

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN PARABOLİK GÜNEŞ
KOLLEKTÖRLERİNE ENTEGRASYONU VE ETKİLERİ**

HAZIRLAYAN

GÜLDEN ADIYAMAN

DOKTORA TEZİ

ANKARA – 2024

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN PARABOLİK GÜNEŞ
KOLLEKTÖRLERİNE ENTEGRASYONU VE ETKİLERİ**

HAZIRLAYAN

GÜLDEN ADIYAMAN

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK

ANKARA – 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı çerçevesinde Gülden ADIYAMAN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 02 / 08 / 2024

Tez Adı: Faz Değiştiren Malzemelerin Parabolik Güneş Kollektörlerine Entegrasyonu ve Etkileri

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK (Danışman)

.....

Prof. Dr. Tahir YAVUZ (Başkent Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. İlhami HORUZ (Gazi Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Adem ACIR (Gazi Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Hüseyin YAPICI (Başkent Üniversitesi)

.....

ONAY

Prof. Dr. Dilek Çökeliler Serdaroğlu
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih : ... / ... / 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 28 / 08 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı: Gülden ADIYAMAN

Öğrencinin Numarası: 21720574

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Makine Mühendisliği Doktora Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK

Tez Başlığı: Faz Değiştiren Malzemelerin Parabolik Güneş Kollektörlerine Entegrasyonu ve Etkileri

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 82 sayfalık kısmına ilişkin, 28 / 08 / 2024 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası: Gülden ADIYAMAN

ONAY

Tarih: 28 / 08 / 2024

Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK

Tez Danışmanı

TEŞEKKÜR

Doktora tezimi 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (Proje No: 122M039) kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Başkanlığı'na teőekkürlerimi sunarım.

Tez danışmanım ve proje yürütücüsü Dr. Öğr. Üyesi Levent Çolak'a, proje ekibinde bulunan Prof. Dr. Mustafa Tutar, Doç. Dr. Emine Gül Cansu Ergün ve Oktay Hançerli'ye birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğumu belirtir teőekkürlerimi sunarım.

Tez izleme jürisinde değerli yorumları ile katkı sağlayan Prof. Dr. İlhami Horuz ve Prof. Dr. Tahir Yavuz'a, tez savunma jürisinde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Hüseyin Yapıcı ve Prof. Dr. Adem Acır'a tüm katkıları için teşekkür ederim.

En büyük teőekkürü bütün çalışmalarımda beni yalnız bırakmayan ve her zaman başaracağıma şüphesiz inanan aileme borçluyum.

ÖZET

Gülden ADIYAMAN

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN PARABOLİK GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİNE ENTEGRASYONU VE ETKİLERİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

Bu tez çalışmasında, parabolik oluk kollektörler için kullanılacak kaviteli, faz değıştiren malzemeli ve yalıtımlı yeni bir güneş alıcısı tasarlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, bir kollektör sisteminin genel verimliliğini ilk ölçüde etkileyen optik verimlilik üzerine çalışılmıştır. Optik verimliliği etkileyen en önemli parametre, güneş ışınımının yoğunlaştığı alıcı tarafından emilen net ısı miktarıdır. Bu bağlamda, optimizasyon parametreleri olarak üç farklı geometri (üçgen, dikdörtgen ve çokgen), üç farklı açıklık genişliği ve yüksekliği ve kavite alıcısının parabolik yansıtıcı yüzeye ilişkin üç farklı konumu alınmıştır. Bu parametrelerin etkilerini değerlendirmek ve aynı zamanda alıcı tarafından absorbe edilen radyasyon miktarı üzerindeki etkilerini incelemek için bir deney tasarımı yaklaşımı kapsamında Yanıt Yüzey Metodu kullanılmıştır. Optik analiz için, bu parametrelerin etkilerini araştırmak üzere Monte Carlo Işın İzleme yöntemiyle birlikte açık kaynaklı sayısal ışın izleme yazılımı SolTrace kullanılmıştır. Sonuçlar, optimum boşluk geometrisinin çokgen olduğunu ve boşluk derinliğinin ve açıklığının her ikisinin de 0,05 m'ye eşit olduğunu göstermektedir. Ayrıca en etkili parametrenin alıcının konumu olduğu ve optimum konumun parabolik yoğunlaştırıcının odak noktası olduğu bulunmuştur. Optimum boşluklu alıcı tasarımı için sistemin optik verimliliği %81,05 olarak bulunmuştur. Yeni alıcı tasarımında, yeni modelin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Yeni alıcı tasarımında, ilk olarak yeni modelin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda literatürden iki aşamalı doğrulama yapılmıştır. İlk olarak borulu bir güneş alıcısında unifor olmayan ışınım haritası entegre edilerek ısıl analizler deneysel bir çalışma doğrulanmıştır. Daha sonra Faz Değıştiren Malzeme (FDM) erime analizleri literatürdeki deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Doğrulama çalışmalarından sonra, FDM entegreli, kendinden yalıtımlı kaviteli alıcı modellenmiş ve HAD analizleri yapılarak sonuçlar

değerlendirilmiştir. FDM olarak erime ve donma sıcaklıkları sırasıyla 130 ve 120°C olan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kullanılmıştır. HAD sonuçlarına göre, FDM 13.dakikada erimeye başlamıştır. Tamamen erime süresi 31.dakikadır. Buna FDM depolama süresi de denilebilir. FDM tamamen eriyene kadar geçen sürede suyun çıkış sıcaklığı 437,52K olmuştur. Bu aşamadan sonra, güneş ışınımının kesildiği durum için kavite duvarlarındaki ışınım haritası kaldırılmış olup analizler yine zamana bağlı devam etmiştir. Bu analizlerde görülmüştür ki FDM 5.dakikadan itibaren katılaşmaya başlayıp 21. dakikada tamamen katı haldedir. FDM entegreli kendinden yalıtımlı kavitel güneş alıcı, aynı sınır koşullarında FDM entegresiz yalıtım olmayan kaviteli alıcı ile karşılaştırılmıştır. FDMnin katılaşma süresince (16 dakika) su çıkış sıcaklığındaki dalgalanma yalnızca 17,5°C iken FDM entegresiz alıcıda bu değer 58°C olmuştur. Güneş alıcısına FDM entegresi özellikle gün içinde bulut geçişleri sırasında dakika boyunca düşük su çıkış sıcaklığı dalgalanmaları ile sistemin daha stabil çalışmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca güneşin tamamen kesildiği akşam saatlerinde de FDM entegreli alıcıdan bir süre daha sıcak su veya buhar eldesinin devam edebileceğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: kaviteli güneş alıcısı, optik verim, optimizasyon, yanıt yüzey metodu, faz değiştiren malzeme, parabolik oluk kollektör, sayısal analiz, HAD.

ABSTRACT

Gülden ADIYAMAN

INTEGRATION OF PHASE CHANGING MATERIALS IN PARABOLIC SOLAR COLLECTORS AND THEIR EFFECTS

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2024

In this thesis, a new solar receiver with cavity, phase change material and insulation that can be used for parabolic trough collectors has been designed. In the first stage of the study, optical efficiency was studied, which primarily affects the overall efficiency of a collector system. The most important parameter affecting optical efficiency is the net amount of heat absorbed by the receiver where solar radiation is concentrated. In this context, three different geometries (triangle, rectangle and polygon), three different aperture width and height, and three different positions of the cavity receiver relative to the parabolic reflecting surface were taken as optimization parameters. The Response Surface Method was used within a design-of-experiment approach to evaluate the effects of these parameters and also to examine their impact on the radiative heat rate absorbed by the receiver. For optical analysis open-source numerical ray-tracing software SolTrace, accompanied with the Monte Carlo Ray Tracing method, was used to investigate the effects of these parameters. The results showed that the optimum cavity geometry was polygonal and the cavity depth and span are both equal to 0.05m. Moreover, it is found that the most effective parameter is the position of the cavity receiver and the optimum position was at the focal line of the parabolic concentrator. For the optimum cavity receiver design, the optical efficiency of the system was found to be 81.05%. In the new receiver design, verification studies of the new model were carried out with Computational Fluid Dynamics (CFD). In this context, two-stage validation was performed from the literature. Firstly, the non-uniform radiation map was integrated in a tubular solar receiver and thermal analyses were verified with an experimental study. Then, the Phase Change Material (PCM) melting analyses were verified with an experimental study in the literature. After the validation studies, the PCM integrated, self-insulating cavity receiver was modeled and the results were evaluated by performing CFD analyses. High density polyethylene (HDPE) with

melting and freezing temperatures of 130 and 120°C, respectively, was used as PCM. According to the CFD results, PCM started to melt in the 13th minute. The complete melting time was 31st minute. This can also be called PCM storage time. The exit temperature of the water was 437.52K during the period until PCM was completely melted. After this stage, the radiation map on the cavity walls was removed for the case where solar radiation was cut off and the analyses continued again depending on time. In these analyses, it was seen that FDM started to solidify from the 5th minute and was completely solid at the 21st minute. FDM integrated self-insulating cavity solar receiver was compared with FDM integrated non-insulating cavity receiver under the same boundary conditions. While the fluctuation in water outlet temperature was only 17.5°C during the solidification period of FDM (16 minutes), this value was 58°C in the receiver without FDM integration. FDM integration to the solar receiver allowed the system to work more stably, especially during cloud transitions during the day, with low water outlet temperature fluctuations for minutes. It was also shown that hot water or steam could continue to be obtained from the FDM integrated receiver for a while longer in the evening hours when the sun completely stopped.

KEYWORDS: cavity solar receiver; optical efficiency, optimization, response surface methodology, phase change material, parabolic trough collector, numerical analysis, CFD.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	16
2. KAVİTELİ ALICI TASARIMI VE İŞİNSAL OPTİMİZASYONU	18
2.1. Kaviteli Güneş Alıcısı Modeli	18
2.2. Optik Model.....	20
2.3. Optimizasyon Metodu	22
2.4. Optik Model Doğrulama	25
2.5. Optik Analizler ve Sonuçlar.....	27
3. MATEMATİKSEL MODELVE DOĞRULAMA.....	42
3.1. Matematiksel Model	43
3.2. Doğrulama	46
3.2.1. Termal modelin HAD doğrulaması	47
3.2.2. Faz Değiştiren Malzemenin HAD Doğrulaması	53
4. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ENTEGRELİ, KAVİTELİ, KENDİNDEN YALITIMLI ALICININ SAYISAL ANALİZİ VE BULGULAR	57
4.1. Sayısal Analiz Sonuçları.....	60
4.2. Kaviteli Alıcı ile Karşılaştırma	70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
5.1. Sonuçlar	75
5.2. Öneriler	77
KAYNAKLAR.....	78

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2. 1. Parabolik oluk kollektörün boyutları.....	19
Tablo 2. 2. Faktörlerin seviyeleri ve derece değerleri	25
Tablo 2. 3. LS-2 parabolik oluk kollektör sistemi özellikleri	26
Tablo 2. 4. Kollektör sisteminin optik özellikleri.....	28
Tablo 2. 5. Faktör seviyeleri ve sonuçları (Q_{abs} ve η_{opt}).....	30
Tablo 2. 6. Varyans analizi.....	31
Tablo 2. 7. Yanıt değerini maksimuma çıkaran parametre seviyeleri ve değerleri	38
Tablo 2. 8. Optimum model için SolTrace'den elde edilen sonuçlar	38
Tablo 2. 9. Optimum model için Minitab ve SolTrace analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	38
Tablo 3. 1. Syltherm800 yağın termofiziksel özellikleri	50
Tablo 3. 2. Havanın termofiziksel özellikleri	51
Tablo 3. 3. LS-2 kollektör sistemin deneysel verileri.....	51
Tablo 3. 4. Ağ yapısından bağımsızlık analiz sonuçları.....	52
Tablo 3. 5. Deneysel ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması	53
Tablo 3. 6. Su, RT82-parafin (FDM) ve bakırın termofiziksel özellikleri	55
Tablo 3. 7. Deneysel ile FDM HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Tablo 4. 1. Seçilen FDM'nin termofiziksel özellikleri.....	60
Tablo 4. 2. Kaviteli alıcı dış yüzey plakalarına ait ısı transfer katsayıları	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1. Parabolik oluk tür güneş kolektörü	2
Şekil 1. 2. Parabolik oluklu güneş kolektörü için eş merkezli alıcı tasarımı	4
Şekil 1. 3. Faz değişim malzemesi ile entegre düz plaka güneş kolektörü	5
Şekil 1. 4. FDM toplayıcının yapısı ve sensör konumları	5
Şekil 1. 5. FDM entegreli güneş alıcısı	7
Şekil 1. 6. Çoklu FDM'li güneş alıcısının şematik yerleşimi	8
Şekil 1. 7. Faz değişim malzemesi entegre manifold tasarımı	9
Şekil 1. 8. Vakumlu borunun (a) FDM'li (b) FDM'siz kesiti	9
Şekil 1. 9. Dikdörtgen kaviteli borulu alıcılı parabolik oluk kolektör şeması	10
Şekil 1. 10. Kavite alıcılı kolektör için SolTrace'de yapılan bir analiz örneği	11
Şekil 1. 11. Kaviteli kapaklı alıcı şeması	12
Şekil 1. 12. 3 farklı tip kaviteli alıcı	12
Şekil 1. 13. OptisWorks® simülasyonu (a) Alıcılı parabolik çanak yoğunlaştırıcı ve (b) Silindirik alıcı	13
Şekil 1. 14. Farklı alıcı tasarımlarının şematik gösterimi (A) Konvansiyonel alıcı (B) Yarı Yalıtım Dolgulu Alıcı (C) Doğrusal Boşluk Alıcısı (1-Emici boru, 2- Cam tüp, 3-Halka şeklindeki boşluk, 4-Yalıtım, 5-Boşluk)	13
Şekil 1. 15. Silindirik boşluk alıcısı, a) ANSYS Design Modeler'da alıcının 3D modeli, b) modelin ANSYS'te mesh görüntüsü c) test edilen alıcının fotoğrafı	14
Şekil 1. 16. Doğrusal boşluk alıcısının yapısı (a) ve enine kesiti (b)	15
Şekil 1. 17. FDM'li kaviteli alıcı	17
Şekil 2. 1. Kaviteli bir alıcıya sahip parabolik oluk kolektörün şeması	19
Şekil 2. 2. Kaviteli alıcının şematik görünümü (örnek geometri)	20
Şekil 2. 3. Optimizasyon prosedürü için akış şeması	23
Şekil 2. 4. Kaviteli alıcılı parabolik oluk tür kolektörün optimizasyon parametreleri	24
Şekil 2. 5. LS-2 alıcı etrafındaki ısı akışı dağılımı. Literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma	27
Şekil 2. 6. Kaviteli alıcının optik modeli (örnek geometri)	28
Şekil 2. 7. Qabs için tüm parametrelerin etkileri	32
Şekil 2. 8. geo, h, a ve b parametreleri arasındaki ikili etkileşimler	33
Şekil 2. 9. Normal olasılık grafiği	34

Şekil 2. 10. Kavite üzerindeki ışınım dağılımı	34
Şekil 2. 11. Parabolik kollektör üzerindeki gölgeli ve gölgesiz alanlar	35
Şekil 2. 12. Odak noktasının 0,10 m yukarısındaki üçgen kaviteli alıcının kollektör optik analizi	36
Şekil 2. 13. Odak noktasının 0,10 m yukarısındaki üçgen kaviteli alıcının optik analizi ...	36
Şekil 2. 14. Odak noktasındaki üçgen kaviteli alıcının kollektör optik analizi	37
Şekil 2. 15. Odak noktasındaki üçgen kaviteli alıcının optik analizi	37
Şekil 2. 16. Optimum kaviteli alıcının SolTrace analiz sonucunun perspektif görünümü ..	39
Şekil 2. 17. Optimum kaviteli alıcının SolTrace analiz sonucunun ön görünüşü	40
Şekil 3. 1. Kaviteli FDM'li ve yalıtımlı yeni alıcının katı modeli	42
Şekil 3. 2. Kaviteli FDM'li ve yalıtımlı yeni alıcının ön görünüşü ve boyutları.....	42
Şekil 3. 3. LS2 alıcı modeli	47
Şekil 3. 4. LS2 alıcı modelinin ön görünüş	48
Şekil 3. 5. LS2 alıcı modelinin genel ağ yapısı	48
Şekil 3. 6. LS2 alıcı modelinin genel ağ yapısı ön görünüş	49
Şekil 3. 7. LS2 alıcı modelinin sınır tabaka ağ yapısı ön görünüş	49
Şekil 3. 8. Alıcı yüzey sıcaklığı	52
Şekil 3. 9. Sistem geometrisi	53
Şekil 3. 10. Sistem boyutları	54
Şekil 3. 11. Sistemin ANSYS Design Modeler'da 3D geometrisi	54
Şekil 3. 12. 3-boyutlu ağ yapısı görüntüsü	55
Şekil 3. 13. Ağ yapısı ön görünüş kesiti	55
Şekil 3. 14. Deneysel ile HAD sonuçlarının karşılaştırması	56
Şekil 4. 1. Kaviteli FDMli alıcılı kollektörün optik analizi.....	58
Şekil 4. 2. Kaviteli FDMli alıcı geometrisinin optik analizi	59
Şekil 4. 3. FDM'li kaviteli alıcının kavite duvarlarına ait ışınım haritası	59
Şekil 4. 4. FDM entegreli kendinden yalıtımlı kaviteli alıcının mesh yapısı – ön görünüş	61
Şekil 4. 5. FDM entegreli kendinden yalıtımlı kaviteli alıcının mesh yapısı	61
Şekil 4. 6. Kaviteli alıcı ve hava hacmi modeli	62
Şekil 4. 7. Kavite etrafına modellenen hava hacminin mesh yapısı	62
Şekil 4. 8. Kaviteli alıcı dış yüzey plaka numaralandırmaları.....	63
Şekil 4. 9. FDM erime analizleri için zamana bağlı sıcaklık dağılımı	65
Şekil 4. 10. FDM erime analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu dağılımı	66
Şekil 4. 11. FDM erime analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu grafiği.....	67

Şekil 4. 12. FDM erime analizleri için zamana bağlı su çıkış sıcaklığı grafiği.....	67
Şekil 4. 13. FDM katılaşma analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu dağılımı.....	68
Şekil 4. 14. FDM katılaşma analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu grafiği	69
Şekil 4. 15. FDM katılaşma analizleri için zamana bağlı su çıkış sıcaklığı grafiği.....	69
Şekil 4. 16. Kaviteli alıcının mesh yapısı	70
Şekil 4. 17. Direkt ışıınının bulunduğu durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile kaviteli alıcıda iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	71
Şekil 4. 18. Direkt ışıınının kesintiye uğradığı durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile kaviteli alıcıda iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	yüzey alanı (m ²)
D	çap (m)
f	odak uzaklığı
g	yerçekimi ivmesi (m/s ²)
h	ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
k	ısıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
K	geliş açısı değıştiricisi
L	uzunluk (m)
W	genişlik (m)
T	sıcaklık (°C, K)
V	hız (m/s)
Q	ışınım akısı (W/m ²)
c _p	özgül ısı (J/kgK, kJ/kgK)
I _d	direkt ışınım (W/m ²)
\dot{m}	kütleli debi (kg/s)
\dot{Q}	net ışınım miktarı (W)
α	absorbsiyon oranı
ρ	yansıtıcılık oranı
τ	geçirgenlik oranı
γ	kesişim faktörü
θ	güneş geliş açısı
μ	dinamik viskozite (kg/ms)
ν	kinematik viskozite (m ² /s)
abs	absorbe edilen
opt	optik
ort	ortalama
Pr	prandtl sayısı
BBD	box-behnken tasarım yöntemi
DoE	deney tasarımı yaklaşımı
FDM	faz değıştiren malzeme
HAD	hesaplmalı akışkanlar dinamiği
MCRT	monte carlo ışın izleme yöntemi
PTC	parabolik oluk kollektör
RSM	yanıt yüzey metodu
YYPE	yüksek yoğunluklu polietilen

1. GİRİŞ

Son yüzyılda sanayinin ve teknolojinin gelişmesi, enerji taleplerinin artmasına neden olmuştur. Artan enerji talebi her ne kadar fosil yakıtlarla karşılanmaya çalışılsa da fosil yakıtların sebep olduğu çevresel kirliliklerin yanısıra rezervlerinin de kısıtlı olması nedeniyle, ülkeler yeni enerji kaynaklarına yönelmiştir. Artan enerji talebinin karşılanmasında önemli bir alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisidir. Güneş enerjisi tükenmez, temiz ve güvenli bir enerji kaynağı olduğundan, elektrik tedariki için en umut verici adaylardan biri olarak büyük ilgi görmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi son yıllarda büyük ölçüde artmış ve özellikle yüksek ısı gücü sağlayan optik yoğunlaştırılmalı güneş teknolojilerinin kullanımı önem kazanmıştır. Dünya çapında parabolik oluk, güç kulesi ve çanak/motor dahil yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinde gelişmeler görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi, yer yüzeyinde düşük ekserjili olması nedeniyle yoğunlaştırıcı güneş kolektör teknolojisi ile yüksek ekserjili yüksek sıcaklıkta ısı enerji elde edilerek farklı sanayi alanlarında etkin biçimde kullanılabilir.

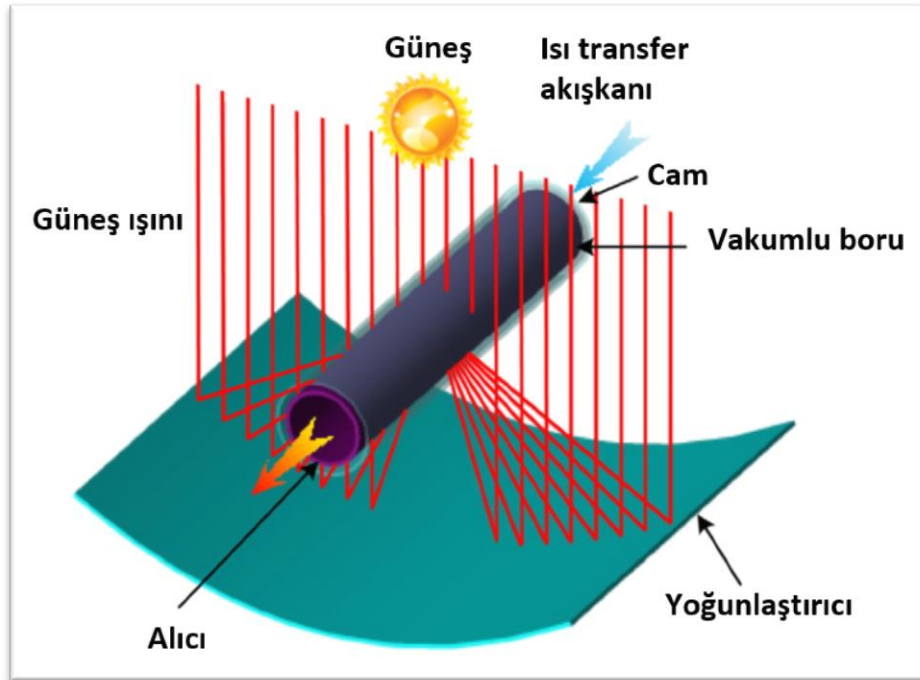
Yoğunlaştırıcı güneş kolektörlerinde kaviteli güneş alıcıları öncelikli olarak güneş kuleleri sistemlerinde ticari olarak kullanılmaktadır. Mevcut güneş alıcıları çoğunlukla parabolik oluk, çanak tip ve fresnel sistemler ise araştırma geliştirme aşamasındadır. Araştırma geliştirme aşamasında olan bir diğer konu ise faz değiştiren malzemelerin güneş alıcılarında kullanılmasıdır. Günümüzde faz değiştiren malzemeler çoğunlukla iş akışkanı sıcaklığının elde edilmesinin sonrasındaki uygulamalarda kullanılmaktadır.

Direkt güneş ışınımı kullanan yoğunlaştırıcı güneş kolektörlerinde, direkt ışınımın gün içinde bulutlanma nedeniyle kesintiye uğraması, alıcı üzerindeki odaklanmayı keserek alıcı içinden geçen iş akışkanı çıkış sıcaklığında ani ve önemli dalgalanmalara yol açmaktadır. Ayrıca geleneksel borulu güneş alıcılı yoğunlaştırıcı sistemlerinde boru yüzeyinin tamamı yansıtıcı kolektörden gelen ışınımına maruz kalamamaktadır. Bunun yanında geleneksel güneş alıcılarının etrafında bulunan dairesel kesitli camlar maliyet artışına, ışın geçirgenliği sorununa ve alıcı malzemesi ile camın farklı genleşme katsayıları olduğu için sistemde deformasyonlara neden olurken aynı zamanda hava şartlarından kaynaklı olarak (dolu, şiddetli yağmur vb.) hasar almakta, sistemi olumsuz etkilemekte ve sistemin çalışmasının duraksamasına neden olmaktadır. Bu nedenle günümüzde yukarıda yer alan sorunların üstesinden gelecek bir çözüme ihtiyaç duyulmuştur.

Doktora Tezi çalışması ile parabolik oluk tip güneş kolektör alıcısı için kendi içinde depolama sistemi olan, optik ve ısıl verimliği geleneksel alıcılara göre artırılmış yenilikçi bir tasarım ile mevcut problemlerinden üstesinden gelinmesi ve faz değıştiren malzeme entegresinin alıcı üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Parabolik oluk kolektör sistemleri, parabolik şekle sahip yansıtıcılardan oluşan ve bu yansıtıcıların odak merkezlerinde bulunan borulu alıcıya çizgisel odaklama yapan ticarileşmiş sistemlerdir. Şekil 1.1’de tipik bir parabolik oluk kolektör sistemi gösterilmektedir. Alıcı tüplerin içerisinde dolaşan akışkan, kolektörler tarafından yoğunlaştırılmış güneş ışınımıyla ısınır ve ısıl enerji elde edilir [1]. Parabolik oluk kolektörler, yansıtıcı bir materyalin ince bir tabaka halinde eğilerek parabolik bir şekil almasıyla oluşurlar. Alıcılar ise ısı kayıplarını azaltmak için dışı cam ile kaplı siyah metal borulardır ve yansıtıcıların odak çizgisi boyunca yer alırlar [2].



Şekil 1. 1. Parabolik oluk tür güneş kolektörü

Parabolik oluk tür kolektörler ticari açıdan en olgunlaşmış yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisidir. Fakat ısı transfer akışkan sıcaklığının düşük olması sistemin ekserji veriminin ve dolayısıyla elektrik veriminin de düşük olmasına neden olmaktadır. Parabolik oluk tür kolektörlerden faydalanmanın bir diğer yolu ise buhar eldesidir. Bu sayede

sistemden elde edilen ısı güç daha az enerji kaybına uğrayarak yararlı işe çevrilebilmektedir.

Parabolik oluk sistemlerinde kullanılan tipik bir alıcı, konveksiyonel kayıpları azaltmak için dışında cam bir boru ile kaplanmış çelik bir borudan oluşur. Bu çelik boru absorptivitesi %90'ın üstünde, yayıcılığı %30 un altında olan ve radyasyon kayıplarını azaltan seçici bir yüzeyle kaplıdır. Bunun yanısıra yüksek çalışma sıcaklığı ve yüksek verim elde edebilmek için cam borular veya dışı camla kaplı vakumlu borular da kullanılmaktadır. Vakumsuz borular genellikle çalışma sıcaklığı 250°C civarında olan sistemlerde kullanılır çünkü düşük çalışma sıcaklıklarında ısı kayıplar kritik değildir. Tek bir alıcının boyu 6 m'den azdır. Birden fazla borulu alıcı birbiri ardına kaynakla birleştirilmektedir ve toplam alıcı uzunluğu genellikle 25-150m arasındadır [1]. Bu sistemler 50-400°C arasında sıcaklık üretebilirler [2]. Fakat yeni ısı transfer akışkanı deneme çalışmaları bu sıcaklığın 500°C'ye ulaşabileceğini göstermektedir [3].

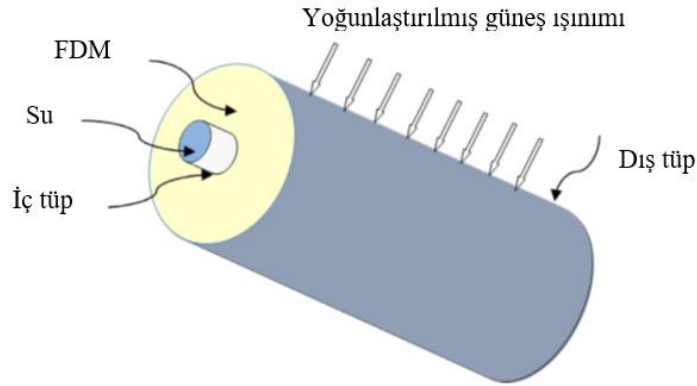
Sağlanan enerji girdisinin etkin kullanımına yönelik faaliyetler her enerji kaynağında olduğu gibi güneş enerjisi için de önemlidir. Son yıllarda güneş enerjisi sistemlerinin farklı teknolojiler ile hibritlenmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu sayede birden fazla enerji çıktısı ile mevcut ihtiyaçların karşılanması ve güneş alıcılarının verim artışının sağlanması bu araştırmaların hedefleri arasındadır. Gün içerisinde meydana gelen ışınlam değerlerindeki dalgalanmalar sistemde kullanılan ısı transfer akışkanının çıkış sıcaklığını büyük ölçüde değiştirmektedir. Kollektör çıkışındaki sıcaklık değerinin dalgalanması, sisteme ek enerji kaynaklarından girdi ihtiyacına neden olmaktadır. Ayrıca alıcı yüzeyinde ışınlamın yoğun olduğu zamanlarda meydana gelen aşırı ısınma ve ışınlamın az olduğu zamanlarda oluşan soğumalar, alıcı performansını ve malzeme deformasyonunu önemli ölçüde etkilemektedir. Parabolik oluk tip kollektörlerde meydana gelen bu dezavantajlar ve hibrit sistemlerin gelişimi gözönüne alınarak yenilikçi bir tasarım ortaya koymak üzere araştırmalar yapılmıştır.

Güneş enerjisi, tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında en hızlı büyüyen dağıtım oranlarından birine sahiptir. Fakat, güneş enerjisinin etkili kullanımı dalgalanan doğası nedeniyle zordur. Dolayısıyla, güneş enerjisi kullanımında arz-talep uyumsuzluğu vardır. Bu nedenle, toplanan enerjiyi güneş kolektörleriyle depolamak için ara termal enerji depolaması gereklidir. Termal enerji depolaması, enerji arzı ve talebi arasındaki boşluğu etkili bir şekilde azaltır.

Normalde ısı enerji depolama sistemlerinde duyulur ve gizli ısı enerjisi depolaması kullanılmaktadır. Çoğu durumda, bu depolama sistemleri, kısa bir süre için bir enerji

kaynağı olmadığında gerekli ısıtmayı sağlar. Faz değişim malzemesi (FDM) böyle bir zorluğun üstesinden gelmek için depolama malzemelerinden biridir. Faz değişim malzemeleri gibi gizli ısı malzemeleri, yüksek enerji depolama yoğunlukları ve kompaktlıkları için yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Guerraiche vd. [5], termal enerji depolama sistemi entegre edilmiş küçük ölçekli parabolik oluklu güneş kolektörünün performansını incelemek için sayısal ve deneysel araştırmalar sunmaktadır. Bu çalışmada, termal enerjiyi depolamak için faz değişim malzemesini kullanan yeni bir alıcı tasarlanmıştır (Şekil 1.2). Parabolik oluklu bir güneş yoğunlaştırıcı önerilen sistemde faz değişim malzemeli eşmerkezli bir emici tüp kullanılmıştır. Bu tasarımda alıcı, geçici bir ısı depolama bileşeni olarak kabul edilmektedir. Isı depolama-geri kazanım mekanizması, parabolik oluk güneş kolektörünün yoğun ışınım yokken veya kısa süreli bulutlu koşullar için enerji çıkışını stabilize etmesine izin veren bir termal dengeleyici görevi görmektedir.

