



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**TRAPEZ YÜZEY GEOMETRİLİ GÜNEŞ
ENERJİLİ HAVALI KOLLEKTÖRÜN HAD
SİMÜLASYONU İLE PERFORMANS
ANALİZİ**

Ahmet ERTAN

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet ERTAN tarafından hazırlanan “Trapez Yüzey Geometrilili Güneş Enerjili Havalı Kollektörün HAD Simülasyonu ile Performans Analizi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Termodinamik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

.....

Danışman

Doç. Dr. Selçuk DARICI

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet ERTAN

Tarih: 27.10.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

TRAPEZ YÜZEY GEOMETRİLİ GÜNEŞ ENERJİLİ HAVALI KOLLEKTÖRÜN HAD SİMÜLASYONU İLE PERFORMANS ANALİZİ

Ahmet ERTAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Termodinamik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Selçuk DARICI

2023, 97 Sayfa

Jüri

Danışman: Doç. Dr. Selçuk DARICI
Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ulaş ATMACA

Günümüzde gelişen teknoloji ile fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artması ile güneş enerjili sistemlerin araştırılması ve kullanılması konularında çalışmalar artmaktadır. Bilinen bir teknik olan güneş enerjisi ile su ısıtma sistemlerinin yanı sıra kurutma, binalarda mahal ısıtması, nemlendirme veya seracılık gibi alanlarda ön ısıtma proseslerinde kullanılmak üzere güneş enerjili havalı kollektörler üzerine halen çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada güneş enerjili havalı kollektörün performansını artırmaya yönelik, farklı boyutlarda trapez geometrilere sahip yutucu plakalı kollektörler deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Farklı çalışma parametreleri için, Solidworks Flow Simulation programı kullanılarak akış analizleri sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Düz ve 45° açıda trapez yutucu plakalı iki kollektör deneysel olarak test edilmiş ve aynı kollektörlerin HAD analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Testler ve analizler akış havası için 0,01-0,1 kg/s aralığında altı farklı kütle akış debisi ve 600, 800 ve 1000 W/m² güneş ışıınımı değerleri için gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri ile deney sonuçları arasında en fazla % 8 sapma görülmüştür. Üç boyutlu sayısal analiz sonuçlarının deney sonuçları ile uyumu problemin çözümünde yapılan sayısal analiz modelini doğrulamaktadır. Çalışma sonucunda 1000 W/m² ışıınım ve 0,01 kg/s kütle debisi için en yüksek ısı verim M2 kollektörde $\epsilon/D_h = 0,45$ ve $P/\epsilon = 8$ için %80 olarak bulunmuştur. En uygun kollektörün, 45° trapez açılı yutucu plakalı M2 model olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deneysel çalışma, Havalı kollektör, Parametrik çalışma, Sayısal analiz, Trapez yutucu plaka,

ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR AIR COLLECTOR WITH TRAPEZOIDAL SURFACE GEOMETRY USING CFD SIMULATION

Ahmet ERTAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Selcuk DARICI

2023, 97 Pages

Jury

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Selcuk DARICI
Assoc. Prof. Dr. Dilek Nur OZEN
Asst. Prof. Dr. Sukru Ulas ATMACA**

Nowadays, with the developing technology, the reduction of fossil fuel consumption and the increasing tendency towards renewable energy sources, studies on the research and use of solar energy systems are increasing. In addition to water heating systems with solar energy, which is a known technique, studies are still being carried out on solar air collectors to be used in preheating processes in areas such as drying, space heating in buildings, humidification or greenhouse cultivation. In this study, absorber plate collectors with trapezoidal geometries of different sizes are experimentally and numerically investigated to improve the performance of solar air collectors. For different operating parameters, flow analyses were performed numerically using Solidworks Flow Simulation program. Two collectors with flat and 45° angle trapezoidal absorber plates were experimentally tested and compared with CFD analysis results of the same collectors. The tests and analyses were carried out for six different mass flow rates ranging from 0.01-0.1 kg/s for flow air and solar irradiance values of 600, 800 and 1000 W/m². The maximum deviation between CFD analyses and experimental results was 8%. The agreement of the three-dimensional numerical analysis results with the experimental results confirms the numerical analysis model used to solve the problem. As a result of the study, the highest thermal efficiency for 1000 W/m² irradiation and 0.01 kg/s mass flow rate was found to be 80% for $e/D_h = 0.45$ and $P/e = 8$ for M2 collector. It is concluded that the most suitable collector is the M2 model with a 45° trapezoidal angle absorber plate.

Keywords: Experimental study, Solar air collector, Parametric study, Theoretical analysis, Trapezoidal absorber plate.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yeni bir havalı güneş kolektörünün geliştirilmesi, performans analizi ve simülasyon tekniğinin deneysel çalışma ile karşılaştırılarak model doğrulaması araştırılmıştır.

Bu çalışmanın, havalı güneş kolektörlerinin geliştirilmesi üzerine gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutmasını temenni ederim.

Lisansüstü çalışmalarımın her aşamasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Selçuk DARICI'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmayı bilimsel olarak yürüten, deney tesisatının kurulması, ölçme sisteminin oluşturulması, deneylerin yapılması aşamalarında SOLİMPEKS A.Ş. 'ye, İnnorma ArGe 'ye ve yöneticim Mahmut Sami BÜKER'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez aşamam sürecinde desteklerini benden esirgemeyen aileme ve sevdiklerime, daima yanımda oldukları için teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet ERTAN
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEZİN AMACI	4
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
4. GÜNEŞ ENERJİLİ HAVA KOLLEKTÖRLERİ.....	14
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
5.1. Deneysel Çalışma	18
5.1.1. Ölçümler ve kullanılan cihazlar	23
5.1.2. Deneylerin yapılışı	25
5.1.3. Belirsizlik analizi.....	25
5.1.4. Kütle debisi.....	26
5.1.5. Kollektör verimi	27
5.1.6. Reynolds sayısı.....	28
5.1.7. Nusselt sayısı.....	30
5.1.8. Deney setinin doğrulanması	31
5.2. HAD Simülasyonu	32
5.2.1. Matematik model ve türbülans çözücü.....	34
5.2.2. Başlangıç ve sınır şartları	38
5.2.3. Çalışma parametreleri.....	39
5.3. Enerji Analizi	40
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	41

6.1. Deneysel Çalışmanın Sonuçları.....	41
6.1.1. Güneş ışıının ve sıcaklıkların zamanla değışimi.....	41
6.1.2. Havanın sıcaklık farkı sonuçları.....	51
6.1.3. Güneş ışıının havanın sıcaklık farkına etkisi	55
6.1.4. Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin değışimi.....	59
6.1.5. Hava debisinin kollektörün ısı verimine etkisi.....	62
6.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Sonuçları	64
6.2.1. Model 1 kollektör HAD analiz sonuçları	66
6.2.2. Model 2 kollektör HAD analiz sonuçları	73
6.3. Deneysel ve HAD Analizi Sonuçlarının Kıyaslanması.....	79
6.3.1. Tüm kollektörlerin HAD analiz sonuçlarının kıyaslanması.....	80
7. SONUÇLAR	91
8. KAYNAKLAR.....	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Dünya güneş enerjisi kurulu kapasitesi (Ourworldindata, 2023)	1
Şekil 1.2 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli (GEPA, 2023)	2
Şekil 4.1 Güneş kolektörlerinin sınıflandırılması	14
Şekil 4.2 Güneş enerjili hava kolektörleri üzerinde yapılan modifikasyonlar (Prakash vd., 2022)	15
Şekil 4.3 Güneş enerjili hava kolektörünün şematik diyagramı (Chabane vd., 2014)	16
Şekil 5.1 Güneş enerjili havalı kolektör şematik gösterimi	19
Şekil 5.2 Kolektör alüminyum kasası ve taban sacı	20
Şekil 5.3 Kolektör kasasının yalıtımı	20
Şekil 5.4 Kolektör yutucu plakaları a) Düz plaka, b) Trapez plaka	21
Şekil 5.5 Yutucu plaka üzerine konumlandırılan K tipi termokupllar	21
Şekil 5.6 Deneyler için hazırlanan M1 ve M2 model kolektörler	22
Şekil 5.7 Model 1 kolektör enine kesit görünüşü (ölçüler mm'dir.)	22
Şekil 5.8 Model 2 kolektör enine kesit görünüşü (ölçüler mm'dir.)	23
Şekil 5.9 K tipi termokupl kablosu	23
Şekil 5.10 Hız ölçümü için kullanılan anemometre	24
Şekil 5.11 Güneş ışıınımı ölçme cihazı	24
Şekil 5.12 Veri kayıt cihazı	25
Şekil 5.13 Deneysel ve teorik Nusselt sayılarının kıyaslanması (M1 kolektör)	32
Şekil 5.14 Sayısal analizdeki akış alanı	33
Şekil 5.15 Havalı kolektör akış hacmi	33
Şekil 5.16 Havalı kolektör sınır şartları	38
Şekil 5.17 Trapez yutucu plakanın parametrik ölçüleri	39
Şekil 6.1 Anlık güneş ışıınımlarının zamana bağlı değişimleri	41
Şekil 6.2 Çevre sıcaklığının zamanla değişimi	42
Şekil 6.3 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,01 kg/s)	43
Şekil 6.4 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,02 kg/s)	43
Şekil 6.5 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,03 kg/s)	44
Şekil 6.6 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,05 kg/s)	44
Şekil 6.7 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,07 kg/s)	45
Şekil 6.8 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,1 kg/s)	45
Şekil 6.9 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (M1 model)	46

Şekil 6.10 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (M2 model)	47
Şekil 6.11 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,01 kg/s).....	47
Şekil 6.12 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,02 kg/s).....	48
Şekil 6.13 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,03 kg/s))	48
Şekil 6.14 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,05 kg/s).....	49
Şekil 6.15 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,07 kg/s).....	49
Şekil 6.16 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,1 kg/s).....	50
Şekil 6.17 Yutucu plaka sıcaklıklarının pik değerleri (saat 13:00).....	51
Şekil 6.18 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,01 kg/s)	51
Şekil 6.19 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,02 kg/s)	52
Şekil 6.20 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,03 kg/s)	52
Şekil 6.21 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,05 kg/s)	53
Şekil 6.22 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,07 kg/s)	53
Şekil 6.23 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,1 kg/s)	54
Şekil 6.24 Havanın sıcaklık farklarının pik değerleri (saat 13.00)	55
Şekil 6.25 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,01 kg/s)	55
Şekil 6.26 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,02 kg/s)	56
Şekil 6.27 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,03 kg/s)	56
Şekil 6.28 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,05 kg/s)	57
Şekil 6.29 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,07 kg/s)	57
Şekil 6.30 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,1 kg/s)	58
Şekil 6.31 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,01 kg/s)..	59
Şekil 6.32 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,02 kg/s)..	60
Şekil 6.33 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,03 kg/s)..	60
Şekil 6.34 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,05 kg/s)..	61
Şekil 6.35 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,07 kg/s)..	61
Şekil 6.36 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,1 kg/s)....	62
Şekil 6.37 M1 kollektör ısı veriminin zamanla değişimi	63
Şekil 6.38 M2 kollektör ısı veriminin zamanla değişimi	63
Şekil 6.39 M1 kollektörde eleman ağı sayısına göre havanın sıcaklık profilleri	64
Şekil 6.40 M2 kollektörde eleman ağı sayısına göre havanın sıcaklık profilleri	65
Şekil 6.41 M1 kollektör 600 W/m ² için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri	67

Şekil 6.42 M1 kollektör 800 W/m ² için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri	68
Şekil 6.43 M1 kollektör 1000 W/m ² için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri	69
Şekil 6.44 M1 kollektör 600 W/m ² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri	70
Şekil 6.45 M1 kollektör 800 W/m ² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri	71
Şekil 6.46 M1 kollektör 1000 W/m ² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri	72
Şekil 6.47 M2 kollektör 600 W/m ² ışıını için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri.....	73
Şekil 6.48 M2 kollektör 800 W/m ² ışıını için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri.....	74
Şekil 6.49 M2 kollektör 1000 W/m ² ışıını için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri.....	75
Şekil 6.50 M2 kollektör 600 W/m ² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri	76
Şekil 6.51 M2 kollektörü 800 W/m ² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri	77
Şekil 6.52 M2 kollektör 1000 W/m ² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri	78
Şekil 6.53 M2, M3 ve M4 kollektörlerin kesit alınmış görünümleri	81
Şekil 6.54 1000 W/m ² ışıını için havanın sıcaklık profilleri (0,01 kg/s)	82
Şekil 6.55 1000 W/m ² ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri (0,01 kg/s)...	83
Şekil 6.56 1000 W/m ² ışıını için havanın sıcaklık profilleri (0,1 kg/s)	84
Şekil 6.57 1000 W/m ² ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri (0,1 kg/s).....	85
Şekil 6.58 e/D _h değerlerinin ısı verimine etkisi (I=600 W/m ²).....	86
Şekil 6.59 e/D _h değerlerinin ısı verime etkisi (I=1000 W/m ²).....	86
Şekil 6.60 P/e değerlerinin ısı verime etkisi (I=1000 W/m ²).....	88

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 Kaynak taramasında incelenen çalışmaların yöntem ve bulguları...	12
Çizelge 3.2 Literatürde mevcut farklı yutucu plakalı kollektör çalışmalarının çıktıları (Mund vd., 2021).....	13
Çizelge 5.1 Kollektörlerin teknik özellikleri.....	19
Çizelge 5.2 Ölçülen parametrelerin belirsizlik değerleri	26
Çizelge 5.3 Kütle debisi için belirsizlik değerleri ($\pm\%$).....	27
Çizelge 5.4 Isıl verim belirsizlik değerleri ($\pm\%$).....	28
Çizelge 5.5 Reynolds sayısı belirsizlik değerleri ($\pm\%$).....	29
Çizelge 5.6 Nusselt sayısı için belirsizlik değerleri ($\pm\%$).....	31
Çizelge 5.7 Korelasyonların Reynolds sayısına göre Nusselt değerleri	32
Çizelge 5.8 Malzemelerin termofiziksel özellikleri.....	34
Çizelge 5.9 M2, M3 ve M4 kollektörler için parametre seti.....	40
Çizelge 6.1 M1 kollektörde eleman ağ sayısına göre analiz değerleri	65
Çizelge 6.2 M2 kollektörde eleman ağ sayısına göre analiz değerleri.....	66
Çizelge 6.3 M1 kollektör hava çıkış sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları	79
Çizelge 6.4 M2 kollektör hava çıkış sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları	79
Çizelge 6.5 M1 kollektör yutucu plaka sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları.....	80
Çizelge 6.6 M2 kollektör yutucu plaka sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_c	: Hava kanalı kesit alanı (m^2)
A_p	: Yutucu plaka yüzey alanı (m^2)
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı (J/kgK)
D_h	: Akış kanalının hidrolik çapı (m)
e	: Trapez yüksekliği (m)
$\vec{E}$	: Güneş ışımasını doğu yönü
f	: Sürtünme katsayısı
H	: Kollektör yüksekliği (m)
$\bar{h}$	: Ortalama ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
I	: Güneş ışımasını yoğunluğu (W/m^2)
k	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
L	: Kollektör uzunluğu (m)
$\dot{m}$	: Kütle debisi (kg/s)
Nu	: Nusselt sayısı
$\vec{N}$	: Güneş ışımasını kuzey yönü
Re	: Reynolds sayısı
P	: Trapezler arası mesafe (m)
ΔT	: Havanın sıcaklık farkı ($=T_o-T_i$) ($^{\circ}C$)
ΔT_{p-b}	: Yutucu plaka sıcaklığı ile havanın ortalama yığık sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
U	: Akışkanın kanal içerisindeki ortalama hızı (m/s)
V	: Hava akış hızı (m/s)
W	: Kollektör genişliği (m)
W_1, W_2, W_n	: Bağımsız değişkenlerin belirsizlik değeri
W_R	: R değişkeni için toplam belirsizlik
$\vec{Z}$	: Güneş zenit yönü
α	: Trapez yutucu plaka trapez açısı
$\emptyset_s$	: Güneş azimut açısı
Q_u	: Akışkana aktarılan faydalı ısı (W)
Q_s	: Kollektör yüzeyine gelen ısı (W)

