı yaklaşımlar ise, yüksek iletkenli parçacıkların kullanılması, metal yapılar, faz değiştiren malzeme (FDM) yanında fiber kullanma, doğrudan temaslı ısı eşanjörleri ve döner silindirik yöntemlerin olduğu vurgulanmıştır. Termal enerji depolama sistemlerinin FDM kullanılarak uygun şekilde tasarlanması, FDM'deki ısı transferi ve faz değişimi süreçleri hakkında literatürde detaylı bilgiler verilmiştir (Regin vd., 2008).

Makro kapsülleme, bir tüp, küre veya silindirin içine bir FDM dâhil edilmesinden oluşturulmuştur ve yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Mikro kapsülleme ise, çok ince cidarlı ve yüksek molekül ağırlığına sahip polimer küre içerisindeki (çapı 1 mm'den küçük) faz değiştiren kimyasal bir madde ile oluşturulmuştur. Ayrıca TED maliyetinin önemli bir unsuru olan ısı depolama malzemesinin, etkili bir ısı yalıtımının olması gerektiği belirtilmiştir (Sarbu ve Sebarchievici, 2018).

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile döner fırın teknolojisi yardımıyla termal ve termokimyasal işlemler yapılmıştır. Ayrıca döner fırınlar, yüksek sıcaklıkta ileri güneş uygulamalarını gerçekleştirmek için uygun cihazlar olarak görülmüştür (Alonso vd., 2017).

Agyenim ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, FDM kaplarının geometrisi, yapılandırılması, ısı transfer sıvısının giriş sıcaklığı ve kütleli debi gibi parametrelerin etkileri bu çalışmada incelenmiştir. Faz değişimi problemleriyle ilgili araştırmaların çoğu, evsel ısıtma/soğutmaya uygun (0–60) °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Yaygın olarak çalışılan FDM'ler, parafinler, Glauber tuzları (kristal sodyum sülfat), balmumu, stearik asit ve n-okta dekan olduğu belirtilmiştir (Agyenim vd., 2010).

Kenisarin tarafından, (120-1000) °C sıcaklık aralığında bir güneş enerjisi ile termal depolama için, yüksek sıcaklık FDM'lerin araştırılması ve geliştirilmesi incelenmiştir. Potansiyel ısı depolama tuzu bileşimlerinin ve metal alaşımlarının termofiziksel özellikleri

bu literatür çalışmasında verilmiştir. Tekrarlanan erime ve katılaşma döngüleri sırasında bazı ısı depolama malzemelerin uzun süreli kullanım özelliklerine ilişkin veriler analiz edilmiştir (Kenisarin, 2010).

Tiryaki tarafından yapılan bir çalışmada, taşıyıcı akışkan olarak eriyik tuz kullanan iç bükey ısı alıcılı bir güneş kulesi sisteminin literatürden alınan parametreleri kullanılarak enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Analiz için gerekli olan denklemler Matematica adlı program yardımı ile elde edilerek, Matlab'ta yazılan bir program yardımıyla çözülmüştür (Tiryaki, 2017).

İnorganik faz değişimi malzemelerinin kullanımı ile ilgili literatürde bulunan birçok araştırma mevcuttur. Peng ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, üçlü nitrat tuzları ile karşılaştırıldığında, Potasyum Nitrat, Sodyum Nitrit, Sodyum Nitrat ve %5 katkı maddesinden oluşan erimiş tuzlar, daha yüksek sıcaklıkta termal kararlılığa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Optimum çalışma sıcaklıklarını 500 °C'den 550 °C'ye çıkaran %5 katkı maddesi içeren erimiş tuz, daha düşük donma noktasına ve daha yüksek faz değişimi gizli ısısına sahip olduğu belirtilmiştir (Peng vd., 2010).

Turchi ve arkadaşları, 600 °C'de tek bileşenli nitrat tuzları, 650 °C'de alternatif olarak karbonat klorürlü tuzların ve solar tuzun (ağırlıkça %60;40, NaNO₃;KNO₃) doğrudan depolanarak kullanılması araştırılmıştır. Süper kritik CO₂ için Brayton döngüsünde kullanmak için gerekli olan ısı, tuzların depolanması yardımıyla elde edilmiştir (Turchi vd., 2018)

Bauer ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 100 bar basınçta su-buhar fazı değişimini 310 °C'lik bir sıcaklıkta gerçekleştirmek amacıyla, gizli ısı depolaması için faz değiştiren madde (FDM) olarak Sodyum Nitrat (NaNO₃) kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada Sodyum Nitrat eriyiğindeki Nitrit oluşumunun FDM kullanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Bauer vd., 2009).

Khare vd. tarafından, termal enerji depolama için potansiyel FDM ortamını belirlemek için çok amaçlı bir optimizasyon yöntemine dayalı bir malzeme seçim yazılımı kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıkta (400-750) °C aralığındaki gizli ısı depolama uygulaması için, Al, Mg, Si ve Zn gibi ikili ve çok bileşenli sistemlerde belirli ötektik bileşimler kullanılmıştır. Özellikle %88 Al - %12 Si ve %60 Al - %34 Mg - %6 Zn metal alaşımlarının bir FDM için üstün özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir (Khare vd., 2012).

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ve termal enerji depolama sistemlerinde nitratlı erimiş tuzlar, duyulur ısı depolaması ve gizli ısı depolaması için kullanılabilir. KNO₃ ve

NaNO_3 tuzları, bunların ötektik (ağırlık yüzdeleri %45,67 NaNO_3 ; %54,33 KNO_3) ve Solar tuzu (ağırlık yüzdeleri %60 NaNO_3 ; %40 KNO_3) karışımlarının yüksek sıcaklık özellikleri, katı ve sıvı rejimlerinde kütle yoğunlukları, entalpileri, termal genleşme katsayıları, izotermal sıkıştırılması ve sıvı fazdaki c_p ve c_v özgül ısıları literatürde analiz edilmiştir (Dinçer ve Rosen, 2011; D'Aguanno vd., 2018).

Erimiş klorür tuzları, ısı depolama ve ısı transfer sıvısı olarak kullanılırken, diğer erimiş nitrat tuzu karışımlarına kıyasla daha düşük fiyatlara sahip olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, klorür tuzları ile temas halindeki yapısal malzemelerin şiddetli korozyonuna ve yüksek sıcaklıklarda (800 °C) termal kararlılığa sahip olması bazı uygulamalarda kullanılması sınırlandırmıştır. Ayrıca klorür tuzu ve karışımlarının erime noktası, buhar basıncı, ısı kapasitesi ve birim maliyetleri gibi özellikleri detaylı olarak bu literatürde sunulmuştur (Ding vd., 2019).

Bonk ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, laboratuvarında sentetik hava koşulları altında 560 °C sıcaklıkta depolanabilen solar tuz, nitrat ve nitrit içeriğinin zaman içinde nispeten sabit kalmasıyla birkaç gün içinde kolayca dengeli hale gelmiştir. Bir nitrojen atmosferi, Nitratın Nitrite sürekli olarak indirgenmesi nedeniyle bozunmayı artırmıştır. Ayrıca açık bir atmosferde, erimiş nitratların atmosferik CO_2 ile reaksiyonu nedeniyle CO_2 oluşumu belirginleşmiştir (Bonk vd., 2017).

Vaka vd. tarafından, farklı oranlarda ikili sistemin $(\text{Al}(\text{NO}_3)_3)-(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2)$, diferansiyel taramalı kalorimetre ve termogravimetrik analizleri kullanılarak termal analizleri yapılmıştır. İkili tuz karışımının ötektik sıcaklığı 65 °C olarak belirleyerek sırasıyla bozunma sıcaklığı, özgül ısı, gizli füzyon ısısı ve termal kararlılıkları rapor edilmiştir. Bu ikili erimiş tuz karışımının (150-300) °C'de ortalama özgül ısısı (2,73-2,13) J $\text{g}^{-1}\text{K}^{-1}$ arasında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, çeşitli bileşimlerde alüminyum nitrat nonhidrat ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) ve bakır nitrat hidrattan ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) sırasıyla (60:40, 50:50, 55:45 ve 57,5:42,5) oluşturularak düşük erime sıcaklıklı tuz karışımları sentezlenmiştir (Vaka vd., 2020).

Chaleff vd. tarafından yapılan çalışmada, hem florür-tuz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörleri hem de erimiş tuz yakıtlı reaktörlerin, doğru ısı transferi analizleri için, tuzların ışıyım ile ısı transferi özelliklerinin gerekli olacağını ve yüksek sıcaklıklarda çalıştığı belirtilmiştir. Deneysel olarak bir çok tuzun yutunum katsayısı ölçülememiştir. Bu literatür çalışmasında çok sayıda erimiş tuzdaki fotoelektrik etkileşimlerden kaynaklanan yutunum katsayısını hesaplamak için Vienna Ab-Initio Simulation Package (VASP) programı kullanılmıştır. Ayrıca saf halojenür tuzları LiF, FLiNaK ve FLiBe'nin elektromanyetik

spektrumun geniş bir bölümünde, optik olarak açık berrak olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan, geçiş metali florür tuzu KF-ZrF_4 'ün büyük ölçüde opak olduğu gösterilmiştir (Chaleff vd., 2018).

Berdibek tarafınan yapılan çalışmada, bir ikili nitrat güneş tuzu karışımındaki ışığın zayıflama katsayısı (m^{-1}) (833-2500) nm dalga boyu aralığında ve (300-400) °C sıcaklık ölçülmüştür. Böylece geçirgenlik katsayısı, zayıflama katsayısı verileri bir Fourier Transform Infrared spektrometresi ve yarı saydam sıvılar için tasarlanan bir deney cihazı kullanılarak elde edilmiştir (Berdibek, 2015).

Bu literatür çalışmasında, yüksek sıcaklık uygulamalarında yutunum ve ısı transferi performansını karakterize etmek için optik özellikler gerekliliği vurgulanmıştır. Bu nedenle, 1 m derinlikte doğrudan yutulan güneş alıcı uygulamalarında saçılmayan yüksek sıcaklıktaki yarı şeffaf sıvıların yutunum katsayısını deneysel olarak belirlemek için bir yöntem geliştirilmiştir. Ağırlıkça %50 KCl; %50 NaCl ikili klorür erimiş tuz karışımı ve ağırlıkça %60 NaNO_3 ; %40 KNO_3 ikili nitrat erimiş tuz karışımında, 800 °C'ye kadar sıcaklıklarda yutunum katsayısını geniş bir spektral aralıkta ölçmek için kullanılmıştır. Termal ayrışmanın güneş enerjisinin %95'ini soğurmak için gereken sıvı derinliğini yaklaşık 1 m'den 0,25 m'ye düşürülüp tuzu opak bir yüzey emiciye dönüştürülerek ikili nitrat karışımının performansı geliştirilmiştir (Tetreault-Friend vd., 2017).

Faz değişim malzemesi ve ısı depolama malzemesi arasındaki korozyon etkileşimi üzerinde yapılan literatür araştırmaları aşağıda verilmektedir. Literatür araştırmalarından FDM sonucu olarak, sodyum nitrat, potasyum nitrat ve sodyum nitrit'ten oluşan ikili ve üçlü ötektik karışımlarının kullanılması hedeflenmiştir. Bu ötektik tuz karışımları, düşük erime noktasına sahip olması ve yüksek ısı kapasitesi nedeniyle seçilmiştir. Korozyon dirençleri bakımından aşağıdaki araştırmalarda da verildiği gibi yıllık korozyon oranları kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Isı depolama malzemelerinin inorganik erimiş tuzlar ile etkileşimi sonucu korozyon dirençleri ile ilgili yapılan birçok çalışma literatürde mevcuttur. Bu literatür çalışmasında, AISI 304 paslanmaz çeliğin (ağırlıkça %18 Cr, %8 Ni içeren) ısı transfer akışkanı olarak kullanılan Hitec tuzu (%53 KNO_3 ; %40 NaNO_2 ; %7 NaNO_3) ile korozyon davranışı incelenmiştir. Bu paslanmaz çelik üzerinde yapılan testlere göre yıllık korozyon oranı 0,01991 mm/yıl'dır (Ahmed, 2013).

Sridharan ve Allen tarafından yapılan çalışmada, erimiş tuzlar, yüksek kaynama noktaları, hacimsel ısı kapasiteleri ve termal iletkenliklerinden dolayı uzun süredir nükleer

enerji sistemleri için birincil soğutucular ve ısı transfer ortamı olarak kabul edilmiştir. Bu erimiş tuz korozyonuna uygun malzeme seçimi ve tuz kimyası kontrolü gerekliliği vurgulanmaktadır (Sridharan ve Allen, 2013).

Sarvghad tarafından, atmosferik hava altında yüksek sıcaklıklarda çalışan yeni nesil yoğunlaştırılmış güneş enerjisi tesisleri için koruma malzemesi olarak, ticari alaşımlar ile yüksek termal kapasiteli klorür karbonat ve klorür sülfat tuzların uygunluğu araştırılmıştır. Erimiş tuzlar içeren yüksek sıcaklık ortamlarında yaygın olarak kullanılan dört ticari alaşım; yumuşak çelik 1008, iki katlı çelik 2205, paslanmaz çelik 316 ve Inconel 601 süper alaşımlar olduğu belirtilmiştir (Sarvghad, 2018).

Sarvghad ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Inconel 601 ile ötektik $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ karışımı arasındaki etkileşim, termal enerji depolaması için incelenmiştir. Soğuk işlenmiş ve tavllanmış koşullarda alaşım davranışının karşılaştırılması sonucunda, tavlamanın daha az yerel alanı ile birlikte daha düşük bir korozyon oranına yol açtığı görülmüştür (Sarvghad vd., 2017a).

Sarvghad ve arkadaşları tarafından bir diğer çalışmada, Inconel 601 süper alaşım, termal enerji depolama için havada 700 °C sıcaklıkta $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$ ve $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ve 450 °C sıcaklıkta $\text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 'ün ötektik karışımları ile uyumluluk açısından incelenmiştir. Korozyon ölçümleri için, gelişmiş mikroskopik ve mikro analiz teknikleri ile birleştirilen elektrokimyasal ölçümler kullanılmıştır. Klorür-karbonat tuzunun klorür-sülfat tuz karışımına kıyasla yüzeydeki oksitlenmenin metal alaşım elementlerini çözme eğilimi daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Sarvghad vd., 2017b).

Tavakoli ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklıktaki (700-1000°C) alıcılarda ve ısı değiştiricilerde malzeme olarak kullanılan alaşımlar korozyona maruz bırakılarak, bu durum ısı transfer verimliliğinde bir azalmaya yol açarak sistemin dayanıklılığını etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, erimiş tuzlu ısı transfer sistemi ile temas halinde olan nikel esaslı bir alaşımın korozyon hızlarını ve mekanizmalarını tahmin etmek için bir korozyon modeli geliştirilmiştir (Tavakoli vd., 2016).

Depolama malzemeleri olarak çelik alaşımlar, termal enerji depolama sistemlerinde ekonomik kabul edilirken, erimiş klorürlerin, nitratların, karbonatların ve florürlerin ötektik bileşimi FDM olarak kullanılmıştır (Olson vd., 2009). Eklemek gerekirse çalışma sıcaklığına bağlı olarak düşük alaşımlı karbonlu çelikler, Cr-Mo çelikler ve Cr-Ni paslanmaz çelikler FDM ile birlikte kullanılmıştır (Bauer vd., 2013).

1.6. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması, öncelikle güneş enerjisinin gelecekte sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlisi olması bakımından çevreye ve enerji dönüşümüne katkı sağlayacaktır. Ayrıca ülkemizin kalkınmasına ve gelişmesine katkı sunacağı düşünülmektedir. Güneş enerjisinin ısıya dönüştürülmesi için, büyük termal enerji depolama üniteleri kurularak, endüstrinin termal enerji ihtiyacının karşılanması ve elektrik üretimi için gerekli olan enerji kaynaklarının oluşturulması sağlanacaktır. Bu tez çalışmasında, inorganik tuzlar ile ısı yoğunlaştırıcı sistemler birlikte kullanılarak gerekli termal enerji kaynağının sağlanması birinci esas amaçtır.

Yapılan bu tez çalışmasında; düşük, orta ve yüksek sıcaklık uygulamalarında (örneğin ortam ısıtması, elektrik üretimi, fırınlar gibi) güneş enerjisi sistemler ile duyulur ve gizli ısı depolama uygulamalarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Tezde, kule, çanak ve oluk tipi ısı depolamalı enerji santrallerinden farklı olarak, oldukça küçük boyutlarda halka dizisi yoğunlaştırıcı, güneş fırını ve ısı depolama tankı tasarlanarak, bu ünitelerden oluşturulan sistemin kullanılabilirliği ve uygulanabilirlik potansiyellerinin araştırılması diğer bir ana hedeflerdendir.

Bu tez çalışmasında sunulan sistemin, güneş fırınının yoğunlaştırıcı ile beraber hareket etmesi, zemine yakın olması, iş akışkanının pompalanma kolaylığı, güneş takip sistemi vb. uygulamalarda daha ergonomiklik sağlayacağı amaçlandı. Ayrıca bu çalışmada, halka dizisi yoğunlaştırıcılar, diğer yoğunlaştırıcılara göre yüksek yoğunlaştırma oranına, yüksek optik özelliğe, yüksek ısı izleme özelliğine ve modüler bir tasarıma sahip olması nedeniyle tercih edildi. Yine bu çalışmada özellikle yüksek ısı depolama kapasiteleri ve erime noktaları dikkate alınarak, belirli inorganik tuzların ısı depolamada kullanılması ele alındı. Enerji ihtiyacının sürekliliğinin sağlanması amacıyla güneş fırını, ısı depolama tankı ve ısı eşanjörü vasıtasıyla depolanan ısınn kullanım çevrimi ve ünitelerinin boyutlandırılması yapıldı. Halka dizisi yoğunlaştırıcısı güneş enerjisi ile bütünleşmiş güneş fırını ve ısı depolama tankı içinde helisel ısı değiştiricisi, FDM olarak inorganik tuzlar ve ısı transfer akışkanı olarak termal yağların birlikte kullanımı ilk kez bu tezde ele alınmış olup, literatürde böyle bir çalışmaya rastlanmadı. Bu doğrultuda yeni bir halka dizisi yoğunlaştırıcısı ile ısı depolama sistemi literatürdeki bu boşluğu dolduracağı amaçlanmaktadır.

Halka dizisi yoğunlaştırıcı (HDY) kullanılarak güneş ışınlarının düşey olarak aşağıya doğru tek bir bölgede odaklanmasıyla ergonomik kullanılabilen bir fırında ısı enerjisine

dönüştürülerek, bir faz değıştiren madde (FDM1 - ağırlıkça %53 KNO₃, %40 NaNO₂ ve %7 NaNO₃) olan inorganik Hitec tuzunda ısı depolama çalışması yapıldı. Işınların yoğunlaştığı odak noktasına yerleştirilen fırın halka dizisi yoğunlaştırıcının hareketini takip etmektedir. Ayrıca fırında depolanan ısı, termal yağın iş akışkanı olarak kullanılmasıyla, farklı bir faz değışim malzemesi (FDM2 - %32 Ca(NO₃)₂, %24 NaNO₃ ve %44 KNO₃) olan inorganik yeni Hitec XL tuzu bulunan bir tankta termal enerji depolanması incelendi. Bu çalışmanın özgün değeri, ilk defa tasarlanan boyutlarda ve imalatı yapılan yeni halka dizisi tipi güneş yoğunlaştırıcı, güneş fırını ve ısı depolama tankından oluşan entegre bir sistem ile, yüksek sıcaklıklarda termal enerji depolamanın sağlanması ve incelenmesidir. Bu amaçla tanıtılan ünitelerin ve beraber çalışma sisteminin performansları laboratuvarında kalibrasyon, deneysel, analitik ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı (HAD) sayısal yöntemler ile araştırıldı.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında sunulan Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı (HDY) ısı depolama yöntemine ait sisteminin çalışması ve sistemin tüm elemanlarının yapısı ve hesaplamaları aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, deneysel, analitik, sayısal HAD yöntemi ve kalibrasyon testlerini içeren dört bölümden oluşmaktadır.

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Deney Düzenekinin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı

Isı depolama yönteminde, sunulan bu sistemin en önemli parçası halka dizisi tipi yoğunlaştırıcıdır. Bu tez çalışmasında, halka dizisi yoğunlaştırıcılar yüksek yoğunlaştırma oranı, yüksek optik özelliği, yüksek ışınlama izleme özelliğine ve modüler ve kompakt tasarımına sahip olmasından dolayı tercih edildi. Yüksek yoğunlaştırma oranı sayesinde yüksek sıcaklıklara ulaşmak için, yoğunlaştırıcı halka tasarımı, halka yüzey eğimleri ve halkalar arasındaki mesafeler bir katı modelleme (Solidworks) programı yardımıyla oluşturuldu.

Yüzeye gelen ışınların yansıtılması, optik yansıma kanunlarına göre belirlenmiştir. Yaklaşık 10 mm'lik düz çizgiler ile parabolik eğri yüzeyler oluşturuldu. Ek olarak maksimum yüzey alanının kullanılması amacıyla yansıma durumlarına göre ve montaj kolaylığı düşünülerek halkalar arası mesafeler belirlendi.

İlk model olarak tasarlanan ve Tablo 2'de özellikleri verilen HDY1 sistemi, dış çapı 1,68 m olan 5 halkadan ve çapı 30 cm olan Fresnel lensten oluşmaktadır. Halka yüksekliği 200 mm olan HDY1 modelinin, toplam yoğunlaştırıcı yüzey alanı lens ile birlikte yaklaşık olarak 1,504 m² hesaplandı. Ayrıca halkaların odak uzunluğu, lensin odak noktası uzunluğuna eşitlenerek yoğunlaştırıcı yüzey eğriliği çizimleri gerçekleştirildi.

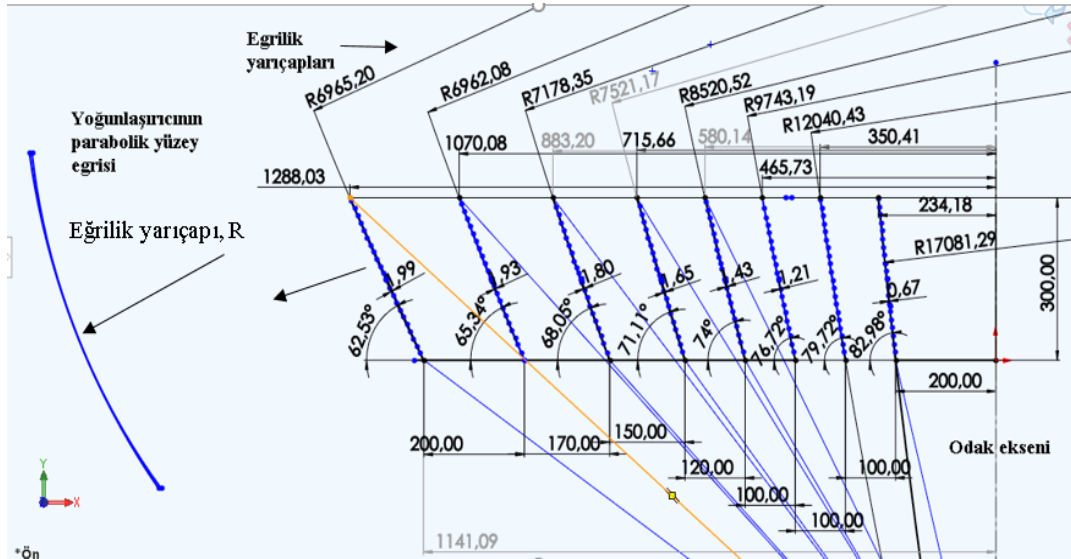
Bu tez çalışmasında esas alınan ve deneylerde kullanılan HDY2 modeli ise, halka dış çapı 2,576 m, halka sayısı 8 olan ve çapı 35 cm olan Fresnel lens eklenebilecek şekilde tasarımı oluşturuldu. HDY2 olarak adlandırılan modelin tasarım özellikleri Tablo 3'te verildi. Şekil 7'de ise HDY2 modelinin halka montaj açıları (örneğin 8'inci halka için 62,53°), halka üst ve alt yarıçapları, halka eğrilik yarıçapları, halka yüzeyi ortası eğim derinliği, halka yüksekliği boyutları verildi.

Tablo 2. Tasarlanan Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı-1 (HDY1) modelin özellikleri

Halka sayısı	Eğrilik yarıçapları (m)	Halka alt çap (m)	Halka üst çap (m)	Yüzey alanı (m ²)	Kenar açısı (°)
1.Halka	3,503	0,47	0,5876	0,0976	36
2. Halka	3,2576	0.610	0,7554	0,1542	43,2
3. Halka	3,1836	0,78	0,9503	0,23149	49,7
4. Halka	2,9378	1,04	1,242	0,3625	58
5. Halka	3,1788	1,44	1,68	0,588	66

Tablo 3. Tasarlanan Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı-2 (HDY2) modelin özellikleri

Halka sayısı	Eğrilik yarıçapları (m)	Halka alt çap(m)	Halka üst çap(m)	Yüzey alanı (m ²)	Kenar açısı (°)
1. Halka	17,081	0,4	0,4683	0,0466	14,04
2. Halka	12,04	0,6	0,7008	0,1034	20,56
3. Halka	9,743	0,8	0,9314	0,179	26,57
4. Halka	8,5205	1	1,1602	0,271	32,01
5. Halka	7,521	1,04	1,4313	0,401	37,78
6. Halka	7,1783	1,34	1,7664	0,587	43,91
7. Halka	6,962	1,68	2,1401	0,822	49,54
8. Halka	6,965	2,2821	2,5761	1,12	55,2



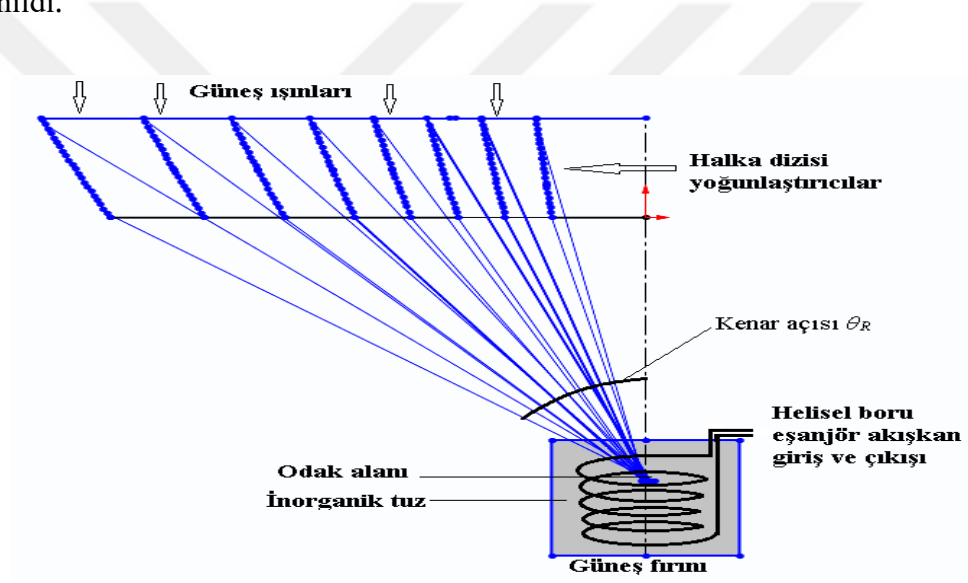
Şekil 7. Halka dizisi yoğunlaştırıcıların çizimleri ve boyutlarının görüntüsü

Halka sayısı ve odak mesafesi ile ilişkin olarak, odak mesafesi kısa olması durumunda halkaların yatay eksen ile olan açıları azaltılır. Bu durumda birim alana daha az halka

yerleştirilir. Bunun yanında halka yoğunlaştırıcıların kenar açısı ise artar. Sonuç olarak kenar açısının artmasıyla optik verimde azalma meydana gelir (Özcan ve Demirtaş, 2021). Her sistem için halka sayısı, yüzey alanı ve odak mesafesi optik verim açısından en uygun şekilde belirlendi.

Şekil 8’de halka dizisi tipi yoğunlaştırıcıya gelen ışınların fırın üzerindeki kuvars camdan geçerek inorganik tuzlara odaklanmasını gösteren iki boyutlu şematik görünümü verildi. Şekilde görülen kenar açısı (θ_R), son halka ile gelen ışının odak noktasında kesişmesi ile dikey eksen arasındaki açı olarak tanımlandı.

Bu tez çalışmasında güneş fırını, halka dizisi yoğunlaştırıcı ile birlikte hareket edecek şekilde tasarlandı. Böylece güneş ışınlarından maksimum seviyede daha uzun süre yararlanıldı.



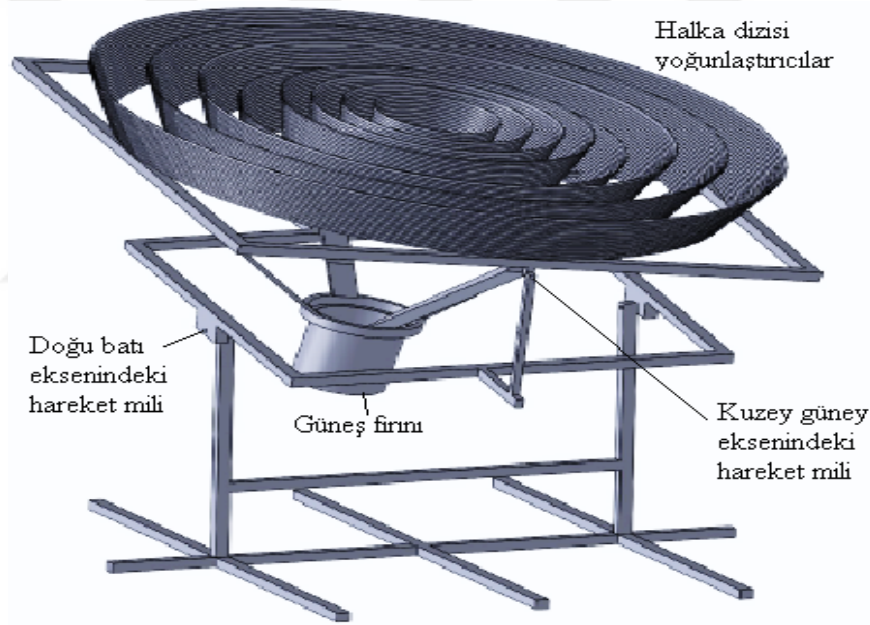
Şekil 8. HDY2 sisteminden fırına odaklanan ışınların iki boyutlu görünümü

2.1.2. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı Modeli Deney Düzenekinin Kurulumu

Yoğunlaştırıcıdan yansıtılarak yoğunlaşan güneş ışınları, fırın üzerine yerleştirilen kuvars camdan geçerek fırın içerisine girişi gerçekleştirildi. Böylece fırın içerisindeki inorganik tuzların eritilmesi sağlanarak en yüksek sıvı sıcaklığına ulaşılan kadar işlem sürdürüldü. Bu sayede fırında homojen bir sıcaklık elde edilerek fırın termal veriminin artırılması hedeflendi. Fırın sıcaklığı arttığında helisel boru eşanjördeki ısı transfer akışkanı aracılığıyla depolama tankına ısı geçişi sağlandı. Aynı zamanda fırından çıkan sıcak ısı transfer akışkanı bir eşanjörden geçirilerek direkt kullanıma sunuldu. Isı transfer akışkanı ısı kaybettiği için, belirlenen debideki yağ bir pompa yardımıyla tekrar fırındaki helisel boruya

aktarıldı. Böylece döngü tamamlandı. İlave olarak, fırın ve ısı depolama tankı dış yüzeyi ile tüm tesisat, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yalıtım malzemeleri (cam yünü) kullanılarak ısı kaybının azaltılması sağlandı.

Şekil 9’da, iki eksenli güneş takip sistemine uygun olarak tasarlanan modelin üç boyutlu (3B) montaj durumu görülmektedir. Solidworks 2018 programında çizilen tüm halkaların yerleşimi görüldüğü gibi, küçük halkalardan başlayarak dışa doğru büyüyen halkalardan oluşmaktadır. Bu sistemde parabolik çanak tipi yoğunlaştırıcının aksine, odak noktası yoğunlaştırıcının altında zemine yakın olması sayesinde, termal enerji depolamada kullanılan fırının kullanımında kolaylık sağladı. Ayrıca güneş takip sistemi ile gün boyu güneş ışınlarının tek yansıma ile fırına yansıtılarak eritme işlemleri daha etkili bir şekilde yapıldı.



Şekil 9. HDY2 sistemi ve iki eksenli güneş takip sisteminin 3B montaj görüntüsü

Halka dizisi yoğunlaştırıcının en önemli avantajlarından biri, fırının zemine yakın olması ile aktif olarak kullanılabilirliğidir. Bunun yanında güneş fırını ve depolama tankı arasındaki yüksekliğin az olması nedeniyle ısı transfer yağının pompalanması kolaylaştırıldı. Bu yoğunlaştırıcıların bir diğer avantajı ise, istenen yüksek sıcaklıkta ısı depolanması için halka sayısı artırılabilmekte veya düşük sıcaklıklar için halka sayısı azaltılabilmektedir. Bu tez çalışması için, uygun depolama yöntemleri olarak silindirik kapta helisel boru eşanjör

modelleri kullanıldı. Güneş fırını ve ısı depolama tankı içinde helisel boru tipi eşanjörler kullanılarak ısı geçişi sağlandı.

2.1.3. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcının Yansıtıcı Yüzey İmalatı ve Hazırlanması

Boyutları tasarlanarak belirlenen halka dizisi tipi yoğunlaştırıcıların imalatı için, öncelikle her bir halka için ayrı ayrı kalıplar hazırlandı. Bu kalıplar, her bir halkanın eşit oranda küçük bir bölümü kesit alınarak 3 boyutlu yazıcı yardımı ile çıkarıldı. Solidworks programında çizilen halka yüzey eğimlerin 3B yazıcıda işlenmesi için stl formatında kaydedildi. Kalıpların hazırlanması sonrası, yoğunlaştırıcı yüzeylerin oluşturulması için, hazırlanan epoksi reçinenin kalıp üzerine yerleştirilen cam elyaf üzerine döküm işlemi yapıldı. İnce dökümler için, epoksi ve sertleştirici oranları 2:1 şeklinde olan reçine tercih edildi. Her bir kalıp için, yaklaşık 50 gr epoksi reçine ve 25 gr sertleştirici bir bardağa konularak 2 dakika boyunca berraklaşana kadar karıştırıldı. Ardından kalıp üzerine dengeli bir biçimde dökümü yapıldı. Cam elyafın her yüzeyi üzerinde reçinenin süpürülme işlemi ile döküm tamamlandı. Son olarak, yaklaşık 25 °C hava sıcaklığında dökümün maksimum 24 saatte kurutulması sağlanarak numuneler kalıptan çıkarıldı. Böylece her bir halka için farklı sayıdaki numunelerin imalatı gerçekleştirildi. Bu numunelerin yüzey kontrolü ve gerekli yüzey işlemlerinin (zımparalama vb.) yapılması ile her bir numune birleştirilerek bir halka oluşturuldu. Tüm halkalar aynı şekilde numunelerin birleştirilmesi ile parabolik kesik koni şeklinde halkalar elde edildi.

2.1.4. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı Modeli için Güneş Takip Sisteminin Kurulumu

Halka dizisi yoğunlaştırıcı modelin hareketinin sağlanması için, doğu batı ve güney kuzey eksenli güneş takip sisteminin kurulumu yapıldı. Sistemde 12 Voltluk (60-72) Ah aralığında akü kullanılarak hareket kontrolü sağlandı. Üst eksen (güney kuzey) ve alt eksen (doğu batı) birer DC motor ile çalıştırıldı. Şekil 10'da görülen hem otomatik hem de manuel olarak kullanılabilen güneş takip sistemi kontrol ünitesi deneylerde kullanıldı. Güneşin iki ekseninde takip edilmesiyle ışınların yoğunlaştırıcıya 90° gelmesi sağlandı. Güneş takibinde bir ışın algılayıcı üst eksene yerleştirilerek bu sensör yardımıyla kontrol ünitesine komut verildi. Işın sensörü ile halka tipi yoğunlaştırıcı aynı düzlemde konumlandırılarak beraber hareket ettirildi. Doğru akımlı motorlu kollara verilen komut kadar sistem hareket ettirildi.



Şekil 10. Güneş takip sistemi kontrolörü, ışın sensörü ve rüzgâr ölçüm cihazı

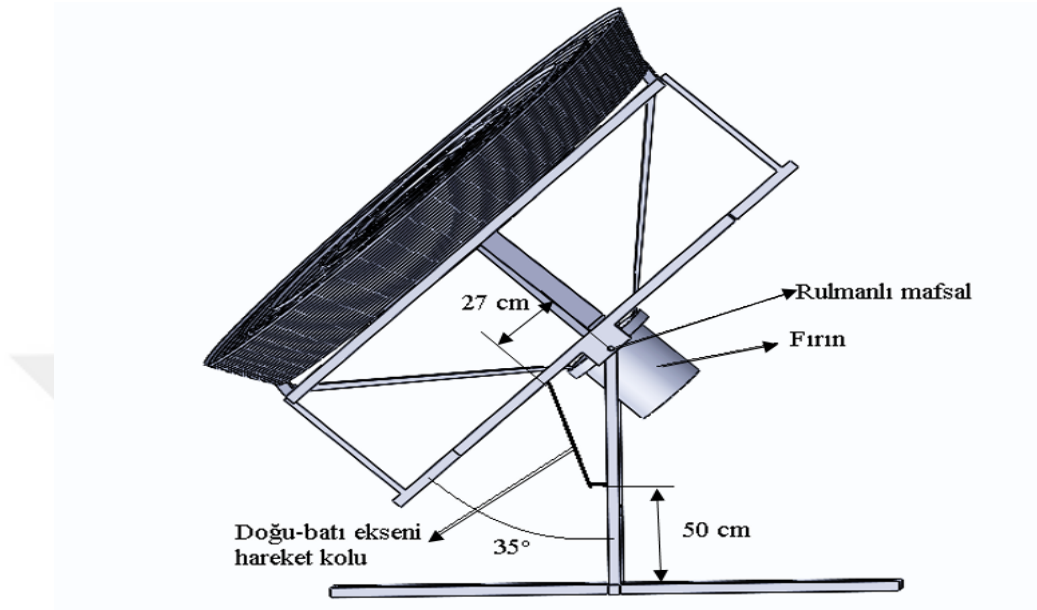
Güneş takip sistemi için taşınacak yük miktarı hesaplanarak belirlendi. Montajı yapılan takip sisteminin her bir hareket koluna (alt eksen ve üst eksen) 1500 N kuvvet (itme ve çekme) uygulanabilmektedir. Alt eksendeki doğu batı hareket kolu maksimum 400 mm uzayabilir. Alt eksende hareket kolunun uygulanacağı noktanın belirlenmesi için, üzerindeki yükün ağırlık merkezi tespit edildi. Toplam $\sum x=0$ ve $\sum y=0$ kabul edilerek bileşenlerin dönme eksenine göre momenti alındı. Kolun uygulayacağı maksimum kuvvete göre eksenden minimum uzaklık bulundu. Buna göre Şekil 11’de görüldüğü gibi bu sistem için, alt eksende kaldırma kolu ile uygulanan nokta mil ekseninden yaklaşık 27 cm uzaklıkta olduğu hesaplandı. Sistem doğu batı ekseninde iki yönde dikey ile yaptığı açı yaklaşık olarak $(35-40)^\circ$ arasında ayarlandı. Böylece bu çalışmadaki yoğunlaştırıcı sistem için, güneş takip sisteminin doğu batı yönünde hareket ettiği açı yaklaşık olarak 110° olarak hesaplandı.

Benzer şekilde üst eksen için, ağırlık kuvvetine karşılık uygulanacak kuvvetin yerinin belirlenmesi için x ve y yönünde momentleri alındı. Hareket kolunun konumu, üst eksenindeki mil ekseninden uzaklığı 55 cm olarak hesaplandı. Böylece üst eksen için uygulanacak kuvvetin noktasal konumu belirlendi.

2.1.5. Güneş Fırını İçin Faz Değişim Malzemesinin Hazırlanması

Faz değişim malzemesi (FDM1) olarak tercih edilen erime noktası 142°C olan Hitec tuzunun (%53 KNO_3 , %40 NaNO_2 ve %7 NaNO_3) bazı fiziksel özellikleri Tablo 4’te verilmiştir (URL-3, 2023; Ivenson vd., 2012). Her bir tuzun yaklaşık 1,5 saatlik kurutma işleminden sonra homojen bir tuz oluşturmak için, belirli ağırlıkça oranlarına göre

kariştirilerek Hitec tuzu kül fırınında (350-360) °C sıcaklıkta yaklaşık 2 saat bekletilerek eritilmesi sağlandı. Hitec tuzunun erimesi sonucu katılaşma noktası sıcaklığı 142 °C olarak ölçülerek kalibre edildi.



Şekil 11. Yoğunlaştırıcı sistemin doğu-batı eksenindeki hareket kolunun yerleşimi

Tablo 4. Hitec tuzun (%53 KNO₃, %40 NaNO₂ ve %7 NaNO₃) bazı fiziksel özellikleri (URL-3, 2023; Iverson vd., 2012)

Özellikler	Sembol	Değer
Yoğunluk (katı-sıvı)	ρ	(2013-1857) kg m ⁻³
Özgül ısısı (katı-sıvı)	c_p	(1090-1570) J kg ⁻¹ K ⁻¹
Isı iletim katsayısı (katı-sıvı)	k	(0,74-0,439) W m ⁻¹ K ⁻¹
Erime gizli ısısı	L_e	83740 J kg ⁻¹
Viskozite	μ	(0,024-0,0012) kg m ⁻¹ s ⁻¹
Erime noktası sıcaklığı	T_m	415 (K)
Maksimum çalışma sıcaklığı	T_b	811 (K)

İnorganik solar tuz, gizli ısı, fiziksel yapısı ve erime noktası sıcaklığına bağlı olarak faz değişim malzemesi (%60 NaNO₃; %40 KNO₃) olarak alternatif olarak seçimi yapıldı. Solar tuzunun erime sıcaklığı 222 °C ve diğer bazı fiziksel özellikler Tablo 5’te verildi (Iverson vd., 2012; Zhang vd., 2015; Bohlmann, 1972). Solar tuz diğer inorganik tuzlara göre düşük korozyon özelliğine sahip ve daha ekonomiktir. Bu nedenden dolayı ve fırında oluşan yüksek sıcaklıklara göre yüksek erime gizli ısısına sahip olması FDM olarak solar

tuzlarda kullanılabilir. Solar tuza benzer özellikleri olan ötektik solar tuzun fiziksel özellikleri ise Tablo 6’da verilmiştir (Bauer vd., 2009; Bauer vd., 2013).

İnorganik tuz ile fırına yerleştirilen spiral boru eşanjör arasında ısı alış veriş gerçekleştirildi. Böylece termal enerjinin iletilerek depolanması sağlandı. Helisel boru eşanjörde ve diğer boru bağlantılarında, akış kontrol vanaları yardımıyla debi kontrolü ve yağın dolaşımı bir pompa ile sağlandı. Güneş fırını çevresi ve eşanjör bağlantı borularından kaynaklanan ısı kaybını en aza indirmek için, alüminyum folyolu cam yünü ile yalıtımı yapıldı.

Tablo 5. Solar tuzun (%60 NaNO₃ ve %40 KNO₃) bazı fiziksel özellikleri (Ivenson vd., 2012; Zhang vd., 2015; Bohlmann, 1972)

Özellikler	Sembol	Değer
Yoğunluk (katı-sıvı)	ρ	(2079-1884) kg m ⁻³
Özgül ısı (katı-sıvı)	c_p	(1050-1500) J kg ⁻¹ K ⁻¹
Isı iletim katsayısı (katı-sıvı)	k	(0,705-0,478) W m ⁻¹ K ⁻¹
Erime gizli ısı	L_e	122890 J kg ⁻¹
Viskozite (katı-sıvı)	μ	(0,007) kg m ⁻¹ s ⁻¹
Erime noktası sıcaklığı	T_m	513 (K)
Maksimum kararlı çalışma sıcaklığı	T_b	873 (K)

Tablo 6. Ötektik solar tuzun (%50 NaNO₃ ve %50 KNO₃) bazı fiziksel özellikleri (Bauer vd., 2009; Bauer vd., 2013)

Özellikler	Sembol	Değer
Yoğunluk (katı-sıvı)	ρ	(2173,7-1836,4) kg m ⁻³
Özgül ısı (katı-sıvı)	c_p	(1050-1460) J kg ⁻¹ K ⁻¹
Isı iletim katsayısı (katı-sıvı)	k	(0,38-0,46) W m ⁻¹ K ⁻¹
Erime gizli ısı	L_e	110000 J kg ⁻¹
Viskozite (katı-sıvı)	μ	(0,0033-0,00099) kg m ⁻¹ s ⁻¹
Erime noktası sıcaklığı	T_m	495 (K)
Maksimum kararlı çalışma sıcaklığı	T_b	873 (K)

Güneş fırını için alternatif olan yüksek sıcaklık (500-873 K) çalışma koşullarına uygun olan solar tuzu, sodyum nitrat ve potasyum nitrat bileşenlerinden oluşmaktadır. Tasarlanan fırın boyutu için yaklaşık olarak 20 kg inorganik tuz kapasitesine sahiptir. Tuz karışımların ağırlık ölçümlerinde 0,1 gr hassasiyete sahip Mettler PM 6000 markalı tartı cihazı kullanıldı. Eritme işleminden önce tuzun kurutulma ve neminin azaltılması için, 3 kg’lık kaplarda Lenton marka bir elektrikli fırında tuzlar 200 °C’de yaklaşık 1,5 saat bekletildi. İnorganik tuzların karıştırılıp eritildiği elektrikli fırının görüntüsü Ek Şekil 1’de verildi. Kurutma

işleminden sonra homojen bir tuz oluşturmak için, ağırlıkça karışım oranlarına göre karıştırılarak yine elektrikli fırında (350-360) °C sıcaklıkta yaklaşık 2 saat bekletilerek eritilmesi sağlandı. Solar tuz bileşenlerinden olan Sodyum Nitrat 308 °C sıcaklıkta ve Potasyum Nitrat 334 °C sıcaklıkta eridiği için fırın sıcaklığı 360 °C’de tutuldu. Solar tuz için, CEM DT-610 termometreye bağlı K tipi termoeleman eriyiğe daldırılarak katılaşma noktası sıcaklığı yaklaşık olarak 221 °C ölçüldü. Oda koşullarında katılaşan tuzun fırına dökülmesi için öğütme işlemi yapılarak tekrar toz haline getirildi. Böylece tuzlar daha homojen hale getirildi.

2.1.6. Isı Depolama Tankı İçin Faz Değişim Malzemesinin Hazırlanması

Isı depolama tankında, faz değişim malzemesi olarak güneş fırınına göre nispeten daha düşük erime noktalı inorganik tuz karışımlarının kullanılması planlandı. Bu durumda daha düşük sıcaklıklarda (80-150 °C) yüksek depolama kapasitesine sahip inorganik tuzun gizli ısısından faydalanıldı. Ayrıca fırından gelen termal enerjinin bir kısmı ısı depolama tankına gönderilerek daha düşük sıcaklıkta ısı depolama sağlandı. Hitec (%53 Potasyum Nitrat KNO_3 ; %40 Sodyum Nitrit NaNO_2 ve %7 Sodyum Nitrat NaNO_3) ve Hitec XL (%48 Kalsiyum Nitrat $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)$ + %45 KNO_3 + %7 NaNO_3) gibi Solar tuza göre düşük erime noktasına sahip inorganik tuzlar depolama tankı için tercih edilebilir. Bu çalışmada depolama tankı için, Hitec XL üçlü karışımına benzeyen ancak ağırlık oranları farklı olan yaklaşık 80 °C erime noktasına sahip (%32 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, %24 NaNO_3 ve %44 KNO_3) FDM2 inorganik tuz karışımının kullanılması amaçlandı. FDM2’nin diğer önemli termofiziksel özellikleri ise Tablo 7’de verilmektedir (Chen ve Zhao, 2017).

Tablo 7. İnorganik üçlü tuz karışımının (FDM2) bazı fiziksel özellikleri

Özellikler	Sembol	Değer
Yoğunluk (sıvı)	ρ	(1460) kg m^{-3}
Özgül ısısı (katı-sıvı)	c_p	(1600-1200) $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Isı iletim katsayısı (sıvı)	k	(1-3,2) $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Erime gizli ısısı	L_e	67000 J kg^{-1}
Viskozite	μ	(0,1) $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$
Erime noktası sıcaklığı	T_m	353 (K)
Bozulma sıcaklığı	T_b	873 (K)

2.1.7. Fırın ve Helisel Boru Eşanjörün Boyutlarının Belirlenmesi

Fırının boyutlarının belirlenmesi için, helisel boru eşanjörünün boyutlandırılması yapıldı. Fırın içerisine yerleştirilecek olan helisel eşanjör üzerinde enerji dengesi kuruldu. Paslanmaz çelikten imal edilen helisel eşanjör boru yüzeyinden iç kısımdaki ısı transfer akışkanı yağa geçen termal enerji hesaplamaları teorik ve sayısal yöntem (Fluentte) ile hesaplandı. Helisel borular kullanılarak ısı transfer miktarı artırıldı.

Fırındaki helisel boru uzunluğunu bulmak için, boru üzerinde enerji dengesi kurularak, boruda taşınım ile olan ısı geçişi boru içindeki akışkanda depolanan entalpiye eşitlendi ($Q_{konv} = Q_{entalpi}$) ve Denklem (1)'deki eşitlik elde edildi.

$$\bar{h}A_s \Delta T_{lm} = \dot{m} c_p (T_c - T_g) \quad (1)$$

Fırındaki helisel borunun dış yüzey sıcaklığı sabit tutularak ve boruda ince cidar kabulü yapılarak, logaritmik sıcaklık Denklem (2) ile hesaplandı.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_c) - (T_s - T_g)}{\ln \left(\frac{T_s - T_c}{T_s - T_g} \right)} \quad (2)$$

Analitik hesaplamalarda boru dış yüzey sıcaklığı sabit olarak ve en yüksek 500 K, başlangıç giriş sıcaklığı 300 K ve istenen çıkış sıcaklığı 430 K olarak kabul edildi. Bu sıcaklık değerleri, inorganik tuzların erime noktasından daha yüksek olduğu için seçildi. Motor yağının sıcaklığı 430 K olduğu durumda, sabit basınç özgül ısısı 2471 J/kgK hesaplamalarda kullanıldı. İstenen çıkış sıcaklığına göre helisel boru uzunluğu hesaplandı.

Isı transfer katsayısı için boru içindeki yağ akış durumunun belirlenmesi için Reynolds sayısı Denklem (3) ile hesaplanmıştır. Analitik olarak helisel borudaki kütleli debi, istenen sıcaklıklara belirlenen sürede ulaşması için, yaklaşık 0,002 kg/s olarak hesaplandı.