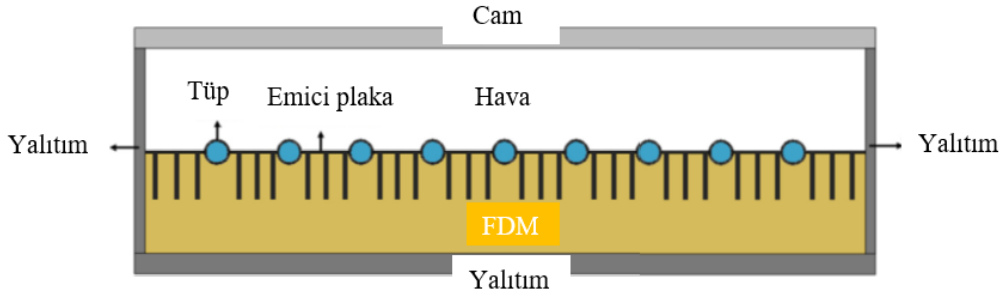


Şekil 1. 2. Parabolik oluklu güneş kolektörü için eş merkezli alıcı tasarımı [5]

Faz değiştiren malzeme (FDM) olarak, emici tüpün dairesel boşluğunu dolduran %60 NaNO_3 ve %40 KNO_3 karışımından oluşan bir ikili tuz kullanılmıştır. Bu sistemde güneş enerjisi ısıya dönüştürülür, faz değişim malzemesinde depolanır ve alıcının iç borusundaki son ısı transfer sıvısı olan soğuk suya deşarj edilir. Faz değişim materyali olan ve olmayan alıcının eşzamanlı testi araştırılmıştır. Tüm sistemin ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli sunulmuş ve sayısal sonuçlar, alıcı tüp içinde faz değiştirme malzemesi ile ya da malzeme olmadan yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Alıcı tüpte faz değiştirme malzemesi kullanılarak elde edilen maksimum çıkış suyu sıcaklığı, 21 Temmuz ve 21 Ekim için basit tüpten yaklaşık %16,80 ve %14,86 daha yüksektir. Parabolik oluklu güneş yoğunlaştırıcının günlük termal verimliliği, faz değiştiren malzeme eşmerkezli tüplü bir alıcı kullanılarak her iki gün için sırasıyla % 6,56 ve 8,32 artış göstermiştir. Faz

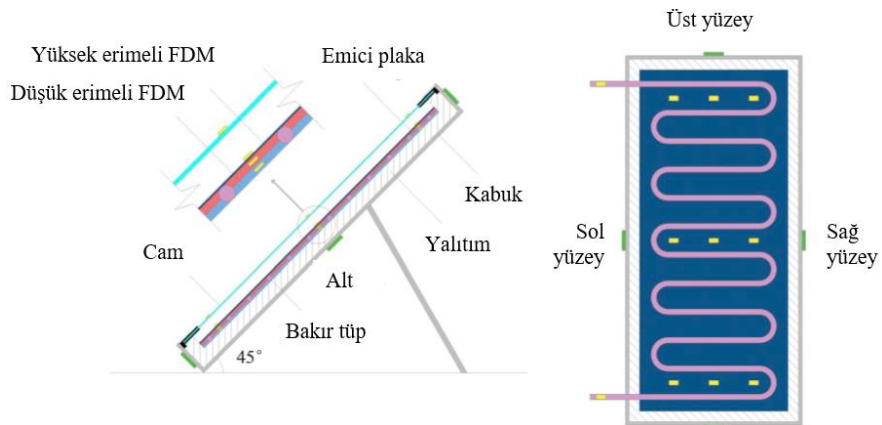
değişim malzemesi, 30°C ve 40°C su giriş sıcaklığı için sırasıyla 2 saat ile 1 saat 40 dakika arasında iyi bir ısı tutma göstermiştir [5].

Badiei vd. [6] bir FDM tabakası ile entegre edilmiş bir düz güneş kolektörünü (Şekil 1.3) incelemek için üç boyutlu zamana bağlı bir HAD modeli geliştirmiştir. Kanatçıklar FDM'ye birleştirilmiş ve ortaya çıkan sıcaklık dağılımları, İran'ın Şiraz kentindeki iki farklı yaz ve kış gününde analiz edilmiştir. Sonuçlar, FDM'li sistemin sabahları daha düşük çıkış sıcaklıklarına sahip olmasına rağmen, akşamları daha uzun sürede sıcak su sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, minimum erime sıcaklığı olan FDM için yaz aylarında ortalama kolektör verimi %33'ten %46'ya çıkmıştır. Ayrıca, kanatçıkların dahil edilmesi, özellikle daha yüksek erime sıcaklıklarına sahip FDM'lerde depolama kapasitesini arttırmıştır.



Şekil 1. 3. Faz değişim malzemesi ile entegre düz plaka güneş kolektörü [6]

Wang vd. [7] güneş kolektörlerinin donma ve aşırı ısınma problemlerinin üstesinden gelmek için, yeni bir çift fazlı değişim malzemesi (FDM) entegreli düz plaka toplayıcı önermiştir (Şekil 1.4). Güneş kolektöründe iki katman FDM bulunmaktadır; bunlardan biri faz değişim sıcaklığı 70°C, diğeri ise faz değişim sıcaklığı 15°C olan faz değişim malzemesidir. Bunlar, kolektör emici plakasının altındaki boşluğa yerleştirilmiştir.

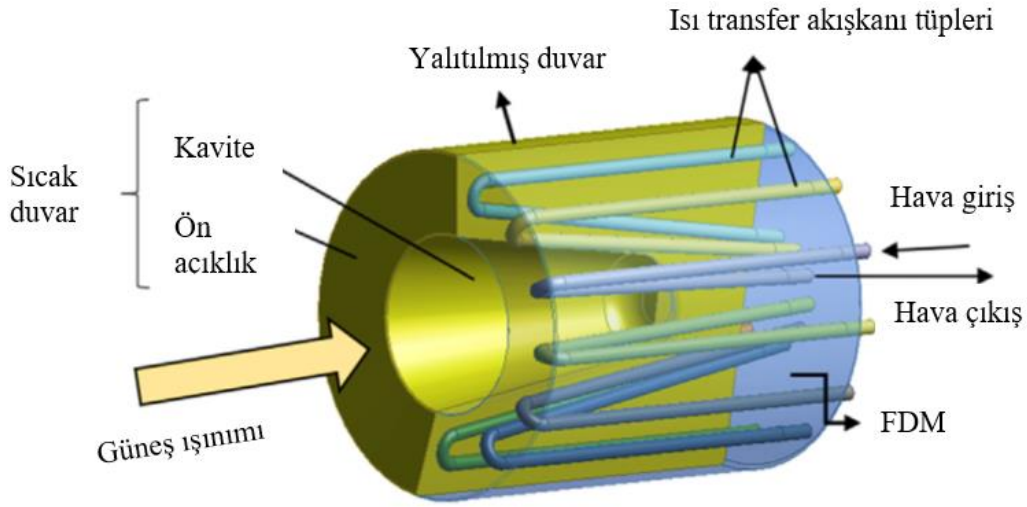


Şekil 1. 4. FDM toplayıcının yapısı ve sensör konumları [7]

Yeni çift fazlı değişim malzemeli güneş kolektörünün donma ve yüksek sıcaklık dayanımı performansı bir laboratuvarında sistematik olarak test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, soğurucu plakanın sıcaklığının 60°C'den 78°C'ye çıkması için geçen sürenin yüksek sıcaklık koşulları altında 1,6 saat uzatılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, düşük erime noktalı FDM, düşük sıcaklık koşullarında ısıyı katılaştırarak ve salarak toplayıcının sıcaklık düşüşünü önemli ölçüde yavaşlatmıştır. Ve emici plakanın sıcaklığının 19°C'den 10°C'ye düşmesi için geçen süre, düşük erime noktalı FDM yüksek erime FDM altına yerleştirildiğinde ve yüksek erime FDM düşük seviyeye getirildiğinde 6,4 saat ve 3,1 saat uzatmıştır. Böylece, çift FDM toplayıcının aşırı ısınma ve donma problemlerinin üstesinden gelmek için kullanılabilmesi görülmüştür. Buna ek olarak, sıradan bir düz plaka toplayıcı ile karşılaştırıldığında, düşük erime noktalı FDM yüksek erime FDM'nin altına ve tam tersi duruma getirilirken, çift FDM toplayıcının verimliliği %24,1 ve %19,6 artmıştır.

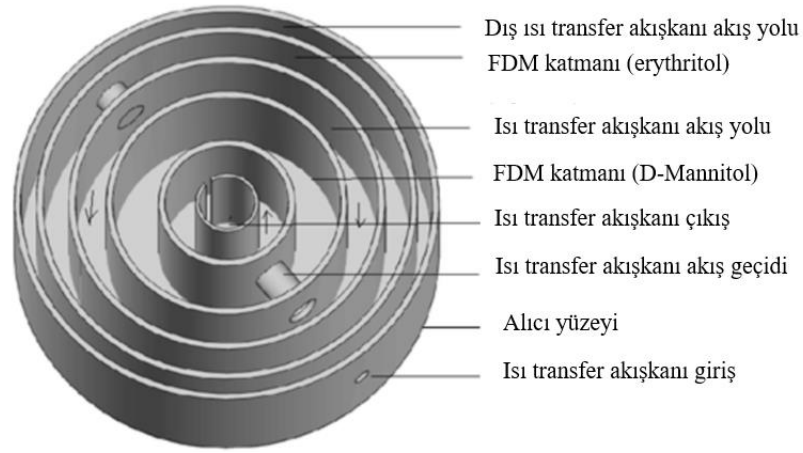
Çanak-Mikro Gaz Türbini (MGT) sistemleri, elektriğe sınırlı erişimi olan kırsal alanlarda etkili bir güç üretimi yöntemi (<100 kW) olabilmektedir. Böyle bir yakıt destekli sistemlerde, MGT'ye giriş termal gücünün stabilitesi önemli bir husustur çünkü MGT, güneş akısının doğal dalgalanmasının neden olduğu sıcaklık değişimlerine karşı hassastır. Bu etkiyi azaltmak için, kısa süreli termal enerji depolaması için Faz Değiştiren Malzeme (FDM) ile entegre yeni bir güneş alıcısı önerilmiştir (Şekil 1.5). Önerilen alıcı, ön yüzünde konik bir boşluk ve FDM içine daldırılmış ısı transfer sıvısı tüpleri ile FDM ile doldurulmuş silindirik şekle sahiptir. Bu makale, MGT'nin gerekli girdi parametrelerine dayanarak önerilen alıcının optimum tasarım noktasının araştırılması ile ilgilidir. Sayısal simülasyonlar, birçok kontrol parametresinin alıcının sıcaklığı, FDM sıvı fraksiyonu, basınç kaybı ve çıkış termal gücü üzerindeki etkisini önceden değerlendirmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen güneş alıcısının sayısal parametrik bir çalışması, ticari yazılım Ansys Fluent 18.2 kullanılarak HAD yöntemleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Alıcı açıklık yüzeyinde 500 kW/m²'lik sabit güneş ışınımı için yüzeyden yüzeye (S2S) radyasyon modeli ile birlikte ışın izleme modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan faktörler arasında yüksek sıcaklık FDM'leri, alıcı boşluk boyutları, güneş akısı, sıcak duvar kalınlığı, boru çapı ve tüp sayısı, tüplerin içindeki basınç düşüşü ve giriş kütle akış hızı bulunmaktadır. Sonuçlar, her değişkenin alıcı çıktı parametreleri üzerindeki önemli etkisini göstermektedir ve bu da optimum tasarım noktasının tanımlanmasına yol açmaktadır. Çalışmanın sonucu, daha ileri

deneyler için alıcı gelişimi için değerli yönergeler sunmaktadır. Her değişkenin alıcı üzerindeki etkisi çalışmada incelenmiştir [8].



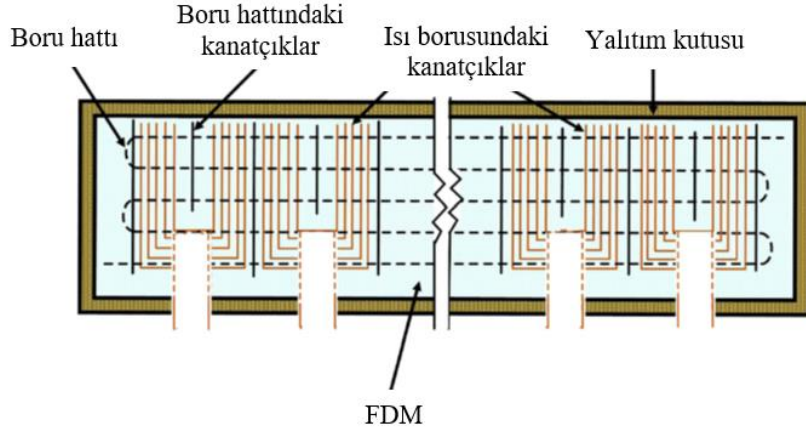
Şekil 1. 5. FDM entegreli güneş alıcısı [8]

Senthil ve Cheralathan [9], bir güneş alıcısının faz değişim malzemeleri kullanarak termal depolama kapasitesinin artırılmasına yönelik deneysel bir araştırma sunmuşlardır (Şekil 1.6). Güneş alıcısının performansını test etmek için 16m^2 'lik bir reflektör açıklık alanına sahip parabolik bir çanak toplayıcı kullanılmıştır. Şeker alkoller; orta erime noktası, yüksek gizli ısı ve orta faz değişim sıcaklığı özellikleri nedeniyle faz değiştirme malzemeleri olarak seçilmiştir. FDM'ler pik ışınımı yakalamak ve güneş enerjisi alıcısındaki sıcaklık dağılımı ve toplama verimliliklerine bağlı olarak ısıyı depolamak için alıcıya ince tabakalar halinde doldurulmuştur. Dış mekan testleri, farklı ısı transfer akışkan debisinde gerçekleştirilmiştir. Güneş alıcısındaki FDM, güneş alıcısının termal tamponlama etkisi nedeniyle güneş radyasyonunun kısa süreli kesilmesi sırasında homojen bir ısı çıkışı sağlamaktadır. Birden fazla FDM'li alıcının ortalama enerji ve ekserji verimliliği, 80 kg/saat ısı transfer akışkan debisi için sırasıyla %66,7 ve %13,8'dir. Güneş alıcısı gün batımından sonra bile termal ihtiyaçları karşılamak için bir termal pil görevi görmektedir.



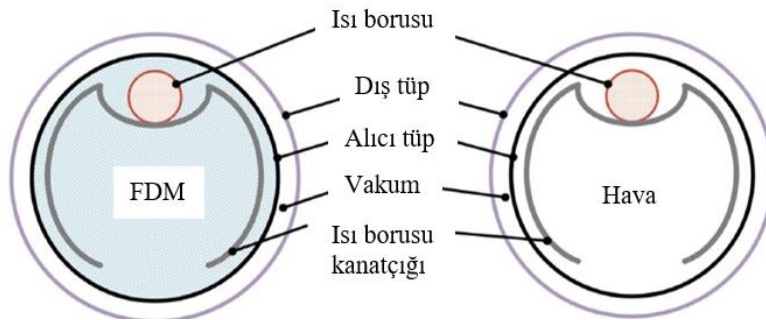
Şekil 1. 6. Çoklu FDM'li güneş alıcısının şematik yerleşimi [9]

Chopra vd. [10], faz değişim malzemesi olarak stearik asit ile entegre yeni bir güneş kolektörünün termal performansını araştırmışlardır (Şekil 1.7). Bu tasarımda, güneş ışınımı, vakumlu tüpler ile ısı borusu ile toplanmış ve daha sonra faz değişim malzemesi ile entegre manifoldda depolanmıştır. Faz değişim malzemesinin depolanan termal enerjisi daha sonra manifoldun içine yerleştirilmiş kanatçıklı bakır boru demetinden akan suya aktarılmaktadır. Geliştirilen sistem farklı debiler ile araştırılmış ve değişken debinin sistemin termal performansı üzerindeki etkisini tartışmıştır. Tasarlanan ve geliştirilen sistemin deneysel araştırması, iki mod için, yani gün ortasında şarj modu ve tam gün şarj modu için gerçekleştirilmiştir. Kütle akış hızları dikkate alındığında, sistemin termal verimliliğinin tam gün şarj modu için yaklaşık %52-62 aralığında değiştiği, gün ortasında şarj modunda ise %55 ila 72 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Her iki mod için faz değiştirme malzemesinin verimliliği yaklaşık %61-64 aralığında değişmiştir. Geliştirilen sistemin yıllık maliyeti ve yıllık yakıt maliyeti geleneksel sistemden çok daha düşüktür. Ayrıca, geliştirilen sistemin ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresinin 6 yıl olduğu görülmüştür. Önerilen sistem, geleneksel vakumlu ısı borulu güneş kolektörü ile ilişkili iki sorunun üstesinden gelmektedir. Bunlar; Isı borusunda meydana gelen aşırı ısınma probleminin ortadan kaldırılması ve faz değişim malzemelerinin düşük ısı iletkenliğidir. Bu yeni manifold tasarımı ile termal tabakalaşmanın güneş kolektörlerinin termal performansı üzerindeki etkisi tamamen ortadan kaldırılabilir [10].



Şekil 1. 7. Faz değişim malzemesi entegre manifold tasarımı [10]

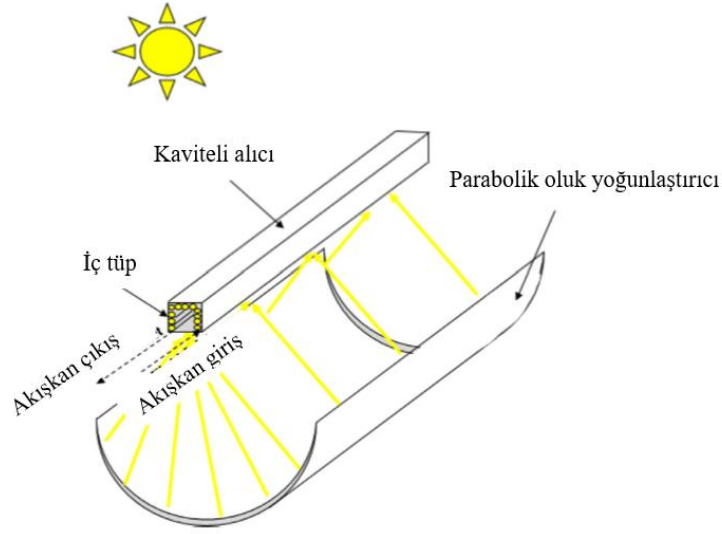
Chopra vd. [11], aynı hava koşullarında su ısıtma uygulaması için faz değiştirme malzemesi olan ve olmayan ısı borusu boşaltılan tüp güneş kolektörü için deneysel bir araştırma sunmuşlardır (Şekil 1.8). Bu çalışmada, aynı hava koşulunda iki sistemin karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Birinci sistemde vakumlu tüpleri faz değişim malzemesi olmadan bırakılmış, ikinci sistemde ise faz değiştirme malzemesi olarak SA-67 ile entegre edilmiştir. Seçilen faz değişim malzemesinin termal ve kimyasal stabilitesini sağlamak için termal çevrim işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar SA-67'nin 1500 termal döngü uygulamasından sonra bile mükemmel kimyasal ve termal kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Tasarlanan sistemlerin termal performansını analiz etmek için deney beş farklı debide (8, 12, 16, 20 ve 24 L/h) gerçekleştirilmiştir. Faz değişim malzemesi olan ve olmayan vakum borulu güneş kolektörünün günlük ısı verimliliği sırasıyla % 42-55 ve % 79-87 arasında değişmiştir.



Şekil 1. 8. Vakumlu borunun (a) FDM'li (b) FDM'siz kesiti [11]

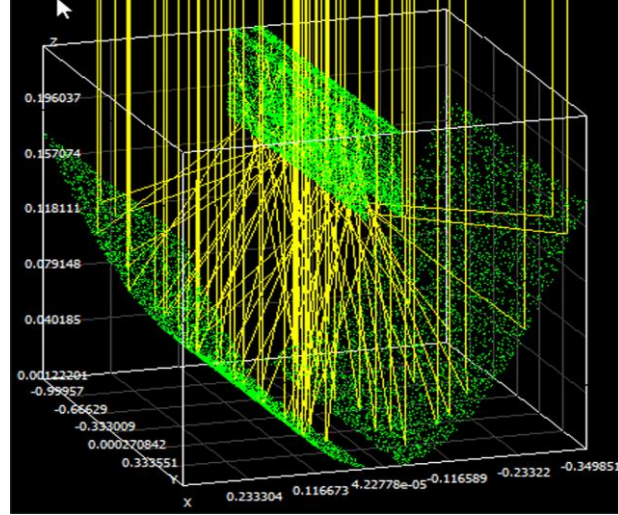
Loni vd. tarafından yapılan çalışmada, kaviteli (boşluklu) alıcılar, çanak tip yoğunlaştırıcılar, fresnel yoğunlaştırıcılar ve nadiren parabolik oluk sistemleri de dahil olmak üzere farklı konsantre güneş kolektörlerinde etkili bir güneş alıcı tipi olarak

tanıtılmaktadır. Özel yapıları nedeniyle kavite alıcıları, geleneksel güneş alıcılarına göre daha yüksek optik verimliliğe sahiptir. Bu alıcılarda; gelen güneş ışını, kavite alıcısının alanı içinde yakalanır ve ayrıca bir kısım kayıp ışınlar, kavite duvarları tarafından ikinci bir aşamada yakalanabilir. Böylece, gelen güneş radyasyonunun çoğunluğu radyasyon ve yeniden radyasyon nedeniyle kavite duvarları tarafından emilir [12]. Şekil 1.9'da dikdörtgen kaviteli borulu alıcılı parabolik oluk kollektör şeması görülmektedir. Güneş kollektörü, maksimum termal verim elde etmek için araştırılmıştır.



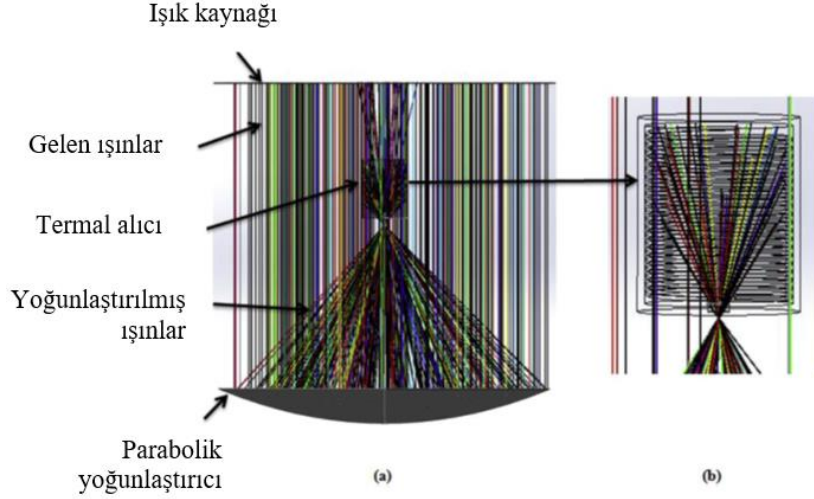
Şekil 1. 9. Dikdörtgen kaviteli borulu alıcılı parabolik oluk kollektör şeması [12]

Termal modelleme Maple yazılımındaki bir kodla yapılırken; PTC, SolTrace yazılımında optik olarak incelenmiştir (Şekil 1.10). Geliştirilen model literatürden elde edilen deneysel verilerle doğrulanmıştır. Kaviteli alıcının farklı geometrik boyutları, kavitenin pozisyonu, boşluk açıklığı, boşluk yüksekliği ve boşluk tüpü çapı dahil olmak üzere duyarlılık analizine dayanılarak araştırılmıştır. Ayrıca, sistem farklı çalışma koşulları için incelenmiştir. Sonuçlara göre, en iyi boşluk derinliği, boşluk açıklığı genişliğine eşittir. Daha yüksek yoğunlaştırıcı açıklığının emilen enerjiyi arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca, boşluğun parabolün odak hattında bulunması gerektiği bulunmuştur. Sistemde absorbe edilen en yüksek ısı güç ve sistemin termal verimliliği, 5 mm boşluklu tüp çapı için sırasıyla 618,09 W ve %77,26'ya eşittir [12].



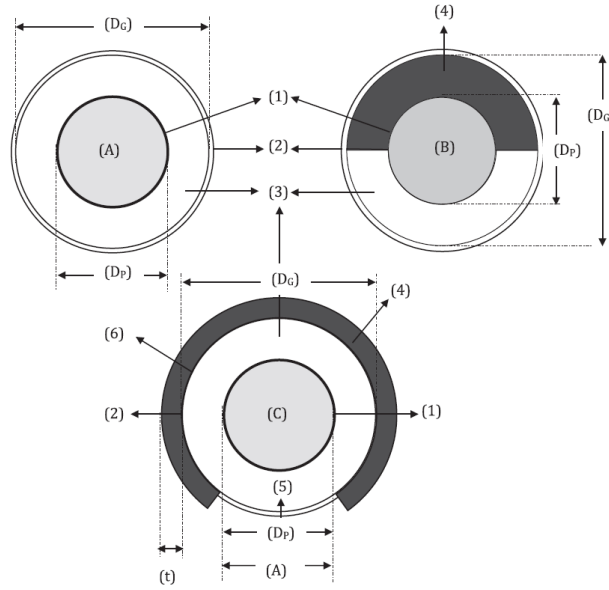
Şekil 1. 10. Kavite alıcılı kollektör için SolTrace'de yapılan bir analiz örneği [12].

Liang vd. [13], parabolik oluk kollektörler için yeni bir hareketli kapaklı bir tür boşluk alıcısı sunmuşlardır (Şekil 1.11). Bu çalışmada hareketli kapağın, boşluk alıcısının ısı kaybını ve aşırı ısınmasını azaltma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Güneş ışınımı yeterince yüksekse, hareketli kapak açılır ve sistem konsantre güneş enerjisini toplar. Hareketli kapak, güneş ışınımı çok düşük olduğunda veya gece ısı kaybını azaltmak için kapatılır. Bu çalışmada, kavite alıcısının termal performansı deneysel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Ortam sıcaklığı, rüzgar hızı, giriş sıcaklığı, toplayıcının dönme açısı ve hareketli kapağın açma-kapama durumunun ısı kaybı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ek olarak, hareketli kapak, güneş ışınımı çok yüksek olduğunda veya sistem ısı kazancını tüketemediğinde aşırı ısınmaya karşı koruma için kullanılabilir. Hareketli kapağı kapatmanın ısı kaybı, kapağın açık olduğu durumdan daha az olmuştur. Isı kaybı azaltma oranı %6,36 ile %13,55 arasında değişmektedir. Bununla birlikte, hareketli kapağı kapatma yöntemi, reflektörün döndürülmesini ve daha sonra güneşin yeniden izlenmesini önlemektedir. Sunulan yeni hareketli kapak, kavite alıcılarının termal performansını önemli ölçüde basit bir şekilde geliştirmiştir.



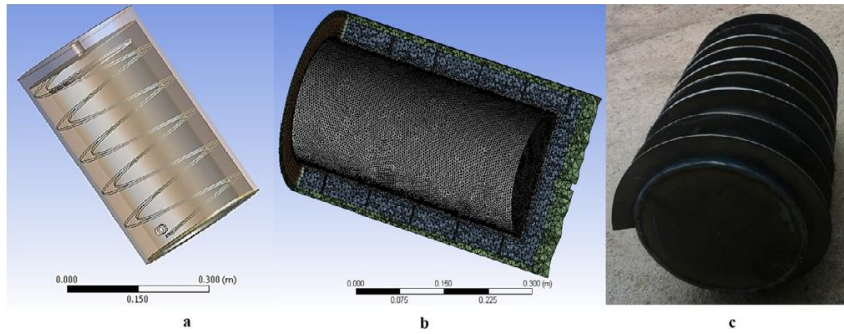
Şekil 1. 13. OptisWorks® simülasyonu (a) Alıcılı parabolik çanak yoğunlaştırıcı ve (b) Silindirik alıcı [14]

Patil vd. [15], daha küçük kenar açlarına sahip parabolik oluk toplayıcılar için alternatif alıcı tasarımları araştırmışlardır. Yarı Yalıtım Dolgulu Alıcı ve Doğrusal Boşluk Alıcı tasarımları incelenmiş ve minimum ısı kaybı için optimize edilmiştir. SCHOTT PTR 70 alıcısının konfigürasyonu bu çalışma için temel durum olarak kabul edilmiştir (Şekil 1.14). Mikroterm hava (0,1 atm basınçta) kombinasyonu için Yarı Yalıtım Dolgulu Alıcı ve Doğrusal Boşluk Alıcı'dan olan ısı kayıpları sırasıyla en az 255 W/m ve 246 W/m'dir. 400°C'nin üzerinde bu iki tasarımın, SCHOTT alıcıdan daha iyi performans göstermiştir. Her iki önerilen alıcı tasarımının daha küçük kenar açısına sahip (yaklaşık 45) parabolik oluk toplayıcılar için vakumlu alıcıların uygun alternatifleri olması beklenmektedir.



Şekil 1. 14. Farklı alıcı tasarımlarının şematik gösterimi (A) Konvansiyonel alıcı (B) Yarı Yalıtım Dolgulu Alıcı (C) Doğrusal Boşluk Alıcısı (1-Emici boru, 2-Cam tüp, 3-Halka şeklindeki boşluk, 4-Yalıtım, 5-Boşluk) [15]

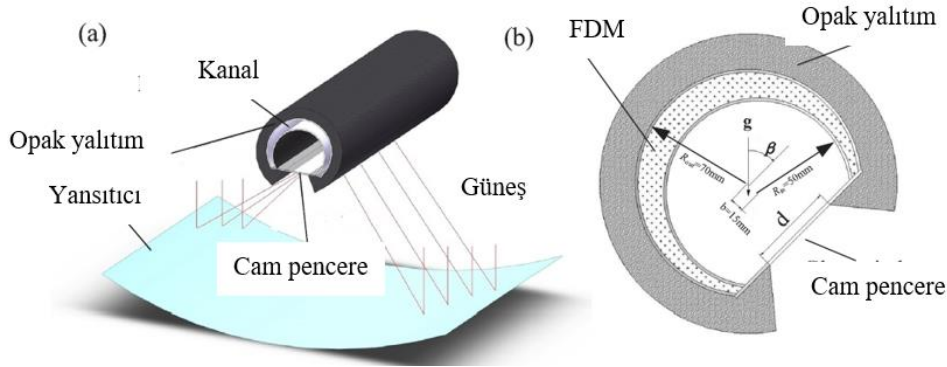
Soltani vd tarafından yapılan çalışmada, bir çanak güneş kollektör sisteminin odak hattına yerleştirilen helisel silindirik boşluklu bir alıcının (Şekil 1.15) termal performansı, ısı deneyleriyle hem teorik olarak hem de termal kayıpların olduğu ve olmadığı durumlar için incelenmiştir. Bu tür sistemlerin optik ve termal modellemesinde kapsamlı bir yöntem önerilmiştir. Optik bölümde, sistem, alıcıdaki gerçek güneş akısı dağılımını incelemek için SolTrace yazılımı ile modellenmiştir. Optik modellemede elde edilen güneş akısı dağılımı sistemin termal modellemesinde kullanılmıştır. Sonuçlar, alıcı açıklık mesafesinin odak uzaklığı oranının termal performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve bazı durumlarda sistemin ısı performansını %65'e kadar artırabildiğini göstermektedir. Alıcı en-boy oranı iki açıdan önemlidir: biri, alıcının iç duvarları arasında absorbe edilen ve değiştirilen güneş enerjisi miktarı üzerindeki etkisi, diğeri ise iç duvarlardan çevreye olan ısı kayıpları üzerindeki etkisi. Optik modellemenin sonuçları, daha büyük alıcı açıklıkları için, maksimum ısı girdisinin daha küçük alıcı en-boy oranlarında elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca termal modellemenin sonuçlarına göre, kaviteye ısı oranı girişinin maksimum olduğunda, maksimum ısı transfer akışkanı çıkış sıcaklığına ulaşılmaktadır. Sistem geometrik yoğunlaştırma oranının, sistemin termal performansı üzerindeki etkisi; daha büyük açıklıklara sahip alıcılar için, boşluğa maksimum miktarda ısı oranı girdisinin daha küçük miktarlarda geometrik konsantrasyon oranlarına ulaşıldığını gösterir. Fakat ısı transfer akışkan sıcaklığının artmasıyla, alıcı iç duvarlarının sıcaklığındaki artış ve dolayısıyla termal kayıplardaki artış nedeniyle sistem termal verimliliğinin azaldığını göstermektedir [16].



Şekil 1. 15. Silindirik boşluk alıcısı, a) ANSYS Design Modeler'da alıcının 3D modeli, b) modelin ANSYS'te mesh görüntüsü c) test edilen alıcının fotoğrafı [16]

Li vd. [17], bu çalışmada parabolik oluk güneş kolektörleri için yeni bir ark şekilli kavite alıcısı önermişlerdir (Şekil 1.16). Eğim açısının, toplama sıcaklığının, yüzey emisyonunun ve açıklık genişliğinin ısı kaybı üzerindeki etkileri, doğal taşınımı yüzey

radyasyonu ile birleştiren iki boyutlu sayısal bir modelle ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar şunları göstermektedir: (1) Doğal konveksiyon ısı kaybı, eğim açısından önemli ölçüde etkilenirken, radyasyon ısı kaybı esas olarak yüzey emisyonundan ve alıcı yüzey sıcaklığından etkilenmektedir. (2) Alıcının açıklık genişliğinin termal performans üzerinde büyük etkisi vardır. Açıklık genişliği büyüdükçe, ısı kayıpları da artar. Bununla birlikte, açıklık genişliği optik performansı ve imalat maliyetini de etkileyebilir. Bu tür doğrusal boşluk alıcısı için makul açıklık genişliği, tüm bu faktörler göz önüne alındığında yaklaşık 50-70 mm'dir. (3) Önerilen doğrusal boşluk alıcısı, özellikle yüksek sıcaklık aralığında, geleneksel vakumlu alıcılarla karşılaştırılabilir düzeyde hatta daha iyi ısıl performans göstermektedir.