Kısaltmalar

M1	: Model 1 kollektör
M2	: Model 2 kollektör
M3	: Model 3 kollektör
M4	: Model 4 kollektör
RRH	: Bağlı pürüzlülük yüksekliği ($=e/D_h$)
RRP	: Bağlı pürüzlülük mesafesi ($=P/e$)

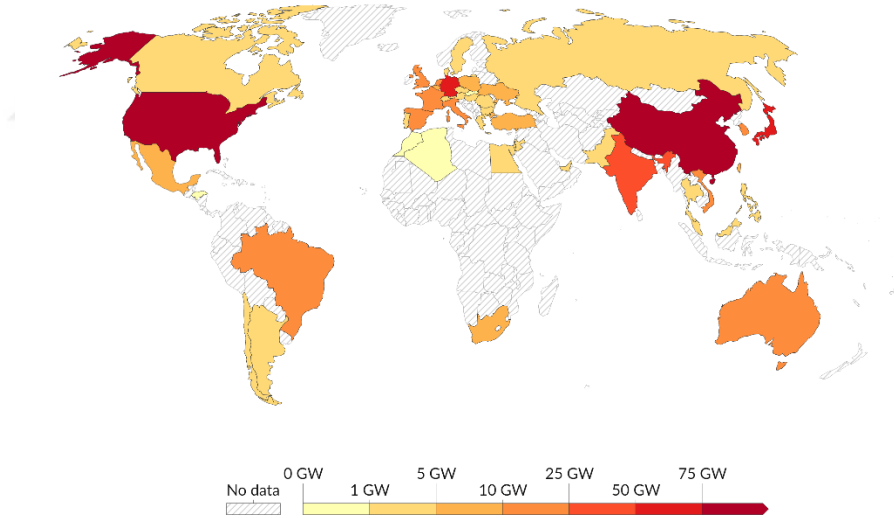
Yunan sembolleri

ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
η	: Kollektör ısı verimi
α	: Yutucu plaka yutma katsayısı
τ	: Cam örtü geçirgenlik değeri
θ	: Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojiadaki hızlı gelişmeler, dünya genelinde enerji talebinde önemli bir artışa neden olmuştur. Bu artışa karşılık son yirmi yılda enerji talebinin karşılanmasında kullanılan birincil enerji kaynağı genellikle fosil yakıtlardır (K Ghosh, 2020). Fakat iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı olması ile insanlar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu nedenle güneş enerjisi; yaygın olması, erişilebilir olması ve sera gazı veya diğer kirleticiler üretmemesi gibi avantajlarından dolayı yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir ilgi kazanmıştır (Kalogirou, 2004a).

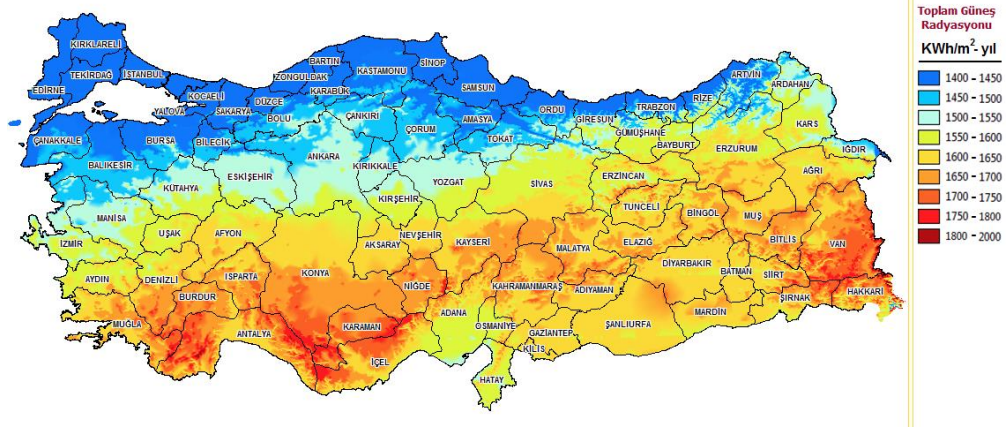
Güneş enerjisi, sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir ve dünya genelinde kullanımı giderek artmaktadır (Şekil 1.1). Enerji tasarrufu sağlaması ve çevresel etkilerin azaltılması için güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılması önemlidir. Güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu ülkelerde, gerekli yatırımlar yapılarak, enerji arz güvenliği sağlanabilir ve fosil yakıtların neden olduğu çevresel etkiler azaltılabilir.



Şekil 1.1 Dünya güneş enerjisi kurulu kapasitesi (Ourworldindata, 2023)

Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir ülkedir. Ülkemiz yılda ortalama 2737 saat (günlük 7.5 saat) güneşlenme süresine sahiptir ve güneş ışınlarının yüzeye düşme açısı bakımından oldukça yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir (Şekil 1.2). Yapılan araştırmalara göre, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli yılda 1527 kWh/m² civarındadır ("Güneş - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı", 2022). Bu potansiyel, ülkenin elektrik üretiminde ve ısınma ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilir. Türkiye'nin kurulu güneş enerjisi kapasitesi

ise 9319 MW değerindedir. Bu nedenle, Türkiye için güneş enerjisi yatırımlarının artırılması, sürdürülebilir bir enerji geleceği açısından önemlidir.



Şekil 1.2 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli (GEPA, 2023)

Antik Yunanlılar ve Romalılar döneminde dini törenlerde nesnelerin tutuşturulmasında kullanılan güneş ışınları, güneş enerjisinin binlerce yıllık kullanımının ilk örneklerindendir. Fakat 19. yüzyılın sonlarına kadar bu enerji elektrik üretiminde kullanılacak bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülememişti. Günümüzde ise en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir ve dünyanın her yerinde evlere ve iş yerlerine elektrik, ısı ve sıcak su sağlamak amacıyla kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Güneş enerjisi; ısıtma, soğutma, aydınlatma ve elektrik üretimi gibi farklı uygulamalarda kullanılabilen yenilenebilir enerji türleri arasında en yaygın ve temiz olan kaynaklardandır (Maraba, 2012). Geleneksel fosil yakıtlara göre çevre dostu olması, tükenme limitinin olmaması, geniş bir yelpazede erişilebilir olması ve ücretsiz bir şekilde edinilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Ancak, güneş enerjisinin; aralıklı olması (sürekli erişilemez), dağınık (difüz) olması ve hava şartlarına bağımlı olması gibi olumsuzlukları da mevcuttur (Saini, 2019). Bu nedenle, güneş enerjisinin depolanması ve kullanılması için verimli ve maliyet açısından etkin çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Güneş enerjisinin en yaygın kullanım şekillerinden birisi de güneş kolektörleridir. Güneş enerjili hava kolektörleri binalarda ısıtma ve havalandırma konusunda ilgi çeken bir seçenek olmaya başlamıştır. Bu kolektörler güneş ışınımını kullanılabilir ısıya dönüştürürler ve böylece fosil yakıtlara bağlı geleneksel ısıtma sistemlerine bağımlılığı azaltırlar. Mahallerin ısıtılmasında, havalandırılmasında, kurutmada ve benzeri

uygulamalarda kullanılabilirler. Güneş enerjili hava kolektörlerinin tasarım ve işletmede basitlik, düşük bakım gereksinimleri ve düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılabilmesi gibi özellikleri, diğer güneş enerjili kolektörlere göre avantajları arasındadır. Ancak, güneş enerjili hava kolektörlerinin verimlerinin düşük olması da bir dezavantaj olarak dikkate alınmalıdır.

Bu tezin amacı, havalı güneş kolektöründen elde edilecek ısı transferini ve ekonomik uygulanabilirliğini artırabilecek bir tasarım sunmak ve değerlendirmektir. Bu tezde, yeni tip bir yutucu plakaya sahip güneş enerjili hava kolektörü tasarlanmış ve düz plakalı kolektör ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2; tezin amacına yönelik detaylı bilgilerin paylaşıldığı, yapılacak uygulamaların kısaca özetlerini içermektedir.

Bölüm 3; mevcut güneş enerjili hava kolektörlerinin tasarım ve türlerini, avantaj-dezavantajlarını, uygulamalarını ve potansiyel iyileştirmeleri konu alan bir literatür taramasını içermektedir.

Bölüm 4; güneş enerjili kolektörler hakkında bilgiler içermektedir. Güneş enerjili hava kolektörlerinin ana kullanımı ve belirli örneklerini göstermekle beraber, bu kolektörlerin sınıflandırması hakkında bilgiler vermektedir.

Bölüm 5; farklı işletme şartları altında tez konusu güneş enerjili hava kolektörünün performans değerlendirmesi için oluşturulan test düzeneğinin ve prosedürünün açıklamasını içermektedir. Bu bölümde ayrıca HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinin yöntemi ve değişken parametrelerin açıklamaları yer almaktadır. Aynı zamanda ölçüm teknikleri ve veri toplamak için kullanılan ekipmanlar tanımlanmaktadır.

Bölüm 6'de kolektör verimi, yüzey sıcaklıkları, havanın çıkış sıcaklığı, sayısal modelleme ve deneysel verileri içeren sonuçlar açıklanmakta ve tartışılmaktadır. Aynı zamanda yeni tasarımın literatürdeki mevcut düz plakalı kolektör sonuçları ile karşılaştırmasını içermektedir.

Bölüm 7'da ise sonuçlar özetlenmekte ve gelecekteki benzer çalışmalar için öneriler bulunmaktadır.

2. TEZİN AMACI

Bu tez çalışmasında, yeni tasarlanan yutucu plakalı kurulumu yapılan güneş enerjili hava kolektörünün performansı incelenecektir. Bu hedef doğrultusunda, aşağıdaki özel amaçlar belirlenmiştir:

1. Mevcut hava kolektörü tasarımlarını ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, eksikliklerini ve sınırlamalarını belirlemek için literatür taraması gerçekleştirmek.
2. Yeni tasarım hava kolektörünün verimliliğini, teorik ve deneysel analiz yoluyla değerlendirmek ve mevcut tasarımlar ile karşılaştırmak.
3. Optimum çalışma koşullarını belirlemek için yeni tasarımda hava akış debisinin, yutucu plaka sıcaklığı ve havanın çıkış sıcaklığı gibi faktörlere olan etkisini incelemek.
4. Yeni tasarımın binaların ısıtmada enerji ihtiyacına olan etkisini ve ekonomik uygunluğunu değerlendirmek.
5. Yeni tasarımın çevresel etkisini değerlendirmek ve düz plakalı kolektör ile karşılaştırmak.
6. Yeni tasarımın, ısıtma, havalandırma ve sıcak su üretimi gibi potansiyel uygulamalarını belirlemek.
7. Yeni tasarımın geliştirilmesi ve optimize edilmesi için öneriler sunmak.

Bu tezin amaçları doğrultusunda, yeni bir güneş hava kolektörü tasarımının performansının incelenmesi, daha verimli ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu çalışma ayrıca Türkiye gibi güneşlenme süresi uzun ve güneş ışınımı yoğun olan ülkelerde yenilenebilir enerjinin daha yaygın bir şekilde kullanılması için de bir adım olacaktır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli göz önünde bulundurulursa, Avrupa'nın en fazla güneş ışınımı alan ülkelerinden birisi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, güneş enerjisi teknolojilerinin kullanımı henüz ülkemizde yeterince yaygın değildir.

Sonuç olarak bu tez, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesine, enerji verimliliğinin artırılmasına ve çevrenin korunmasına yönelik olarak güneş enerjisi teknolojilerinin daha yaygın kullanılması için örnek bir uygulama sunmayı amaçlamaktadır.

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Güneş enerjili hava kolektörü, güneş enerjisinden faydalanarak havanın ısıtılmasını sağlayan bir cihazdır. Bu cihaz vasıtasıyla ısıtılan hava mahal ısıtma ve benzeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Güneş enerjili hava kolektörleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, bir çalışmada Model-I (düz) ve Model-II (trapez) geometriye sahip iki farklı hava kolektörünün enerji ve ekserji karakteristikleri incelenmiştir (Reddy vd., 2022). Farklı eğim açılarında (15° , 30° ve 45°) ve hava debilerinde (0,0039-0,0156 kg/s) testler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, havanın kütle debisindeki artış ile havanın çıkış sıcaklığının azaldığı ancak yutucu plakadan ısı çekme oranının iyileştiği görülmüştür. Buna ek olarak; hava debisini 3 kat artırmak ısı verimliliği % 60 oranında artırmış, ekserji verimliliğini ise % 39 oranında düşürmüştür. Eğim açısını 15° 'den 45° 'ye çıkarmak ise verimliliği % 38-66 oranında artırmıştır.

Yıldız ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada (Yildiz & Yilmaz, 2022), dört farklı güneş enerjili hava kolektörünün ısı performanslarının karşılaştırılmasını içermektedir. Bu kolektörlerin kasa içi yapılarında farklılıklar mevcuttur. Çalışmada, 0,5 m/s aralıklarla farklı hızlarda (1-4 m/s) hava kullanılmıştır. Alüminyum teneke, alüminyum teneke-metal çip kolektör, alüminyum teneke-parafin kolektör ve referans standart bir kolektör kullanılmıştır. Alınan sonuçlara göre; Alüminyum teneke-metal çip kolektör ile edinilen ortalama sıcaklık farkı, 1,5 m/s hava hızında 54°C ile çalışmadaki kolektörler arasındaki en yüksek değer olarak ölçülmüştür. En yüksek ısı verimlilik ise 4 m/s hızda alüminyum teneke-metal çip kolektörde % 53 olarak ölçülürken, alüminyum teneke-parafin kolektörde ise 4 m/s hava hızında % 51'e ulaşmıştır.

Maraba (Maraba, 2012), güneş enerjili hava kolektörlerinin tasarım parametrelerinin tanımlanması amacıyla bir deneysel karşılaştırma gerçekleştirilmiş ve sonuçlara göre güneş enerjili bir hava kolektörü tasarlanmıştır. Çalışmada, gözenekli malzeme kullanımı ile kolektörde ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Açık ve gözenekli malzemeli kanalları içeren birkaç deney gerçekleştirilerek, güneş enerjili hava kolektörü için optimum tasarım parametrelerinin ve maksimum verimin belirlenmesi hedeflenmiştir. Kolektör boyunca sıcaklık verisi, kanal içerisindeki havanın ortalama hızı, gözenekli malzeme dolayısıyla basınç düşüşü, fan ve elektrikli ısıtıcının tükettiği güç gibi verilerin ölçüldüğü farklı konfigürasyon ve tasarımlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda, gözenekli malzeme kullanımının güneş enerjili hava kolektörü sistemleri

üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu, gözenekli katmanların eklenmesiyle ısı kaybının azaldığı ve verimliliğin arttığı, ancak gözenekli katmanların akış kanalı içerisinde bir direnç oluşturarak hız profilini bozduğu, havanın çıkış sıcaklıklarında artışa neden olmadığı görülmüştür. Gözenekli katmanların yutucu plaka yüzey sıcaklığını azalttığı ve kanal içi sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği gözlenmiştir.

Abulkhair (Abulkhair, 2011) , pürüzsüz camsız saydam güneş kollektörü üzerinde merkez bölgedeki trapez yapı kaynaklı ısı kaybını incelemek için sayısal bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, güncel karşılaştırmaların düz ya da sinüzoidal yapılarla kısıtlı kaldığından bahsedilmiş ve yapısal sağlamlık nedeniyle eklenen trapez yapıların ısı kaybında artışa neden olduğu belirtilmiştir. Burada, düz yutucu plakaya göre üç kat daha fazla ısı kaybına neden oldukları açıklanmıştır. Çalışmada ayrıca, hava hızının etkisinin olmadığı bölgelerde bu yapının etkinliği incelenmiş ve hava çekme hızıyla ilgili bir ilişki tanımlanmıştır. Çalışmada trapez yapıya sahip kollektördeki ısı kaybını ve kollektörün etkinliğini çalışmak için bir CFD modeli oluşturulmuştur. Modelden alınan sonuçlara göre, asemptomatik bölgede etkinlik ve ısı transferi; hava hızından etkilenmemiştir.