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3)$$

Helisel boru akışında Reynolds sayısını 2300'den küçük olduğu için akış laminar olarak belirlendi. Akışın tam gelişmiş olduğu farz edilerek ortalama Nusselt sayısı 3,66'ya eşit olarak alındı. Böylece ortalama ısı taşınım katsayısı Denklem (4) ile hesaplandı.

$$\bar{h} = \overline{Nu} \frac{k}{D} = 3,66 \times \frac{0,137}{0,01} \quad (4)$$

Denklem (1)'de bulunan değerler yerine yazılarak yüzey alanı $A_s (\pi D l)$ bulunur. Başlangıç durumu için helisel boru uzunluğu (l) ise 4,01 m hesaplandı. Süreklilik durumunda giriş sıcaklığının (350 K) ve kütledebisi artırılarak (0,0035 kg/s) kabul edilmesiyle helisel boru uzunluğu 5,1 m olarak hesaplandı. Böylece deneysel çalışmalar için, 6 m uzunluğunda helisel boru eşanjör kullanıldı.

Borudaki akışın hidrodinamik ve termal olarak gelişmiş olduğunu anlamak için Denklem (5) kullanılarak yaklaşık 5,1 m olarak hesaplandı (Bergman vd., 2011). Bu denklemdeki Pr sayısı değeri Tablo 12'de verilmektedir.

$$X_{fd} = 0,05 Re_D D Pr \quad (5)$$

Denklem (1) eşitliği kullanılarak zamana bağlı helisel boru çıkış sıcaklığı Denklem (6) ile hesaplandı (Incropera ve DeWitt, 2000).

$$T_c(t) = T_s + \exp\left(\frac{-\bar{h} A_s t}{\rho V C_p}\right) \times (T_g - T_s) \quad (6)$$

Burada standart helisel boru uzunluğu 6 m, boru çapı 0,01 m ve boru hacmi $0,471 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ kabul edilerek hesaplama yapıldı. Böylece helisel boru yüzey sıcaklığı (500 K) sabit kabul edilmesi ile çıkış sıcaklığı 10 dakika sonunda yüzey sıcaklığına yaklaştırıldı.

Helisel borunun imalat kolaylığı bakımından ve standart sarmal boru eşanjörlere bağlı olarak fırın boyutları belirlendi. Buna göre sarmal boru çapı 20 cm, sarmal boru yüksekliği (15-20) cm aralığında, boru iç çapı yaklaşık (10-20) mm aralığında, boru kalınlığı 0,5 veya 1 mm olacak şekilde tasarlandı. Bu koşullara bağlı olarak 26 cm çaplı 26 cm yükseklikte bir silindirik kap tasarlanmıştır. Bu durumda fırın iç hacmi ortalama olarak $0,013 \text{ m}^3$ olmaktadır. Fırın yaklaşık (20-25) kg aralığında inorganik tuzu depolayabilecek boyutlardadır.

2.1.8. Isı Transfer Akışkanı İçin Pompa Hesabı

Fırın, ısı depolama tankı ve eşanjör arasında yağ dolaşımı için sisteme pompa eklendi. Gerekli olan pompa gücü, boru içi akışı hesabı yapılarak bulundu. Yağ dolaşım sisteminde

boru içi akış hesaplamaları için Bernoulli enerji denklemi kullanıldı ve Denklem (7) ile verilmektedir.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f - h_p \quad (7)$$

Burada h_p pompa yükü, h_f sürtünme yükü, Z yükseklik, V akış hızı ve P boru içi basınç olarak tanımlandı.

Tasarlanan güneş fırınında dolaşan akışkan yağın, yaklaşık 1,5 m yüksekliğe pompalanması gereklidir. Fırın ve ısı depolama tankı, yaklaşık altı metre uzunlukta helisel borulara sahip iken ve fırın ile ısı depolama tankı arasında ise 3 m boru uzunluğu belirlendi. P_1 ve P_2 arasında atmosfer basınç farkının olmadığı varsayımı yapılarak ve hızlar ise süreklilik halinde eşit kabul edildi. Ayrıca vana kayıpları ihmal edildi. Boru akışının laminar olduğu kabulü yapılarak sistemin debisi (0,0005-0,0017) kg/s arasında olduğu belirlendi. Bu durumda pompa gücü yaklaşık olarak (302-1193) W aralığında hesaplandı. Boru akışında Reynolds sayısı 2300'den küçük olduğundan laminar akış kabulü doğrulandı. Yaklaşık olarak eşit güçteki ikinci pompa ise eşit boru uzunluğuna sahip eşanjör ve ısı depolama tankı arasına yerleştirilerek akışın sürekliliği sağlandı.

2.1.9. HDY2 Sistemi ile Güneş Altında Deneylerin Yapılması

Deneyler güneşli bir günde yapılarak, tasarlanan HDY2 sisteminin ve ısı depolama birimlerinin performansları ölçüldü.

Sekiz adet halka dizisi tipi yoğunlaştırıcıya ve lense sahip ısı depolama sisteminin şarj esnasında, öncelikle açık güneşli bir havanın olması gerekmektedir. Güneş ışınları yeterli olduğunda ise yoğunlaştırma işlemi gerçekleştirildi. Odak alanına yoğunlaştırılan ışınlar fırındaki kuvars camdan geçerek veya iletim yoluyla çelik alıcıdan geçerek inorganik tuzlar eritildi. Bu tuzun tamamen erime işlemi gerçekleştiğinde fırındaki ilk ısı depolama süreci başlamış oldu. Bununla birlikte fırındaki helisel borudaki ısı transfer akışkanı (termal yağ) sıcaklığı gittikçe artmaya başladı ve böylece yaklaşık olarak eriyik tuz sıcaklığına ulaşıldı. Akışkan yağ yardımıyla depolama tankındaki ikinci bir helisel eşanjöre ısı geçişi yapıldı. ısı depolama tankındaki inorganik tuzun, helisel boru ile ısı iletim yoluyla termal gücü artırılarak, şarj işlemi gerçekleştirildi.

Bu yoğunlaştırıcı sistemin ilk deneyinde, odak noktası uzunluğunun belirlenmesi ve halka yoğunlaştırıcıların eksenlerinin merkezlenmesi gibi genel kontroller yapıldı. Deneylerde kullanılan 12 kanallı Lutron markalı verileri kaydedebilen (datalogger) termometrenin teknik özellikleri Ek Tablo 1’de verildi. Fırın içinde altı adet ve ısı depolama tankında üç adet T tipi termoeleman yerleştirildi. Isı depolama tankına yerleştirilen FDM2 ve termoelemanların bir görüntüsü Ek Şekil 2’de verildi. Odak alanı ölçümünde, bir termoeleman tam odak noktasından ve diğer termoeleman fırın duvarı olan paslanmaz çelik üzerinden alındı. Deneylerde kullanılan bir diğer Dijital Termometre (CEM DT-610B) ve K tipi termoelemanın ait teknik özellikler Tablo 8’de verilmektedir. Ek olarak üretici firma tarafından kalibre edilen CEM DT-610B dijital termometrenin 1000 °C için $\pm 0,5$ hata oranına ve K tipi termoeleman için 800 °C’de $\pm 0,75$ hata oranına sahiptir. Bu hata oranları yapılan deneysel çalışmalar için yeterli hassasiyettedir.

Tablo 8. Dijital termometre ve K tipi termoelemanın teknik özellikleri

Ölçüm aralığı	-50 °C ve +1300 °C
Hassasiyeti	$\pm 0,5$ veya ± 1 °C (0–1000 °C)
Çalışma sıcaklığı	(–20 ÷ 60) °C
Okuma oranı	2.5 sefer/saniye
Çözünürlük	0,1 °C - 1°C
Dijital termometrenin boyutları	162 mm x 76 mm x38,5 mm
Sıcaklık probu	Çift K tipi Termokupul
Termokupul ölçüm aralığı	-200°C - 1200°C
Termokupul eleman teli	Nikel Krom-Nikel (NiCr-Ni)
Termokupul doğruluğu	$\pm 2,2$ °C veya $\pm 0,75$ (0–800 °C)
Termokupul yalıtım sıcaklığı	Maksimum 260 °C (Teflon izoleli)
Termokupul duyarlılığı	41µV/°C

Güneş şiddeti ölçümünde ise güneş ışınlarının dik gelmesi için yoğunlaştırıcı sistemin üst ekseninin kenarına bir Solarimetre yerleştirildi. Deneylerde kullanılan Solarimetre’nin (PCE-SPM1) teknik özellikleri Tablo 9’da verilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan bu Solarimetre, standart test koşullarında üretici firmalar tarafından kalibre edilmiştir. PCE-SPM1 Solarimetrenin 1000 W/m² güneş ışınım şiddeti için (± 10 W/m²) toplam %5 hata oranı ile ölçüldü. Bu hata oranları ise yapılan deneysel çalışmalar için yeterli hassasiyettedir.

Tablo 9. PCE-SPM1 Solarimetre'nin teknik özellikleri

Ölçüm aralığı	0-2.000 W/m ²
Çevre koşulları	5 °C – 40 °C (Maksimum nem %80)
Çözünürlük	1 W/m ²
Hassasiyet	± 10 W/m ² ya da ± %5
Spektral aralık	400-1100 nm
Pil	4x1,5 V AAA
Boyut	(111x64x34) mm
Ağırlık	165 gr



Şekil 12. Deney anındaki HDY2 ile ısı depolama sisteminin genel görüntüsü

Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinde, fırın içinde yüksek sıcaklıkların elde edilebilmesi için, radyasyon ve taşınım kayıplarının azaltılması gerekmektedir. Bunun için mevcut sistemde taşınım kayıplarının azaltılmasında odak alanında yüksek sıcaklığa dayanan kuvars cam kullanıldı. Ayrıca odaklama ve yansıma kayıplarını azaltmak için, fırın üzerine ikinci bir konik yoğunlaştırıcı yerleştirildi. Aynı zamanda bu konik yoğunlaştırıcı, yalıtım malzemesini yoğunlaştırılmış güneş ışınlarından korurken, gelen ışınların fırın

içerisine girmesini sağladı. Şekil 12’de yedi halka ve lens kullanılan HDY2 ile ısı depolama sistemi deney düzeneğinin genel görüntüsü verilmektedir.

Eritilerek homojen hale getirilen solar tuz, odak bölgesine yerleştirilen fırın içerisine döküldü. Bunun yanında helisel eşanjör ise toz halindeki tuz içerisine yerleştirildi. Deney anında yoğunlaştırılmış ışınların odaklandığı fırının yakın bir görüntüsü Ek Şekil 3’te verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi fırının yataya yakın olduğu durumda, Trabzon şehir merkezi konumu için Ocak ayında güneş yüksekliği yaklaşık (30-35)° olarak belirlendi. Yaz aylarında özellikle Mayıs ve Ekim ayları arasında güneş yüksekliği, mevcut güneş takip sistemi için daha uygun olduğu görüldü.

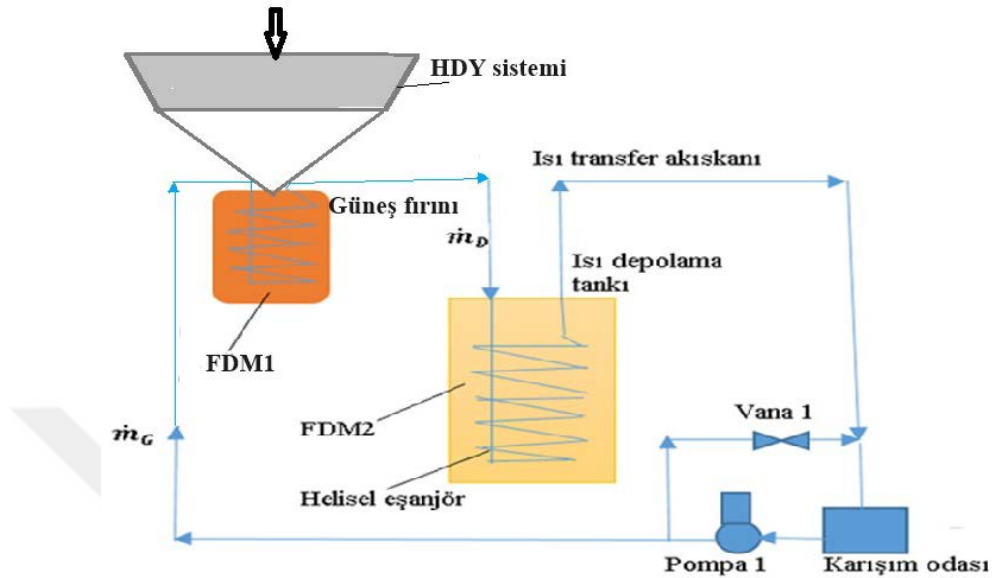
2.1.10. HDY Isı Depolama Entegre Sisteminin Çalışma Prensibi

Şekil 13’te şarj esnasında HDY ısı depolama sisteminin genel çalışma prensibi şematik görüntüsü verilmektedir. Odak alanına yoğunlaştırılan ışınlar sayesinde fırındaki inorganik tuzların eritilmesi sağlandı. Bununla birlikte fırındaki helisel borudaki yağ, Vana1 kapalı olduğu durumda Pompa1 ile akışı sağlanarak fırına gönderildi. Fırından çıkan kızgın akışkan yağ, depolama tankına aktarılarak helisel eşanjörde belirli bir süre bekletilerek ısıнын FDM2’ye aktarılması sağlandı. Böylece FDM2’nin eritilmesi veya ısıısının artırılması ile şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. Soğuyan yağ tekrar karışım odasına aktarılarak döngü tamamlanmaktadır. Şarj durumunda güneş fırınından geçen debi, depolama tankından geçen debiye eşittir.

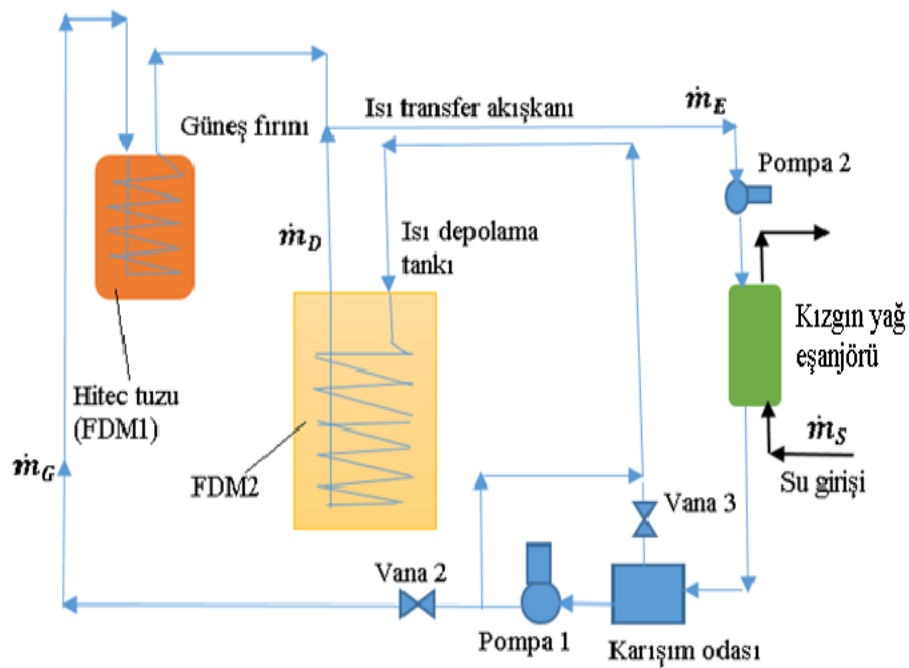
Isı tranfer akışkanını sıcaklığının artması sayesinde iletim yoluyla depolama tankındaki FDM2 tuzunun eritilmesi sağlandı. Isı depolama tankında soğuyan ısı transfer akışkanını karışım odasına aktarıldı. Şarj durumunda sadece Vana1 kapatılarak diğer vanalar açıldı. Son olarak, Isı transfer akışkanını karışım odasından Pompa1 ile tekrar yaklaşık 1,5 m yükseklikteki güneş fırınına pompalanmaktadır. Böylece ısı transfer akışkanının dolaşımı sağlanmaktadır.

Şekil 14’te eriyik halinde depolanan Hitec tuzunundeşarj durumunun şematik görünümü verilmektedir. Buna göre,deşarj durumunda ısı depolama tankına pompalanan ısı transfer akışkanını, şarj durumundaki akışa ters yönde hareket ederek plakalı eşanjöre aktarıldı. Pompa2 sayesinde eşanjörden geçerek soğuyan akışkan karışım odasına aktarıldı. Bu işlem Hitec tuzunun ortam sıcaklığına düşmesine kadar devam ettirildi. Kızgın yağ

eşanjöründen kullanım ihtiyacına göre, alternatif bir yöntem olarak sıcak su veya buhar elde edilebilmektedir.



Şekil 13. Isı depolama sisteminin şarj esnasındaki şematik görünümü



Şekil 14. Isı depolama sisteminin deşarj esnasındaki şematik görünümü

Deşarj durumunda Vana 2'nin açık olduğu durumda eşanjörden geçen debi, güneş fırınından ve ısı depolama tankından geçen debilerin toplamına eşittir.

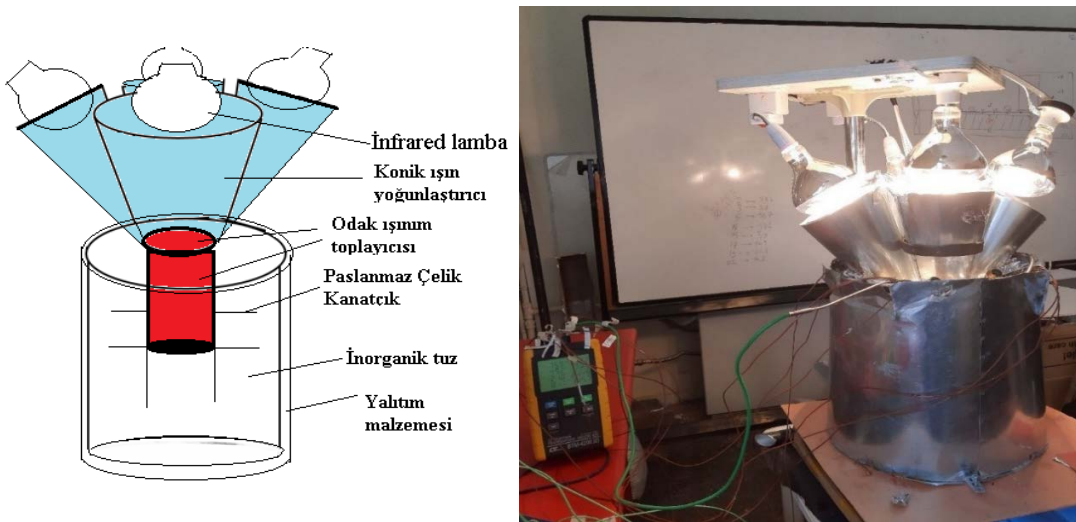
$$\dot{m}_E = \dot{m}_G + \dot{m}_D \quad (8)$$

2.2. Laboratuvarda Ortamında Kalibrasyon Testlerinin Yapılması

Laboratuvar ortamında iki farklı yöntem ile kalibrasyon (ölçümleme) çalışmaları yapıldı. Laboratuvar ortamında ise infrared lambalar ve dirençli ısıtıcı yardımıyla ısı kaynağı oluşturularak tasarlanan fırında depolanan termal enerjinin performans ölçümü gerçekleştirildi. İlk olarak, İnfrared lamba ile mevcut fırında ısı depolama testleri yapıldı. İkinci ölçümleme testinde ise bir dirençli ısıtıcı yardımıyla fırında ısı depolama testi gerçekleştirildi.

2.2.1. İnfrared Lamba ile Yapılan Isı Depolama Testleri

İnfrared lamba deneylerinde, gerçek güneş altındaki yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile fırına sağlanan enerji, benzer şekilde laboratuvar ortamında sağlanarak ısı depolama işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. HDY2 sistemine ait fırında, toplam gücü 1700 W olan 4 adet infrared lamba kullanıldı. Böylece, yapay bir güneş oluşturularak fırının performans analizi gerçekleştirildi. İnfrared ışınlar, bir konik yoğunlaştırıcı ile fırın üzerindeki yaklaşık 10 cm çaplı silindirik bir odak alanına yoğunlaştırıldı. İnfrared lamba ile yapılan deney düzeneği ve şematik resmi Şekil 15'te verilmektedir.

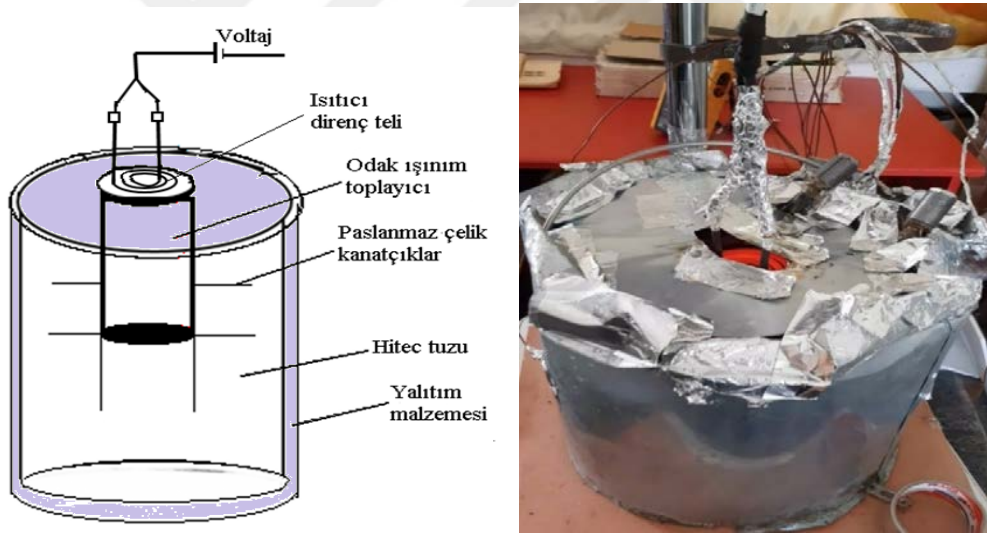


Şekil 15. İnfrared lamba ile yapılan ısı depolama deneyi ve şematik bir görüntüsü

Şekil 15'te görüldüğü gibi, infrared lamba deneyinde, sistem dört adet yoğunlaştırıcı ve infrared lambadan oluşmaktadır. Uyarlamalı fırın olarak, kanatçıklar ile ısı transferi arttırılan bir test gerçekleştirildi. Fırında Hitec tuzu kullanılarak fırın içinden şarj deneyi boyunca sıcaklıklar termoelemanlar ile ölçülerek datalogger ile kaydedildi.

2.2.2. Dirençli Isıtıcı ile Fırında Yapılan Isı Depolama Testleri

Laboratuvar ortamında yapılan ikinci kalibrasyon testinde ısıtıcı direnç teli kullanılarak tasarlanan uyarlamalı fırında ısı depolama sağlanabilmektedir. Isıtıcı dirençli tel, fırının silindirik alıcısı üzerine yerleştirilerek elektrik akımıyla çalıştırıldı. Şekil 16'da, ısıtıcı yöntemin şematik görüntüsü ve deney düzeneğinin resmi görülmektedir. Test süresi boyunca fırın içindeki FDM sıcaklıkları ve dış yüzey sıcaklıkları termoelemanlar ile ölçülerek datalogger ile kaydedildi. Güneş altındaki deneylerde de yine aynı fırın kullanıldı.



Şekil 16. Elektrikli ısıtıcı ile fırının test anındaki resmi ve şematik görüntüsü

2.3. Analitik Hesaplamalar

2.3.1. Anlık Işıtım Değerinin Analitik Olarak Hesabı

Deneylerin yapıldığı bölge için anlık toplam güneş şiddeti değeri, direkt ısıtım, yayılı ısıtım ve yansıyan ısıtım değerlerinin toplamına eşitlenerek Denklem (9) ile hesaplandı (Goswami, 2015; Duffie ve Beckman, 2013).

$$I = I_B + I_D + I_R \quad (9)$$

Burada I_B eğik yüzeye gelen direkt ışınım, I_D eğik yüzeye gelen yayılı ışınım ve I_R ise eğik yüzeye gelen yansıyan ışınım değeridir ve anlık ortalama güneş şiddeti değeri (I) sırasıyla Denklem (10), (11) ve (12) ile hesaplandı (Goswami, 2015; Duffie ve Beckman , 2013).

$$I_B = (r_t \times I_h - r_d \times I_d) \times \frac{\cos \theta_i}{\sin \alpha_h} \quad (10)$$

$$I_D = (r_d \times I_d) \times \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (11)$$

$$I_R = \rho_{gr} \times r_t \times I_h \times \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (12)$$

Burada r_d yatay bir yüzey üzerinde uzun dönem saatlik difüz ışınımın günlük ortalama difüz ışınımına oranı olarak Denklem (13) ile hesaplandı (Whillier, 1956; Liu ve Jordan, 1960; Iqbal, 1983; Gueymard, 2000; Goswami, 2015). Yatay bir yüzey üzerinde uzun dönem saatlik toplam ışınımın ortalama günlük toplam ışınımına oranı olan r_t ise Denklem (14) ile hesaplandı (Collares-Pereira ve Rabl, 1979; Gueymard, 2000; Goswami, 2015).

$$r_d = \frac{\pi}{24} \times \frac{\cos(h_s) - \cos(h_{ss})}{\sin(h_{ss}) - \frac{\pi}{180} (h_{ss}) \times \cos(h_{ss})} \quad (13)$$

$$r_t = (a + b \times \cos(h_s)) \times r_d \quad (14)$$

Burada a ve b terimleri sırasıyla Denklem (15) ve (16) ile hesaplandı (Collares-Pereira and Rabl, 1979; Goswami, 2015).

$$a = 0,409 + 0,5016 \times \sin(h_{ss} - 60^\circ) \quad (15)$$

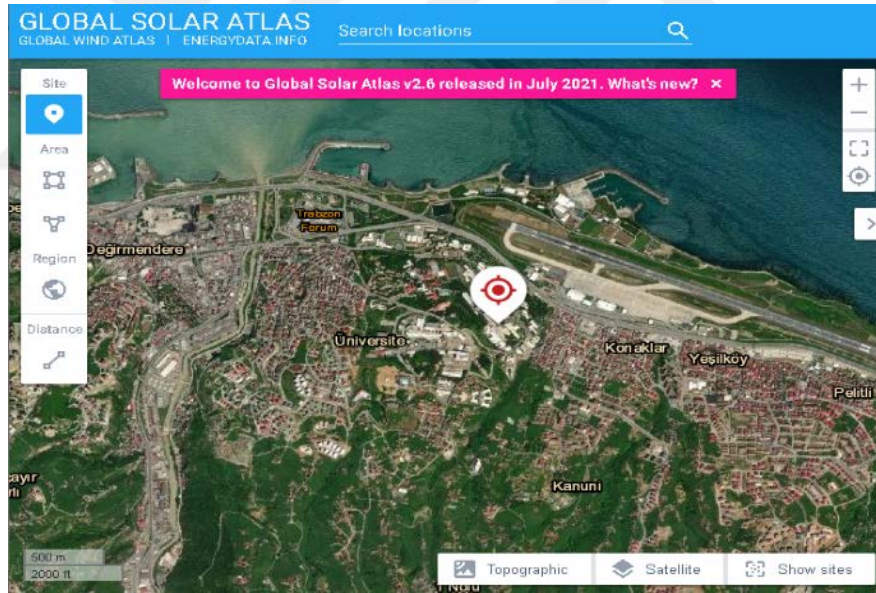
$$b = 0,6609 + 0,4767 \times \sin(h_{ss} - 60^\circ) \quad (16)$$

Yatay bir yüzey üzerine gelen saatlik ortalama yayılı ışınım miktarı I_d , küresel ışınım miktarına ve açıklık indeksine bağlı olarak Denklem (17) ile hesaplandı (Kaygusuz, 2020).

$$\frac{I_d}{I_g} = 0,785 - 0,803 \times k_T \quad (17)$$

Burada k_T saatlik gökyüzü açıklık indeksi olarak Trabzon'da öğle vakti için 0,524 değeri alındı (Kaygusuz, 2020).

Şekil 17'de gösterilen "Global Solar Atlas" adresinden alınan Türkiye'nin Trabzon kentinin konumu için, yatay bir yüzey üzerine gelen ortalama toplam küresel ışıınım miktarı (I_g) 4,783 kWh/m²gün ve yatay bir yüzey üzerine gelen ortalama yayılı (difüz) ışıınım miktarı (I_h) (1,742-1,826) kWh/m²gün değerleri kullanılmıştır (Çağlar vd., 2013; URL-4, 2022). Ayrıca uygun açıdaki eğik düzleme gelen küresel ışıınım miktarı yıllık 1427,6 kWh/m²yıl olarak belirlendi (Global Solar Atlas, 2022). Ayrıca deneylerin yapıldığı koordinatlarda, sıcaklığın yüksek olduğu 15 Temmuz günü için, öğle saatinde (12.30'da $h_s = 0^\circ$), güneş batış saat açısı ($h_{ss} = 110^\circ$), güneş yükseklik açısı ($\alpha_h = 70^\circ$), alıcı yüzeyi eğim açısı ($\beta = 20^\circ$), beton zemin için ölçülen yansıtma katsayısı ($\rho_{gr} = 0,22$) değerleri kullanılmıştır. Bu değerlere göre eğik yüzeye gelen anlık ortalama radyasyon miktarı yaklaşık olarak 1005,8 W m⁻² hesaplandı.



Şekil 17. Trabzon için ışıınım değerlerinin alındığı konum (URL-4, 2022)

2.3.2. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcı Sisteminde Termal Enerji Dönüşümü Hesaplamaları

Tasarlanan sistemin teorik olarak odak sıcaklığı hesabı, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sayesinde fırındaki tuzların eritme debisi hesabı, fırın ve depolama tankının Termodinamiğin birinci ve ikinci kanun verimi analizleri aşağıda sunulmaktadır.

Yoğunlaştırma oranı, halka dizisi yansıtıcı yüzey alanına gelen güneş ışınlarının odak yüzey alanına oranı olarak hesaplanmaktadır. Tek halkaya sahip yoğunlaştırıcı için, yoğunlaştırma oranı (C_R) analitik olarak Denklem (18) ile hesaplandı. Sistemin optik lense sahip olduğu durumda ve tüm halka dizilerine ait toplam yoğunlaştırma oranı ise Denklem (19) ile hesaplandı (Garcia vd., 2019; Karathanasis, 2019).

$$C_{H1} = \frac{A_{HDY1}}{A_r} \quad (18)$$

$$C_R = \frac{A_{lens} + \sum_{i=1}^n A_{HDY,i}}{A_r} \quad (19)$$

Burada A_r alıcı olan fırın üzerindeki odak yüzey alanı, A_{lens} lensin yüzey alanı, A_{HDY} toplam halka yoğunlaştırıcı yüzeyi alanıdır ve Denklem (20) ile hesaplandı. Yoğunlaştırıcının sırasıyla üstten ve alttan odak eksenine uzaklığı $R_{üst}$ ve R_{alt} olarak tanımlandı. Odak eksenine en yakın olan birinci halkanın $R_{üst}$ ve R_{alt} değerleri sırasıyla 234,18 mm ve 200 mm olduğu Şekil 7’de verilmektedir.

$$A_{HDY} = \pi \times [(R_{n,üst}^2 - R_{n,alt}^2) + \dots + (R_{1,üst}^2 - R_{1,alt}^2) + R_{lens}^2] \quad (20)$$

Güneş fırını yüzeyindeki teorik maksimum odak sıcaklığı (K) Denklem (21) ile hesaplandı (Stine ve Diver, 1994; Castellanos vd., 2017; Demirtaş ve Özcan, 2021).

$$T_{odak} = \left(\sqrt[4]{\frac{\eta_{op} \times \alpha \times \tau \times I \times C_R}{\epsilon \sigma}} \right) \times F_B \times R_S \quad (21)$$

Burada deneysel olarak ölçülen odak sıcaklığı ve güneş şiddeti değerlerine dayanılarak elde edilen bozulma faktörü ($F_B=0,85$) ve soğuma katsayısı ($R_S=0,6$) değerleri hesaplarda kullanılmıştır (Castellanos vd., 2017). Denklem (21)’de kullanılan diğer parametre ve değerler Tablo 10’da verilmektedir. Ayrıca hesaplanan anlık toplam güneş şiddeti değeri I ($W \cdot m^{-2}$) analitik hesaplamalarda kullanıldı. Odak yüzeyinde analitik olarak ısı akısının bulunması için, deneysel olarak ölçülen odak sıcaklık değerleri kullanılarak, ışıınım ile olan ısı geçiş denkleminde yararlanarak fırına gelen ışıınım değeri de Denklem (21) ile hesaplandı (Özcan vd., 2023).

Güneş fırını üzerindeki odak açıklık alanının belirlenmesi için, Ek Şekil 4'teki grafikte farklı yoğunlaştırma oranına göre elde edilen odak sıcaklıkları değişimi verilmektedir. Odak açıklık çapı 10 cm olması durumunda, yoğunlaştırma oranı 450 ve odak sıcaklığı 916,6 K olarak hesaplandı. Uyarlamalı fırında odak yüzey alanının artırılması ile HDY2 sistemi için, yoğunlaştırma oranı 70 olduğunda odak sıcaklığı 575 K olarak hesaplandı. Buna göre seçilen odak açıklık çapı, güneş fırınında inorganik tuzların bozunma sıcaklığı (873 K) dikkate alınarak ve odakta kullanılan malzeme geçirgenlik ve ısı iletim katsayılarına bağlı olarak belirlendi. Bu durumda Ek Şekil 4'te histogramdaki 2 numaralı grup seçildi.

Yoğunlaştırıcı optik verimi (η_{op}), yoğunlaştırıcının yansıtıcılığına, gölgeleme ve karşılıklı faktörlerine bağlı olarak tanımlandı ve Denklem (22) ile hesaplandı (Stine ve Diver, 1994; Jaramillo S., 1998; Duffie ve Beckman, 2013; Castellanos vd., 2017).

$$\eta_{op} = \cos\theta_i \times \rho_{ch} \times (f_s \Gamma) \quad (22)$$

Tablo 10. Yoğunlaştırıcı ve fırın tasarımı için kullanılan özellikler ve değerleri

Özellikler	Sembol	Değer
Yansıtma katsayısı	ρ_{ch}	$0,95 \pm 0,03$ (Krom-gümüş net ayna folyo)
Geçirgenlik katsayısı	τ	$0,92 \pm 0,01$ (Kuars cam için)
Işın kayma açısı	θ_i	$0^\circ \pm 5^\circ$ (Dikey gelen ışın)
Yutunum katsayısı	α_s	$0,89 \pm 0,05$ (Solar tuz) (Tetreault-Friend vd.,2017)
Yayınım katsayısı	ε_s	$0,89 \pm 0,05$ (Solar tuz) (Tetreault-Friend vd., 2017)

Burada θ_i gelen güneş açısı, güneş takibi yapıldığında sıfır değerini alır, ρ yüzey yansıtma katsayısı, $f_s \Gamma$ gölgeleme ve karşılıklı faktörü olarak tanımlanmıştır ve Denklem (23) ile hesaplandı (Jaramillo Salgado, 1998; Garcia vd., 2019).

$$f_s \Gamma = \frac{\sin^2 \theta_R - \sin^2 \theta_{min}}{4 \tan^2(\frac{\theta_R}{2})} \quad (23)$$

Burada yoğunlaştırıcı kenar açısı θ_R , gölge açısı θ_{min} ve halka dizisi sistemlerde odakta gölge oluşmadığı varsayılarak gölge açısı (θ_{min}) sıfır alındı.

Genel olarak alıcıda (odakta) enerji dengesi kurulursa, fırına gelen enerjinin bir kısmı yansıma, taşınım, iletim ve ışıınım ile kaybedilmektedir.

Güneş fırını üzerindeki odak yüzeyinden ışıınım ile ısı kayıpları Denklem (24) ile hesaplandı (Castellanos vd., 2017; Liao ve lin, 2015; Skouri vd., 2013; Fraser, 2008). İlk olarak fırındaki ışıınım kayıpları, yayılan ve yansıyan ışıınım olarak iki şekilde hesaplanmıştır. Fırının odak yüzeyinden yayınım nedeniyle oluşan ışıınım kaybı Stefan Boltzmann kanunu olan Denklem (25) ile hesaplandı.

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = \dot{Q}_{\text{R,e}} + \dot{Q}_{\text{R,ref}} \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{\text{R,e}} = A_r \varepsilon \sigma (T_{\text{Odak}}^4 - T_a^4) \quad (25)$$

Fırın odak yüzeyinden ışıınların yansıması nedeniyle oluşan ışıınım kaybı ise Denklem (26) ile hesaplandı (Castellanos vd., 2017; Liao ve lin, 2015; Skouri vd., 2013; Fraser, 2008). Odak boşluğunun soğurma etkisi α_{eff} Denklem (27) ile hesaplandı (Duffie ve Beckman, 2013).

$$\dot{Q}_{\text{R,ref}} = (1 - \alpha_{\text{eff}}) \dot{Q}_{\text{güneş,gr}} \quad (26)$$

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\alpha_s}{\alpha_s + (1 - \alpha_s) \frac{A_0}{A_1}} \quad (27)$$

Burada α_s fırın yüzeyinin yutunum katsayısı, A_1 (m²) fırın üzerindeki odak alanı ve A_0 (m²) fırın yüzey alanıdır.

Fırına gelen enerji miktarı, Denklem (28) ile verilen, optik verimin ve HDY yoğunlaştırıcıya gelen enerjinin bir fonksiyonu olarak hesaplandı (Castellanos vd., 2017; Ahmadi vd., 2013; Li vd., 2011).

$$\dot{Q}_{\text{güneş,gr}} = I A_{\text{Top}} \eta_{\text{op}} \quad (28)$$

Odak yüzeyindeki hava akışının doğal taşınım olup olmadığını bulmak için, Grashof ve Reynolds sayılarına bağlı $\frac{Gr}{Re_L^2} \geq 1$ olan koşulunun sağlanması gerekmektedir. Güneş fırınının odak yüzeyinden çevreye olan taşınım ile ısı transferi Newton'un Soğuma Kanunu olan Denklem (29) ile hesaplandı.

$$\dot{Q}_{\text{taş}} = h_o A_o (T_{\text{odak}} - T_a) \quad (29)$$

Düz bir levha üzerindeki akış için tanımlanan odak yüzeyinin ısı taşınım katsayısının bulunması için, Nusselt sayısının bilinmesi gerekmektedir. Nusselt sayısı, laminar akış durumu için Denklem (30) ile hesaplandı (Incropera ve DeWitt, 2000).

$$Nu_L = \frac{h_L L}{k_f} = 0,332 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} ; Pr \geq 0,6 \quad (30)$$

Burada odak bölgesindeki havanın Reynolds sayısının ($Re = \frac{VL}{\nu}$) ve Prandtl sayısının bilinmesi gereklidir. Odak bölgesindeki ortalama rüzgâr hızından yararlanarak Reynolds sayısı hesaplandı. Ayrıca ortalama odak sıcaklığı 500 K olarak hava için, $Pr = 0,684$ ve $k_f = 0,0407$ W/mK olarak hesaplamalarda kullanıldı (Incropera ve DeWitt, 2000).

Uyarlamalı fırında silindirik olan odak yüzeyinden olan ısı taşınım miktarını bulmak için, sıcak dikey plakadan çevreye olan doğal taşınım Denklem (31) ile hesaplandı.

$$\dot{Q}_{taş} = \bar{h} A_s (T_{odak} - T_a) \quad (31)$$

Burada odak yüzeyi ortalama ısı taşınım katsayısını $\bar{h}$ bulmak için, Rayleigh (Ra) değerine bağlı dikey levha bağlantıları kullanıldı. Tüm Ra sayılarını kapsayan Churchill ve Chu tarafından önerilen, dikey levhalar için Nusselt sayısı Denklem (32) ile hesaplandı (Churchill ve Chu, 1975). Ayrıca Rayleigh sayısı, Grashof ve Prandtl sayılarının çarpımı olarak Denklem (33) ile hesaplandı.

$$\overline{Nu}_L = \left(0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right)^2 \quad (32)$$

$$Ra_L = Gr \times Pr = \frac{g \beta (T_{odak} - T_a) L^3}{\nu \alpha} \quad (33)$$

Burada tüm özellikler $T_f = (T_{odak} + T_a)/2$ film sıcaklığında hesaplandı. Ayrıca genleşme katsayısı $\beta = T_f^{-1}$, yer çekimi ivmesi g ($9,81 \text{ m/s}^2$) ve L ise odak geometrisine bağlı dikey uzunluktur.

Odak alanından ışıınım ile ısı kaybının olduğu varsayılarak, halka dizisi yoğunlaştırıcı sisteminin odaktaki bir metalik alıcının termal verimi Denklem (34) ile hesaplandı (Neber ve Lee, 2012; Özcan ve Demirtaş, 2021).

$$\eta_{al} = \frac{\dot{Q}_{depo}}{\dot{Q}_{güneş,gr}} = \frac{\eta_{Op} \times I \times \alpha \times A_{Top} - (\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{taş})}{I A_{Top} \eta_{Op}} \quad (34)$$

Alıcı verim hesabında, α malzeme yutunum katsayısı, ε malzeme yayınım katsayısı, T_{odak} odadaki alıcı yüzeyi sıcaklığı, T_a atmosfer sıcaklığı ve $\dot{Q}_{güneş, gr}$ birim zamanda fırına giren güneş enerjisi gücü (W) olarak tanımlandı. Ayrıca alıcı malzeme olarak kullanılan demir çelik metalin yutunum katsayıları ($\alpha=0,70-0,80$) ve yayınım katsayıları ($\varepsilon=0,30-0,57$) dikkate alınarak alıcı verimi hesaplandı (Touloukian & DeWitt, 1970).

2.3.3. Güneş Fırındaki Sıcaklık Dağılımı ve Eritme Debisinin Hesaplanması

Çevresi yalıtılan fırın üzerindeki odak yüzeyine gelen enerji, iletim yoluyla fırın içerisindeki FDM'ye aktarılır. FDM üzerinde depolanan termal enerji iletim ile aktarılan enerjiye eşitlenerek fırın içindeki sıcaklık dağılımı Denklem (35) ile hesaplandı (Asgari vd., 2021).

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} + \rho V L_e \frac{d\beta(T)}{dt} = \frac{kA}{l} (T_{od} - T) \quad (35)$$

Faz değişim malzemesinin sıvı kısmını temsil eden β Denklem (36) ile tanımlandı (Asgari vd., 2021). Böylece β terimi sıcaklık (T) cinsinden yazılarak diferansiyel formdaki denklem çözüldü.

$$\beta(T) = \frac{(T - T_m + \frac{T_0}{2})}{T_0}; \beta = 0 \text{ ise } T < (T_m - T_0) \text{ ve } \beta = 1 \text{ ise } T > (T_m + T_0) \quad (36)$$

Burada FDM erime sıcaklığı T_m (K), katı-sıvı faz değişim aralığı T_0 (K), inorganik tuzun yoğunluğu ρ (kg m^{-3}), tuzun hacmi V (m^3), tuzun özgül ısı c_p ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), zaman t (s), tuzun erime gizli ısı L_e (J kg^{-1}) olarak tanımlandı. Ayrıca tuzun ısı iletim katsayısı k , sıcaklık uygulanan yüzey alanı A , tuz için duvar kalınlığı l , odak bölgesindeki tuzun sıcaklığı T_1 , istenen fırın içi tuzun sıcaklığı T (K) olarak ifade edildi. İnorganik tuzun katı kısmının değeri $K = (1 - \beta)$ şeklinde tanımlandı.

$$\dot{Q}_{gir} - \dot{Q}_{çık} + \dot{Q}_{üre} = \dot{Q}_{de} \quad (37)$$

Tasarlanan fırında kimyasal reaksiyonun veya enerji üretiminin ($E_{üre}=0$) olmadığı varsayımı ve mükemmel bir yalıtımın olmadığı güneş fırını için termal enerji dengesi Denklem (38) ile verildi.

$$\dot{Q}_{gün} - (\dot{Q}_{deş} + \dot{Q}_k) = \dot{Q}_{de} \quad (38)$$

Güneş enerjisinin olmadığı durumlar için depolanan enerji fırından deşarj edilmektedir. Bu durumda Denklem (39)'daki eşitlik elde edildi.

$$\dot{Q}_{de} - \dot{Q}_k = \dot{Q}_{deş} \quad (39)$$

FDM olarak inorganik tuzda depolanan enerji miktarı, FDM'nin ortalama sıcaklığına göre hesaplandı. Katı-sıvı faz değişimi sırasında FDM'de ve ısı transfer akışkanında depolanan toplam enerji miktarı Denklem (40) ile hesaplandı (Lane, 1983; Sharma et al., 2009; Dinçer and Rosen, 2011; Subramaniam and Senthil, 2021).

$$\dot{Q}_{de} = \int_{T_i}^{T_m} \dot{m}_{FDM} c_{FDM(k)} dT + \dot{m}_{FDM} L_e + \int_{T_m}^{T_f} \dot{m}_{FDM} c_{FDM(s)} dT \quad (40)$$

Güneş fırını termal enerji verimi, faydalı enerjinin fırına gelen yoğunlaştırılmış güneş enerjisine oranı olarak tanımlandı. Tasarlanan yeni halka dizisi yoğunlaştırıcı sisteminde, yararlı enerji olarak FDM erime gizli ısısı ve duyulur ısısı dikkate alınarak, fırının birinci kanun verimi Denklem (41) ile hesaplandı.

$$\eta_{fır} = 1 - \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_{gün}} = \frac{\dot{Q}_{de}}{A_{HDY} I \eta_{op} \tau \alpha_s} = \frac{\dot{m} (1-\beta) c_{FDM(k)} (T_m - T_i) + \dot{m} \beta L_{ks} + \dot{m} \beta c_{FDM(s)} (T_f - T_m)}{A_{HDY} I \eta_{op} \tau \alpha_s} \quad (41)$$

Burada tuzun ilk sıcaklığı T_i , tuzun erime noktası sıcaklığı T_m ve tuzun ortalama sıvı sıcaklığı T_f , fırından ışıınım ve taşınım ile kaybedilen enerji miktarı Q_k olarak ifade edilmektedir. I ışıınım şiddeti için, analitik olarak hesaplamalarda 1006 W m^{-2} sabit olarak alınırken deneysel hesaplamalarda ölçülen güneş şiddeti kullanıldı.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisini verimli kullanmak için, optik kayıplar ve fırın kayıplarının azaltılması gereklidir. Özellikle radyasyon ve taşınım kayıpları en aza indirilerek alıcı veriminde artış sağlandı. Odak bölgesinde taşınım kaybının giderilmesinde kuvars cam ve uyarlamalı fırında ise odak alanında silindirik paslanmaz çelik kullanıldı. İnorganik tuzun tamamen sıvı hale getirilerek şarj durumunda, toplam güneş-termal dönüşüm verimi Denklem (42) ile hesaplandı (Fletcher and Moen, 1977; Romero and Steinfeld, 2012; Steinfeld, 2019; Garcia vd., 2019).

$$\eta_{Thermal} = \eta_{Op} \times \eta_{Fır} \times \eta_{Carnot} \quad (42)$$

Burada Carnot verimi Denklem (43) ile tanımlandı (Steinfeld, 2019; Garcia vd., 2019).

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_a}{T_f} \quad (43)$$

Güneş fırınında, helisel eşanjöre aktarılan enerjinin fırında depolanan enerjiye oranı olarak eşanjör enerji verimi tanımlandı. Fırında helisel eşanjör enerji dönüşüm verimi Denklem (44) ile hesaplandı.

$$\eta_{f,es} = \frac{\dot{Q}_{es}}{\dot{Q}_{de}} = \frac{\dot{m}_{ITA} \times c_{p,ITA} \times (T_{\zeta} - T_g)}{\dot{m}_{c_{FDM(k)}}(T_m - T_i) + \dot{m}_{L_{ks}} + \dot{m}_{c_{FDM(s)}}(T_f - T_m)} \quad (44)$$

2.3.5. Isı Depolama Tankı Üzerinde Yapılan Termal Hesaplamalar

Termal enerji depolama alanında faz değişim malzemesi önemli bir yere sahiptir. Faz değişim malzemesi, termal enerjiyi (sıvı veya katı fazda) üzerinde belli bir süre tutabilmektedir. Şarj esnasında, uygun güneş radyasyonu olduğu durumda ısı transfer akışkanı tarafından ısı depolanmaya başlanabilmektedir. Yoğunlaştırıcılar ile önce fırındaki FDM1 (Hitec tuz) eritilerek ilk depolama sağlanır. Aynı zamanda fırındaki helisel eşanjör içerisinden geçen ısı transfer akışkanı (termal yağ veya motor yağı) dolaşımı sayesinde ısı depolama tankındaki daha düşük erime noktalı faz değişim malzemesine (Ca, Na, K; NO₃-FDM2) termal enerji aktarılır.

Isı depolama tankı üzerinde yapılan Termodinamik analizler aşağıda verilmektedir. Şarj durumunda yalıtımlı ısı depolama tankında ısı transfer akışkanından faz değişim malzemesine sağlanan giren enerji Denklem (45) ile hesaplandı (Mahfuz vd., 2014).

$$Q_{g,ITA} = \dot{m}_{ITA} \times c_{p,ITA} \times (T_g - T_c) \quad (45)$$

Deşarj durumunda depolama tankında faz değişim malzemesinden ısı transfer akışkanı ile çıkan enerji Denklem (46) ile hesaplandı.

$$Q_{de,FDM} = \dot{m}_{FDM} \times c_{p,FDM} \times (T_{de,s} - T_{de,i}) \quad (46)$$

Burada T_g ve T_c ısı transfer akışkanı yağın depolama tankına giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır. Isı depolama tankının termal enerji verimi ise, FDM2’de depolanan termal enerjinin ısı transfer akışkanı yoluyla giren enerjiye oranı olarak Denklem (47) ile hesaplandı (Mahfuz vd., 2014).

$$\eta_{d,eş} = \frac{\dot{Q}_{de,FDM}}{\dot{Q}_{g,ITA}} \quad (47)$$

Güneş radyasyonunun olmadığı durumda depolanan termal enerji ısı transfer akışkanına aktarılır. Faz değişim malzemesi aracılığıyla helisel boru eşanjör ile ısıtılan ısı transfer akışkanı (yağ) pompalanarak kullanıma sunulur. Depolama sonunda faz değişim malzemesi katılaşır ortam sıcaklığına düşerek deşarj tamamlanır. Eğer buhar veya sıcak su kullanımı sağlanacak ise, ısı transfer akışkanı (yağ) bir kızgın yağ eşanjöründen geçirilerek kullanıma sunulur.