Şekil 1. 16. Doğrusal boşluk alıcısının yapısı (a) ve enine kesiti (b) [17]

Jeasingh ve Herbert [18], parabolik oluk kollektörlerde yapısal ve optik performans analizi; optik verimlilik, çalışma sıvısının ısı transferi katsayısı, ısı akısı vb. gibi ana parametrelerin çevresel koşullara dayanacak şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca termal depolama sistemi birçok termal uygulama için bir çalışma ortaya koymuşlardır. Katıdan sıvıya faz değişimi ile gece vakti ve bulutlu günlerde kullanılacak kadar çok enerjiyi depolamak için çalışmalarda bulunmuşlardır.

Faz Değiştiren Maddelerin (FDM) güneş enerjisi sistemlerine entegrasyonuna ilişkin son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalarda; güneş kollektörlerine FDM entegrasyonunun güneş enerjisinden ısı eldesinde süreklilik sağladığı, enerji eldesinde stabilitenin sağlandığı ve bunlara bağlı olarak güneş kollektörlerinin daha uzun sürelerde daha verimli olarak işletildiklerine ilişkin sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir.

Yük gereksinimlerini karşılamak için uygun faz değişim parametrelerine sahip FDM'yi seçmek önemlidir. Faz değişim sıcaklığı, FDM zarfının uygulama etkisini etkileyen en önemli faz değişim parametresi olarak kabul edilebilir. FDM'nin faz değişim sıcaklığı çok yüksekse, FDM'nin güneş radyasyonu ısı kazancı gün boyunca daha düşük

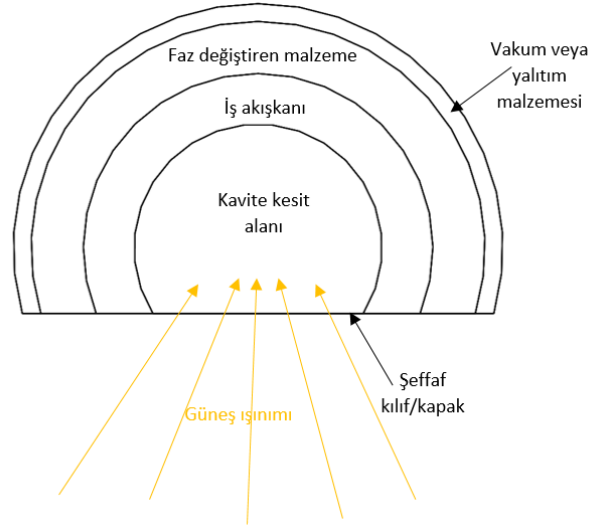
olacaktır. Bu nedenle, FDM'nin uygun bir faz değişim sıcaklığı uygulamaya göre belirlenmelidir. Bunun yanısıra FDM'nin gizli ısı, FDM bulunan bölgenin termal performansını etkileyen önemli bir faktördür. Çoğu FDM, bir sıcaklık noktası yerine bir sıcaklık aralığında faz değişimini gerçekleştirir. Bu, faz değişim sıcaklık aralığıdır. FDM zarfının özellikleri doğrudan faz değişim sıcaklık aralığı ile ilgilidir [19].

Sattari vd. [20] çalışmasında, FDM'nin erime sürecini araştırmak için erime fraksiyonu farklı zamanlarda analiz edilmiştir. Sayısal yaklaşım, sistem içinde yer alan eritme işleminin özelliklerini tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Erimeyi simüle etmek için, hem sıvı hem de katı fazların izotropik, homojen olduğu ve arayüzde termal dengede kaldığı varsayılır.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Yukarıda bahsedilen problemlerin çözümüne yönelik, 2021/013862 no'lu ve 21/08/2024 tarihli patent belgesi yayınlanan 'Faz değiştiren malzeme içeren kaviteli bir güneş alıcısı' başlıklı buluş; işbu Doktora Tezinin kapsamında araştırma konusu olarak belirlenmiştir. Şekil 1.17'de teze konu FDM entegreli şeffaf kılıflı kaviteli alıcının şematik görüntüsü verilmiştir. Buluşun çözümünü amaçladığı teknik problem yoğunlaştırıcı güneş sistemlerinde ışınım kesintilerinde mevcut sıcaklığı stabil hale getirmek için faz değiştiren malzeme içeren, optik kayıpların azaltılması için kaviteli yapıda olan ve ısı kayıpların önlenmesidir. Ayrıca buluş konusu istemler sanayiye uygulanabilir niteliktedir. Bu bağlamda doktora tezleri için gerekli olan; yeni bir bilimsel yöntem geliştirilmesi, bilime yenilik getirilmesi ve bilimin bir yöntemi yeni bir alanda uygulanması kriterlerinden bilime yenilik kriterini sağlamaktadır.

Ayrıca bu çalışma konusu Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (proje no:122M039) kapsamında desteklenmektedir.



Şekil 1. 17. FDM'li kaviteli alıcı

Tez çalışması kapsamında incelenen FDM entegreli, kendinden yalıtımlı kaviteli güneş alıcısının (Şekil 1.17) optimum boyutlarının ve geometrisinin belirlenebilmesi için Yanıt yüzey metodu kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optik analizler neticesinde alıcı için en yüksek optik verimin elde edildiği boyutlar ve geometri elde edilmiş ve ışınım haritası oluşturulmuştur. Alıcının ısıl analizleri ANSYS Fluent'te gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda ilk olarak termal model literatürden doğrulanmış, daha sonra yenilikçi alıcının termal analizleri gerçekleştirilerek FDM'nin alıcı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

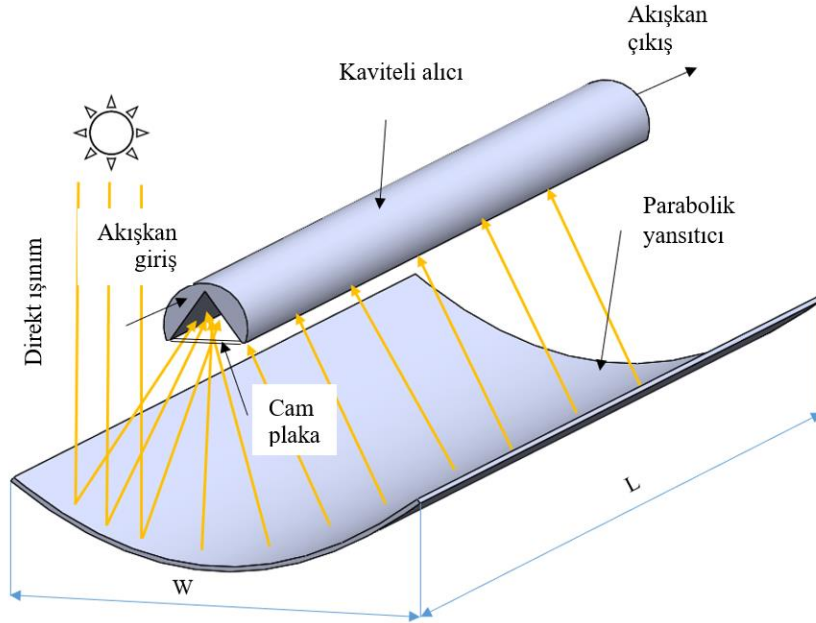
2. KAVİTELİ ALICI TASARIMI VE İŞİNSAL OPTİMİZASYONU

2.1. Kaviteli Güneş Alıcısı Modeli

Parabolik oluklu güneş kolektörünün genel verimliliğinin üst sınırı olan optik verimliliği etkileyen en önemli parametre, güneş ışınımının yoğunlaştığı alıcı tarafından emilen net ısı oranıdır. Bu nedenle optik verimliliği yüksek bir kaviteli güneş alıcısı tasarımı önem kazanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, parabolik oluk kolektörlerde kullanılan kaviteli bir alıcının boyut, konum ve geometri parametrelerinin, kaviteli alıcıda absorbe edilen ısı akısı üzerindeki etkilerinin ve öneminin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, incelenen sistemdeki birçok parametrenin (faktörün) etkilerini aynı anda değerlendirmek ve bunların çıkış parametresi (yanıtı) üzerindeki etkilerini aynı anda incelemek için bir deney tasarımı yaklaşımı (DoE) kullanılmıştır. Kavite alıcı yüzeyine düşen yoğunlaştırılmış ısı akısı, Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Box-Behnken tasarım yöntemi (BBD) ile deney planı oluşturulmuş ve yanıt parametresi olan alıcı yüzeyinde toplanan ısı akısı MCRT yöntemi kullanan SolTrace yazılımı ile elde edilmiştir. Minitab Response Optimizer yardımıyla elde edilen regresyon denklemi çözülerek yanıt parametresini maksimuma çıkaran parametre değerleri elde edilmiştir. Ayrıca incelenen sistem için en yüksek optik verimliliği sağlayan optimum geometri ve buna karşılık gelen boyutlar değerlendirilmiştir.

Boşluklu alıcılar, geleneksel borulu alıcılarla karşılaştırıldığında, daha geniş çalışma sıcaklığı aralıkları, azaltılmış termal ve optik kayıplar, daha yüksek verimlilik ve konsantrasyon oranları gibi çeşitli avantajlara sahiptir [21]. Bu çalışmada, parabolik oluk kolektör sisteminin soğurucusu olan kaviteli güneş alıcısı, optimizasyon metodolojisi ile incelenmiştir. Kaviteli alıcılı parabolik oluk kolektör sisteminin şeması Şekil 2.1'de sunulmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi; parabolik yansıtıcı yüzeye gelen direkt güneş ışınımı, kaviteli alıcı açıklığı üzerinde yoğunlaşır. Yoğunlaştırılmış ışınlar, kavite girişindeki düşük demirli cam plakadan geçer. Düşük demirli cam, güneşten gelen düşük dalga boylu ışınların geçmesine izin verirken, alıcı yüzeyinden yayılan yüksek dalga boylu ışınların geçmesine izin vermez. Bu, radyasyon kayıplarının azaltılmasını sağlar. Düşük demirli cam plakadan geçen ışınlar, kavitenin iç yüzeyleri tarafından emilir ve kaviteli alıcı içinde akan ısı transfer akışkanını ısıtır. Alıcının dış yüzeyi çevreye olan ısı kayıplarını azaltmak için yalıtılmıştır. İncelenen kaviteli alıcısının avantajları aşağıdaki gibidir:

- Kavite ve cam plaka ışı nım kay ıplar ın ın ço ğunu engelledi ğinden ışı nım kay ıplar ın ın azaltılması ve
- Kavite iç yüzeyleri arasındaki çoklu yansımalar yoluyla güneş ışınlarının konsantrasyonunun artırılması.



Şekil 2. 1. Kaviteli bir alıcıya sahip parabolik oluk kolektörün şeması

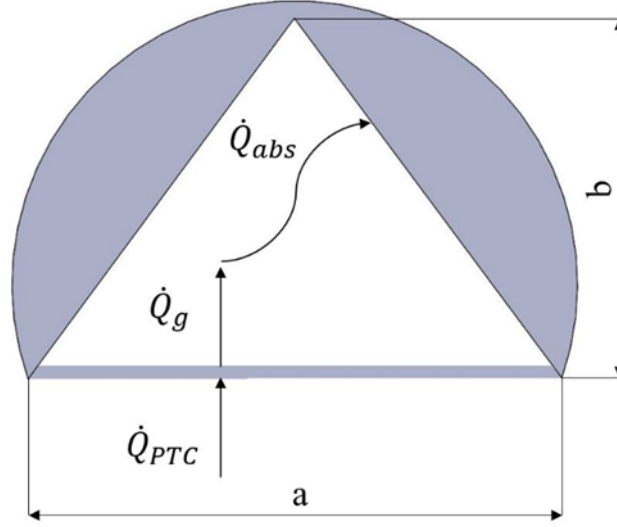
Bu çalışmada incelenen parabolik oluklu güneş kolektörünün boyutları Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Kaviteli alıcı uzunluğu sabit bir parametre ve parabolik kolektör uzunluğuna (L) eşit iken; kavite geometrisi (üçgen, dikdörtgen ve çokgen), kavite açıklığı genişliği (a), kavite yüksekliği (b) ve kaviteli alıcının konumu (h) optimizasyon yöntemi kullanılarak belirtilen değer aralıkları içerisinde değişmektedir.

Tablo 2. 1. Parabolik oluk kolektörün boyutları

Özellik	Değer
Parabolik kolektör uzunluğu (L)	2 m
Parabolik kolektör açıklığı (W)	2 m
Odak uzaklığı (f)	0,5 m
Parabolik kolektörün kenar açısı	90°

2.2. Optik Model

Bu çalışmada incelenen sistemin optik modellemesi, örnek bir kaviteli alıcı geometrisindeki optik denklem ilişkilerine dayanmaktadır. Alıcının şeması ve kaviteli alıcıdan kaynaklanan optik kayıplar Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu bölümde geliştirilen optik modelin ana denklemleri [22] detaylarıyla sunulmuştur.



Şekil 2. 2. Kaviteli alıcının şematik görünümü (örnek geometri)

Parabolik kolektörün optik verimliliği şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{opt} = 100 \cdot \frac{\dot{Q}_{abs}}{I_d \cdot A_C} \quad (2.1)$$

A_C parabolik kolektörün toplam açıklık alanıdır ve boyutları Tablo 3.1'de verilmiştir.

$$A_C = W \cdot L \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_{abs} = Q_{abs} \cdot A_{PTC} \quad (2.3)$$

A_{PTC} parabolik kolektörün gölgelemeyen açıklık alanıdır ve:

$$A_{PTC} = (W - a) \cdot L \quad (2.4)$$

Gölgelemeyen açıklık alanının absorbe ettiği ışınım akısı Q_{abs} (W/m^2) için bir denklem şu şekilde yazılabilir [22]:

$$Q_{abs} = I_d \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot K \quad (2.5)$$

γ kesişim faktörüdür ve yansıyan ışınımın, alıcının absorbe eden yüzeyine gelen ışınım oranı olarak tanımlanır. Bu değer genellikle 0,9'dan büyüktür. Bu çalışmada kesişim faktörü 1,0 olarak alınmıştır. Yani kesişim kayıpları ihmal edilmiştir. Kavite üzerindeki ışınımın normal geliş açısından sapmalarını hesaba katmak için bir geliş açısı

değiştiricisi K kullanılır. Bu çalışmada, geliş ışınım açısından sapmalar ihmal edildiğinden K değeri 1,0 alınmıştır.

Parabolik yoğunlaştırıcıya gelen güneş enerjisi, direkt güneş ışınımına I_d ve parabolik yoğunlaştırıcının gölgelenmeyen açıklık alanına A_{PTC} bağlıdır. Gölgelenmeyen alan ise doğrudan kavite genişliği (a) ile ilişkilidir. Güneş ışınımı (\dot{Q}_s), aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{Q}_s = I_d \cdot A_{PTC} \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6)'da, \dot{Q}_s (W) parabolik oluk kollektörün gölgelenmeyen açıklık alanı tarafından alınan toplam güneş ışınımı olarak tanımlanır. Burada kavite genişliğindeki artışın gölgelenmeyen açıklık alanını, dolayısıyla da yansıtıcı yüzeyden yansyarak alıcı üzerine odaklanan ışınımı azalttığı görüldüğünden kavite genişliğinin tasarım için önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.

Parabolik oluk kollektörden yansıyan toplam ısı akısı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{Q}_{PTC} = \rho \cdot I_d \cdot A_{PTC} \quad (2.7)$$

Cam plakadan geçen ışınım akısı miktarı, camın geçirgenliğine (τ) bağlıdır ve aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\dot{Q}_g = \tau \cdot \dot{Q}_{PTC} \quad (2.8)$$

Kaviteli alıcının iç yüzeyleri tarafından absorbe edilen net ısı akısı:

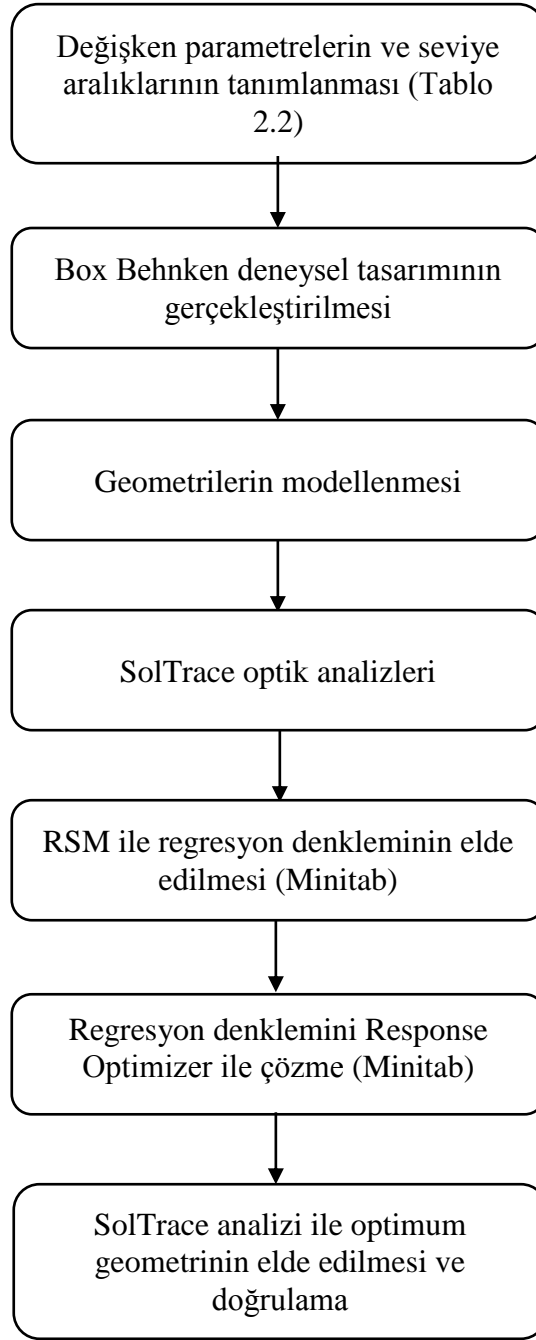
$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \cdot \dot{Q}_g \quad (2.9)$$

I_d direkt güneş ışınımıdır ve bu çalışmada $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ olarak alınmıştır. ρ parametresi, parabolik yansıtıcı yüzeylerin optik karakteristiğine dayalı olarak bu çalışmada 0,95'e eşit olduğu varsayılan kollektörün yansıtma verimliliği olarak tanımlanır.

\dot{Q}_g kaviteli alıcı girişindeki cam plakadan geçen ışınım miktarıdır. Eşitlik (2.8)'de, alıcı girişindeki düşük demirli cam plakanın geçirgenliği 0,95'e eşittir. Kavitenin iç yüzeyleri tarafından absorbe edilen net ışınım \dot{Q}_{abs} , aynı zamanda alıcı yüzey soğurma özelliklerine α 'ya da bağlıdır. Kaviteli alıcının iç yüzeyi, yüksek absorpsiyon oranına (0,94) sahip seçici boya ile kaplanmaktadır. Eşitlik 3.1'de görüldüğü gibi, parabolik oluk kollektör sisteminin optik verimliliği η_{opt} (%), bu modelleme yaklaşımında parabolik oluk yoğunlaştırıcı boyutları ve optik özellikler sabit olduğundan, kaviteli alıcının iç yüzeyleri tarafından absorbe edilen net ışınım miktarına, \dot{Q}_{abs} , bağlıdır.

2.3. Optimizasyon Metodu

Kaviteli alıcıların geliştirilmesindeki temel zorluk, geometrik özelliklerinin optimize edilmesine yönelik çalışmalarda, kollektör sisteminin termal ve optik özelliklerinin yüksek derecede birbirine bağlı olmasıdır [21]. Bu nedenle kaviteli alıcıların geometrisi ve boyutlandırılması parabolik oluk kollektör verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir ve aynı anda incelenmesi gerekir. Bunu yapmanın en etkili yolu, tüm parametreleri araştırmak için bir optimizasyon yöntemi kullanmaktır. Bu amaçla, sonucu optimize eden faktörlerin belirlenmesi için ilk olarak Deney Tasarımı (DoE) yaklaşımı benimsenmiştir. DoE, bir süreçteki yanıtı etkileyen parametrelerin etkisini bulmak için matematiksel ve istatistiksel tekniklerin toplanmasına yönelik bir metodolojidir [23]. Böylece deney sayısının, maliyetin ve zamanın azaltılması amaçlanmaktadır [24]. Bu çalışmada, tüm deneysel tasarım ve optimizasyon çözümleri Minitab V.19 adlı bir yazılım kullanılarak ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Kullanılan optimizasyon prosedürünün akış şeması Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2. 3. Optimizasyon prosedürü için akış şeması

Değişkenleri ve seviyelerini tanımlamak, Yanıt Yüzey Metodolojisinin (RSM) ilk adımıdır. RSM, yanıt yüzeylerinin tasarımı ve analizi için matematiksel ve istatistiksel araçları içermektedir [25]. Bu optimizasyon yöntemi, farklı değişken parametrelerden etkilenen en uygun yanıtı bulmak için bir dizi deney kullanır. RSM, faktörler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi değerlendiren matematiksel ve istatistiksel bir optimizasyon aracıdır. RSM, sınırlı sayıda numune noktasıyla güvenilir sonuçlar sağlar ve farklı deney tasarımları sunar. Box Behnken deney tasarımı (BBD), faktörler arasındaki etkileşimi değerlendirmek

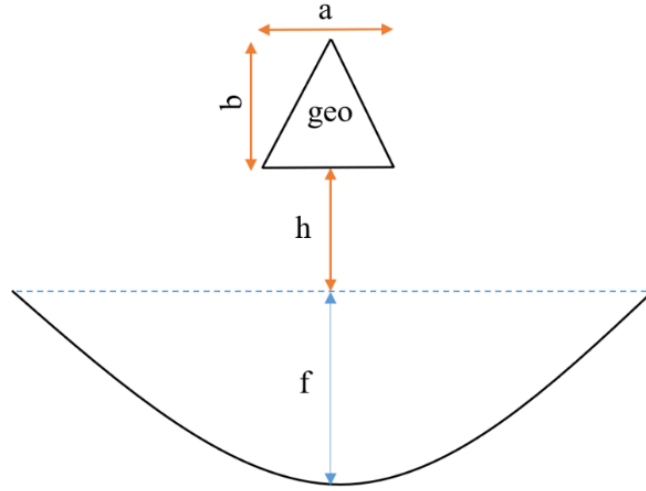
için uygundur. Üç seviyeli faktörleri incelemek için uygundur. Bu tasarım en az sayıda deneysel çalışma gerektirir [26]. Parametreler ve seviyeler tanımlandıktan sonra Box-Behnken tasarımı kullanılarak bir deney tasarımı kurgusu oluşturulmuştur. Tüm model geometrileri SolTrace'te modellenmiş ve analiz edilmiştir. Minitab yazılımı kullanılarak bir regresyon denklemi elde edilmiştir. Minitab Response Optimizer ile regresyon denklemi çözüldükten sonra optimum geometri elde edilmiştir.

Eşitlik (2.10)'da; Y, tahmin edilen yanıt denklemdir [27]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (2.10)$$

β_0 ofset terimi, β_i doğrusal etki, β_{ij} ikinci dereceden etkisi ve β_{ii} ise parametrelerin birbirleri ile olan etkileşim etkisini tanımlamaktadır.

Bu çalışmada incelenen sistemin parametreleri (faktörleri) Şekil 2.4'te gösterilmektedir. 4 parametre vardır: h: kaviteli alıcının odak noktasına olan mesafesi, a: kavite genişliği, b: kavite yüksekliği ve geo: kaviteli alıcının geometrisi.



Şekil 2. 4. Kaviteli alıcılı parabolik oluk tür kollektörün optimizasyon parametreleri

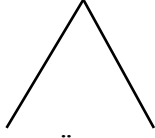

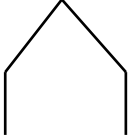
Parabolik oluk tür güneş kollektör sisteminin toplam verimliliği, optik verim ile ısı veriminin çarpılmasıyla bulunur. Eşitlik 2.1'e göre optik verim, alıcıda emilen ışınım miktarının, parabolik kollektöre düşen direkt ışınımına oranıdır. Bu çalışmada parabolik oluk kollektör boyutları sabit olup değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Dolayısıyla parabolik kollektör açıklık alanı üzerinde toplanan toplam ışınım oranı ($I_d \cdot A_C$), 4000 W olarak sabittir. Alıcının iç duvarlarında absorbe edilen ve optik verimliliği etkileyen ışınım miktarı (\dot{Q}_{abs}), yanıt parametresi "Y" olarak seçilmiştir. Dört bağımsız değişken geo, h, a,

b ile Eşitlik (2.10) yeniden düzenlendiğinde aşağıda verilen ikinci dereceden bir polinom denklem elde edilmektedir.

$$Y(\dot{Q}_{abs}) = \beta_0 + \beta_1(\text{geo}) + \beta_2(h) + \beta_3(a) + \beta_4(b) + \beta_{11}(\text{geo}^2) + \beta_{22}(h^2) + \beta_{33}(a^2) + \beta_{44}(b^2) + \beta_{12}(\text{geo})(h) + \beta_{13}(\text{geo})(a) + \beta_{14}(\text{geo})(b) + \beta_{23}(h)(a) + \beta_{24}(h)(b) + \beta_{34}(a)(b) \quad (2.11)$$

Faktörlerin seviyeleri ve derece değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Tablo 2.2'de görüldüğü gibi kavite şekli parametresi 'geo' faktörü için üç farklı geometri oluşturulmuştur: üçgen, dikdörtgen ve 4 kenarlı çokgen. Burada çokgen geometride dik plakaların uzunluğu kavite yüksekliğinin (b) yarısı kadardır. Kavite alıcısının girişindeki cam plaka referans olarak alınır, bu cam plakanın parabolik kollektörün odak noktasına (h=0,0 m) uzaklığı h parametresidir (Şekil 2.4).

Tablo 2. 2. Faktörlerin seviyeleri ve derece değerleri

Faktör	Birinci derece (-1)	İkinci derece (0)	Üçüncü derece (1)
geo	 Üçgen	Dikdörtgen 	 Çokgen
h	0,00 m (odak noktasında)	0,05 m	0,10 m
a	0,025 m	0,0375 m	0,050 m
b	0,025 m	0,0375 m	0,050 m

Box Behnken deneysel tasarım yöntemi, 4 parametre ve 3 seviye için 27 adet deney planı vermiştir. SolTrace optik analizlerinde güneş ışınımı her simülasyonda yazılım tarafından rastgele verildiğinden her deney geometrisi için 3 tekrar yapılmıştır. Sonuçta 4 parametrelili, 3 seviyeli ve 3 yinelemeli toplam 81 deney planı ortaya çıkmıştır.

2.4. Optik Model Doğrulama

Optik modeli doğrulamak için Sandia'da test edilen LS-2 parabolik oluk kollektör sistemi [29] kullanılmıştır. Alıcı yüzeyinde meydana gelen ışınım dağılımı (ışınım haritası) SolTrace ile elde edilmiştir. LS-2 sistemine ait sistem parametreleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

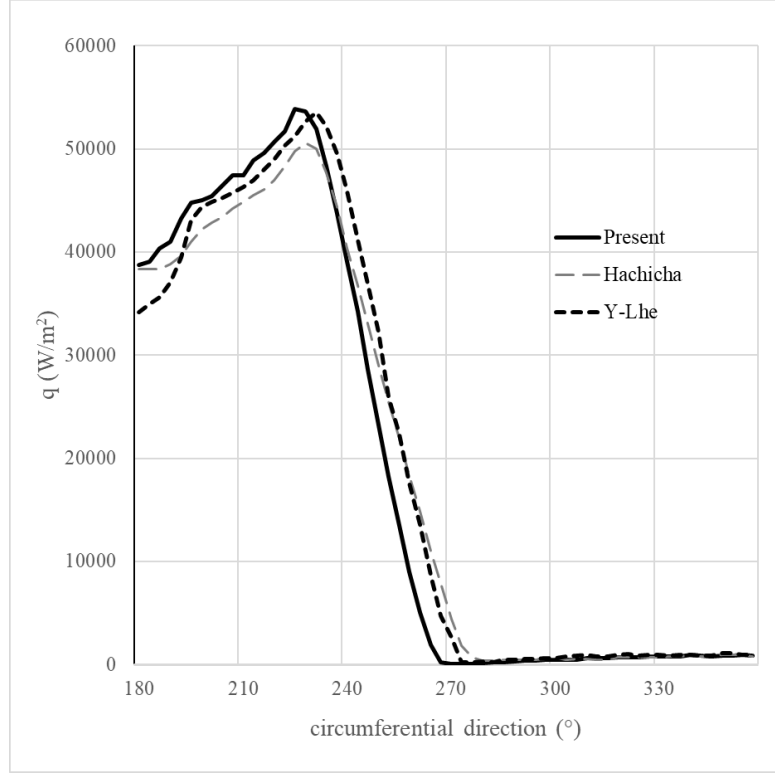
Yarım açı genişliği 4,65 mrad olan, düzgün bir dağılım varsayımı olan bir Pillbox güneş şekli seçilmiştir. Pillbox yaklaşımı optik analizler için yeterlidir [28]. Bu, tüm güneş ışını ışınımının güneş diski tarafından sarıldığı bir yaklaşım modelidir. Alıcı yüzeyinin yansıma değeri 0,04'tür. Optik özelliklerin sıcaklıktan ve açıdan bağımsız olduğu varsayılmıştır. Analizde bu değerler sabit olarak kabul edilmiştir. Bu analizde optik hatalar ihmal edilmiş olup, direkt normal ışınım değeri, testlerde ölçülen $933,7 \text{ W/m}^2$ olarak alınmıştır.

Tablo 2. 3. LS-2 parabolik oluk kollektör sistemi özellikleri [29]

Parametre	Değeri
Alıcı uzunluğu (L)	7,8 m
Kollektör açıklığı (W)	5,0 m
Odak uzaklığı (f)	1,84 m
Alıcı iç çapı	0,066 m
Alıcı dış çapı	0,070 m
Cam iç çapı	0,109 m
Cam dış çapı	0,115 m
Alıcı absorpsiyon oranı (α)	0,96
Cam geçirgenlik oranı (τ)	0,95
Parabolik kollektör yansıtıcılık oranı (ρ)	0,93
Güneş geliş açısı (θ)	$0,0^\circ$
Direkt ışınım (I_d)	$933,7 \text{ W/m}^2$

Cam tüpün kalınlığı çok küçük olduğundan camdan geçen ışınların yön değişimi Snell kanununa göre ihmal edilmiştir [30]. Bu nedenle camın kırılma indisi dikkate alınmamıştır. Sistemde camın kırılma indisi dikkate alınmadığı için camın sadece dış çapı modellenmiştir.

SolTrace'in sonuçları literatürdeki iki farklı çalışmayla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.5). Problem simetrik olduğundan sonuçlar alıcının yarısı için gösterilmektedir. Şekil 2.5'te, eğriler karşılaştırmalı sonuçlar ile aynı eğilimi göstermektedir. Maksimum ve minimum değerlerin de çok yakın olması mevcut modelin güvenilir olduğunu doğrulamaktadır.



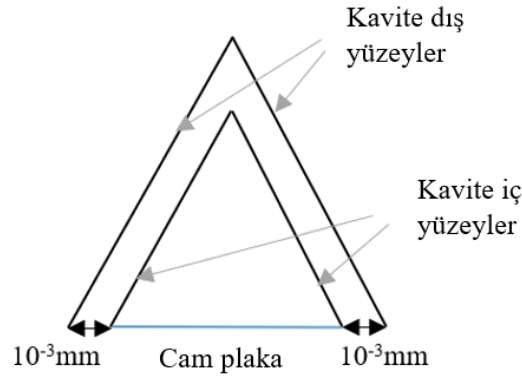
Şekil 2. 5. LS-2 alıcı etrafındaki ısı akısı dağılımı. Literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma [30]

2.5. Optik Analizler ve Sonuçlar

Konsantre toplayıcıların optik analizi genellikle ışın izleme yöntemleriyle gerçekleştirilir. Bu, çok sayıda gelen radyasyon ışınının optik sistem boyunca izlediği yolları takip etme işlemidir. Işınlardan ilgililenen yüzey üzerindeki dağılımını belirlemek için kırılan ve yansıtan yüzeyler kümesini içerir [22]. Monte-Carlo ışın izleme yöntemi (MCRT) özellikle yapısal geometriler için en çok kullanılan yöntemdir [31]. Bu çalışmada optik sistemlerin araştırılmasında açık kaynaklı sayısal ışın izleme yazılımı olan SolTrace kullanılmıştır. SolTrace, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) uygulamalarında kullanılan optik sistemleri modellemek için tasarlanmış bir optik simülasyon aracıdır [28].