Rajaseenivasan (Rajaseenivasan vd., 2015) çalışmasında , dairesel ve V-şekilli ekleme parçaları kullanarak tek geçişli bir güneş enerjili hava ısıtıcısının (SAH) performans artışını araştırmıştır. Çalışmada, yutucu plakada farklı geometrilere sahip dairesel ve V-şekilli türbülatorlerin kullanıldığı iki benzer SAH test edilmiştir. Sistem veriminin Reynolds sayısı ve yutucu plakadaki türbülator sayısı ile arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek hava sıcaklığı, 57,7 kg/h kütleli hava debisinde tip-f türbülatorleri için 66 °C olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, Nusselt sayısının Reynolds sayı ile arttığını ve 11615 Reynolds sayısında tip-f türbülatorleri için maksimum 210 değerine ulaştığını göstermiştir. Teorik analiz deneysel sonuçları desteklemektedir.

Kumar vd. (A. Kumar vd., 2014) makalelerinde , yapay pürüzlülüğün düz plakalı güneş enerjili hava ısıtıcılarının ısı performansını artırmak için etkili ve ekonomik bir yöntem olduğunu gösteren araştırmaların kapsamlı bir derlemesini sunmaktadır. Makalede, farklı şekillerde ve formlarda yapay pürüzlülük kullanımının ısı ve hidrolik performansı nasıl etkilediği, yapılan deneysel çalışmalar, geliştirilen ısı transferi ve sürtünme faktörü korelasyonları ele alınmıştır. Çalışmalar, yapay pürüzlülüğün Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve ısı verimliliği gibi parametreleri önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, çapraz nervür şekillerinin

kullanımı sırasında, nervürün hemen öncesinde ve sonrasında iki akım vorteksi olduğu ve bu nedenle ısı transferinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Ancak, nervür açısının değiştirilmesi, akım vortekslerinin nervür boyunca hareketini artırarak ve bir ikincil akım hücresi oluşumuna neden olarak ısı transferini artırabilir. V-şekilli nervürlerin kullanımı, ikincil akım hücrelerinin sayısını artırarak ısı transfer verimliliğini daha da artırabilmektedir. Çalışmada yapılan literatür taramasının sonuçlarına göre, yapay pürüzlülük kullanımı, düz plakalı güneş hava ısıtıcılarının ısı verimliliğini artırmak için etkili ve ekonomik bir yöntemdir.

Darıcı (Darıcı, 2020) bir çalışmada , güneş enerjili hava kollektörlerinin ısı performansının genellikle düşük olduğu ve bu nedenle, yutucu levhanın yüzey geometrisinde değişiklik yapılarak ısı performansın artırılabilceği belirtilmiştir. Bu çalışmada, trapezoidal çizgili ve düz yutucu levhaya sahip iki güneş hava kollektörünün ısı performansı Konya ili hava koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler 0,022, 0,033 ve 0,044 kg/s olmak üzere üç farklı hava akış debisi için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar düz yutucu levhali güneş hava toplayıcısı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hava akış debisi azaldıkça güneş hava toplayıcılarının giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı gözlemlenmiştir. 0,022 kg/s hava akış debisi için trapezoidal çizgili levhali güneş hava toplayıcısındaki maksimum sıcaklık artışı, düz levhali güneş hava toplayıcısına göre 9 °C'dir. Güneş hava toplayıcılarının ısı performansının hava akış debisi ile arttığı belirlenmiştir. Trapezoidal yutucu levhali hava toplayıcısının ortalama günlük ısı verimi 0,044 kg/s için % 63 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, trapezoidal çizgili yutucu levhaya sahip güneş hava toplayıcısının düz yutucu levhali toplaya göre daha yüksek bir ısı verime sahip olduğunu ve hava sıcaklığında daha yüksek artış sağladığını göstermektedir. Ayrıca, hava toplayıcısının ısı veriminin, hava akış debisi, yutucu levhanın yüzey özellikleri ve toplayıcı yüzeyine düşen güneş ışınları gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği bulunmuştur. Türkiye'de yenilenebilir enerji açısından büyük bir güneş enerjisi potansiyeli bulunduğundan, trapezoidal yutucu levhali güneş hava toplayıcıları, farklı tarımsal ürünlerin düşük sıcaklıklarda mekân ısıtması ve kurutması için önemli bir ısı kaynağı olarak kullanılabilir.

Vakumlu mikro-kanal teknolojinin güneş enerjili hava kollektörü performansı üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelendiği bir diğer çalışmada, 4 cm'lik bir yutucu-kapak aralığı için güneş kolektörü 0,1 bar basınca vakumlanmıştır (Abdulkadhim, 2019). 30 dikdörtgen mikro-kanallı (uzunluk 0,9, genişlik 0,004, yükseklik 0,0008 m)

bir Alüminyum metal yutucu plakası, hız, sıcaklık ve diferansiyel basınç ölçüm cihazları kullanılarak üretilmiştir. Testler, güneş simülatörü kullanılarak kapalı alanda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, vakumlu mikro-kanallı bir yutucu plaka ve siyah yüzey kullanarak vakum olmadan elde edilen performansa göre, vakumun güneş kolektörü performansını yaklaşık % 2-5 artırdığını göstermiştir.

Pürüzsüz yapıda kanala sahip güneş enerjili hava kolektörünün performansının tahmini için detaylı bir matematiksel modelin sunulduğu bir çalışmada (Maheshwari vd., 2011), yarı delik bölmelerin (baffle) yutucu plaka üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, yarı delik bölmelerin (baffle) yutucu plaka üzerine tutturulmasının ısı transferini arttırdığını (yaklaşık % 180-235) ve plaka sıcaklığını 20-25 °C azalttığını göstermiştir. Bu nedenle, bu tür bir hava ısıtıcısı, pürüzsüz kanallı bir hava ısıtıcısına kıyasla % 28-45 daha yüksek ısı verimlilik sağlamaktadır. Yapılan matematiksel modelleme sonuçlarına göre, güneş ışınımının ısı performans üzerinde etkisi yok denecek derecede azdır. Ancak rüzgar ısı transfer katsayısındaki değişiklikler ısı verimliliği % 1,6-4,3 arasında etkilemektedir.

Fahmi vd. (Fahmi vd., 2020) havalı güneş kolektörlerin de, farklı konfigürasyonlarda yutucu yüzeye sabitlenmiş aksel olarak üçgen kanatlarla donatılmış güneş enerjili hava kolektörü sistemi incelenmiştir. Dört farklı alüminyum yutucu levha kullanılarak yapılan deneyler Irak'ın Ramadi şehrinde kış mevsiminde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kanatların varlığının, basınç düşüşünde önemsiz bir artışla birlikte çift geçişli güneş kolektörünün ısı performansını arttırmak için iyi bir teknik olduğunu göstermiştir. Farklı konfigürasyonlarda yapılan deneyler sonucunda, kanatların varlığı yutucu yüzey alanında ve doğal olarak ısı transferinde artışa neden olmuştur. Ayrıca, kanatlar soğuk ve sıcak havayı karıştırarak daha yüksek bir türbülans yoğunluğu sağlamıştır. Çalışma, bu tür kolektörlerin ekserji verimliliğini de inceleyerek, kolektör tipi G'de (% 43,08) en yüksek ekserjetik verimin elde edildiğini ve en yüksek sıcaklık farkının kolektör tipi G'de (20,6 °C) elde edildiğini göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada, kanatların çift geçişli güneş kolektörlerinin performansını arttırmak için ve bu tür kolektörlerin ısınma amaçlı kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Ancak, kanatların basınç düşüşüne ve artan pompa gücüne etkisini göstermek için daha kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Literatürdeki güneş enerjili hava kolektörlerini inceleyen Hu ve Zhang (Hu & Zhang, 2019), güneş enerjisi toplama sistemlerinin ana bileşeni olan hava kolektörünün ısı performansını artırmak için literatürde bulunan teknikler incelenmiştir. Çalışmada

sunulan yöntemler arasında, toplayıcı plakaya nervür, kanat, file vb. eklemek veya farklı şekilli yüzeyler kullanarak alt tabakadaki laminar hava akışını yeniden düzenlemek; yutucu plaka yakınındaki hava akışını yeniden düzenleyerek taşınım ile ısı transferini artırmak için hava püskürtmeli jet kullanmak; tek kanallı toplayıcıyı çift/çoklu geçişli kanallarla değiştirerek ana akıştaki hava akışını yeniden düzenlemek ve ikincil akım oluşturmak için yönlendiriciler kullanmaktır. Bu yöntemlerin ana özelliği ise, hava akışını yeniden düzenlemektir. Yapılan çalışmaların sonucunda, bu yöntemlerin uygulanması ile ısı performansının önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Ancak her yöntemin farklı avantajları ve dezavantajları olduğu belirtilerek, uygulama için verimlilik, ekonomi ve pratiklik arasında bir denge sağlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Yadav ve Thapak (Singh Yadav & Kumar Thapak, 2014) çalışmalarında, güneşli hava ısıtıcılarının borularına yapay pürüzlülük eklemenin ısı transferini artırdığı, 30 yıldır araştırma konusu olduğu ve 38 farklı yapay pürüzlülük geometrisinin kullanıldığı deneysel çalışmaların ayrıntılı bir incelemesi sunulmaktadır. Çalışmada, farklı pürüzlülük geometrilerinin birbirine göre performanslarını araştırmak için kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmalı çalışma için 20 farklı pürüzlülük elemanı geometrisi ele alınmış ve MATLAB yazılımında kodlar geliştirilerek sonuçlar sayısal olarak elde edilmiştir. Bu makale, yapay olarak pürüzlendirilmiş güneşli hava ısıtıcısının hidrolik ve ısı performansını tahmin etmek için kullanılabilecek ısı transferi ve sürtünme faktörü korelasyonlarını da sunmaktadır. Makalede, pürüzlülük elemanlarının çeşitli boyutları, şekilleri ve düzenleri hakkında detaylı bir inceleme yapılmış ve nervür parametrelerinin ısı transferi ve akış süreçlerine etkileri tartışılmıştır. Sonuç olarak, yapay pürüzlülük kullanımının akışkanın boru içindeki ısı transferini artırırken, sürtünme ve enerji tüketiminin de arttığı belirtilmiştir. Makale, tasarımı ve geliştirilmesi en zorlu ve maliyetli olan yapay pürüzlendirilmiş bir güneşli hava ısıtıcısı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımının kullanılabileceğini belirtmektedir.

Yadav ve Bhagoria (Yadav & Bhagoria, 2014) bir diğer çalışmalarında, yüzeyde tekrarlanan nervür şeklindeki yapay pürüzlülük elemanları kullanımının ısı transferini artırmak için etkili bir teknik olduğunu göstermektedir. Kare kesitli çapraz nervürlerin dikdörtgen kanalda tam gelişmiş türbülans akışta ısı transferine ve akış özelliklerine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda, en iyi termodinamik performans parametresini sunan nervür yapısının $P/e = 10,71$ ve $e/D = 0,042$ olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, yapay pürüzlülük kullanımının ısı transfer hızını artırmak için

etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ayrıca, CFD teknolojisi, geniş parametre aralıklarını ve sıvı akışını içeren karmaşık analizleri başarıyla uygulayabileceği için bu çalışmada ANSYS Fluent yazılımından faydalanılmıştır. Son olarak, pompa gücüne dayalı termodinamik performans parametresi, yapay pürüzlülük ve akış parametreleri için optimize edilerek, önemli bir artış gözlenmiştir.

El-Sebaai vd. (El-Sebaai vd., 2011) gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada, çift geçişli, kanatlı, levhalı güneş enerjili hava ısıtıcısı teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, bir analitik model kullanılmış ve Tanta (enlem, 30 ° 470N ve boylam, 31 ° E) şartları altında sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Ölçülen performansla teorik tahminler arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, havanın çıkış sıcaklıkları, yutucu levha sıcaklıkları ve çift geçişli kanatlı levhalı ve V-çizgili levhalı güneş hava ısıtıcılarının çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Havanın kütle akış debilerinin çift geçişli kanatlı ve V-çizgili levhalı güneş hava ısıtıcılarının basınç düşüşü, ısı ve termohidrolik verimleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, V-çizgili levhalı güneş hava ısıtıcısının çift geçişli kanatlı levhalı güneş hava ısıtıcısına göre % 9,3-11,9 daha verimli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, havanın kütle akış debileri 0,0125 ve 0,0225 kg/s için, çift geçişli kanatlı ve V-çizgili levhalı güneş hava ısıtıcılarının termohidrolik verimlerinin maksimum değerleri elde edildiği belirtilmiştir.

Li vd. (Li vd., 2015), güneş hava toplayıcılarının verimliliğini artırmak için, yutucu plakada yarı küresel çıkıntıların olduğu yeni bir güneş hava toplayıcısı sunulmuş, optik ve termodinamik açılarından performans analizi yapılmıştır. Optik performansın artırılması amacıyla, çukur ve çıkıntı yapay pürüzlülüğüne ışık yolu TRACEPRO yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Yarı küre kapaklı çukurun optik yolu da simüle edilmiştir. Sonuçlar, optik açıdan yarı küre çukurun en iyi olduğunu göstermektedir. Daha sonra, yarı küresel çıkıntının (çukurun arka tarafı) ısı transfer performansı deneylerle araştırılmıştır. Reynolds sayısı 3000-11,000 aralığında, göreceli pürüzlülük yüksekliği (e/D_h)=0,033 ile 0,1 ve göreceli adım (p/e)=3,5 ile 5,5 olan akış koşullarında, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleri düz kanal altındaki değerlerle karşılaştırılarak ısı transfer artışı ve sürtünme faktörü artışı belirlenmiştir. Bu yarı küresel çıkıntılı güneş hava toplayıcısı için Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü ilişkileri geliştirilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, yarı küresel çıkıntılı güneş hava toplayıcıları için tasarım referansı sağlayabilecek önemli bilgiler sunmaktadır.

Yang vd. (Yang vd., 2014), güneş enerjili hava ısıtıcılarının ısı verimliliğini arttırmak için, ofset şerit kanatlar ile tasarlanmış bir hava ısıtıcısının sayısal

modellemesi optimize edilmiş ve ASHRAE Standardı 93-2003'e göre bir dizi deney yapılarak detaylı ısı performans test edilmiştir. Sonuçlar, tipik bir ısıtma uygulamasında (güneş ışınlamı 600 W/m^2 , iç hava sıcaklığı 14°C , dış hava sıcaklığı -5°C ve güneş açısal eğimi 20°) hava akış hızı düşük ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) olsa bile anlık ısı verimliliğin $0,40$ 'ın üzerine çıkabileceğini göstermektedir. Bu tasarım sadece yaklaşık 20 W fan gücü gerektirir. Bu çalışma, enerji verimli ve maliyet etkili güneş enerjili hava ısıtıcıları geliştirilmesinde yararlı olabilir.

Yapılan kaynak taraması sonucunda öne çıkan çalışmaların sonuçlarının dahil olduğu bir çizelge oluşturulmuştur. Çizelge 3.1, incelenen çalışmaların yöntem ve sonuçlarını içermektedir.