2.3.6. HDY, Güneş Fırını ve Isı Depolama Tankının Belirsizlik Analizi

Sayısal ve teorik termal analizi için yapılan ölçme hataları ve varsayım hatalarından dolayı belirsizlik analizi yapıldı. Tablo 11’de halka dizisi yoğunlaştırıcısı için bazı hata değerleri verildi. Bu verilere göre ısı yoğunlaştırıcı sistemin Denklem (48) ile belirsizlik eşitliği yardımıyla belirsizlik oranı yaklaşık %5,85 değerinde hesaplandı (Kline ve McClintock, 1953).

$$B_{HDY,e} = [(e_{sl})^2 + (e_{sen})^2 + (e_{dr})^2 + (e_{foc})^2 + (e_{ref})^2 + (e_{in})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

Tablo 11. Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcı için bazı hata türleri ve oranları

Hata türleri	Hata oranı (°)
Yüzey eğimi açısı (e_{sl})	$\pm \%1,5$
Takip sistemi ışın alıcısı (e_{sen})	$\pm \%1,1$
DC motor sürücü kol açısı (e_{dr})	$\pm \%1,1$
Alıcıya odaklanma açısı (e_{foc})	$\pm \%4,4$
Yüzey yansıması açısı (e_{ref})	$\pm \%2,2$
Gelen ışın açısı (e_{in})	$\pm \%2,2$

Fırında ve depolama tankında ölçümlerdeki hatalara bağlı belirsizlik analizleri yapıldı. Genel olarak ölçümlerdeki hatalar, dikkatsizlik, sabit ve sistematik hatalardan oluşmaktadır. Sıcaklık ölçümünde ortaya çıkabilecek hatalar, deneylerde kullanılan ölçüm aletlerine bağlı olarak değişmektedir. Deneylerde güneş fırın ve ısı depolama tankı üzerinde sıcaklık ölçümlerinden kaynaklanan hatalar ve yaklaşık oranları şunlardır;

h1- Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan hata $\pm \%0,75$ °C

h2- Dijital termometreden kaynaklanan ortalama hata $\pm \%0,5$ °C

h3- Odak sıcaklığı ölçülmesinde yapılan ortalama hata $\pm \%5$ °C

h4- Fırın iç sıcaklık ölçülmesinde yapılan ortalama hata $\pm \%4$ °C

h5- Isı depolama tankındaki sıcaklık ölçülmesinde yapılan ortalama hata $\pm \%4$ °C

h6- Isı depolama yağ çıkışı ve yağ girişi sıcaklık ölçümünde yapılan hata $\pm \%5$ °C

Odak sıcaklığı ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata B_h Denklem (49) ile hesaplandı. Odak sıcaklığı ölçümünde yapılan ortalama belirsizlik oranı yaklaşık $\%5,01$ 'dir.

$$B_{odak,h} = [(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

Fırın iç sıcaklığı ve ısı depolama tankı iç sıcaklık ölçümündeki belirsizlik oranları $\%5,7$ 'dir. Isı depolama tankında helisel borudan çıkan yağın sıcaklık ölçümündeki belirsizlik oranı $\%5,08$ 'dir.

Güneş şiddetinin ölçülmesindeki hatalar, ölçme yöntemi ve ölçü aletlerine bağlı olarak değişmektedir. Deneylerde ışıyım ölçümlerinden kaynaklanan bazı hata ve yaklaşık oranları şunlardır;

s_1 Solarimetreden kaynaklanan ortalama hata $\pm 5\% \text{ W/m}^2$

s_2 Solarimetre'nin yerleştirildiği konuma bağlı hata $\pm 1\% \text{ W/m}^2$

Bu durumda, Solarimetre ile ışıyım ölçümündeki belirsizlik oranı yaklaşık %5,1 'dir. Sıcaklık ve ışıyım ölçümlerinde, belirsizlik oranlarının yeterli hassasiyette olduğu değerlendirilmektedir.

2.4. Sayısal Yöntemde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Çözümlemesi

HAD yöntemi ile güneş fırınları ve ısı depolama tankı modeli için termal analiz hesaplamaları yapıldı.

2.4.1. Güneş Fırınında HAD Modellemesi

İnorganik tuzların erimesinin modellenmesi ve simülasyonu için, ANSYS (Fluent) 19.0 yazılımının erime ve katılaşma modeli kullanıldı. ANSYS Fluent ile katılaşma ve erime sürecini modellemek için sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır (Ansys, 2015). Entalpi dengesine dayalı olarak, sıvı kısmı (fraksiyonu) her yinelemeden sonra hesaplanır. Bu yöntemde faz değişim ara yüzünün, sıvı kısmının değeri 0-1 arasında değiştirilmektedir. Malzeme katılaştığında geçirgenlik 0 olurken, o bölgede hız sıfıra düşmüştür (URL-5, 2023; Hassab et al., 2017; Arıcı et al., 2017; Chauhan et al., 2017).

Sayısal modellemedeki başlangıç ve sınır şartları şunlardır:

1. Erime ve katılaşma geçici rejim olarak 2 ve 3 boyutlu durumları ele alındı.
2. İnorganik tuzların (FDM) sıvı haldeki hareketi sıkıştırılmaz, akışkan Newton tipi olarak alındı.
3. İki fazlı akış, doğal taşınım ile ısı transferi ve laminar akış şartları HAD'nde ele alındı.
4. FDM'nin özgül ısı katsayısı, viskozitesi, yoğunluğu ve ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği kabul edildi.
5. Viskoz ısıtma ve hacim genişlemesi göz ardı edildi.
6. Fırın içindeki FDM'de ısı üretimi olmadığı varsayıldı.

2.4.2. HAD Modellenmesinde Kullanılan Denklemler

Katılaşma erime sürecini modellemek için, ANSYS Fluentte bir entalpi-gözeneklilik (porozite) tekniği kullanıldı (Voller, 1987; Voller vd., 1987; Voller ve Prakash, 1987). Bu teknikte, eriyik arayüzü açıkça izlenmemektedir. Bunun yerine, sıvı formdaki hücresel hacim kısmını gösteren sıvı kısmı adı verilen miktar, alandaki her bir hücre ile ilişkilendirildi. Malzeme eridikçe gözenekliliğin 0'dan 1'e yükselerek gözenekli bir ortam olarak modellendi.

Erime ve katılaşma problemleri için temel denklemler, enerji denklemi Denklem (50) ile çözümlendi (Ansys, 2015). Süreklilik denklemi Denklem (51) ve momentum denklemleri x, y ve z yönlerinde Denklem (52), Denklem (53) ve Denklem (54) ile formüle edildi (Zhang vd., 2015; URL-5, 2023).

$$\frac{\partial (\rho_f H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{U} H) = \nabla \cdot (k_f \nabla T) + S \quad (50)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla (\rho_f \vec{U}) = 0 \quad (51)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{U} \nabla u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 u - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f F_1}{\sqrt{K}} |u| \right) u + A_s u \quad (52)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{U} \nabla v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 v - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f F_1}{\sqrt{K}} |v| \right) v + A_s v \quad (53)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon^2} (\vec{U} \nabla w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 w - \left(\frac{\mu_f}{K} + \frac{\rho_f F_1}{\sqrt{K}} |w| \right) w + \rho_f g \beta_{te} (T - T_m) + A_s w \quad (54)$$

Burada, k_f , ρ_f , μ_f , β_{te} , ε , U sırasıyla inorganik tuzun ısı iletkenliği, yoğunluğu, dinamik viskozitesi, termal genleşme katsayısı, gözeneklilik katsayısı, akış hızıdır. K ve F_1 sırasıyla geçirgenlik ve atalet direncidir. Ayrıca H eriyik malzeme entalpisidir ve duyulur ile gizli ısının entalpi toplamı olarak Denklem (55) ile hesaplandı (URL-5, 2023).

$$H = h + \Delta H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \beta L_e \quad (55)$$

Katı sıvı karışımında, eriyik sıvı miktarı için β aşağıdaki gibi tanımlandı (URL-5, 2023; Arıcı et al., 2017; Hassab et al., 2017).

Eğer $T < T_{katılaşma}$ ise $\beta = 0$ 'dır. Eğer $T > T_{sıvılaşma}$ ise $\beta = 1$ 'dir.

Arayüzde $T_{katılaşma} < T < T_{sıvılaşma}$ ise $\beta = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}}$ şeklindedir.

Kısmi katı bölgedeki azalan gözeneklilik nedeniyle momentum kaybı Denklem (56) ile hesaplandı (URL-5, 2023).

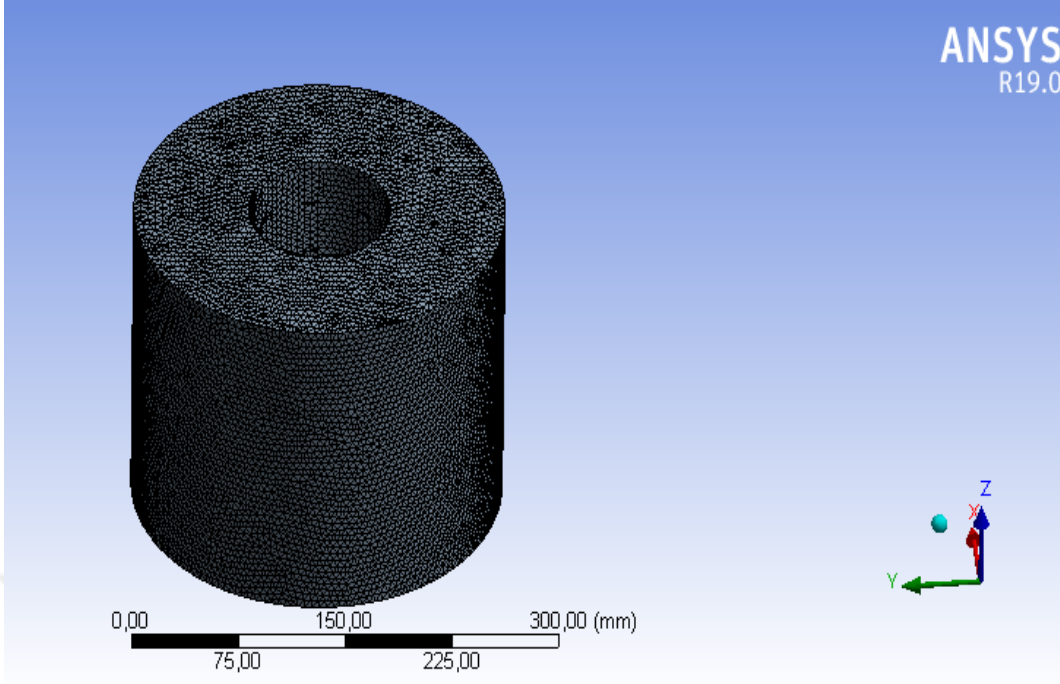
$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3-\varepsilon)} A_{ks}(\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (56)$$

Burada β sıvı hacim oranıdır, ε sıfıra bölmeyi önlemek için çok küçük bir sayıdır (0,001), kısmi katı-sıvı bölge sabiti olan A_{ks} yaklaşık olarak 10^4 alındı (Zhang vd., 2015). Katılaştırmış malzemenin alan dışına çekilmediğinden dolayı katı hızı ise $\vec{v}_p = 0$ alındı.

2.4.3. Güneş Fırınının Üç Boyutlu HAD Modellemesi

Tasarlanan fırın modeline ait üç boyutlu mesh dosyası sayısal analiz yapan çözücü modül olan Fluent'e aktarıldı. Modelleme yapılırken Fluent kullanıcıya Double Precision ve Serial olmak üzere seçenek sunmaktadır. Serial seçilirse, bilgisayarın bir çekirdeği kullanılırken, paralel seçilirse, bilgisayarın kaç çekirdeği varsa hepsini seçme şansı olur. Bu yüzden bu çalışmada daha hızlı sonuç almak için paralel seçilirken, 4 çekirdekli bilgisayarda işlemler yapıldı. Check butonu ile mesh yapısı ve koordinatlarda kayma olup olmadığı kontrol edildi. Fluentte bulunan Report Quality ise ağın kalite özelliklerini ekranda okuyabilmemizi sağlamaktadır. Orthogonal Quality 0 ile 1 arasında değişen bir değer olup, 1'e yakın olması iyi bir ağ yapısının olduğu anlamına gelmektedir. Ağ yapısı için, Orthogonal quality değeri 0,84 iken, Skewness sayısı 0,85 olarak hedeflendi. General modülünde çözücü (solver) tipi tüm analizlerde akış sıkıştırılamaz ve sürekli olmadığı için basınca bağlı (Pressure-based) ve zamana bağlı (transient) olarak seçildi.

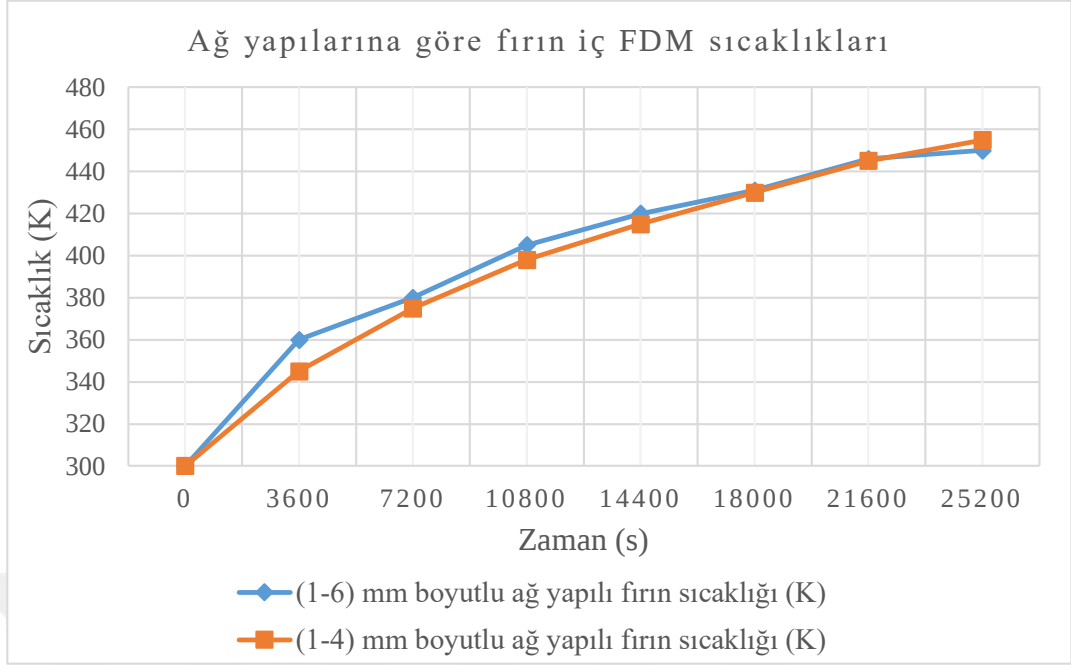
FDM eritme esaslı problem, ANSYS (Fluent) R19 programı ile sonlu eleman yöntemi ile çözülmektedir. Şekil 19'da gösterildiği gibi üç boyutlu model, boyu 200 mm ve çapı 260 mm silindirik olarak tasarlanan faz değişim malzemesinin element boyutu (1-5) mm aralığında, boyut fonksiyonu ise uniform olarak, düğüm sayısı 85.980 ve eleman sayısı 468.279 olan ağ yapısına sahiptir. Enerji ve momentum denklemlerindeki taşınım terimleri (h), ikinci dereceden olan enterpolasyon şeması kullanılarak ayrıklaştırıldı. Simülasyon, basınca bağlı ve zaman olarak geçici rejimde gerçekleştirildi. Fırındaki faz değişim malzemesi (akış) sıkıştırılamaz olduğundan basınç ve hız alanları, momentum ve süreklilik denklemlerini kullanan basınç ve hız arasındaki bağlantı, SIMPLE algoritması ile çözüldü. SIMPLE, laminar akışlar için daha doğru sonuçlar vermektedir. Basınç enterpolasyonu için, her türlü ağ yapısına elverişli olan PRESTO seçimi yapıldı. Zaman adımı boyutu 0,05 s, zaman adımı başına iterasyon sayısı 21 ve istenilen zaman adımı sayısı yazılarak hesaplatıldı.



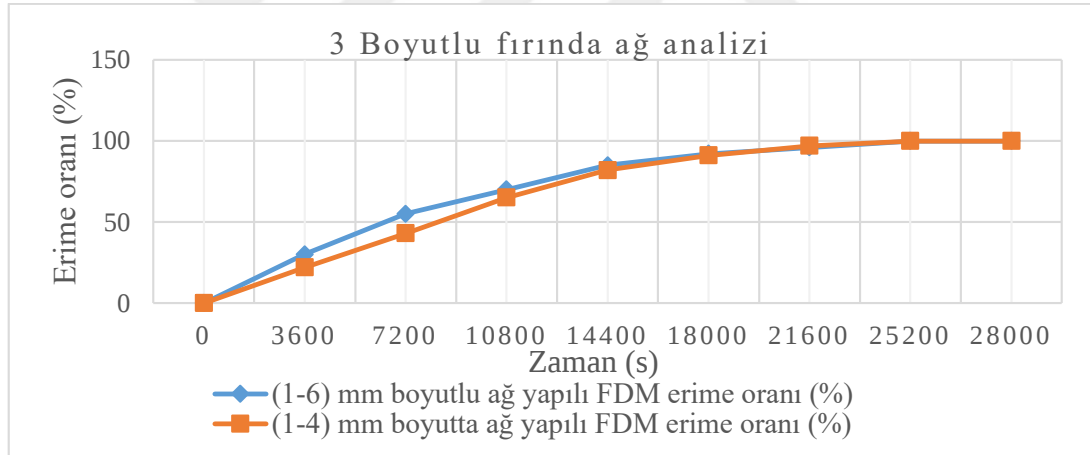
Şekil 19. Tasarlanan güneş fırınının ağ yapılı FDM hacminin şematik diyagramı

2.4.4. Üç Boyutlu Fırındaki FDM Ağ Yapılarının Denetlenmesi

Sayısal yöntemde, yapılan çalışmada modelin ağ yapısından etkilenmemesi gerekir. Ayrıca analiz sonuçlarının ayırıklaştırma işleminden kaynaklı herhangi bir hata içermemesi çalışmanın güvenilirliği açısından önemlidir. Bu sebeple mevcut çalışma sonuçlarının ağ yapısından etkilenmediği ayırıklaştırma modelini bulmak için, ağ bağımsızlık testi gerçekleştirildi. Buna göre, üç boyutlu fırın modelinin düğüm sayısı 85.000 ve ağ (mesh) elemanı sayısı yaklaşık 450.000 ulaştıktan sonra sonuçlarda değişme gözlemlenmedi. Dolayısıyla üç boyutlu modelde eleman sayısı 468.279 olan ağ yapısı kullanıldı. Üç boyutlu modellemede ağ yapısı analizi olarak fırın içindeki FDM sıcaklık değerleri Şekil 20’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi iki farklı eleman sayılı model sonuçları birbirine yakındır. Ancak daha küçük boyutlu modeller gerçek değerlere daha yakındır. Şekil 21’de görüldüğü gibi, erime oranlarının zamana göre değişimleri birbirine oldukça yakındır. Böylece ağ yapılarına bağlı olarak sonuçlarda aşırı bir değişim gözlenmedi.



Şekil 20. Ağ yapısı analizi için uyarlamalı fırın içindeki FDM sıcaklık değerleri



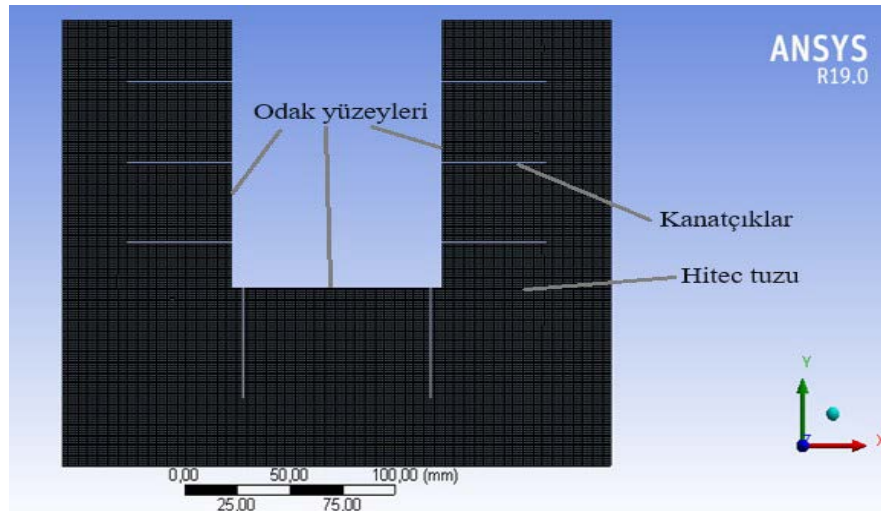
Şekil 21. Ağ yapısı analizi için uyarlamalı fırın içindeki FDM erime oranları

2.4.5. Güneş Fırınının İki Boyutlu HAD Modellemesi

Güneş fırını modellenmesinde eleman boyutu ve düğüm sayılarının çok fazla olmasından dolayı ve bilgisayar hızına bağlı olarak çok uzun zaman alan sayısal çözümlemenin, 2 boyutlu FDM1 modeli tasarlanarak daha hızlı sonuçlara ulaşıldı. Bu modelin, FDM1 eleman boyutu 1 mm ve maksimum 2 mm aralığında, düğüm sayısı 16.509 ve eleman sayısı 16.255, eleman kalitesi olarak Orthogonal quality değeri 0,99 ve boyut fonksiyonu olarak daha gerçekçi sonuçlara ulaştığı için uniform HAD (CFD) Fluent olarak

ağ yapısı oluşturuldu. Modelin sınır koşulları olarak, odak yüzeyi sıcaklığı 550 K ve diğer yüzeyler yaklaşık 305 K değerinde sabit alınarak taşınım ve ışıınım kayıplarının olduğu varsayıldı. Deneysel sonuçlara bağlı olarak, fırın üst yüzeyi için sıcaklık taşınım ve ışıınım sıcaklık değerleri 330 K değeri alındı. Bu modelde viskoz akış, düşük hızda kabulü ile laminar seçildi. Basınç ve hız alanları, momentum ve süreklilik denklemlerini kullanan basınç ve hız arasındaki bağlantı, SIMPLE algoritması ile çözüldü. Basınç enterpolasyonu için, her türlü ağ yapısına elverişli olan PRESTO seçimi yapıldı. Enerji, momentum ve geçiş dönüşüm denklemleri de ikinci dereceden seçildi. Bu model ile solar tuz için sayısal olarak uygulama yapıldı.

Fırın içerisinde ısı transferini arttırmak için fırın içerisine ısı iletim katsayısı yüksek paslanmaz çelik metal silindirik bir odak yüzeyi oluşturuldu. Bu silindirik yüzey üzerine ısıının fırın içerisine transfer edilmesi için metal kanatçıklar ile birleştirildi. Şekil 22’de uyarlamalı (ışın toplayıcı) fırının iki boyutlu mesh görüntüsü verilmektedir. Odak alanına gelen gücün aynı zamanda kanatçıklara iletildiği varsayımı yapıldı. Bu modelin FDM₁ eleman boyutu 1 mm, düğüm sayısı 40.581 ve eleman sayısı 39.600 ve boyut fonksiyonu olarak uniform seçilerek HAD (CFD) Fluent olarak ağ yapısı oluşturuldu. Modelin sınır koşulları olarak, odak yüzeyi sıcaklığı 500 K ve diğer yüzeyler yaklaşık 305 K değerinde sabit alınarak taşınım ve ışıınım kayıplarının olduğu varsayıldı. Deneysel sonuçlara bağlı olarak, fırın üst yüzeyi için sıcaklık taşınım ve ışıınım sıcaklık değerleri 330 K değeri alındı. Kararlı bir sıcaklık ve erime oranlarının artışına bağlı olarak en uygun zaman adımı 0,3 s ve iterasyon sayısı olarak 25 alınarak çözümleme yapıldı.



Şekil 22. Uyarlamalı fırının Fluentte oluşturulan ağ yapısının iki boyutlu görüntüsü

2.4.6. Fırındaki Helisel Boruda Akışın HAD Modellemesi

Fırın içinde eşanjör görevi gören helisel borunun akışının modellemesi sayısal olarak hesaplanmasında ANSYS 19,0 Fluent Flow programından yararlanıldı. Silindirik fırın içerisine yerleştirilmesi bakımından ve akışın daha kolay hareketinin sağlanması için helisel şeklinde borulardan oluşması amaçlandı. Üç boyutlu katı modelleme (Solidworks) ile çizimi yapılan helisel eşanjör, geometrisinin ANSYS Fluent flow'a aktarılarak 121.776 düğümünden ve 110.321 eleman sayısından oluşan bir ağ yapısına sahiptir. Eleman boyutları ise 0,1 mm ve 10 mm arasındadır. Programda boru akışı için, enerji denklemi ve viskoz modeli olarak düşük hızda akış olduğu için laminer akış kullanılarak hesaplama yapıldı. Borudaki yağın debisi (0,001-0,005) kg/s aralığında olduğundan Reynolds sayısı değeri (sıfıra yakın) oldukça düşüktür. Fırın içindeki helisel borudaki akışın dış boru yüzey sıcaklığı sabit olarak fırın eriyik sıcaklığı kabul edilerek işlemler yapıldı. Ayrıca helisel boru malzemesi eriyik tuzlarla korozyon etkileşimi çok düşük olan 304 paslanmaz çelik ve ısı transfer akışkanı olarak ANSYS veri tabanında bulunan sıcaklığa bağlı değişen motor yağı (engine oil) seçimi yapıldı. Motor yağının 370 K'deki fiziksel özellikleri Tablo 12'de verilmektedir (Incropera ve DeWitt, 2000). Başlangıç sınır koşulları olarak, boru ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı 300 K, çelik boru için fırın eriyik sıcaklığı dikkate alınarak dış yüzey sıcaklığı yaklaşık 450 K, ısı transfer akışkanı kütleli debisi 0,003 kg/s alındı. Burada kütleli debinin belirlenmesinde yaklaşık değerler (0,001-0,005 kg/s arasında) verilerek zamana göre uygunluğu sağlandı.

Tablo 12. Isı transfer akışkanı motor yağının bazı fiziksel özellikleri

Parametreler	Semboller	Değeri
Yoğunluk	ρ	841,8 kg m ⁻³
Özgül ısı katsayısı	C_p	2206 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Isıl iletkenlik katsayısı	k	0,137 W m ⁻¹ K ⁻¹
Buharlaşma sıcaklığı	T_b	(200-250) °C
Parlama noktası	T_p	250 °C
Dinamik viskozite	μ	0,0186 kg/ms
Kinematik viskozite	ν	22x10 ⁻⁶ m ² /s
Prandtl sayısı	Pr	300

2.4.7. Isı Depolama Tankı HAD Modellemesi

Isı depolama tankında, FDM2 eritme esaslı problem, ANSYS (Fluent) programı ile sonlu eleman yöntemi ile 3 boyutlu olarak modellendi. Isı depolama tankı hacmi 20 lt, boyu 280 mm ve çapı 300 mm silindirik olarak tasarlanan faz değişim malzemesinin eleman boyutu 3 mm, düğüm sayısı 270.272 ve eleman sayısı 1.418.977 olan bir ağ yapısına sahiptir. Isı depolama tankında FDM olarak FDM2 (Ca, K ve Na;NO₃) inorganik tuzu kullanıldı. Programda akış için, enerji denklemi, erime katılaşma denklemleri ve düşük hızda akış olduğu için laminer akış kullanılarak hesaplama yapıldı. Literatürden elde edilen FDM2 değerleri girilerek ve helisel borudaki akış için motor yağı seçilerek, akış sıcaklığı 400 K sabit olarak modelleme yapıldı. Ek olarak, depolama tankı dış yüzeyi, 1 mm kalınlıkta paslanmaz çelik seçilerek ve sıcaklığı 300 K olarak sabit tutularak sınır koşulları sağlandı. FDM2'nin basınç ve hız arasındaki bağlantı, SIMPLE algoritması ile yapıldı ve basınç enterpolasyonu için PRESTO seçimi yapıldı. Zaman adımı boyutu 0,2 s, zaman adımı başına iterasyon sayısı 25 seçilerek ve istenilen zaman adımı sayısı yazılarak çözümleme yapıldı.

2.5. Tezde Çalışılan Entegre Sistemin Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasa Analizleri

HDY sisteminin, güneş fırını ve ısı depolama tankı üzerinde yapılan Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına bağlı analizleri aşağıda verilmektedir.

2.5.1. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcının Ekserji Analizi

HDY2 ısı depolama sisteminin verimliliğini anlamak ve iyileştirmek için termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayanan ekserji analizi yöntemi kullanıldı. Toplam giren ekserjinin, ekserji yıkımı (tersinmezlikler), ekserji kaybı ve depolanan ekserji ile eşitlik dengesi Denklem (57)'de verildi.

$$\sum E_{x,g} = \sum E_{x,depo} + \sum E_{x,k} + \sum E_{x,y} \quad (57)$$

Halka dizisi yoğunlaştırıcıya giren ekserji miktarı Denklem (58) ile tanımlandı (Petela, 2003; Sansaniwal et al., 2018).

$$E_{xg,HDY} = A_{HDY} I \left[1 - \frac{4T_a}{3T_{gün}} + \left(\frac{1T_a}{3T_{gün}} \right)^4 \right] \quad (58)$$

HDY2'den çıkan ekserji miktarı ise giren ekserji ile kaybedilen ekserji farkına eşitlenerek Denklem (59) ile ifade edildi.

$$E_{xç,HDY} = A_{HDY} I \eta_{op} \left[1 - \frac{4T_a}{3T_{gün}} + \left(\frac{1T_a}{3T_{gün}} \right)^4 \right] \left(1 - \frac{T_a}{T_{od}} \right) \quad (59)$$

HDY'nın ekserji verimi, yoğunlaştırıcıdan çıkan ekserjinin (odak noktasına gelen ekserjinin) yoğunlaştırıcıya gelen ekserjiye oranı olarak Denklem (60) ile ifade edildi (Sansaniwal et al., 2018).

$$\psi_{HDY} = \frac{A_{HDY} I \eta_{op} \left[1 - \frac{4T_a}{3T_{gün}} + \left(\frac{1T_a}{3T_{gün}} \right)^4 \right] \left(1 - \frac{T_a}{T_{od}} \right)}{A_{HDY} I \left[1 - \frac{4T_a}{3T_{gün}} + \left(\frac{1T_a}{3T_{gün}} \right)^4 \right]} \quad (60)$$

2.5.2. Güneş Fırınının Ekserji Analizi

Güneş fırınının ekserji verimi, güneş ışıyım kaynağının ekserjisinin FDM'nin ekserjisindeki artışı ile tanımlandı. Fırındaki FDM'nin tamamen sıvı hale geldiği durum için, ısı geri kazanım işlemi sırasında ısı depolama sisteminden geri kazanılan kullanılabilirlik olarak tanımlanan, çıkan ekserji Denklem (61) ile verildi (MacPhee and Dincer, 2009; Saxena and Gaur, 2020; Subramaniam and Senthil, 2021).

$$\dot{E}_{xç,F} = \dot{m}_{FDM} c_p \left[(T_f - T_a) - T_a \ln \left(\frac{T_f}{T_a} \right) \right] + \dot{m}_{FDM} L_e \left(1 - \frac{T_m}{T_f} \right) \quad (61)$$

Isı depolama işlemi sırasında sisteme eklenen kullanılabilirlik olarak, güneş fırınına giren ekserji ise Denklem (62) ile hesaplandı (Sansaniwal et al., 2018).

$$\dot{E}_{xg,F} = A_{HDY} I \eta_{op} \alpha_s \left[1 - \frac{4T_a}{3T_{gün}} + \left(\frac{1T_a}{3T_{gün}} \right)^4 \right] \left(1 - \frac{T_a}{T_{od}} \right) \quad (62)$$

Ekserji verimi, ortam sıcaklığı ve yüzey sıcaklığına bağlı olarak güneş enerjisi girdisi dikkate alınarak FDM'nin güneş fırınındaki faydalı ekserjisine göre belirlendi. Deneysel yöntem ile yapılan termal verim hesabında, fırındaki helisel borudaki yağda depolanan enerji miktarı da faydalı ekserjiye eklenmiştir. Literatürdeki mevcut kaynaklardan yararlanılarak, tasarlanan güneş fırınının ekserji verimi (Ψ), çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı olarak Denklem (63) ile hesaplandı (Sansaniwal vd., 2018; Saxena ve Gaur, 2020; Subramaniam ve Senthil, 2021; Petela, 2003).

$$\psi_{fır} = \frac{\dot{m}_{FDM} c_{p(FDM)} \left[(T_f - T_i) - T_a \ln \left(\frac{T_f}{T_i} \right) \right] + \dot{m}_{FDM} \times L_e \left(1 - \frac{T_m}{T_f} \right)}{A_{HDY} I \eta_{op} \alpha_s \left[1 - \frac{4T_a}{3T_{gün}} + \left(\frac{1}{3} \frac{T_a}{T_{gün}} \right)^4 \right] \left(1 - \frac{T_a}{T_{od}} \right)} \quad (63)$$

Burada $T_{gün}$ güneşin yüzey sıcaklığı (6000 K), T_a çevre veya ortam sıcaklığı (K), T_i ; T_f , faz değişim malzemesi (FDM) ilk ve son sıcaklığı (K) ve $c_{p(FDM)}$ özgül ısı katsayısı olarak tanımlandı.

Güneş fırınındaki helisel eşanjör ekserji verimi iki farklı şekilde hesaplandı. İlk olarak, fırındaki FDM'den helisel borudaki yağa geçen ekserji Denklem (64) ile hesaplandı.

$$\psi_{H,eş} = 1 - \frac{\dot{E}_{x,k}}{\dot{E}_{x,g}} = \frac{\dot{E}_{xç,ITA}}{\dot{E}_{xg,FDM}} \quad (64)$$

Burada helisel borudaki akışkan yağda depolanan ekserji (çıkan ekserji) Denklem (65) ile hesaplandı. FDM'den helisel borudaki akışkan yağa geçen giren ekserji Denklem (66) ile hesaplandı.

$$\dot{E}_{xç,ITA} = \dot{m}_{ITA} c_{p(ITA)} \left[(T_c - T_g) - T_a \ln \left(\frac{T_c}{T_g} \right) \right] \quad (65)$$

$$\dot{E}_{xg,FDM} = \dot{m}_{FDM} c_{p(FDM)} \left[(T_f - T_i) - T_a \ln \left(\frac{T_f}{T_i} \right) \right] \left(1 - \frac{T_i}{T_f} \right) \quad (66)$$

İkinci hesaplama yöntemi olarak faydalı ekserji verimi, helisel borudaki yağa geçen ekserjinin güneş fırınına gelen ekserjiye oranı olarak Denklem (67) ile hesaplandı.

$$\psi_{fay} = \frac{\dot{E}_{xç,ITA}}{\dot{E}_{xg,F}} \quad (67)$$

2.5.3. Isı Depolama Tankının Ekserji Analizi

Isı depolama tankında ısı kaybının olmadığı varsayımı yapılarak, ekserji yıkımı giren ve çıkan ekserji farkına eşitlendi. Yalıtımlı ısı depolama tankının şarj esnasındaki ısı transfer akışkanı ile faz değişimi malzemesine sağlanan ekserji Denklem (68) ile hesaplandı (Mahfuz vd., 2014).

$$\dot{E}_{xg,ITA} = \dot{m}_{ITA} \times c_{p,ITA} \times [(T_g - T_c) - T_a \times \ln\left(\frac{T_g}{T_c}\right)] \quad (68)$$

Isı depolama tankında faz değişim malzemesinden depolanarak çıkan ekserji Denklem (69) ile hesaplandı (MacPhee and Dincer, 2009).

$$\dot{E}_{xç,FDM2} = \dot{m}_{FDM} \times c_{p,FDM} \times [(T_{de,s} - T_{de,i}) - T_a \times \ln\left(\frac{T_{de,s}}{T_{de,i}}\right)] \quad (69)$$

Burada ısı depolama tankında ulaşılan ortalama sıcaklık $T_{de,s}$, depolama tankının yağ çevrimi öncesi sıcaklığı ise $T_{de,i}$ olarak ifade edildi.

Isı depolama tankının şarj esnasında, çıkan ekserjisinin giren ekserjisine oranı olarak ekserji verimi Denklem (70) ile hesaplandı (Mahfuz vd., 2014).

$$\psi_{d,eş} = \frac{\dot{E}_{xç,FDM2}}{\dot{E}_{xg,ITA}} \quad (70)$$

2.5.4. Kurulan Tüm Sistemin Termoekonomik Analizi

Sekiz halka dizisi yoğunlaştırıcı ve ısı depolama sistemi imalatı ile ilgili olarak yapılan tüm harcamalar Tablo 13'te kısaca verilmektedir. Sistemin kurulumu için yapılan tüm harcama miktarı 1816 \$ olarak hesaplandı. Bu tarihlerde (Aralık 2023'te) 1 dolar yaklaşık 29 Türk lirasına eşit olarak alındı. Deneysel verilere göre HDY sisteminin günde 11 saatte ürettiği enerji (2 kW) bakımından birim tüketim maliyeti yaklaşık 1,4 \$/kWh olarak hesaplandı.

Tablo 13. HDY2 ısı depolama sisteminin maliyet hesabı

Ürün/malzeme/işlem	Birim fiyat	Toplam fiyat
Cam elyaf	2,58 \$	28,4 \$
Epoksi reçine	15,6 \$	117 \$
Polyester çelik macun	4,3 \$	30,1 \$
Metalik sac (13 m)	3,97 \$	51,6 \$
Güneş fırını (paslanmaz çelik)	74,4 \$	74,4 \$
Spiral eşanjör (paslanmaz çelik)	20,6 \$	41,2 \$
Isı depolama tankı	91,25 \$	91,25 \$
İki eksenli güneş takip sistemi parçaları	224 \$	224 \$
Sarf harcamalar (metal, kaynak, rulman vb.)	300 \$	300 \$
Isıl işlem için pürmüz, ısıtıcı, yakıt vb.	51,65 \$	51,65 \$
Halka kalıbı için 3D yazıcı çıktısı	27,5 \$	137,7 \$
Parabolik yüzey için özel merdane üretimi	68,86 \$	68,86 \$
Sodyum Nitrat	2,07 \$	51,6 \$
Potasyum Nitrat	2,13 \$	53,3 \$
Sodyum Nitrit	2,07 \$	51,6 \$
Net ayna yansıtıcı folyo	7,75 \$	85,22 \$
Kalsiyum Nitrat	3,1 \$	31 \$
Isıya dayanıklı silikon	6,2 \$	6,2 \$
Esnek çelik boru, vana, işçilik vb.	25,8 \$	51,65 \$
Fresnel lens (35 cm çaplı)	29,3 \$	29,3 \$
Akü	24,1 \$	24,1 \$
Motor yağı	2,07 \$	12,4 \$
12 V DC Sıvı aktarma pompası	51,65 \$	103,3 \$
İnfrared lamba 500 W	8,61 \$	34,43 \$
Toplam maliyet		1.816 \$

Termoekolojik analiz, ekolojik performans parametreleri (ECOP) ile ifade edilmiştir. Bu katsayı güneş yoğunlaştırıcı ısı depolama sistemi için, net faydalı ekserji çıkışının ekserji yıkımına oranı olarak ifade edildi (Çalışkan, 2020).

Termoekonomik analiz, tüm sistemin enerji kaybının ($\dot{E}_k$) toplam HDY2 ısı depolama sistemi kurulum maliyetine (Z_{kur}) oranı olarak Denklem (71) ile hesaplandı ve parametre (R_{en}) ile ifade edildi (Rosen & Dincer, 2003; Çalışkan, 2020).

$$R_{en} = \frac{\dot{E}_k}{Z_{kur}} \quad (71)$$

Burada $\dot{E}_k$, $Q_{k,f}$ fırından taşınım ve ışıınım ile ısı kaybına ve $Q_{k,de}$ ısı depolama tankından çevreye ısı kaybına eşittir.

Termoekonomik faktör (f_k) Denklem (72) ile tanımlandı (Bejan vd., 1995).

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{yıkım_k}} \quad (72)$$

Termoekonomik faktör, sistemin tersinmezlik maliyeti azaldığında sistemin ideal çalışma şartlarındaki maliyet koşullarına ulaşıldığını ve ekserji yıkımının azalması ile maliyetin azaldığını gösteren bir kriterdir. Termoekonomiklik kriterinin 1 değerine ulaşması o bileşenin ekonomik çalışmasının göstergesidir.

2.5.5. Tüm sistemin Eksergoekonomik Analizi

Eksergoekonomik analizin amacı, sistem süreçlerinin maliyetini ve sistemin ürün akışlarının birim başına ekserji maliyetini ortaya çıkarmaktır. İşletimden elde edilen ürünlerin birim ekserji maliyeti çevrimin ekonomik optimizasyonu için kullanılmaktadır. Her bir ekserji ürünün birim maliyetini hesaplamak için bir maliyet denge denklemi ve yardımcı denklemler, çevrimin her bileşenine uygulanmaktadır. Ekserji maliyet değerlendirilmesinde, her bileşen ekserji akımı maliyeti ile ilişkilendirilir. Sistemdeki enerji aktarımı ile ekserji transferi gerçekleşirken tersinmezlik sebebiyle ekserjinin bir bölümü yok olmaktadır. Tüm bileşenlerin ekserji maliyeti Denklem (73) ile hesaplandı. Dönem maliyeti fiyatı $\dot{C}_j$ (\$/h), ekserjinin birim maliyeti c_j (\$/J) ve $\dot{E}$ ekserji akışı olarak ifade edildi (Luo vd., 2019; Nacak vd., 2023).

$$\sum (\dot{E}_g c_j)_g + \dot{Z}_k = \sum (\dot{E}_\varphi c_j)_\varphi \quad (73)$$

Kontrol hacmindeki gücün ekserji maliyeti Denklem (74) ile belirlendi (Luo vd., 2019; Nacak vd., 2023).

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (74)$$

Isı transferi $\dot{Q}$ ve ekserjisi $\dot{E}_q$ olan ekserji maliyeti $\dot{C}_q$ ise Denklem (75) ile belirlendi (Luo vd., 2019; Nacak vd., 2023).

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q \quad (75)$$

Bir sistemin termal performansının ekonomik olarak uygulanabilirliği ekserji maliyetine göre değerlendirildiğinde, ele alınan kontrol hacminde oluşan ekserji tahribatı, ekserji-ürünü, çevre şartlarına ve sistemde ortaya çıkan tersinmezlik üreten kaynaklara göre değerlendirildi. Sistemi oluşturan her bir bileşen indisi k ile ifade edildi. Her bir bileşene ait özel ilave ekonomiklik denklemler yazılarak ortalama ekserji maliyeti Denklem (76) ile hesaplandı (Luo vd., 2019).

$$\sum_{\zeta} (c_{\zeta} \dot{E}_{\zeta})_{\zeta} + c_w \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_q + \sum_g (c_g \dot{E}_g)_g + \dot{Z}_k \quad (76)$$

2.5.6. Ekserji Maliyet Eşitliğinin Sistem Bileşenlerine Uygulanması

Maliyet değerlendirilmesinde ekonomik kriterlerden ana para geri kazanım oranı, bir değere indirgenmiş düzeltme faktörü ve eskalasyon düzeltme faktörü kriterleri sistemdeki her bir bileşene uygulandı. Ana para geri kazanım oranı (CRF) Denklem (77), bir değere getirilmiş düzeltme faktörü (k) Denklem (78), eskalasyon düzeltme faktörü (CELF) Denklem (79) ve bir değere getirilme faktörü (M) Denklem (80) ile hesaplandı (Luo vd., 2019).

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (77)$$

$$k = \frac{1+r_n}{1+i} \quad (78)$$

$$CELF = \frac{k(1-k^n)}{1-k} CRF \quad (79)$$

$$M = \frac{CELF}{1+r_i} \quad (80)$$

Burada eskalasyon oranı r_n , sisteminin ömrünü n , geri ödeme oranı i ile ifade edilmektedir.

Her bir bileşenin toplam maliyet fiyatı $\dot{Z}_k$, sisteme ait her bir bileşenin ilk yatırım maliyet fiyatı $\dot{Z}_{yat}$ ile işletme ve bakım maliyet fiyatı $\dot{Z}_{i\dot{s}}$ toplamı olarak tanımlandı. Sisteme ait saatlik toplam maliyeti Denklem (81) ile belirlendi (Bejan vd., 1995).

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_{yat} + \dot{Z}_{i\dot{s}} \quad (81)$$

Yatırım maliyeti Z_{yat} Denklem (82) ile işletme ve bakım maliyeti $Z_{i\dot{s}}$ Denklem (83) ile hesaplandı (Nacak vd., 2023).

$$Z_{yat} = Z_{kurulum} + Z_{nakil} + Z_{i\dot{s}\dot{c}i} + Z_{tesis} (\$) \quad (82)$$

$$Z_{i\dot{s}} = Z_{servis} + Z_{bakim} + Z_{elektrik} (\$) \quad (83)$$

HDY ısı depolama sistemi, yoğunlaştırıcı, güneş fırını ve ısı depolama tankı olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Denklem (82) ve Denklem (83)'e ait birimler düzenlenerek, sistemin her bir elemanı için bir yıla indirgenmiş toplam ekserji maliyetleri, sistemin ömrü $n=20$ yıl, günlük çalışma saati 6 saat, eskalasyon oranı $r_n \%4$, faiz oranı $r_i \%20$ olarak ve geri ödeme oranı $i_g \%6$ seçilerek aşağıda verilen eşitliklerle hesaplandı. HDY ısı depolama sistemi her bileşeni için, ekserji maliyeti Denklem (84) ve Denklem (85) ile hesaplandı. Her bileşenin ekserji maliyet eşitliği Denklem (86) ve her bileşenin ekserji yıkımı maliyeti $\dot{C}_{yıkım}$ ise Denklem (87) ile hesaplandı (Nacak vd., 2023).

$$\dot{Z}_{HDY} = (\dot{Z}_{yat} + \dot{Z}_{i\dot{s}}) \times M \quad (84)$$

$$\dot{Z}_{HDY} = (Z_{yat}/(n \times 24 \times 365) + Z_{i\dot{s}}/(\Delta T \times 365)) \times M \quad (\$/h) \quad (85)$$

$$c_{\dot{c}} \dot{E}_{\dot{c}} + c_{el} \dot{W}_{i\dot{s}} = c_g \dot{E}_g + \dot{Z}_{HDY} \quad (86)$$

$$\dot{C}_{yıkım_{HDY}} = c_g \dot{E}_{yıkım_{HDY}} \quad (\$/h) \quad (87)$$

Burada yoğunlaştırıcıya giren ışıının ekserji maliyeti $c_g=0$ olarak alınmaktadır. Bir değere getirilme faktörü M yaklaşık olarak 1,195 hesaplandı. Arazi yatırım maliyeti miktarı yoğunlaştırıcı maliyetine eklendi. Toplam HDY, güneş fırını ve ısı depolama tankı için bileşen maliyetleri ve termodinamik oranları Tablo 14'te verilmektedir. Ayrıca yoğunlaştırıcı çıkış ekserji maliyeti ($c_{\dot{c},y} \dot{E}_{\dot{c},y}$) fırın giriş ekserji maliyetine ($c_{g,f} \dot{E}_{g,f}$) eşit

kabul edildi. Ek olarak, güneş fırını çıkış ekserji maliyeti ($c_{ç,f} \dot{E}_{ç,f}$) ısı depolama tankının giriş ekserji maliyetine ($c_{g,d} \dot{E}_{g,d}$) eşit olarak kabul edildi.

Sistemin seviyeli elektrik (termal enerji için) maliyeti oranı (SEM) Denklem (88) ile hesaplandı (Okonkwo, vd., 2018).

$$SEM = \frac{Z_y \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + i_s \right) \phi}{E_{net}} = \frac{Z_y \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + i_s \right) \phi}{W_{net} N} \quad (88)$$

Burada sistem tarafından üretilen yıllık toplam enerji (kWh) E_{net} , elde edilen net iş W_{net} ve sistemin yıllık çalışma saati N ile ifade edilmektedir. Ayrıca faiz oranı (i) %20, sigorta oranı (i_s) %1 (Montes vd., 2011) ve işletme ve bakım faktörü için (ϕ) 1,6 değerleri kullanıldı (Valero vd., 1994; Okonkwo vd., 2018).

Son olarak maliyet geri ödeme süresi (GÖS), bir yatırımın maliyetinin geri kazanılması için gereken süreyi temsil etmektedir ve Denklem (89) ile tanımlandı (Okonkwo vd., 2018).

$$GÖS = \frac{Z_y}{SEM E_{net}} \quad (89)$$

Yıllık yatırım maliyetini bulmak, Trabzon ili için ortalama arazi birim maliyeti 3000 TL/m² (103 \$/m²) olması durumunda toplam arazi maliyeti 650 \$, HDY ısı depolama sisteminin kurulum maliyeti için 1816 \$ değerleri kullanıldı. Bu durumda sistemin günde 6 saat çalışması durumunda yıllık güneşlenme süresi 200 gün alınarak N değeri 1200 saat alındı. HDY ısı depolama sisteminde üretilen termal enerji miktarı yaklaşık 2 kW ve SEM oranı 3,97 alındığında, maliyet geri ödeme süresi yaklaşık olarak 3 yıl hesaplandı.

Tablo 14. HDY, fırın ve ısı depolama tankı yatırım maliyetleri ve termodinamik oranları

Özellikler	Yoğunlaştırıcı	Fırın	Isı depolama tankı
Toplam birim maliyet , $\dot{Z}_{HDY}$	0,0000232 \$/s	0,000003525 \$/s	0,000002524 \$/s
Yatırım maliyeti, Z_{yat}	1168 \$	376,6 \$	301,5 \$
Ekserji girişi, $\dot{E}_g$	3103 W	869 W	15 W
Ekserji çıkışı, $\dot{E}_ç$	1478 W	130 W	5 W

Eksergoekonomik analiz, parametre (R_{ex}) ile ifade edilmektedir. Bu parametre sistemin toplam ekserji kaybı ($\dot{E}_{x,k}$) ve toplam ekserji yıkımı ($\dot{E}_{x,y}$) toplamının, HDY ısı depolama sisteminin kurulum maliyetine oranı olarak Denklem (90) ile hesaplandı (Rosen ve Dincer, 2003).

$$R_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,k}}{Z_{kur}} + \frac{\dot{E}_{x,y}}{Z_{kur}} \quad (90)$$

Ayrıca tüm sistem üzerinden yapılan ekserji kaybı ve ekserji yıkımından kaynaklanan eksergoekonomik analiz değeri Denklem (90) ile 1,45 W/\$ olarak hesaplandı. Deneysel verilere göre, tüm sistemin termoeekonomik analizi Denklem (71) ile yaklaşık 1,239 W/\$ olarak hesaplandı. Denklem (72) ile termoeekonomik faktör ile halka dizisi yoğunlaştırıcı, güneş fırını, ısı depolama tankı sırasıyla 0,408, 0,077 ve 0,394 değerleri hesaplandı. Termoeekonomik faktör değerlerinden güneş fırınının ekonomiklik kriterinin en düşük değer aldığı görülmektedir. Yoğunlaştırıcının yatırım maliyetinde, ilk kurulum maliyeti ve arazi maliyeti hesaba katılırken, düşük bir işletim ve bakım maliyetine sahiptir. Ayrıca üç yıl içinde kurulum ve arazi maliyetini geriye kazandırmaktadır. Diğer bileşenlere göre yoğunlaştırıcı daha yüksek maliyete ve daha yüksek ekserji yıkımına sahiptir. Fırın yatırım maliyetinde arazi maliyeti hesaba katılmadığından ve yoğunlaştırıcıdan daha düşük bir ekserji çıkışı ile beraber daha düşük Termoeekonomik faktöre sahiptir. Bu bakımdan fırın üzerindeki ekserji yıkımının azaltılması ile Termoeekonomik faktörün 1'e yaklaşması durumunda fırının daha ekonomik çalıştırılması sağlanabilir. Isı depolama tankının ise fırına göre daha düşük ekserji yıkımına ve daha düşük enerji kaybına sahip olduğu tespit edildi.