Bu çalışmada, kaviteli alıcı iç yüzeyinde absorbe edilen ışınım miktarını maksimuma çıkaran geometri ve boyutları araştırılmıştır. Kaviteli alıcı modelinde belirtilen ısı transfer akışkanının aktığı kesitin boyutu bu çalışmanın konusu değildir. Alıcı duvarlarının birbiri arasındaki ve alıcı ile kolektör arasındaki yeniden ışınım da dahil olmak üzere tüm etkileşimler dikkate alınmıştır. Bu nedenle güneş parabolik kolektör-alıcı sisteminin tamamı tek bir ortam olarak düşünülmüş ve SolTrace analizleri 'tek aşamada' (one stage) gerçekleştirilmiştir. Ancak alıcının dış yüzeyi mevcut tasarımda izolasyonla kaplı olduğundan alıcının üst yüzeylerine gelen ışınım dikkate alınmamalıdır. Bu nedenle her bir alıcının geometrisi şeklinde, kaviteli iç yüzeylerin 10^{-3} mm dışarıya doğru

kopyalanmasıyla alıcının dış yüzeyleri oluşturulmuştur (Şekil 2.6). Kavite iç yüzeyi ile dış yüzey arasındaki mesafe o kadar küçük seçilmiştir ki (10^{-3} mm), kavite dış yüzeylerinin genişliğinin izdüşüm alanının parabolik yansıtıcı yüzeye düşmesi sonucu oluşan gölge ihmal edilebilecek kadar azdır. Parabolik yansıtıcı kollektör üzerindeki gölge, alıcı boşluğu açıklığından ve güneş ışınımına maruz kalmayan alanlardan kaynaklanmıştır. Dış yüzeylere gelen radyasyon %100 absorbe edilmektedir. Bu sayede dış katmandan parabole yeniden yansıma olmadığından aralarında herhangi bir etkileşim oluşmamıştır. Bu nedenle alıcının iç yüzeylerinin absorbe ettiği radyasyon miktarını etkilememektedir.



Şekil 2. 6. Kaviteli alıcının optik modeli (örnek geometri)

Optik analizler SolTrace 2012.7.9 sürümünde yapılmıştır. Analizde istenilen ışın kesişme sayısı 10^6 , üretilen güneş ışınlarının maksimum sayısı ise 10^9 olarak seçilerek yüksek doğruluk sağlanmıştır. Analizlerde direkt güneş ışınım değeri 1000 W/m^2 olarak alınmıştır. Optik hatalar ihmal edilmiştir. Güneş şekli Pillbox ve açı aralığı 4,65 mrad'dır. SolTrace analizleri 'tek aşamalı' olarak gerçekleştirildiğinden, alıcı ve yansıtıcı arasındaki gölgeli alanlar ve yeniden yansımalar dahil tüm etkileşimler dikkate alınmıştır. Parabolik yansıtıcı ve alıcının tüm optik özellikleri Tablo 2.4'te sunulmaktadır.

Tablo 2. 4. Kollektör sisteminin optik özellikleri

Parametre	Değeri
Parabolik kollektör yansıtıcılık oranı (ρ)	0,95
Kavite iç yüzey absorpsiyon oranı (α)	0,94
Kavite dış yüzey absorpsiyon oranı	1,00
Cam geçirgenlik oranı (τ)	0,95
Direkt ışınım (I_d)	1000 W/m^2

Tüm girdi faktörlerinin (geo, h, a, b) çıktı faktörü (\dot{Q}_{abs}) üzerindeki birleşik etkilerini aynı anda incelemek için kapsamlı bir performans analizi yapılmıştır. Bu amaçla kavite geometrisi (üçgen, dikdörtgen ve çokgen), kavite açıklık genişliği (a), kavite yüksekliği (b) ve kavite alıcısının konumu (h), DoE yaklaşımına dayanan RSM optimizasyonu kullanılarak incelenmiştir. Box-Behnken tasarımı kullanılarak deneysel bir tasarım oluşturulmuştur ve tüm SolTrace optik sonuçları Tablo 2.5'te verilmiştir. Kaviteli alıcıda absorbe edilen ışınım miktarı, \dot{Q}_{abs} , (SolTrace yazılımının çıktısı) ve optik verimlilik, η_{opt} , (Eşitlik 2.1'den hesaplanan) sonuçları tabloda açıkça görülmektedir.

Tablo 2. 5. Faktör seviyeleri ve sonuçları (\dot{Q}_{abs} ve η_{opt})

geo	h	a	b	\dot{Q}_{abs}	η_{opt}	geo	h	a	b	\dot{Q}_{abs}	η_{opt}
-1	0	0	1	585,97	14,65	1	-1	0	0	3191,23	79,78
0	-1	0	-1	3181,85	79,55	-1	-1	0	0	3136,21	78,41
-1	1	0	0	266,82	6,67	-1	-1	0	0	3126,67	78,17
0	-1	-1	0	3098,94	77,47	0	-1	0	-1	3186,59	79,66
0	1	0	1	261,69	6,54	1	0	1	0	747,94	18,70
0	-1	0	1	3202,28	80,06	-1	0	1	0	745,28	18,63
0	1	-1	0	175,40	4,39	-1	1	0	0	267,38	6,68
1	-1	0	0	3185,66	79,64	0	0	0	0	575,15	14,38
0	0	-1	1	391,74	9,79	1	1	0	0	266,57	6,66
0	0	1	1	747,16	18,68	0	0	0	0	571,37	14,28
1	0	0	1	584,24	14,61	0	1	0	-1	259,33	6,48
1	0	-1	0	398,18	9,95	-1	1	0	0	269,12	6,73
1	0	0	1	585,99	14,65	-1	0	0	-1	583,20	14,58
0	1	0	-1	257,06	6,43	0	1	-1	0	174,49	4,36
1	0	0	-1	570,32	14,26	0	1	1	0	342,20	8,56
1	-1	0	0	3186,99	79,67	-1	0	0	-1	581,18	14,53
0	1	0	1	261,89	6,55	0	-1	1	0	3235,36	80,88
0	0	0	0	573,52	14,34	0	0	1	-1	740,36	18,51
0	0	1	-1	741,15	18,53	0	0	0	0	573,99	14,35
-1	0	-1	0	399,51	9,99	1	0	0	-1	571,14	14,28
1	1	0	0	267,77	6,69	1	1	0	0	268,17	6,70
0	0	0	0	571,13	14,28	0	0	1	1	746,72	18,67
0	1	-1	0	173,45	4,34	-1	0	0	-1	580,91	14,52
-1	0	1	0	745,14	18,63	1	0	-1	0	400,42	10,01
0	0	-1	1	391,36	9,78	1	0	0	-1	570,08	14,25
0	0	1	-1	738,32	18,46	0	-1	1	0	3234,38	80,86
0	-1	0	1	3207,63	80,19	0	-1	1	0	3236,00	80,90
-1	0	0	1	584,79	14,62	0	1	1	0	341,94	8,55
0	-1	0	-1	3180,93	79,52	0	1	0	-1	256,60	6,42
0	0	1	1	747,25	18,68	1	0	1	0	748,42	18,71
0	0	0	0	570,64	14,27	0	1	1	0	343,14	8,58
-1	0	0	1	586,69	14,67	0	0	-1	-1	387,99	9,70
1	0	1	0	746,26	18,66	0	0	-1	-1	387,22	9,68
1	0	-1	0	397,02	9,93	-1	0	1	0	745,73	18,64
0	-1	-1	0	3095,06	77,38	-1	-1	0	0	3123,38	78,08
-1	0	-1	0	398,98	9,97	0	-1	-1	0	3101,02	77,53
0	0	-1	1	390,72	9,77	1	0	0	1	587,41	14,69
-1	0	-1	0	399,82	10,00	0	0	0	0	570,91	14,27
0	1	0	1	260,57	6,51	0	-1	0	1	3205,87	80,15
0	0	0	0	572,02	14,30	0	0	-1	-1	388,40	9,71
0	0	0	0	571,17	14,28						

Minitab kullanılarak elde edilen \hat{Q}_{abs} için regresyon denklemi Y aşağıda verilmiştir.

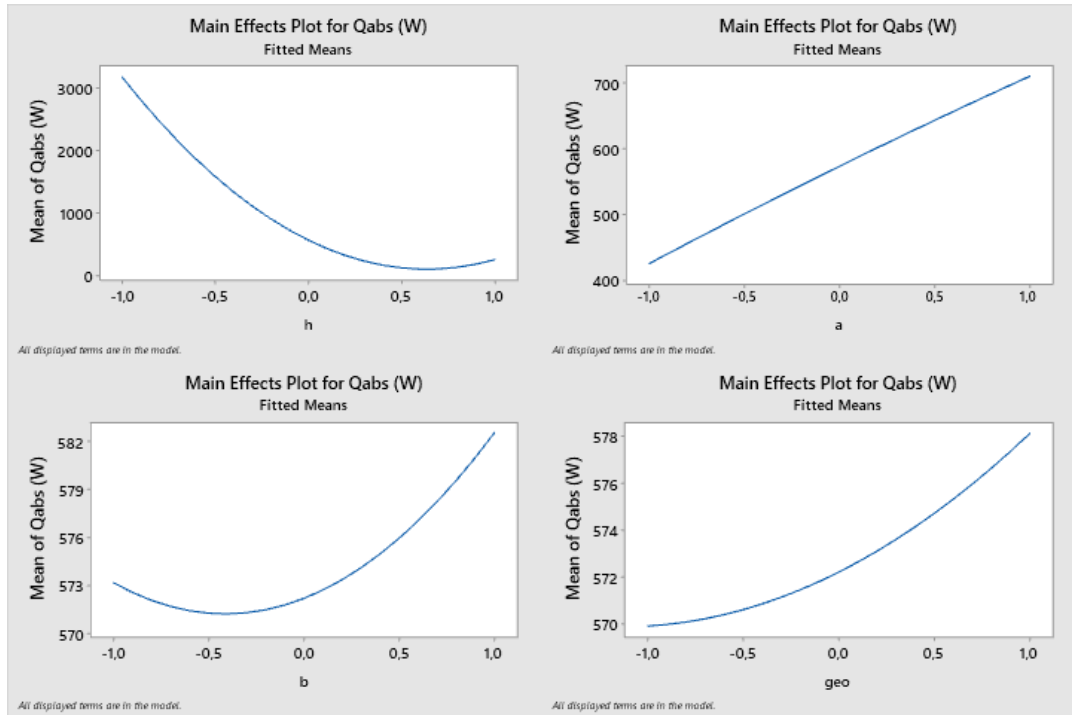
$$\begin{aligned} \hat{Q}_{abs}(W) = & 572.7 + 4.08geo - 1455.62h(m) + 142.31a(m) + 4.65b(m) \\ & + 1.80geo^2 + 1144.68h^2(m^2) - 5.62a^2(m^2) + 5.63b^2(m^2) \\ & - 14.9geo * h(m) + 0.8geo * a(m) + 2.8geo * b(m) \\ & + 7.8h * a(m^2) - 4.6h * b(m^2) + +0.9a * b(m^2) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Parametrelerin her bir katsayısı incelenirse, katsayı ne kadar büyük olursa yanıt parametresinin denklemini de o kadar etkilediği sonucuna varılır. Parametrelerin etkilerini incelemenin bir başka yolu da “P” değeridir. Tablo 2.6'da tüm faktörlerin p değerleri doğrusal, ikinci dereceden ve ikili etkileşimler halinde verilmiştir.

Tablo 2. 6. Varyans analizi

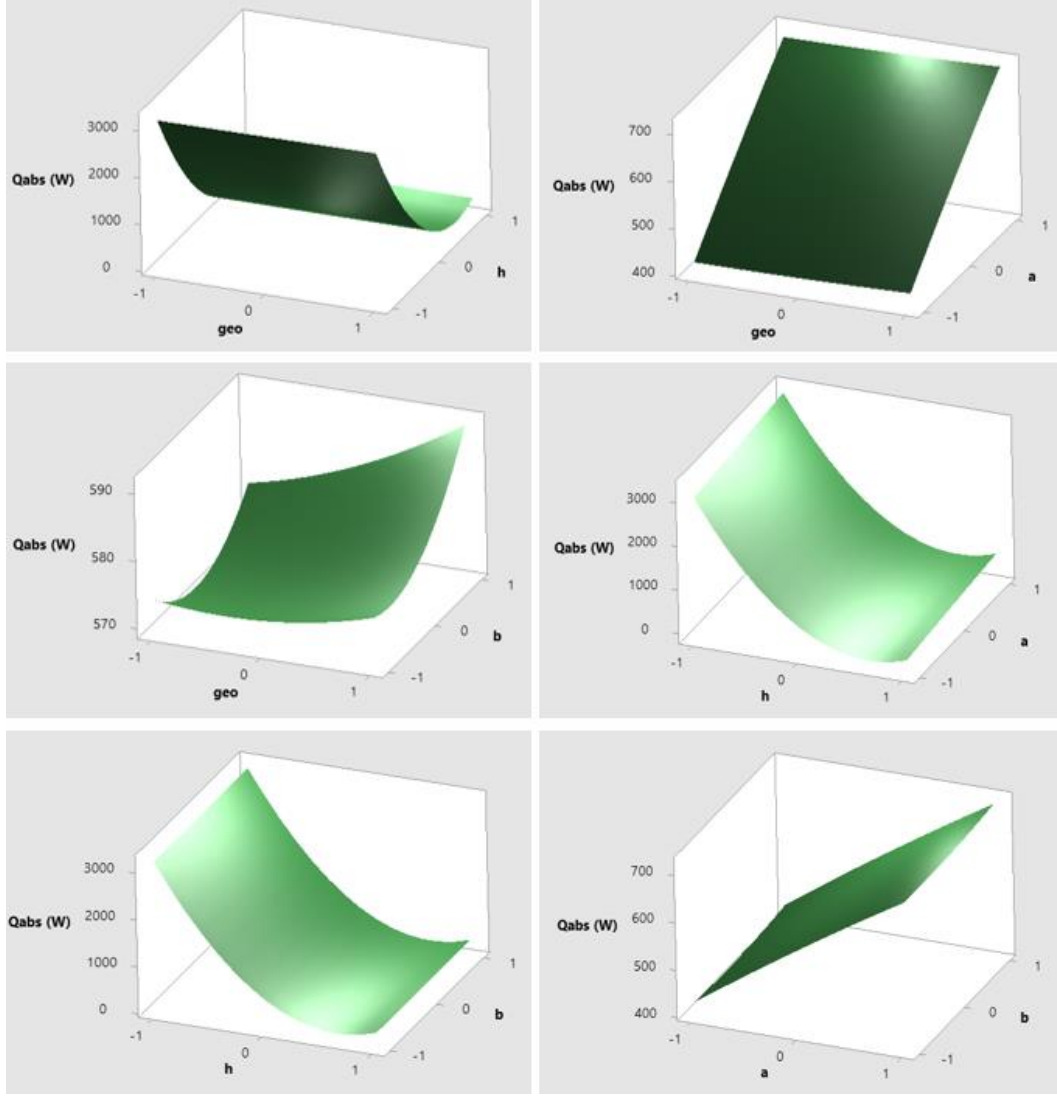
	P-Değeri
Model	0,000
Linear	0,000
geo	0,498
h	0,000
a	0,000
b	0,441
Square	0,000
geo*geo	0,842
h*h	0,000
a*a	0,534
b*b	0,533
2-Way Interaction	0,819
geo*h	0,157
geo*a	0,942
geo*b	0,786
h*a	0,457
h*b	0,659
a*b	0,929

P değeri, hipotezi değerlendirmek için anlamlılık düzeyidir. Yanıt ile modeldeki her bir terim arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığına ilişkin bir karşılaştırma sağlar. Genellikle 0,05'e eşit veya daha küçük değer, iyi sonuç verir [27]. Tablo 2.6'da görüldüğü gibi, \dot{Q}_{abs} yanıtı, kaviteli alıcının konumundan (h) 0,000 “P” değeriyle önemli ölçüde etkilenmiştir. Yanıtın ayrıca, 0,000 “P” değeriyle kavite açıklığı genişliğinin (a) doğrusal teriminden ve 0,000 “P” değeriyle kaviteli alıcının konumunun ikinci dereceden teriminden (h*h) de etkilendiği görülmektedir. Yanıt denklemini en az etkileyen parametrenin geo olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, kavite girişinde kullanılan düşük demirli cam ve kavite iç duvarlarında kullanılan absorpsiyon oranı yüksek seçici yüzey boyasıdır. Kavite duvarlarındaki seçici yüzey boyanın absorpsiyonu yüksek ve yansıması düşük olduğundan, kavitenin iç duvarlarından yeniden radyasyon gelme olasılığı düşüktür. Ayrıca cam plakanın özelliği sebebiyle, cam plakadan kaynaklanan kayıplar düşüktür. \dot{Q}_{abs} için tüm parametrelerin ana etki grafiği Şekil 2.7'de verilmiştir.



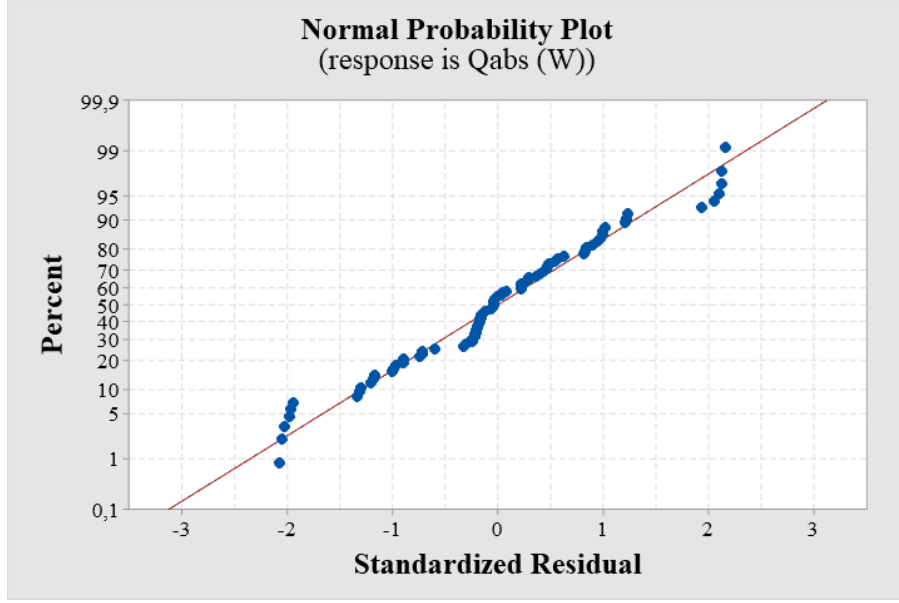
Şekil 2. 7. \dot{Q}_{abs} için tüm parametrelerin etkileri

İkili etkileşimlerin etkisini gösteren grafikler, üçüncü faktör sabit tutulduğundan farklı davranışlara sahiptir (Şekil 2.8). h baskın faktördür ve değeri değiştiğinde diğer parametreler de onunla aynı trendde değişmektedir. a ve b birlikte arttığında \dot{Q}_{abs} 'nin arttığı görülmektedir.



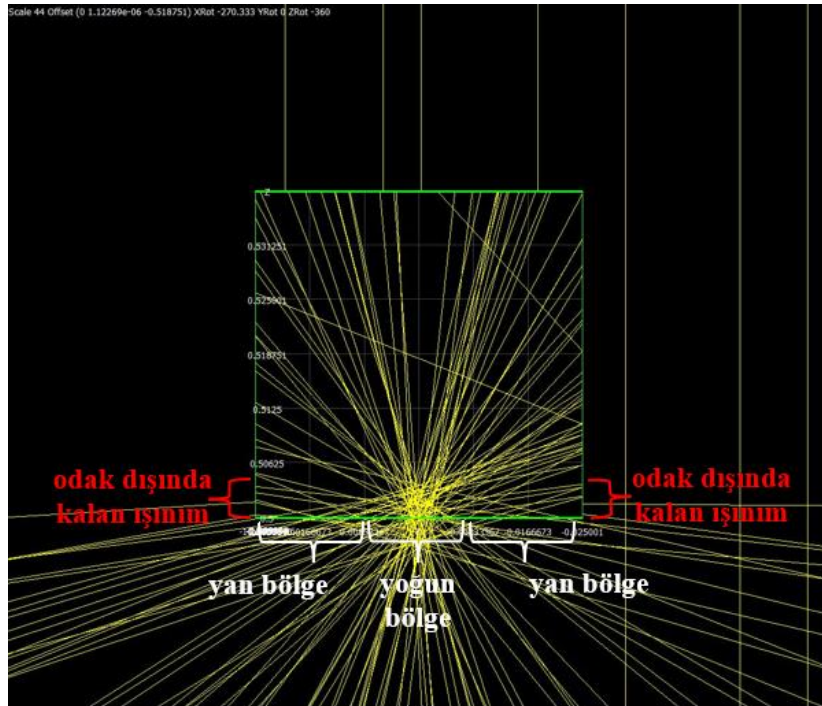
Şekil 2. 8. geo, h, a ve b parametreleri arasındaki ikili etkileşimler

Regresyondaki uyumun iyiliğini incelemek için standartlaştırılmış artık değerlerin normal olasılık grafiği çizilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, standartlaştırılmış artıklar çoğunlukla normal olasılık grafiğindeki kırmızı çizgiye uymaktadır. Bu grafik, veriler için gerekli koşulların sağlandığını göstermektedir. R^2 yanıtta varyasyonun yüzdesidir. R^2 , modelin verilere ne kadar iyi uyduğunu belirleyen bir kriter olup, R^2 değeri ne kadar yüksek olursa model, verilerinize o kadar iyi uymaktadır. Minitab'tan elde edilen R^2 bu modelde %99,92 olarak bulunmuştur.



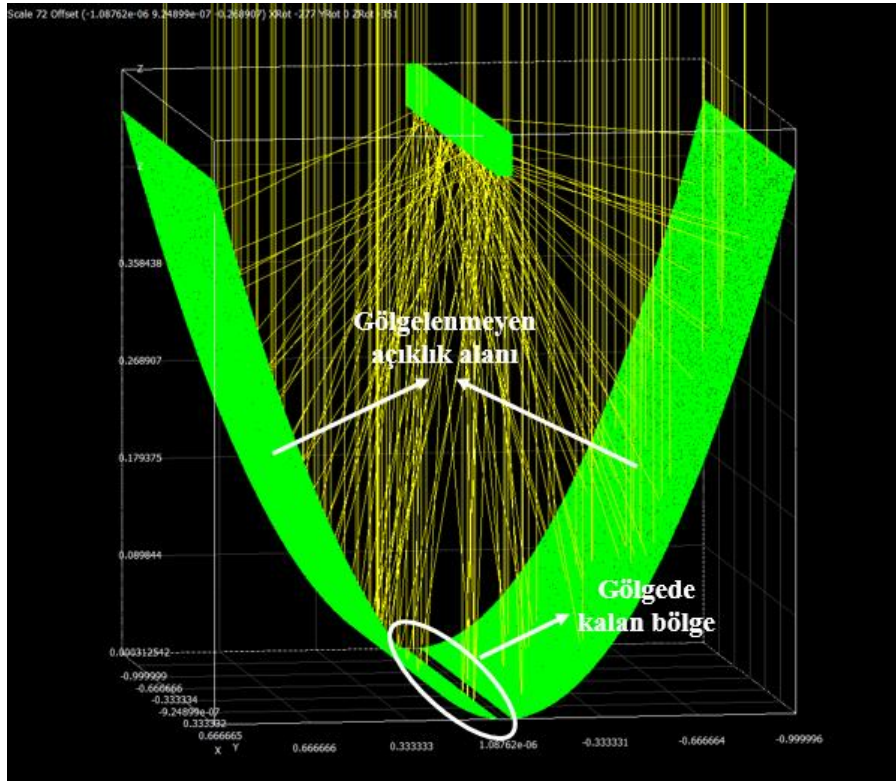
Şekil 2. 9. Normal olasılık grafiği

Şekil 2.10, kavite üzerindeki ışın hüzmelerinin dağılımını göstermektedir. Işınım, cam plaka üzerindeki dar alanda (yoğun bölge) yoğunlaşmaktadır. Ayrıca güneş ışınları yan bölgelerden de kavite içine girmektedir. Bu nedenle, kavite açıklığının genişliği (a), yoğunlaştırılmış güneş ışınlarının tamamını absorbe etmek için önemli bir parametredir. Yoğunlaştırılmış güneş ışınlarının bir kısmı kavitenin dış yan yüzeyleri tarafından absorbe edilmektedir. Bu, odak dışı ışınım kayıpları ile açıklanabilir.



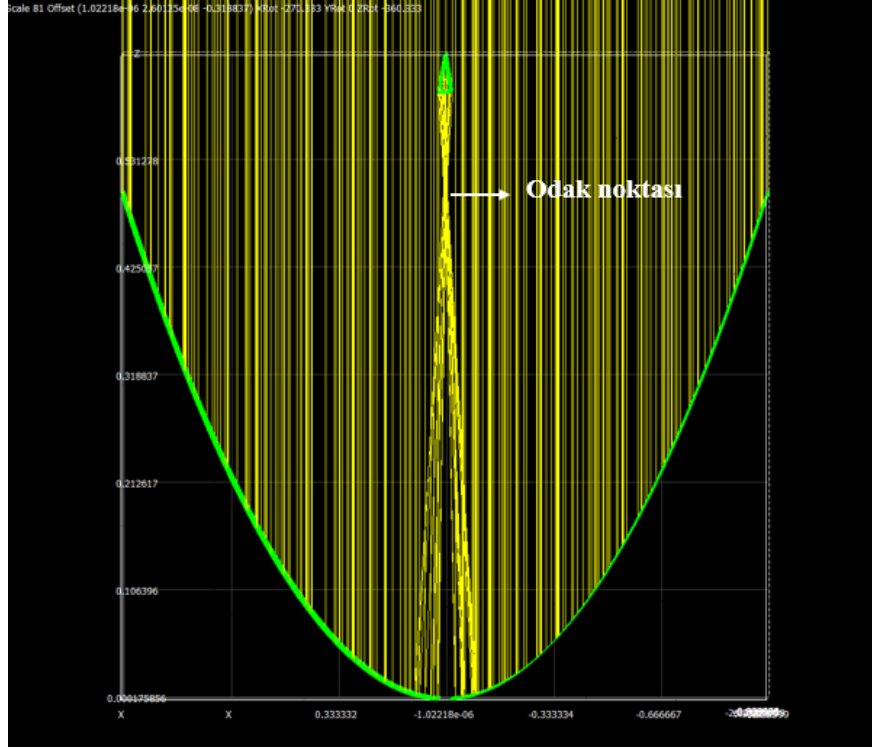
Şekil 2. 10. Kavite üzerindeki ışınım dağılımı

Şekil 2.11'de kollektör üzerindeki gölgeli ve gölgesiz alanlar gösterilmiştir. Parabolik kollektör üzerindeki gölgeli alanlar sırasıyla kollektördenden yansıyan toplam ışınım miktarını (\dot{Q}_{PTC}) ve kaviteli alıcının iç yüzeyleri tarafından absorbe edilen net ışınımı (\dot{Q}_{abs}) etkilediğinden, gölgeden kaynaklanan kayıplar optik analiz için önemlidir. Şekil 2.11'de gösterilen bu gölge alanı, kaviteli alıcının genişliğinin parabolik kollektör üzerindeki projeksiyon alanıdır. Bu nedenle kavite genişliği, yoğunlaştırılmış güneş ışınının tamamını veya çoğunu alacak kadar büyük, gölge alandan kaynaklanan kayıpları minimum seviyede tutabilecek kadar küçük olmalıdır.

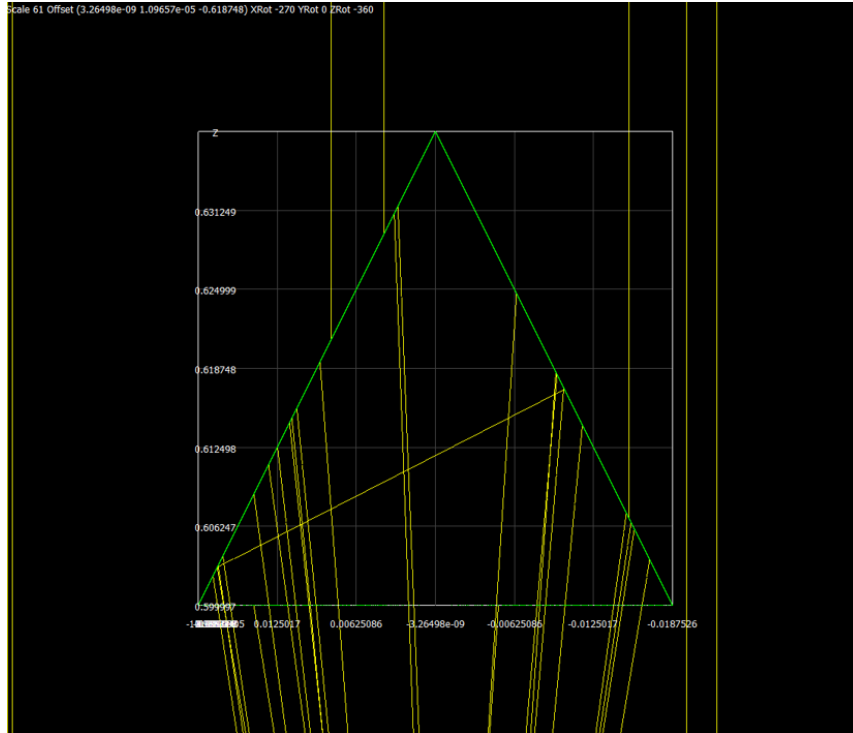


Şekil 2. 11. Parabolik kollektör üzerindeki gölgeli ve gölgesiz alanlar

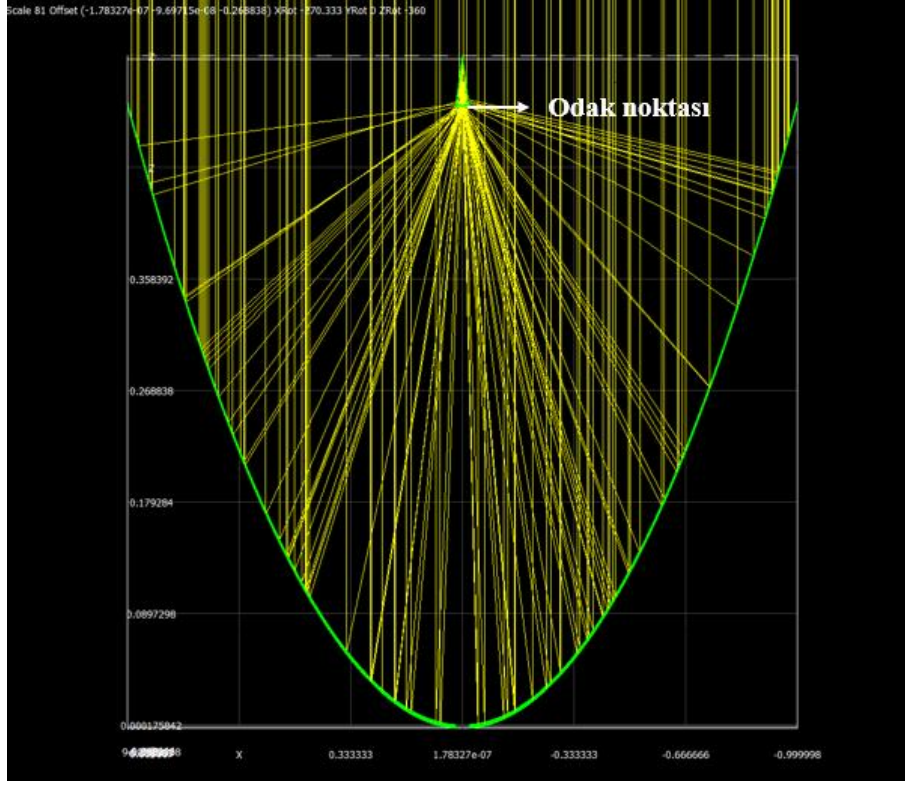
Şekil 2.12, odak noktasının 0,10 m üzerindeki üçgen kaviteli alıcının optik analizini göstermektedir. Yoğunlaştırılmış güneş ışınımı odak noktasında toplanmaktadır ve belirli bir açıyla saçılmaktadır. Bu saçılan radyasyonun küçük bir kısmı (267,38 W) alıcı tarafından yakalanabilmektedir (Şekil 2.13). Şekil 2.14'te ise aynı alıcı odak noktasında bulunmaktadır. Şekil 2.15, üçgen kaviteli alıcının odak noktasındaki optik analizini göstermektedir. Şekil 2.13 ve 3.15 karşılaştırıldığında odak noktasına konumlandırılan alıcının gelen ışınımı çoğunlukla (3123,38 W) yakaladığı görülmüştür. Bu da h parametresinin seviyesinin -1 (odak noktasında) olmasının mantıklı bir sonuç olduğunu göstermektedir.