Çizelge 3.1 Kaynak taramasında incelenen çalışmaların yöntem ve bulguları

Çalışmanın başlığı	Yazar ve Yıl	Yöntem	Sonuçlar
Energy and exergy analysis of a trapezoidal yutucu plate-based solar air collector	(Reddy vd., 2022)	İki yutucu levhanın karşılaştırılması	Debideki artışın çıkış sıcaklığını azalttığı, ancak ısı çekme oranını iyileştirdiği görüldü. Debileri üç kat artırmak ısı verimliliği % 60 oranında artırdı. Eğim açısını 15° 'den 45°' ye çıkarmak verimliliği % 38-66 oranında artırdı.
Investigation of the efficiency of air heated solar collectors with different geometries by experimental method	(Yildiz & Yilmaz, 2022)	Dört farklı güneş enerjili hava kolektörünün karşılaştırıldığı çalışma	Alüminyum teneke-metal çip kolektör ile edinilen ortalama sıcaklık farkı en yüksek değer olarak ölçüldü. En yüksek ısı verimlilik alüminyum teneke-metal çip kolektörde ölçüldü.
An Experimental Study on Enhancement of Heat Transfer In a Solar Air Heater Collector By Using Porous Medium	(Maraba, 2012)	Deneyssel bir çalışma	Gözenekli malzeme kullanımının güneş enerjili hava kolektörü sistemleri üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu, gözenekli katmanların eklenmesiyle ısı kaybının azaldığı ve verimliliğin arttığı görüldü.
Thermal Analysis of Unglazed Transpired Solar Collectors	(Abulhair, 2011)	Sayısal simülasyon	Trapez yapının ısı kaybında artışa neden olduğu belirtilmiştir. Hava hızının etkisinin olmadığı bölgelerde bu yapının etkinliği incelenmiş ve hava çekme hızıyla ilgili bir ilişki tanımlanmıştır.
Comprehensive study on solar air heater with circular and V-type turbulators attached on yutucu plate	(Rajaseenivasan vd., 2015)	Deneyssel bir çalışma	Sistem verimi, Reynolds sayısı ve yutucu plakadaki türbülantör sayısı ile arttı.
A review of thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters	(A. Kumar vd., 2014)	Literatür taraması	Yapay pürüzlülük kullanımının ısı ve hidrolik performansı önemli ölçüde artırdığı gösterildi.
Comparative study on the performances of solar air collectors with trapezoidal corrugated and flat yutucu plates	(Darici, 2020)	Deneyssel bir çalışma	Trapezoidal levhalı güneş hava toplayıcısının düz levhalı güneş hava toplayıcısına göre daha yüksek bir ısı verime sahip olduğu gösterildi.
Collector with Micro-Channel Yutucu Plate	(Abdulkadhim, 2019)	Deneyssel bir çalışma	Vakumun güneş kolektörü performansını yaklaşık % 2-5 artırdığı gösterildi.
Performance Study of Solar Air Heater Having Yutucu Plate with Half-Perforated Baffles	Maheshwari, Karwa ve Gharai	Matematik model	Pürüzsüz yapıda kanala sahip güneş enerjili hava kolektörünün performansının tahmini için detaylı bir matematiksel model sunuldu.

Buna ek olarak, farklı tasarımda yutucu plakaya sahip çalışmaların özet çıktıları, Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

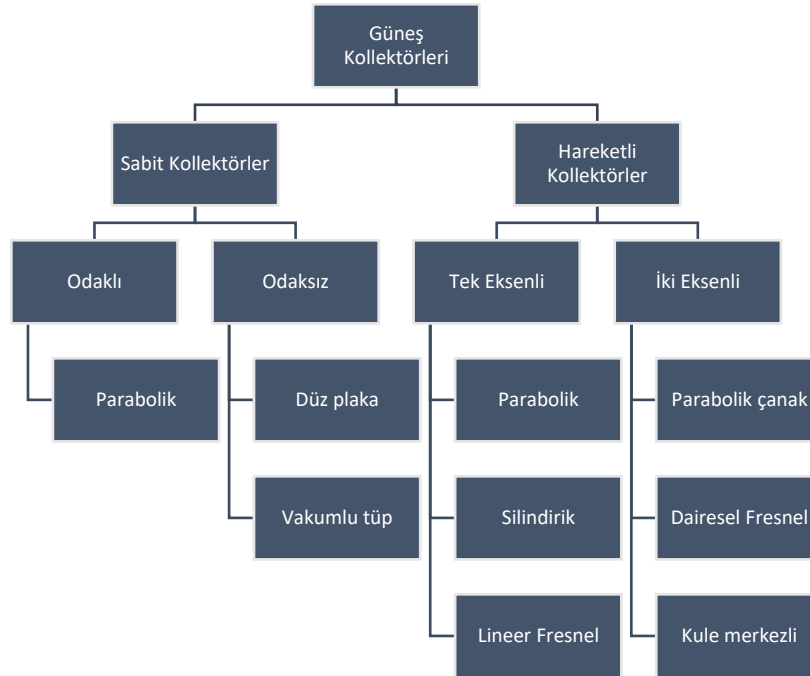
Çizelge 3.2 Literatürde mevcut farklı yutucu plakalı kolektör çalışmalarının çıktıları (Mund vd., 2021)

Referans	Yenilik	Aralık/İşlem Parametreleri	Önemli Noktalar	Ek Detaylar
(Satyender Singh vd., 2019)	Serpantin dalgalı kanal hava kolektörü	$\dot{m} = 0,01 - 0,04 \text{ kg/s}$	$\eta_{t,maks} = \% 66$ ve $\dot{m} = 0,04 \text{ kg/s}$ için basınç düşüşü = 3 Pa	$\dot{m} = 0,02 - 0,03 \text{ kg/s}$ için Optimum değerler: $\lambda = 0,075 \text{ m}$, $\delta = 0,012 \text{ m}$ ve $D_h = 0,0835 \text{ m}$
(Raj vd., 2019)	Asimetrik kanal geçişlerine sahip güneş enerjili hava kolektörü	$I = 100-720 \text{ W/m}^2$ $\dot{m} = 0,02 - 0,03 \text{ kg/s}$	$\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$ için %20 ve $\dot{m} = 0,03 \text{ kg/s}$ için % 41 ısı verim	$\eta_{exr} = \%5,6-18,04$, Basınç düşüşü: $0,13-0,47 \text{ N/m}^2$
(Manjunath vd., 2018)	Yutucu plakada sinüzoidal oluklar	$\dot{m} = 0,007-0,04 \text{ kg/s}$. $Re = 4000-25,000$	$Re = 13,500$, $AR = 3,0$, $\lambda = 2,0$. ve $\eta_{t,maks} = 0,80$ değerleri için %68,7 etkin verim	$AR = 1,5$ ve $\lambda = 1,0$. değeri için η değerindeki maks. ortalama artış (oluklu); %12,5
(A. P. Singh & Singh, 2018)	Kıvrımlı yutucu plaka	$e_v/H = 0,21, 0,3$ $e_r/H = 0,125$ $P/e_v = 0,834, 1,15, 1,25, 1,73$ $P/e_r = 2,0, 3,0$ $Re = 2209, 3722, 6058$ $\dot{m} = 0,0172, 0,029, 0,0472 \text{ kg/sm}^2$	$e_v/H = 0,3$ and $P/e_v = 0,834$ değerleri için η_t maks. % artışı = %11.83 ve maks. % sıcaklık artışı = %32.05	$P/e_v = 0,834$ değerinde CPVCSP kolektörü CPSP kolektörü ile karşılaştırıldığında $\eta_{t,max} = \%91,93$ ve hava çıkış sıcaklığı artışı = %32,05
(Zhang vd., 2018)	Açıklığa sahip pürüzlü güneş enerjili hava kolektörü	$P_p = 0,08-0,12 \text{ m}$, $D_p = 0,001-0,003 \text{ m}$	$H_c = 3 \text{ m}$ ve optimum hava hızı = $1,14 \text{ m/s}$ değerinde $\eta_{maks} = \%67,4$; (diğer değişkenlerle)	Optimum açıklık çapı = $0,001 \text{ m}$ ve $0,12 \text{ m}$ (diğer değişken parametrelerle)
(Poongavanam vd., 2018)	Kumlanmış V oluklu yutucu plaka	Oluk açısı = $55-60^\circ$; $\dot{m} = 0,01, 0,015$ ve $0,02 \text{ kg/s}$;	$\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$ değeri için THPP = 1,57	THPP'deki maks iyileştirme $1,35 - 1,56$ aralığındadır
(Simarpreet Singh, 2017)	Eşkenar üçgen türbülantör ve çukurlu türbülantörli kemerli yutucu plaka	$Re = 3800-14000$; $u = 1,67 - 7,9$; $q = 500 \text{ W/m}^2$	$Re > 10000$ değeri için Nusselt numarası düz plakada % 80, Eşkenar üçgende ~%16 ve çukur türbülantörlerde ~%55,7 artış göstermiştir	Maks. THPP yaklaşık olarak 2'ye eşittir.

4. GÜNEŞ ENERJİLİ HAVA KOLLEKTÖRLERİ

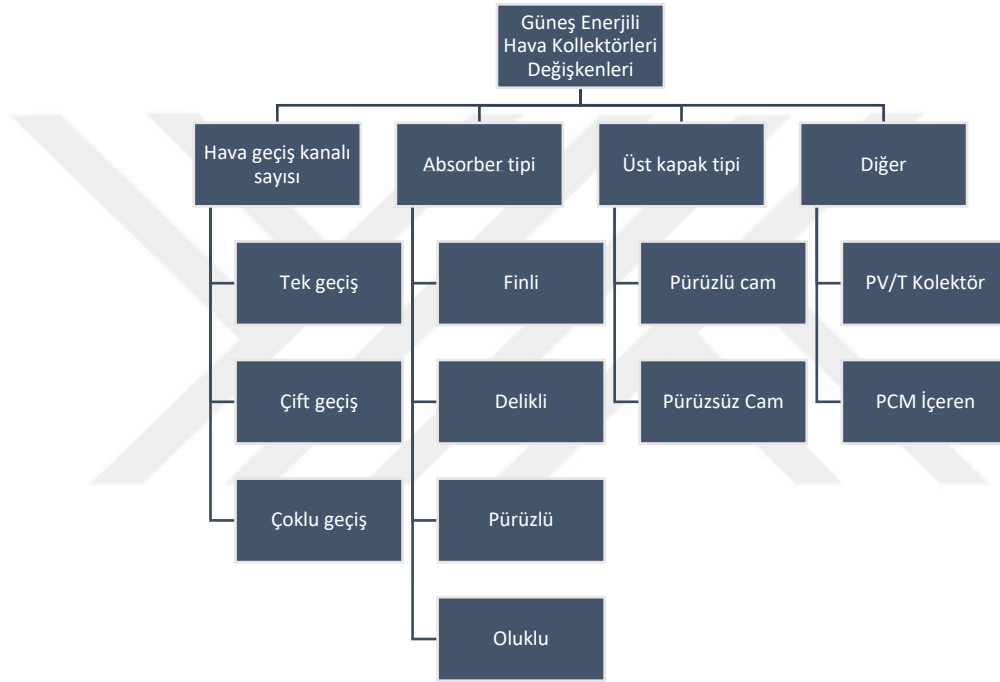
Son birkaç on yılda endüstri devrimi, yaşam standartlarının yükselmesi ve nüfus artışı gibi faktörler nedeniyle enerji talebi büyük ölçüde artmıştır. Madencilik, otomotiv, üretim, kimya, tarım ve gıda işleme gibi önemli ekonomik sektörler, fosil yakıtlar gibi geleneksel enerji kaynaklarına oldukça bağımlıdır. Ancak bu kaynaklar aşırı kullanımdan dolayı tükenmektedir. Bu açıdan bakıldığında, sürdürülebilir bir gelecek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmazdır. Güneş enerjisi; yüksek verimlilik, kullanılabilirlik ve geniş uygulama yelpazesi nedeniyle geleneksel enerji kaynaklarına çok iyi bir alternatif olarak kullanılabilir.

Güneş enerjisi, ısı ve fotovoltaik olmak üzere iki ana sistemde kullanılmaktadır. Isıl sistemde, güneşten gelen enerji doğrudan veya dolaylı olarak çeşitli uygulamalar için kullanılırken, güneş fotovoltaik sisteminde güneş enerjisi önce elektrik enerjisine dönüştürülür ve bu elektrik enerjisi daha sonra farklı amaçlar için kullanılır. Güneş kollektörleri, güneş enerjisini belirli ölçüde toplayan ve ısıya dönüştüren araçlardır. Bu toplayıcılar sabit veya hareketli olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Prakash vd., 2022). Güneş kollektörlerinin sınıflandırması Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 Güneş kollektörlerinin sınıflandırılması

Güneş enerjisini toplamak için kullanılan en yaygın güneş kolektörü, düz plakalı güneş kolektörleridir (DPGK). DPGK, basit yapısı, düşük maliyeti ve kolay bakımı ile bilinir. Ancak, DPGK'nin ısı kapasitesi düşüktür ve yutucu levha ile hava arasındaki ısı transferi zayıftır. Bu koşullar havanın kolektörde yüksek sıcaklıklara ulaşmasını engellemektedir. Bu nedenle, son yıllarda DPGK'nin yutucu plakasında birçok tasarım değişikliği yapılmış ve tarım ürünleri kurutma, mekanik ısıtma ve endüstriyel uygulamalar için daha verimli hale getirilmiştir. Şekil 4.2 güneş enerjili hava kolektörlerinin sınıflandırılmasını göstermektedir.

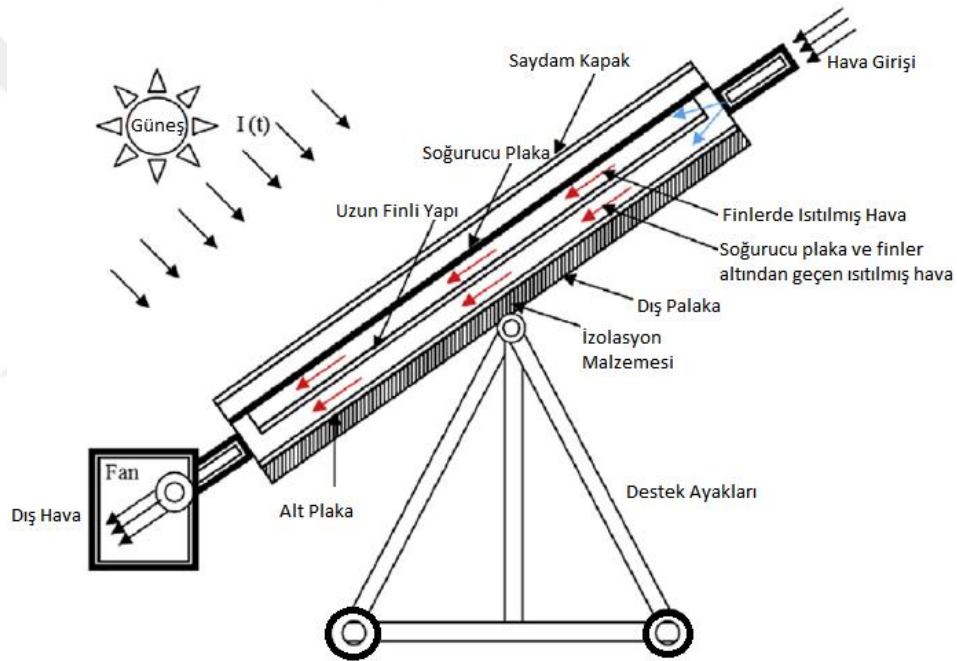


Şekil 4.2 Güneş enerjili hava kolektörleri üzerinde yapılan modifikasyonlar (Prakash vd., 2022)

Güneş enerjili hava kolektörleri, birçok farklı tasarıma ve çalışma prensibine sahip olan güneş enerjili ısıtma sistemlerinin bir alt grubudur. Bu sistemler, toplayıcıda kullanılan çalışma akışkanına ve tasarım tipine göre sınıflandırılabilirler. Toplayıcılarda hava veya su (bazen antifriz solüsyonları) kullanılır. Bu sistemlerin işleyiş prensipleri genel olarak aynıdır. Akışkan, toplayıcıya bir uçtan girer, toplayıcıda yutulan ısıyı taşır ve bir çıkış noktasından dışarıya çıkar. Akış hareketi pasif doğal taşınım veya zorlanmış akış şeklinde gerçekleştirilebilir. Pasif hava temelli ısıtma sistemleri bina özelliklerine bağlıdır ve genellikle bina tasarımına entegre edilir (Rossi, 2019). Aktif sistemler ise, kanal sisteminde bazı değişiklikler yaparak mevcut binalara kolayca kurulabilir. Güneş enerjili hava kolektörleri, endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır

ve bina dış duvarları gibi dikey yüzeylerin kullanılabileceği büyük bir yüzey alanına sahiptir. Bu tesisler, 30 yıllık ömrü boyunca düşük bakım gerektirir ve ısıtma maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilirler ("A Path to Achieving Europe's 2020 - Solarwall", 2014).