HDY ile ısı depolama yerine elektrikli bir ısıtıcı (2 kW) ile 6 saat termal güç sağlanırsa, 2023 tarihinde birim elektrik fiyatı yaklaşık 2,6 TL/kWh (0,08965 \$/kWh) (İGDAŞ üzerinden) alınarak, günlük elektrik maliyeti 0,89 \$/gün olarak hesaplandı. Bu enerji (2 kW) doğalgazdan sağlanırsa, günde 10 kWh eşdeğeri olarak yaklaşık 1 m³ doğalgaz maliyeti 0,33 \$'dir. Son olarak HDY güneş enerjisi ısı depolama sistemleri ile günlük maliyetsiz enerji üretimi yapılmaktadır.

3. BULGULAR

Tasarlanan fırın ve ısı depolama tankının analitik, sayısal HAD hesaplama yoluyla elde edilen veriler, güneşli bir günde deneysel olarak elde edilen veriler ve kalibrasyon uygulamalarından elde edilen veriler aşağıda verilmektedir.

3.1. Analitik Bulgular

Halka dizisi yoğunlaştırıcılara ait hesaplanan optik verim, fırında oluşan odak sıcaklığı, fırın içindeki FDM sıcaklıkları ve fırın termal enerji verimlerinin analitik sonuçları bu bölümde verilmektedir.

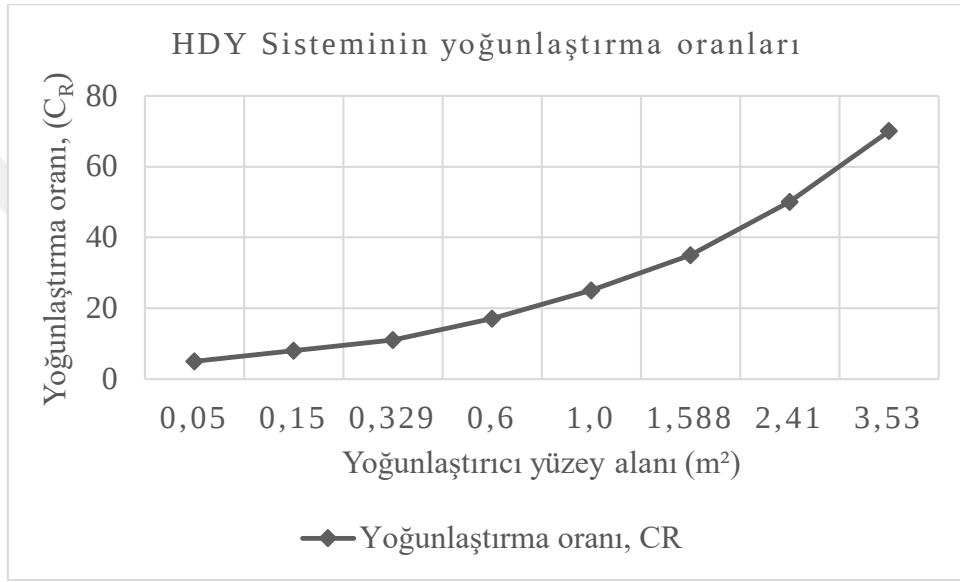
3.1.1. Halka Dizisi Yoğunlaştırıcıların Optik Verim ve Odak Sıcaklığı Sonuçları

Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcının (HDY2) yüzey alanı $3,5 \text{ m}^2$ olduğu durumda, kenar açısı θ_R $54,94^\circ$ ve gölgeleme ve karışıklık faktörü ($f_s r$) terimi $0,618$ olarak hesaplandı. HDY2 sisteminde tüm halkalar için, optik verim Denklem (22) ile $\%58,8$ olarak hesaplandı. Farklı boyutlarda tasarlanan ($1,5 \text{ m}^2$ ve $3,5 \text{ m}^2$) iki halka dizisi tipi yoğunlaştırıcının özellikleri ve teorik olarak elde edilen değerleri Tablo 15'te verilmektedir. Yoğunlaştırma oranı için gerekli olan uyarlamalı fırındaki silindirik odak yüzey alanı yaklaşık $0,050 \text{ m}^2$ olarak hesaplandı.

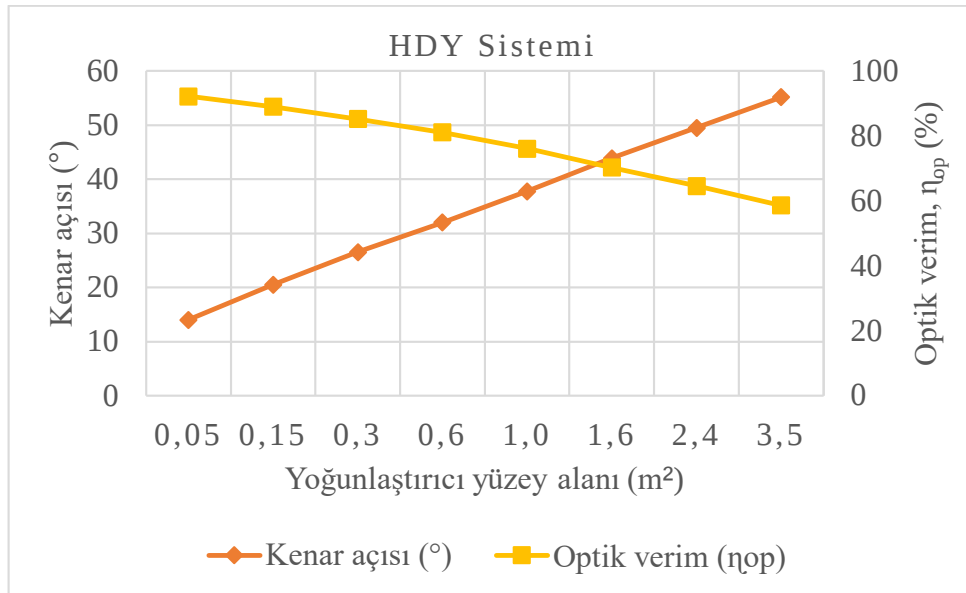
Tablo 15. Yüzey alanlarına ($1,5 \text{ m}^2$ and $3,5 \text{ m}^2$) göre yoğunlaştırıcıların özellikleri

Özellikler	HDY2	HDY2
Halka sayısı ve optik lens kullanımı	5 Halka ve lens	8 Halka ve lens
Odak uzunluğu, f (cm)	32 ± 1	80 ± 1
Halka yüksekliği, H (cm)	20 ± 1	30 ± 1
Yoğunlaştırıcı alanı, A_{HDY} (m^2)	$1,5 \pm 0,01$	$3,5 \pm 0,02$
Teorik yoğunlaştırma oranı, C_R	25 ± 3	70 ± 5
En büyük halka için kenar açısı, $\theta_R(^\circ)$	$65,68 \pm 0,5$	$54,94 \pm 0,5$
Odağa gelen sabit akı değeri, q' (W/cm^2)	$0,966 \pm 0,005$	$1,205 \pm 0,005$
Optik verim, η_{op}	$0,473 \pm 0,02$	$0,588 \pm 0,05$
Teorik ortalama odak sıcaklığı T_{odak} (K)	480 ± 15	575 ± 15

Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcının performans değerlendirilmesi yapıldı. Şekil 23'te görüldüğü gibi HDY sisteminin, halka sayısının artması ile birlikte yoğunlaştırıcı yüzey alanı artarken, yoğunlaştırma oranı da artmaktadır. HDY2 sistemi yüzey alanı $3,5 \text{ m}^2$ olduğu durumda yoğunlaştırma oranı yaklaşık 70 hesaplandı. Halka dizisi tipi yoğunlaştırıcı sistemlerde yüzey alanı büyüdükçe kenar açısı artarken optik verim azalmaktadır. Şekil 24'te görüldüğü gibi tasarlanan HDY2 sistemi için, kenar açısı maksimum 55° olduğu durumda optik verim %58,8 hesaplandı.

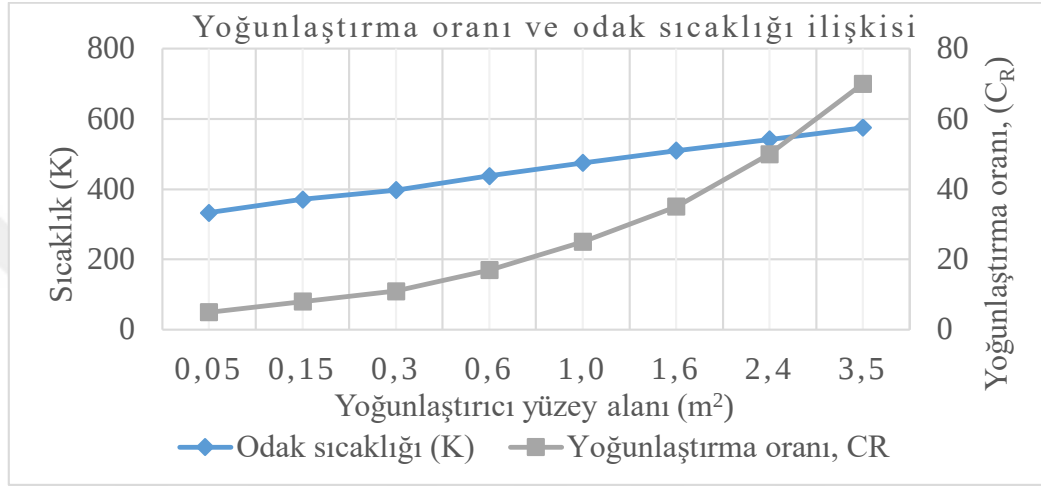


Şekil 23. Yoğunlaştırıcı yüzey alanı ile yoğunlaştırma oranının değişimi



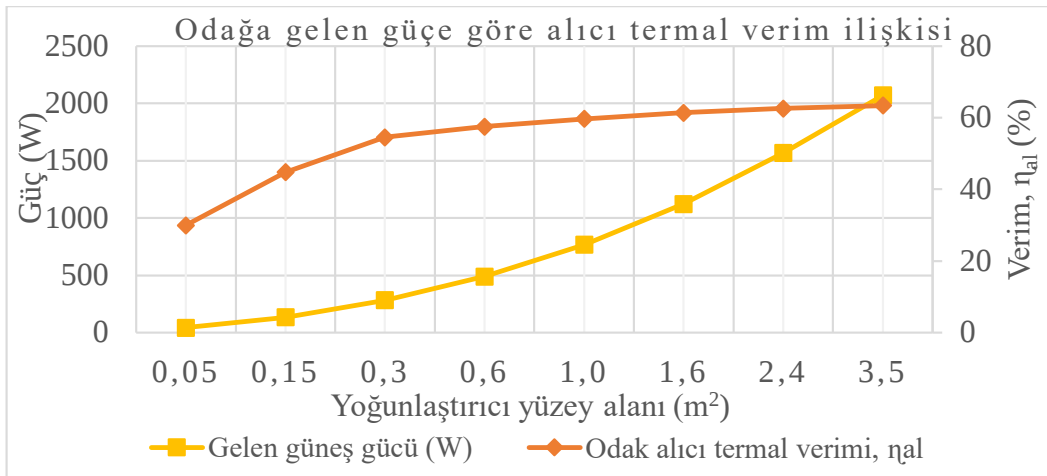
Şekil 24. Kenar açısı ve optik verimin yoğunlaştırıcı yüzey alanına göre değişimi

Şekil 25'te yoğunlaştırıcı yüzey alanının artması ile odak noktasında alıcı sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca yoğunlaştırma oranı arttıkça odak noktası sıcaklığının arttığı görülmektedir. Yoğunlaştırıcı yüzey alanının artmasına rağmen optik kayıpların artması ve alıcı yayınım katsayılarının atmasına bağlı olarak alıcı odak sıcaklık değerleri sınırlanmaktadır. HDY2 modelinde tüm halkalar (sekiz halka) için teorik ortalama alıcı sıcaklığı Denklem (21) ile 575 K olarak hesaplandı.



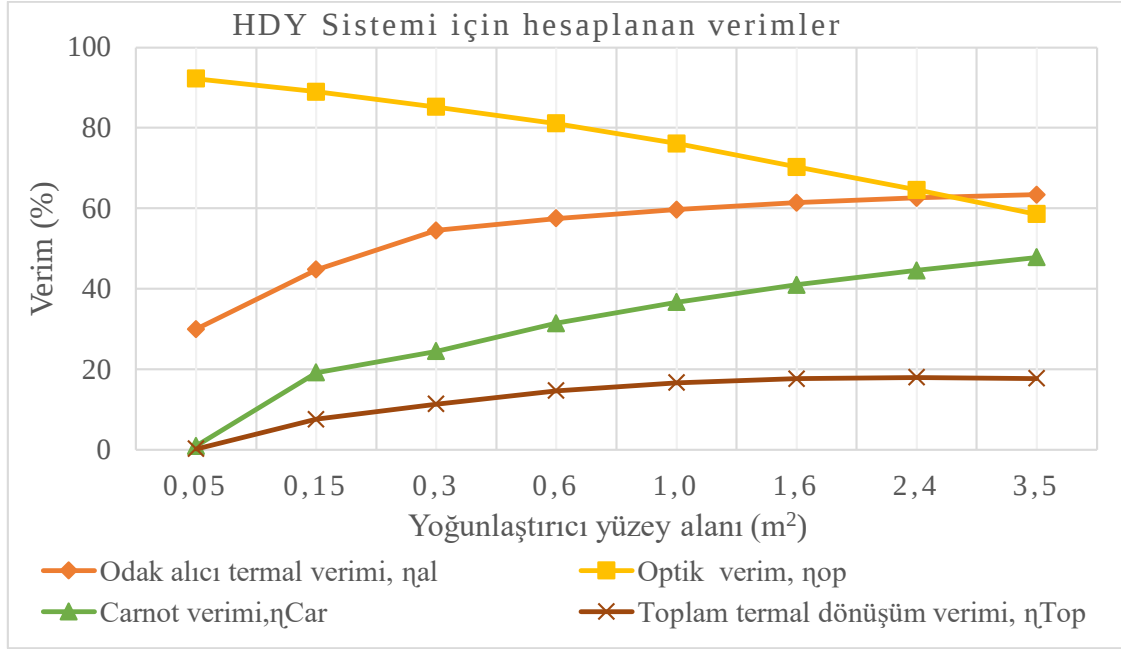
Şekil 25. Yoğunlaştırıcı yüzey alanına göre sıcaklık ve yoğunlaştırma oranı değişimi

Şekil 26'da halka sayısının artması veya yoğunlaştırıcı yüzey alanının artmasıyla fırına gelen yoğunlaştırılmış güneş enerjisi gücünün arttığı görülmektedir. Sekiz halka için, optik kayıpların hesaba katılmasıyla odak noktasına gelen teorik olarak en yüksek güneş enerjisi gücü ($IA \eta_{op}$) 2070 W olarak hesaplandı.



Şekil 26. Yoğunlaştırıcı yüzey alanı ve güneş gücünün artması ile alıcı verim değişimi

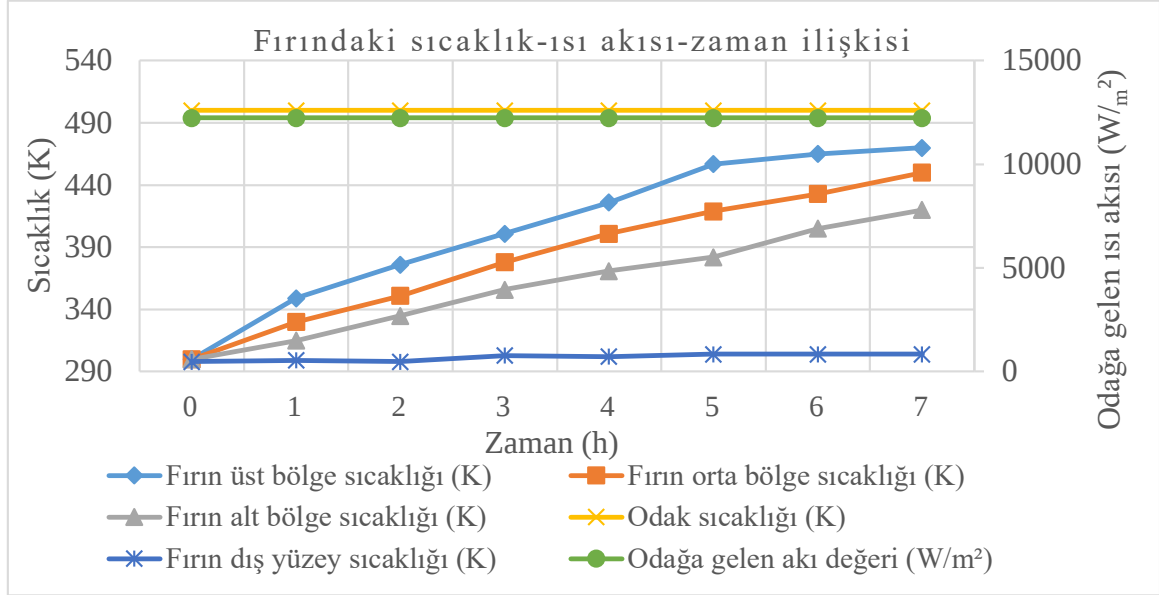
Son olarak, HDY sistemi için Şekil 27’de görüldüğü gibi, yoğunlaştırıcı yüzey alanının artması ile optik verim azalmaktadır. Yoğunlaştırıcı yüzey alanının artması ile alıcı odak sıcaklığı artmaktadır. Ancak odak yüzeyinden ışıınım ve taşınım kayıplarının artmasından dolayı alıcı verimi en yüksek %63,4 olarak hesaplandı. Toplam güneş enerjisi termal dönüşüm verimi ise sekiz halka (3,5 m²) için %17,7 olarak hesaplandı.



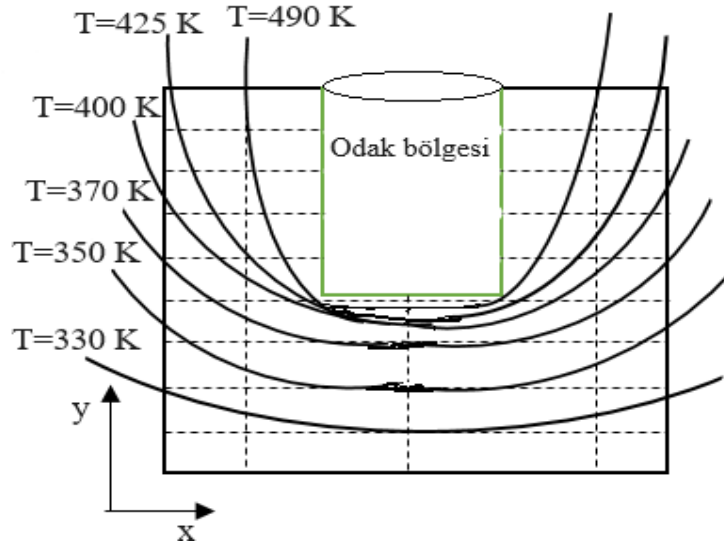
Şekil 27. Yoğunlaştırıcı yüzey alanı ile optik, alıcı, Carnot ve toplam termal verim değişimi

3.1.2. Analitik Olarak Fırındaki Ortalama FDM Sıcaklığı ve Termal Verim Sonuçları

HDY2 sistemi için, analitik yöntem kullanılarak, uyarlamalı fırında 18 kg Hitec tuzunun tamamının erime anına kadar geçen süre Denklem (35) ile yaklaşık yedi saat olarak hesaplandı. Buna göre anlık analitik olarak eritme debisi için 0,00071 kg s⁻¹ olarak hesaplandı. Şekil 28’de analitik olarak hesaplanan fırın içindeki ortalama tuz sıcaklığının zamana göre değişimi verilmektedir. Odak yüzeyin sıcaklığı sabit olarak 500 K değerinde tutularak zamanla fırın içerisine geçen sıcaklık değerleri analitik olarak hesaplandı. Yaklaşık iki saat sonunda fırında oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 29’da verilmektedir.

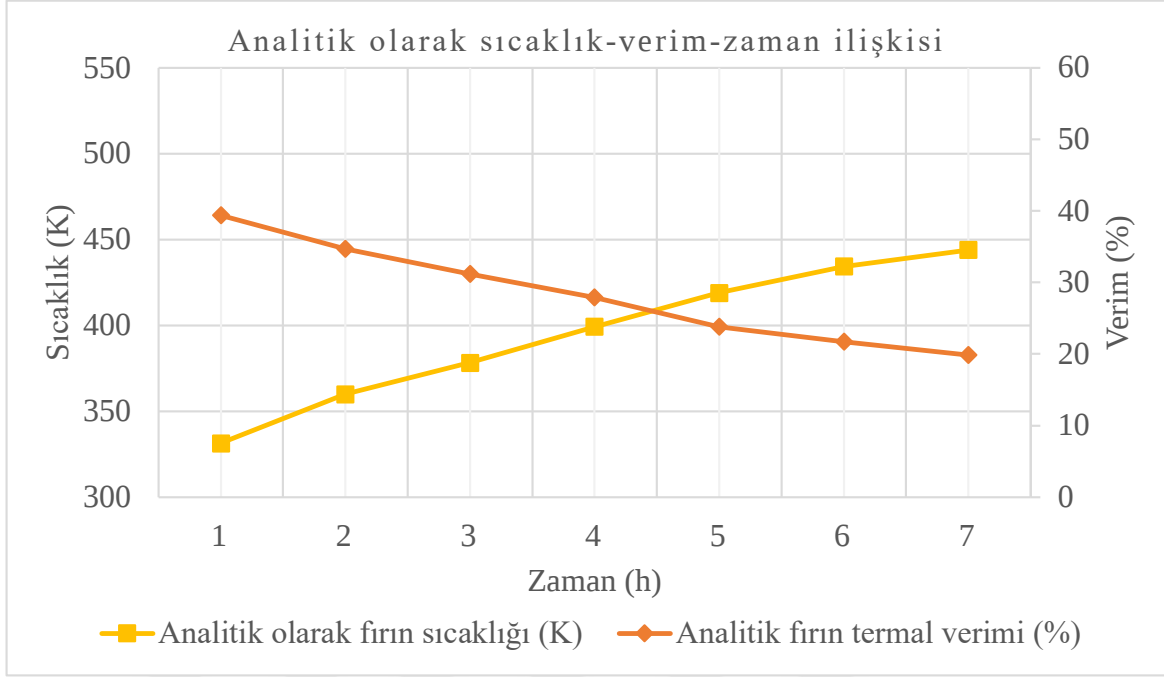


Şekil 28. Analitik olarak odaktaki ısı akısı değerlerine göre HDY2 uyarlamalı fırın iç ve dış yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi



Şekil 29. Analitik olarak hesaplanan HDY2 uyarlamalı fırın içindeki FDM sıcaklık dağılımı

Belirlenen koşullar altında Şekil 30'da, fırın termal enerji verimi Denklem (41) ile hesaplanarak zamana göre grafiği oluşturuldu. Analitik olarak, fırındaki Hitec tuzu ortalama sıcaklığı 448 K olarak bulunurken, fırın termal verimi %28,3 hesaplandı.



Şekil 30. HDY2 uyarlamalı fırında ortalama Hitec tuzu sıcaklığı ve termal verimin zamanla değişimi

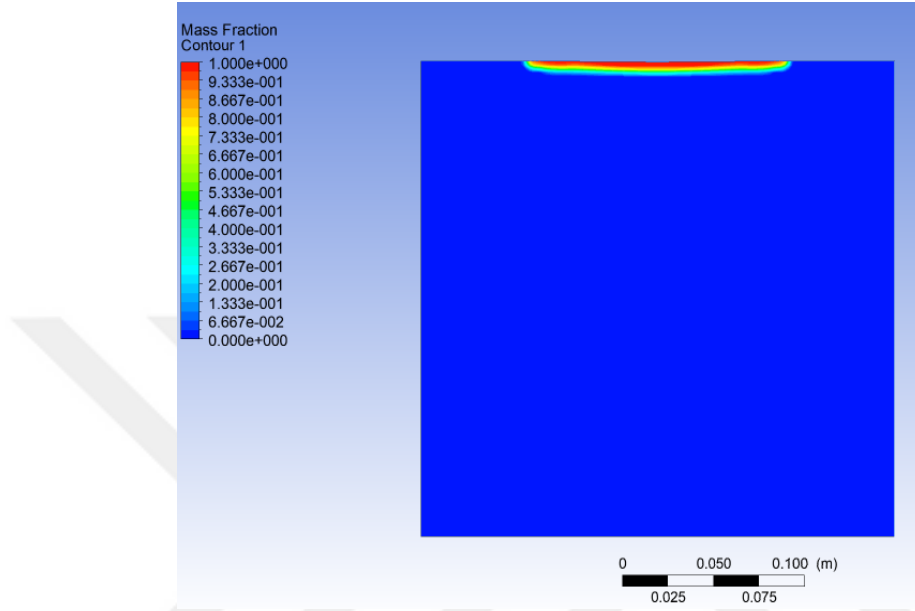
3.2. Sayısal Bulgular

Yoğunlaştırıcı yüzey alanları $1,5 \text{ m}^2$ (HDY1) ve $3,5 \text{ m}^2$ (HDY2) olan sistemlerin ANSYS programı üzerinde Fluentte yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modelinin sonuçları aşağıda verilmektedir.

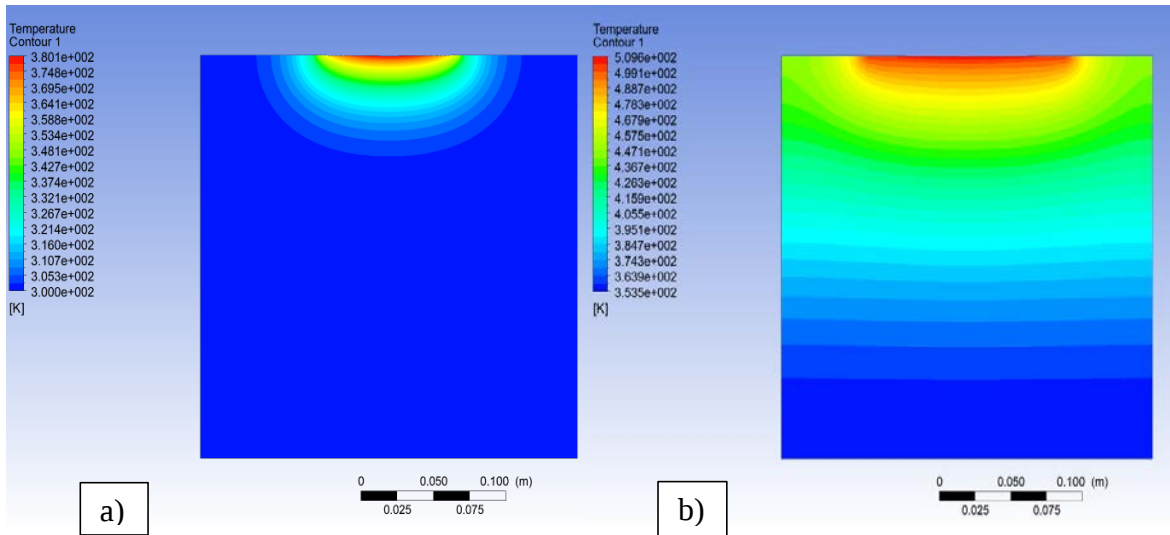
3.2.1. HDY1 Sistemi ile Düz Fırındaki Solar Tuz için HAD Modelleme Sonuçları

HDY1 için, teorik olarak odağa gelen yoğunlaştırılmış güneş akısı yaklaşık 6600 W/m^2 olarak hesaplandı. Bu modelde içinde solar tuz olan fırında, odak noktası sıcaklığı 500 K sabit olarak Fluent programına girilmiştir. Şekil 31’de erime noktası 495 K olan inorganik solar tuzun 36 saat içinde ise yaklaşık %1 eritildiğini gösteren sıvı kısmı kontörü verilmektedir. Ayrıca fırın içinde, 1 ve 36’ıncı saatlerdeki tuzun sıcaklık kontörleri Şekil 32’de görüldüğü gibi, yoğunlaştırılmış güneş ışınlarının malzeme yüzeyine geldiği odak noktası alanı daha yüksek sıcaklıklardadır. Buna göre sayısal analiz sonucunda, fırın içindeki ortalama FDM1 sıcaklığı 36 saat sonunda yaklaşık olarak 397 K ’dir. Dolayısıyla odak noktasına verilen termal enerji oldukça düşüktür.

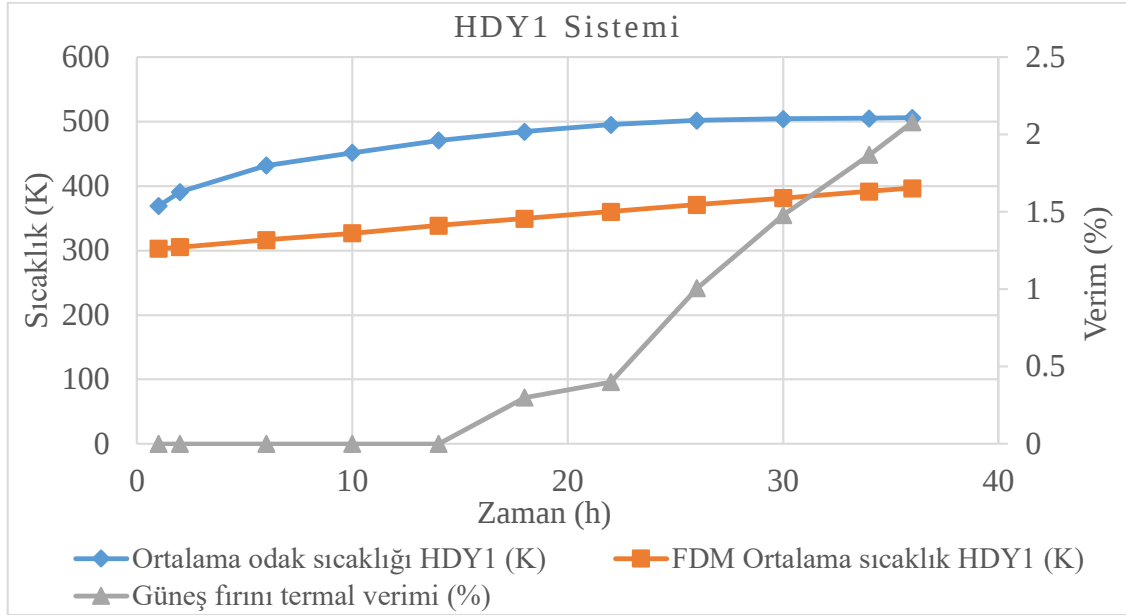
Şekil 33'te HDY1 için, güneş fırınındaki odak ve FDM1 ortalama sıcaklığı ve termal verimin zamana göre değişimi verilmektedir. HDY1 sistemi ile fırın içindeki FDM1 sıcaklıkları, uzun bir zaman sürdürülmesine rağmen istenilen değerlere ulaşamadı. Ayrıca Denklem (41) ile hesaplanan fırın enerji verimi oldukça düşüktür ve yaklaşık %2'dir.



Şekil 31. HDY1 düz fırında, 36 saat içindeki inorganik tuzun erime kontörleri



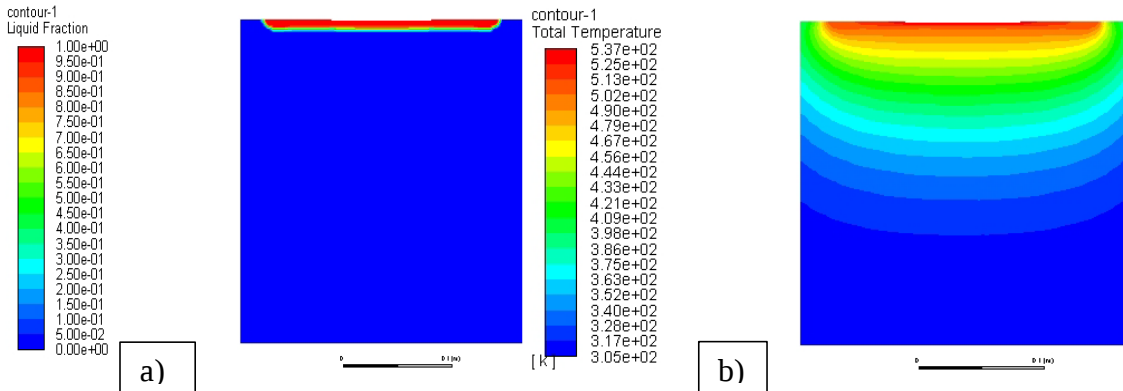
Şekil 32. HDY1 düz fırında inorganik solar tuzun a) 1. Saat ve b) 36. Saattteki 2 Boyutlu sıcaklık kontörleri



Şekil 33. HDY1 düz fırındaki odak, ortalama PCM sıcaklığı ve termal veriminin zamana göre değişimi

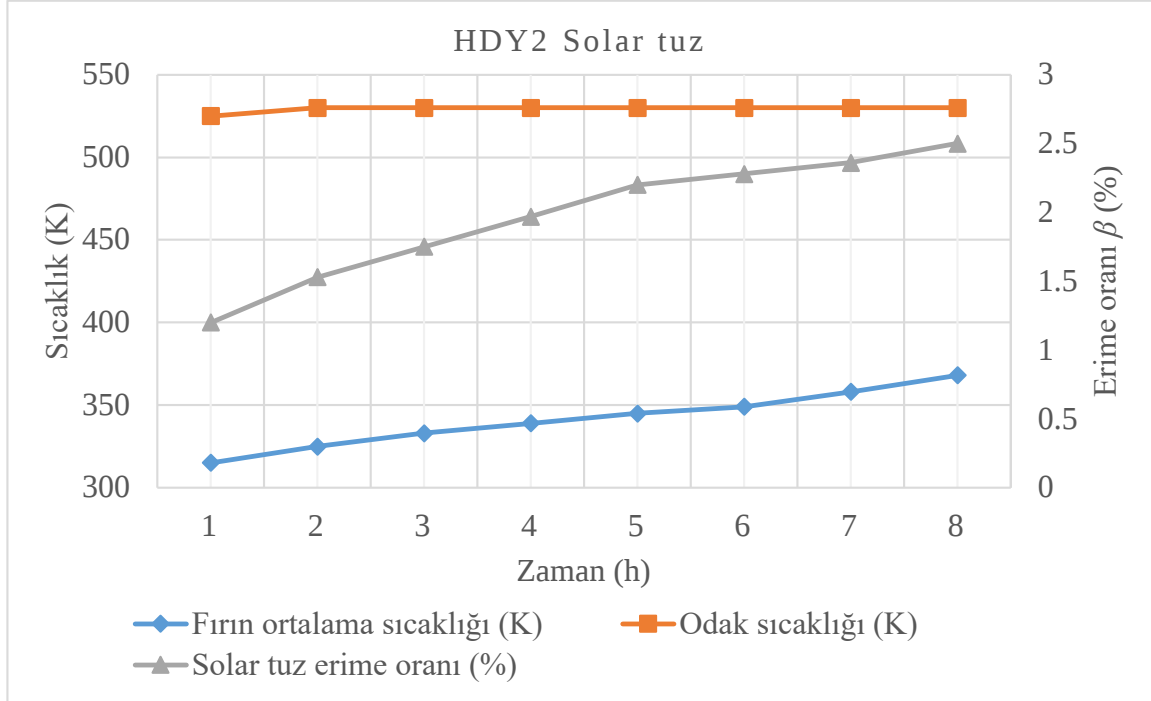
3.2.2. HDY2 Sistemi ile Fırında Solar Tuz İçin Sayısal Sonuçlar

HDY2 için, teorik olarak odağa gelen yoğunlaştırılmış güneş akısı yaklaşık 12000 W/m² olarak hesaplandı. Bu modelde deneysel verilere dayanarak, odak noktasının başlangıç koşulu 530 K olarak Fluent programına girilmiştir. Deneysel verilere bağlı olarak fırın çevre sıcaklığı sınır koşulu olarak ise 305 K alınmıştır. Fırın dış yüzeyi ısı transfer katsayısı ise 5 W/m²K deneydeki ortam hızına göre hesaplanmıştır. Şekil 34'te inorganik Solar tuzun sekiz saatte içindeki erime ve sıcaklık kontörleri verilmektedir.



Şekil 34. HDY2 düz fırında inorganik solar tuz için; a) Erime ve b) Sıcaklık kontörleri

Şekil 35'te HDY2 için, odak sıcaklığı, güneş fırınındaki solar tuz ortalama sıcaklığı ve tuz erime oranları zamana göre değişimi verilmektedir. Grafikler incelendiğinde, solar tuzun erime oranı sekiz saatte yaklaşık %2,5 olduğundan dolayı tamamen erimesi daha uzun süre alacaktır. Gün içinde fırındaki tüm inorganik tuzun eritilmesi hedeflenmesinden dolayı, FDM'nin değiştirilmesine ve özellikle fırın içinde ısı transferini artıracak bazı değişiklikler yapılmasına karar verildi.



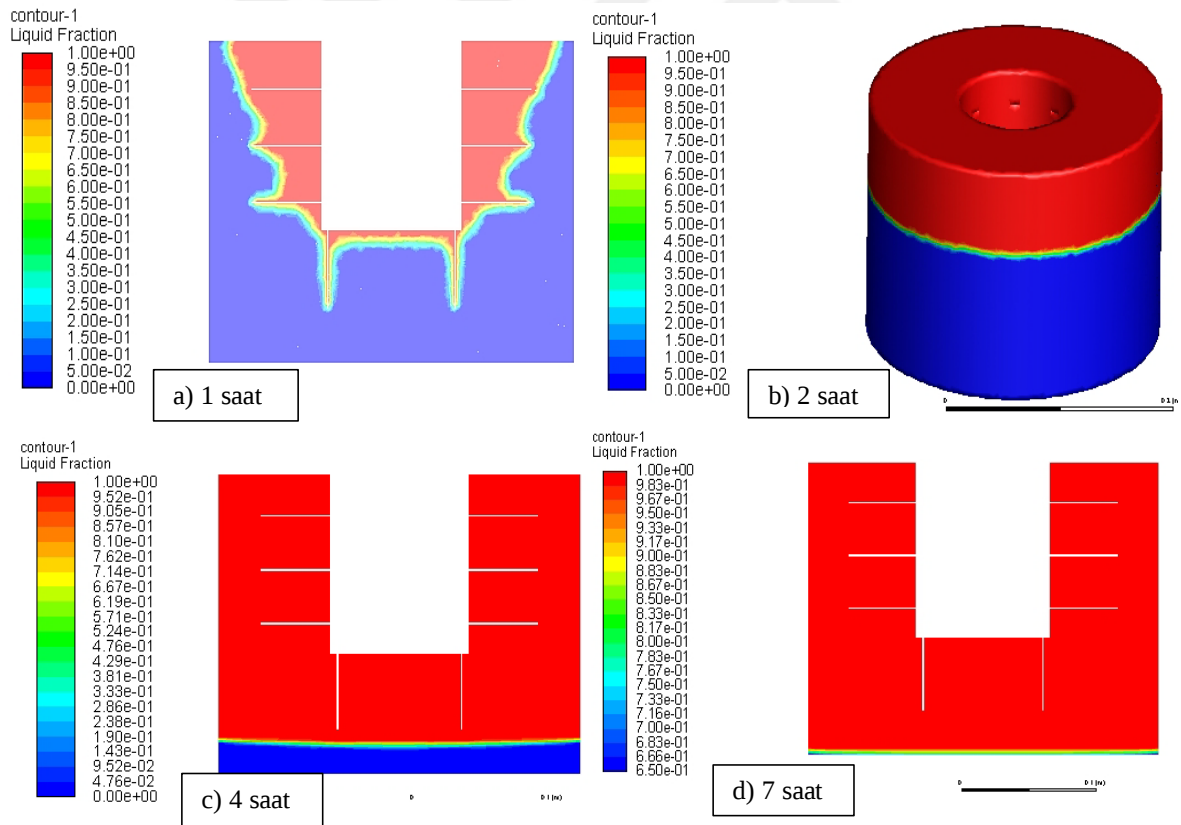
Şekil 35. HDY2 düz fırında sayısal programlar ile elde edilen Solar tuz sıcaklık ve erime değerleri

Solar tuz için sayısal olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneysel uygulamalar için oldukça uzun bir sürede eridikleri için, mevcut HDY2 sistemi ile farklı FDM'ler üzerinde araştırma yapıldı. Nispeten daha düşük sıcaklıkta eriyen FDM'ler incelenerek Hitec tuzu tercih edildi. Ayrıca Hitec tuzu hem ekonomik hem de özgül ısı kapasitesi solar tuza yakın değerlerdedir.

Fırın içerisinde ısı transferini arttırmak için fırın içerisine ısı iletim katsayısı yüksek paslanmaz çelik metal silindirik bir odak yüzeyi oluşturuldu. Bu silindirik odak yüzey üzerinden fırın içerisine ısı transfer edilmesi için metal kanatçıklar yerleştirildi. Odak alanına gelen gücün aynı zamanda kanatçıklara iletildiği varsayımı yapıldı.

3.2.3. Uyarlamalı Fırında Hitec Tuzu İçin HAD Modelleme Sonuçları

HDY2 ile güneş fırını içindeki Hitec tuzunun fiziksel özellikleri Fluent Flow'a girilerek sayısal olarak modellendi. Modelleme için enerji, erime ve katılaşma denklemleri kullanılarak çözümleme yapıldı. Bu modelde odak noktası sınır koşulu olarak, deneysel çalışmalarda ölçülerek oluşan ortalama odak sıcaklık değeri kullanıldı. Odak alanı sıcaklığı yaklaşık 500 K olarak sınır koşulu kullanıldı. Güneş fırınının dış yüzeyinin yalıtımlı olmasının yanında, fırın dış yüzeyinin yaklaşık 305 K olarak alınarak doğal taşınım ve radyasyon ile ısı transferinin olduğu varsayıldı. Fırın üst yüzeyi (odak alanı çevresi) ise yaklaşık 330 K olarak alınarak doğal taşınım ve radyasyon ile ısı transferinin olduğu varsayıldı. Düşük rüzgâr hızındaki ortam dikkate alınarak, ısı transfer katsayısı ise $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ve çelik yüzeyi ışıyım yayılım katsayısı 0,3 değeri çözümlemelerde sınır koşulları olarak kullanıldı.



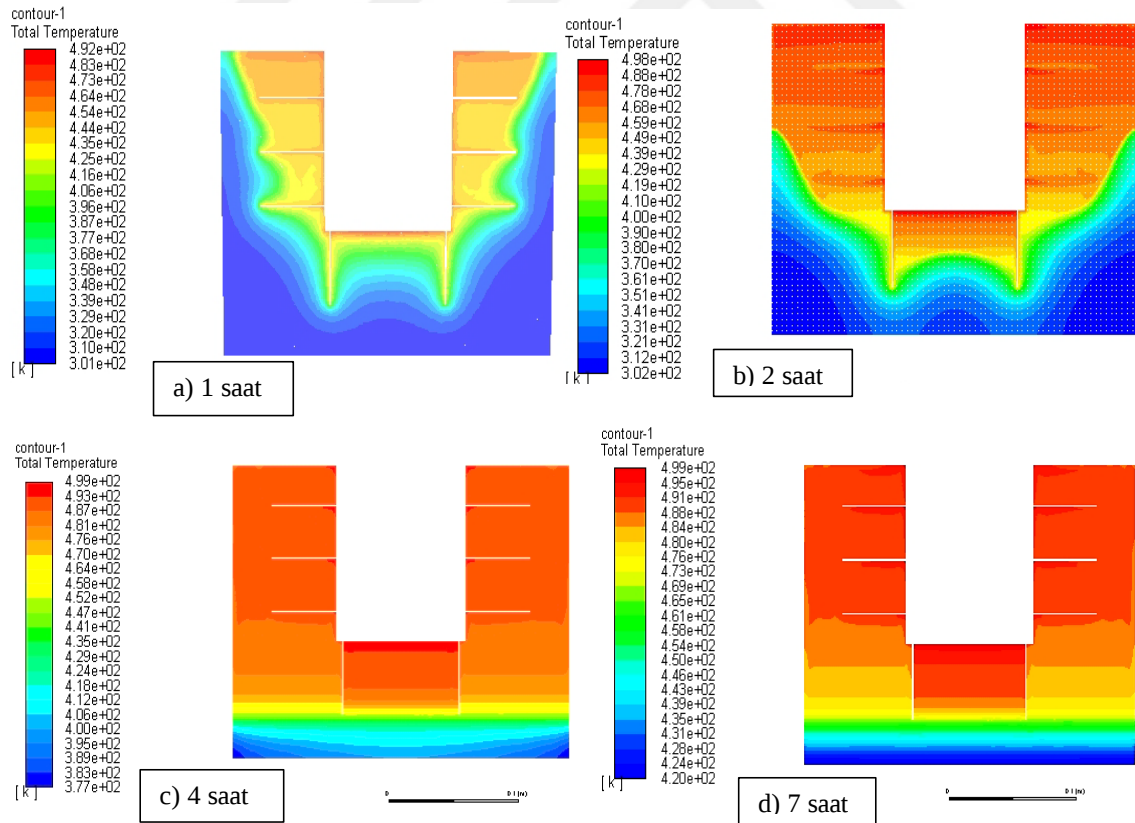
Şekil 36. Hitec tuzun erime kontörleri; a) 1saat, b) 2 saat, c) 4 saat ve d) 7 saat

Şekil 36'de inorganik Hitec tuzun sırasıyla 1, 2, 4 ve 7'inci saatlerde erime kontörleri verilmektedir. Erimenin olduğu alanlar kırmızı renktedir. Şekil 36b'de iki saat sonraki erime

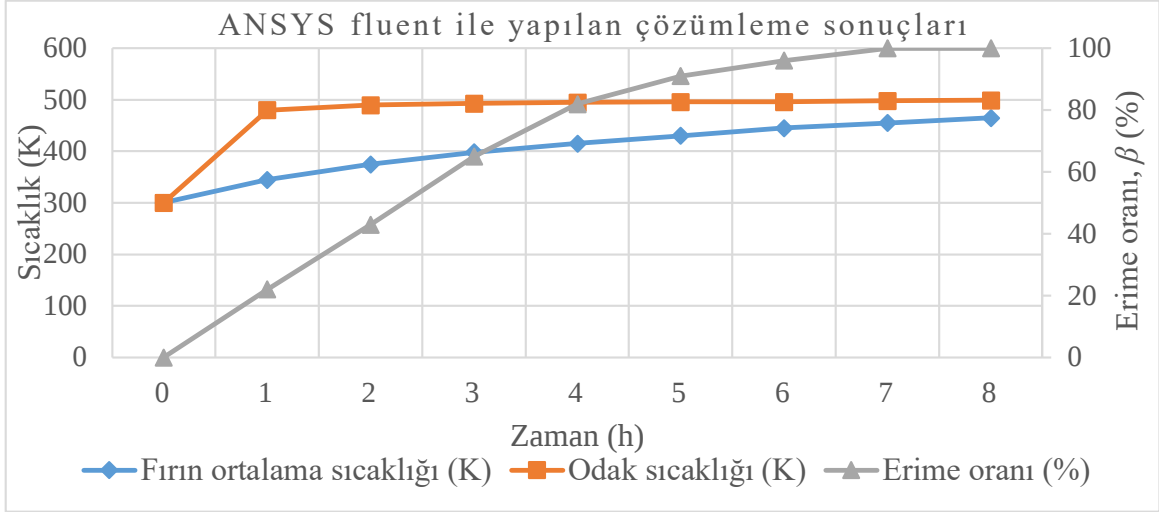
oranı %43 ulaşan üç boyutlu sıvı kısmı kontörleri verilmektedir. Şekil 36d’de yedinci saatte yaklaşık 18 kg’lık Hitec tuzunun tamamen eridiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde eklenen kanatçıklar sayesinde fırın içinde ısı transferinin artırılmasıyla özellikle fırın üst bölgesinde daha hızlı bir erime sağlanırken, kanatçığın daha az olduğu taban kısmında erimenin daha yavaş olduğu görülmektedir.

Şekil 37’de sayısal olarak ANSYS Fluentte, yedi saat boyunca, HDY2 yoğunlaştırıcısı ile fırında ulaşılan sıcaklık kontörlerinin görünümü verilmektedir. Sayısal olarak, yedi saat sonunda ortalama odak sıcaklığı 500 K değerine ulaşırken ve ortalama eriyik sıcaklığı 455 K olarak elde edildi. Şekil 37d’de incelendiğinde, fırın en alt noktasının FDM sıcaklığı yaklaşık 420 K değerine ulaştığından tüm tuzun tamamen eridiği görülmektedir.

Şekil 38’de görüldüğü gibi HDY2 için güneş fırınında zamana göre FDM1 erime miktarı değişimi verilmektedir. Buna göre, yaklaşık 3 saatte FDM1 Hitec tuzun hızlı bir şekilde erimesi gerçekleştiği ve yaklaşık olarak %65’inin eridiği görülmektedir. Erimenin kalan %35’lik kısmında erime hızı yavaşlayarak yaklaşık 4 saatte tamamlandı.



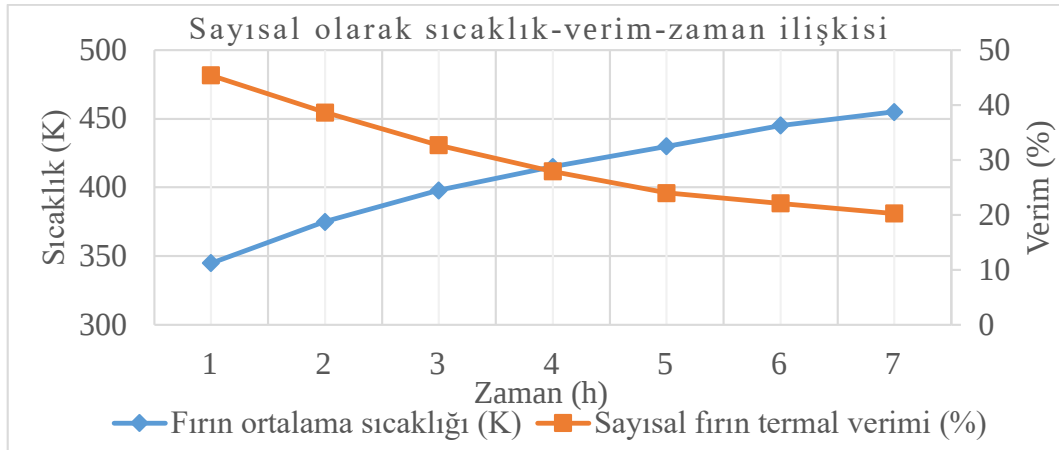
Şekil 37. Hitec tuzun sıcaklık kontörleri; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 4 saat ve d) 7 saat



Şekil 38. Sayısal olarak HDY2 uyarlamalı fırındaki FDM'nin eriyen kısmının ve ortalama sıcaklığının zamanla değişimi

HDY2'ye ait fırındaki ortalama toplam Hitec tuz sıcaklığı ve birinci kanun veriminin zamana göre değişimi Şekil 39'da gösterilmektedir. Buna göre, fırındaki ortalama sıcaklık artarken, fırın verimi azalmaktadır. Bu süreçte odak alanındaki yüksek sıcaklıklardan dolayı doğal taşınım ve ışıınım kayıplarında da artış olduğu belirlendi.