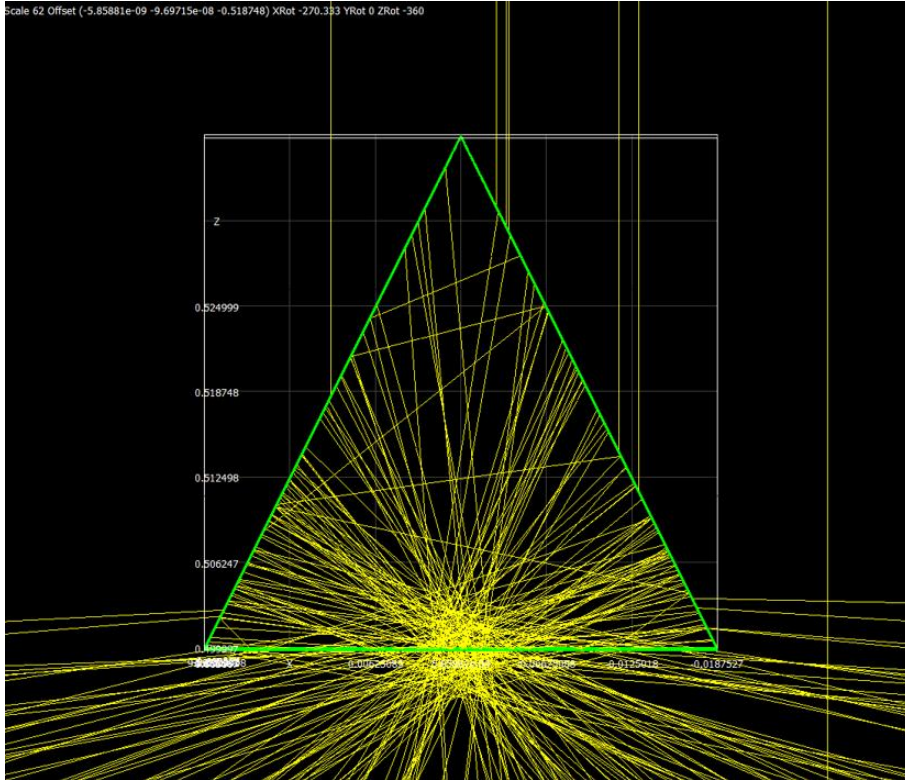
Şekil 2. 12. Odak noktasının 0,10 m yukarıdaki üçgen kaviteli alıcının kollektör optik analizi



Şekil 2. 13. Odak noktasının 0,10 m yukarıdaki üçgen kaviteli alıcının optik analizi



Şekil 2. 14. Odak noktasındaki üçgen kaviteli alıcının kollektör optik analizi



Şekil 2. 15. Odak noktasındaki üçgen kaviteli alıcının optik analizi

Yanıt fonksiyonunu maksimuma çıkaran parametreler ve değerleri, Eşitlik (2.11) Minitab Response Optimizer ile çözülerek elde edilmiş ve sonuç Tablo 3.7'de verilmiştir. Optimum modelin seviyeleri ve değerleri Tablo 2.7'de görülmektedir. Response Optimizer aracı, optimum modelde \dot{Q}_{abs} değerini 3341,6 W olarak tahmin etmiştir.

Tablo 2. 7. Yanıt değerini maksimuma çıkaran parametre seviyeleri ve değerleri

Faktör	Seviye	Seviye değeri
geo	1	Polygon
h	-1	0,00 m
a	1	0,05 m
b	1	0,05 m

Tablo 2.7'de sunulan parametre değerlerine göre alıcı geometrisi modellenmiş ve SolTrace'de optik analizleri yapılmıştır. Optimum model için analiz üç kez tekrar edilmiş ve sonuçlar Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2. 8. Optimum model için SolTrace'den elde edilen sonuçlar

geo	h	a	b	\dot{Q}_{abs}	η_{opt}
1	-1	1	1	3241,99	81,05
1	-1	1	1	3237,25	80,93
1	-1	1	1	3240,81	81,02

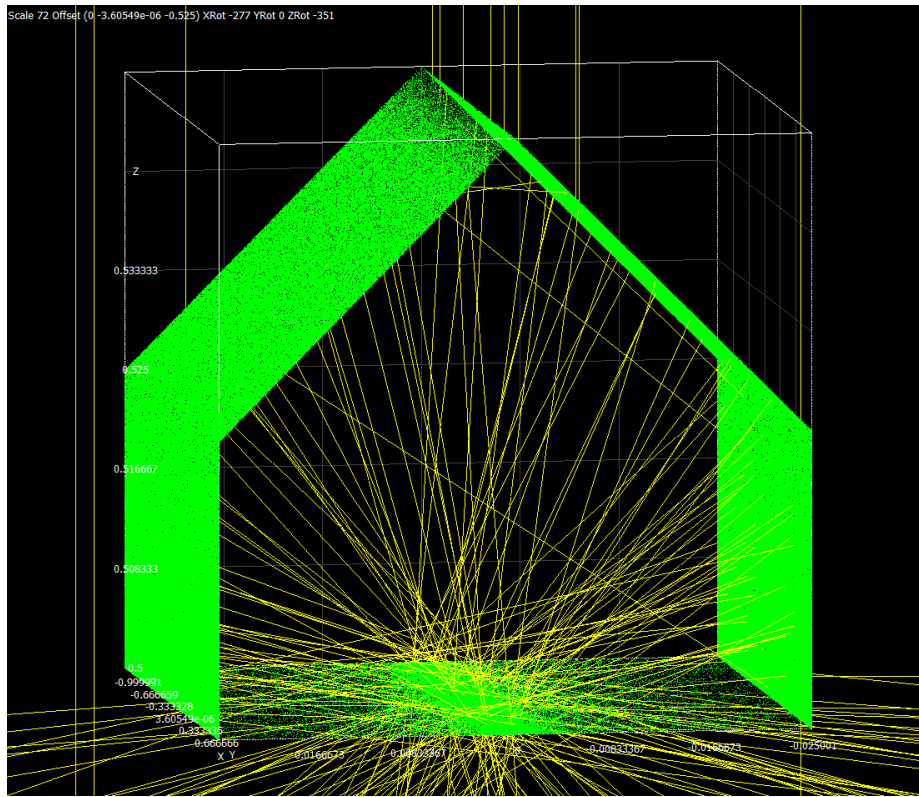
Minitab ve SolTrace'den elde edilen sonuçlar Tablo 2.9'da karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre Minitab ve SolTrace analizinden elde edilen en yüksek Q_{abs} değeri arasında %3'ün altında kabul edilebilir bir fark bulunmaktadır.

Tablo 2. 9. Optimum model için Minitab ve SolTrace analiz sonuçlarının karşılaştırılması

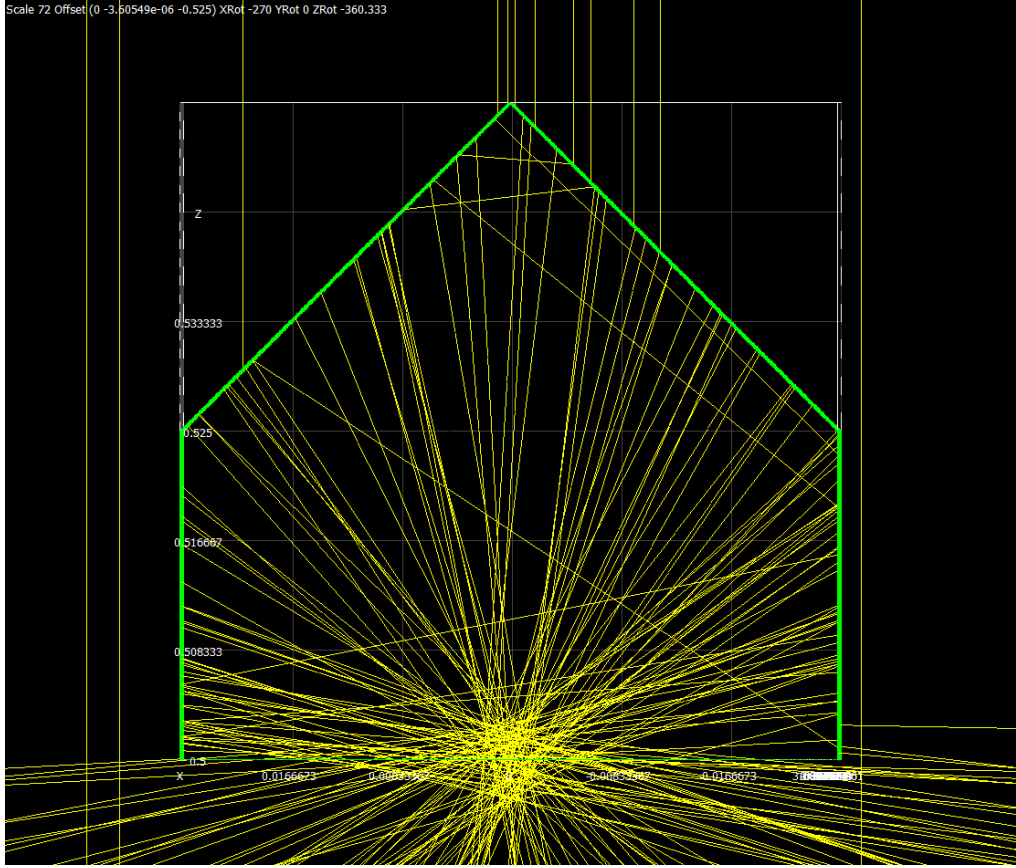
	Minitab	SolTrace	Error (%)
\dot{Q}_{abs}	3341,60	3241,99	2,98

SolTrace ile analiz edilen tüm modellerin sonuçlarının yer aldığı Tablo 2.5'teki 81 sonuçla karşılaştırıldığında, Minitab'tan elde edilen optimum modelin \dot{Q}_{abs} açısından en iyi model olduğu görülmüştür.

Şekil 2.16 ve 2.17, optimum kaviteli güneş alıcısı modelindeki ışınım dağılımını göstermektedir. Cam plaka üzerindeki radyasyon dağılımı Şekil 2.16'da açıkça görülmektedir. Işınım, cam plaka üzerinde dar bir alanda yoğunlaşırken yan bölgelerden gelen ışınım da kavite alanı tarafından yakalanabilmiştir. Çokgen geometrisinin açılı plakalarının birleştiği uç nokta, ışınım en az maruz kalan bölge olmuştur. Şekil 2.17'de camdan geçen ışınımın dağılımı daha net görülmektedir. Dik yan plakalar daha fazla radyasyon alırken, üst açılı plakalar daha az ışınım maruz kalmıştır. Camdan geçen radyasyon geniş bir alana dağılmaktadır ve üstteki açılı plakalar daha az radyasyona maruz kalmaktadır.



Şekil 2. 16. Optimum kaviteli alıcının SolTrace analiz sonucunun perspektif görünümü



Şekil 2. 17. Optimum kaviteli alıcının SolTrace analiz sonucunun ön görünüşü

Çalışmanın bu bölümünde; kaviteli alıcı tarafından soğurulan mümkün olan en yüksek ışınimsal ısı akısını ve dolayısıyla optik verimliliği elde etmek amacıyla, parabolik oluk güneş kollektörlerde kullanılacak kaviteli bir alıcının şekil, konum ve boyutlandırma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla; kavite geometrisi, kavite açıklık genişliği, kavite yüksekliği ve kavite konumu gibi farklı parametrelerin parabolik oluk kollektörün optik performansı üzerindeki etkisi, optimizasyon yöntemi kullanılarak SolTrace modellemesi ile kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yanıt Yüzey Metodolojisi kullanılarak kaviteli alıcı için bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Box Behnken tasarım yöntemi ile belirlenen faktörler (geo, h, a ve b) incelenmiştir. İncelenen kaviteli alıcılı güneş kollektörü, SolTrace tarafından optik olarak modellenmiştir. Bu çalışmanın önemli sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

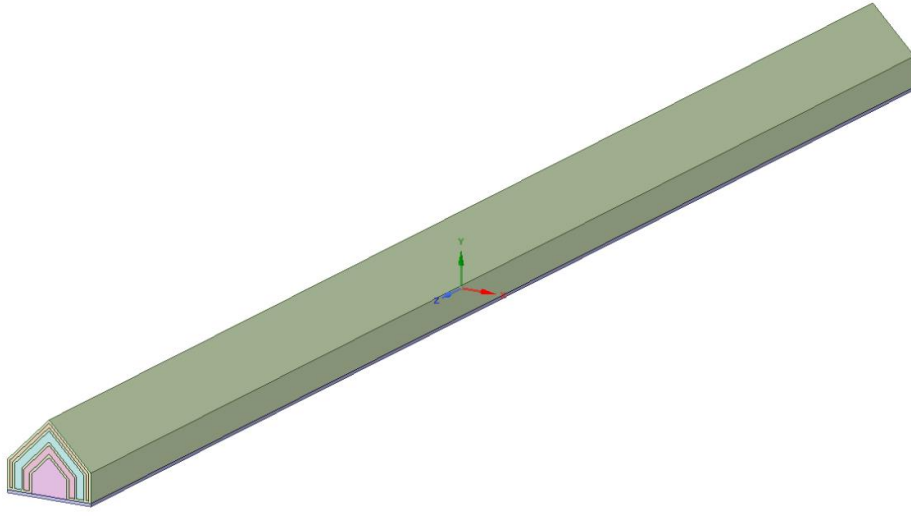
- Her bir parametrenin yanıt fonksiyonuna (\dot{Q}_{abs}) etkisi incelenirken, yanıt fonksiyonuna en az etkiye sahip parametrenin geometri (geo) olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, kavite girişinde düşük demirli bir cam plakanın (parabolik toplayıcıdan yüksek düzeyde radyasyon geçirgenliğine sahip, ancak kavite içinde yeniden yansıyan ışınlar için düşük geçirgenliğe sahip bir cam) konulması ve alıcı

iç yüzeylerde yansıtıcılığı çok düşük (0,04) olan seçici yüzey boyası kullanılmasıdır.

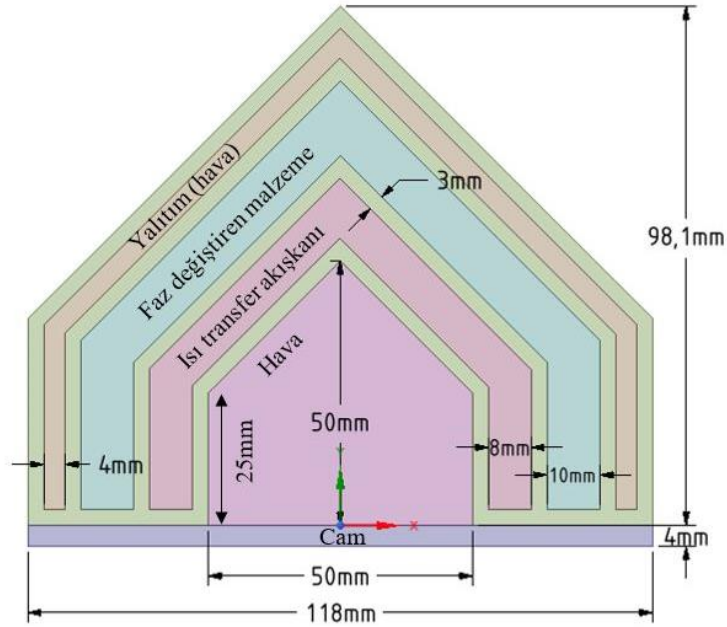
- Alıcının parabolik yansıtıcı üzerinde gölgeleme etkisi olması nedeniyle, küçük kavite genişliği (a) gölgeleme alanını azaltsa da büyük kavite açıklığı parabolik yansıtıcıda yoğunlaşan ışınların tamamının yakalanması açısından önemlidir.
- Kavite yüksekliğinin (b) yanıt fonksiyonu üzerindeki etkisi küçük olmasına rağmen, kavite genişliği ve kavite yüksekliğinin beraber artışının optik verim üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür.
- Sistemin en etkili parametresi kaviteli alıcının parabolik kollektöre göre konumu (h) olmuştur. Alıcının odak noktasına konumlandırılması yanıt fonksiyonunu en üst düzeye çıkarırken odak noktasından sapmalar \dot{Q}_{abs} ve optik verimliliği η_{opt} büyük ölçüde azaltmıştır. Ayrıca h parametresinin diğer parametrelerle etkileşimleri değerlendirildiğinde ikili etkileşimlerde her zaman h parametresinin baskın olduğu görülmüştür.
- Alıcının iç yüzeyleri tarafından absorbe edilen net ışınlık miktarı (\dot{Q}_{abs}) ve optik verimi (η_{opt}) maksimuma çıkaran optimum model, optimizasyon metodolojisi ile hesaplanmış ve sonuç olarak optimum alıcı geometrisinin çokgen olduğu, alıcının odak noktasına yerleştirildiği, kavite yüksekliği ve genişliği eşit ve 0,05 m olan kaviteli alıcının en iyi model olduğu görülmüş ve ısıl analizler için matematiksel model oluşturulmuştur.

3. MATEMATİKSEL MODELVE DOĞRULAMA

Bölüm 2’de gerçekleştirilen kavite optimizasyon çalışması neticesinde kavite şekli ve boyutları (çokgen, 50x50mm) belirlenmişti. Çalışmada kullanılan kaviteli alıcı modelinin ANSYS Design Modeler ve Space Claim yardımı ile oluşturulan katı geometrisi Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bu bağlamda üretim kısıtlamaları da göz önünde bulundurularak yeni tasarım ortaya konulmuştur. Alıcı uzunluğu parabolik kollektör uzunluğuna eşit ve 2 m’dir. Alıcının ön görünüşü ile detaylı boyutlandırması Şekil 3.2.’de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Kaviteli FDM’li ve yalıtımlı yeni alıcının katı modeli



Şekil 3. 2. Kaviteli FDM’li ve yalıtımlı yeni alıcının ön görünüşü ve boyutları

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere FDM entegreli, kaviteli ve yalıtımlı alıcı 3 katmandan oluşmakta olup, imal edilebilirlik ve uygulanabilirlik kriterleri göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda, yansıtıcı yüzeydeki gölge alanını azaltacak, uygulanabilir minimum katman kalınlıkları belirlenmiştir. Isı transfer akışkanı olarak su kullanılan katmanın kalınlığı 8 mm olarak alınmış, FDM malzemenin bulunacağı orta katman kalınlığı 10 mm, içinde hava bulunması öngörülen en dıştaki yalıtım katmanı ise 4 mm olarak belirlenmiştir. Alüminyum olarak seçilen alıcı malzeme kalınlığı ise 3 mm olarak seçilmiştir. Kaviteli alıcının alt bölgesinden ısı kayıplarını önlemek amacıyla, güneşten gelen düşük dalga boylu ışınımı geçiren ancak alıcı yüzeyinden yayılan yüksek dalga boylu ışınımı geçirmeyen 4 mm kalınlığında düşük demirli cam plakanın kaviteli alıcının alt bölgesini tamamen kapatacak şekilde yerleştirilmesine karar verilmiştir.

3.1. Matematiksel Model

Geometrik tasarımı, hesaplama uzayı ve optimal hesaplama ağı oluşturulan alıcı modelinin ısı transfer akışkanı akımının benzetimi sonlu hacimler yöntemine dayalı ayrıklaştırma yapan paralel uyumlu bir ticari akışkan akımı çözümleyici programı Ansys Fluent V.18.1 kullanılarak üç-boyutlu ve türbülanslı akış varsayımları altında gerçekleştirilmiştir. Sistem bir bütün olarak, FDM erime sürecini de kapsayan hidrodinamik ve ısı transfer denklemleri tüm hesaplama alanında aynı anda çözülür. Standard k- ε türbülans modeli kullanılan çözümlemede, Isı transfer akışkanının akışını yöneten süreklilik ve momentum denklemleri en genel halde aşağıdaki gibidir [33]:

süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

momentum denklemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

burada ρ ve μ sıvı yoğunluğu ve viskozitesidir. x_i , u_i ve t konum vektörünü, hız vektörünü ve zaman değişkenini temsil eder. p termodinamik basınçtır ve $(\overline{u'_i u'_j})$ Reynolds gerilme bileşenlerini gösterir.

enerji denklemi

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right] + W_h \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde T sıcaklığı ve γ_{eff} etkin termal iletkenliği temsil eder. E ve W_h sırasıyla toplam enerji ve enerji kaynağı terimidir.

$$\gamma_{eff} = \gamma + \gamma_t \quad (3.4)$$

burada

$$\gamma_t = \frac{c_p \mu_t}{\sigma} \quad (3.5)$$

γ_t türbülans termal iletkenliktir, μ_t türbülans viskozitesidir ve σ Prandtl sayıdır. $(\tau_{ij})_{eff}$ terimi, aşağıdaki şekilde ifade edilen etkin kayma gerilmesi tensörüdür:

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.6)$$

ve

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemlerde μ_t , türbülans kinetik enerjinin ve spesifik dağılım oranının bir fonksiyonu olarak hesaplanan türbülanslı viskoziteyi temsil eder.

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve spesifik dağılım hızı (ε) aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilir:

k denklemi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (3.8)$$

ε denklemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.9)$$

burada türbülans viskozite μ_t şu şekilde verilir

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

G_k , ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerjisinin üretimini temsil eder. G_b kaldırma kuvveti nedeniyle türbülans kinetik enerjisinin üretilmesidir. σ_k ve σ_ε sırasıyla k ve ε için türbülanslı Prandtl sayılarıdır. S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir. Standart sabitler kullanılmıştır [32]. Bunlar: $c_\mu=0,09$, $c_1=1,44$, $c_2=1,92$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$, $\sigma_T=0,85$.

FDM'deki ısı transferini ve faz değişimini açıklayan matematiksel model, aşağıdaki varsayımlar dikkate alınarak elde edilir [33]:

- FDM'nin sıvı fazı Newtonian ve laminerdir.
- Boussinesq yaklaşımı, doğal taşınım etkilerini hesaba katmak için FDM'nin yönetici denklemlerine dahil edilmiştir.
- FDM'nin sabit termofiziksel özelliklere sahip olduğu varsayılır.

Bu varsayımlar göz önüne alındığında, FDM'de ısı transferini ve faz değişimini yöneten süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.11)$$

momentum denklemi

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_{jj}} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \beta g_i (T - T_{ref}) + S_i \quad (3.12)$$

enerji denklemi

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i \rho H] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklemlerde H terimi FDM'nin entalpisini temsil eder ve gizli ve duyulur kısımlardan oluşur.

$$H = h + \Delta H \quad (3.14)$$

burada

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3.15)$$

Gizli ısı içeriği, malzemenin gizli ısısı (L) cinsinden yazılabilir:

$$\Delta H = \beta L \quad (3.16)$$

Erimel ve katılaşmanın faz değişimini simüle etmek için entalpi-gözeneklilik yöntemi kullanılır [34]. Burada ΔH sıfırdan (katı) L 'ye (sıvı) kadar değişebilir. Bu nedenle sıvı fraksiyon β şu şekilde tanımlanabilir:

$$\beta = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{eğer } T < T_{katı} \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{eğer } T > T_{sıvı} \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} & \text{eğer } T_{katı} < T < T_{sıvı} \end{cases} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemlerde h_{ref} referans entalpisini, c_p sabit basınçtaki akışkanın özgül ısısını, $T_{katı}$ ve $T_{sıvı}$ maddenin donma ve erime sıcaklığını temsil eder. Kaynak terim S_i gözeneklilik fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi tanımlanır [35]:

$$S_i = C(1 - \beta^2)^2 + \frac{u_i}{\beta^3 + \epsilon} \quad (3.18)$$

burada C , erime sırasında katı-sıvı morfolojisini belirleyen sabit bir sayıdır. Değeri 10^4 ile 10^7 arasında değişmektedir [36]. Bu çalışmada, Al-Abidi ve arkadaşları tarafından bildirilen deneysel sonuçlarla iyi bir tutarlılık sağlamak için C değeri 10^5 olarak ayarlanmıştır [37]. ϵ sıfıra bölünmeyi önlemek için küçük bir sayıdır. Sistemdeki katı hacimlerin (alıcı katmanların kalınlığı) enerji denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \quad (3.19)$$

γ ve c katının ısı iletim katsayısı ve özgül ısısıdır.

3.2. Doğrulama

Bu tez kapsamında, literatürde yayımlanan deneysel çalışma sonuçlarının matematiksel modelin doğrulanmasında kullanılmasına karar verilmiştir.

FDM entegreli kaviteli alıcıdaki HAD analizlerinin doğrulanabileceği tek bir deneysel çalışma literatürde yar almamaktadır. Bu bağlamda öncelikle FDM katmanı olmayan termal model doğrulanmış, daha sonra da FDM malzemenin bulunduğu katman için oluşturulan model literatürdeki deneysel bir çalışmadan yararlanılarak doğrulanmıştır.

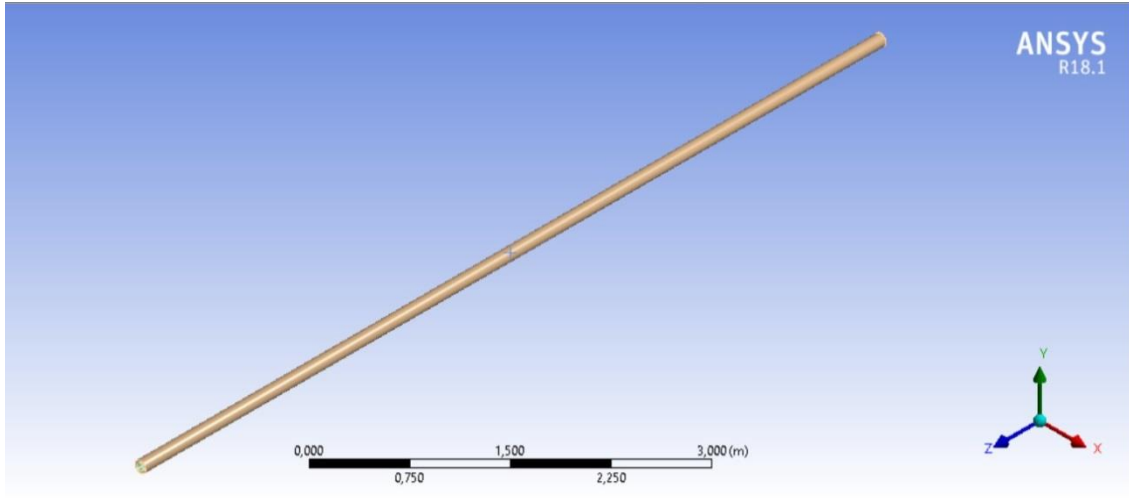
3.2.1. Termal modelin HAD doğrulaması

Termal modeli doğrulamak için Sandia'da test edilen LS-2 parabolik oluk kollektör sistemi [29] kullanılmıştır. Alıcının ısı transferi modeli aşağıdaki süreçleri içermektedir [32]:

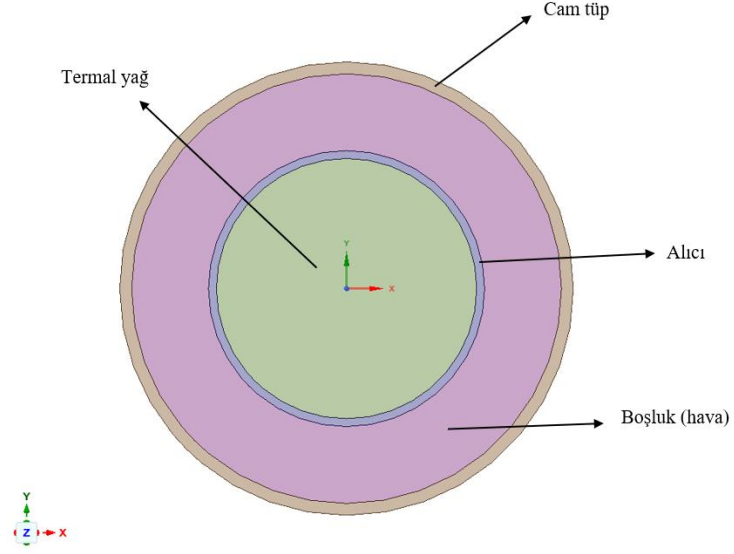
- Isı transfer akışkanı ile alıcı arasında taşınımsal ısı transferi,
- Alıcıda güneş ışınımı absorpsiyonu,
- Alıcı duvar boyunca iletim ısı transferi,
- Alıcıdan cam tüpe ısı transferi,
- Cam tüpte güneş ışınımı absorpsiyonu (ihmal edildi),
- Cam tüp boyunca iletim ısı transferi,
- Cam tüpten atmosfere ısı transferi,

Alıcı dış yüzey ile cam tüp iç yüzeyi arasında hem taşınım hem de radyasyon ısı transferi gerçekleşir.

Alıcı, ANSYS Space Claim modülünde modellenmiştir ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.4'te alıcı modelin detayları gösterilmiştir.

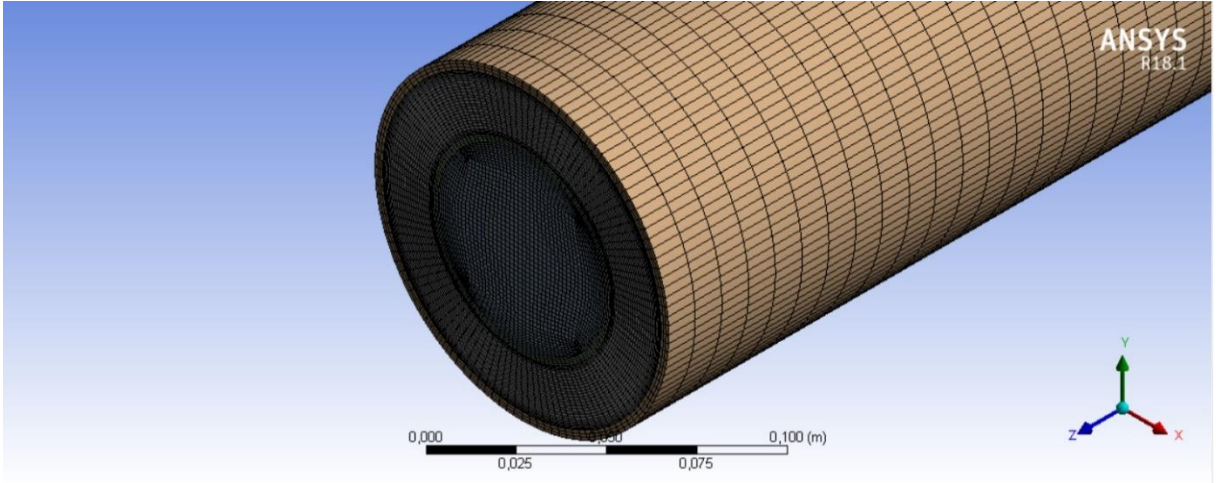


Şekil 3. 3. LS2 alıcı modeli

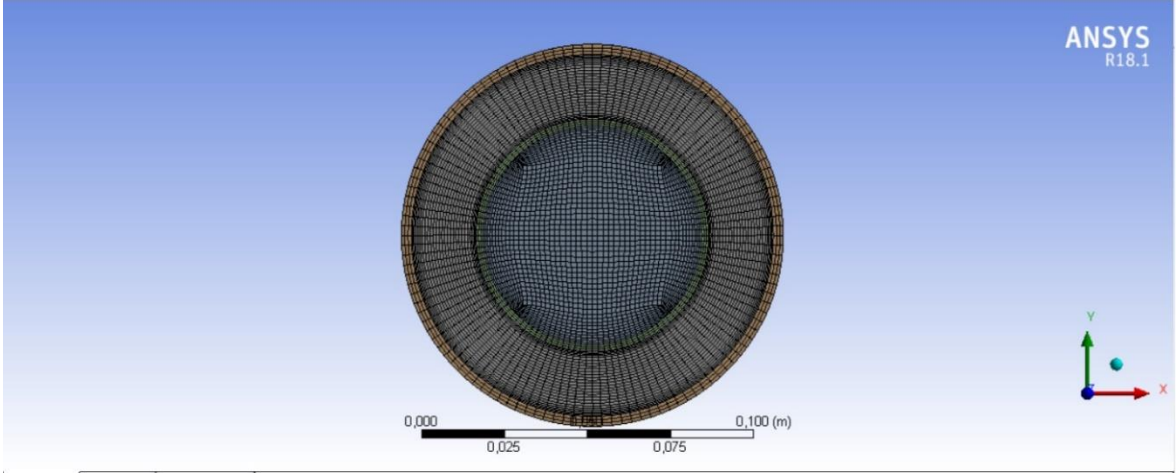


Şekil 3. 4. LS2 alıcı modelinin ön görünüş

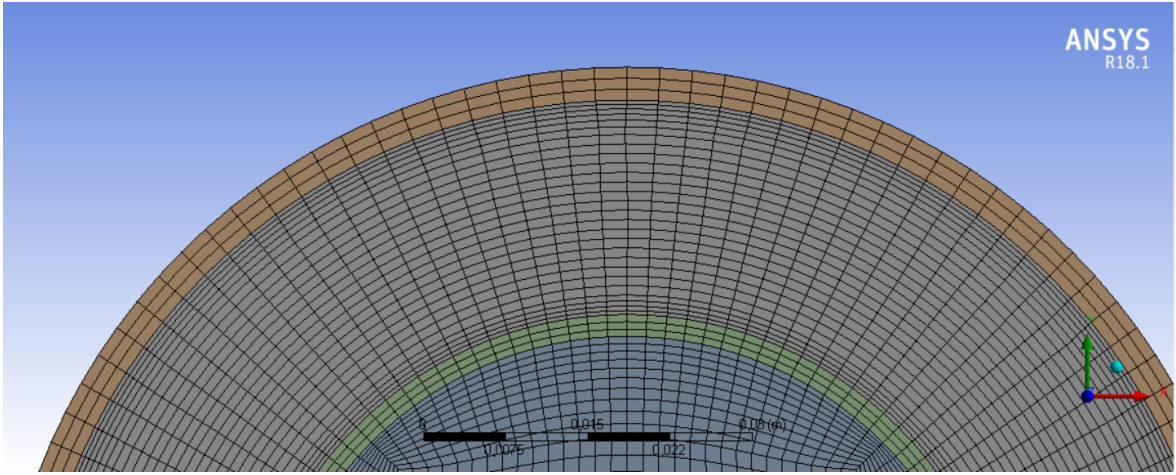
Modelin genel ağ yapısı Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da gösterilmektedir. Katı yüzeylerdeki iletimle olan ısı transferinin de hesaba katılması için alıcı ve cam tüp de mesh yapısına dahil edilmiştir. Katı hacimlerin akışkan ile temas eden yüzeylerine daha sık ve sınır tabaka (inflation) ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ yapısının çarpıklık yani skewness değeri maksimum 0,48 iken ortalama değeri ise 0,043’tür. Şekil 3.7’de sınır tabaka ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3. 5. LS2 alıcı modelinin genel ağ yapısı



Şekil 3. 6. LS2 alıcı modelinin genel ağ yapısı ön görünüş



Şekil 3. 7. LS2 alıcı modelinin sınır tabaka ağ yapısı ön görünüş

Modelin sınır koşulları ayrıntılı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Giriş koşulları sınır şartları:

$$\text{giriş: } w = w_{\text{giriş}}, u = v = 0, T = T_{\text{giriş}}$$

Diğer yüzeyler/duvarlar için sınır koşulları:

(a) Alıcı borunun $z = 0$ ve $z = 7,8\text{m}$ olan uçları: adyabatik

(b) Cam tüp dış yüzeyi: radyasyon ve konveksiyonun ısı transferi ve dış hava sıcaklığı ise test koşullarıyla aynı

Radyasyon sınır koşulu: Stefan-Boltzmann yasası, cismin büyük bir kara cisim boşluğunda (gökyüzü) küçük bir dışbükey gri nesne olduğunu varsayarak net radyasyon transferini hesaplamak için kullanılır. Gri modelde, optik özellikler tüm frekanslar için aynıdır ve sabit ve frekanstan bağımsız kabul edilir.