Bir güneş enerjili hava kolektörü, genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerden yapılan bir yutucu plaka içerir. Yutucu plaka, maksimum ışıınımı absorbe etmesini sağlamak için genellikle alüminyum gibi malzemelerden yapılır ve siyah renkte boyanır (Şekil 4.3). Bu yutucu plaka, ışıının yansımısını önlemek için camla kapatılır. Güneş enerjili hava kolektörünün alt ve yan tarafları ise ısı kaybını önlemek için yalıtılır. Akışkan, sıcak yutucu plakadan ısı alır ve dışarı çıkar.



Şekil 4.3 Güneş enerjili hava kolektörünün şematik diyagramı (Chabane vd., 2014)

Güneş enerjili hava kolektörlerinin birçok uygulaması vardır. Akışkan olarak hava kullanan kolektörler, korozyon sorunu yaşamazlar ve hava sızıntıları cihazın çalışmasını engellemez (Belmonte vd., 2016). Ayrıca, bu kolektörlerin imalatı kolaydır ve akışkan donmadığından veya kaynamadığından yaz ve kış aylarında kolayca kullanılabilir. Güneş enerjili hava kolektörlerinin kurutma ve mahal ısıtması alanında çeşitli uygulamaları bulunmaktadır (Kalogirou, 2004b). Nem alıcı maddelerin kullanıldığı proseslerde rejenere sıcaklıklarının elde edilmesi için ihtiyaç duyulan sıcak hava temininde kullanılabılırler (Belmonte vd., 2016). Açık havada geleneksel güneş

altında pirinç kurutulmasının büyük fabrikalar için dezavantajları mevcuttur. Bu işlem için gereken 60-80 °C sıcaklıkları güneş enerjili hava ısıtma sistemleri ile sağlayarak kurutma proseslerinin yapılması çok ekonomik bir seçenektir. Genellikle kuruma sırasında meydana gelen kayıplar nedeniyle kurutulmuş meyveler pahalıdır ve bu nedenle güneş altında kurutma ekonomik bir seçenektir. Odun kurutma işleminde, güneşte kurutma açık havada kurutmaya kıyasla işlem süresini yaklaşık % 40-50 azaltmaktadır. Çay işleme için gereken sıcaklık seviyesi yaklaşık 100 °C'dir ve kolektörler bu işlemde çok etkili bir şekilde kullanılabilir. Biberin kontrollü olarak güneşte kurutulması, daha yüksek kalite ve daha düşük kayıpla sonuçlanır. Safran için 40 °C, 50 °C ve 55 °C civarında her seviyede kurutma gerektiren üç aşamalı kurutma işlemi için çok etkili bir şekilde kullanılmıştır (Bansal, 1999). Yer ısıtması için termosifon hava panelleri (TAP), Leh'de kullanılmış ve 2,3 kWh/m²/gün enerji toplama kapasitesiyle % 32,5 genel verimlilik elde etmiştir (Bansal, 1999). Güneş enerjili hava kolektörleri ayrıca havalandırma sağlamak için de kullanılmıştır.

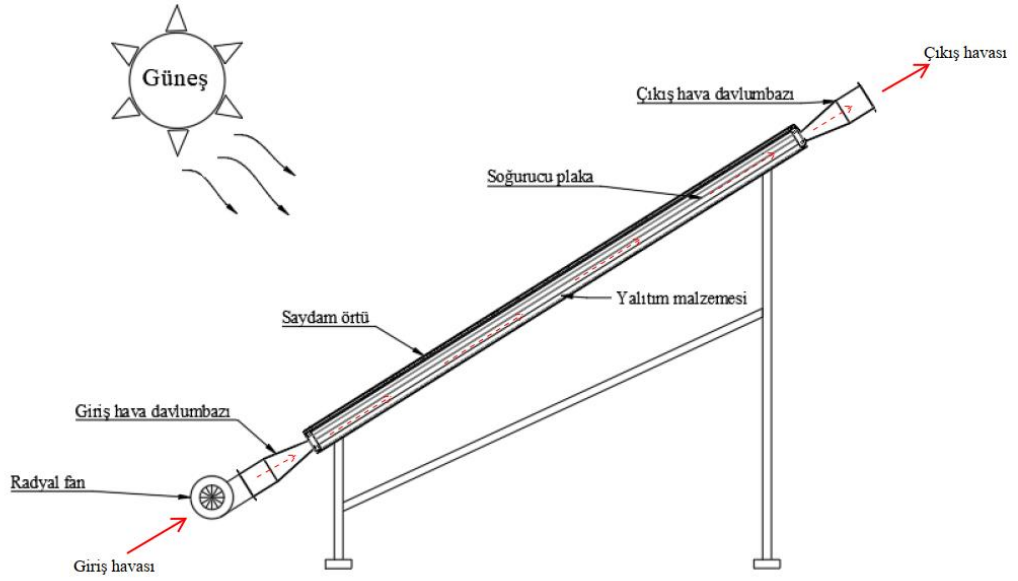
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, güneş enerjili havalı kollektörlerde yer alan trapez geometrili yutucu plakaların kollektör performansına etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Trapez yüzey geometrili farklı trapez açılara sahip yutucu plakaların, kollektör performansına etkisi ile düz (pürüzsüz) yutucu plakalı kollektör performansının karşılaştırılması yapılmıştır. Tez kapsamında deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış olup detaylar aşağıda verilmiştir.

- Model 1 : Düz yutucu plakalı kollektör
- Model 2: 45° trapez açılı trapez yutucu plakalı kollektör
- Model 3: 30° trapez açılı trapez yutucu plakalı kollektör
- Model 4 : 60° trapez açılı trapez yutucu plakalı kollektör

5.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma kapsamında, sayısal hesaplamaların doğruluğunu kanıtlamak için iki adet kollektör kurulmuştur. Biri düz diğeri 45° trapez açılı yutucu plakalı kollektörün imalatı ve testleri SOLİMPEKS A.Ş firmasında gerçekleştirilmiştir. Kollektörler 1041x1988 mm ölçülerinde olup, 90 mm yüksekliğinde alüminyum kasa içerisine yerleştirilmiş özel mat boya ile boyanmış yutucu plakalardan ve yalıtım malzemelerinden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan malzemelerin listesi Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Kurulumu gerçekleştirilen havalı kollektörlerin şematik gösterimi ise Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Güneş enerjili havalı kollektör şematik gösterimi

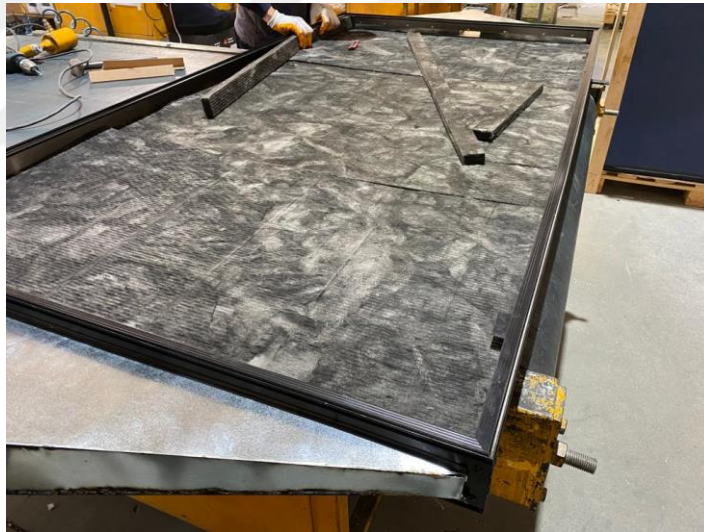
Çizelge 5.1 Kollektörlerin teknik özellikleri

Bileşenin adı	Özellikler
Kasa	1 mm kalınlıkta alüminyum profil
Cam çitası	Alüminyum çita
Saydam örtü	1014x1961x4 mm temperli cam
Yalıtım	20 mm klima levhası
Alt plaka	1004x1951x0.4 mm gofrajlı alüminyum sac
Yutucu plaka	Düz ve trapez yutucu plaka: 999x1986x0.3 mm mat boyalı alüminyum sac
Fan	600 m ³ /h debi, 193 W güç, 100 mm kanal çapında monofaze radyal fan
Boyutlar	1041x1988x90 mm

İmalatı yapılan kollektör modellerinde hem düz yutucu plakalı Model 1’de hem de 45° açılı trapez yutucu plakalı Model 2’de hava akışı yutucu plakanın altından geçecek şekilde tasarlanmıştır. Her iki modelde hava akış kanalının yüksekliği aynıdır. Model 1’de düz yutucu plakanın cam ile mesafesi 38 mm iken, Model 2’de trapez yutucu plakanın cam örtü ile mesafesi 20 mm’dir. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere ilk önce alüminyum profillerden kasa çerçevesi oluşturulmuştur. Taban sacı olarak gofrajlı alüminyum sac kasa tabanına yerleştirilmiştir. Şekil 5.3’ de kollektörlerden çevreye ısı kaybını azaltmak için kasanın alt ve yan kenarları klima levhaları ile yalıtılmıştır.



Şekil 5.2 Kollektör alüminyum kasası ve taban sacı

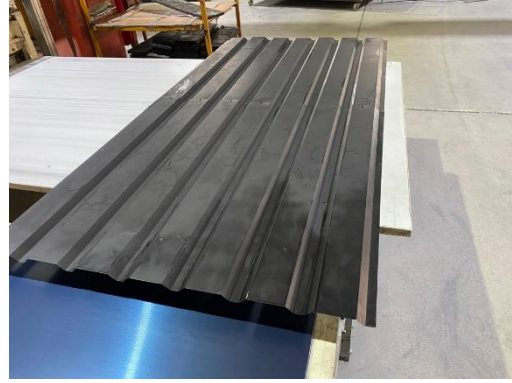


Şekil 5.3 Kollektör kasasının yalıtımı

Güneş enerjili hava ısıtılmalı kollektörlerin en önemli parçası güneş ışıınımlarını yutarak havanın ısınmasını sağlayan yutucu plakalardır. Dolayısı ile plakaların yutma katsayısını en yüksek seviyeye çıkarmak için alüminyum sac levhalar siyah mat boya ile boyanmıştır. Model 1 ve Model 2’de kullanılan sırası ile düz ve trapez plaka Şekil 5.4’de görölmektedir.



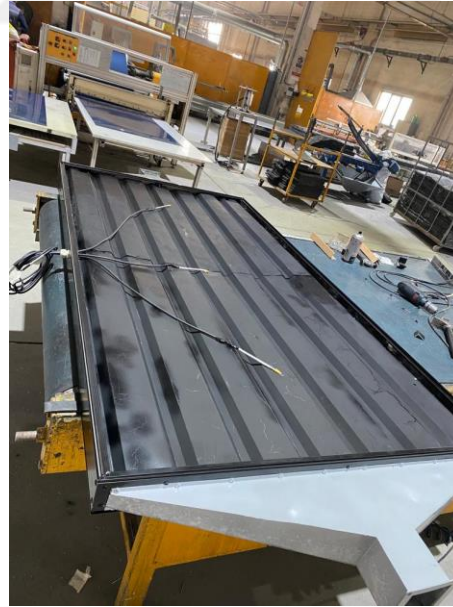
a)



b)

Şekil 5.4 Kollektör yutucu plakaları a) Düz plaka, b) Trapez plaka

Model 1 ve 2’de hava akış kanallarının eşit yükseklikte olması için aparatlar kullanılmış ve yutucu plakalar bu aparatların üzerine yerleştirilmiştir. Kollektörlerin son parçası saydam örtü yerleştirilmeden önce test aşamasında yutucu plakaların sıcaklığını ölçebilmek için 50 cm eşit aralıklarda üç adet K tipi termokupl konumlandırılmıştır. Şekil 5.5’de termokuplların yerleşimi görülmektedir.



Şekil 5.5 Yutucu plaka üzerine konumlandırılan K tipi termokupllar

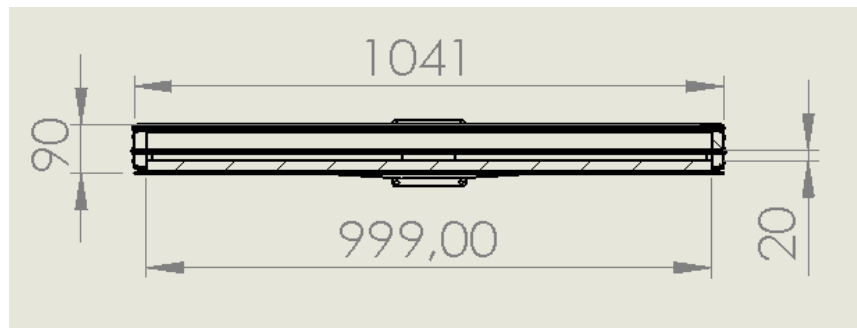
Termokuplların yüzeylere tutturulması ve temperli camın yerleştirilmesi ile kollektörlerin montajı tamamlanmıştır. Sızdırmazlığı ve dayanıklılığı sağlamak için silikon uygulaması yapılmıştır. Şekil 5.6’da deneylere hazırlanan kollektörler yan yana

görülmektedir. Hava giriş ve çıkışlarında yer alan davlumbazlar da yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Son olarak kollektörlere radyal fanlar bağlanarak montaj tamamlanmıştır.

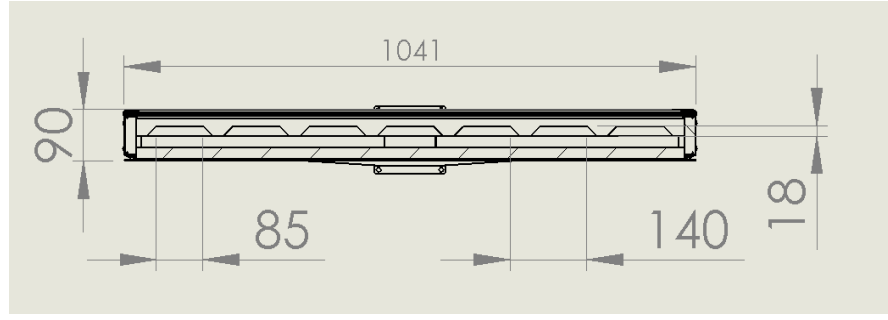


Şekil 5.6 Deneyler için hazırlanan M1 ve M2 model kollektörler

Model 1 ve Model 2'nin yutucu plakalarına ait teknik ölçülerin yer aldığı kesit görünüm sırası ile Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 'de verilmiştir. Model 1 düz plakanın boyutları 999x1986x0.4 mm olup hava kanalının yüksekliği 20 mm'dir. Model 2 trapez yutucu plakadada ise her biri 85 mm genişliğinde 7 adet trapez bulunmaktadır. Trapez açıları 45° olup, trapez adım mesafesi ise 140 mm'dir.



Şekil 5.7 Model 1 kollektör enine kesit görünüşü (ölçüler mm'dir.)



Şekil 5.8 Model 2 kollektör enine kesit görünüşü (ölçüler mm'dir.)

5.1.1. Ölçümler ve kullanılan cihazlar

Sıcaklık ölçümleri için her bir kollektöre 7 adet olmak üzere toplam 14 adet K tipi termokupl kablo konumlandırılmıştır. Havanın giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için hava davlumbazlarının içerisine 1'er adet, saydam örtü üzerine 2 adet, yutucu plaka üzerine ise 3 adet termokupl yerleştirilerek sıcaklık ölçümleri sağlanmıştır. Şekil 5.9'da deneylerde kullanılan K tipi termokupl kablo görülmektedir.