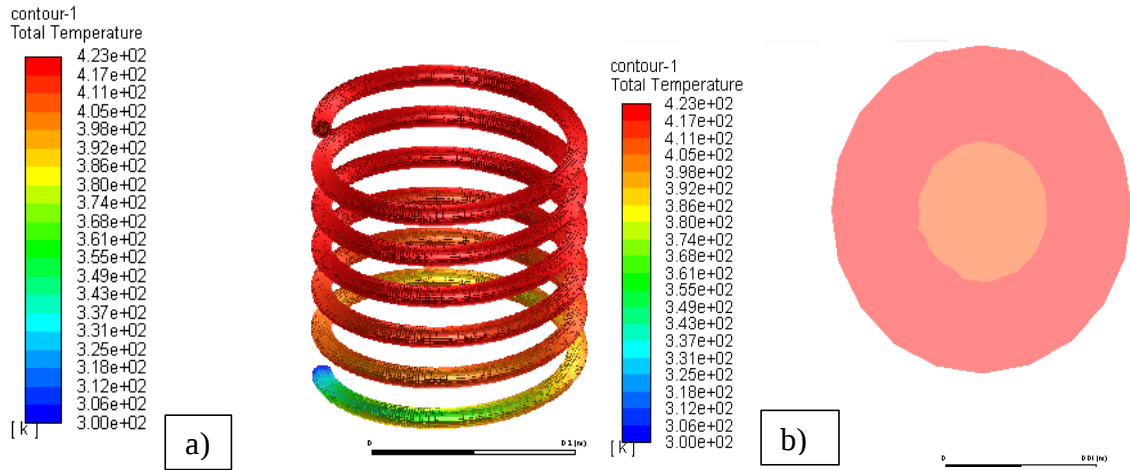
HDY2'ye ait Fluentteki HAD analiz sonuçları ise; Hitec tuzun tamamının eridiği durumda Denklem (41) ile termal enerji verimi %20,5 olarak hesaplandı. Bu andaki ortalama Hitec tuzu sıcaklığı yaklaşık olarak 455 K olarak elde edildi. Sayısal olarak toplam erime süresi yaklaşık 6,5 saattir. Analitik olarak hesaplanan erime süresi ise 7 saattir. Analitik ve sayısal değerlerin zamana göre ortalama eriyik sıcaklık değerleri birbirine yakındır.



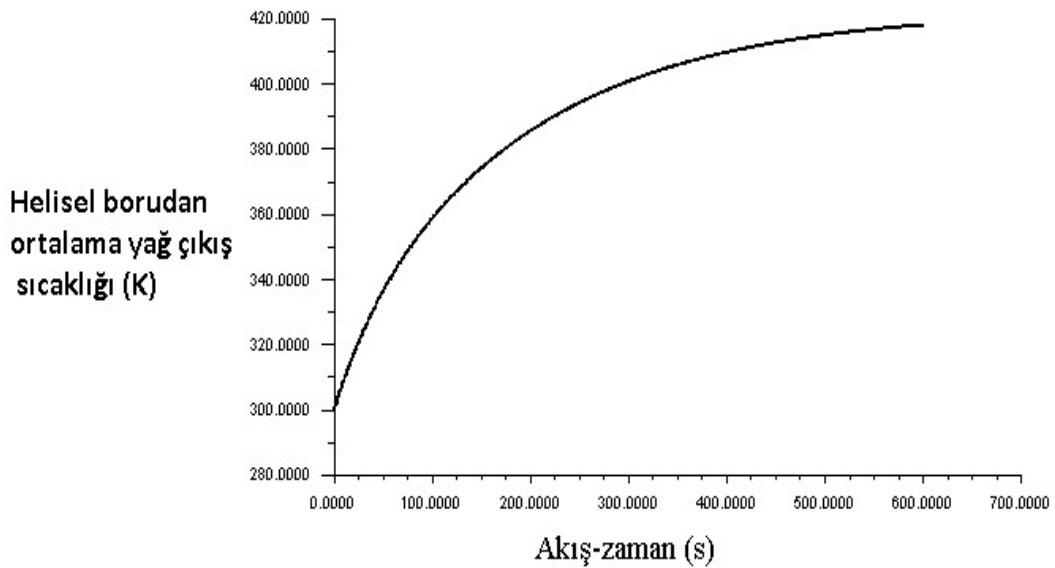
Şekil 39. HDY2 uyarlamalı fırındaki Hitec tuzu ortalama sıcaklığı ve termal verimin zamanla değişimi

3.2.4. Fırındaki Helisel Borudaki Akışın Sayısal Modelleme Sonuçları

Fırına yerleştirilen helisel boru tipi eşanjörün belirlenen koşullar altında sayısal olarak ANSYS Fluentte (HAD) akış modeli çözümlendi. Belirlenen koşullar altında helisel borudaki ısı transfer akışkanının sıcaklık kontörü Şekil 40a'da verilmektedir. Şekil 40b'de ise ısı transfer akışkanının (motor yağı) helisel borudan çıkış sıcaklık kontörü verilmektedir. Buna göre, başlangıçta boru girişinde akışkanın sıcaklığı 300 K olan ve yaklaşık 600 s sonra helisel boru yağ çıkış sıcaklığı 423 K'e (helisel boru yüzey sıcaklığına) yaklaştığı Şekil 41'de görülmektedir.



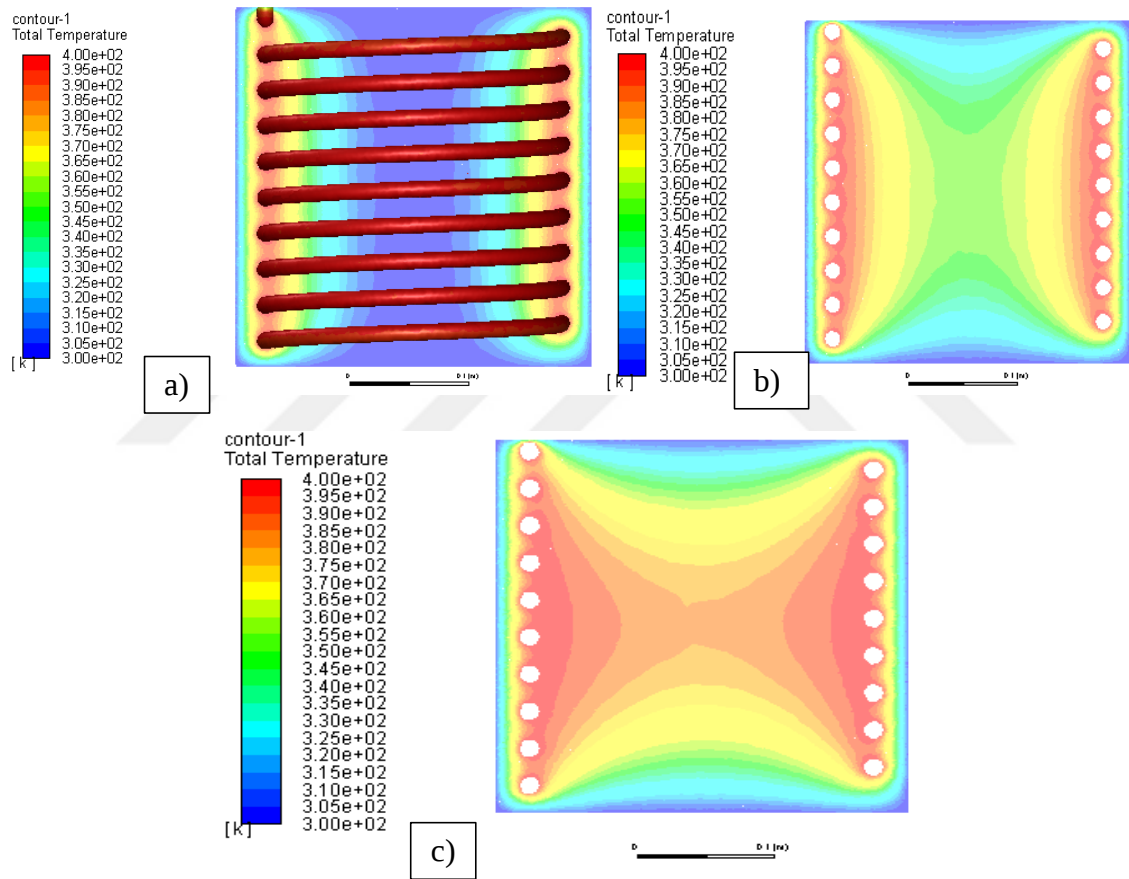
Şekil 40. HDY2 uyarlamalı fırında sıcaklık kontörleri; a) Helisel eşanjördeki yağ, b) Eşanjör yağ çıkış yüzeyi



Şekil 41. Fırındaki helisel borudan yağ çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

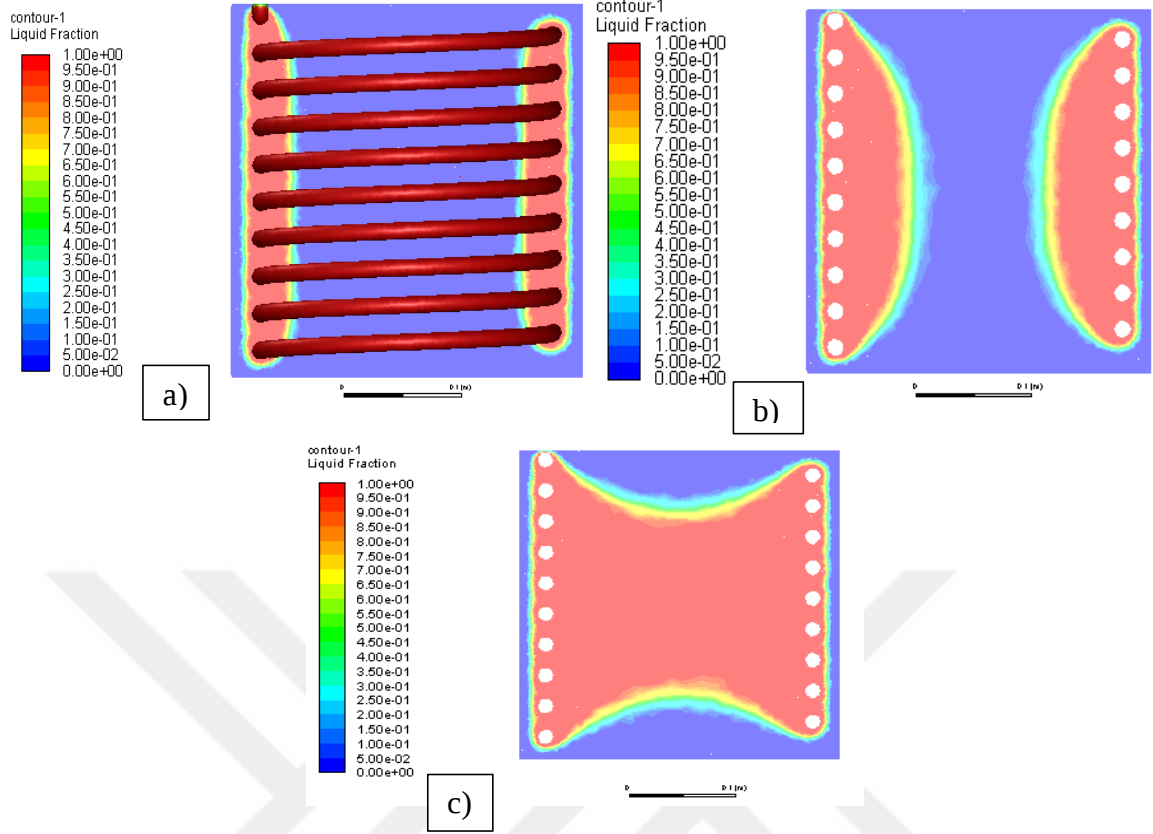
3.2.5. Isı Depolama Tankı İçin HAD Modelleme Sonuçları

Isı depolama tankının termal gücü bir helisel eşanjör sayesinde sağlanır. Sınır koşulları, helisel boru dış yüzey sıcaklığı süreklilik halinde yaklaşık 400 K sabit olarak alındı. Isı depolama tankındaki FDM2 (Ca, K ve Na; NO₃) ise başlangıç sıcaklığı 300 K'dir. Şekil 42'de depolama tankındaki inorganik tuzun 1,5 saat, 3 saat ve 10'uncu saatteki zamanlarda sıcaklık kontörleri verilmektedir. Ek olarak, Şekil 43'te ise bu FDM2'nin erime sıvı kısmı kontörleri verilmektedir.

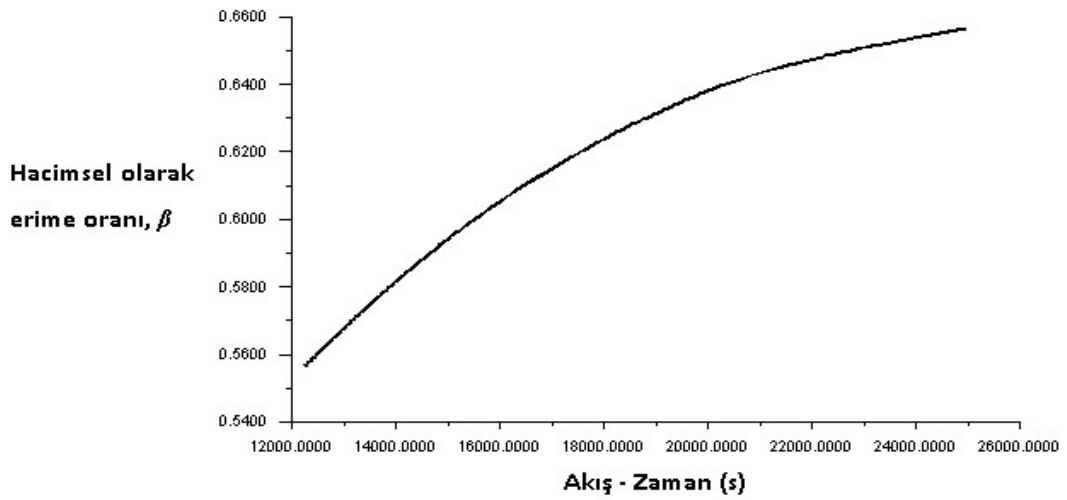


Şekil 42. HDY2 ısı depolama tankının sıcaklık kontörleri; a) 1,5 h, b) 3 h ve c) 10 h

Şekil 44'te yeni inorganik Hitec XL (FDM2) tuzunun (12000-25000) s zamanları arasındaki erime miktarının değişimleri verilmektedir. Ayrıca depolama tankında tüm simülasyon boyunca oluşan hacimsel ortalama toplam FDM2 sıcaklığı ve erime miktarının zamana göre değişimleri Şekil 45'te verilmektedir.



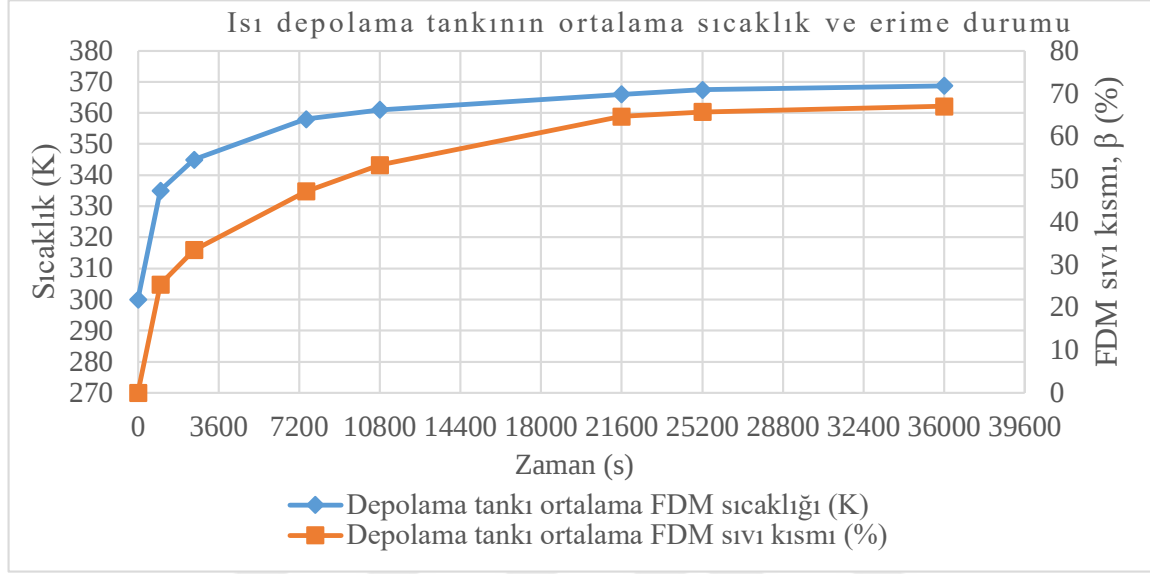
Şekil 43. HDY2 ısı depolama tankı için erime kontörleri; a) 1,5 h, b) 3 h ve c) 10 h



Şekil 44. HDY2 sistemli ısı depolama tankındaki yeni Hitec XL tuzun erime miktarının zamanla değişimi

Şekil 45 incelendiğinde, yaklaşık olarak 2 saatlik (7200 s) sürede hızlı bir sıcaklık yükselişi ile birlikte FDM2'nin hızlı bir şekilde eridiği görülmektedir. Helisel boru tipi eşanjör ile verilen termal enerji, inorganik tuzun 3 saatte yaklaşık olarak %50 oranında

erimesini sağlarken 10 saat sonunda yaklaşık olarak %67 oranında erime sağlandı. Depolama tankında kullanılan inorganik tuzun (Ca, K ve Na; NO₃) düşük ısı iletim katsayısına (1-3,2 W/mK) sahip olmasından dolayı tankın iç orta bölgesi daha uzun sürede eridiği sayısal yöntem ile tespit edildi.



Şekil 45. HDY2 sistemli ısı depolama tankındaki FDM2'nin ortalama sıcaklığı ve erime miktarının zaman ile değişimi

3.3. Deneysel Bulgular

Tasarlanan yoğunlaştırıcı sistemin uygunluğunun sağlanması için, gerçek güneş altında yapılan deneylerden elde edilen veriler aşağıda verilmektedir. Bunlar odak sıcaklık ölçümü, ısı depolamada kullanılan tuzlarının eritilme deneyi verileri fırında ısı depolama kapasitesinin ve tasarlanan yoğunlaştırıcı ısı depolama sistemin uygunluğunun ölçümü için yapılan deneysel verilerdir.

3.3.1. Güneş Şiddeti ve Odak Yüzeyi Sıcaklık Ölçümü Deneysel Verileri

31 Aralık 2022 tarihinde gerçekleştirilen deneyde odak alanı sıcaklık değerleri Tablo 16'da verilmektedir. Deneyde ölçülen radyasyon değerlerine göre en yüksek odak sıcaklığı yaklaşık olarak 440 °C ölçüldü. Çevre sıcaklığı ortalama 14 °C ve kuzeyden gelen 8-10 km/h rüzgâr hızına sahip olarak deneyler gerçekleştirildi.

Tablo 16. 31 Aralık 2022 tarihindeki odak sıcaklığı ölçümüne ait deneysel veriler

Saat	Güneş Şiddeti (W m ⁻²)	Odak Sıcaklığı T ₁ (°C)	Odak Sıcaklığı T ₂ (°C)	Çevre Sıcaklığı (°C)
10.30	970	202	185	14
11.00	981	251	199	14
11.30	974	405	320	14
12.00	980	422	340	15
12.30	981	440	370	15
13.00	974	370	322	14
13.30	972	320	290	14
14.00	960	315	280	14
14.30	855	305	275	13

3.3.2. HDY2 Sistemi ile Yapılan Isı Depolama Deneysel Verileri

Tasarlanan ışın yoğunlaştırıcı sistem ile fırında ısı depolama malzemesi olarak solar tuz ve Hitec tuzunun kullanılabilirliği yapılan deneylerde test edildi. İlk deneyde, fırında solar tuz eritilerek ısı depolamanın sağlanması üzerinde çalışıldı. İkinci deneyde ise fırında eritilen Hitec tuzu ile ısı depolamanın incelenmesi gerçekleştirildi. Ek Şekil 5’te Ocak ayında deney anında çekilen bir fotoğrafta ısı depolama sisteminin genel parçaları ve bağlantıları görülmektedir.

3.3.3. Solar Tuz ile Yapılan Isı Depolama Deneyinden Elde Edilen Veriler

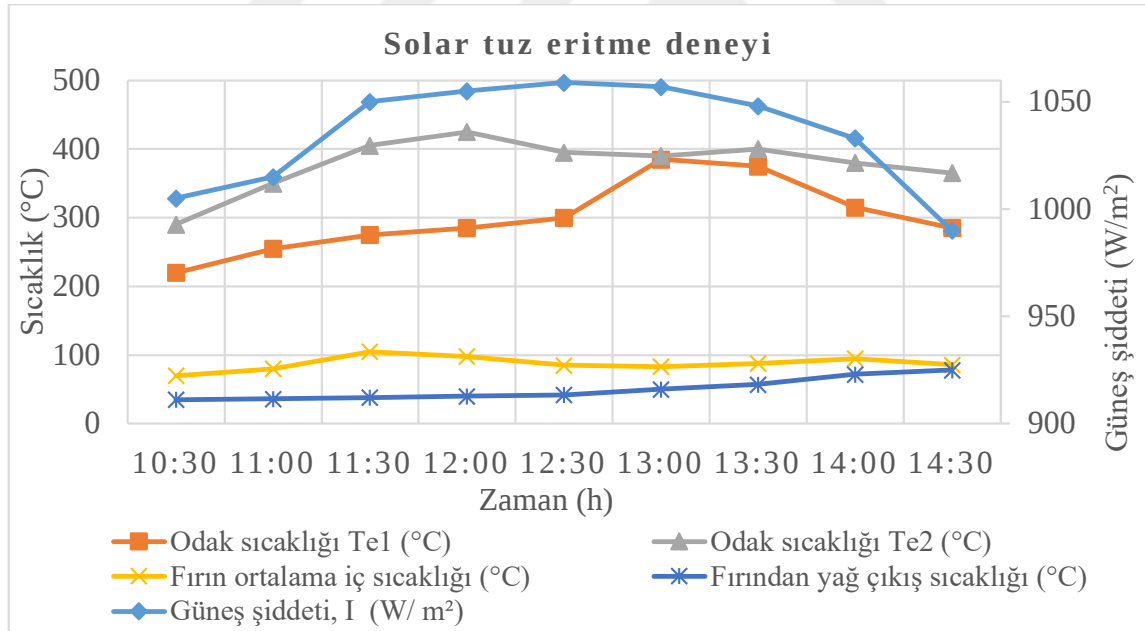
Açık güneşli bir günde 10 Ocak 2023 tarihinde gerçekleştirilen deneyde, çevre sıcaklığı yaklaşık olarak 14 °C, doğu-batı yönünde rüzgâr hızı (6-10) km/h ve nem oranına ise yaklaşık %(50-60) düzeyindedir. Ek Şekil 6’da HDY2 ışın yoğunlaştırıcı ısı depolama sistemin genel bir görünüşü verilmektedir. Trabzon hava koşullarında Ocak ayı için gün içinde güneş yüksekliği açısı (35-45)° arasındadır. Bu aylarda (Aralık-Ocak) güneş yüksekliğinin düşük olmasından dolayı mevcut takip sistemi güney yönünde yaklaşık 40° açı yapacak şekilde ayarlandı. Aralık ve Ocak ayları için doğu batı yönünde güneşin hareketi daha fazla olduğundan güneş takip sisteminin doğu-batı hareketi daha fazladır.

Tablo 17’de görüldüğü gibi, bu deneyde odak noktasında en yüksek sıcaklık 425 °C ve düz fırın içindeki solar tuz üzerinde ölçülen sıcaklık en yüksek 105 °C’ye ulaştı. Fırın iç sıcaklığı solar tuzun erime noktasından (220 °C) düşük olduğundan erime sadece odak alanında gerçekleşti. Fırındaki helisel boru eşanjörden çıkan ısı transfer akışkanı sıcaklığı

ise en yüksek 78 °C olarak ölçüldü. Ayrıca Şekil 46’da solar tuz ile yapılan deneyde gün boyunca güneş şiddetine göre odak ve fırın içi sıcaklık değişimleri verilmektedir. Son olarak, deneysel verilere göre fırın ortalama termal enerji verimi Denklem (41) ile %6 hesaplandı.

Tablo 17. 10 Ocak 2023 tarihindeki solar tuz ile ısı depolama deneysel veriler

Saat	Güneş şiddeti, I (W m ⁻²)	Odak sıcaklığı T _{e1} (°C)	Odak sıcaklığı T _{e2} (°C)	Fırın ortalama iç sıcaklığı (°C)	Fırından yağ çıkış sıcaklığı, (°C)
10.30	1005	220	290	70	35
11.00	1015	255	350	80	36
11.30	1050	275	405	105	38
12.00	1055	285	425	98	40
12.30	1059	300	395	85	42
13.00	1057	385	390	83	50
13.30	1048	375	400	88	57
14.00	1033	315	380	95	72
14.30	990	285	365	86	78



Şekil 46. Gün içindeki güneş şiddetine göre odak ve fırın sıcaklıklarının zamanla değişimi

Ek Şekil 7’de deneyin tamamlanmasının ardındandeşarj durumunda ölçülen düz fırın içindeki solar tuzun sıcaklık değişimi grafiği verilmektedir. Budeşarj anında çevre sıcaklığı ise ortalama 14 °C’dir. Başlangıçta yaklaşık olarak 75 °C olan düz fırın içi FDM1 solar tuz sıcaklığı yaklaşık 2,5 saat sonunda 35 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlendi.

3.3.4. Hitec Tuzu ile Yapılan Isı Depolama Deneyinden Elde Edilen Veriler

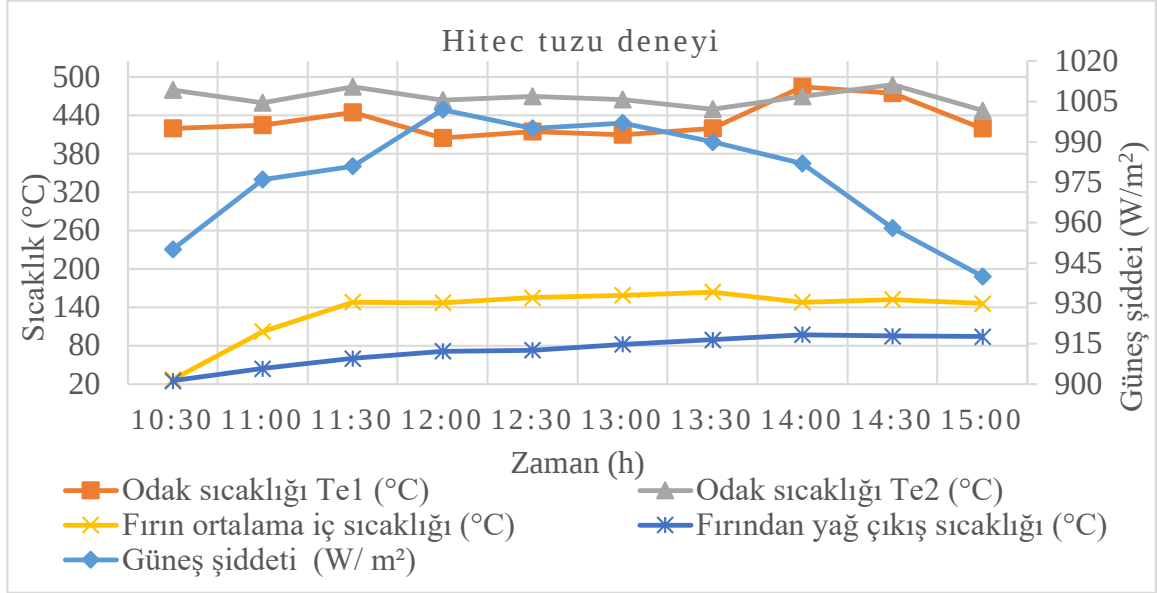
Kuzey enlemi 41° ve doğu boylamı $39,7^\circ$ olan Trabzon şehrinde 11 Ocak 2023 tarihinde gerçekleştirilen deneyde, çevre sıcaklığı yaklaşık olarak 15°C , doğu-batı yönünde rüzgâr hızı (5-10) km/h aralığında ve nem oranı ise yaklaşık %55 düzeyindedir. Depolama ürünü olarak Hitec tuzu kullanılan deneyde elde edilen veriler Tablo 18’de verilmektedir.

Tablo 18. 11 Ocak 2023 tarihindeki Hitec tuzu ile ısı depolamaya ait deneysel veriler

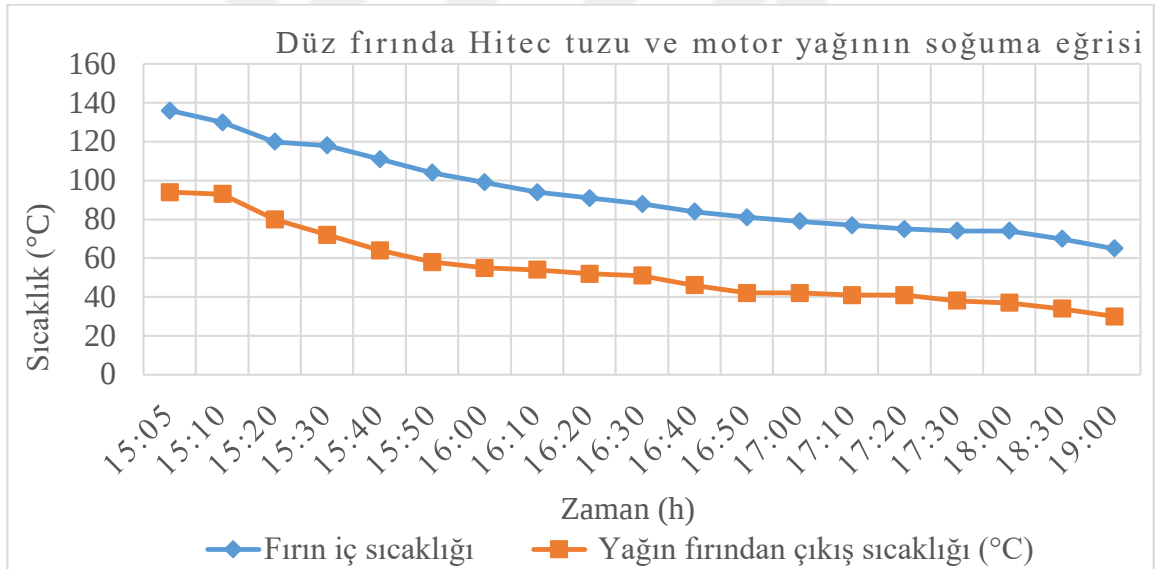
Saat	Güneş şiddeti (W m^{-2})	Odak sıcaklığı T_{e1} ($^\circ\text{C}$)	Odak sıcaklığı T_{e2} ($^\circ\text{C}$)	Fırın ortalama iç sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Fırından yağ çıkış sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
10.30	950	420	480	27	25
11.00	976	425	460	102	44
11.30	981	445	485	148	60
12.00	1002	405	464	147	71
12.30	995	415	470	155	73
13.00	997	410	465	159	82
13.30	990	420	450	164	89
14.00	982	485	470	148	97
14.30	958	475	488	152	95
15.00	940	420	448	146	94

Şekil 47’de gün boyunca yapılan deneyde güneş şiddetine göre HDY2 sistemli odak ve fırın iç sıcaklık değişimleri verilmektedir. Bu deneyde, odak noktasında en yüksek sıcaklık 488°C ve fırın içindeki Hitec tuz üzerinden ölçülen en yüksek sıcaklık 164°C ’dir. Fırın iç sıcaklığı Hitec tuzun erime noktasından (142°C) büyük olduğundan tuzun erimesi gerçekleştirildi. Fırındaki helisel boru eşanjörden çıkan ısı transfer akışkanı yağ sıcaklığı ise en yüksek 97°C olarak ölçüldü.

Fırındaki Hitec tuzunu deşarj durumuna ait zamana göre iç sıcaklık değişimi Şekil 48’de verilmektedir. Aynı zamanda bu şekilde ısı transfer akışkanı yağın helisel boru eşanjörden çıkış sıcaklık değerleri verilmektedir. Yağın debisi yaklaşık olarak $0,00148\text{ kg/s}$ olacak şekilde pompa yardımıyla akışkanın dolaşımı sağlanmaktadır. Deşarj başlangıcında yağ çıkış sıcaklığı 94°C iken, yaklaşık 4 saat sonra deşarj sonunda fırından yağ çıkış sıcaklığı yaklaşık 30°C ’dir. Benzer şekilde Hitec tuzunun deşarj başlangıcında 136°C iken, 4 saat sonra tuz sıcaklığı yaklaşık 60°C ’dir.



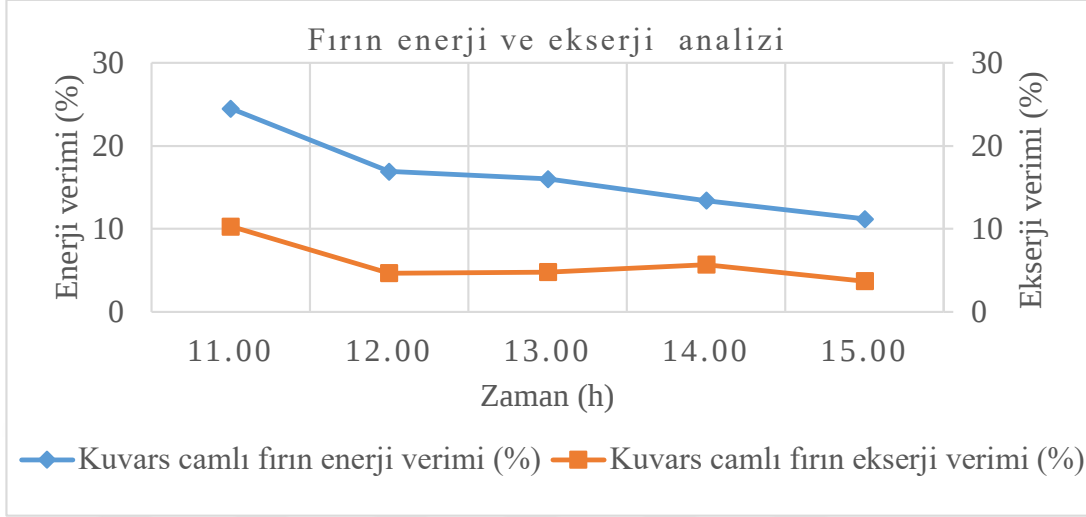
Şekil 47. Gün boyunca güneş şiddetine göre odak ve düz fırındaki Hitec tuzu sıcaklıklarının zamanla değişimi



Şekil 48. Deşarj durumunda yağ çıkış sıcaklığı ve Hitec tuzu sıcaklık değişimi

Deneysel veriler ile şarj durumu için, saat (11.00 ve 15.00) arasında, fırında bulunan Hitec tuzu üzerinden enerji ve ekserji analizi yapıldı. Deneyde sistemin Hitec tuzu eritme debisi, 1 kg tuz yaklaşık 500 s'de eritilmesiyle yaklaşık olarak 0,00208 kg/s hesaplandı. Başlangıçta ise ışın yoğunlaştırıcı sistemin rejime gelme süresi (10-15) dakika aralığındadır. Bu süreden sonra fırın iç sıcaklığı ve odak sıcaklığı birbirine yakın sıcaklıklardadır. Buna göre, zamana göre değişen debi verileri kullanılarak Şekil 49'da görüldüğü gibi, Denklem

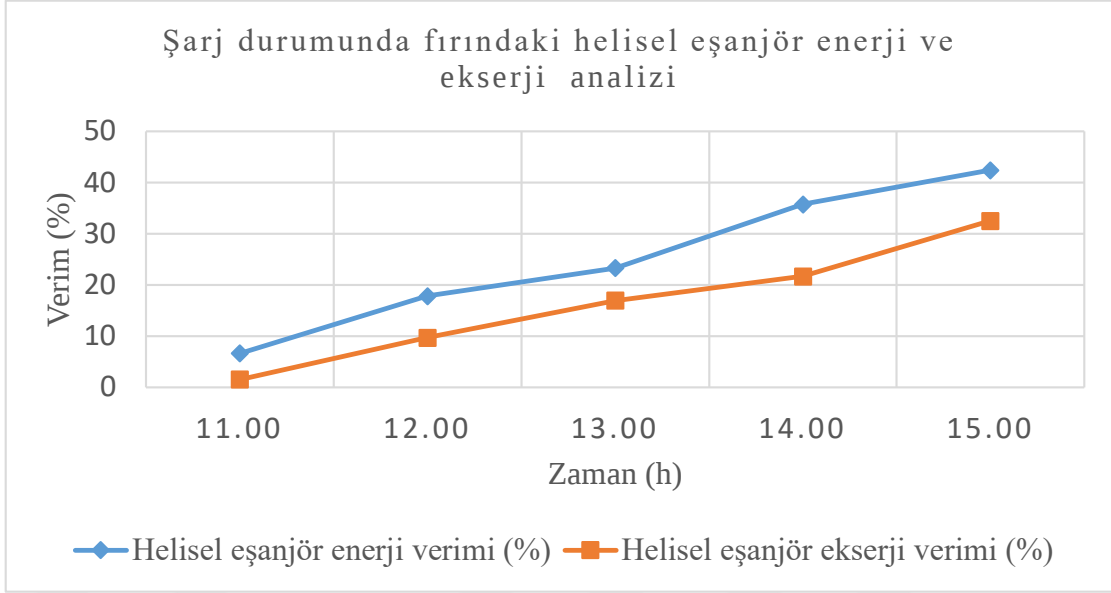
(41) ile gün içi ortalama fırın termal enerji verimi %16,4 iken, Denklem (63) kullanılarak ortalama fırın ekserji verimi ise %5,8 hesaplandı.



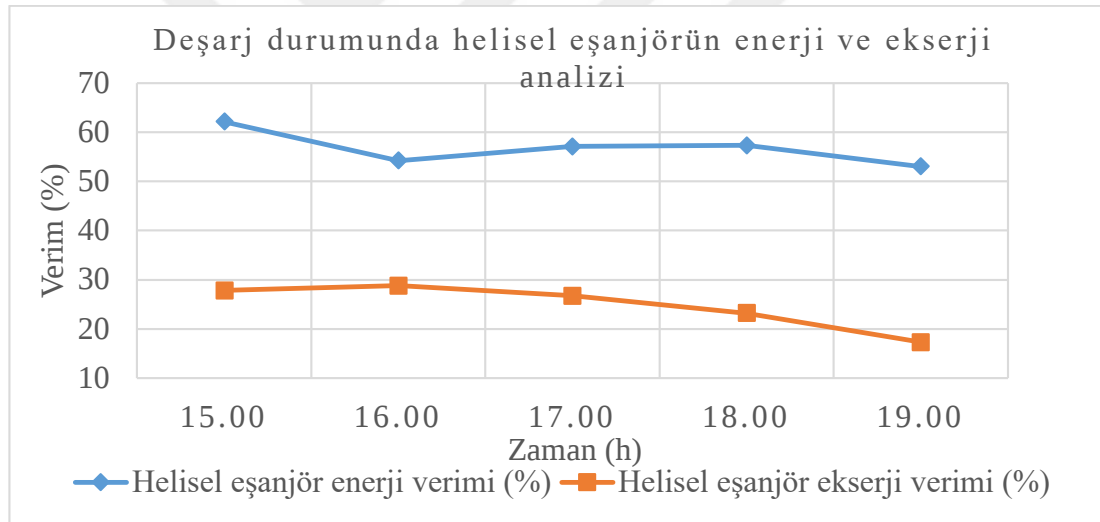
Şekil 49. Şarj durumunda düz fırındaki alıcı Hitec tuzu ile yapılan enerji ve ekserji analizi

Sarj durumunda fırındaki depolanan termal enerji, helisel boru eşanjör yardımıyla kullanıma sunuldu. Helisel eşanjör enerji verimi, fırından helisel boru ile çıkan faydalı enerjinin fırında depolanan enerjiye oranı olarak tanımlandı. Deneysel verilere göre Şekil 50’de görüldüğü gibi, helisel eşanjör enerji verimi başlangıçta %6,6 iken, deney sonunda %42,4 olarak Denklem (44) ile hesaplandı. Ayrıca şarj durumunda Denklem (64) ile hesaplanan helisel eşanjör ekserji verimi, başlangıçta %1,5 iken, beş saat sonra %32,5’e yükseldiği görülmektedir.

11 Ocak 2023 tarihinde yapılan deneyde, saat 15’te güneş ile yoğunlaştırıcı sistemin şarj işlemi tamamlanarak ısı depolama sisteminin deşarj işlemi başlatıldı. Buna göre deşarj durumunda, fırındaki helisel eşanjörün enerji ve ekserji verimi değişimi Şekil 51’de verilmektedir. Deşarj başlangıcında Denklem (44) ile hesaplanan ortalama helisel enerji verimi %57 olan 4 saat sonra yaklaşık olarak %53 olarak hesaplandı. Ayrıca helisel boru eşanjörün Denklem (64) ile hesaplanan ekserji verimi ise deşarj başlangıcında yaklaşık %28 iken, 2 saat sonra yaklaşık olarak %26,7’ye düştüğü ve 4 saat sonunda yaklaşık %17,3 olduğu Şekil 51’de görülmektedir. Sonuç olarak, ısı transfer yağı ve fırındaki Hitec tuzunun zamana göre sıcaklık değişimleri farklı olduğundan verim değerleri de değişkenlik göstermektedir.



Şekil 50. Şarj durumunda düz fırındaki helisel eşanjörün enerji ve ekserji verimi değişimi



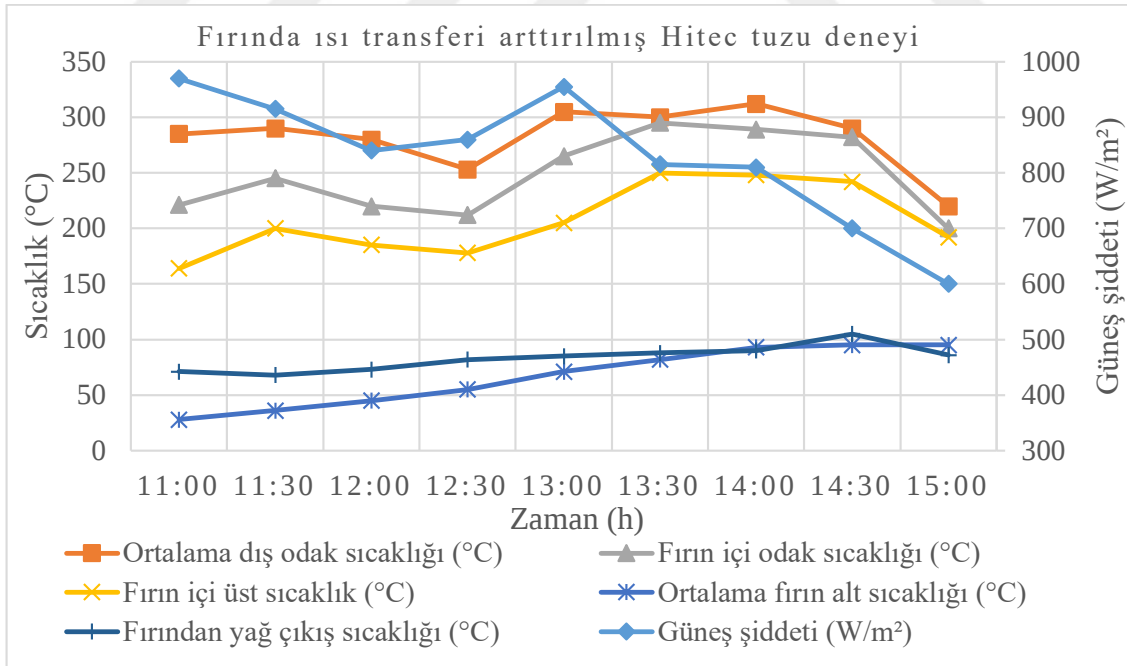
Şekil 51. Deşarj durumunda düz fırındaki helisel eşanjörün enerji ve ekserji verimleri

3.3.5. Isı Transferi Arttırılan Fırında Hitec Tuzu Isı Depolama Deneysel Verileri

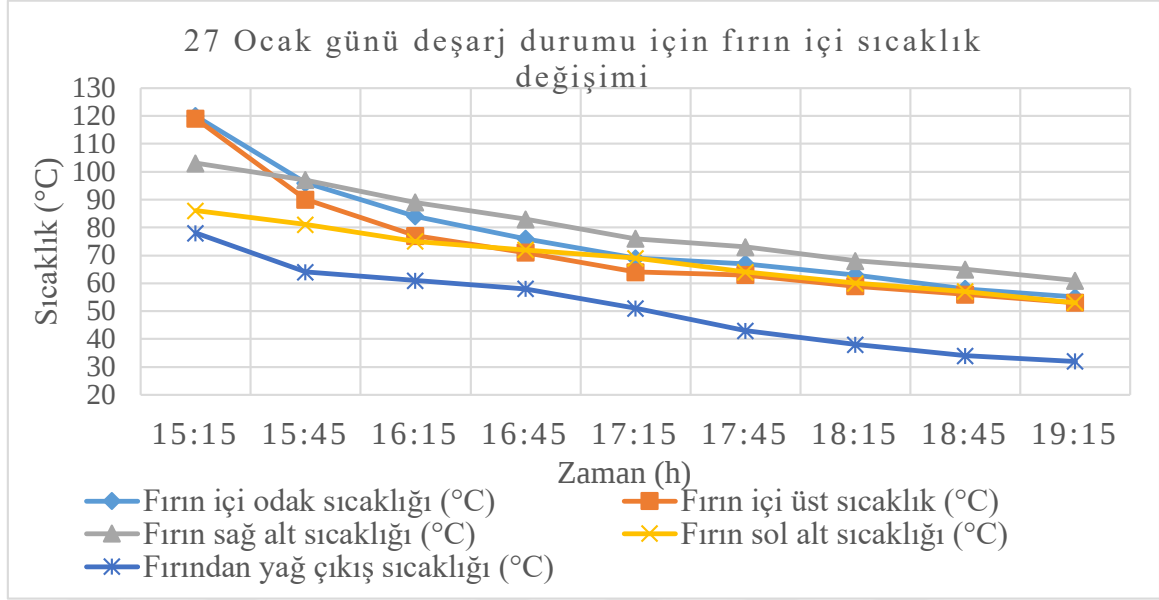
Hitec tuzu ile 2023 yılında Ocak ve Haziran aylarında yapılan deneylerde güneş fırını içerisinde ısı transferi artırılan yöntemler uygulandı. Öncelikle, odakta kuvars cam kullanılarak ve daha sonra silindirik alıcı ile deneyler yapıldı. 27 Ocak 2023 tarihindeki deneyde, odak alanında kuvars camlı ve fırın içerisinde kanatçıklı silindir ile ısı transferi artırılan yönteme ait bir deney yapıldı. Haziran 2023 tarihinde yapılan deneylerde ise kuvars

cam kaldırılarak ışınların direkt olarak fırındaki kanatçıklı silindirik metal alıcıya odaklanması sağlandı.

27 Ocak 2023 tarihinde Hitec tuzu ile gerçekleştirilen deneyde elde edilen veriler Ek Tablo 2’de verilmektedir. Ayrıca Şekil 52’de güneş şiddetine göre fırında oluşan FDM sıcaklık değerleri grafiği verilmektedir. Grafiğe göre, güneş şiddetine bağlı olarak fırın sıcaklıklarında dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu deneyde fırın içindeki ısı transferinin artırılması için, fırın içerisine Hitec tuzu ortasına 10 cm çapında paslanmaz çelik silindir yerleştirildi. Bu sayede fırın üst bölümünde oluşan ısıнын metal üzerinden fırının alt kısımlarına daha hızlı bir şekilde taşındığı test edildi. Isı transfer artırıcı paslamaz çelik silindir alıcının seçiminde korozyona karşı dirençli olması tercih edildi. Ayrıca ışınların fırın içerisine girdiği odak noktasına 3 mm kalınlıklı cam yerleştirilerek, fırın iç sıcaklık artışı ve doğal taşınım kaybının azaltılması sağlandı. Sonuç olarak fırın iç sıcaklığının artması ile fırındaki tüm Hitec tuzunun erimesi sağlandı. Isı transfer artırıcı bir yöntem olmayan önceki deneylere göre daha fazla erimenin olduğu gözlemlendi. Fırın ortasına yerleştirilen çelik silindir alıcı içindeki tuzların fırın deney anında yataya yakın olduğu için eriyerek aktığı ve çelik boru çevresinin eriyerek donduğu gözlemlendi.



Şekil 52. Fırında ısı transferinin artırılması ile elde edilen sıcaklık verileri



Şekil 53. Fırın içi ısı transferi arttırılmış Hitec tuzu deşarj durumu sıcaklık egrileri

Deşarj durumu için fırın içinde yaklaşık 4 saat boyunca ölçümler alınmaya devam edildi. Deşarj durumunda fırında ölçülen değerler Ek Tablo 3'te verilmektedir. Ayrıca Şekil 53'te deşarj durumunda fırın içi sıcaklık değerlerinin zamana göre değişim grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde, fırın alt sıcaklıklarının daha yavaş sıcaklık değişimi olduğu görülürken, odak bölgesinde ise daha hızlı bir sıcaklık düşüşü görülmektedir.

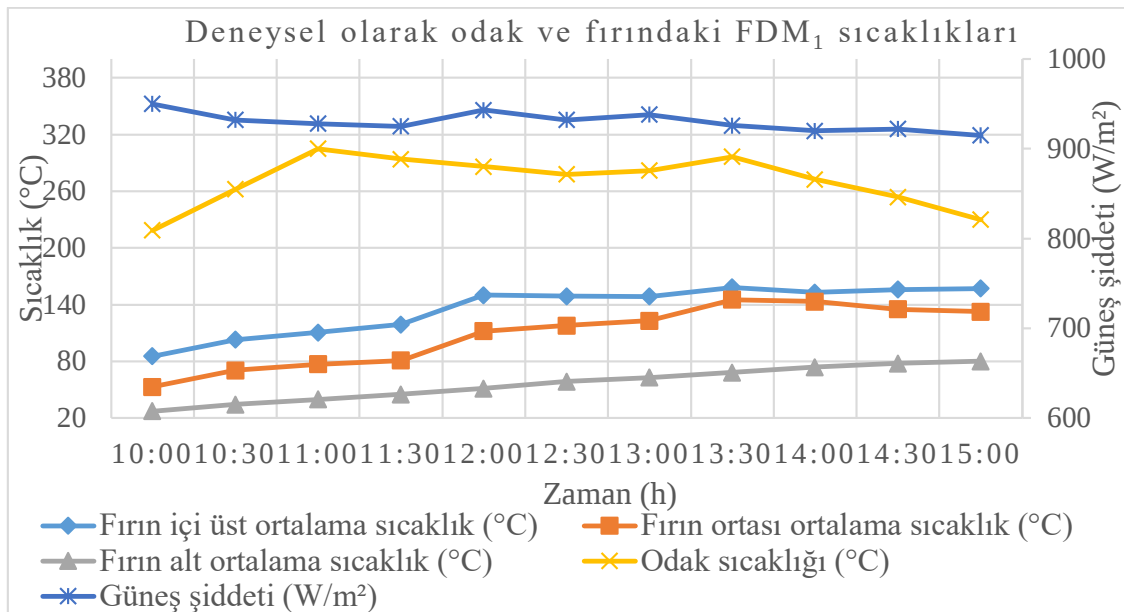
3.3.6. Uyarlamalı Fırın ve Isı Depolama Tankı İçin İlk Deneysel Veriler

HDY2 güneş fırınında FDM içerisinde ısı transferinin arttırılarak geliştirilmesiyle Haziran ayında güneş altında iki deney daha yapıldı. Bunlar 24 Haziran 2023 tarihinde birinci deney ve 25 Haziran 2023 tarihinde ikinci deney olarak adlandırılmaktadır.