Taşınmın sınır koşulu: tüm dış yüzeyde üniform olduğu varsayılır ve ısı transfer katsayısının cam tüp etrafındaki rüzgarla deneysel bir korelasyonu aşığıdaki gibi kullanılır [4]:

$$h_{\text{taşınmın}} = 4V_{\text{rüzgar}}^{0,58} D_{\text{cam,dış}}^{-0,42} \quad (4.20)$$

(c) Alıcının dış boru yüzeyi: MCRT yöntemiyle hesaplanan uniform olmayan güneş enerjisi akı dağılımı (Şekil 3.5)

Çözüm için k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir. Alıcı ile cam arasındaki hava boşluğunda laminer doğal taşınmın için ($Ra < 1,0 \times 10^8$), yalnızca kapalı alanda kaldırma kuvveti kaynaklı bir laminer akışı modellemek mümkündür. Bunun için k-epsilon türbülans model ayarlarından ‘full buoyancy effects’ seçeneğini aktif etmek gerekmektedir. Sistemde -y yönünde $9,81 \text{ m/s}^2$ yerçekimi ivmesi dikkate alınmıştır. Alıcı içerisinde ısı transfer akışkanı olarak kullanılan Syltherm 800 termal yağın özellikleri sıcaklığa bağlı polinom denklemler olarak referanstan [32] alınmıştır. Termal yağın özkütlesi sıcaklığa bağlı denklem (piecewise polynomial) olarak çözücüye giriş yapılmıştır. Bunun nedeni doğal taşınmının da hesaba katılmasını sağlamaktır. Termal yağın diğer termofiziksel özellikleri yağın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması alınarak hesaplanıp sabit olarak verilmiştir ve değerler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Syltherm800 yağın termofiziksel özellikleri

Özgül ısı, c_p	1762,389 J/kgK
Isıl iletkenlik, k	0,1181 W/mK
Viskozite, μ	0,0027 kg/ms

Cam tüp ile alıcı arasındaki hava boşluğu alanı için, doğal taşınmın modeli kapalı bir alan içindedir ve çözüm, alan içindeki kütleye bağlı olacaktır, bu nedenle Boussinesq modeli kullanılarak bir kararlı hal hesaplaması gerçekleştirilir. Buna bağlı olarak havanın termofiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3. 2. Havanın termofiziksel özellikleri

Yoğunluk, ρ	1,225 kg/m ³
Özgül ısı, c_p	1006,43 J/kgK
Isıl iletkenlik, k	0,0242 W/mK
Viskozite, μ	1,7894x10 ⁻⁵ kg/ms

Alıcı malzemesi çelik olup malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir:

Yoğunluk, ρ (kg/m³): 8030

Özgül ısı, c_p (J/kgK): 502,48

Isıl iletkenlik, k (W/mK): 16,27

Alıcı dışında bulunan cam tüpün özellikleri ise

Yoğunluk, ρ (kg/m³): 2225

Özgül ısı, c_p (J/kgK): 835

Isıl iletkenlik, k (W/mK): 1,4

Cam tüpün dış yüzeyi için ‘mixed’ çözüm aktif edilmiş bu sayede camdan dış hava ortamına olan hem taşınımsal hem de ışınımsal ısı transferi dikkate alınmıştır. Taşınımsal ısı transfer katsayısı verilen eşitliğe göre Tablo 3.3’te rüzgar hızı kullanılarak hesaplanmış ve 20,8556 W/m²K’dir. Alıcı dış yüzeyinde absorbe edilen ve Şekil 1.2’de verilen uniform ışınım akısı dağılım haritası, ‘udf’ kullanılarak Fluent’e entegre edilerek sınır şartı olarak belirlenmiştir.

Sistemdeki önemli ısı transferlerinden biri olan ışınım ısı transferini hesaba katmak için Discrete Ordinates (DO) ışınım modeli kullanılmıştır. Sistemdeki tüm cisimler opak olarak kabul edilmiştir. Alıcı yüzeyinde bulunan crome kaplama boyasının yüzey yayıcılık oranı 0,14 ve sabittir. LS-2 test değerleri ve sonucu aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3. 3. LS-2 kollektör sistemin deneysel verileri [29]

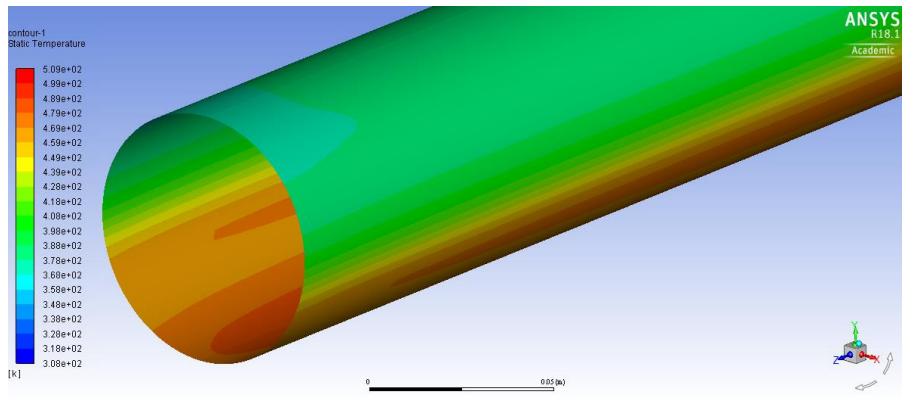
Direk ışınım, I_d (W/m ²)	813,1
Rüzgâr hızı, $V_{rüzgar}$ (m/s)	3,6
Dış hava sıcaklığı, T_{hava} (K)	298,95
Termal yağ giriş sıcaklığı, $T_{yağ,giriş}$ (K)	374,35
Termal yağ debisi, $m_{yağ}$ (kg/s)	0,7254
Termal yağ çıkış sıcaklığı, $T_{yağ,çıkış}$ (K)	392,15

Birçok element sayısında çözüm yapılarak, sonuçlarda mesh sayısından bağımsızlık sağlanana kadar devam etmiş ve uygun element sayısı belirlenmiştir. Mesh sıklığı değiştirilmiş fakat sınır tabaka kalınlığı sabit kalmıştır. Farklı mesh sayılarından elde edilen sonuçlar Tablo 3.4’de verilmiştir. Sonuçlara göre 2713436 element sayısının yeterli ve doğru sonuç alındığı görülmüştür. Genel olarak mesh değişiminin sonuca etkisi çok azdır.

Tablo 3. 4. Ağ yapısından bağımsızlık analiz sonuçları

Mesh sayısı	$T_{\text{yağ,çıkış}}$ (K)
1711872	394,42
2713436	394,39
4502580	394,50
6300640	394,52

Şekil 3.8’de HAD analizlerinden elde edilen alıcı yüzey sıcaklık dağılımı görülmektedir. Alıcı yüzeyinde uniform olmayan ısı akısı nedeniyle uniform olmayan bir sıcaklık değişimi elde edilmiştir. Alıcı borunun alt yüzeyi parabolik kollektörden gelen direkt ışınımına en fazla maruz kalan bölge olduğundan, alt yüzey alanlarında en yüksek sıcaklık değerleri görülürken alıcının üst yüzeylerinin sıcaklığı çok daha düşüktür. Alıcı yüzey sıcaklığı ortalama 434,3 K’dir.



Şekil 3. 8. Alıcı yüzey sıcaklığı

Parabolik kollektörden yoğunlaştırılarak yansıyan direkt ışınım alıcıda absorbe edildiğinden alıcının yüzey sıcaklığı cam tüpe göre oldukça fazladır. Alıcı dış yüzey sıcaklığı ortalama 434.3 K iken cam tüpün iç ve dış yüzey sıcaklıkları sırasıyla 318,8 K ve 316,6 K’dir. Cam tüpün dış yüzey sıcaklığının düşük olması alıcı ile cam tüp arasındaki

hava katmanının yalıtım etkisinden olup, bu durum alıcıdan dış ortama ısı kaybını azalttığından parabolik oluk tür güneş kollektörler için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan model için yapılan HAD sayısal analizinden elde edilen termal yağ çıkış sıcaklığı ile yukarıda Tablo 3.3’de verilen literatürdeki deneysel termal yağ çıkış sıcaklığı karşılaştırıldığında, termal yağın çıkış sıcaklığı için deneysel ve sayısal sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

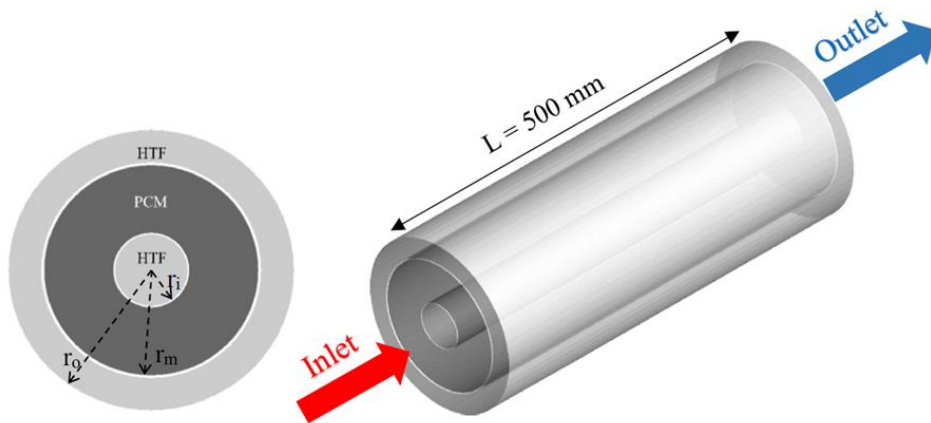
Tablo 3. 5. Deneysel ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	Deney	HAD	Hata (%)
$T_{\text{yağ, çıkış}} \text{ (K)}$	392,15	394,39	0,57

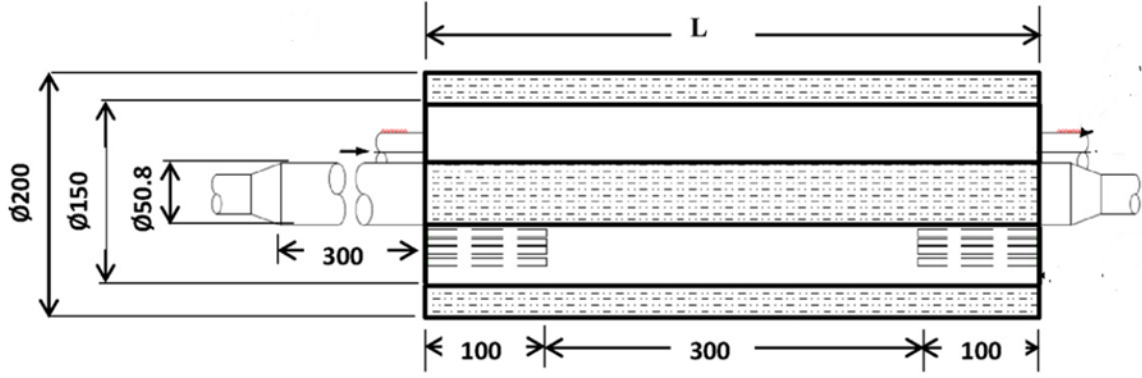
Yukarıdaki Tablo 3.5’den de görüleceği üzere, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki hata oranı % 0,57 olup, bu çalışmada oluşturulan termal model doğrulanmıştır.

3.2.2. Faz Değiştiren Malzemenin HAD Doğrulaması

Faz değiştiren malzeme (FDM) içeren zamana bağlı erime/donma HAD analizlerinin doğrulama çalışmaları için literatürde yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, faz değiştiren malzemenin erime/donma analizinin doğrulanması için Al-Abidi vd. [37] yapmış olduğu deneysel çalışma kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan sistemin geometrisi Şekil 3.9’da ve geometri boyutları Şekil 3.10’da verilmiştir. Isı transfer akışkanı olarak su kullanılmıştır. İç içe tüm borular bakır malzemedan imal edilmiştir. Sistemin orta bölgesinde FDM bulunmaktadır. Çalışmada faz değiştiren malzemenin erimesine etki eden 3 farklı yöntem kullanılmıştır: iç borudan ısıtma, dış borudan ısıtma, iç ve dış borudan ısıtma.

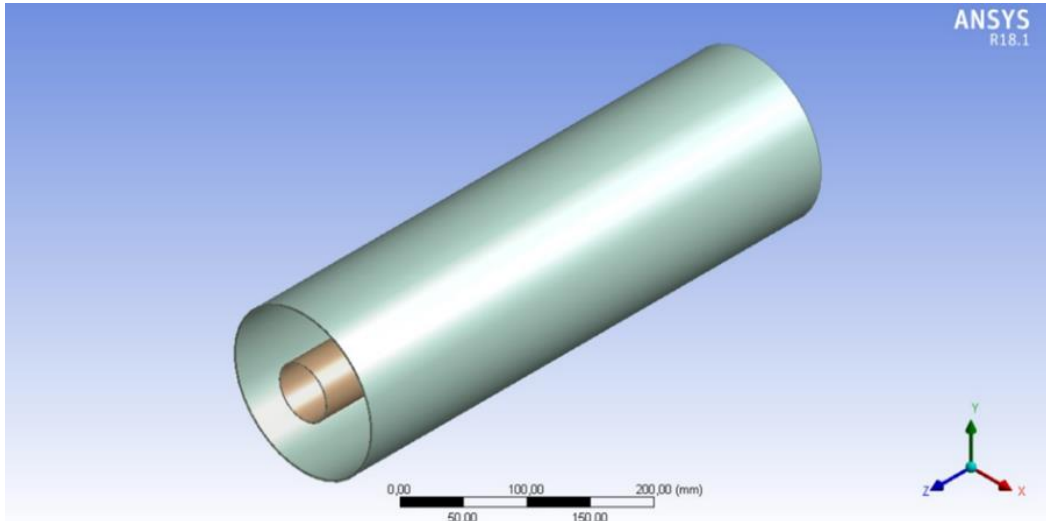


Şekil 3. 9. Sistem geometrisi [33]

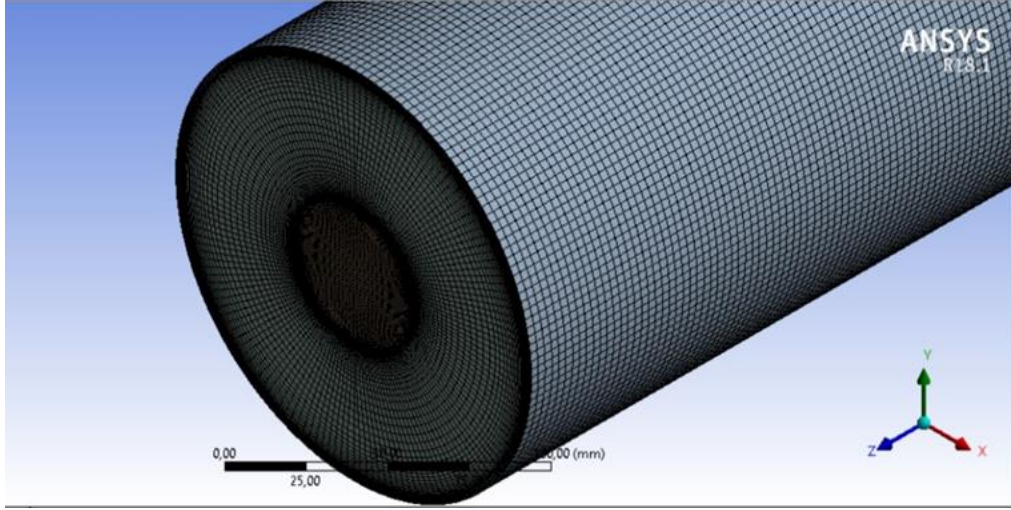


Şekil 3. 10. Sistem boyutları [33]

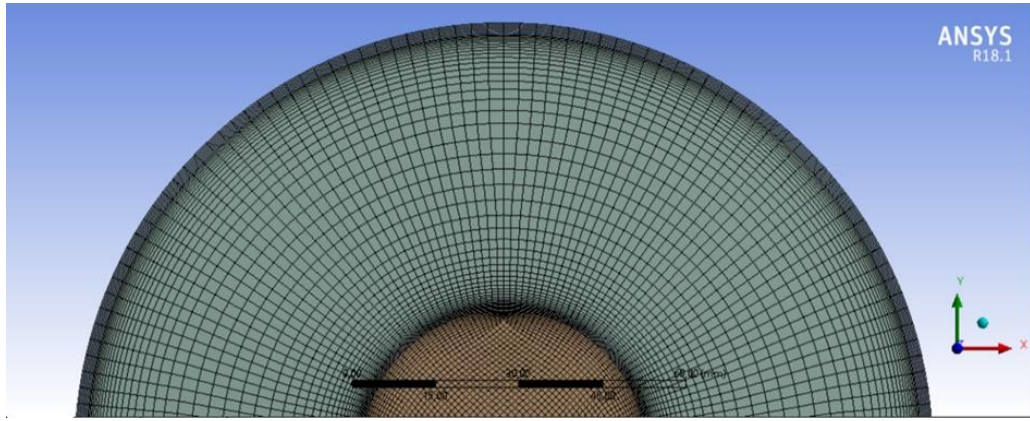
Bu çalışmada referans alınan deneysel çalışmanın iç borudan ısıtma durumu için HAD analizleri yapılmıştır. Geometri ANSYS Design Modeler kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.11). Geometri; iç boru ve FDM'nin bulunduğu iki bölgeden oluşmaktadır. Ayrıca bakır boruların kalınlıkları da dikkate alınarak modellenmiş ve ağ yapısına katılmıştır. Sistemin ağ yapısı Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te görülmektedir. Tüm sisteme hexa ağ (mesh) atılmış olup sınır tabaka da en az 10-katman (layer) ile dikkate alınmıştır. Yaklaşık 2 milyon ağ yapısı elementi kullanılmıştır.



Şekil 3. 11. Sistemin ANSYS Design Modeler'da 3D geometrisi



Şekil 3. 12. 3-boyutlu ağ yapısı görüntüsü



Şekil 3. 13. Ağ yapısı ön görünüş kesiti

Sistemde kullanılan tüm malzemelerin termofiziksel özellikleri aşağıda Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3. 6. Su, RT82-parafin (FDM) ve bakırın termofiziksel özellikleri [33]

	Yoğunluk, ρ (kg/m^3)	Özgül ısı, c_p (J/kgK)	Isıl iletkenlik, k (W/mK)	Viskozite, μ (Pa.s)	Gizli ısı, L (J/kg)	Donma sıcaklığı, $T_{katı}$ (K)	Erime sıcaklığı, $T_{sıvı}$ (K)
Su	965,3	4207	0,6172	0,001003	-	-	-
RT82	950	2000	0,2	0,03499	201643,8	343,27	355,32
Bakır	8978	381	381	-	-	-	-

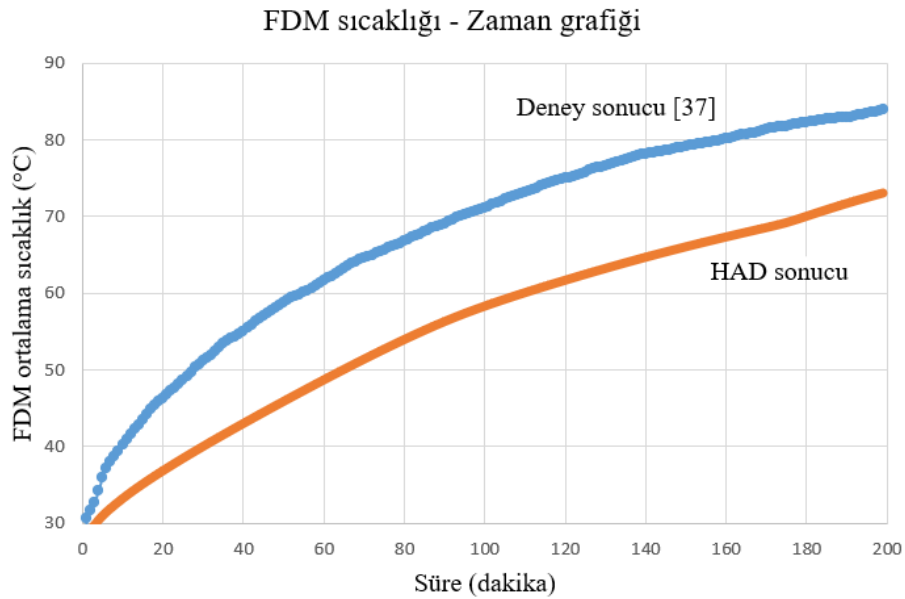
Başlangıçta FDM'nin katı fazda olduğu varsayılmıştır. Tüm sistemin başlangıç sıcaklığı 30°C olarak ayarlanmıştır. Isı transfer akışkanı suyun 363,15 K giriş sıcaklığına sahip ve kütle debisi 2,4 kg/dk giriş sınır koşulu uygulanmıştır. Bakır boru duvarlarında

kaymama sınır koşulu dikkate alınmıştır. Ayrıca boru duvarlarının pürüzlülüğü ihmal edilmiştir. Sistemin dış yüzeyinin yalıtıldığı varsayılmaktadır. Erime işleminin 3 boyutlu simülasyonlarını gerçekleştirmek için sonlu hacim bazlı bir çözücü (a finite volume-based solver) kullanılmıştır. Momentum denklemindeki konvektif terimler QUICK kullanılarak ayrıklaştırılırken, enerji denklemi ve türbülans modelinde bu terimleri ayrıklaştırmak için ikinci dereceden şema (second-order upwind scheme) kullanılmıştır. Basınç gradyanları için PRESTO yöntemi kullanılmıştır. Zamana bağlı (transient) çözüm yapılmıştır. Time step 1 saniye olarak seçilmiş ve her bir zaman adımı (time step) için iterasyon sayısı 20 alınmıştır.

Analiz sonucundan elde edilen FDM ortalama sıcaklık eğrisi, referans alınan çalışmadaki deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.14). Şekilde görüldüğü gibi deneysel veriler ile aynı eğim yakalanarak aynı doğrultuda yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel veriler ile HAD sonuçları arasındaki en büyük fark 110. dakikada $73,54 (346,69 \text{ K}) - 60,00 (333,15 \text{ K}) = 13,54^\circ\text{C} (13,54 \text{ K})$ olarak bulunmuş ve maksimum hata oranı % 3,90 olarak hesaplanmış ve sayısal model doğrulanmıştır (Tablo 3.7).

Tablo 3. 7. Deneysel ile FDM HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması

	Deney	HAD	Hata (%)
$T_{\text{FDM}} (\text{K})$	346,69 K	333,15 K	3,90



Şekil 3. 14. Deneysel [37] ile HAD sonuçlarının karşılaştırması

4. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ENTEGRELİ, KAVİTELİ, KENDİNDEN YALITIMLI ALICININ SAYISAL ANALİZİ VE BULGULAR

Sistemin termal analizlerinin yapılması için elde edilen ışınlam akısının dağılımının alıcı yüzeyine entegre edilmesi ve sistemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile çözümlenmesi gerekmektedir. Alıcının ısı transferi modeli aşağıdaki süreçleri içermektedir:

- Isı transfer akışkanı ile alıcı arasında taşınımsal ısı transferi,
- Alıcıda güneş ışınlamı absorpsiyonu,
- Alıcı duvar boyunca iletim ısı transferi,
- Alıcıdan cam tüpe ısı transferi,
- Camda güneş ışınlamı absorpsiyonu (ihmal edildi),
- Cam boyunca iletim ısı transferi,
- Camdan atmosfere ısı transferi,

Alıcı dış yüzey ile cam iç yüzeyi arasında hem taşınım hem de ışınlam ısı transferi gerçekleşmektedir. Ayrıca FDM katmanında zamana bağlı gerçekleşen erime ve donma faz değişimi bulunmaktadır.

Kavite üzerindeki yeni ışınlam haritasının belirlenmesine yönelik çalışma olarak optik analizler güncellenmiştir. Bunun nedeni, nihai alıcıda özellikle kavite genişliğinin artmasıyla gölgelemeden kaynaklı olarak alıcıda absorbe edilen ışınlam miktarı az da olsa düşmüştür. Ayrıca Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Ankara Etimesgut bölgesi için veriler temin edilmiş olup analizlerde kullanılan 18 Temmuz 2023 tarihine ait hava koşulları aşağıdaki gibidir:

Işınım: 789 W/m²

Hava sıcaklığı: 30,4 °C

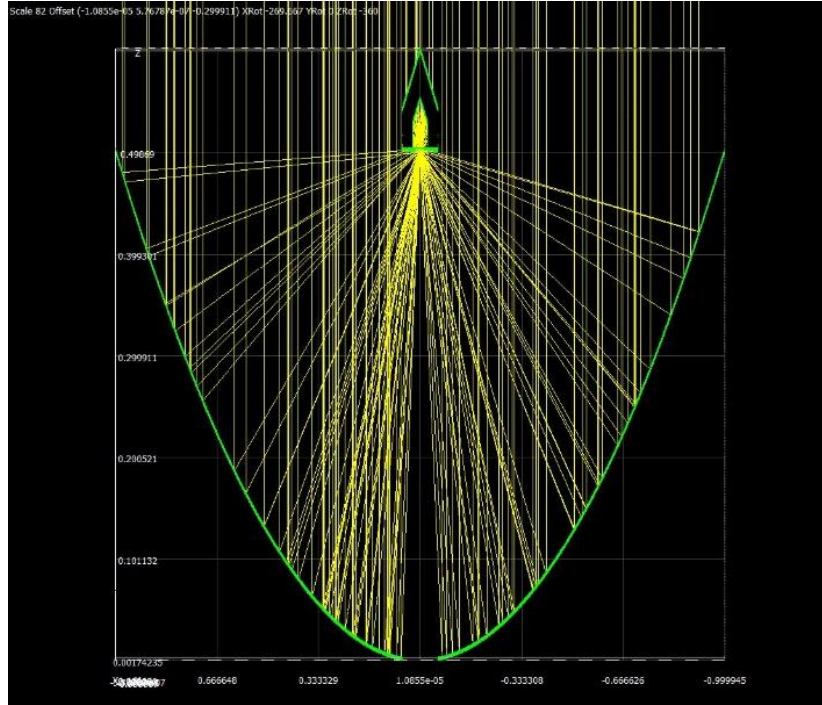
Rüzgar hızı: 2,4 m/s

Bu ortam koşulları için öncelikle ışınlam değeri kullanılarak optik analizler yapılmıştır. Parabolik kollektöre ve alıcıya ait geometrik ve optik parametreler Tablo 3.1 ve 3.4'te verilmiştir. Bu veriler kullanılarak son tasarım ile alıcının boyutları belirlendikten sonra nihai alıcının optik analizi yapılmıştır. SolTrace'den elde edilen optik analize ait

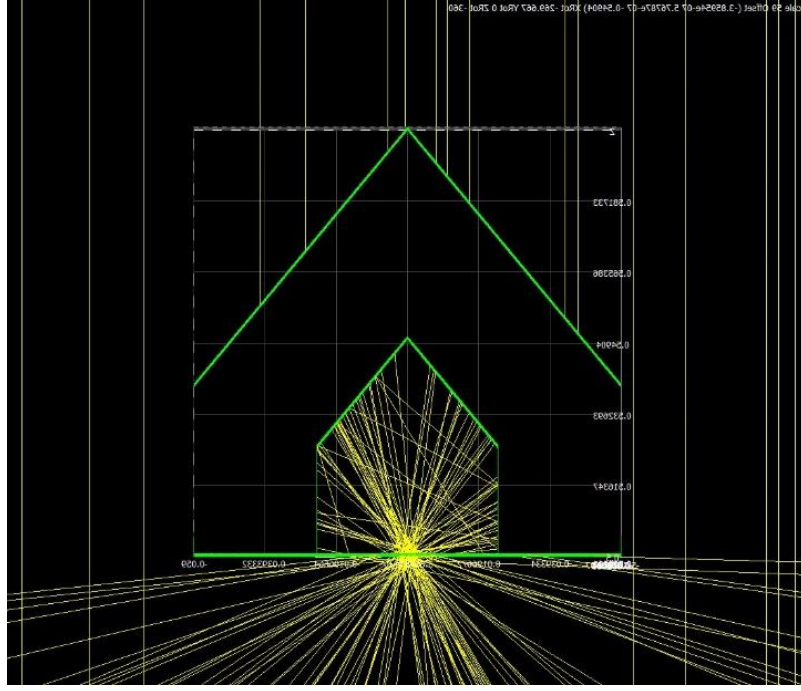
şekiller aşağıda verilmiştir. Şekil 4.1 ve 4.2’te görüldüğü gibi alıcının dış yüzeyleri modellenmiştir. Analiz sonucunda nihai alıcının absorbe ettiği ışınım miktarı, Q_{abs} , 2458 W olarak elde edilmiştir. Sağ ve sol dik plakalara gelen ışınım miktarları eşit ve 720W olurken üst plakalara gelen ışınım yine eşit ve 509W olarak görülmüştür. Kavite duvarlarında absorbe edilen ışınım dağılımı (ışınım haritası) Şekil 4.3’te verilmiştir.