Şekil 5.9 K tipi termokupl kablosu

Havalı kollektörlerden geçen havanın ortalama akış hızını ölçmek için TESTO 405i marka anemometre kullanılmıştır. Anemometre üzerinde yer alan pitot tüpü probu ile kanal içerisinde ortalama hız ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10 'da deneylerde kullanılan anemometre görülmektedir.



Şekil 5.10 Hız ölçümü için kullanılan anemometre

Havalı güneş kollektörlerine paralel olarak yerleştirilen Kipp&Zonen CMP3 marka ışıınımmölçer piranometre ile güneş ışıınımmı ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada eğik kollektör düzleminin birim alanına gelen anlık güneş ışıınımm değeri 5 saniye aralıklarla kaydedilmiştir. Şekil 5.11’de kullanılan piranometre görülmektedir.



Şekil 5.11 Güneş ışıınımmı ölçme cihazı

Deneylerde sensörlerden gelen verilerin depolanabilmesi için 5 saniye aralıklarla kayıt alabilen 16 kanallı OMET MS6 marka veri kaydedici kullanılmıştır. Veri kaydedicinin görseli Şekil 5.12 ‘de verilmiştir.



Şekil 5.12 Veri kayıt cihazı

5.1.2. Deneylerin yapılışı

Deneyler Solimpeks A.Ş. firmasının bahçesinde açık alanda 2023 yılının Temmuz ayında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler havanın tamamen açık ve güneşli olduğu günlerde gerçekleştirilmiştir. Deneylere saat 09.00'da başlanmış ve 17.00'de son verilmiştir.

Deneylerde kollektörlere giren havanın sıcaklığı, ortam sıcaklığı, yutucu plaka sıcaklıkları, saydam örtü sıcaklıkları K-tipi termokupllar ile ölçülerek kayıt cihazına depolanmıştır. Gün sonunda sıcaklıklar veri kaydediciden bilgisayara aktarılmıştır. Havalı kollektörlerden geçen havanın akış hızı anemometre yardımı ile ölçülmüş ve istenen kütsel debi, radyal fanın hava giriş ağzı bir klape yardımıyla kontrollü olarak kapatılarak ayarlanmıştır. Farklı günlerde yapılan testlerin birbiri ile kıyaslanabilmesi için deneyler arasından ölçülen güneş ışıınım değerlerinin yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu günlerde yapılan deney verileri dikkate alınmıştır.

Deneyisel çalışma sonucunda elde edilen verilerin güvenilirliğinin tespiti için (Kline ve McClintock, 1953) belirsizlik analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile hata analizi yapılarak sensörlerden kaynaklı sapmalar tespit edilmiştir. Testler esnasında güneş ışıınımı, havanın akış hızı, akışkan ve yüzey sıcaklıkları ölçülmüş, elde edilen veriler ile kollektörlerin ısı verimleri, Reynolds sayıları ve ortalama Nusselt sayıları hesaplanmıştır.

5.1.3. Belirsizlik analizi

Elde edilen deneyisel sonuçların geçerliliğinin kanıtlanabilmesi için hata analizi yapılması gerekir. Deneyisel ölçümlerde yapılan rastgele hatalar, sabit hatalar ve imalat

hataları nedeni ile ortaya çıkan toplam hatalar dikkate alındığında ölçülen değişkenlere bağlı olarak hesaplanan bir büyüklükteki toplam hatayı bulmak için belirsizlik analizi adı verilen bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre herhangi bir R büyüklüğünün hata (belirsizlik) miktarı aşağıdaki denklem (Holman, 2007) ile belirlenmektedir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

Burada,

R: Hesaplanan büyüklük,

$X_1, X_2, \dots, X_n$: Bağımsız değişkenler,

n: Bağımsız değişken sayısı,

$W_1, W_2, \dots, W_n$: Bağımsız değişkenlere ait hata değerleri,

W_R : R büyüklüğünün toplam belirsizlik değeridir.

Yukarıda belirtilen ölçüm cihazlarının üretici firma kataloglarından alınan belirsizlik değerleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Ölçülen parametrelerin belirsizlik değerleri

Parametre	Belirsizlik
Boyut, m	$\pm 0,0003$ m
Sıcaklık, °C	$\pm 0,14$ °C
Hava akış hızı, m/s	$\pm \% 3$
Güneş ışıınımı, W/m ²	± 10 W/m ²

5.1.4. Kütle debisi

Hava akışının kütle debisi için belirsizlik değeri denklem 5.2 ve 5.3 ile belirlenebilir.

$$W_m = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} W_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial V} W_V \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial A_c} W_{A_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

$$W_m = \left[(V A_c W_\rho)^2 + (\rho A_c W_V)^2 + (\rho V W_{A_c})^2 \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

A_c : Kollektör hava giriş kesit alanı (m²)

21.07.2023 tarihinde gerçekleştirilen düz plakalı kollektör testleri için saat 13:00'da alınan deneysel veriler kullanılarak yapılan örnek bir belirsizlik hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\rho = 1,177 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 0,80 \text{ m/s}$$

$$A_c = 0,02 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$$

$$W_\rho = \pm(\%0,1) \times 1,177 = 0,001177 \text{ kg/m}^3$$

$$W_V = \pm 0,024 \text{ m/s}$$

$$W_{A_c} = 0,000154 \text{ m}^2$$

Yukarıda verilen değerler Denklem 5.3 'te yerine konulursa kütle debisi için belirsizlik değeri,

$$\frac{W_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \frac{5,83 \times 10^{-4}}{0,01} \times 100 = \pm \% 5,83$$

olarak bulunur.

Havanın farklı kütleli debi değerlerinde düz ve trapez plakalı kollektörler için hesaplanan kütle debisi belirsizlik değerleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Kütle debisi için belirsizlik değerleri ($\pm\%$)

Kütle Debisi	Düz plakalı kollektör (M1)	Trapez plakalı kollektör (M2)
0,01 kg/s	5,83	5,88
0,02 kg/s	5,44	5,53
0,03 kg/s	5,45	5,61
0,05 kg/s	5,16	5,24
0,07 kg/s	5,27	5,33
0,1 kg/s	4,99	5,07

5.1.5. Kollektör verimi

Düz ve trapez plakalı kollektörlerin ısı verimlerinin belirsizliği Denklem 5.4 ile bulunabilir.

$$W_{\eta_{kol}} = \left[\left(\frac{c_p \Delta T}{I A_p} W_{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m} \Delta T}{I A_p} W_{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m} c_p}{I A_p} W_{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m} c_p \Delta T}{I^2 A_p} W_I \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m} c_p \Delta T}{I A_p^2} W_{A_p} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

21.07.2023 tarihinde gerçekleştirilen düz plakalı kollektör testleri için saat 13:00 ‘da alınan deneysel veriler kullanılarak ısı verimin belirsizlik hesabı aşağıda verilmiştir.

$$c_p = 1005,18 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta T = 46,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I = 1019,4 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$$

$$A_p = 1,98 \text{ m}^2$$

$$\eta_{kol} = 0,23$$

$$W_{\dot{m}} = 0,000583 \text{ kg/s}$$

$$W_{c_p} = \pm 1,00518 \text{ J/kgK}$$

$$W_{\Delta T} = 0,934 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$W_I = 10,19 \text{ W/m}^2$$

$$W_{A_p} = 0,0003 \text{ m}^2$$

Yukarıda verilen değerler Denklem 5.4’de yerine konulursa ısı verim için belirsizlik değeri,

$$W_{\eta_{kol}} = \pm 0,011$$

$$\frac{W_{\eta_{kol}}}{\eta_{kol}} = \frac{0,011}{0,23} \times 100 = \pm \% 4,78$$

bulunur.

Farklı kütleli debi değerleri için düz ve trapez plakalı kollektörlerin ısı verim belirsizlik analizleri Çizelge 5.4 ‘te verilmiştir.

Çizelge 5.4 Isı verim belirsizlik değerleri ($\pm\%$)

Kütle Debisi	Düz plakalı kollektör (M1)	Trapez plakalı kollektör (M2)
0,01 kg/s	4,78	3,57
0,02 kg/s	4,63	3,64
0,03 kg/s	4,72	3,88
0,05 kg/s	4,33	3,94
0,07 kg/s	4,47	4,23
0,1 kg/s	4,86	4,42

5.1.6. Reynolds sayısı

Düz ve trapez plakalı kollektörlerin Reynolds sayılarının belirsizliği Denklem 5.5 ile bulunabilir.

$$W_{Re} = \left[\left(\frac{D_h}{\vartheta} W_V \right)^2 + \left(\frac{V}{\vartheta} W_{D_h} \right)^2 + \left(\frac{-VD_h}{\vartheta^2} W_{\vartheta} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

21.07.2023 tarihinde gerçekleştirilen düz plakalı kollektör testleri için saat 13:00 ‘da alınan deneysel veriler kullanılarak Reynolds sayısının belirsizlik hesabı aşağıda verilmiştir.

$$V = 0,8 \text{ m/s}$$

$$D_h = 0,03 \text{ m}$$

$$\vartheta = 0,0000171 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = 1403,5$$

$$W_{D_h} = \pm 0,0003 \text{ m}$$

$$W_{\vartheta} = \pm (\%0,1) \times 0,0000171 = 0,0000000171 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$W_V = \pm 0,03 \text{ m/s}$$

Yukarıda verilen değerler Denklem 5.5 ‘te yerine konulursa Reynolds sayısı için belirsizlik değeri,

$$W_{Re} = \pm 54,45$$

$$\frac{W_{Re}}{Re} = \frac{54,45}{1403,5} \times 100 = \pm \% 3,88$$

bulunur.

Farklı kütleli debi değerleri için düz ve trapez plakalı kollektörlerde Reynolds sayılarının belirsizlik analizleri Çizelge 5.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Reynolds sayısı belirsizlik değerleri ($\pm\%$)

Kütle Debisi	Düz plakalı kollektör (M1)	Trapez plakalı kollektör (M2)
0,01 kg/s	3,88	3,82
0,02 kg/s	1,90	1,93
0,03 kg/s	1,46	1,87
0,05 kg/s	1,17	1,34
0,07 kg/s	1,08	1,27
0,1 kg/s	1,04	1,22

5.1.7. Nusselt sayısı

Kollektörlerin Nusselt sayılarının belirsizliği Denklem 5.6 ile hesaplanabilir.

$$W_{Nu} = \left[\left(\frac{c_p \Delta T D_h}{A_p k \Delta T_{p-b}} W_{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m} \Delta T D_h}{A_p k \Delta T_{p-b}} W_{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m} c_p D_h}{A_p k \Delta T_{p-b}} W_{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A_p k \Delta T_{p-b}} W_{D_h} \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m} c_p \Delta T D_h}{A_p^2 k \Delta T_{p-b}} W_{A_p} \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m} c_p \Delta T D_h}{A_p k^2 \Delta T_{p-b}} W_k \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m} c_p \Delta T D_h}{A_p k \Delta T_{p-b}^2} W_{\Delta T_{p-b}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

21.07.2023 tarihinde gerçekleştirilen düz plakalı kollektör testleri için saat 13:00 'da alınan deneysel veriler kullanılarak Nusselt sayısının belirsizlik hesabı aşağıda verilmiştir.

$$D_h = 0,03 \text{ m}$$

$$c_p = 1005,18 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta T = 46,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_p = 1,98 \text{ m}^2$$

$$k = 0,02714 \text{ W/mK}$$

$$\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$$

$$Nu = 3,49$$

$$\Delta T_{p-b} = 107,6 - 32,6 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$W_{\dot{m}} = 0,000583 \text{ kg/s}$$

$$W_{c_p} = \pm 1,00518 \text{ J/kgK}$$

$$W_{\Delta T} = 0,934 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$W_{D_h} = \pm 0,0003 \text{ m}$$

$$W_{A_p} = 0,0003 \text{ m}^2$$

$$W_k = \pm (\%0,1) \times 0,02714 = 0,00002714 \text{ W/mK}$$

$$W_{\Delta T_{p-b}} = \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Verilen değerler Denklem 5.6'da yerine yazıldığında 0.01 kg/s debi için Nusselt sayısının belirsizlik değeri şu şekilde bulunur.

$$W_{Nu} = \pm 0,206$$

$$\frac{W_{Nu}}{Nu} = \frac{0,206}{3,49} \times 100 = \pm \% 5,92$$

İki farklı kollektör modeli için farklı kütleli debilerde Nusselt sayısının belirsizlik değerleri Çizelge 5.6 'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Nusselt sayısı için belirsizlik değerleri ($\pm\%$)

Kütle Debisi	Düz plakalı kollektör (M1)	Trapez plakalı kollektör (M2)
0,01 kg/s	5,92	5,91
0,02 kg/s	4,65	5,74
0,03 kg/s	4,28	5,32
0,05 kg/s	4,17	4,96
0,07 kg/s	4,14	4,61
0,1 kg/s	4,13	4,4

5.1.8. Deney setinin doğrulanması

Bu çalışma kapsamında deney düzeneğinin ve ölçülen verilerin doğruluğunu kontrol etmek için düz plakalı kollektör için hesaplanan Nusselt sayıları, literatürde yer alan iki ayrı Nusselt korelasyonundan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kıyaslama için kullanılan Nu korelasyonları, geçiş akışı için literatürde verilen “Gnielinski” denklemi (Gnielinski, 1976), diğeri ise paralel iki plaka arasındaki akış için Kays ve Crawford (Kays ve Crawford, 1980) tarafından önerilen denklemdir. Gnielinski denklemindeki sürtünme katsayısı Petukhov denklemi (Petukhov, 1970) ile belirlenmiştir. Reynolds sayısına göre akış rejiminin geçiş bölgesi ve paralel iki plaka arasındaki akışın Nusselt değerlerinin hesaplanabilmesi için bu iki denkleme ihtiyaç duyulmaktadır. Gnielinski, Petukhov ve Kays-Crawford korelasyonları sırası ile Denklem (5.7), (5.8) ve (5.9)’da verilmiştir.

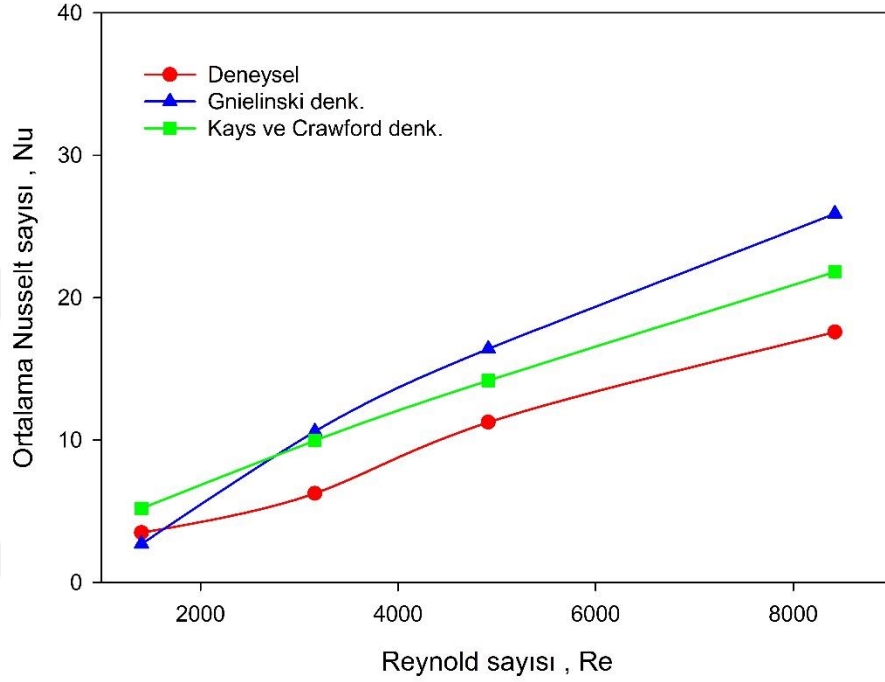
$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\left(\frac{Pr}{3}-1\right)} \quad (5.7)$$

$$f = [0,79 \ln(Re) - 1,64]^{-2} \quad (5.8)$$

$$Nu = 0,0158Re^{0.8} \quad (5.9)$$

Kollektördeki hava kanalı için hesaplanan deneysel ve teorik Nusselt sayılarının kıyaslanması Şekil 5.13’te görülmektedir. Re sayısının artışı ile Nu sayıları da artmaktadır. Düz plakalı kollektör için çalışılan Re sayısı aralığı için ortalama Nusselt sayısı 3.5 ile 32.7 arasındadır. Şekilden de görüldüğü gibi, deneysel ve teorik Nusselt

sayıları arasındaki ortalama sapma % 20.6'dır (Kumar ve ark., 2016, Tsai ve ark., 2009; Karadağ ve Teke, 2004;). Bu sonuç, deneysel verilerin doğruluğu için yeterlidir. Deneysel sonuçların Gnielinski denkleminde elde edilen sonuçlardan sapmasının temel nedeni, Gnielinski korelasyonunda akış kanalının tüm cidarlarının ısıtılmış kabul edilirken, bu çalışmada ise deneyler sadece bir cidarı ısıtılan kanal içerisinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin karşılaştırılması Çizelge 5.7 'de verilmiştir.