24 Haziranda öncelikle havanın tam açık olması nedeniyle deneylerin yapılmasına karar verildi. 24 Haziranda hava sıcaklığı 23 °C, rügar hızı ise kuzey-doğu yönünde 10 km/h ve havadaki nem oranı yaklaşık %58'dir. Tasarlanan hareketli sistem sayesinde taşınabilen, sabahdan ve akşama kadar sistemin önüne geçecek engeller (ağaç ve bina vb.) dikkate alınarak konumu belirlenmiştir. Yoğunlaştırıcı sistemin bir yönü doğu batı ekseninde ve diğer yönü ise güney kuzey eksenine gelecek şekilde ayarlandı. Bu şekilde ayarlandıktan sonra sistem, ışın algılayıcı sensör sayesinde otomatik olarak veya bir kumanda yardımıyla manuel olarak güneşe yönlendirildi. Ayrıca deney boyunca ışınların odak alanına gelip

gelmediği gözle kontrolü yapıldı. Ek olarak, odak alanındaki termokupullar yardımıyla ölçülen sıcaklık değerinin artmasına bağlı olarak manuel olarak odak noktası ayarlandı. Böylece güneş ışınlarının odak alanına gelmesi ile fırın içerisinde sıcaklıklar artmaya başladı. Fırın içerisine ikişer üst, orta ve alt olmak üzere toplamda 6 termokupul elemanı yerleştirildi. Böylece gün boyunca fırında oluşan FDM1 sıcaklık değerleri Şekil 54'te verilmektedir. Güneş şiddetinin (900-950) W/m² aralığında değiştiği bir günde, fırın içinde üst noktada en yüksek sıcaklık 173 °C ve fırın ortalaması en yüksek sıcaklık ise 123 °C olarak ölçüldü. Fırın orta ve üst bölge sıcaklık ortalaması ise (145-150) °C aralığında olduğundan erime bu bölgelerde gerçekleştirildi.

Ek Şekil 8'de gün içinde, şarj durumunda depolama tankı içerisinde bulunan faz değişim malzemesi (Ca,Na,K;NO₃-FDM2) üzerinden ölçülen sıcaklık değerleri ve ısı depolama tankındaki eşanjöre yağ girişi ve eşanjörden yağ çıkış sıcaklık değerleri verilmektedir. Güneş fırınından depolama tankına giren motor yağı sıcaklığı ortalama 75 °C iken depolama tankındaki eşanjörden ortalama yağ çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 55 °C ölçüldü. Bu durumda depolama tankındaki FDM2 ortalama sıcaklığı (35-45) °C aralığında değiştiği tespit edildi. Fırın ve depolama tankı arasında motor yağı dolaşımı yaklaşık 15 dk ara ile yapılarak, fırında oluşan ısının depolama tankına aktarılması sağlandı. Ek olarak 24 Haziran deneyinde şarj durumunda ölçülen tüm parametre ve ilgili veriler Ek Tablo 4'te verilmektedir.



Şekil 54. Güneş şiddetine bağlı olarak uyarlamalı fırın ve odak sıcaklıklarının gün içindeki değişimi

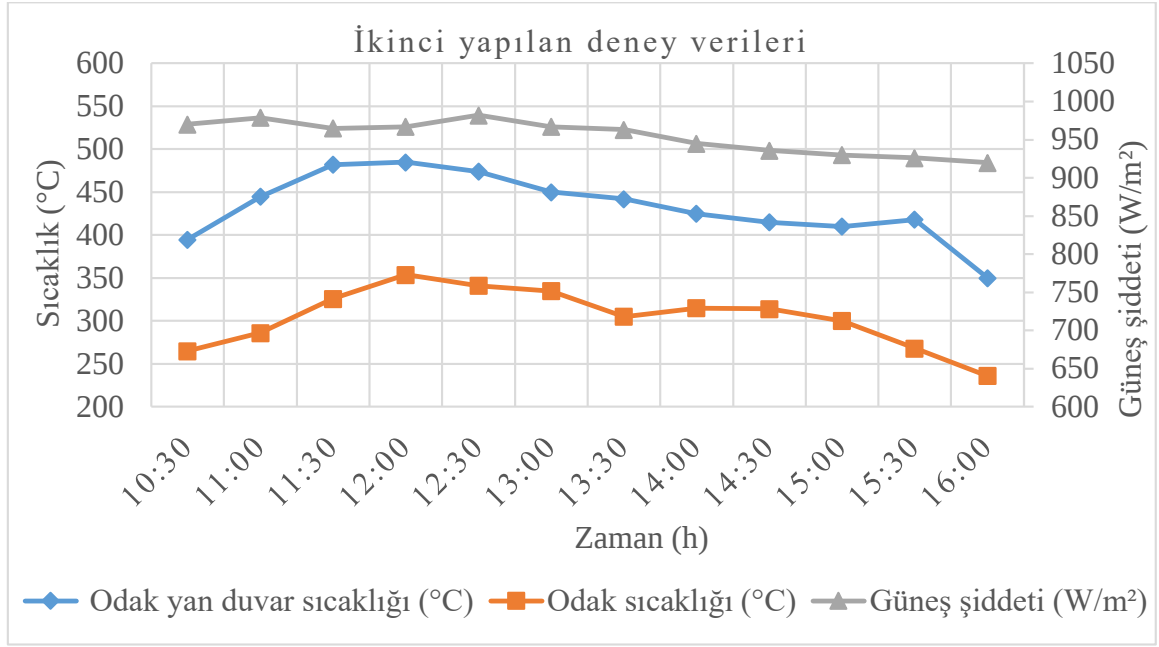
Deşarj durumu için, Ek Şekil 9'da görüldüğü gibi fırın içerisinde üst, orta ve alt bölgelerden alınan ölçümlerin zamana bağlı olarak ortalama FDM1 sıcaklıkları değişim grafiği verildi. Fırın üst bölgesi yalıtımsız olduğundan daha hızlı bir sıcaklık düşüşü ölçülürken, fırın tabanında daha yavaş hızda sıcaklık düşüşü ölçüldü. Eklemek gerekirse fırın tabanında 4 saat sonunda 80 °C'den 65 °C sıcaklığa düştüğü görüldü. Deşarj durumunda deney sonunda ısı depolama tankında FDM2 sıcaklık değeri yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Ek Şekil 10'da göüldüğü gibi depolama tankındaki eşanjöre giren ve çıkan yağ sıcaklıkları ise fırın sıcaklığının azalmasına paralel olarak değiştiği görülmektedir.

3.3.7. Uyarlamalı Fırın ve Depolama Tankı İçin İkinci Deneysel Veriler

Fırın sıcaklıklarının kararlılığını tekrar ölçmek için ve fırında yapılan iyileştirilmeler nedeniyle deneyler tekrarlandı. 25 Haziranda hava sıcaklığı 25 °C, rügar hızı ise kuzey-doğu yönünde (5-7) km/h ve havadaki nem oranı ise yaklaşık %81'dir.

Şarj durumunda bu deneyde fırın içerisinde üst bölgeden alınan ölçüme göre en yüksek sıcaklık 220 °C'dir. Gün içerisindeki verilere göre toplam fırın üst ve orta bölgesi FDM1 sıcaklıkları ortalaması alınarak yaklaşık olarak 164 °C hesaplandı. Bu durumda Hitec tuzunun erime noktası sıcaklığı (142 °C) aşıldığı için üst ve orta bölgelerin eridiği tespit edildi. Deney sonuna doğru ise fırın alt bölgesinin de eridiği belirlendi. Fırın içerisinden yaklaşık 15 dk ara ile 1 dk süre boyunca 30 °C olan motor yağı dolaşımı yapıldığında, fırın üst ve orta sıcaklıkları yaklaşık olarak 50 °C düştüğü diğital termometre üzerinden görüldü. Şarj sürecine devam edilmesiyle yaklaşık 10 dk içerisinde fırın içi FDM1 sıcaklığı ortalama fırın sıcaklığına tekrar ulaştı. Tablo 19'da gün içinde ölçülerek elde edilen fırın içi ve odak sıcaklık değerleri verilmektedir. Bunun yanında sıcaklık ölçümlerinin alındığı diğital termometrenin deney anındaki bir görüntüsü Ek Şekil 11'de verilmektedir. Bu fotoğrafta fırın üst sıcaklıkları kanal-1 için 220 °C ve kanal-4 ise 166,6 °C, orta sıcaklıklar kanal-2 206,1 °C ve kanal-5 ise 141,2 °C, fırın alt sıcaklığı kanal-6 ise 101,3 °C olduğu görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmada depolama tankı ve fırın bağlantı durumu Ek Şekil 12'de verilmektedir. Isı transfer akışkanı yağının karışım odasından fırına pompalandığında ısı depolama tankına sıcak yağ aktarıldı. Isı depolama tankında bekletilen yağdan FDM2 tuzuna ısı aktarıldı. Soğuyan akışkan, yağ pompası yardımıyla tekrar karışım odasına aktarıldı. Böylece yağ döngüsü tamamlandı.

Yaz ayında 25 Haziranda yapılan deneyde, ortalama güneş şiddetinin 950 W m^{-2} olduğu gün için, odak noktası sıcaklığı temassız olarak ölçülürken, odak yan duvar sıcaklık ölçümü ise çelik metali üzerinden yapıldı. Deneyde, çelik metal alıcı üzerinde ölçülen sıcaklık gün boyunca odak sıcaklığından daha yüksek olduğu görüldü. Ölçümlere göre ortalama odak sıcaklığı yaklaşık olarak $368 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 55'te görüldüğü gibi, alıcı çelik metali üzerinde ulaşılan en yüksek odak sıcaklığı ise saat 12.00'da $485 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu gözlemlendi.



Şekil 55. 25 Hazirandaki deneyde güneş şiddetine bağlı odak sıcaklıkları değişimi

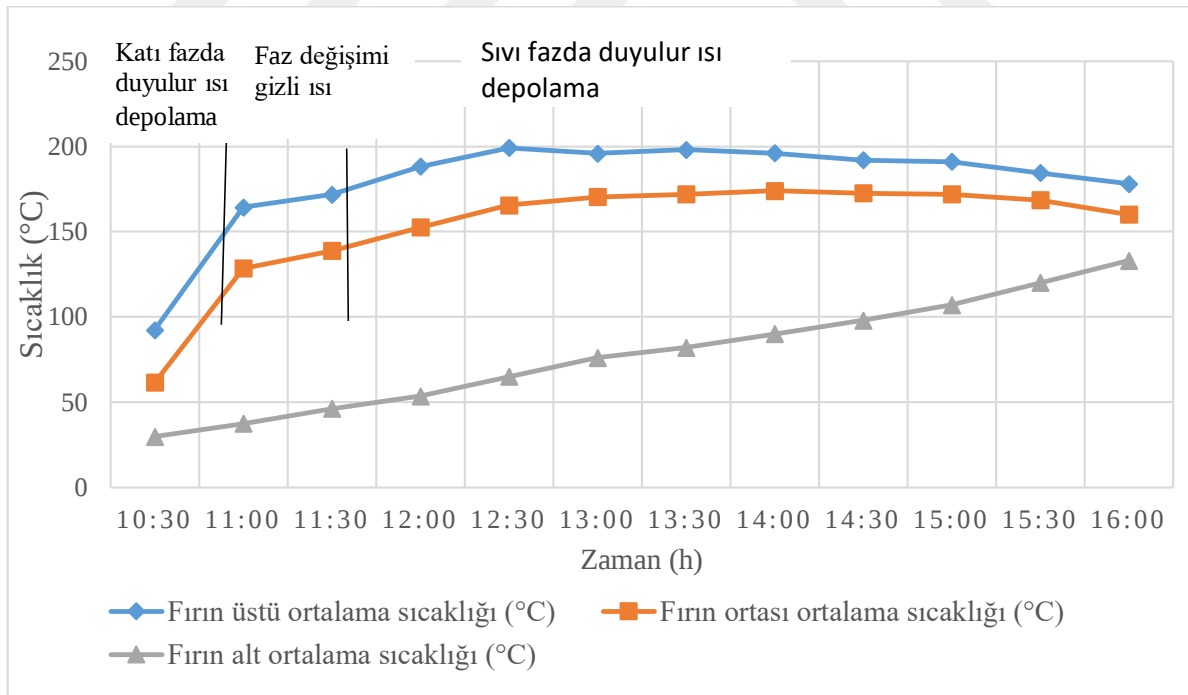
Şekil 56'da görüldüğü gibi, güneş fırını içindeki özellikle üst ve orta bölge sıcaklıkları daha hızlı bir şekilde yükselirken, faz değişimi de daha hızlı gerçekleşti. Fırın alt bölgesi ise daha yavaş ve doğrusal bir artış gösterdi. Üst ve orta bölgelerin ısısı fırın içerisine yerleştirilen helisel eşanjörden geçen yağ ile alındığı için bu gölgedeki FDM'nin sıvı fazdaki sıcaklıkları ($150\text{-}200$) $^{\circ}\text{C}$ aralığında dengelendi. Güneş ısıtım şiddetinin azalmasıyla deney sonunda, fırın üst bölgelerin sıcaklığının azalmasına rağmen fırın alt bölgesinde yine sıcaklık artışı gözlemlendi.

Deney anında uyarlamalı fırındaki helisel boru eşanjörde pompa aracılığıyla dolaştırılan ince motor yağı, depolama tankına aktararak daha sonra toplanma kabına gelmektedir. Isı transfer yağı olarak kullanılan motor yağının diğer ısı transfer yağlara göre tedarik edilmesi ve maliyeti daha uygundur. Deney süresince, toplanma kabında sıcaklığı 30

°C olan yağ bir doğru akım pompası yardımıyla yaklaşık 1,5 m yükseklikteki fırına gönderildi. Yaklaşık olarak 15 dk ara ile 1 dk süre pompa çalıştırılarak fırındaki ısı depolama tankına aktarıldı.

Tablo 19. 25 Hazirandaki şarj deneyinde fırındaki FDM1 ve odak sıcaklık verileri

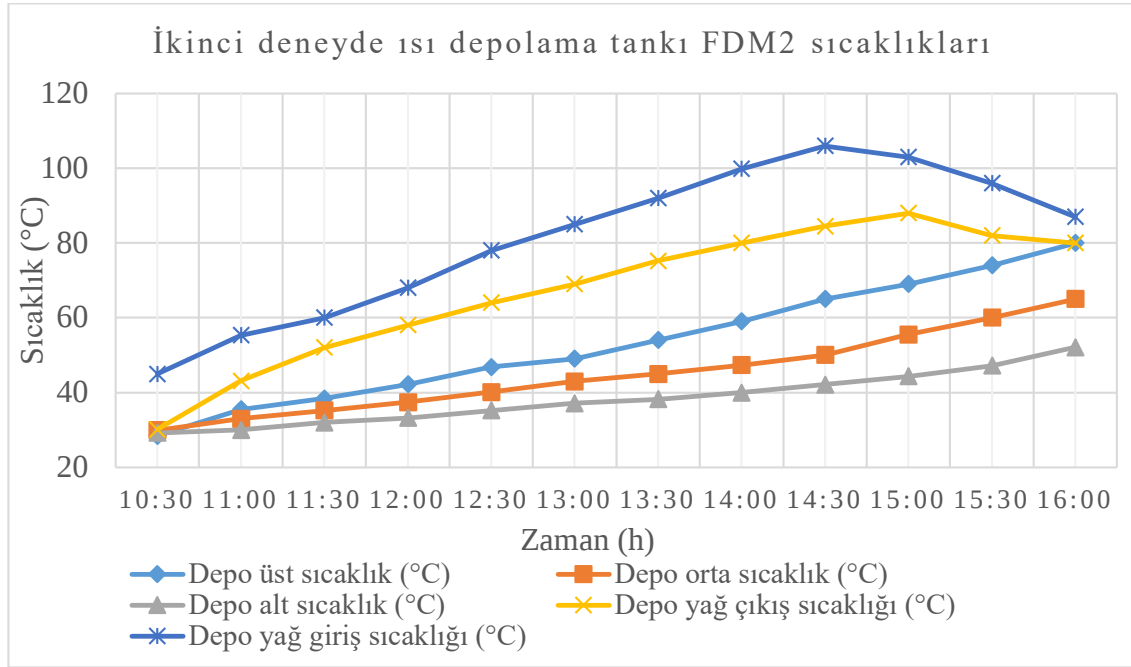
Saat	Güneş şiddeti (W/m ²)	Fırın üstü ortalama sıcaklığı (°C)	Fırın ortası ortalama sıcaklığı (°C)	Fırın alt ortalama sıcaklığı (°C)	Odak yan duvar sıcaklığı (°C)	Odak sıcaklığı, (°C)
10:30	970	92,3	61,55	29,8	395	265
11:00	979	164,2	128,5	37,45	445	286
11:30	965	171,85	138,8	46,15	482	326
12:00	967	188,15	152,5	53,55	485	354
12:30	982	199,2	165,5	65	474	341
13:00	967	195,9	170,35	76,2	450	335
13:30	963	198,2	172	82,05	442	305
14:00	945	196	174,1	90,2	425	315
14:30	936	192,1	172,5	98,1	415	314
15:00	930	191,1	172	107	390	300
15:30	926	184,4	168,5	119,8	418	268
16:00	920	178	160	133,2	320	236



Şekil 56. 25 Hazirandaki deneyde uyarlamalı fırın içinde FDM1 sıcaklıklarının değişimi

Şekil 57'de görüldüğü gibi, fırından çıkan yağ veya depolama tankına giren yağın ortalama sıcaklığı 80 °C olarak tespit edildi. Isı depolama tankından çıkan yağın ortalama

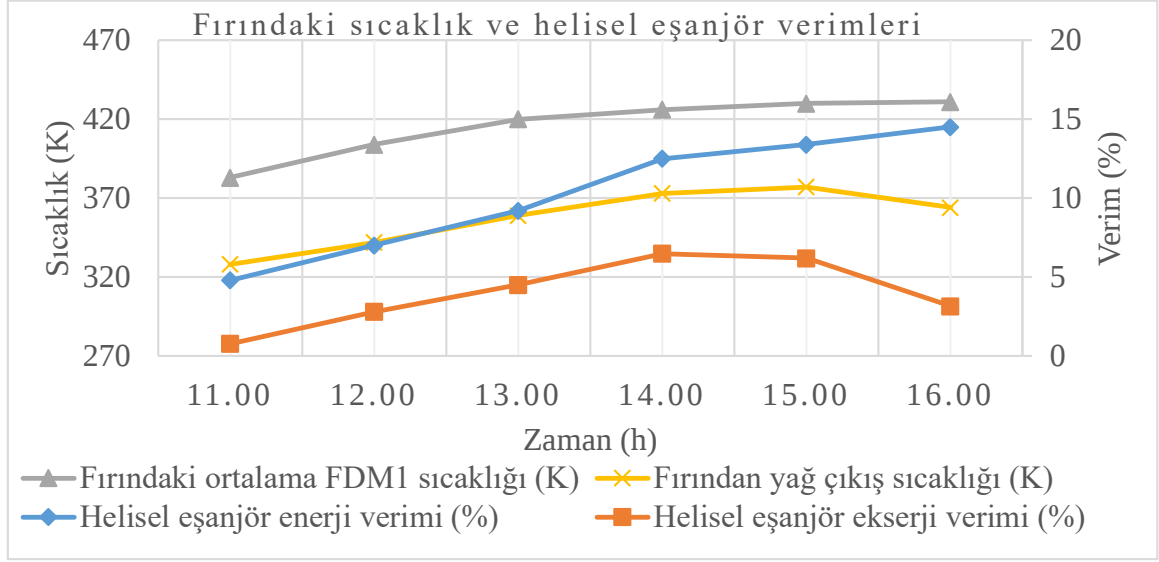
sıcaklığı ise 65 °C olarak tespit edildi. Bu durumda deney boyunca depolama tankı içinde FDM2 ortalama sıcaklığı 47 °C'ye ulaşırken, ısı depolama tankının üst bölümünde en yüksek sıcaklık ise 80°C ölçüldü. Sonuç olarak, ısı depolama tankında (FDM2) erime noktası yaklaşık (80-93) °C aralığında olmasından dolayı, bu yöntem ile depolama tankında ulaşılan sıcaklıklar nedeniyle daha çok duyulur ısı olarak depolama yapıldı. Bölgesel olarak helisel boru etrafında gizli ısı depolama yapıldı.



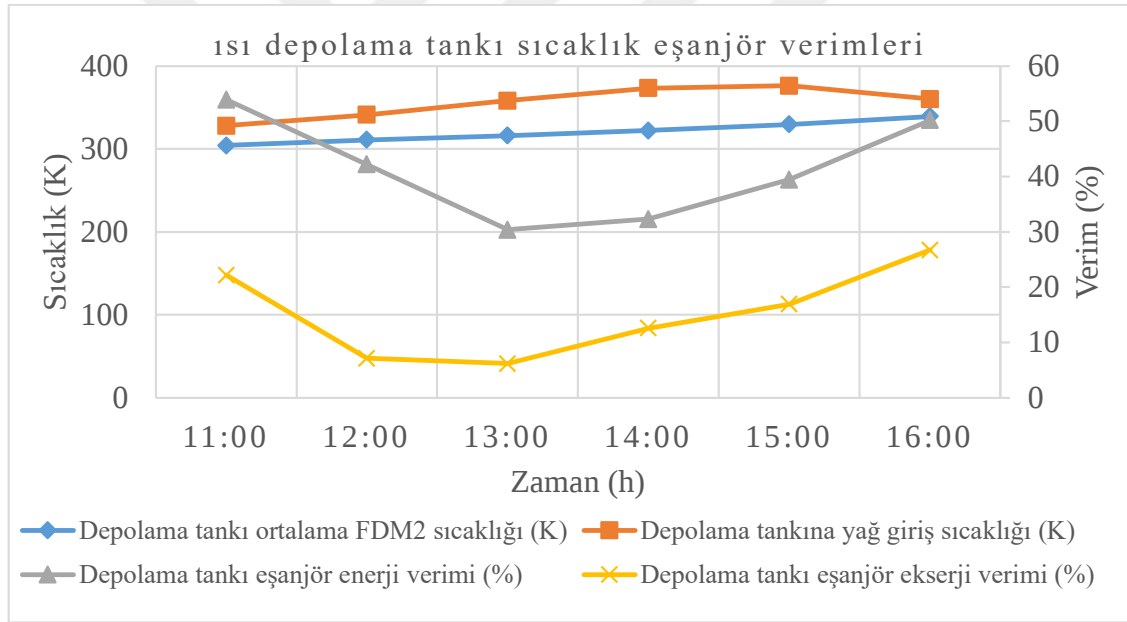
Şekil 57. Şarj durumu için ısı depolama tankı FDM2 ve eşanjör yağ giriş-çıkış sıcaklıkları

Şarj durumunda fırındaki helisel eşanjör enerji ve ekserji verimlerinin gün içindeki değişimleri Şekil 58'de verilmektedir. Grafikten görüldüğü gibi, FDM1 sıcaklık artışı ile denklem (34) ile hesaplanan eşanjör enerji verimi gün içinde artarak %14,5'e ulaştı. Ayrıca fırından yağ çıkış sıcaklığı 360 K seviyesinde olduğu görülürken, saat 14.00'te Denklem (54) ile hesaplanan en yüksek ekserji veriminin %6,5'e ulaştığı görülmektedir.

Isı depolama tankında oluşan yağ giriş sıcaklığı, FDM2 sıcaklığı, enerji ve ekserji verimlerinin şarj durumundaki değerleri Şekil 59'da verilmektedir. Buna göre 24 kg lık FDM2 orta bölge sıcaklığı 6 saat sonunda 339 K'e ulaştı. Helisel eşanjör çevresi ise (350-360) K olarak ölçüldü. Ek olarak, gün içindeki Denklem (44) ile hesaplanan ortalama helisel eşanjör enerji verimi %41,4 ve Denklem (64) ile hesaplanan ortalama helisel eşanjör ekserji verimi %15,3 olarak hesaplandı.



Şekil 58. Şarj durumunda fırındaki sıcaklık ve helisel eşanjör enerji ve ekserji verimleri

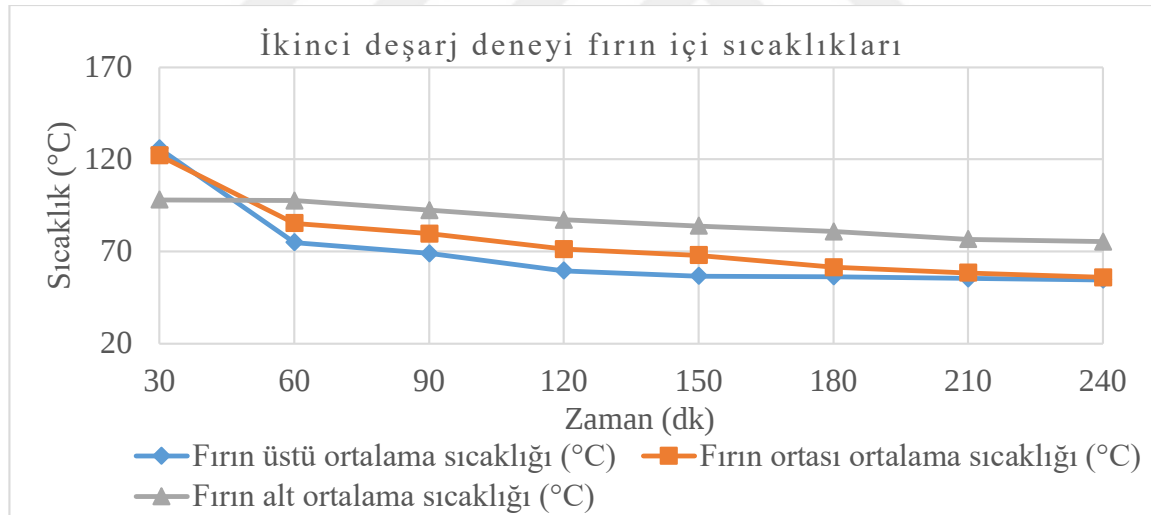


Şekil 59. Isı depolama tankı sıcaklıkları ile helisel eşanjör enerji ve ekserji verimlerinin zamanla değişimi

Güneş ışınları ile odaklama yapılmadığı durumda deşarj süreci başlatıldı. Şekil 60'taki grafikten fırın alt bölgesi ortalama sıcaklığı 100 °C iken 4 saatlik süre sonunda yaklaşık 80 °C 'ye düştüğü gözlemlendi. Fırın orta ve üst bölge sıcaklıkları ise yaklaşık 125 °C'den 55 °C'ye düştü. Bu deney anında çevre sıcaklığı ise 24 °C olarak ölçüldü. Deşarj süreci boyunca da yine ısı transfer yağı dolaştırılarak ısıнын depolama tankına aktarılması sağlandı. Böylece sistemin kullanım koşullarına göre güneş fırını test edildi. Bu deneyde fırında 4 saat sonunda

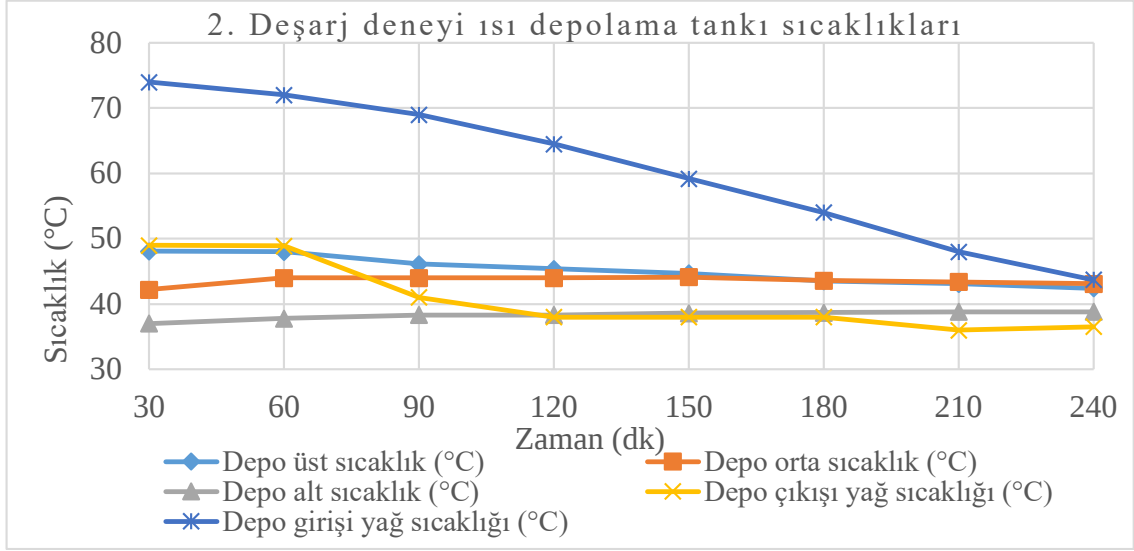
FDM1 ortalama sıcaklığı yaklaşık olarak 60° C’de olması bu ısı depolama sisteminin faydalı ve verimli olduğunu göstermektedir.

Deşarj durumunda, ısı depolama tankında FDM2’nin ve ısı transfer yağının zamana göre sıcaklık ilişkisi Şekil 61’de verilmektedir. Grafik incelendiğinde, ölçümü alınan 4 saatlik deşarj boyunca, depolama tankındaki FDM2’nin orta sıcaklığı yaklaşık olarak (40-50) °C aralığında sabit kalırken ısı transfer yağı sıcaklığında daha hızlı bir azalma gerçekleşti. Isı transfer yağı sıcaklığı 74 °C’den yaklaşık olarak 44 °C sıcaklığa düştü. Sonuç olarak, depolama tankındaki FDM2’nin sıcaklığının deşarj sürecinde sabit kalmasındaki en büyük etken ise fırından yağ akışkanı ile gelen termal enerjidir. Cam yünü ile yalıtımlı depolama tankında helisel borudan iletim yoluyla FDM2’ye aktararak kullanım koşullarına bağlı olarak belirli bir süre için ısı depolama sağlandı. Bu koşullar altında, fırında ve depolama tankında en az 10 saatlik bir ısı depolama yapılabildiği ortaya çıkarıldı. Deneyler sonrasında fırın içerisinde tuzun erime durumu kontrol edildi. Deney öncesi toz halinde fırına konulan Hitec tuzunun eriyerek helisel boru üzerinde katılaşmış kaldığı gözlemlendi.



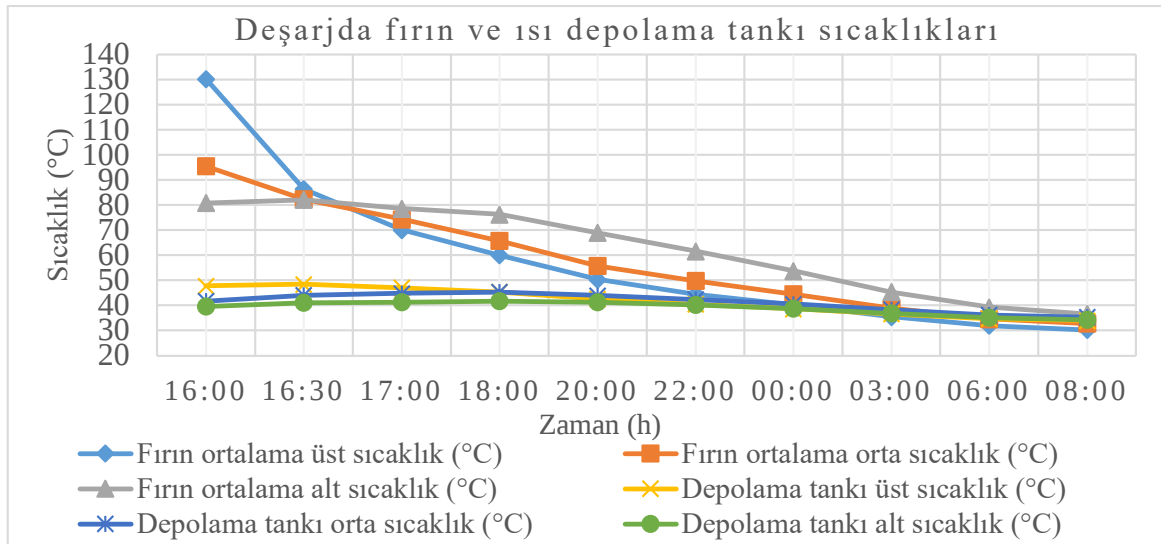
Şekil 60. Deşarj süresince ısı depolama tankı içindeki FDM1 sıcaklıklarının zamanla değişimi

27 Temmuz 2023’te deneysel yöntem ile ısı depolama tankı ve depolama tankında, 16 saatlik deşarj durumunu gösteren grafik Şekil 62’de verilmektedir. Deşarj sürecinde çevre sıcaklığı 22 °C’de olduğu durumda, üst ve orta bölgelerin ısıları fırın içerisine yerleştirilen helisel eşanjörden geçen yağ ile alındığı için bu bölgedeki sıcaklıklar (150-200) °C aralığında dengelendi.



Şekil 61. Deşarj durumu için ısı depolama tankında FDM2'nin zaman ile sıcaklık ilişkisi

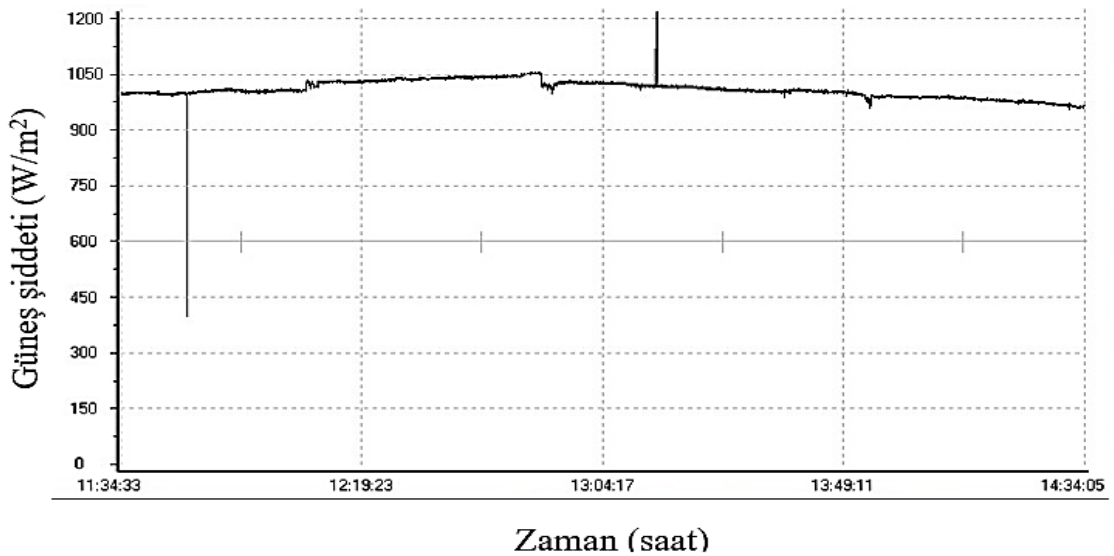
Deşarj durumunda, fırın sıcaklıkları başlangıçta, ortalama 102 °C'de iken, 4 saat sonra 58 °C'ye ve 16 saat sonra ise ortalama 33 °C'ye düştü. Aynı zamanda, depolama tankının iç sıcaklığı ise, başlangıçta ortalama 43 °C'de iken, 4 saat sonra 42,6 °C'ye ve 16 saat sonra 34,5 °C'ye düştüğü gözlemlendi. Isı depolama tankında depolanan düşük sıcaklığa rağmen, deşarj sonunda fırın sıcaklık değişimine göre daha düşük sıcaklık (10 °C) farkı meydana geldi. Isı depolama tankında düşük sıcaklık farkı nedeni, depolama tankının boyutuyla (24 kg FDM2'ye sahip) ve daha iyi yalıtımıyla ilişkilidir. Ayrıca güneş fırınında yaklaşık 16 kg FDM1'e sahipken, fırın üst yüzeyi (odak alanı) atmosfere açıktır.



Şekil 62. 16 Saat deşarj durumunda uyarlamalı fırın ve ısı depolama tankı FDM sıcaklıklarının zamanla değişimleri

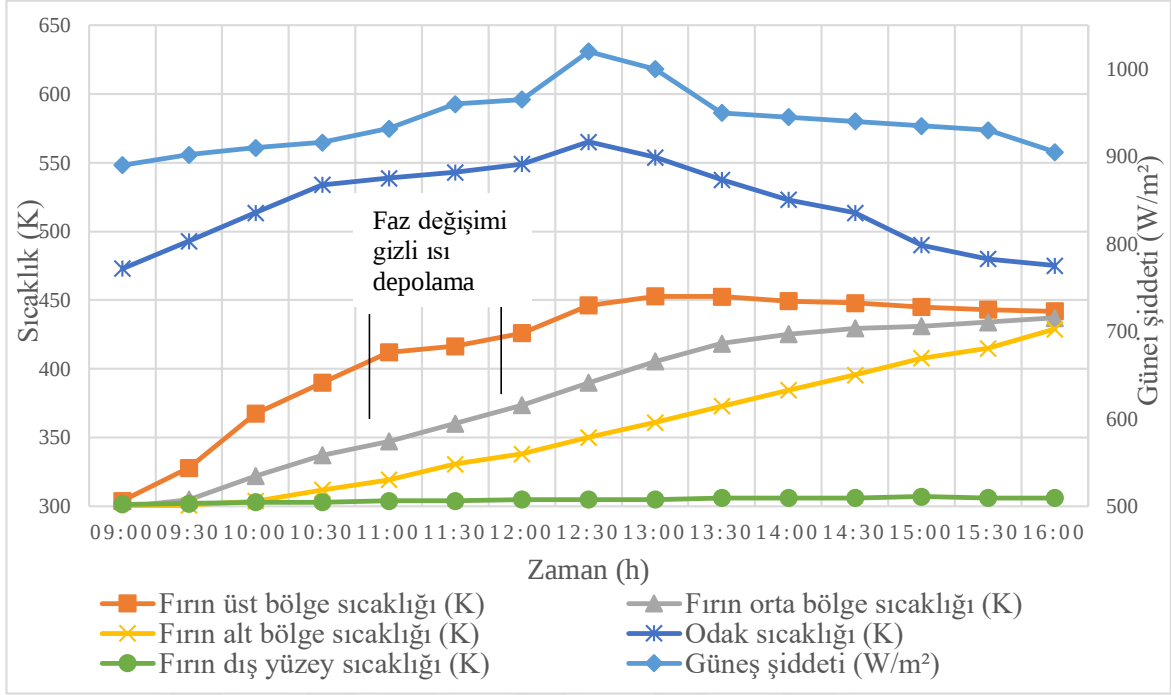
3.3.8. Uyarlamalı Fırın İçin Yapılan Son Deneysel Veriler

27 Eylül de yapılan deneyde datalogger özellikli solarimetre ile ölçümü alınan anlık güneş şiddeti değerlerini gösteren grafik Şekil 63'te verilmektedir. Bu şekle göre ölçülen saatler arası (11.30-14.30) güneş şiddeti değerinin (950-1050) W/m^2 aralığında olduğu görülmektedir. Gün boyu yapılan deneyde ölçülen güneş şiddetine bağlı olarak fırında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 64'te verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, odak sıcaklık değerleri güneş şiddetinin artmasıyla arttığı görülürken, odak sıcaklığının yaklaşık (475-550) K aralığında olduğu görülmektedir. Yapılan yedi saatlik deney sonunda, güneş fırınındaki Hitec tuzundan alınan ölçümlerde fırın üst, orta ve alt bölge sıcaklıkları sırasıyla 450 K, 437 K ve 430 K olarak tespit edildi. Böylece ölçülen sıcaklık değerlerine göre fırın içindeki Hitec tuzunun erime sıcaklığı noktasının aşılmasıyla tuzun tamamen eridiği tespit edildi. Bu durumda, gizli ısı ve sıvı fazda duyulur ısı olarak fırında FDM2'nin depolanması sağlandı. Ek Şekil 13'te deney sonunda güneş fırınından çıkarılan ve tamamen eriyen tuzun görüntüsü verilmektedir. Deney boyunca fırın dış yüzey sıcaklığı ise ortalama 305 K olarak ölçüldü. Bu dış yüzey sıcaklık değeri, fırın üzerinde yeterli bir yalıtımın yapıldığını göstermektedir.



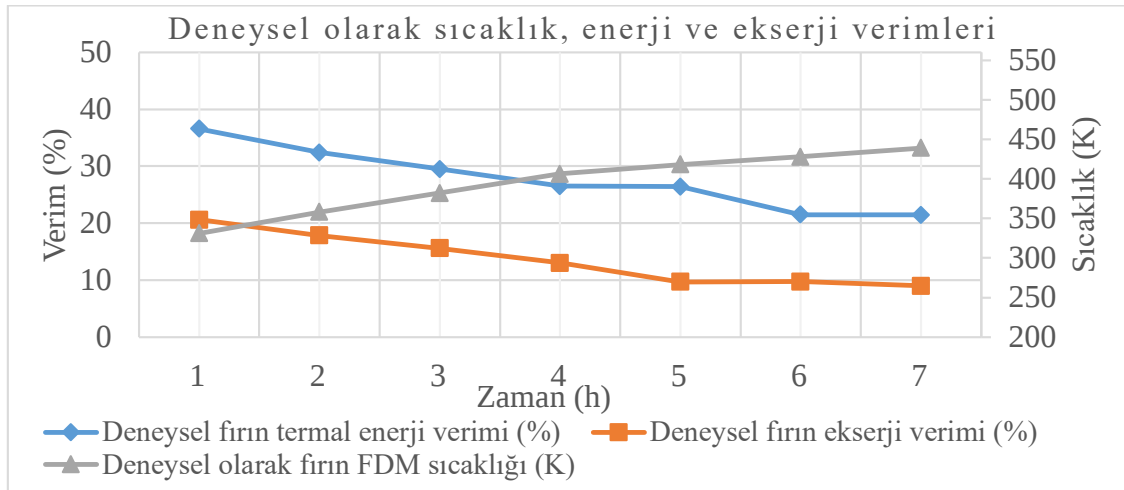
Şekil 63. 27 Eylüldeki deneyde 11:30-14:30 saatleri arası ölçülen güneş şiddeti değerleri

Deneysel olarak yapılan çalışmalarda daha yüksek sıcaklık ve verim sağladığı için, 25 Haziran deneyi verileri hesaplamalarda kullanıldı. Şekil 65'te deneysel olarak yapılan çalışmada fırında ulaşılan ortalama sıcaklığa bağlı olarak elde edilen fırın enerji ve ekserji verimleri grafiği verilmektedir.



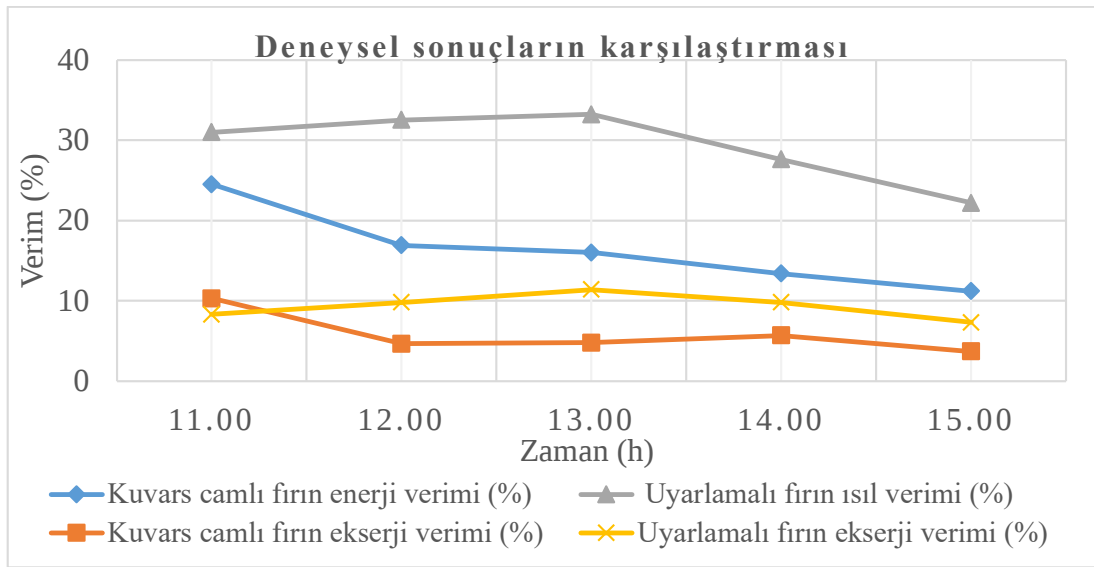
Şekil 64. Güneşli bir günde yapılan deneyde fırın üzerinde elde edilen veriler

Şekil 65'e göre yedi saatte ortalama Hitec tuzu sıcaklığı yaklaşık 440 K'e ulaşarak fırındaki erime tamamlandı. Deney ilerledikçe eritilen FDM miktarı hızının düşmesiyle fırın enerji ve ekserji verimleri de düştü. Deney sonunda, eriyik kütleli debisine bağlı olarak Denklem (41) ile enerji verimi %21,5 ve ekserji verimi Denklem (63) ile yaklaşık %9 olarak hesaplandı. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin direkt uygulandığı bölgelerde daha hızlı erime gerçekleşirken, Hitec tuz ısı iletim katsayısının düşük olmasından dolayı fırın tabanına doğru erime hızı daha yavaştır.



Şekil 65. Deney olarak elde edilen ortalama sıcaklık, enerji ve ekserji verimleri

Son olarak yapılan deneysel çalışmalardaki verimlerin karşılaştırılması Şekil 66’da verilmektedir. Grafik incelendiğinde, Ocak ayındaki kuvars camlı fırında, ışınların fırın içerisine girmesiyle odak bölgesinde yüksek sıcaklıklar oluşurken, fırındaki inorganik tuzun düşük iletim katsayısından dolayı daha yavaş bir erime sağlar. Bu nedenle daha düşük erime debisi ile daha düşük bir verim elde edilmektedir. Haziran ayında ise uyarlamalı fırındaki enerji ve ekserji verimleri daha yüksek olduğu görülmektedir. Uyarlamalı fırında gelen ısının fırın içerisine aktarılmasıyla fırın iç sıcaklığındaki artış ile birlikte erime oranı da artmaktadır. Böylece inorganik tuz erime oranına bağlı olarak verimlerde değişkenlik göstermektedir.



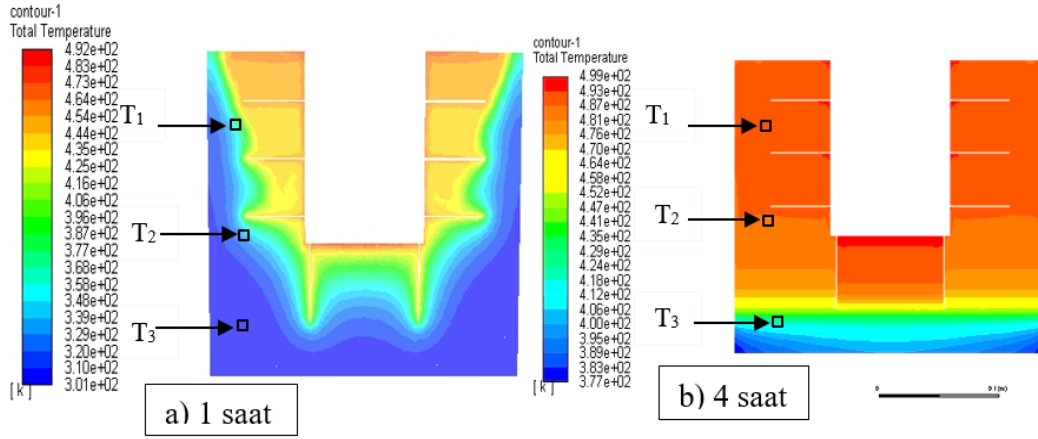
Şekil 66. Kuvars cam ve uyarlamalı fırının deneysel olarak enerji ve ekserji verimlerinin zaman ile değişimi

3.3.9. Güneş Fırını İçin Sayısal Model ile Deneysel Verilerin Karşılaştırılması

Uyarlamalı güneş fırını modelinin doğrulaması yapılması için, deneysel veriler ile sayısal veriler karşılaştırıldı. Şekil 67’de görüldüğü gibi, sayısal HAD olarak sıcaklık kontörleri üzerinden işaretlenerek, yapılan deneydeki fırın sıcaklık verileri karşılaştırıldı.

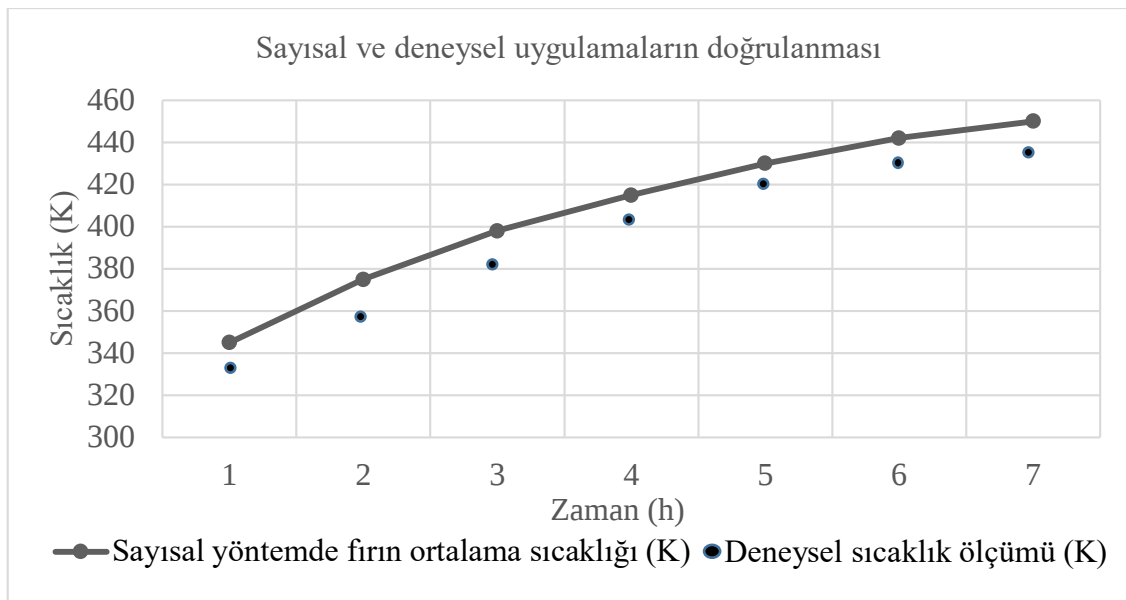
Şekil 67a’da görüldüğü gibi, deneysel yöntemde 1 saat sonraki ölçümlerde, fırın üst bölge sıcaklığı T_1 , yaklaşık olarak 376 K iken, sayısal yöntemde sıcaklık kontörü üzerinde ise yaklaşık 400 K’dir. Fırın orta bölgesi sıcaklığı T_2 , deneysel olarak 327 K olarak ölçülürken, sayısal yöntemde sıcaklık kontörü üzerinde 330 K civarındadır. Fırın alt bölge sıcaklığı T_3 , deneysel olarak yaklaşık 304 K ölçülürken, sıcaklık kontörü üzerinde yaklaşık

305 K olduğu görülmektedir. Birinci saatte deneysel ve sayısal uygulamalardaki yapılan ölçümler birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 67. Sayısal sıcaklık kontörlerinin deneysel ölçümler ile karşılaştırması

Şekil 67b’de görüldüğü gibi fırın ortalama sıcaklığı, 4 saat sonraki doğrulama için, deneysel olarak 453 K olarak ölçülürken, sayısal yöntemde sıcaklık kontörü üzerinde yaklaşık 480 K olarak okunmaktadır. Fırın orta bölge sıcaklıkları, deneysel olarak 425 K iken, sayısal olarak 470 K olarak okunmaktadır. Fırın alt bölge sıcaklıkları ise deneysel olarak 373 K iken, sayısal olarak 400 K olarak okunmaktadır. Bu durumda sayısal yöntemde fırın içindeki sıcaklıkların daha hızlı arttığı görülmektedir.