Isı transfer akışkanı olan suyun debisi ise suyun 27°C’deki özellikleri ve çıkış sıcaklığındaki sıcaklık artışı 5°C olacak şekilde aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

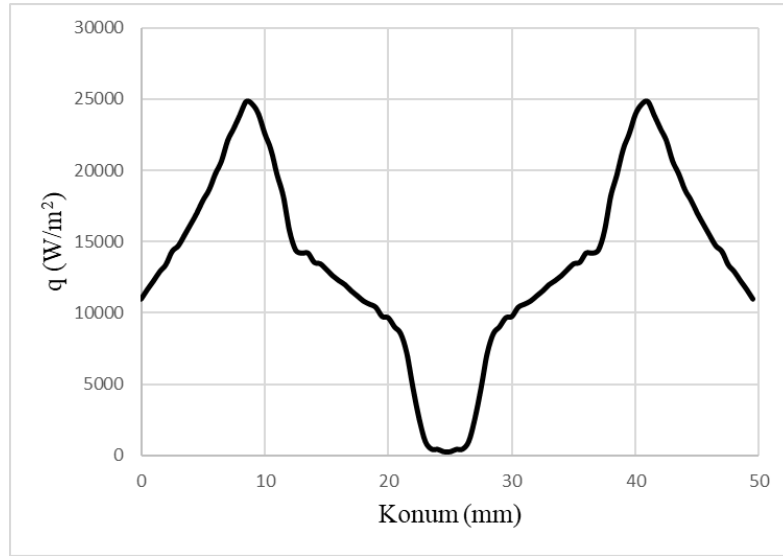
$$\dot{m} = \frac{Q_{abs}}{c_p \Delta T} = \frac{2458 (W)}{4183 \left(\frac{J}{kgK} \right) * 5(K)} = 0,1175 kg/s \quad (4.1)$$



Şekil 4. 1. Kaviteli FDMli alıcılı kollektörün optik analizi



Şekil 4. 2. Kaviteli FDMli alıcı geometrisinin optik analizi



Şekil 4. 3. FDM'li kaviteli alıcının kavite duvarlarına ait ışı nım haritası

SolTrace optik analizinden elde edilen ve Şekil 4.3'te verilen ışı nım haritası Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (User Define Function – UDF) kullanılarak Fluent'e aktarılmıştır. FDM'nin faz değişimi sırasında (hem erime, hem de donma) sistemdeki etkilerini görebilmek için, HAD zmleri zamana bağlı yapılmıştır. Model doğrulamada da kullanılan zaman adımı 1 saniye olarak seçilmiştir.

4.1. Sayısal Analiz Sonuçları

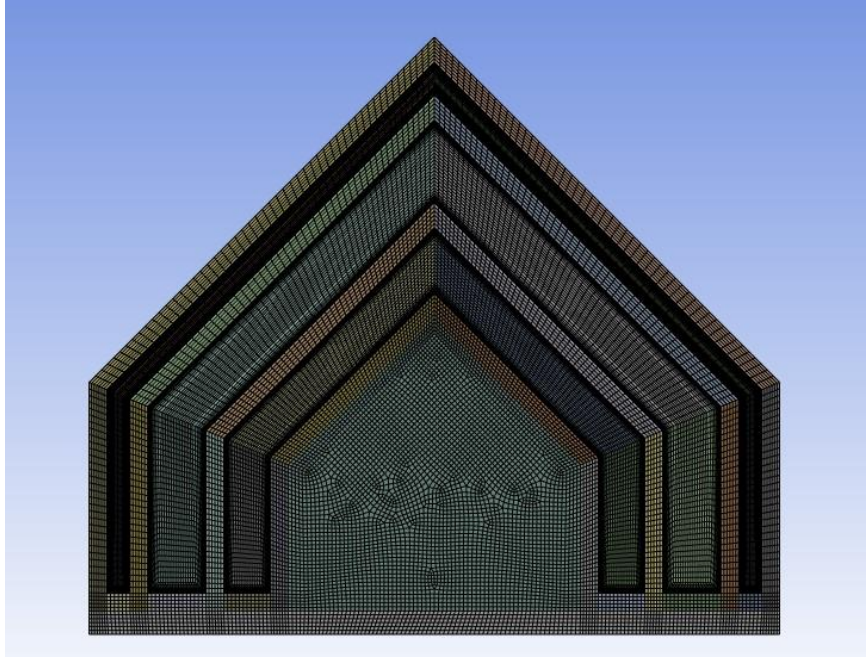
Bu bölümde tez çalışmasına konu; FDM entegreli kaviteli ve kendinden yalıtımlı güneş alıcısının sayısal analizleri ve elde edilen bulgular sunulmuştur. Tasarlanan sistem 100°C-180°C aralığında çalışacağından dolayı FDM olarak 100°C üzerinde erime sıcaklığına sahip malzemeler ve sisteme uygunluğu araştırılmıştır.

FDM'ler organik ve inorganik malzemeler olarak sınıflandırılır. Organik malzemeler yağ asitleri gibi parafin ve parafin olmayan maddelerden oluşurken, inorganik malzemeler ise tuz hidratlar, tuzlu su kompozitleri ve metalik alaşımlardan oluşur. İnorganik FDM'ler erime noktalarına göre üç gruba ayrılabilir: düşük sıcaklıkta ısı depolama (<120°C), orta sıcaklıkta ısı depolama (120–300°C) ve yüksek sıcaklıkta ısı depolama (>300°C). Güneş enerjisi sistemleri için orta-yüksek sıcaklıktaki FDM'ler en popüler malzemedir [38]. Literatür tarandığında, birçok araştırmada termal olarak kararlı bir forma sahip olması ve maliyetinin uygun olması sebebi ile orta sıcaklıkta çalışan ısı enerji depolama tesisleri için FDM olarak yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) önerilmiştir [39-40]. Bu bağlamda, çalışma için seçilen malzemeye ait termofiziksel özellikler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

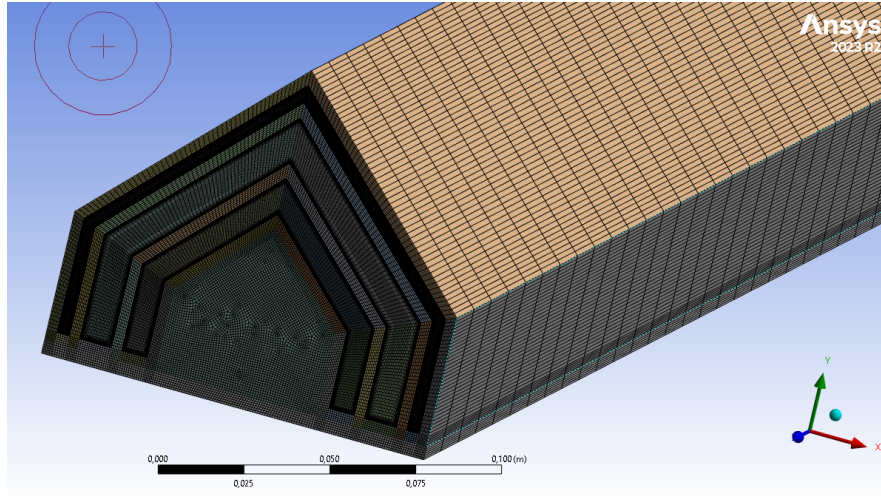
Tablo 4. 1. Seçilen FDM'nin termofiziksel özellikleri

	Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	Özgül ısı, c_p (J/kgK)	Isıl iletkenlik, k (W/mK)	Viskozite, μ (Pa.s)	Gizli ısı, L (J/kg)	Donma sıcaklığı, $T_{katı}$ (°C)	Erime sıcaklığı, $T_{sıvı}$ (°C)
YYPE	952	2600	0,48	0,0375	255000	120	130

Bölüm 3'te FDM entegreli kendinden yalıtımlı kaviteli alıcının boyutları ve matematiksel modeli verilmişti. Space Claim'de modellenen alıcının mesh görüntüsü Şekil 4.4 ve 4.5'de detaylıca verilmiştir. 2,6 milyon element sayısına sahip mesh yapısının maksimum skewness değeri 0,72'dir.



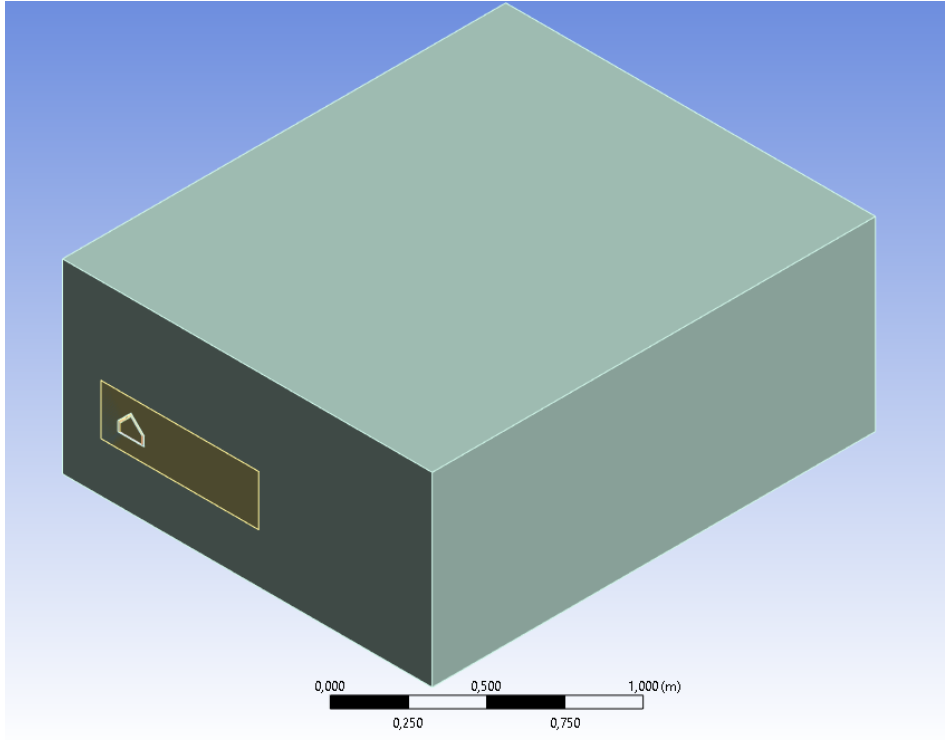
Şekil 4. 4. FDM entegreli kendinden yalıtımlı kaviteli alıcının mesh yapısı – ön görünüş



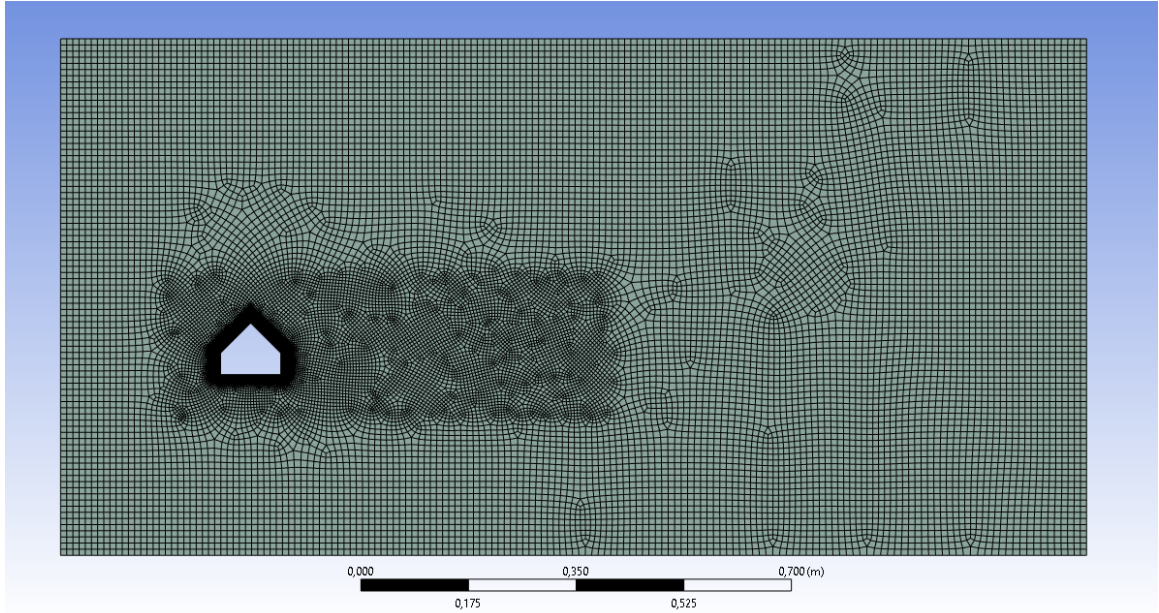
Şekil 4. 5. FDM entegreli kendinden yalıtımlı kaviteli alıcının mesh yapısı

Geometrinin karmaşıklığı ve literatürde bu geometride bir cisim için dış hava koşullarında ısı transfer katsayısı için matematiksel bir denklem bulunamadığından, alıcı çevresine bir hava hacmi modellenmiştir (Şekil 4.6). Bu sayede alıcı çevresindeki ısı transfer katsayısı HAD çözümleri ile elde edilmiştir. Şekil 4.7’de modelin mesh görüntüsü verilmiştir. Alıcı çevresine çizilen dikdörtgenel hava hacmi, akış ayrılmaları gözönünde bulundurularak ve birkaç analiz sonucunda optimize edilerek oluşturulmuştur. Dış hava hacminin boyutları 0,8m yüksekliğinde 1,6m genişliğindedir. Uzunluğu alıcı boyuna eşit ve 2m’dir. Alıcı çevresinde görülen yoğun akış ayrılmaları nedeniyle alıcı etrafına yeterli boyutlarda dikdörtgenel geometride yoğun mesh içeren bir bölge bulunmaktadır. Şekil

4.8’de verilmiş olan dış hava hacmi ağ yapısının element sayısı yaklaşık 3,5 milyon değerindeyken çarpıklık (skewness) değeri 0,65’dir.



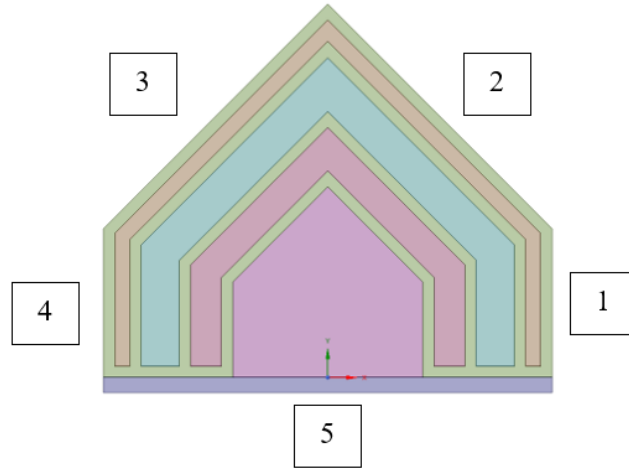
Şekil 4. 6. Kaviteli alıcı ve hava hacmi modeli



Şekil 4. 7. Kavite etrafına modellenen hava hacminin mesh yapısı

Alıcıdan ortama olan ısı transfer katsayısının HAD ile elde edilmesinde kararlı hal (steady-state) çözüm uygulanmıştır. Bunun nedeni hem tüm katmanlardaki ısı transferini

hem de dış hava koşullarındaki ısı transferini hesaba katarak aynı zamanda uniform olmayan ısı akısı ile zamana bağlı çözüm almanın zorluğudur. Bu zorluklar nedeniyle bazı varsayımlar yapılmıştır. Çözüm zamandan bağımsız, sabit FDM sıcaklığı ver FDM faz değişiminin bulunmadığı bir model ile yapılmıştır. Bu bağlamda FDM'nin farklı sıcaklıkları için 4 farklı çözüm elde edilmiş ve bunlara ait sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir. Farklı FDM sıcaklıklarından elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir dış yüzey ve cam için ortalama ısı transfer katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın devamında yapılan tüm HAD analizlerinde Tablo 4.2'de her plaka için verilen ortalama ısı transfer katsayısı (h) değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4. 8. Kaviteli alıcı dış yüzey plaka numaralandırmaları

Tablo 4. 2. Kaviteli alıcı dış yüzey plakalarına ait ısı transfer katsayıları

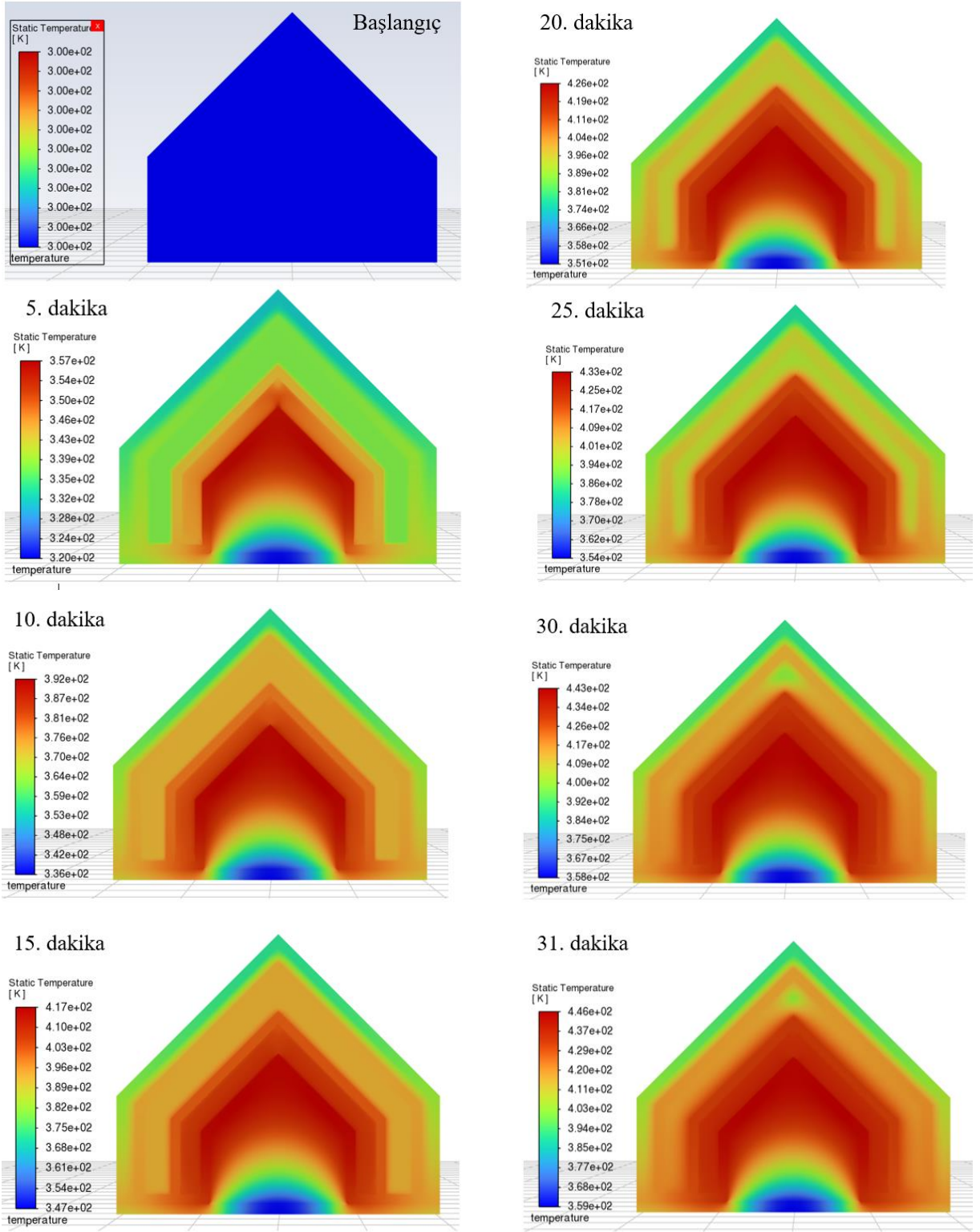
FDM Sıcaklığı (K)	Kavite dış duvarları numaraları için ısı transfer katsayıları (W/m ² K)				
	1	2	3	4	5
323	7,58	11,86	10,57	16,58	7,62
353	10,73	16,46	15,03	23,07	10,51
373	11,64	17,73	16,31	24,88	11,32
403	12,42	18,82	17,42	26,43	12,01
Ortalama	10,59	16,22	14,83	22,74	10,33

Bu aşamadan sonra Şekil 4.4'te verilen alıcı modeli 3-boyutlu, zaman bağlı ısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Isı transfer akışkanı olarak su seçilmiştir. Giriş sıcaklığı 300K olarak belirlenmiştir. Isı transfer akışkanının çıkışı girişe bağlanmıştır. FDM erime durumu için HAD sonuçlarından elde edilen zamana bağlı sıcaklık ve sıvı fraksiyonu

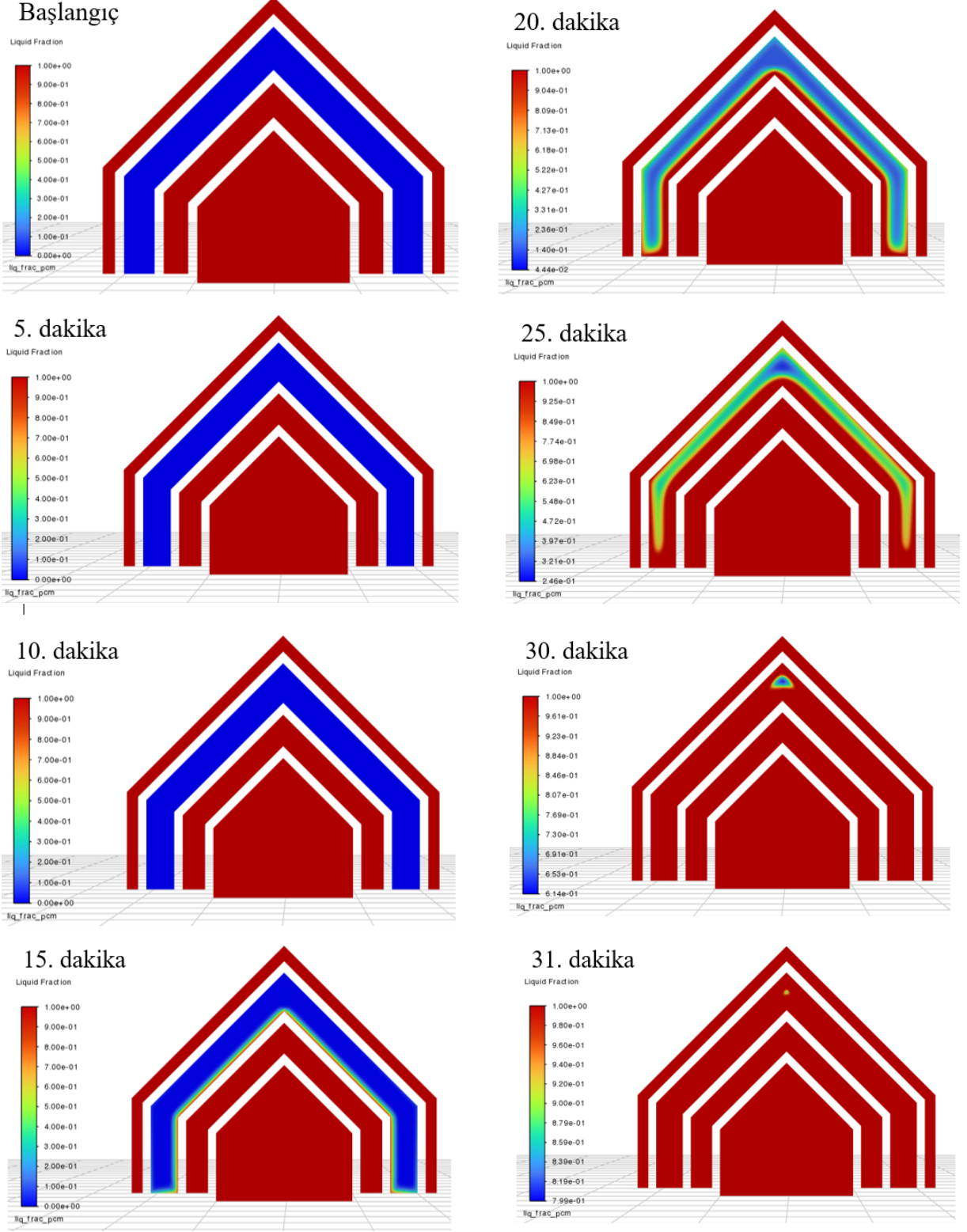
görüntüleri Şekil 4.9 ve 4.10'de verilmiştir. Sistem başlangıçta 300K olarak ilk değer girilmiştir.

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, HAD analizi FDMnin tamamen erime süresi olan 31.dakikanın sonuna kadar devam etmiştir. Isı transfer akışkanı olan suyun 5, 10, 15, 20, 25 ve 30. dakikadaki sıcaklık değerleri sırasıyla 347, 382, 407, 416, 423 ve 433K'dir. FDMnin tamamen eridiği andaki su sıcaklığı ise 437,52K olmuştur. Buna karşılık FDM sıcaklığı ise 338, 373, 394, 398, 404 ve 418K'dir. FDMnin tamamen sıvı haldeki sıcaklığı ise 423,76K'dir. Su ve FDM arasında yaklaşık 10°C fark vardır. Güneş ışınımı kaviteli alıcının duvarında absorbe edildiğinde suyun ilk katmanda olması sebebiyle, suyun sıcaklığının her zaman FDM'den fazla olması beklenen bir sonuçtur.

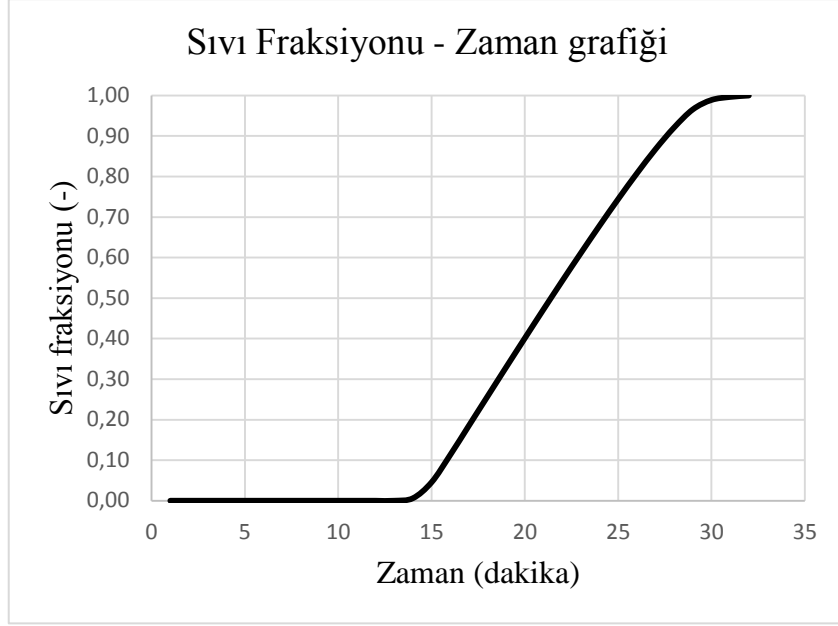
Şekil 4.10'da verilen FDMnin sıvı oranı dağılımına göre, erime ilk olarak suya yakın olan iç katmanda başlamıştır. Bu durum 15.dakikada net olarak görülmektedir. Daha sonra alıcı malzemesinin tüm cidarlarda alüminyum olması sebebiyle dış katmanlara doğru da ısı transferi artmaktadır (20.dakika). FDMnin tamamen erimesi tam olarak 1876.saniyede olmuştur. 30 ve 31.dakikadaki şekiller incelendiğinde beklenildiği gibi en son eriyen bölge kavitenin üst en uç bölgesi olmuştur.



Şekil 4. 9. FDM erime analizleri için zamana bağlı sıcaklık dağılımı

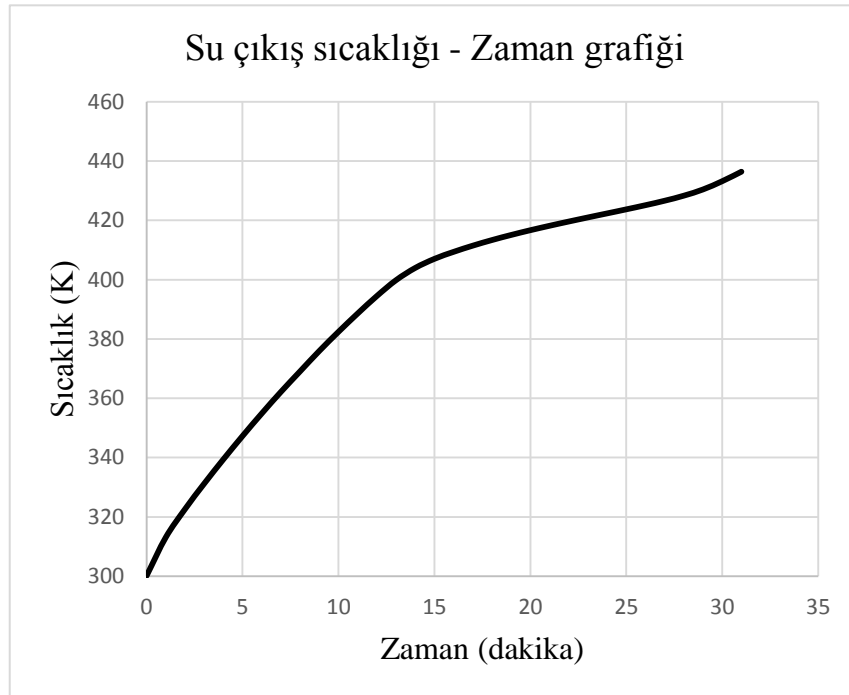


Şekil 4. 10. FDM erime analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu dağılımı



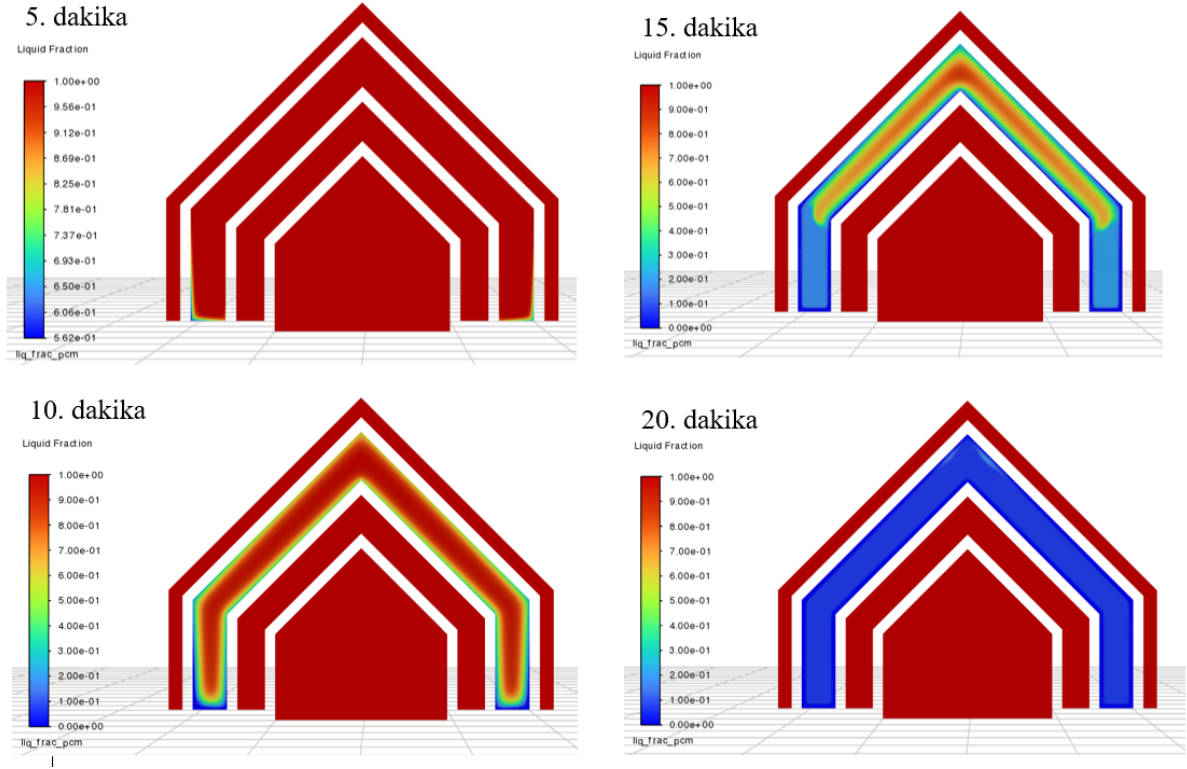
Şekil 4. 11. FDM erime analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu grafiği

Şekil 4.11 FDM'nin zamana bağlı erime oranını (sıvı fraksiyonunu) göstermektedir. Sıvı fraksiyonu 0 ila 1 arasında değişmekte olup 0 değeri tüm hacmin tamamen katı olduğu hali 1 ise tamamen sıvı olduğu hali ifade etmektedir. Şekilden görüldüğü üzere FDM 13.dakikada erimeye başlamıştır ve tamamen erime süresi 31.dakikanın sonudur. Şekil 4.12'de zamana bağlı olarak su çıkış sıcaklığının değişim grafiği verilmiştir. FDM tamamen eridiğinde su sıcaklığı 437,52 K'dir.