Şekil 5.13 Deneysel ve teorik Nusselt sayılarının kıyaslanması (M1 kollektör)

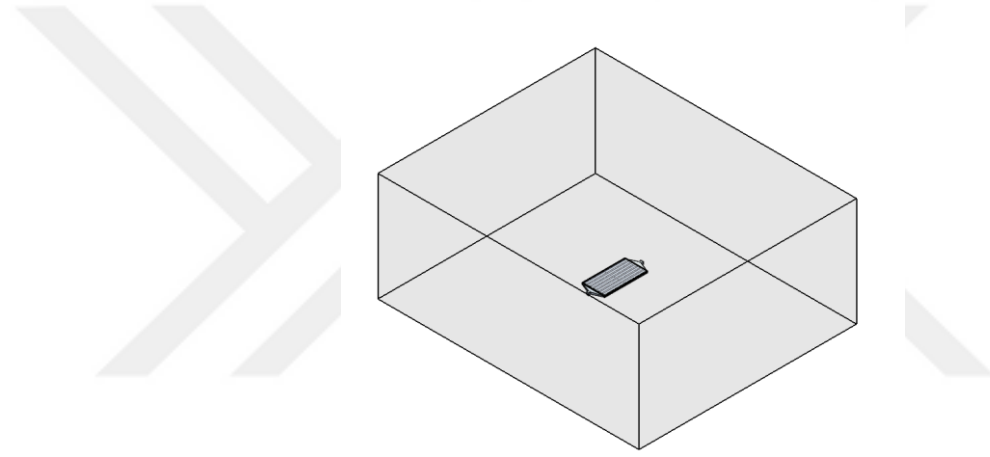
Çizelge 5.7 Korelasyonların Reynolds sayısına göre Nusselt değerleri

Reynolds sayısı	1403,5	3158	4912	8421
Korelasyon				
Gnielinski	2,7	10,6	16,4	25,9
Kays ve Crawford	5,2	9,96	14	21,8
Deneysel çalışma	3,5	6,25	11,2	17,6

5.2. HAD Simülasyonu

Test düzeneği kurulan ve testleri gerçekleştirilen güneş enerjili havalı kollektörlerin 3B katı modellemesi SOLIDWORKS programında yapılmıştır. Model 1 ve Model 2 kollektörlerin akış analizleri SOLIDWORKS Flow Simulation modülünde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde doğrulaması yapılan simülasyon

modellemesi ile yutucu plaka parametreleri değiştirilerek kollektör verimini artırmaya yönelik çalışma gerçekleştirilmiştir. Model 2 trapez plakaya ek olarak trapez açıları 30° ve 60° olan Model 3 ve Model 4 kollektörler için de sayısal analizler yapılmıştır. Akış analizlerinde tanımlanan akış alanı ve modellerin akış hacimleri Şekil 5.14 ve 5.15’de gösterilmiştir. 3B gerçekleştirilen analizler ve test düzeneğinden elde edilen veriler karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Veriler neticesinde grafikler çizilerek karşılaştırma yapılmış ve bu doğrultuda trapez yutucu plaka boyutları değiştirilerek yeni modeller oluşturulmuştur. Böylece daha fazla sayıda kollektör prototipi zamandan tasarruf edilerek teste tabi tutulmaksızın sayısal olarak çözümlenmiş ve yeni modellerin performans eğrileri çizilmiştir. Sayısal analizde kullanılan malzemelerin bazı termofiziksel özellikleri Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Sayısal analizdeki akış alanı



Şekil 5.15 Havalı kollektör akış hacmi

Çizelge 5.8 Malzemelerin termofiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kgK)	Isıl iletkenlik (W/mK)
Hava	1,225	1006	0,0242
Temperlenmiş cam	3000	500	1.8
Alüminyum sac	2719	871	202,4

5.2.1. Matematik model ve türbülans çözücü

Güneş enerjili havalı kollektörlerde ısı transferi ve hava akışı, enerji denklemleriyle ifade edilir. Sonlu hacimler yöntemi kullanılarak akış hacmi, ısı transfer ve hava akış özelliklerini incelemek için küçük elemanlara bölünmüştür. Türbülans çözücü olarak k-ε modeli kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda sırası ile verilmiştir (Dassault Systèmes, 2020).

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.10)$$

Navier Stokes denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + (\vec{v} \nabla) \rho \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \vec{g} + S \quad (5.11)$$

Enerji denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho E + p) \vec{v} = \nabla \cdot k_{eff} \nabla T + S_h \quad (5.12)$$

Denklem 5.11’de yer alan S momentum kaynağı terimi, Denklem 5.12’de yer alan S_h ise radyasyon kaynağı terimidir.

Bu çalışma kapsamında sayısal analizlerde ışıyım hesaplamaları Konya ili için enlem, boylam, deney yapılan ay, gün ve saatler girilerek Solidworks Flow Simulation modülündeki lokasyon ve zamana göre ışıyım hesaplama bölümü ile çözümlenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler aşağıda gösterilmiştir.

Güneş yön vektörü aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$\vec{S} = [\vec{E}.sin\phi_s + \vec{N}.cos\phi_s].cos\theta_s + \vec{Z}.sin\theta_s \quad (5.13)$$

Burada $\vec{Z}$ zenit yönünü, $\vec{N}$ kuzey yönünü, $\vec{E} = \vec{N} \times \vec{Z}$ doğu yönünü belirtmektedir. Güneş yükseklik açısı θ_s ile ifade edilmektedir. ϕ_s güneş azimut açısını ifade etmektedir. Bu açı saat yönünde kuzeyden olan açıyı ifade etmektedir.

Güneş yükseklik açısı θ_s , aşağıda yer alan eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$sin\theta_s = cosh.cos\delta.cos\Phi + sin\delta sin\Phi \quad (5.14)$$

Burada Φ yerel enlem, δ ise mevcut güneş eğimini ifade etmektedir.

$h = \frac{t}{86400} 2\pi - \pi$, şimdiki zaman olan t 'nin saniye cinsinden ifade edilmesidir.

Güneş azimut açısı ϕ_s , iyi bir yaklaşımla aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$sin\phi_s = -\frac{sinh.cos\delta}{cos\theta_s} \quad (5.15)$$

$$cos\phi_s = \frac{sin\delta.cos\Phi - cosh.cos\delta.sin\Phi}{cos\theta_s} \quad (5.16)$$

Mevcut güneş eğimi δ yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\delta = -23.44^\circ .cos\left[\frac{360^\circ}{365} .(N + 10)\right] \quad (5.17)$$

Burada N , yılın gününü, -23.44° Dünya'nın eksen eğikliğini ifade etmektedir.

Güneş radyasyon şiddeti aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$q_s(\theta_s) = \frac{\theta_{s0}^*}{1+c_m m_1} .(1 - n) \quad (5.18)$$

Burada $c_m = 0.092$ ve $m_1 = 1.029/(\sin\theta_s + 0.029)$ ampirik değerlerdir. Gökyüzü bulutluluk değeri (0-1 aralığı) n ile ifade edilmektedir. θ_{s0}^* ifadesi güneş sabitidir ve değeri 1360 W/m^2 dir.

Sayısal analizler esnasında k-ε türbülans çözücüsü kullanılmış ve denklemleri aşağıda verilmiştir (D. Kumar & Premachandran, 2019).

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (5.20)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5.21)$$

Burada k, ısı iletkenlik katsayısıdır. $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ sabit değerlerdir.

Akışın laminar veya türbülanslı olduğu Reynolds sayısı (Re) dikkate alınarak belirlenmektedir. Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranı olarak ifade edilen Reynolds sayısı, dikdörtgen bir kanal içerisindeki akış için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$Re = \frac{\rho U D_H}{\mu} \quad (5.22)$$

Burada; μ (kg/ms) akışkanın dinamik viskozitesini, ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğunu, U (m/s) akışkanın kanal içerisindeki ortalama hızını ve D_H (m) ise kanalın hidrolik çapını ifade etmektedir.

Dikdörtgen kesitli akış kanalı için hidrolik çap,

$$D_H = \frac{4 \times ALAN}{\text{ÇEVRE}} = \frac{4 H W}{2(H+W)} \quad (5.23)$$

Nusselt sayısı yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanı ve taşınım ile ısı transferinin, iletimle ısı transferine oranı olarak tanımlanmaktadır. Yerel Nusselt sayısı ve yerel ısı taşınım katsayısı sırası ile aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilir.

$$Nu_x = \frac{h_x D_H}{k} \quad (5.24)$$

$$h_x = \frac{q_x}{(T_{wx} - T_{b(x)})} \quad (5.25)$$

Burada T_{wx} , x konumunda plakanın yüzey sıcaklığı, $T_{b(x)}$ havanın x konumundaki ortalama yığık sıcaklığıdır.

Hava kanalında ortalama Nusselt sayısı;

$$\overline{Nu} = \bar{h} D_H / k \quad (5.26)$$

ifadesinden bulunur. Bu denklemden ortalama ısı taşınım katsayısı $\bar{h}$, aşağıdaki eşitlikten faydalananarak,

$$Q = \bar{h} A_p (T_w - T_b) = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (5.27)$$

$$\bar{h} = \frac{Q}{A_p (T_w - T_b)} = \frac{q''}{(T_w - T_b)} \quad (5.28)$$

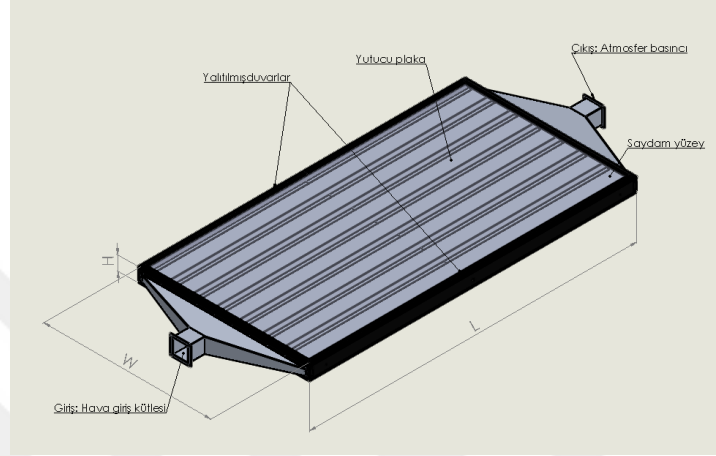
ifadesinden elde edilir. Burada q'' yüzey ısı akısı, T_b havanın ortalama yığık sıcaklığıdır.

$$T_b = \frac{\int_A u T dA}{\int_A u dA} \quad (5.29)$$

Patankar ve Spalding'in geliştirdiği basınca bağlı bu denklemler çözüm algoritmasında kullanılmaktadır. Kütle, momentum ve enerji denklemleri, ilgili değişkenler (hız, sıcaklık, basınç ve duvar ısı akısı) için yakınsayına kadar sayısal yöntemler kullanılarak karşılık gelen sınır koşulları için yinelemeli olarak çözülmüştür.

5.2.2. Başlangıç ve sınır şartları

Deneyisel çalışmaların sayısal olarak modellenmesi ve çözülebilmesi için belirli kabullerin yapılması gerekir. Yapılan bu kabuller sayısal çözümü basitleştirmektedir. Başlangıç ve sınır şartları, sayısal çözümlemenin hangi aralıklarda olacağını ifade etmektedir. Şekil 5.16 sınır şartlarının analizler kapsamında tanımlanma şekillerini göstermektedir. Başlangıç ve sınır şartları şu şekilde ifade edilebilir;



Şekil 5.16 Havalı kollektör sınır şartları

Giriş sınır şartı:

$$u = U_i, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = T_i, \quad P = P_i \quad (5.30)$$

Kanalın alt ve yan yüzeyleri için yalıtım sınır şartı uygulanmaktadır. Enerji denkleminin bu sınır şartının matematik ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$y = 0 \text{ da } \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (5.31)$$

$$z = 0 \text{ ve } z = W' \text{ de } \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5.32)$$

Kollektöre üst yüzeyden (saydam örtüden) sabit ısı akısı uygulanmaktadır.

$$y = H' \text{ de } \quad -k \frac{dT}{dy} = q'' \quad (5.33)$$

Kanal duvarlarında akış kaymasının olmadığı (kaymama şartı) kabul edilmiştir. Momentum denkleminin bu sınır şartının matematik ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$y = 0 \text{ ve } y = H \quad u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0 \quad (5.34)$$

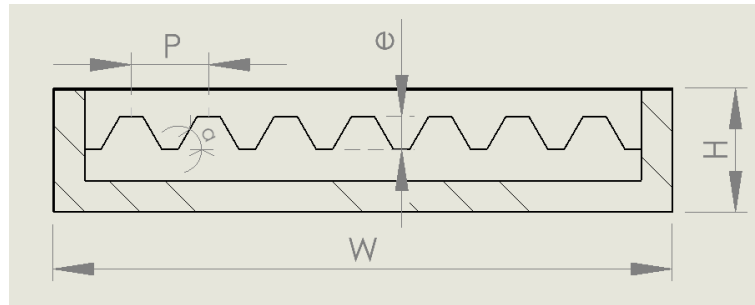
$$z = 0 \text{ ve } z = W \quad u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0 \quad (5.35)$$

Sayısal çözüm algoritmasında yapılan kabuller şu şekildedir.

- Akış üç boyutlu, türbülanslı, newtoniyen, sıkıştırılmaz kabul edilir.
- Akışkan olarak hava kullanılacaktır.
- Akışkanın termofiziksel özellikleri sabittir.
- Akışkanın, kanala giriş sıcaklığı T_i deneysel verilere göre seçilecektir.
- Kanal içindeki akışın sıkıştırılmaz ve ses altı olduğu varsayılır. Bu nedenle, havanın yoğunluğu ideal bir gaz olarak değerlendirilmiştir. Havalı kollektör girişinde havanın dağılımı üniiformdur.
- Duvar olarak tanımlı bütün elemanlara kaymaz durum şartı uygulanacaktır.
- Sınır şartları belirlenirken, havanın kollektöre giriş hızı “velocity inlet”, çıkış basıncı ise “pressure outlet” olarak belirlenecektir.
- Sayısal çalışma Reynolds sayısının farklı değerlerinde gerçekleştirilecektir.
- Basınç değişimleri ihmal edilecektir.