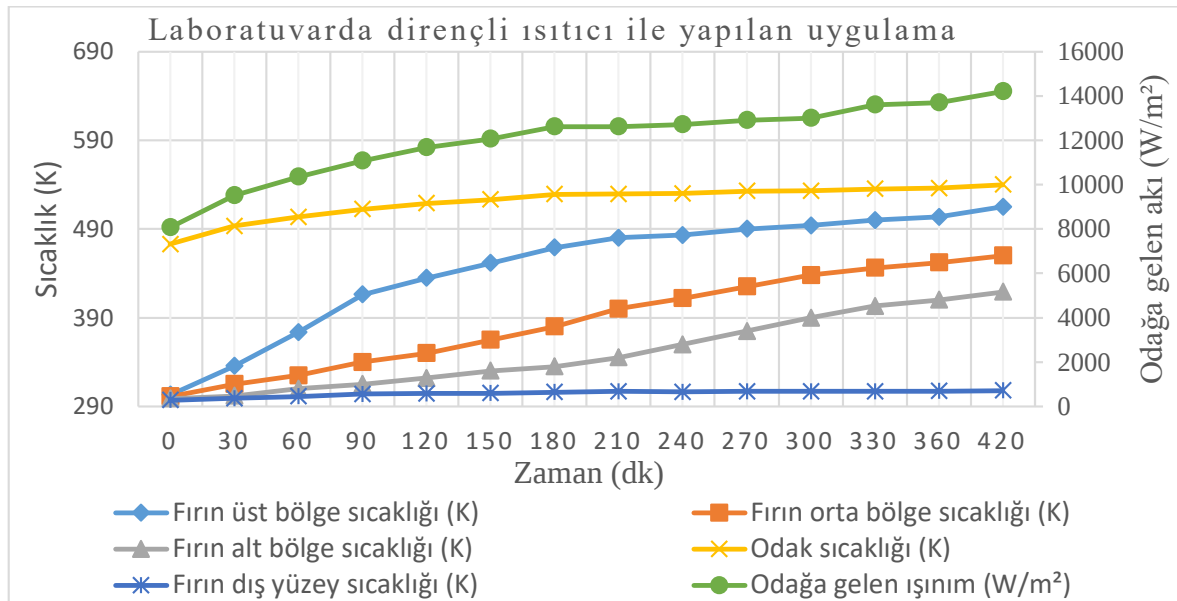


Şekil 68. Sayısal yöntem ve deneylerdeki fırın iç sıcaklıklarının karşılaştırılması

Şekil 68’de fırın iç sıcaklıkları, sayısal yöntem üzerinde deneysel çalışmaların karşılaştırılması grafik olarak verilmektedir. Sonuç olarak, 4 saat sonunda deneysel veriler ile sayısal veriler karşılaştırıldığında, deneysel koşullarda mükemmel bir odaklama yapılamadığından ve fırından çevreye daha fazla ısı kaybından dolayı fırın iç sıcaklıklarının daha düşük olduğu gözlemlendi. Ayrıca sayısal uygulamalarda odak noktasına verilen enerji daima sabittir. Bu durum, sayısal uygulamalarda FDM sıcaklığını ve erime oranlarını artırdı.

3.3.10. Laboratuvarda Dirençli Isıtıcı ile Yapılan Kalibrasyon Sonuçları

Laboratuvar ortamında dirençli bir ısıtıcı yardımıyla fırında elde edilen ilk veriler Tablo 20’de verilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan güneş fırını aynı zamanda laboratuvar ortamında da kullanıldı. Tabloda, deney boyunca ortalama odak sıcaklığı 522 K olarak ve fırın içi üst, orta ve alt bölgesi ortalama sıcaklıkları sırasıyla 515 K, 460 K ve 419 K olarak dijital termometre ile ölçüldü. Şekil 69’da bu deneydeki fırında ölçülen tüm sıcaklıkların zamana göre değişim grafiği verilmektedir. Yaklaşık olarak yedi saat içinde güneş fırınındaki tüm Hitec tuzunun eridiği tespit edildi. Ayrıca, odak noktasında ölçülen ortalama sıcaklık değerine göre Denklem (21) ile hesaplanan odak ısı akısı değerleri zamana bağlı olarak verilmektedir. Güneş fırını dış yüzey sıcaklığı ise ortalama 305 K olarak sabit kalmaktadır.



Şekil 69. Laboratuvarda yapılan dirençli ısıtıcı deneyinde fırında elde edilen veriler

Laboratuvar ortamında yapılan deneyde güneş fırınında elde edilen ortalama sıcaklık değerlerine göre hesaplanan fırın verim değerlerinin zamana göre değişimleri Şekil 70’de verilmektedir. Şekil incelendiğinde, güneş fırını ortalama sıcaklığı beşinci saatte (300 dk) Hitec tuzunun erime noktasına ulaşırken, deney sonunda fırın ortalama sıcaklığı 442 K olarak ölçüldü. Buna göre fırın verimleri ise deney boyunca azalarak ortalama %27,3 değeri elde edildi. Bu durumda laboratuvar ortamında deney boyunca güneş fırınındaki Hitec tuzu eritme debisi ortalama 0,0008 kg/s olarak hesaplandı.

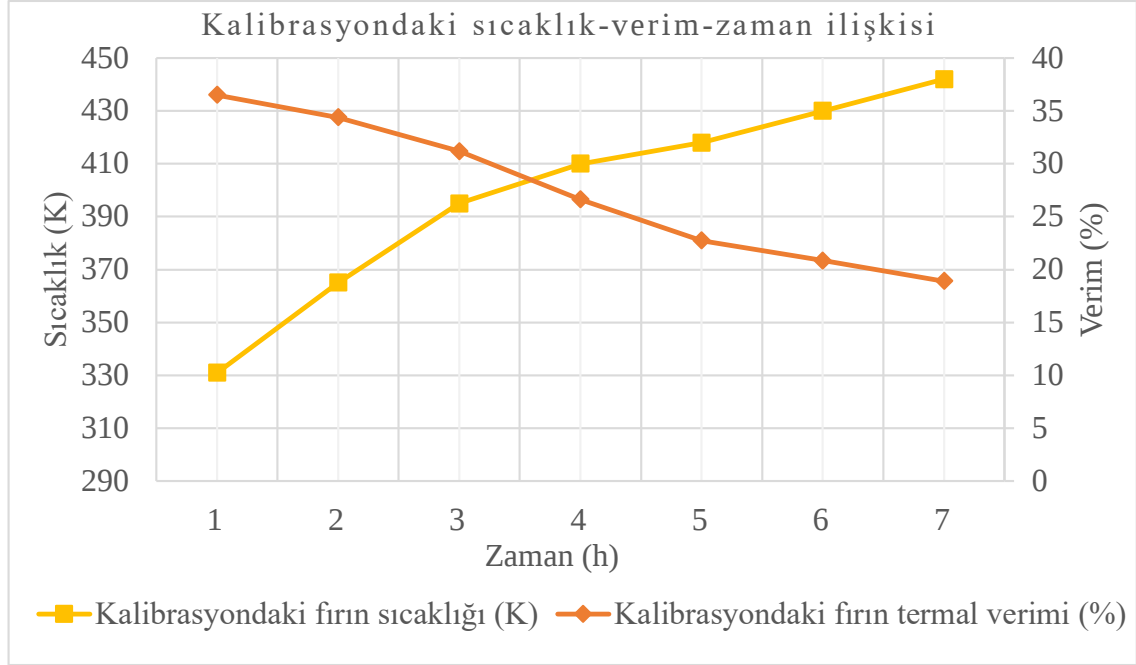
Tablo 20. Laboratuvarda dirençli ısıtıcı ile yapılan Hitec tuzu eritme deneyi verileri

Zaman (dk)	Fırın üst bölge sıcaklığı (K)	Fırın orta bölge sıcaklığı (K)	Fırın alt bölge sıcaklığı (K)	Odak sıcaklığı (K)	Fırın dış yüzey sıcaklığı (K)
0	303.1	301.25	298.9	473	297.15
30	335.6	315	302	493.2	299.1
60	373.75	325	310	503.5	301.25
90	416	340	315	512.1	303.9
120	434.8	350	322	518.9	304.45
150	451.65	365	330	523.1	305
180	469.1	380	335	529	305.95
210	480.1	400	345	529.3	307
240	483	412	360	530	306.35
270	489.95	425	375	532.6	306.95
300	494	438	390	533	307.05
330	500	446	403	539	307.05
360	503.5	452	410	540	307.15
420	515	460	419	550	308

3.3.11. Uyarlamalı Fırında İnfrared Lamba ile Yapılan Kalibrasyon Sonuçları

Güneş fırınında yapılan ısı transferi artırıcı etmenlerin kullanılması ve düzenlemeler sonrası infrared lamba ile laboratuvar ortamında deneyler yapıldı. Bu deneyde 1700 W’lık 4 adet infrared lamba kullanılarak, deneysel yöntemde oluşan ısı akısına yaklaştırıldı. Böylece güneş altında deneysel yapılan çalışmaya yakın bir gücün fırına girişi sağlandı. Şekil 71’de infrared lamba ile yapılan şarj deneyinin zamana göre odak ve fırın iç sıcaklık değişimi gösteren bir grafik verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde, odak noktasında termoelemanın temassız alınan ölçümü yaklaşık olarak 300 °C de sabit kaldığı görülmektedir. Uyarlamalı

fırında odak yüzeyi genişletilip odak noktası fırın içerisine doğru kaydırılan odakta metal dış yüzeyin üzerinden alınan ölçümün 150 °C de sabit kaldığı görüldü. Bu odak yüzeyinde fırın içerisine iletim ile ısı transferi olurken fırın içi sıcaklığı zaman ile artış gösterdi. Uyarlamalı fırında dört infrared lambalı şarj deneyinin tüm verileri Tablo 21’de verilmektedir.

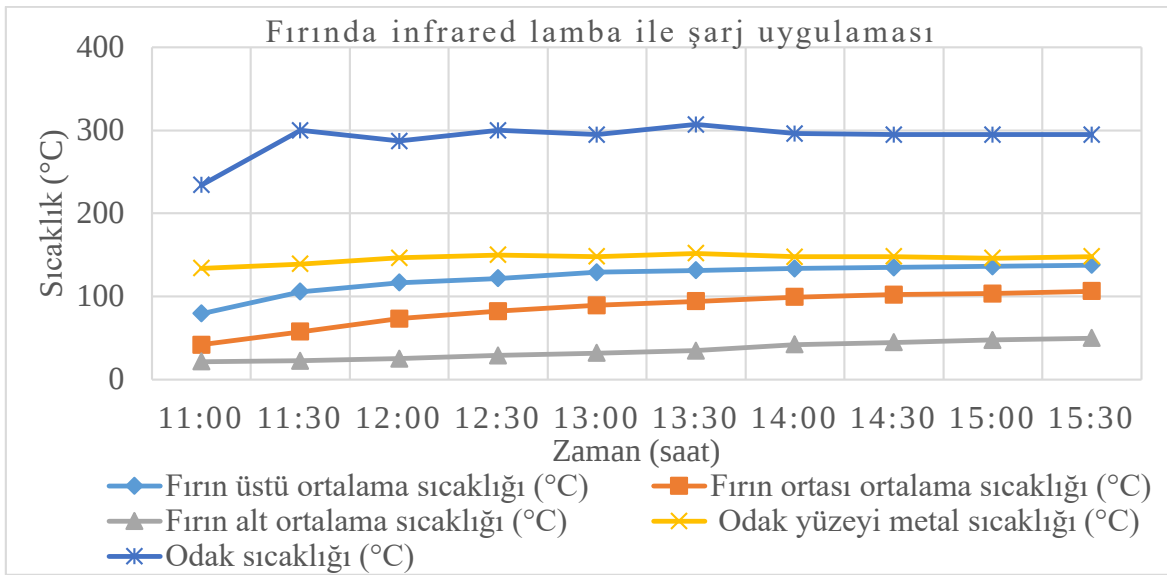


Şekil 70. Kalibrasyondaki uygulamada fırındaki FDM ortalama sıcaklığının ve termal verimin zamanla değişimi

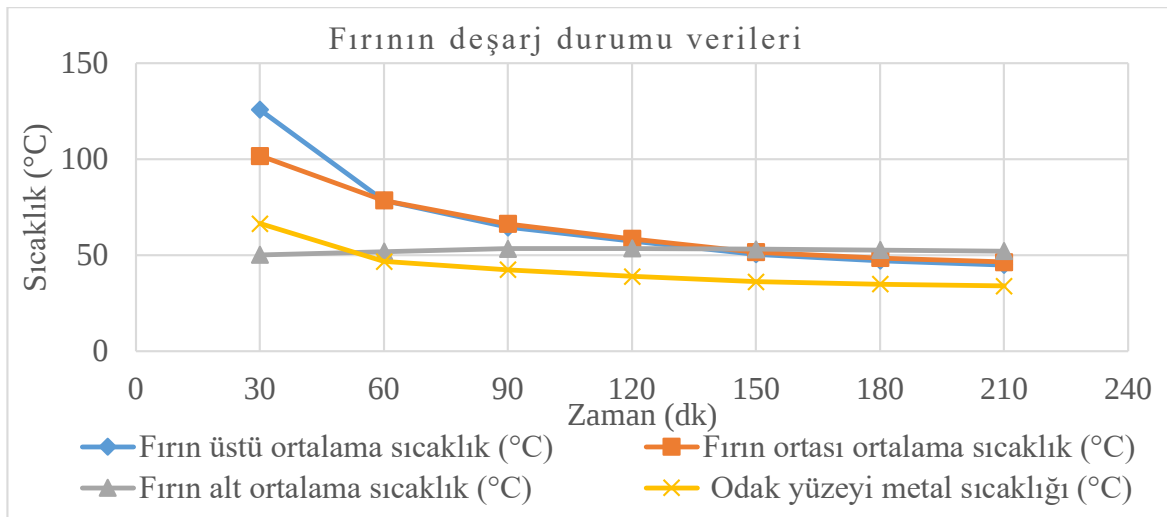
Tablo 21. İnfrared lamba ile uyarlamalı fırında şarj deneyi verileri

Saat	Fırın üstü ortalama sıcaklığı (°C)	Fırın ortası ortalama sıcaklığı (°C)	Fırın alt ortalama sıcaklığı (°C)	Odak yüzeyi metal sıcaklığı (°C)	Maksimum Odak sıcaklığı (°C)
11:00	79,3	41,7	21,6	134	234
11:30	105,6	57,45	22,4	139	300
12:00	116,6	73,35	24,95	146,6	287
12:30	121,6	82,35	28,95	150	300
13:00	129,15	89,3	31,85	148	295
13:30	131,5	94,1	34,8	152	307
14:00	133,5	99,35	42	147,8	296
14:30	135	102,1	44,45	148,2	295
15:00	136,1	103,35	47,6	146,2	294,7
15:30	137,75	106,2	49,6	148	295

Deşarj durumunda uyarlamalı fırında infrared lamba deneyinden elde edilen veriler Ek Tablo 5’te verilmektedir. İnfrared lambaların kapatılması ile deşarj sürecince fırın iç sıcaklık değerleri ölçümüne devam edildi. Şekil 72’de deşarj işleminde alınan fırın içindeki Hitec tuzu sıcaklık ölçümleri grafik halinde verilmektedir. Grafik incelendiğinde, deşarj işlemi için yaklaşık 3,5 saat ölçümler alındı. Uyarlamalı fırın alt bölgesi sıcaklığı 52 °C’de değişmezken, üst ve orta bölgelerde başlangıçta ortalama sıcaklığı 120 °C’iken 3,5 saat sonunda ortalama sıcaklığı 45 °C’ye düştüğü gözlemlendi. Odak sıcaklığı ise ortam sıcaklığına daha hızlı indiği tespit edildi.



Şekil 71. İnfrared lamba uygulamasında odak ve uyarlamalı fırın iç sıcaklıklarının zaman ile değişimi



Şekil 72. İnfrared lamba uygulaması sonrası deşarj sürecinde fırın iç sıcaklık değerleri

Sonuç olarak fırında deşarj işleminde, fırın alt bölümü üzerinde düşük iletkenliğe sahip inorganik tuz olduğundan bu bölgenin sıcaklığı çok yavaş değişmektedir. Bu nedenle özellikle dış yüzeyi yalıtımlı fırın alt bölgesinde inorganik tuzlar sıvı haline geldiğinde daha uzun bir ısı depolama işlevi görebilir.



4. TARTIŞMA

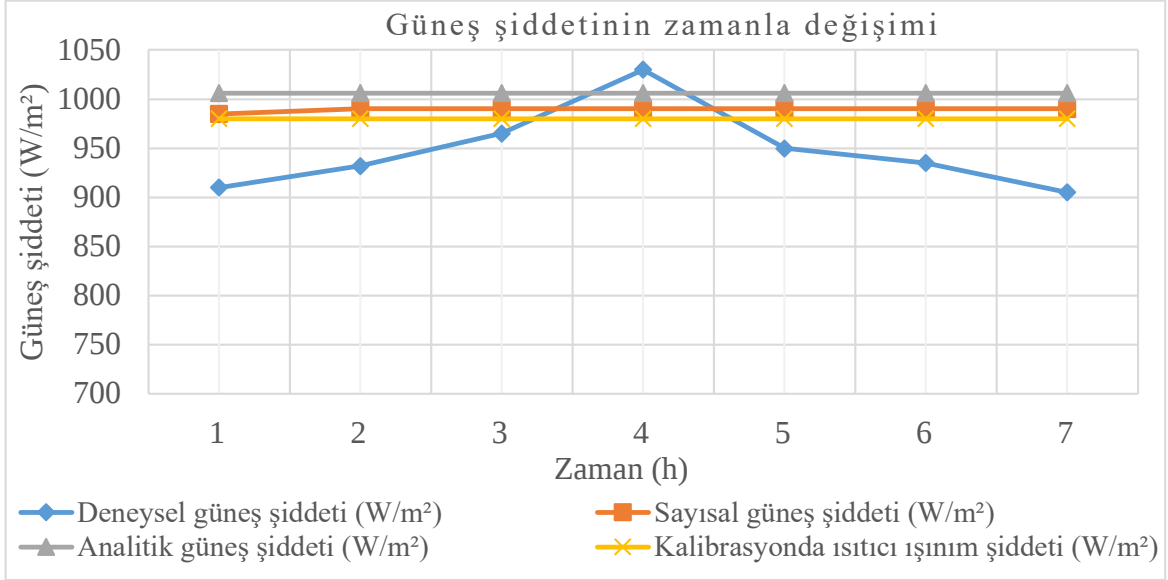
4.1. Deneysel, Analitik, Sayısal (HAD) ve Kalibrasyon Verilerin Karşılaştırılması

HDY2 sisteminde çalışılan tüm yöntemlere ait güneş şiddeti, odak ve fırın iç sıcaklıkları, fırın dış yüzey sıcaklıkları ve odaktaki ısı akısı ortalama değerleri Tablo 22’de verilmektedir. Ölçülen güneş şiddeti ve hesaplanan ışıyım şiddetleri birbirlerine oldukça yakındır. Bunun yanında ölçülen odak ve fırın FDM sıcaklıkları ile hesaplanan bu sıcaklık değerleri birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca sayısal yöntem ile okunan ve deneysel verilere dayanılarak hesaplanan analitik ve deneysel odak ısı akısı değerleri de birbirine yakındır.

Deneysel, analitik, sayısal yöntem ve kalibrasyonu laboratuvarında yapılan HDY2 ısı depolama sistemine ait zamana göre elde edilen veriler aşağıda grafik halinde verilmektedir. Öncelikle güneş şiddetinin deneysel olarak ölçümü yapılırken, teorik olarak Denklem (21) ile zamana göre hesaplanan değerleri Şekil 73’te verilmektedir. Şekil incelendiğinde, deneysel ölçümde güneş şiddeti 14400 saniyede en yüksek seviyedeysen, sabah ve akşama doğru azaldığı görülmektedir. Sayısal yöntemde ve laboratuvar kalibrasyonunda ise hesaplanan ışıyım şiddetinin yaklaşık olarak sabit kaldığı Şekil 74’te görülmektedir. Analitik olarak Temmuz ayı öğle vakti için, hesaplanan güneş şiddeti ise 1006 W m^{-2} değerinde zamana göre sabit kalmaktadır. Tüm yöntemlerde ortalama güneş şiddeti değerleri birbirine yakın olduğu görülmektedir.

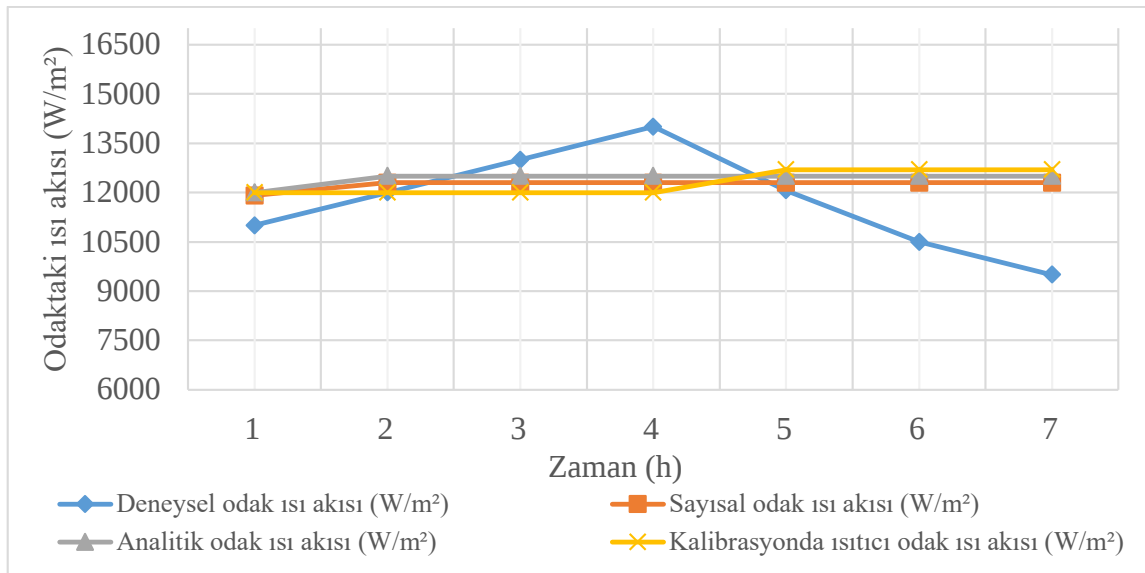
Tablo 22. HDY2 sisteminde tüm yöntemler ile elde edilen ortalama sonuçlar

Yöntem	Güneş şiddeti I (W/m^2)	Odak ısı akısı Q (W/m^2)	Odak sıcaklığı (K)	Termal verim (%)	Fırın ortalama iç sıcaklığı (K)	Fırın dış yüzey sıcaklığı (K)
Deneysel	942	11.795	518	27.7	394.7	305
Analitik	1006	13.685	500	28.3	395	305
Sayısal	1001	13.871	495	30.1	409	305
Kalibrasyon lab.	979	12.613	520	28.3	398.9	304



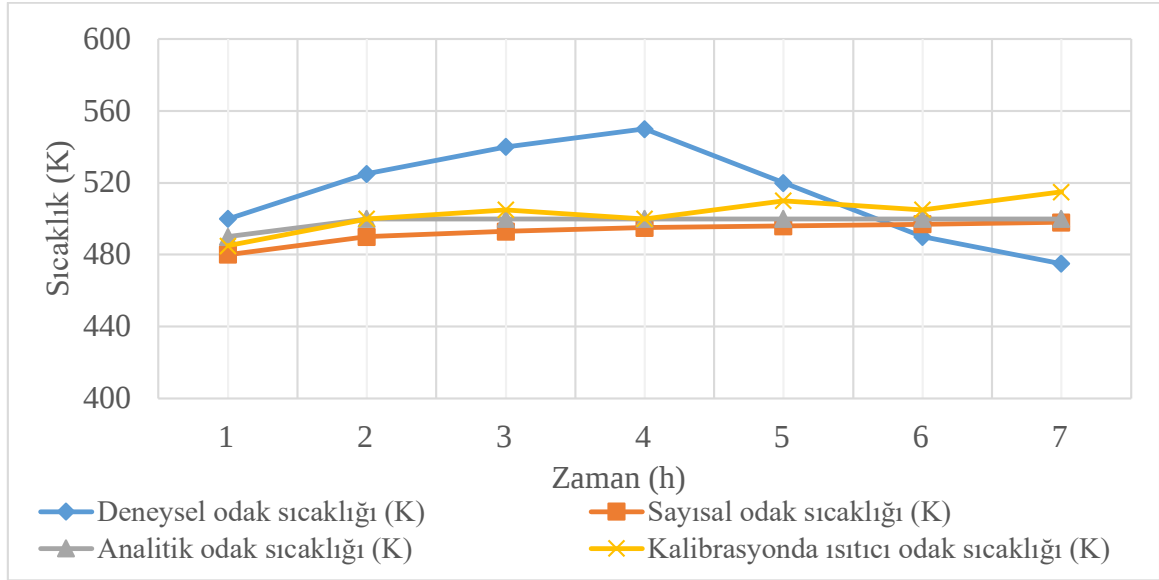
Şekil 73. Tüm yöntemlere göre güneş ışınım şiddetinin zamanla değişimi

Şekil 74'te, tüm yöntemlerin zamana göre odak yüzey alanında oluşan ortalama ısı akısı değerleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, deneysel yöntemde ısı akısı değeri öğle saatlerinde maksimum seviyededir. Laboratuvar ortamında kalibrasyon için dirençli ısıtıcı akısı, şebeke akımına bağlı olarak değişkenlik göstermesi ile işlem boyunca odak yüzeyi ısı akısının yaklaşık olarak sabit kaldığı belirlendi. Analitik yöntemde Denklem (21) kullanılarak teorik elde edilen odak sıcaklığına bağlı olarak oluşan odak ısı akısı değeri de yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



Şekil 74. Tüm yöntemler ile odakta oluşan ısı akısının zamanla değişimi

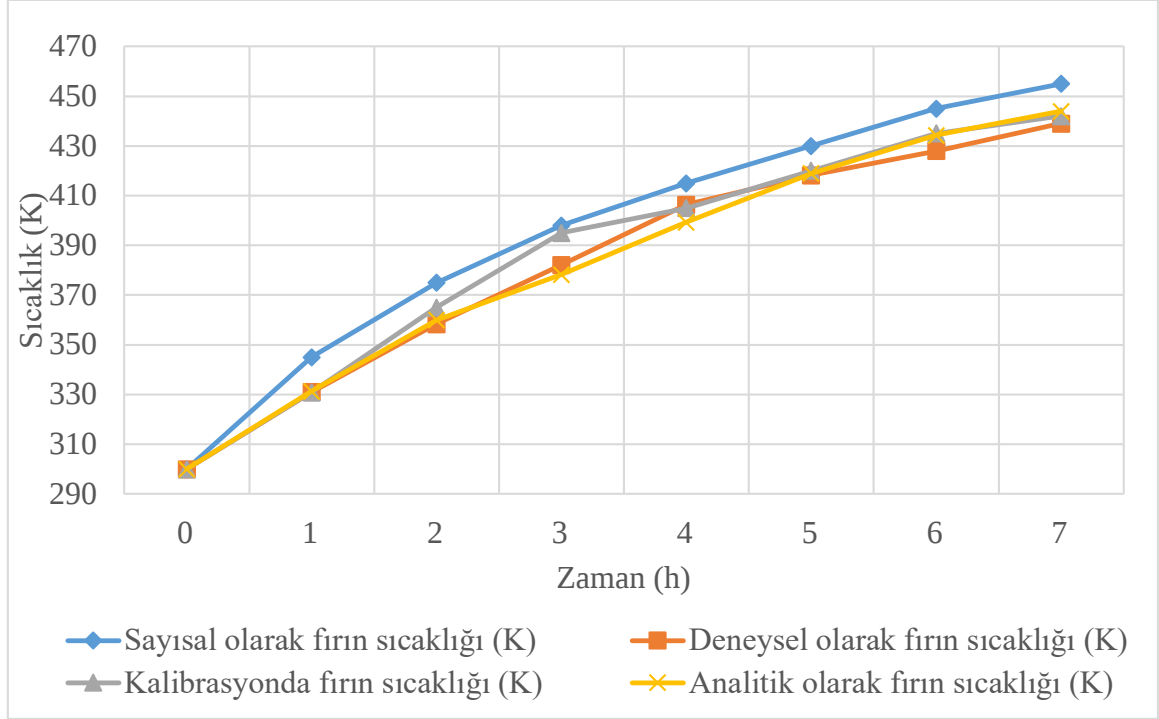
Deneysel olarak, sayısal ve laboratuvar ortamında ölçülen odak noktası sıcaklıkları ve analitik olarak hesaplanan odak sıcaklıklarının zamana göre değişimi Şekil 75'te verilmektedir. Sayısal yöntemde ise deneysel olarak elde edilen verilere dayanılarak sisteme girilen ortalama odak sıcaklık değerleri yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Laboratuvarda kalibrasyonda ise odak sıcaklığı, dirençli ısıtıcının üzerinin kapatılması ile beraber ısıнын depolanmasına bağlı olarak bir artış ortaya çıkmaktadır.



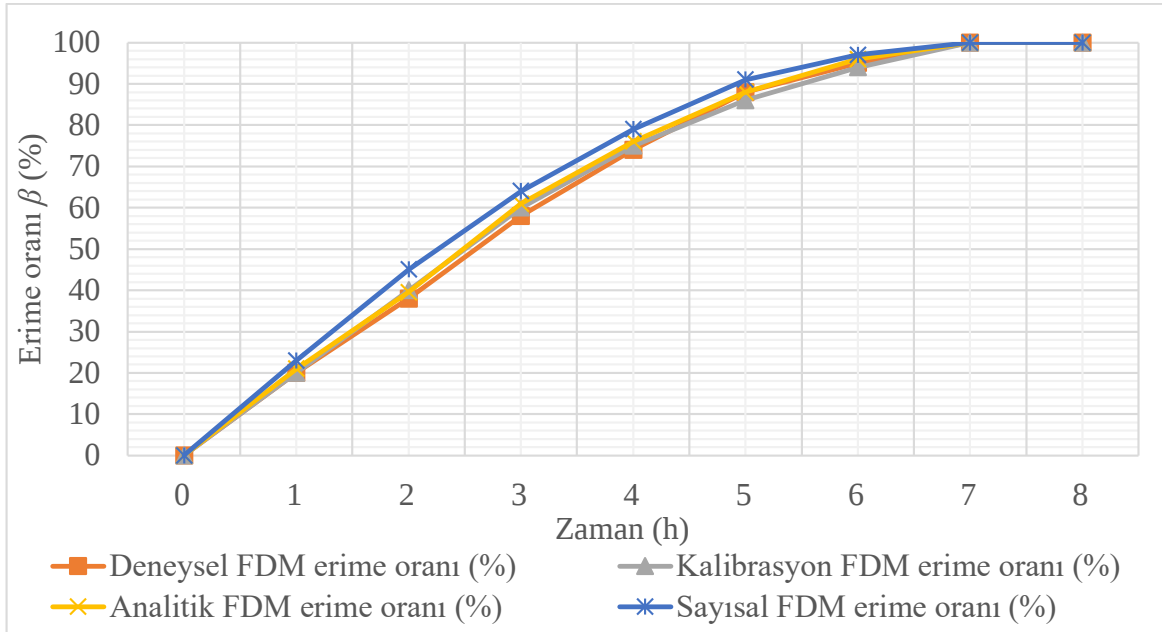
Şekil 75. Deneysel, sayısal, analitik ve kalibrasyondaki odak sıcaklıklarının zamanla değişimi

Farklı yöntem ve uygulamalara göre benzer bir fırında zamana göre ulaşılan FDM1 sıcaklıkları değişimini gösteren grafik Şekil 76'da verilmektedir. Deneysel çalışmada fırın içerisinden helisel boru yardımıyla ısı transfer akışkanı yağ geçirilerek, depolama tankına ısı transferi yapılmıştır. Bu durumdan dolayı deneysel olarak fırın içindeki sıcaklık artışı sayısal yöntemde göre daha yavaştır. Grafik incelendiğinde fırın içindeki sıcaklık değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Deney sonunda, tüm yöntemlerde fırın ortalama sıcaklık değerleri artarak yaklaşık olarak 440 K değerine ulaşmaktadır. Analitik olarak fırın FDM1 sıcaklığı ise teorik olarak elde edilen odak sıcaklığına göre fırın içerisinde iletim ile geçen sıcaklık değerleri Denklem (26) ile hesaplandı. Deneysel, analitik, sayısal ve laboratuvar ortamındaki kalibrasyon testlerinde fırın ortalama sıcaklıkları sırasıyla 437 K, 444 K, 455 K ve 442 K değerlerine ulaştı. Odağa gelen ısı akısı, odak sıcaklığına bağlı olarak Denklem (21) ile $(10.000-13.000) \text{ W m}^{-2}$ aralığında hesaplandı. Tüm yöntemlere göre odak

yüzeyinden fırına giren net termal güç miktarları ortalama (650-750) W aralığında değişmektedir.



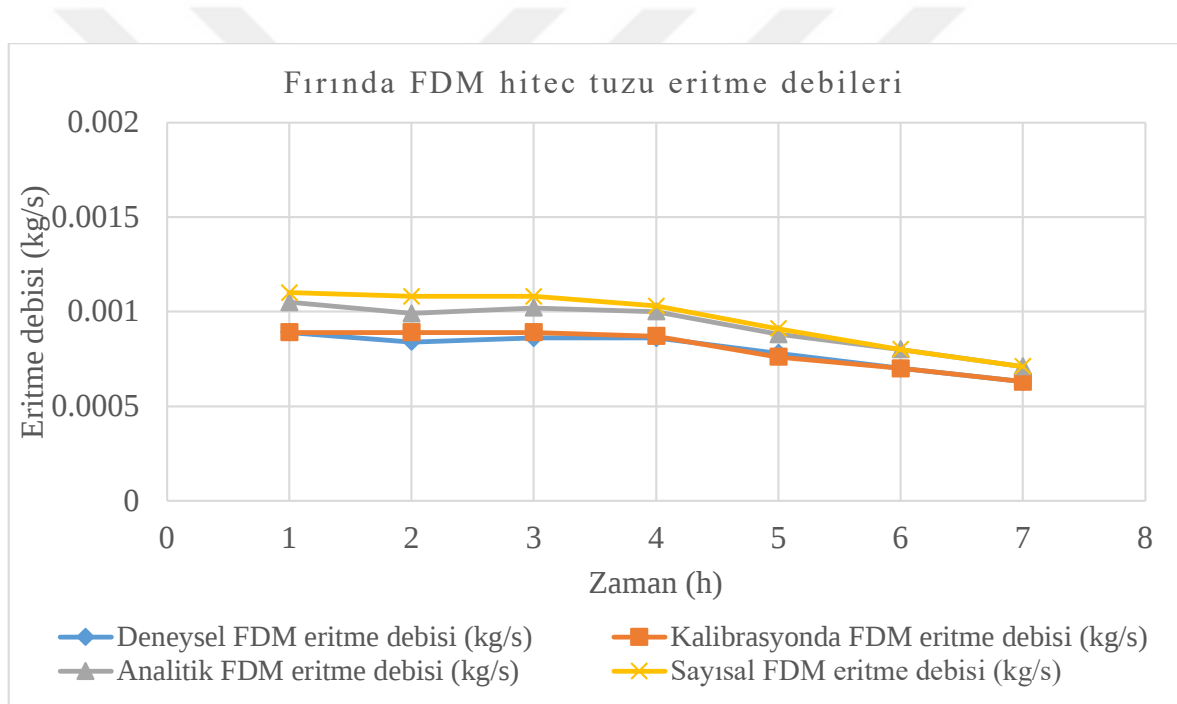
Şekil 76. Farklı yöntemlere göre uyarlamalı fırındaki Hitec tuzu ortalama sıcaklıklarının zamanla değişimi



Şekil 77. DeneySEL, sayısal, analitik ve kalibrasyonda eritilen uyarlamalı fırındaki Hitec tuzunun zamanla değişimi

Şekil 77’de deneysel, sayısal, analitik ve laboratuvar ortamında fırında eritilen FDM1 sıvı miktarlarını gösteren grafiğe yer verilmektedir. Deneysel, analitik, sayısal ve laboratuvar ortamında her bir yöntem için, başlangıçtan iki saat sonraki erime oranları sırasıyla %38, %39,5, %43 ve %40 olarak gerçekleşti. Ayrıca tüm yöntemlerde, deney sonuna doğru erime oranlarının birbirine yaklaşarak tamamen eridikleri grafikte görülmektedir.

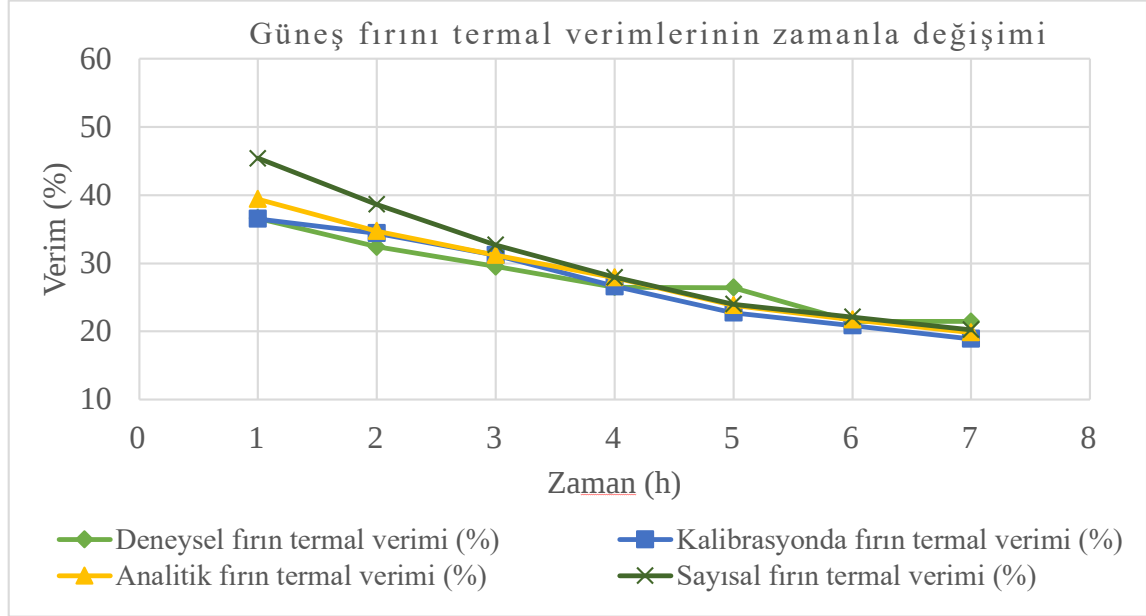
Uyarlamalı güneş fırınında zamana bağlı olarak eritilen FDM1 sıvı miktarı oranlarına göre, eritme debileri hesaplandı. Farklı yöntemlere göre fırında zamana bağlı olarak oluşan eritme debileri Şekil 78’de verilmektedir. Grafik incelendiğinde, tüm yöntemlerde ilk saatlerde sabitken, dördüncü saatten sonra eritme debisinin azaldığı görülmektedir. Eritme debisinin azalmasındaki etken, fırın tabanına doğru ısı iletiminin yavaşlamasıdır.



Şekil 78. Deneysel, sayısal, analitik ve kalibrasyonda eritilen FDM’nin kütleli debileri

Güneş altında yapılan deneysel çalışmada fırında helisel boru eşanjör yardımıyla yüksek sıcaklıkta ısı depolama yapılırken, ısı depolama tankında ise daha düşük sıcaklıkta ısı depolama yapıldı. Sayısal ve analitik hesaplarda fırında helisel boru eşanjör olmadan fırın sıcaklığı ve erime durumları belirlendi. Şekil 79’daki grafik incelendiğinde, tüm yöntemlerde zamana bağlı olarak fırın veriminin azaldığı görülmektedir. Bu durumun en önemli nedeni ise fırında zamanla eritme debisinin azalmasıdır. Deneysel, analitik, sayısal ve laboratuvar ortamındaki kalibrasyon testlerde ortalama fırın verimleri sırasıyla %27,7,

%28,3, %30 ve %27,3 olarak hesaplandı. Fırın verimlerinin de birbirine yakın oldukları görülmektedir.



Şekil 79. Deneyisel, sayısal, analitik ve kalibrasyonda oluşan uyarlamalı fırın termal enerji verimlerinin zamanla değişimi

Bu tez çalışması için, sayısal verilere göre HDY2 yoğunlaştırıcı sistem, HDY1 yoğunlaştırıcı sisteme göre daha hızlı eritme süresine sahip olduğundan daha hızlı bir ısı depolama sağlayacaktır. Ayrıca günlük düşük güneşlenme süreleri dikkate alınarak tasarlanan RAC2 yoğunlaştırıcı sistemi bu çalışmadaki ısı depolama için daha uygundur.

Deneyisel olarak, odak noktasında en yüksek sıcaklık 565 K ve fırın içindeki Hitec tuz üzerinden ölçülen sıcaklık en yüksek 440 K'dir. Uyarlamalı güneş fırınında ortalama iç sıcaklığı Hitec tuzun erime noktasından (415 K) büyük olduğundan fırındaki tuzun tamamının erimesi gerçekleştirildi. Solar tuz eritme deneyinde ise fırın iç sıcaklığı yeterli sıcaklığa ulaşamadığından sadece odak alanında düşük bir debide eritme sağlandı. Deneyisel veriler ile şarj durumu için uyarlamalı fırında, Hitec tuzu eritme debisi yaklaşık olarak (0,00089-0,00063) kg/s aralığında değiştiği tespit edildi. Buna göre gün boyunca oluşan fırının ortalama termal enerji verimi %27,7 ve ortalama ekserji verimi ise %13,6 olarak hesaplandı. Deneyisel olarak uyarlamalı fırında, helisel boru eşanjörden çıkan ortalama sıcaklık (90 °C) değerine bağlı olarak, ısı transfer akışkanı yağın debisi yaklaşık olarak (0,0004-0,0002) kg/s aralığında değiştiği tespit edildi.

Tasarlanan HDY2 sistemi için, Solar tuzdan daha yüksek debide eritilerek gizli ısısından daha fazla faydalanılan Hitec tuzunun ısı depolama açısından daha uygun bir FDM1 olduğu deneysel ve sayısal olarak test edildi. Isı depolama tankı için, düşük sıcaklık erime noktasına ve ısı depolamaya uygun fiziksel özelliklere sahip olduğundan dolayı FDM2 olarak yeni Hitec XL (%32 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, %24 NaNO_3 ve %44 KNO_3) karışımının kullanımı hem deneysel hem de sayısal olarak incelendi.

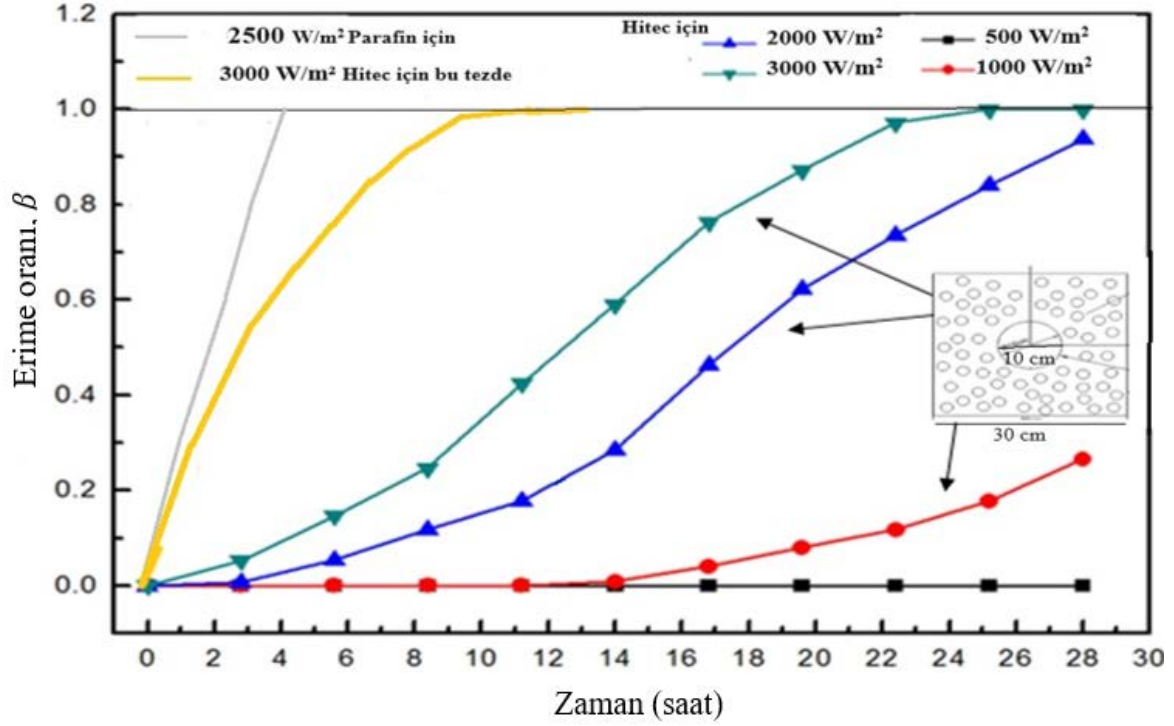
Fırına ışıın giriş alanı (odak alanı) tamamen tuzlarla kapalı olduğu durumda fırın iç sıcaklığı oldukça düşüktür. Bu durumun nedeni ise inorganik tuzların (Solar tuz ve Hitec tuzu) ısı iletkenlik katsayılarının (0,7-0,4) düşük olmasıdır. Bu nedenle odak alanına gelen enerji, fırın üst kısmından alt kısımlara ısı geçişi sağlanarak fırın iç sıcaklığı artırılmaktadır. Uyarlamalı fırında, odak alanından fırın içerisine doğru ısı iletkenliği yüksek metaller yerleştirilerek ısı geçişinin hızlandırılması sağlandı. Sonuç olarak, güneş fırınında yapılan değişiklikler fırın iç sıcaklığını artırarak erimeyi hızlandırdı.

Kısaca yapılan tez çalışmasında, Halka dizisi yoğunlaştırıcı ile fırında eritilen inorganik Hitec tuzlar (FDM1) ile ısı depolama gerçekleştirildi. Ayrıca fırındaki helisel eşanjör ile sıcaklığı yükselen ısı transfer akışkanı yağ, ısı depolama tankına aktarılmıştır. Isı depolama tankında, ikinci bir helisel boru eşanjördeki sıcak yağ ile tank içinde bulunan üçlü tuz karışımına (FDM2) ısı geçişi yapılarak, belirli bir sürede gizli ve duyulur ısıнын depolanması incelendi.

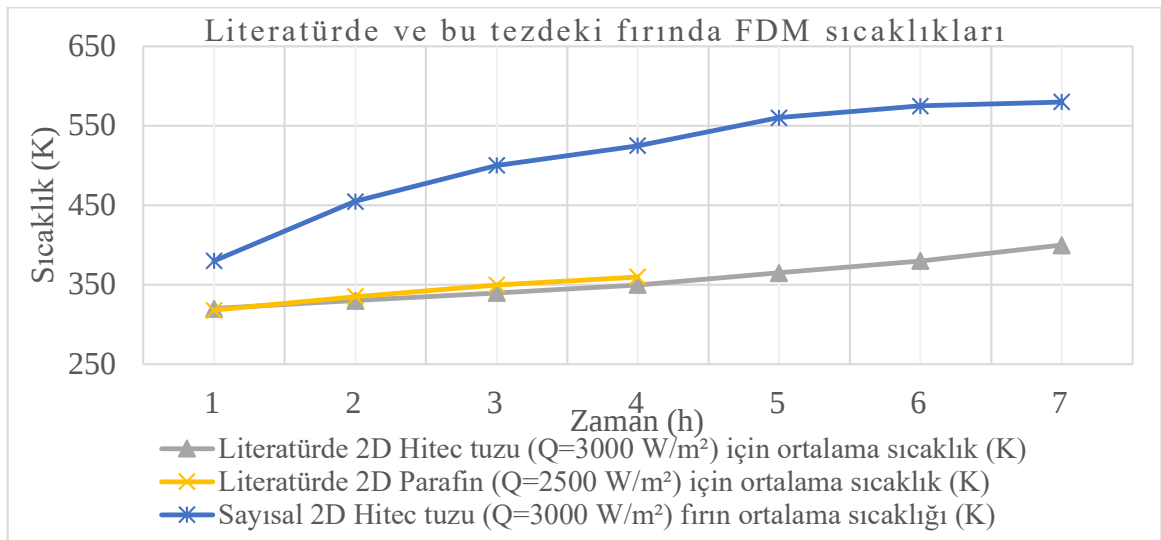
4.2. HDY2 Sisteminin Literatürdeki Yoğunlaştırıcı Sistemler ile Karşılaştırılması

Hitec tuzu ile literatürdeki bir çalışma ile bu tez çalışması arasında bir karşılaştırma yapıldı. Benzer boyutlardaki bir model için elde edilen değerler erime ve sıcaklık değerleri karşılaştırıldı. Şekil 80’de görüldüğü gibi, 2 boyutlu uygulamalar için, literatürde ve bu tez çalışmasında sayısal olarak, ısı akısına göre erime oranları karşılaştırıldı. Literatürde yapılan çalışmada ısı akısı (3.000 W/m^2) verilmesine bağlı olarak ve model boyutuna (kenarı 30 cm olan kare) göre Hitec tuzunun erime süresi uzamıştır (Wu vd., 2017). Bu tez çalışmasında, uyarlamalı fırında Hitec tuzu için, aynı ısı akısı (3.000 W/m^2) uygulandığında erime oranı yükseldi. Literatürde yapılan diğer bir uygulamada, yaklaşık (2.500 W/m^2) olan ısı akısı ile yapılan ancak farklı organik malzeme olan parafininin düşük erime noktasının olmasından dolayı zamana göre erime oranı yüksektir. Şekil 81’de ise iki boyutlu olarak tasarlanan uyarlamalı fırın ve literatürdeki modellerinde Hitec tuzu ve parafin için ortalama

sıcaklıklarının zamana göre durumları verilmektedir. Benzer şekilde uyarlamalı fırın içinde ısı transferi kanatçıklarla artırıldığı için, Hitec tuzu ortalama sıcaklığı literatürdeki uygulamalara göre daha yüksektir. Sonuç olarak gün içinde erimenin tamamlanması için, güneş fırınına verilen ısı akısının yeterli olduğu görülmektedir.