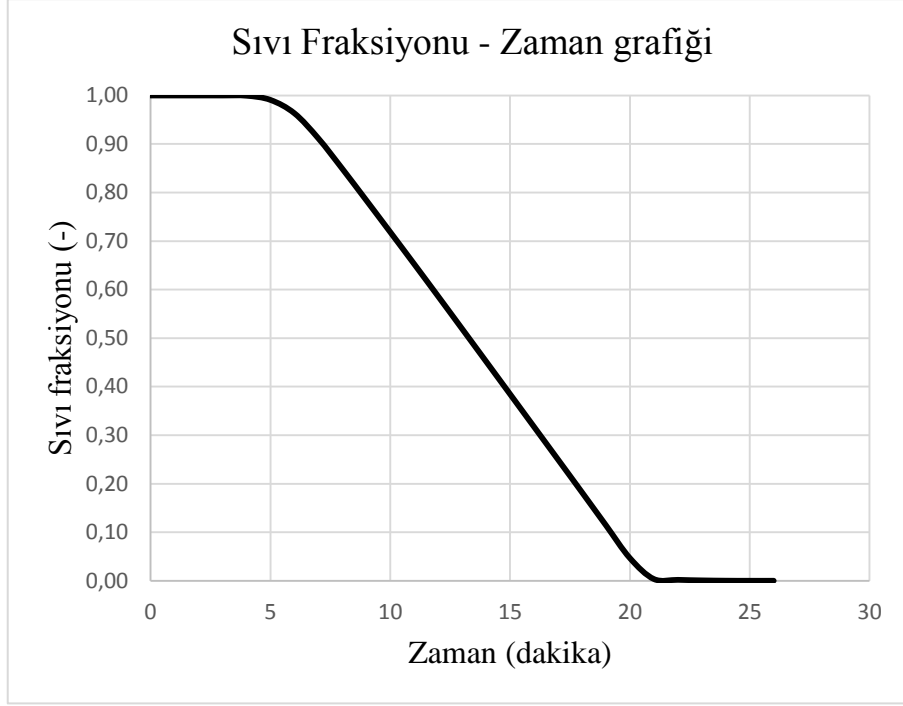
Şekil 4. 12. FDM erime analizleri için zamana bağlı su çıkış sıcaklığı grafiği

FDM tamamen eridikten sonra analiz durdurulmuş ve 2. durum olarak FDM'nin katılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda 31. dakika sonundaki durum yeni analizlerin başlangıcı olarak kabul edilmiş, kavite duvarlarında bulunan uniform olmayan ısı akısı UDF kaldırılmış ve güneşin kesildiği durum için analizler yapılmıştır. FDM katılaşma durumu için HAD sonuçlarından elde edilen zamana bağlı sıvı fraksiyonu görüntüleri Şekil 4.13'te verilmiştir.

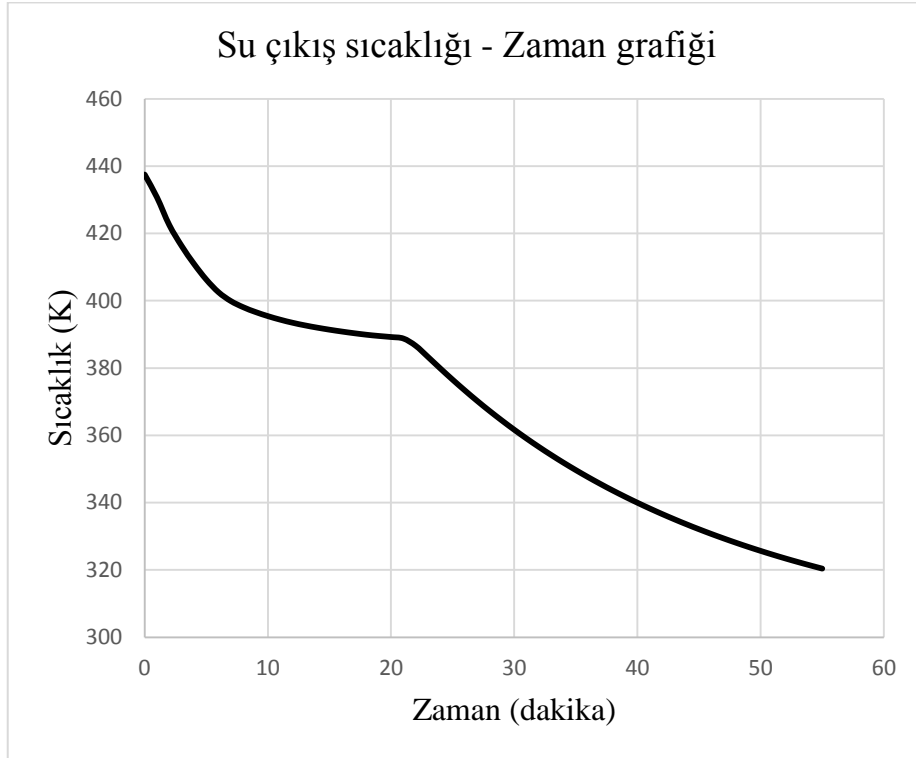


Şekil 4. 13. FDM katılaşma analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu dağılımı

Şekil 4.13'de verilen FDMnin sıvı oranı dağılımına göre, katılaşma/donma ilk olarak alt cidarlarda başlamıştır. Bunun sebebi alt uç cidarlardan dış havaya olan ısı kaybının da fazla olmasıdır. Bu nedenle bu bölgeler daha fazla soğumuştur. Hem yalıtım katmanı olan havaya hem de ısı transfer akışkanı olan su katmanına olan ısı transferi nedeniyle FDM hem üst hem alt cidarlardan katılaşmaya başlamıştır. 20. dakikanın sonunda ise FDM sıvı oranı 0 yani tamamen katıdır.



Şekil 4. 14. FDM katılaşma analizleri için zamana bağlı sıvı fraksiyonu grafiği

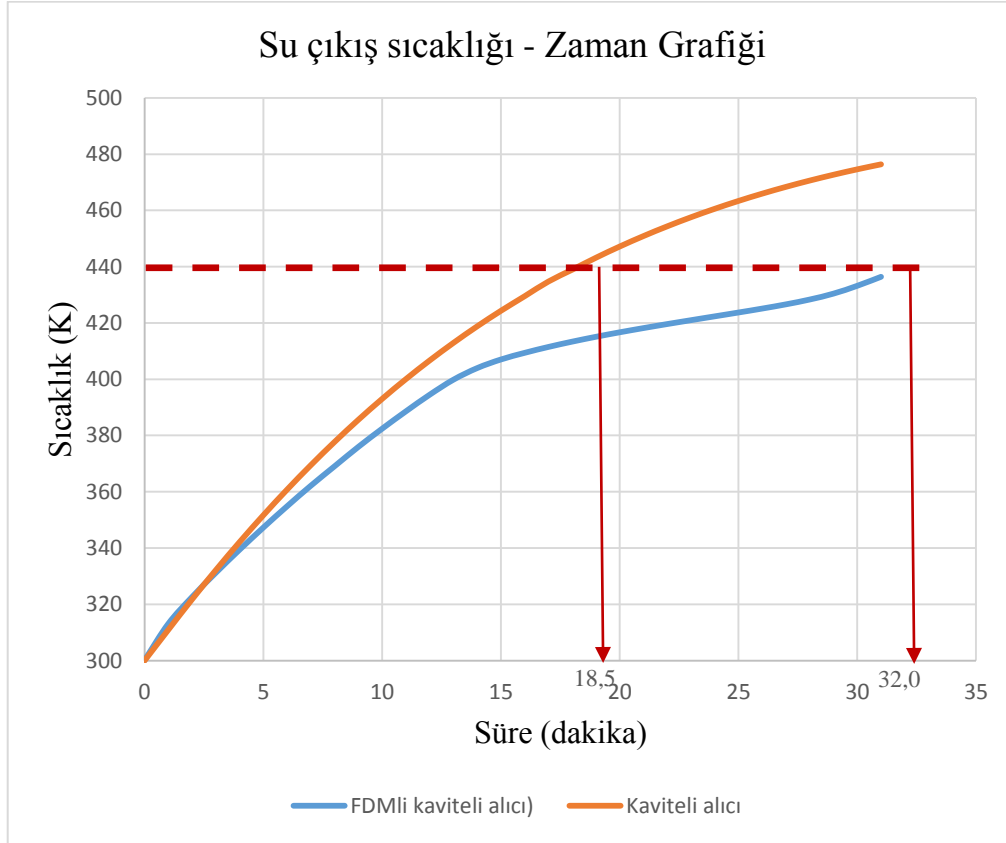


Şekil 4. 15. FDM katılaşma analizleri için zamana bağlı su çıkış sıcaklığı grafiği

Şekil 4.14 FDM'nin zamana bağlı katılaşma oranını (sıvı fraksiyonunu) göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere FDM 5. dakikada katılaşmaya başlamıştır ve tamamen donma süresi 21. dakikadır. Beklenildiği üzere FDMnin katılaşma süresince sıcaklığı neredeyse sabittir.

uğratarak, alıcı üzerindeki direkt ışınım değeri sıfırlanarak, iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki zamana bağlı değişim incelenmiştir (Şekil 4.18).

Aşağıdaki grafikte, FDM entegreli kaviteli alıcı ve FDM katmanı bulunmayan aynı boyutlardaki yalın kaviteli alıcı üzerine aynı miktarda direkt ışınım akısı uygulanarak, zamana bağlı HAD sayısal analizleriyle, her iki alıcı çıkışındaki iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi elde edilmiştir.



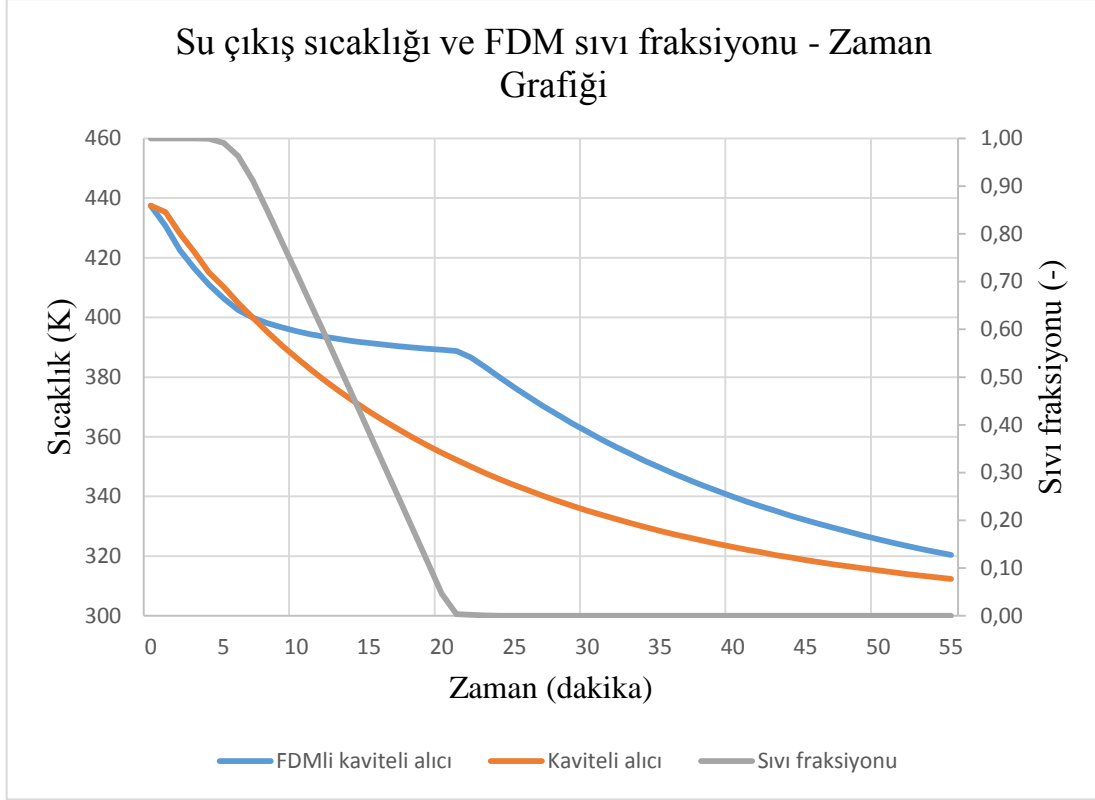
Şekil 4. 17. Direk ışınımın bulunduğu durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile kaviteli alıcıda iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.17’de Direk ışınımın bulunduğu durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile kaviteli alıcıda iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi nin grafiği verilmiştir. Bölüm 4.1’de FDM entegreli kaviteli alıcı için yapılan FDM’nin erime analizlerinin sınır şartları tamamıyla kaviteli alıcı için de aynıdır. Sistem başlangıç ve suyun giriş sıcaklığı 300K’dir. Aynı başlangıç koşullarında yapılan analizler sonucunda, FDM entegreli kaviteli alıcıda FDM’nin eridiği süreçte iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki zamana bağlı artış oranı düşük olmasına karşın, FDM entegresiz yalın kaviteli alıcıdaki iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki zamana bağlı artış oranı çok daha fazla olmuştur. Bu bağlamda, 31. dakikada sonunda FDM entegreli kaviteli alıcıda suyun çıkış sıcaklığı

436,41 K olurken, FDM entegresiz kaviteli alıcıda bu sıcaklık 476,38 K olmuştur. Bunun nedeni direkt ışınımına bağlı ışınım akısının bir miktarının FDM entegreli kaviteli alıcıdaki FDM tarafından depolanmasıdır. Bu tez kapsamında hedeflenen iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığı 440K olup, 300K başlangıç değerinden bu değere FDM entegreli kaviteli alıcı 32 dakika sonra ulaşabilirken, FDM bulunmayan yalın kaviteli alıcıda 440K sıcaklığa 18.5 dakika sonra ulaşıldığı görülmektedir. Direkt ışınım altındaki ısıtma durumunda 440K değerine 13.5 dakika sonra ulaşılması, parabolik oluk tür güneş kolektörleri için bir sorun teşkil etmemektedir. Çünkü bu tür sistemlerde iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığı değeri çalışma koşulu olarak belirlenen hedef değere ulaştıktan sonra sabit tutulmakta olup, asıl önemli sorun ise bulut geçişlerine bağlı direkt ışınım kesintilerinde iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki dalgalanma olmaktadır. Dolayısıyla sistemin devreye alınması sonrası, iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının 440K değerinde kararlı rejime ulaşmasındaki 13,5 dakikalık gecikme bu tür sistemlerde bir sorun teşkil etmemekte olup, 440K hedef değere ulaşıldığı durumdaki ani direkt ışınım kesintilerindeki iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki düşmeye bağlı dalgalanmalar bu tür sistemler için en önemli problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu kapsamda, direkt ışınımın kesitiye uğradığı durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile FDM bulunmayan yalın kaviteli alıcının iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişiminin sayısal analizi yapılarak Şekil 4.18’de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Bu grafikte, direkt ışınımın kesitiye uğradığı durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile FDM bulunmayan yalın kaviteli alıcının iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişiminin yanısıra, FDM sıvı fraksiyonu değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği de görülmektedir.

Bu analizde, Bölüm 4.1’de FDM entegreli kaviteli alıcı için yapılan FDM’nin katılma analizlerinin sınır şartları tamamıyla kaviteli alıcı için de aynı alınmıştır. Direkt ışınımın olduğu durumda elde edilen 440 K iş akışkanı (su) sıcaklığının elde edildiği iş akışkanı (su) giriş sıcaklığı olan 437,52 K değeri her iki tür alıcı için aynı alınmış ve direkt ışınım akısı değeri sıfırlanarak, direkt ışınımın bulutlanma nedeniyle olmadığı durum için analizler yapılmıştır. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4. 18. Direkt ışınının kesintiye uğradığı durumda FDM entegreli kaviteli alıcı ile kaviteli alıcıda iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Yukarıdaki grafikte iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığı eğrileri değerlendirildiğinde, direkt ışınının kesintiye uğradığı, dolayısıyla da alıcı üzerindeki direkt ışınım akısının sıfır değerine düştüğü durumda, FDM'siz kaviteli alıcı çıkışındaki iş akışkanı (su) sıcaklığında, dış ortama olan ısı kayıpları nedeniyle, ciddi oranda düşüş meydana geldiği, FDM entegreli alıcıda ise FDM tarafından daha önce depolanmış enerjinin, bu süreçte iş akışkanına aktarılması sayesinde su çıkış sıcaklığındaki düşüşün çok daha az olduğu görülmektedir. FDM entegreli kaviteli alıcıda FDM'nin faz değiştirmeye başladığı 5.dakikadaki su çıkış sıcaklığı 406,3K değerindeyken, kaviteli alıcıda bu değer 410,2K'dir. Diğer yandan FDM'nin tamamen katılaşmasına kadar geçen sürede (21.dakika) FDM entegreli alıcıda su çıkış sıcaklığı 388,8K değerine düşmesine karşın, FDM bulunmayan kaviteli alıcıda ise su çıkış sıcaklığı 352,2K değerine düşmüştür. Bu bağlamda, FDM entegreli alıcıda bu süreçte su çıkış sıcaklığındaki düşme yalnızca 17,5K olurken, FDM entegresiz alıcıda ise 58K olmuştur. Bu sonuca göre, alıcıya FDM entegresi özellikle gün içinde bulut geçişleri sırasındaki direkt ışınım kesintilerinde, yaklaşık 16 dakika boyunca, iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki dalgalanmaları azaltarak, sistemin daha stabil çalışmasına olanak sağlamaktadır. FDM entegreli alıcıda donma sırasında sıcaklıklar neredeyse sabit kaldığından, FDM tamamen katılaşmış durumda da su sıcaklığı FDM entegresiz alıcıya göre

daha yüksek değerde olmuştur. Bu sayede FDM entegreli alıcıdan aynı sürede daha yüksek sıcaklıkta su çıkış sıcaklığı elde edilmeye devam edilmiştir. Bu da direkt ışınının tamamen kesildiği akşam saatlerinde de FDM entegreli alıcıdan bir süre daha sıcak su eldesinin devam edebileceğini ve kısa süreli bulutlanma kaynaklı direkt ışınım kesintilerinde ise, iş akışkanının alıcıdan çıkış sıcaklığındaki dalgalanmanın önemli oranda azalacağını göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, parabolik oluk kollektörler için kullanılabilir kaviteli, faz değiştiren malzemeli ve yalıtımlı yeni bir güneş alıcısı tasarlanmıştır. Optik verimliliği etkileyen en önemli parametre, güneş ışınımının yoğunlaştığı alıcı tarafından absorbe edilen net ısı miktarıdır. Bu bağlamda, optimizasyon parametreleri olarak üç farklı geometri (üçgen, dikdörtgen ve çokgen), üç farklı açıklık genişliği ve yüksekliği ve kavite alıcısının parabolik yansıtıcı yüzeye ilişkin üç farklı konumu alınmıştır. Çalışmanın diğer aşaması alıcının termal modeli ve HAD analizleridir. Geleneksel borulu alıcıda model doğrulama çalışması LS-2 parabolik oluk kollektör sisteminde kullanılan deneysel sonuçlar ile yapılmıştır. HAD sonuçları ile deneysel veriler arasında hata oranı %0,57 olup, iş akışkanını katmanlı modeli doğrulanmıştır. FDM'nin erime modellemesi için iç içe geçirilmiş borulardan oluşan ve ısı transfer akışkanı ile FDM katmanları bulunan deneysel bir model seçilmiştir. Deneysel elde edilen FDM sıcaklığı ile HAD sonuçları karşılaştırılmış ve FDM modeli %3,90 hata oranı ile doğrulanmıştır. Literatür tarandığında, birçok çalışmada termal olarak kararlı bir forma sahip olması ve çalışma sıcaklık aralığı nedeniyle FDM olarak yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular:

- Her bir parametrenin yanıt fonksiyonuna (\dot{Q}_{abs}) etkisi incelenirken, yanıt fonksiyonuna en az etkiye sahip parametrenin geometri (geo) olduğu görülmüştür.
- Kavite yüksekliğinin (b) yanıt fonksiyonu üzerindeki etkisi küçük olmasına rağmen, kavite genişliği ve kavite yüksekliğinin beraber artışının optik verim üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür.
- Sistemin en etkili parametresi kaviteli alıcının parabolik kollektöre göre konumu (h) olmuştur.
- Alıcının iç yüzeyleri tarafından absorbe edilen net ışınım miktarı (\dot{Q}_{abs}) ve optik verimi (η_{opt}) maksimuma çıkaran optimum model, optimizasyon metodolojisi ile hesaplanmış ve sonuç olarak optimum alıcı geometrisinin çokgen olduğu, alıcının odak noktasına yerleştirildiği, kavite yüksekliği ve genişliği eşit ve 0,05 m olan kaviteli alıcının en iyi model olduğu görülmüştür.

- Yapılan direkt ışıınının olduğu analizlerde ilk olarak FDM erime durumu için HAD analizleri yapılmıştır. FDM'nin tamamen erime süresi 31. dakikadır. Buna depolama süresi de denilebilir.
- Direkt ışıının altındaki analizlerde, hedef iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığı olan 440K değerine FDM entegreli kaviteli alıcıda, yalın kaviteli alıcıya kıyasla 13,5 dakika sonra ulaşılmış olup, parabolik oluk tür güneş kollektörleri için ilk çalışmada kararlı rejime ulaşılmadaki bu gecikme önemli bir sorun teşkil etmemektedir.
- Bu tür sistemlerde iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığı değeri çalışma koşulu olarak belirlenen hedef değere ulaştıktan sonra sabit tutulmakta olup, asıl önemli sorun ise bulut geçişlerine bağlı direkt ışıının kesintilerinde iş akışkanı (su) çıkış sıcaklığındaki dalgalanma olmaktadır.
- FDM'nin tamamen eridiği analiz sonucunda güneş ışıınının tamamen kesildiği durum için HAD analizleri yapılmıştır. FDM 5. dakikadan itibaren katılaşmaya başlarken tamamen katılaşma süresi 21 dakika olarak görülmüştür. FDM'nin katılaşma süresince (16 dakika) su çıkış sıcaklığındaki dalgalanma yalnızca 17,5°C iken FDM entegresiz alıcıda bu değer 58°C olmuştur.
- Güneş alıcısına FDM entegresi özellikle gün içinde bulut geçişleri sırasında dakika boyunca düşük su çıkış sıcaklığı dalgalanmaları ile sistemin daha stabil çalışmasına olanak sağlamaktadır.
- FDM entegreli alıcıda donma sırasında sıcaklıklar neredeyse sabit kaldığından, FDM tamamen katılaşta da su sıcaklığı FDM entegresiz alıcıya göre daha yüksek değerde olmuştur. Bu sayede FDM entegreli alıcıdan aynı sürede daha yüksek sıcaklıkta su çıkış sıcaklığı elde edilmeye devam edilmiştir. Bu da güneşin tamamen kesildiği akşam saatlerinde de FDM entegreli alıcıdan bir süre daha sıcak su veya buhar eldesinin devam edebileceğini göstermiştir.
- Bu çalışmanın özgün yanı olan FDM entegreli kaviteli alıcı tasarımı ile FDM malzeme kullanımının; çalışmanın başında da öngörüldüğü üzere kısa süreli bulutlanma kaynaklı direkt güneş ışıının kesintilerinde parabolik oluk tür güneş kollektörlerinde en önemli sorunlardan birisi olan, iş akışkanı çıkış sıcaklığındaki dalgalanmayı FDM katmanı bulunmayan alıcıya oranla yüzde 9,8 oranında azalttığı görülmüştür.

- İş akışkanı çıkış sıcaklığındaki dalgalanmanın azalması parabolik oluk tür güneş kollektörlerinin kullanıldığı ısıl proseslerin ticari anlamda daha da yaygınlaşmasını sağlayacaktır.
- Böylelikle yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin yoğunlaştırıcı güneş kollektörleri ile ısıl proseslerde kullanımı, karbon salımının da azalmasında önemli bir etki oluşturacaktır.

5.2. Öneriler

Bu doktora tez çalışması patentli FDM entegreli, kendinden yalıtımlı, kaviteli bir alıcının optik ve ısıl analizlerini kapsamaktadır. Bu çalışma yeni bir güneş alıcısına temel oluşturmuş, gelecek çalışmalar için bir temel teşkil eden ve devam çalışması konusunda oldukça geniş alana sahip bir bilimsel alan açmıştır. Gelecek çalışmalarda,

- Öncelikle bu çalışmada yapılan ışınsal optimizasyonun yanısıra, sistem ısıl açıdan da incelenerek bütünsel bir yaklaşım optimizasyonu ile sistem daha verimli hale getirilebilir.
- Gerçek ortamda deneysel çalışmaların yapılması ile farklı koşullarda ve mevsimler olarak sistem değerlendirilip uygun çalışma koşulları belirlenebilir.
- Alıcı katman kalınlıkları ve katman içerikleri için yapılacak parametrik optimizasyon ile verim artırmaya yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Yalıtım kalınlığı, vakum, poliüretan vb malzemelerin yalıtım katmanına uygulanması ile ısıl kayıpların önüne geçilmek üzere çalışılabilir.
- FDM'nin konumu ve kalınlığı birer parametre olarak belirlenerek bir optimizasyon çalışması yapılabilir.
- Isı transfer akışkanı ve FDM'nin farklı katmanlarda olduğundaki sonuçlarla sistem için daha uygun katmanlar belirlenebilir.
- Farklı ortam koşulları, ışınlım vb. şartlarında HAD analizleri yapılarak sistemin yaz ve kış performansları ortaya koyulabilir.
- Farklı FDM-Isı transfer akışkanı kombinasyonlarının birarada değerlendirilmesi yapılabilir.
- Sistemin en gerçekçi yıllık performans değerlerinin ve verim eğrilerinin elde edilmesi için deneysel çalışmalar yapılabilir.
- FDM geliştirilmesi üzerine çalışılabilir ve bu bağlamda nano malzeme katkıları, FDM katmanında ısı transfer etkinleştirilmesi için kanatçıklı katman tasarımı vb. ısı transfer sürelerini geliştirmek üzerine çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Y. Goswami and F. Kreith, *Energy Conversion*, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [2] S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, California: Academic Press, 2009.
- [3] K. Lovegrove and W. Stein, *Concentrating Solar Power Technology Principles, Developments and Applications*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [4] R. Senthil, "Effect of charging of phase change material in vertical and horizontal rectangular enclosures in a concentrated solar receiver," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, pp. 0-10, 2020.
- [5] D. Guerraiche, C. Bougriou, K. Guerraiche, L. Valenzuela and Z. Driss, "Experimental and numerical study of a solar collector using phase change material as heat storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, 2020.
- [6] Z. Badiei, M. Eslami and K. Jafarpur, "Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling," *Energy*, vol. 192, 2020.
- [7] D. Wang, H. Liu, Y. Liu, T. Xu, Y. Wang, H. Du, X. Wang and J. Liu, "Frost and High-temperature resistance performance of a novel dual-phase change material flat plate solar collector," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 201, 2019.
- [8] M. A. Bashir and A. Giovannelli, "Design optimization of the phase change material integrated solar receiver: A numerical parametric study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, 2019.

- [9] R. Senthil and M. Cheralathan, "Enhancement of the thermal energy storage capacity of a parabolic dish concentrated solar receiver using phase change materials," *Journal of Energy Storage*, vol. 25, 2019.
- [10] K. Chopra, V. V. Tyagi, A. K. Pathak, A. K. Pandey and A. Sari, "Experimental performance evaluation of a novel designed phase change material integrated manifold heat pipe evacuated tube solar collector system," *Energy Conversion and Management*, vol. 198, 2019.
- [11] K. Chopra, A. K. Pathak, V. V. Tyag, A. K. Pandey, S. Anand and A. Sari, "Thermal performance of phase change material integrated heat pipe evacuated tube solar collector system: An experimental assessment," *Energy Conversion and Management*, vol. 203, 2020.
- [12] R. Loni, B. Ghobadian, A. B. Kasaeian, M. M. Akhlaghi, E. Bellos and G. Najafi, "Sensitivity analysis of parabolic trough concentrator using rectangular cavity receiver," *Applied Thermal Engineering*, vol. 169, 2020.
- [13] H. Liang, M. Fan, S. You, J. Xia, H. Zhang and Y. Wang, "An analysis of the heat loss and overheating protection of a cavity receiver with a novel movable cover for parabolic trough solar collectors," *Energy*, vol. 158, pp. 719-729, 2018.
- [14] A. M. Daabo, S. Mahmoud and R. K. Al-Dadah, "The effect of receiver geometry on the optical performance of a small-scale solar cavity receiver for parabolic dish applications," *Energy*, vol. 114, no. 513-525, 2016.
- [15] R. G. Patil, S. V. Panse, J. B. Joshi and V. H. Dalvi, "Alternative designs of evacuated receiver for parabolic trough collector," *Energy*, vol. 155, pp. 66-76, 2018.
- [16] S. Soltani, M. Bonyadi and V. M. Avargani, "A novel optical-thermal modeling of a parabolic dish collector with a helically baffled cylindrical cavity receiver," *Energy*, vol. 168, pp. 88-98, 2019.

- [17] X. Li, H. Chang, C. Duan, Y. Zheng and S. Shu, "Thermal performance analysis of a novel linear cavity receiver for parabolic trough solar collectors," *Applied Energy*, vol. 237, pp. 431-439, 2019.
- [18] V. K. Jebasingh and G. M. Joselin Herbert, "A review of solar parabolic trough collecto," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1085-1091, 2016.
- [19] R. Cai, Z. Sun, H. Yu, E. Meng, J. Wang and M. Dai, "Review on optimization of phase change parameters in phase change material building envelopes," *Journal of Building Engineering*, vol. 35, 2021.
- [20] H. Sattari, A. Mohebbi, M. M. Afsahi and A. Azimi Yancheshme, "CFD simulation of melting process of phase change materials (PCMs) in a spherical capsule," *International Journal of Refrigeration*, vol. 73, pp. 209-218, 2017.
- [21] B. Kalidasan, M. A. Hassan, A. K. Pandey and S. Chinnasamy, "Linear cavity solar receivers: A review," *Applied Thermal Engineering*, vol. 221, 2023.
- [22] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [23] M. Tutar and I. Veci, "Performance analysis of a horizontal axis 3-bladed Savonius type wave turbine in an experimental wave flume (EWF)," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 8-25, 2016.
- [24] M. Hatami, M. C. M. Cuijpers and M. D. Boot, "Experimental optimization of the vanes geometry for a variable geometry turbocharger (VGT) using a Design of Experiment (DoE) approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 1057-1070, 2015.
- [25] W. J. Hill and W. G. Hunter, "A Review of Response Surface Methodology: A Literature Survey," *Technometrics*, vol. 8, no. 4, pp. 571-590, 1996.

- [26] W.-H. Chen, M. C. Uribe, E. E. Kwon, K.-Y. A. Lin, Y.-K. Park, L. Ding and L. H. Saw, "A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, 2022.
- [27] B. Şimşek, Y. T. İç and E. H. Şimşek, "A RSM-Based Multi-Response Optimization Application for Determining Optimal Mix Proportions of Standard Ready-Mixed Concrete," *Arab J Sci Eng*, vol. 41, pp. 1435-1450, 2016.
- [28] T. Wendelin, A. Dobos and A. Lewandowski, "SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems," National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013.
- [29] V. E. Dudley, G. J. Kolb, A. R. Mahoney, T. R. Mancini, C. W. Matthews, M. Sloan and D. Kearney, "Test results: SEGS LS-2 solar collector," Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, 1994.
- [30] A. A. Hachicha, I. Rodríguez, R. Capdevila and A. Oliva, "Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 581-592, 2013.
- [31] L. Pratico, N. Fronza, R. Bartali, A. Chiappini, E. Sciubba, J. Gonzalez-Aguilar and L. Crema, "Radiation propagation in a hierarchical solar volumetric absorber: Results of single-photon avalanche diode measurements and Monte Carlo ray tracing analysis," *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 482-493, 2021.
- [32] Z. D. Cheng, Y. L. He, F. Q. Cui, R. J. Xu and Y. B. Tao, "Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1770-1784, 2012.

- [33] A. Moradian, M. Ameri and S. Majidi, "Melting expedition in horizontal triplex tube heat exchangers via radial and combined radial-axial fins," *Journal of Energy Storage*, vol. 56, 2022.
- [34] M. J. Hosseini, M. Rahimi and R. Bahrampoury, "Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 128-136, 2014.
- [35] J. M. Mahdi and E. C. Nsofor, "Solidification enhancement of PCM in a triplex-tube thermal energy storage system with nanoparticles and fins," *Applied Energy*, vol. 211, pp. 975-986, 2018.
- [36] W.-B. Ye, D.-S. Zhu and N. Wang, "Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 3871-3884, 2011.
- [37] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman and A. T. Mohammad, "Experimental study of PCM melting in triplex tube thermal energy storage for liquid desiccant air conditioning system," *Energy and Buildings*, vol. 60, pp. 270-279, 2013.
- [38] B. Cárdenas and N. León, "High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 724-737, 2013.
- [39] J. P. d. Cunha and P. Eames, "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review," *Applied Energy*, vol. 177, pp. 227-238, 2016.
- [40] K. Pielichowska and K. Pielichowski , "Phase change materials for thermal energy storage," *Progress in Materials Science*, vol. 65, pp. 67-123, 2014.