Şekil 80. Literatürdeki ve bu tezdeki sayısal uygulamalardaki ısı akısına bağlı olarak Hitec tuzu erime oranlarının zamanla değişimi (Wu vd., 2017)



Şekil 81. Literatürdeki sayısal uygulamalarda ve bu tezdeki fırın ortalama sıcaklıklarının zamanla değişimleri

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında sunulan ışın yoğunlaştırıcı sisteminin, güneş fırınının ve ısı depolama tankının boyutlarının belirlenmesinde ve performans ölçümünde analitik, sayısal, deneysel yöntemler ve laboratuvar ortamındaki kalibrasyon testleri kullanıldı. HDY1 ve HDY2 yüzey alanına sahip yoğunlaştırıcı modeller kullanılarak güneş fırını boyutları belirlendi. Güneş fırınında faz değişimi malzemesi olarak solar tuz ve Hitec tuzlarının kullanılması üzerinde sayısal ve deneysel olarak çalışmalarda önemli bulgular elde edildi.

Sayısal analiz sonucunda, HDY1 için fırın içindeki ortalama FDM Solar tuz sıcaklığı 36 saat sonunda yaklaşık olarak 397 K'dir. Dolayısıyla odak noktasına verilen termal enerji oldukça düşüktür. HDY1 sistemi ile sayısal olarak fırında istenilen yüksek sıcaklık değerlerine ulaşamadığı için, farklı bir FDM'nin kullanımı uygun görüldü.

HDY2 sistemi ile sayısal analiz sonucunda, odak noktasına 550 K sıcaklık uygulamasında, sekiz saatte fırın ortalama sıcaklığı 360 K ve solar tuz erime oranı yaklaşık %2,5 olduğundan dolayı tamamen erimesi daha uzun süre almaktadır. Ayrıca HDY2 sistemi ile solar tuz eritme deneysel çalışmasında, fırın iç sıcaklığı yeterli sıcaklığa (495 K) ulaşamadığından sadece odak alanında düşük bir miktarda eritme sağlanabildi. Gün içinde fırındaki tüm tuzun eritilmesi hedeflenmesinden dolayı, FDM değiştirilirken, özellikle fırın içinde ısı transferini artıran çelik kanatçıklar kullanıldı.

Sayısal olarak HDY2 sisteminde Hitec tuzu ile elde edilen sayısal veriler şunlardır; Uyarlamalı fırında, yaklaşık 18 kg inorganik Hitec tuzun tamamen eritilmiş durumda ortalama sıcaklığı yaklaşık 455 K'dir. Sonuç olarak geliştirilen uyarlamalı fırın ile istenen yüksek sıcaklıklara daha hızlı ulaşıldı. Fırındaki FDM1 Hitec tuzu sıcaklığı simülasyon boyunca artarken, sayısal olarak ortalama fırın termal verimi %30 olarak hesaplandı. Analitik olarak ise FDM1 Hitec tuzu sıcaklığı 445 K'e ulaşırken, ortalama fırın termal verimi %28,3 olarak hesaplandı.

Laboratuvar ortamında kalibrasyon testinde, yaklaşık yedi saatlik deney sonunda fırın ortalama sıcaklığı 442 K olarak ölçüldü. Bu durumda laboratuvar ortamında deney boyunca güneş fırınındaki Hitec tuzu eritme debisi ortalama 0,0008 kg/s olarak ölçüldü. Buna göre fırın termal verimi ortalama %27,3 olarak hesaplandı.

Deneysel olarak, odak noktasında en yüksek sıcaklık 565 K ve fırın içindeki Hitec tuz üzerinden ölçülen sıcaklık en yüksek 452 K'dir. Fırın iç sıcaklığı Hitec tuzun erime

noktasından (440 K) büyük olduğundan fırındaki tuzun tamamının erimesi gerçekleştirildi. Deneysel veriler ile şarj durumu için uyarlamalı fırında, Hitec tuzunun erime debisi yaklaşık olarak (0,00089-0,00063) kg/s aralığında değiştiği tespit edildi. Deneyde eritilen FDM1 miktarının düşmesine rağmen ortalama fırın enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %27,7 ve %13,6 olarak hesaplandı. Sonuç olarak, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin direkt uygulandığı bölgelerde daha hızlı erime gerçekleşirken Hitec tuzu ısı iletim katsayısının düşük olmasından dolayı fırın tabanına doğru erime hızı yavaşlamaktadır. Deneysel verilere göre, tüm sistemin Termoekonomik analizi yaklaşık olarak 1,239 W/\$ ve Eksergoekonomik analiz değeri 1,45 W/\$ olarak hesaplandı. Termoekolojik performans katsayısı (ECOP) değeri ise 0,152 olarak hesaplandı. Termoekonomik faktörleri ise halka dizisi yoğunlaştırıcı, güneş fırını, ısı depolama tankı için sırasıyla 0,56, 0,138 ve 0,259 olarak hesaplandı. Termoekonomik faktör değerlerinden güneş fırınının ekonomiklik kriterinin en düşük değer aldığı görülmektedir.

Bu tez çalışması için, sayısal verilere göre HDY2 yoğunlaştırıcı sistem, HDY1 yoğunlaştırıcı sisteme göre daha hızlı eritme süresine sahip olduğundan daha hızlı bir ısı depolama sağladığı tespit edildi. Ayrıca günlük güneşlenme süreleri de dikkate alınarak tasarlanan HDY2 sistemin bu çalışmadaki ısı depolama için daha uygundur.

Tasarlanan HDY2 sistemi ile solar tuz ısı depolama deneyinde (80-100) °C aralığında iç sıcaklık elde edildi. Bu elde edilen fırın iç sıcaklık değeri, solar tuzu eritmesine yeterli olmadığından daha düşük erime noktasına sahip inorganik Hitec tuzunun bu yoğunlaştırıcı sistem için daha uygun olduğu deneysel olarak test edildi.

Hitec tuzu ile ısı depolama deneyinde, odak noktasında en yüksek sıcaklık 758 K ve fırın içindeki Hitec tuz üzerinden ölçülen sıcaklık en yüksek 452 K'dir. Fırın iç sıcaklığının artması ile birlikte Hitec tuzunun tamamının erimesi gerçekleştirildi. Deneysel olarak uyarlamalı fırında, helisel boru eşanjörden çıkan ortalama sıcaklık (100-110 °C) değerlerine bağlı olarak ısı transfer akışkanı yağın debisi yaklaşık olarak (0,0004-0,0002) kg/s aralığında değişmektedir. Bu koşullar altında, güneş fırını ve ısı depolama tankında, gün içindeki yedi saatlik ısı depolama ve desarj süresi ile toplam 11 saatlik bir ısı depolama yapabilmektedir.

Isı depolama tankı için sayısal olarak, helisel borunun dış sıcaklığı yaklaşık 400 K kabul edilerek, 40 kg olan inorganik tuzun (FDM2) üç saatte erime oranı %50 iken, ortalama FDM2 sıcaklığı 360 K'dir. Simülasyon sonunda erime oranı yavaşlayarak %67'ye ulaştığı belirlendi. Isı depolama tankında kullanılan inorganik tuzun (Ca,K ve Na₂NO₃) düşük ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı tank içinin orta bölgesi daha uzun sürede eridiği

simülasyon ile tespit edildi. Bu nedenlerden dolayı deneysel çalışmalarda daha az miktarda (24 kg) FDM2 kullanılarak erimesi tamamlandı.

Isı depolama tankında deneysel olarak, helisel borunun dış sıcaklığı ortalama 375 K iken, 24 kg olan FDM2 ortalama sıcaklığı deney sonunda 338 K'e ulaşarak %60 oranında eridiği tespit edildi. Gün içindeki hesaplanan ortalama helisel eşanjör termal enerji verimi %41,4 iken, ortalama helisel eşanjör ekserji verimi %15,3 olarak hesaplandı.

Son olarak, güneş fırınında yapılan değişiklikler fırın iç sıcaklığını ve erimeyi arttırmaktadır. Güneş fırını ışın giriş alanı (odak alanı) tamamen tuzlarla kapalı olduğu durumda fırın iç sıcaklığı daha düşüktür. Bu durumun nedeni ise inorganik tuzların (Solar tuz ve Hitec tuzu) iletkenlik katsayılarının düşük olmasıdır. Bu nedenle odak alanına gelen termal enerji, fırın üst kısmından alt kısımlara ısı geçişi artırılan yöntemler kullanılarak fırın iç sıcaklığı artırıldı.

HDY sistemleri, özellikle parabolik çanak yoğunlaştırıcıların aksine odak noktası zemine yakın olduğundan FDM ile ısı depolama uygulamaları için daha kullanışlıdır. Eklemek gerekirse halka dizisi yoğunlaştırıcı sistemler bir fırına üstten giren ışınlar ile eritme gerçekleştirildiğinden eriyen sıvı fırın içerisinde sabit kalır. Bu yüzden faz değişim malzemeleri gibi eritme işlemleri için, halka dizisi sistemleri kullanım açısından avantaj sağlamaktadır. Genel olarak Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji (YGE) sistemleri kitlesel kullanım ihtiyaçlarına yönelik iken, bu tez çalışması tasarlanan halka dizisi tipi yoğunlaştırıcı ile ısı depolama sistemi ise hem kitlesel hem de bireysel kullanıma yöneliktir.

6. ÖNERİLER

Bu çalışmada sunulan yöntem, yoğunlaştırılmış güneş ışınlarının odaklanarak faz değişim malzeleri kullanılarak ısı depolama yapılmasına uygundur. Bu sunulan ışın yoğunlaştırıcı halkaların yüzey yansıma kayıpları azaltılarak daha yüksek sıcaklık uygulamalar için kullanılabilir. Halkaların en uygun çalışmasının sağlanmasının yanında diğer önemli etken fırın tasarımıdır. Tüm çalışmalarda önerilen hususlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Fırın veya alıcılar yoğunlaştırılmış güneş ışınlarını büyük oranda yakalayacak şekilde ve faz değişim malzemesi tarafından soğurulacak şekilde tasarlanmalıdır. Buna bağlı olarak, bu yöntemeye uygun özel güneş fırını veya fırın içindeki inorganik tuzlardan ısı geçişini artıran yöntemler geliştirilebilir.

- Bu tez çalışmasının önemli bir parçası olan güneş takip sisteminin hem daha fazla yük taşıma ve daha etkin bir şekilde güneşe yönelmesi bakımından geliştirilebilir. Bu çalışmada kullanılan yoğunlaştırıcılar cam elyaftan imal edilerek hem hafiflikten hem de yüzey eğimi şeklinin alması bakımından avantaj sağlamaktadır. Mevcut güneş takip sistemi tasarlanan bu model için uygundur. Eğer daha büyük yoğunlaştırıcı sistemler için kullanılması planlanıyorsa daha büyük yüklerde çalıştırılabilen güneş takip sistemleri kullanılmalıdır.

- Yoğunlaştırıcı sistemin sürekli çalışması durumunda dolaşım pompası ve güneş takip sistemini besleyen akü bir foto voltaj (PV) panel ile doldurulabilir. Yaklaşık 150 W'lık güneş paneli günlük güneşleme 6 saat olduğu durumda 12 V 72 Ah akü bir günde dolabilir. Eğer iki adet 12 Volt akü kullanılırsa hem elektrik dopolanabilir hemde sürekli çalışan yoğunlaştırıcı sisteme destek sağlanabilir.

- Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinde fırın da yüksek termal güçlerin elde edilmesi için, ısınım ve taşınım kayıplarının azaltılmalıdır. Bunun için mevcut istemde taşınım kayıplarının azaltılmasında odak alanında yüksek sıcaklığa dayanan kuvars cam kullanılabilir. Ancak kuvars camın kırılabilirliği dikkate alınarak montajı yapılmalıdır. Güneş fırını ve ısı depolama tankında kayıpların azaltılması için, ısı depolama sisteminin yalıtımının iyileştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca tersinmezliklerin azaltılması için, yoğunlaştırıcı tasarımının geliştirilmesi önerilmektedir. Bunun yanında odak bölgesinde iyi

bir odaklama yapmak için, yansıtıcı yüzey eğiminin ve pürüzlüklerinin iyileştirilmesi ve halka yoğunlaştırıcıların çok hassas bir biçimde montajlarının yapılması gerekmektedir.

- Yoğunlaştırıcının yatırım maliyetinde, ilk kurulum maliyeti ve arazi maliyeti hesaba katılırken, düşük bir işletim ve bakım maliyetine sahiptir. Diğer bileşenlere göre yoğunlaştırıcı daha yüksek maliyete ve daha yüksek ekserji yıkımına sahiptir. Bu yüzden HDY'nın ekserji çıkışının artırılması ile daha ekonomik çalıştırılması sağlanabilir. Fırın ve ısı depolama yatırım maliyetinde arazi maliyetleri hesaba katılmadığından ve yoğunlaştırıcıdan daha düşük bir ekserji çıkışı ile beraber daha düşük Termoeconomik faktöre sahiptir. Bu bakımdan fırın üzerine kayıplar ve ekserji yıkımının azaltılması ile Termoeconomik faktörün 1'ye yaklaşması durumunda fırının daha ekonomik çalıştırılması sağlanır.

- Odak noktası çapının belirlenmesinde ulaşılabilecek sıcaklıklar ve erime debileri dikkate alınmıştır. Ayrıca inorganik FDM'lerin kararlı çalışma sıcaklıklarına göre odak sıcaklıkları belirlenmiştir. Odak çapı artırılırsa sıcaklıklar düşeceğinden erime miktarı azalacaktır. Eğer daha büyük sıcaklıklarda ve daha büyük odak çapında çalışılacaksa yoğunlaştırıcı halka sayısı arttırılmalıdır. Bu durumda daha yüksek sıcaklıklarda çalışılabilen farklı bir FDM'nin kullanılması önerilmektedir.

- İnfrared lamba ile yapılan deneylerde, kullanılan konik yoğunlaştırıcı üzerine yapıştırılan yansıtıcı folyo odak bölgesine yakın noktalar yüksek sıcaklıklardan dolayı zarar görebilmektedir. Bu yüzden infrared lamba kullanımında, konik yoğunlaştırıcı için iç yüzeyinin parlatılmış metalik malzemeden yapılması önerilmektedir. Ayrıca odakta ışıyım toplayıcı modelleri (silindirik, yarı küresel veya konik) araştırma aşamasında olup ileride yeni bir ışın toplayıcı modeli olarak önerilebilir.

- Alternatif bir yöntem olarak, Ek Şekil 14'te görüldüğü gibi, fırında bulunan helisel eşanjörden kızgın yağ eşanjörüne direkt ısı geçişi yapılarak, termal enerjinin kullanımı sağlanabilir. Bu durumda fırın aynı zamanda ısı depolama işlevini yerine getirir. Bu yöntem ise mevcut sistemden daha küçük boyutlarda HDY ısı depolama sistemleri için kullanılması önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Alaphilippe, M., Bonnet, S., & Stouffs, P. (2007). Low Power Thermodynamic Solar Energy Conversion: Coupling of a Parabolic Trough Concentrator and an Ericsson Engine. *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 10 (No. 1), 37-45. doi:DOI: 10.5541/ijot.186
- Ansys , G. F. (2015). ANSYS Fluent Theory Guide.
- Asgari, M., Javidan , M., Nozari, M., Asgari , A., & Ganji, D. (2021). Simulation of solidification process of phase change materials in a heat exchanger using branch-shaped fins. *Case Studies in Thermal Engineering* 25, 100835. doi:https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100835
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1995). *Thermal Design and Optimization*. <https://www.wiley.com/en-us/9780471584674>.
- Berdibek, S. (2015). Measurement of optical properties of molten salts for advanced solar and nuclear systems. Tez. Massachusetts Institute of Technology.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Castellanos, L. M., Caballero, G. C., Cobas, V. M., Lora, E. S., & Reyes, A. M. (2017). Mathematical modeling of the geometrical sizing and thermal performance of a Dish/Stirling system for power generation. *Renewable Energy* 107, 23-35. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.020
- Chen, Y., & Zhao, C. (2017). Thermophysical properties of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3$ mixtures for heat transfer and thermal storage. *Solar Energy* 146, 172–179. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.033
- Churchill, S., & Chu, H. (1975). *Correlation Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from Vertical Plate*. International journal Heat Mass Transfer 18.
- Coastal Chemical Company. (2011). *HITEC Heat Transfer Salt* . Houston. HITEC Heat Transfer Salt : <http://stoppingclimatechange.com/MSR%20-%20HITEC%20Heat%20Transfer%20Salt.pdf>.
- Collares-Pereira , M., & Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar energy*, Volume 22(Issue 2), 155-164. doi:https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90100-2.
- Corkish, R., Lipiński, W., & Patterson, R. (2016). Chapter 1: Introduction to Solar Energy. *Solar Energy, World Scientific Series in Current Energy Issues* (s. 1-29). içinde World Scientific Publishing Co Pte Ltd. doi:https://doi.org/10.1142/9789814689502_0001.

- Çağlar, A., Yamalı, C., Baker, D., & Kaftanoğlu, B. (2013). Measurement of solar radiation in Ankara, Turkey. *Journal of Thermal Science and Technology*, 33(2), 135-142. <http://www.tibttd.org.tr/2013-2/135-142.pdf>.
- Çalışkan, H. (2020). Güneş Kollektörlerinin Enerji, Ekserji, Termoeolojik, Sürdürülebilirlik, Termoeekonomik ve Eksergoekonomik Analizleri. *Mühendis ve Makina*, cilt 61(sayı 700), 228-240. doi:DOI: 10.46399/muhendismakina.774277.
- Demirtaş, C., & Özcan, A. K. (2021). The experimental thermal analysis of aluminum metal melting with concentrated solar energy. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 222. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110940>.
- Dinçer , İ., & Rosen, M. (2011). *Thermal energy storage: Systems and applications* (2. edition b.). Hoboken, N.J.: Wiley. <https://www.worldcat.org/title/thermal-energy-storage-systems-and-applications/oclc/671492294> adresinden alındı.
- Duffie , J. A., & Beckman , W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Eurodish. (2022, 12 20). The Plataforma Solar de Almería (PSA): <https://www.psa.es/en/facilities/dishes/eurodish.php> adresinden alındı.
- Fletcher, E. A., & Moen, R. L. (1977). Hydrogen and oxygen from water. *Science Vol 197, Issue 4308*, 1050-1056. doi:DOI: 10.1126/science.197.4308.1050.
- Garcia, D., Liang, D., Tibúrcio, B. D., Almeida, J., & Vistas, C. R. (2019). A three-dimensional ring-array concentrator solar furnace. *Solar Energy* 193, 915–928. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.016>.
- Gielen, D. (2012). *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series: Concentrating Solar Power*. Vol. 1, Power Sector Issue (2/5). Bonn, Germany: IRENA. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf adresinden alındı.
- Global Solar Atlas. (2022, 03 02). *Global Solar Atlas Global Wind Atlas Energydata.Info*. Global Solar Atlas Trabzon: <https://globalsolaratlas.info/map?c=40.9925,39.770765,14> adresinden alındı.
- Goswami, D. Y. (2015). *Principles of Solar Engineering* (CRC Press b.). Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group.
- Gueymard, C. (2000). Prediction and performance assessment of mean hourly global radiation. *Solar Energy* , 68(3), 285–303. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00070-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00070-5).
- Hanif, M., Nadeem, F., Tariq, R., & Rashid, U. (2021). *Renewable and Alternative Energy Resources* (Academic Press b., Cilt 1st Edition). Faisalabad, Pakistan. doi:<https://doi.org/10.1016/C2018-0-03161-8>.

- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2000). Isı ve kütle geçişinin temelleri. literatür yayıncılık.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation* (Academic press b.). Vancouver, Canada. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>.
- Ivenson, B., Broome, S., Kruijenga, A., & Cordaro, J. (2012). Thermal and Mechanical Properties of Nitrate State Thermal Storage Salts in the Solid-Phase. *Solar Energy*, Vol. 86, 2897-2911. doi:[10.1016/j.solener.2012.03.011](https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.011).
- Jaramillo S., O. A. (1998). *Transporte de energia solar concentrada a travesde fibras opticas: acoplamiento fibra-concentrador y estudio termico*. Morelos, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jaramillo Salgado, O. A. (1998). Transporte de energia solar concentrada a travesde fibras opticas: acoplamiento fibra-concentrador y estudio termico.
- Kalogirou, S. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. USA: Elsevier Inc. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-397270-5.00001-7>.
- Karathanasis, S. (2019). *Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration* (ISBN 978-3-030-05279-9 b.). Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-05279-9>.
- Karathanasis, S. (2019). *Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration, Theoretical Analysis, Mathematical Formulation and Parameters Computation using MATLAB*. Switzerland: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-05279-9>.
- Kaygusuz , K. (2020). Calculation of solar radiation data on horizontal and tilted surfaces for Trabzon, Turkey. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, Volume 9(2), 1471-1476. <http://www.journaleras.com/index.php/jeras/article/view/215> adresinden alındı.
- Kennewell , J., & McDonald, A. (2022, 12 25). *Solar Constant, The luminosity of the Sun*. (Australian government, Düzenleyen, & B. o. Meteorology, Prodükör) 12 25, 2022 tarihinde Australian Space Weather Forecasting Centre: <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/1/12> adresinden alındı.
- Lane, G. A. (1983). *Solar Heat Storage Latent Heat Materials, Volume 1 Background and Scientific Principles*. Midland, USA: CRC Press.
- Leblebicioğlu, E. (2022, Kasım 29). *Enerji Depolama Nedir? Enerji Depolama Yöntemleri Nelerdir?* Mühendistan: <https://muhendistan.com/gunes-enerjisiyle-su-isitma-sistemleri-nedir-nasil-calisir/> adresinden alındı.
- Liu, B. Y., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* , Volume 4(Issue 3), 1–19. doi:[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1).

- MacPhee, D., & Dincer, I. (2009). Thermal modeling of a packed bed thermal energy storage system during charging. *Applied Thermal Engineering*, Volume 29, 695-705. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.041>.
- Mendelsohn, M., Lowder, T., & Canavan, B. (2012). *Utility-scale concentrating solar power and photovoltaics projects: a technology and market overview*. Golden, Colorado : NREL/TP-6A20-21137. <http://www.osti.gov/bridge> adresinden alındı.
- Montes, M., Rovira, A., Munoz, M., & Martínez-Val, J. (2011). Performance analysis of an Integrated Solar Combined Cycle using Direct Steam Generation in parabolic trough collectors. *Applied Energy*, Volume 88, Issue 9, 3228-3238. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.038>.
- Moukhtar, I., El Dein, A., Elbaset, A., & Mitani, Y. (2021). *Solar Energy Technologies, Design, Modeling, and Economics*. Switzerland: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-61307-5>.
- Nacak, C., Saraç, B., & Ayhan, T. (2023). Gemideki Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Ünitesinde Deniz Suyu Sıcaklığının Soğutma Performansına Etkisinin Eksergoekonomi Metoduyla Analizi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jarnas> adresinden alındı.
- Neber, M., & Lee, H. (2012). Design of a high temperature cavity receiver for residential scale concentrated solar power. *Energy* 47, 481-487. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.005>.
- Neymark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le, H., Dürig, M., Glass, A., & Zweifel, G. (2002). Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs. *Energy and Building* 34, 917-931. doi:<https://doi.org/10.1016/S0378-7788>.
- Nrel. (2021, 01 20). *Concentrating solar power projects*. National Renewable Energy Laboratory (NREL)- SolarPACES: <https://solarpaces.nrel.gov/> adresinden alındı.
- Okonkwo, E., Okwose, C., Abid, M., & Ratlamwala, T. (2018). Second-Law Analysis and Exergoeconomics Optimization of a Solar Tower Driven Combined-Cycle Power Plant Using Supercritical CO₂. *Journal of Energy Engineering*, Volume 144, Issue 3(04018021). doi:DOI: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000534.
- Petela, R. (2003). Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy*, Volume 74(Issue 6,), 469-488. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00226-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00226-3).
- Romero, M., & Steinfeld, A. (2012). Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels. *Energy & Environmental Science* Volume 5, Issue 11, 9234-9245. doi:<https://doi.org/10.1039/C2EE21275G>.

- Rosen , M., & Dincer, İ. (2003). Exergoeconomic analysis of power plants operating on various fuels. *Applied Thermal Engineering* 23, 643–658. doi:doi:10.1016/S1359-4311(02)00244-2.
- Sansaniwal, S. K., Sharma, V., & Mathur, J. (2018). Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 1576–1601. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003.
- Saxena , G., & Gaur, M. K. (2020). *Energy, exergy and economic analysis of evacuated tube solar water heating system integrated with heat exchanger*. Materials Today: Proceedings 28. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.793.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. India: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13. doi:doi:10.1016/j.rser.2007.10.005.
- Shatnawi, H., Lim, C., & Ismail, F. (2018). Solar Thermal Power: Appraisal of Solar Power Tower. *MATEC Web of Conferences* 225, (s. 1-6). doi:https://doi.org/10.1051/mateconf/201822504003.
- Sierra, C., & Vazquez, A. J. (2005). High solar energy concentration with a Fresnel lens. *Journal of Materials Science* 40, 1339-1343. doi:DOI: 10.1007/s10853-005-0562-6.
- Steinfeld, A. (2019). Concentrated solar energy – the path for efficient thermal conversion to power and fuels. *Science Bulletin Volume* 64, Issue 8, 485-486. doi:https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.04.012.
- Stine, W., & Diver, R. (1994). *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. California, US: Sandia National Laboratories. doi:doi:10.2172/10130410.
- Subramaniam, S. B., & Senthil, R. (2021). *Heat transfer enhancement of concentrated solar absorber using hollow cylindrical fins filled with phase change material*. i n t e r n a t i o n a l journal of hydrogen energy 46, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.061.
- Tetreault-Friend, M., Gray, L., Berdibek, S., McKrell, T., & Slocum, A. (2017). Optical properties of high temperature molten salt mixtures for volumetrically absorbing solar thermal receiver applications. *Solar Energy* 153, 238–248. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.054.
- Touloukian, Y. S., & DeWitt, D. P. (1970). *Thermophysical properties of matter - the TPRC data series. Thermal radiative properties - metallic elements and alloys*. United stated.
- Valero, A., Lozano, M., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C., & Spakovsky, M. (1994). CGAM problem: Definition and conventional solution. *Energy, Volume* 19, Issue 3, 279-286. doi:https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90112-0.

- Whillier, A. (1956). The Determination of Hourly Values of Total Solar Radiation from Daily Summations. *Arch. Met. Geophys.Biokl.* B7, 197–204. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02243322>.
- Wu, B., Yuan, Z., Sun, T., & Liu, Z. (2017). Unsteady Heat Transfer of HITEC Molten Salt in Two-Dimensional Square Cavity. *Sustainable Energy*, 7(6), 97-107. doi:<https://doi.org/10.12677/se.2017.76011>.
- Zhang, P., Xiao, X., Meng, Z., & Li, M. (2015). Heat transfer characteristics of a molten-salt thermal energy storage unit with and without heat transfer enhancement. *Applied Energy*, 37, 758–772. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.004>.
- Zhang, P., Xiao, X., Meng, Z., & Li, M. (2015). Heat transfer characteristics of a molten-salt thermal energy storage unit with and without heat transfer enhancement. *Applied Energy* 137, 758–772. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.004>.

8. EKLER

Ek -1. Şekiller



Ek Şekil 1. Solar ve Hitec tuzlarının hazırlanmasında kullanılan elektrikli fırın

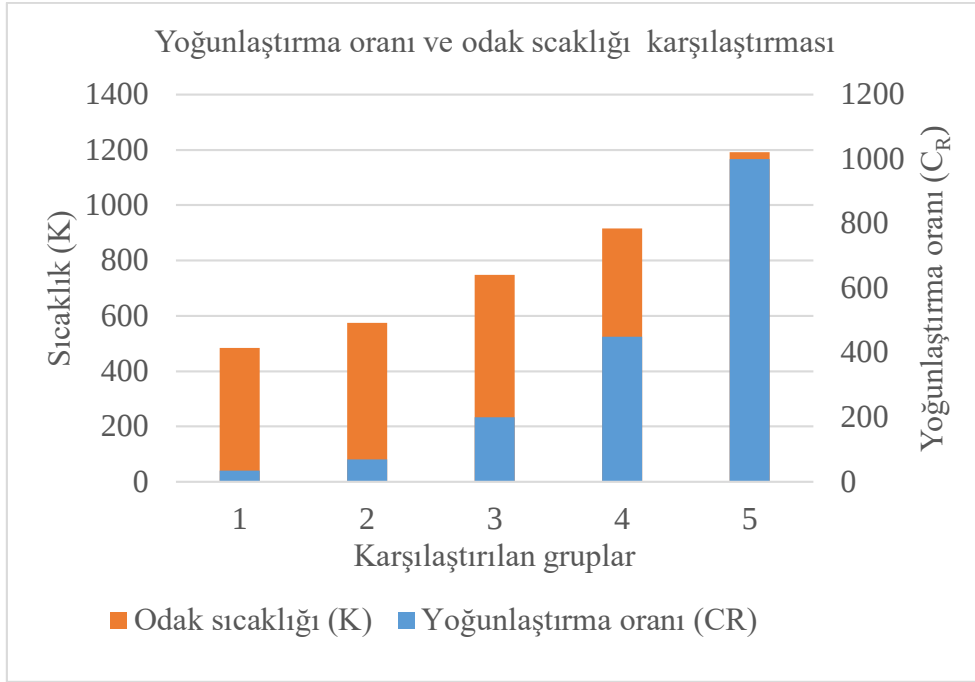


Ek Şekil 2. Isı depolama tankındaki FDM2'nin ve termoelemanların yerleştirilmesine ait görüntüler; solda orta noktada, sağda üst noktada termoeleman yerleşimi

Ek -1'in devamı

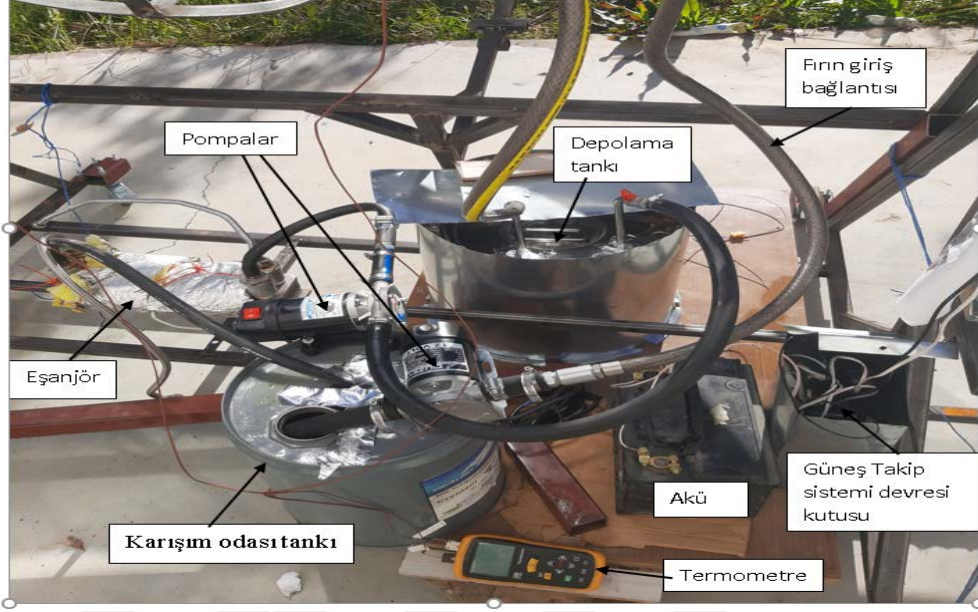


Ek Şekil 3. Halka dizisi yoğunlaştırıcı odağına yerleştirilen fırının bir fotoğrafı



Ek Şekil 4. Odak açıklığı alanı hesabında yoğunlaştırma oranına bağlı odak sıcaklıkları

Ek -1'in devamı

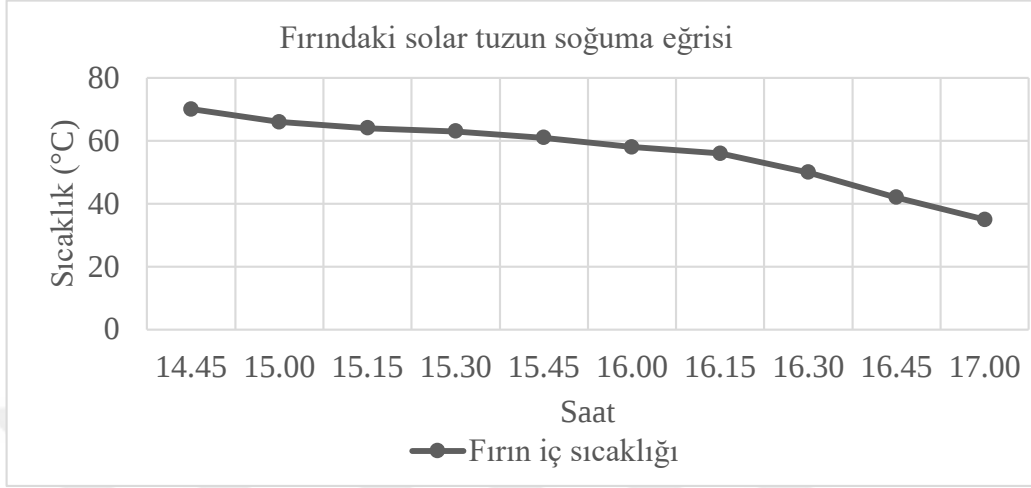


Ek Şekil 5. 2023 Ocak ayında ısı depolama sisteminin bağlantılarına ait bir görüntüsü

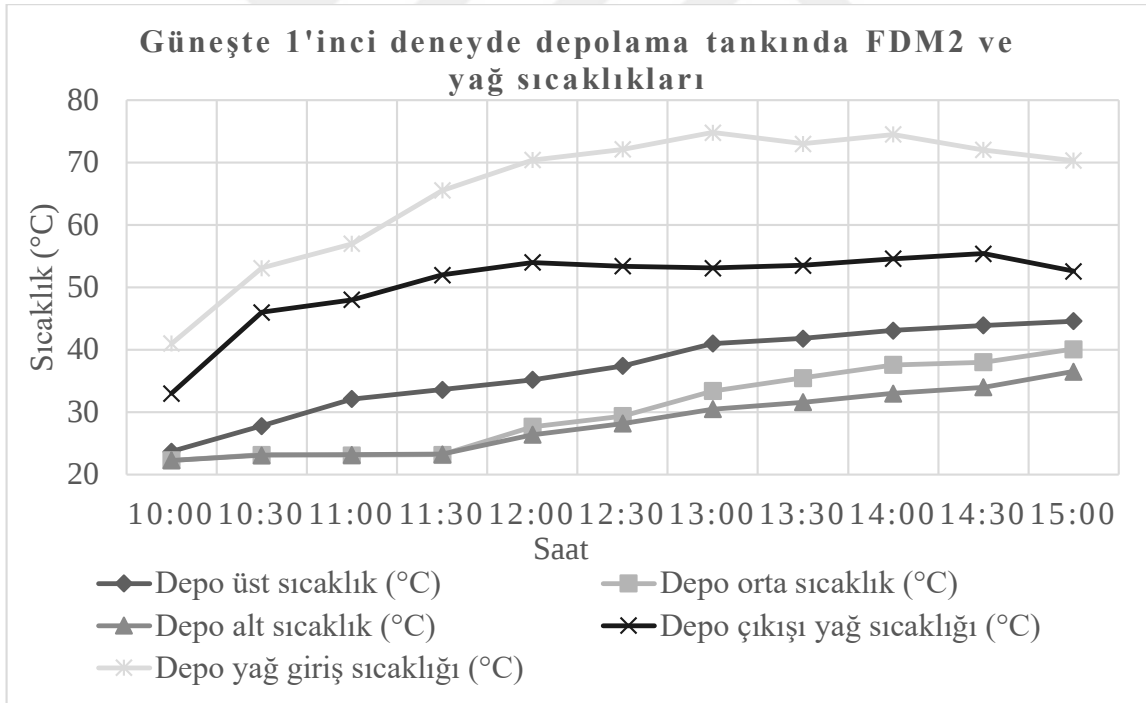


Ek Şekil 6. Ocak 2023'te yapılan HDY2 sisteminin ilk deneyindeki bir görüntüsü

Ek -1'in devamı

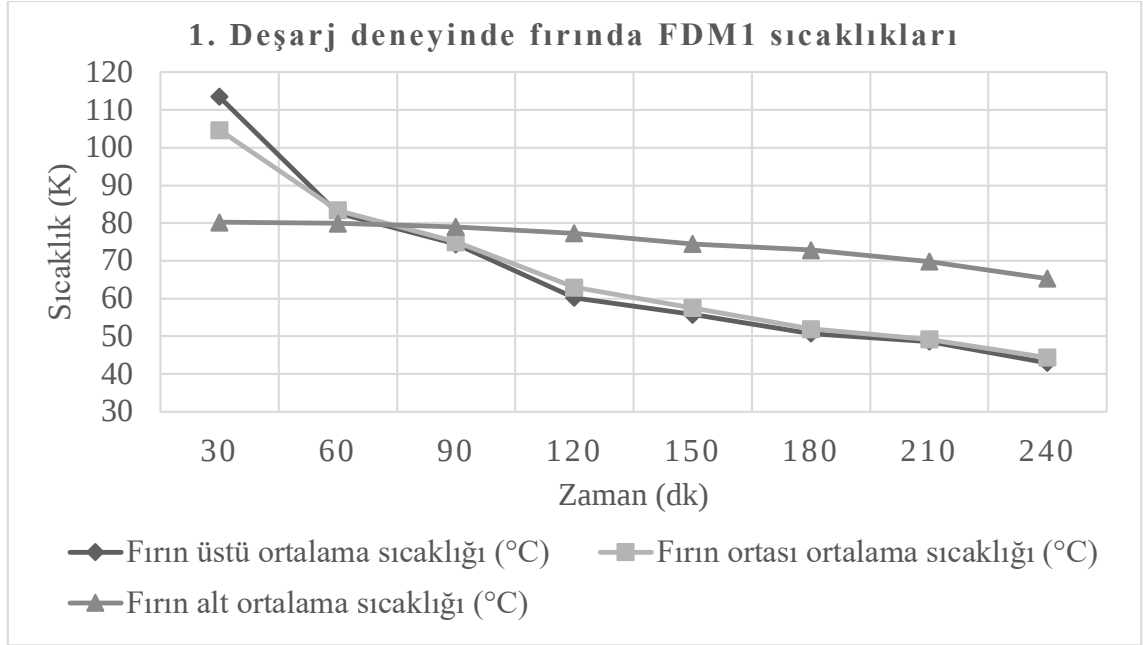


Ek Şekil 7. Deşarj durumunda fırında solar tuzun soğuma grafiği

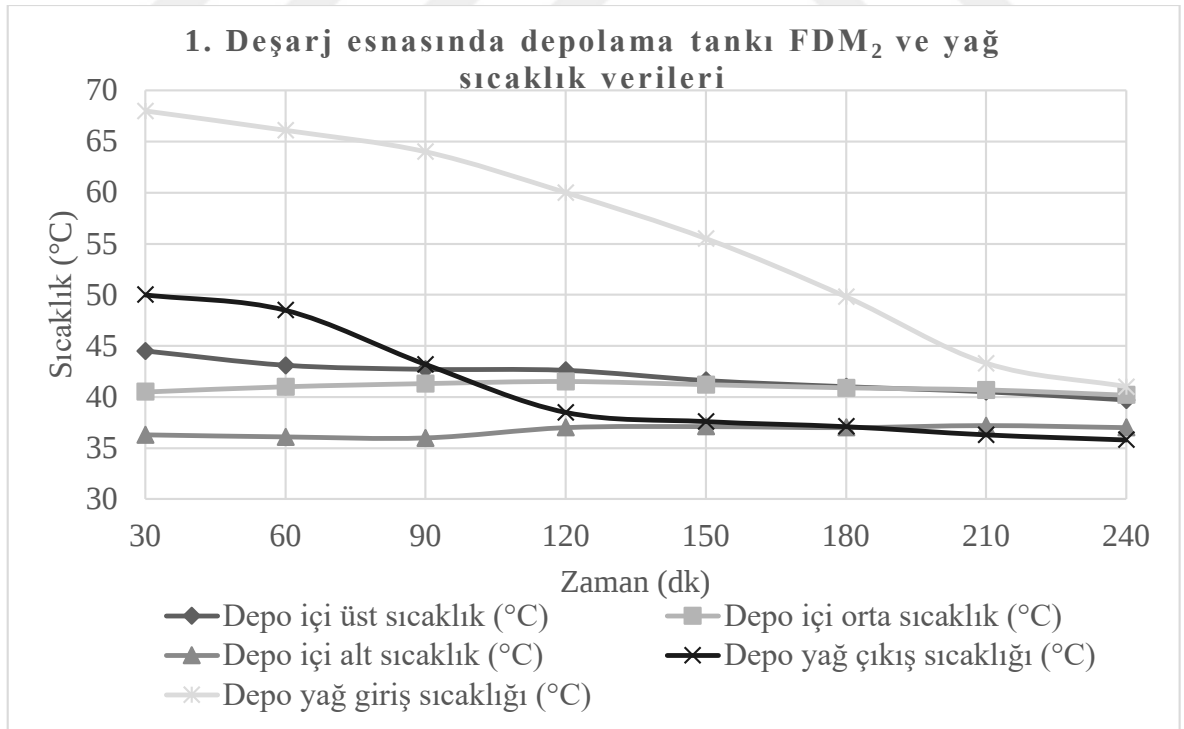


Ek Şekil 8. Şarj durumunda depolama tankında FDM2 ve eşanjör yağ giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi

Ek -1'in devamı



Ek Şekil 9. Deşarj durumu için fırındaki FDM1'in zamanla sıcaklıklarının değişimi



Ek Şekil 10. Deşarj durumunda ısı depolama tankındaki FDM2 ve helisel eşanjör giriş çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi

Ek -1'in devamı



Ek Şekil 11. Hazıranda şarj deneyinde görüntüsü alınan Termometredeki sıcaklık verileri

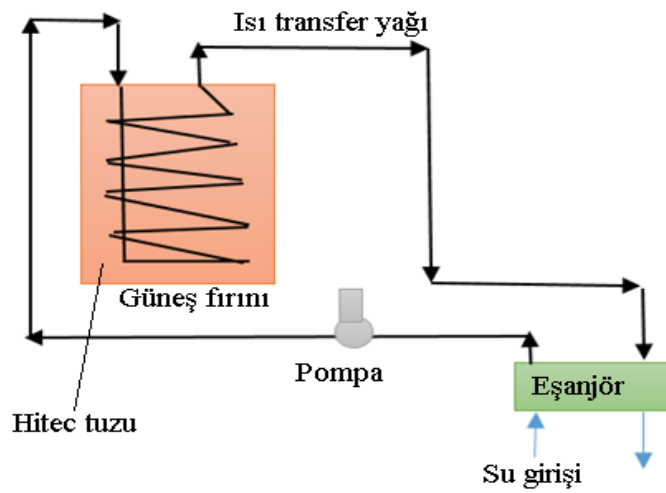


Ek Şekil 12. Haziran ayında fırın ve ısı depolama tankı bağlantısına ait bir görüntüsü

Ek -1'in devamı



Ek Şekil 13. 27 Eylül 2023'te yapılan deneydeki fırın kabından çıkarılan eriyen Hitec tuzunun görüntüsü



Ek Şekil 14. Alternatif güneş enerjili ısı depolama sisteminin şematik görünümü

Ek- 2. Tablolar

Ek Tablo 1. Lutron BTM-4208SD 12 kanal sıcaklık kayıt cihazı teknik özellikleri

Devre	Özel tek çipli mikroişlemci LSI devresi.
Ekran	LCD boyutu: 82 mm x 61 mm.
Kanallar	12 kanal: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11 ve T12.
Sensor Tipi Çözünürlük	K tipi Termokupul probu. Tip J/T/E/R/S termokupl probu. 0,1°C/1°C, 0,1°C/1°C.
Datalogger Örnekleme Süresi Ayar aralığı	Otomatik: 1 saniye ile 3600 saniye arası Manuel: Veri kaydedici düğmesine bir kez basmak, verileri bir kez kaydedebilir.
Gelişmiş Ayarlar	SD kart ayarının ondalık noktası Otomatik kapanma yönetimi Bip Sesini açık/kapalı olarak ayarlanabilir Sıcaklık birimini °C veya °F olarak ayarlanabilir Örnekleme zamanını ayarlanabilir SD hafıza kartı Formatı
Sıcaklık Telafisi	Otomatik sıcaklık K/J/T/E/R/S tipi termometre için telafi.
Prob Giriş Soketi	2 pimli termokupl soketi.
Veri tutma	Ekran okumasını dondurur
Hafıza Geri Çağırma	Maksimum ve Minimum değer.
Ekranın Örnekleme Süresi	Yaklaşık 1 saniye.
Veri Çıkışı	RS 232/USB PC bilgisayar arayüzü. İsteğe bağlı RS232 kablosunu bağlanabilir. İsteğe bağlı USB kablosunu bağlanabilir
Çalışma Sıcaklığı	0 ile 50 °C.
Çalışma Nem Oranı	% 85'ten az B.N.
Güç Kaynağı	Alkalin veya ağır hizmet DC 1,5 V pil (UM3, AA) x 8 adet veya eşdeğeri. DC 9V adaptör girişi. (AC/DC güç adaptörü isteğe bağlıdır).

Ek -2 devamı

Ek Tablo 2. 27 Ocak 2023 tarihinde yapılan Hitec şarj deneyinden elde edilen veriler

Saat	Güneş şiddeti (W/m ²)	Ortalama dış odak sıcaklığı (°C)	Fırın içi odak sıcaklığı (°C)	Fırın üst sıcaklık (°C)	Fırın sağ alt sıcaklığı (°C)	Fırın sol alt sıcaklığı (°C)	Fırından yağ çıkış sıcaklığı (°C)
11:00	970	285	221	164	29	28	71
11:30	915	290	245	200	43	30	68
12:00	840	280	220	185	56	35	73
12:30	860	253	212	178	70	40	82
13:00	955	305	265	205	84	59	85
13:30	815	300	295	250	90	74	88
14:00	810	312	289	248	95	92	90
14:30	700	290	282	242	101	89	105
15:00	600	220	200	192	104	86	86

Ek Tablo 3. 27 Ocak 2023 tarihindeki deneyin Hitec deşarj durumunda elde edilen verileri

Saat	Fırın içi odak sıcaklığı (°C)	Fırın içi üst sıcaklık (°C)	Fırın sağ alt sıcaklığı (°C)	Fırın sol alt sıcaklığı (°C)	Fırından yağ çıkış sıcaklığı (°C)
15:15	120	119	103	86	78
15:45	96	90	97	81	64
16:15	84	77	89	75	61
16:45	76	71	83	72	58
17:15	69	64	76	69	51
17:45	67	63	73	64	43
18:15	63	59	68	60	38
18:45	58	56	65	57	34
19:15	55	53	61	53	32

Ek -2 devamı

Ek Tablo 4. 24 Haziran 2023 deneyinde şarj durumundaki veriler

Fırın üstü ortalama sıcaklığı, T_1 (°C)	Fırın ortası ortalama sıcaklığı, T_2 (°C)	Fırın alt ortalama sıcaklığı, T_3 (°C)	Depo içi üst sıcaklık, T_{10} (°C)	Depo içi orta sıcaklık, T_9 (°C)	Depo içi alt sıcaklık, T_{11} (°C)	Depo yağ çıkış sıcaklığı (°C)	Depo yağ giriş sıcaklığı (°C)
113,5	104,7	80,2	44,5	40,5	36,3	50	68
82,7	83,4	79,95	43,1	41	36,1	48,5	66,1
74,45	75	79	42,7	41,3	36	43,2	64
60,2	62,95	77,35	42,6	41,5	37	38,5	60
55,75	57,55	74,5	41,6	41,2	37,1	37,6	55,5
50,75	51,95	72,9	41	40,9	37	37,1	49,8
48,6	49,2	69,85	40,5	40,7	37,2	36,3	43,3
42,95	44,4	65,3	39,7	40,2	37	35,8	41

Ek Tablo 5. Uyarlamalı fırındadeşarj durumunda infrared lamba deneyinin verileri

Zaman (dk)	Fırın üstü ortalama sıcaklık (°C)	Fırın ortası ortalama sıcaklık (°C)	Fırın alt ortalama sıcaklık (°C)	Odak yüzeyi metal sıcaklığı (°C)
30	125,7	101,7	50,2	66,4
60	78,6	78,5	51,95	46,8
90	64,45	66,35	53,4	42,4
120	57,5	58,5	53,6	39
150	50,45	51,6	53,2	36,2
180	47,15	48,6	52,7	35
210	44,95	46,5	52,2	34

ÖZGEÇMİŞ

Ali Kemal ÖZCAN, ilköğretim ve liseyi Trabzon'da tamamladı. 2009 Yılında Zonguldak Karaelmas (Bülent Ecevit) Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Otomotiv Öğretmenliğinden mezun oldu. 2010-2015 Yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine mühendisliğinde yüksek lisansını tamamladı. 2015-2018 yılları arasında Mühendislik Tamamlama yaparak Makina Mühendisliği lisansını tamamladı. 2018 yılında başladığı Doktora programına ise KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü YÖK 100/2000 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Teknolojileri Anabilim Dalında devam etmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

SCI, SSCI ve AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleleri:

- 1-Demirtaş, C. & Özcan, A.K. (2021). The experimental thermal analysis of aluminum metal melting with concentrated solar energy, Solar Energy Materials and Solar Cells, volume 222,110940, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110940>.

Hazırlanan makaleler:

- 2-Özcan, A.K., Demirtaş, C. & Saraç, B. (2024). Mathematical modeling and thermodynamic analysis of two different ring array-type solar energy concentrator systems, Solar Energy Materials and Solar Cells,

Uluslararası ve ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildirileri:

- 1- Demirtaş, C., Özcan, A.K. & Danışmaz M. (2017). Trabzon Koşullarında Güneş Radyasyonu ile Alüminyum Ergitme, 5th International symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, ISITES2017, Sayfa 702-711, Bakü, Azerbaycan.
- 2- Demirtaş, C. ve Özcan, A.K., (2019). Yoğunlaştırılmış güneş enerjili sistemlerde çeşitli ısı işlem yöntemleri, 8. Güneş Enerjisi Sempozyumu, Bildiriler kitabı, sayfalar 143-154, TMMOB, Mersin.
- 3- Özcan, A.K. & Demirtaş, C. (2021). Halka dizi tipi (Rac) güneş enerjisi yoğunlaştırıcıları ile yüksek sıcaklıkların elde edilmesi. Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'21). volume 1, sayfalar 640-646. Gaziantep: TIBTD. <http://ulibtk2021.gantep.edu.tr>
- 4- Özcan, A.K., Öksüz Ö. & Demirtaş, C. (2023). İnfrared ışınlar ile ergitilen organik ve inorganik maddelerin ısı enerji depolamada kullanımı, The 5th International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET'23), Trabzon.