5.2.3. Çalışma parametreleri

Sayısal analizleri yapılacak olan trapez yutucu plakalı kollektörler için üç adet parametre belirlenmiştir. Parametreler; trapez yüksekliğinin akış kanalının hidrolik çapına oranı olan bağıl pürüzlülük yüksekliği ($RRH=e/D_h$), akışa paralel iki ardışık trapez arası mesafenin trapez yüksekliğine oranı olan bağıl pürüzlülük mesafesi ($RRP=P/e$), trapez ile akış doğrultusu arasında kalan kanatçık açısı (α)’dır. Analizleri yapılan kollektör modelleri için belirlenen çalışma parametreleri Çizelge 5.8 ‘de gösterilmiştir. Trapez plakanın kesiti ve parametrik ölçüleri ise Şekil 5.17 ‘de görülmektedir.



Şekil 5.17 Trapez yutucu plakanın parametrik ölçüleri

Çizelge 5.9 M2, M3 ve M4 kolektörler için parametre seti

Bağıl pürüzlülük yüksekliği (RRH=e/D _h)	Bağıl pürüzlülük mesafesi (RRP=P/e)	Trapez açısı (α)
0,25	14	30°
0,45	8	45°
0,75	5	60°

5.3. Enerji Analizi

Herhangi bir güneş kolektörünün performansı ifadesinden genellikle kolektörün ısı verimliliği anlaşılmalıdır. Kolektörlerin verimliliği kütle akış debisi, güneş ışıını, ışıının geliş açısı, kolektörün eğimi, havanın giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı, optik değerler ve yutucu yüzeyin şekli gibi birçok parametreye bağlıdır.

Çalışma süresi boyunca kolektörden elde edilen ve havaya kazandırılan faydalı ısı enerjisi,

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{\zeta} - T_g) \quad (5.36)$$

ifadesiyle belirlenebilir. Bu denklemde $\dot{m}$ havanın kütleli debisini, C_p sabit basınçta havanın özgül ısı değerini, T_g havanın kolektöre giriş sıcaklığını, T_{ζ} ise havanın kolektörden çıkış sıcaklığını göstermektedir.

Güneşten kolektör yüzeyine ışıınıla gelen ısı,

$$Q_s = I. (\tau\alpha). A_c \quad (5.37)$$

denklemini ile bulunabilir. Burada I güneş ışıını şiddetini, τ saydam örtü geçirgenlik oranını, α yutucu plakanın yutma oranını, A_c ise yutucu plaka yüzey alanını göstermektedir.

Güneş kolektörünün ısı verimliliği, belirli bir zamanda kolektörden elde edilen faydalı ısıyı, aynı zaman sürecinde kolektör yüzeylerince hasat edilen toplam güneş enerjisine bölerek belirlenebilir.

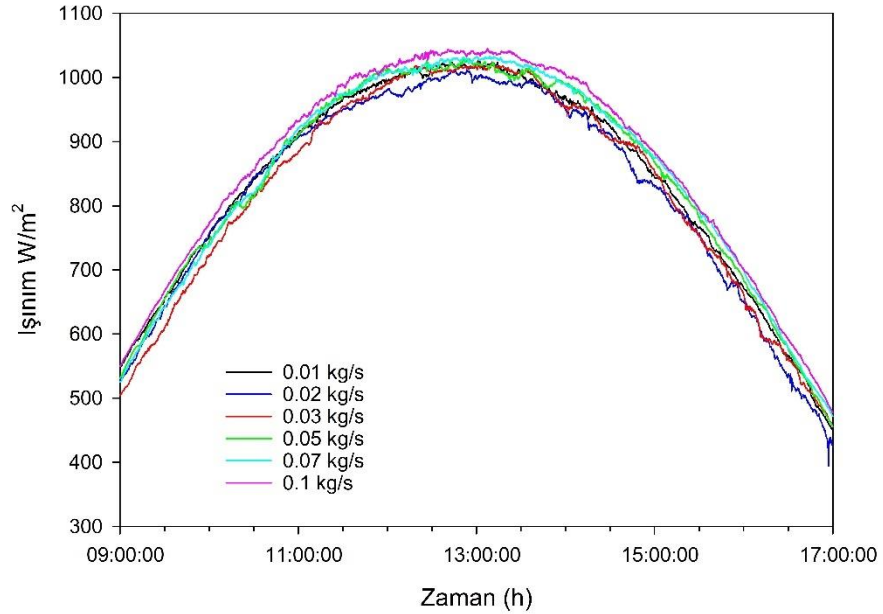
$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (5.38)$$

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Deneysel Çalışmanın Sonuçları

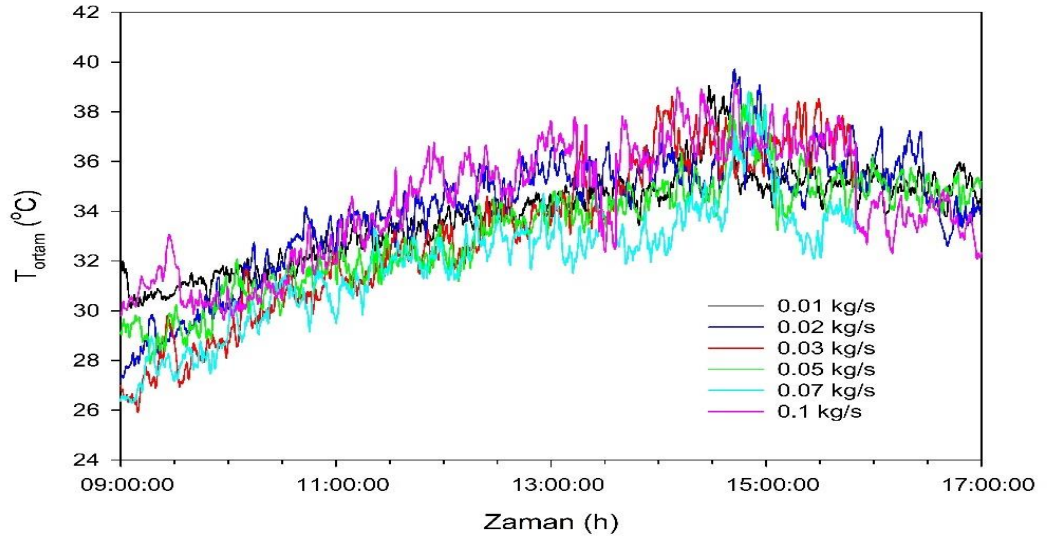
6.1.1. Güneş ışıının ve sıcaklıkların zamanla değişimi

Bu çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen Model 1 (düz plakalı) ve Model 2 (45° trapez açılı plakalı) kollektör deney düzenekleri ile farklı günlerde ve farklı hava debilerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, kollektörden geçen havanın 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s kütle akış debileri için 21.07.2023-03.08.2023 tarihleri arasında yapılmıştır. Deneyler havanın tamamen açık, güneşli ve rüzgâr hızının düşük olduğu günlerde yapılmıştır. Hesaplamalar için, farklı kütle debileri için deney yapılan günler arasında, ölçülen ışıınım değerleri birbirine yakın olan günlerdeki deney verileri dikkate alınmıştır. Farklı kütle debilerinde deney yapılan günlerde kollektör yüzeyine gelen toplam anlık ışıınımların zamana bağlı değişimleri Şekil 6.1’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, farklı günlerde ölçülen güneş ışıınımları, Model 1 ve Model 2 kollektörün performansını mukayese edebilmek açısından kabul edilebilir derecede birbirine yakınlık göstermektedir. Şekilden, ışıınım değerleri incelendiğinde saat 09:00’da 520-550 W/m², saat 13:00’da 1000-1040 W/m² iken saat 17:00’da ise 400-425 W/m² ışıınım değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Tüm deneylerdeki ölçümlere göre günlük ortalama güneş ışıınımlı değeri 830 W/m²’dir.



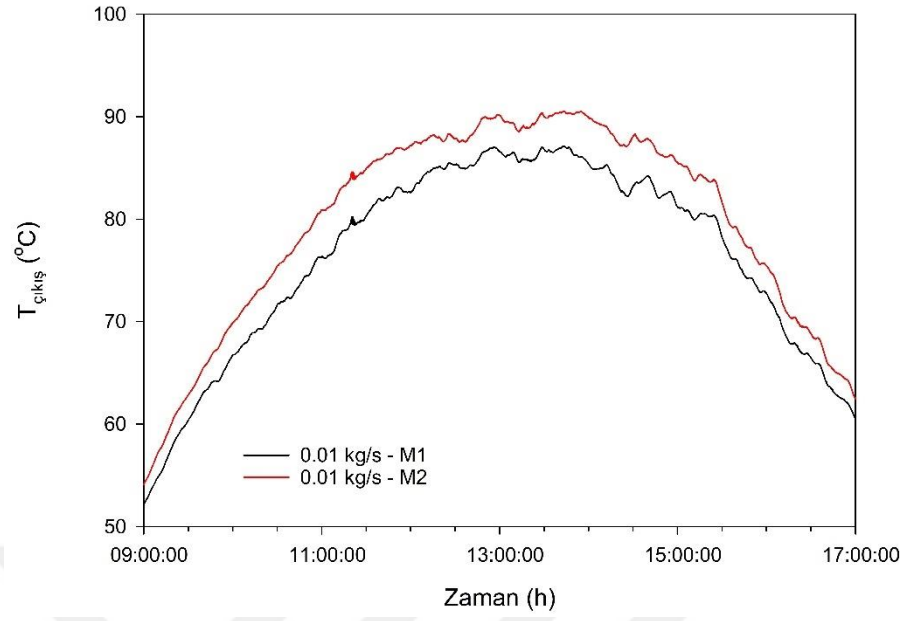
Şekil 6.1 Anlık güneş ışıınımlarının zamana bağlı değişimleri

Kollektör modelleri ile farklı günlerde ve farklı debilerde testler gerçekleştirilerek ölçülen veriler kayıt altına alınmıştır. Deneylerde ölçülen çevre havası sıcaklıklarının zamanla değişimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Tüm deneylerde çevre sıcaklığı gün içerisinde 27-38 °C arasında ölçülürken, deney süresince günlük ortalama sıcaklık 33 °C olarak belirlenmiştir. En yüksek çevre sıcaklığı 12:00-13:00 saatleri arasında gözlenmiştir. Farklı günlerdeki çevre sıcaklığının etkileri ihmal edilebilir. Temmuz-Ağustos aylarında farklı günlerde gerçekleştirilen testlerde rüzgarın hızına bağlı olarak ölçülen çevre sıcaklığı bazen anlık olarak değişse de, bu değişim küçük ve geçici olduğundan deney sonuçlarını etkileyecek derecede değildir.

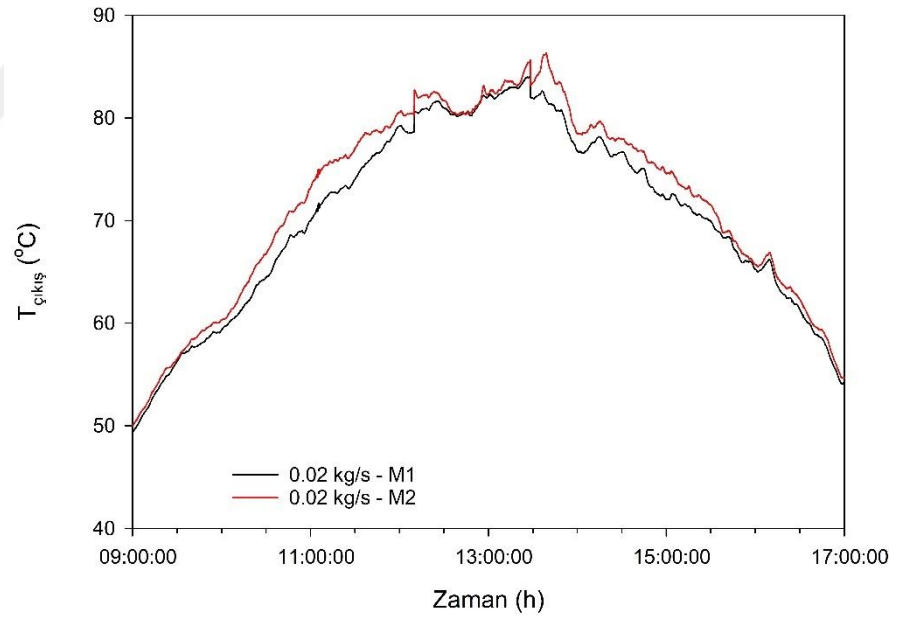


Şekil 6.2 Çevre sıcaklığının zamanla değişimi

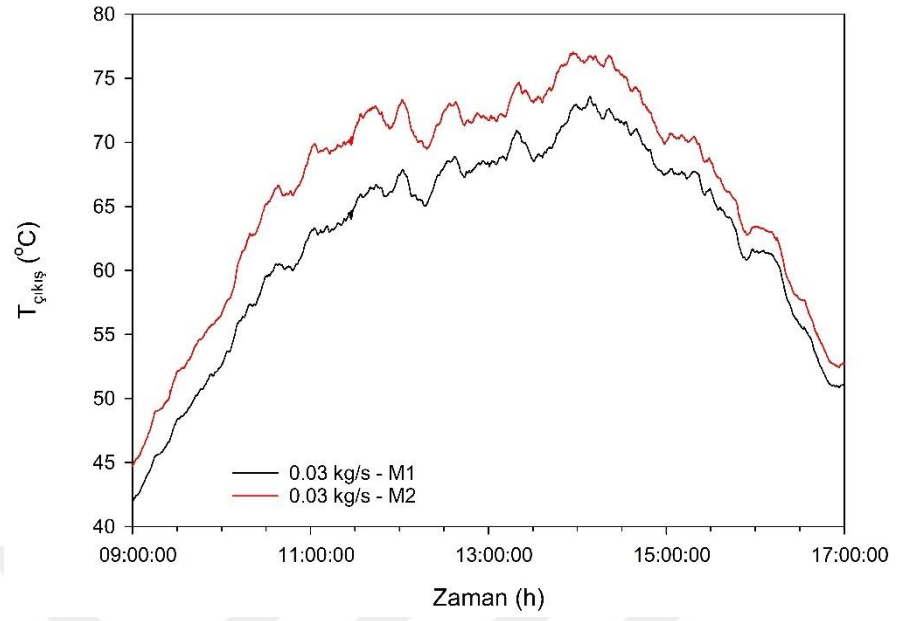
M1 ve M2 kollektörlerinin deneylerinde hava çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



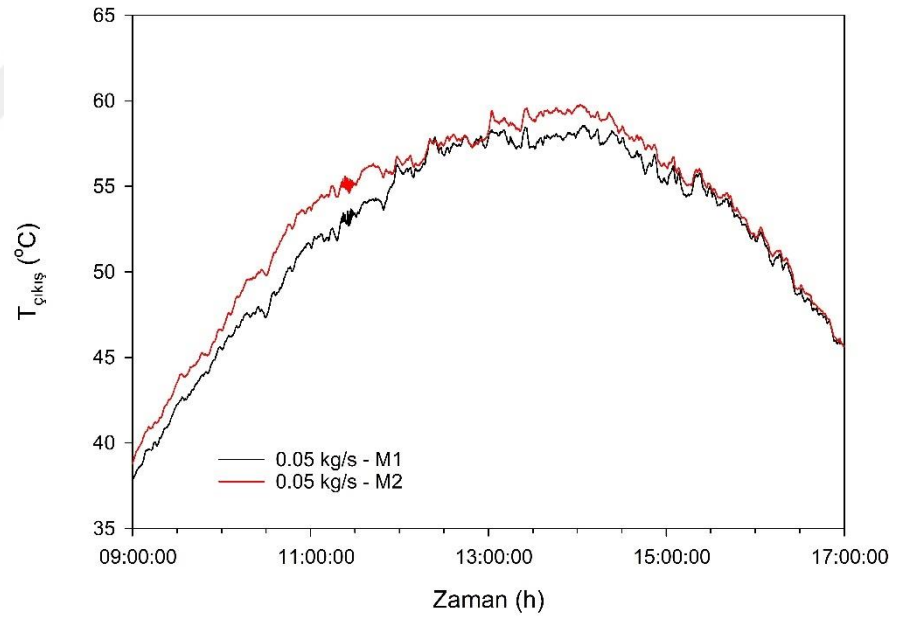
Şekil 6.3 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,01 kg/s)



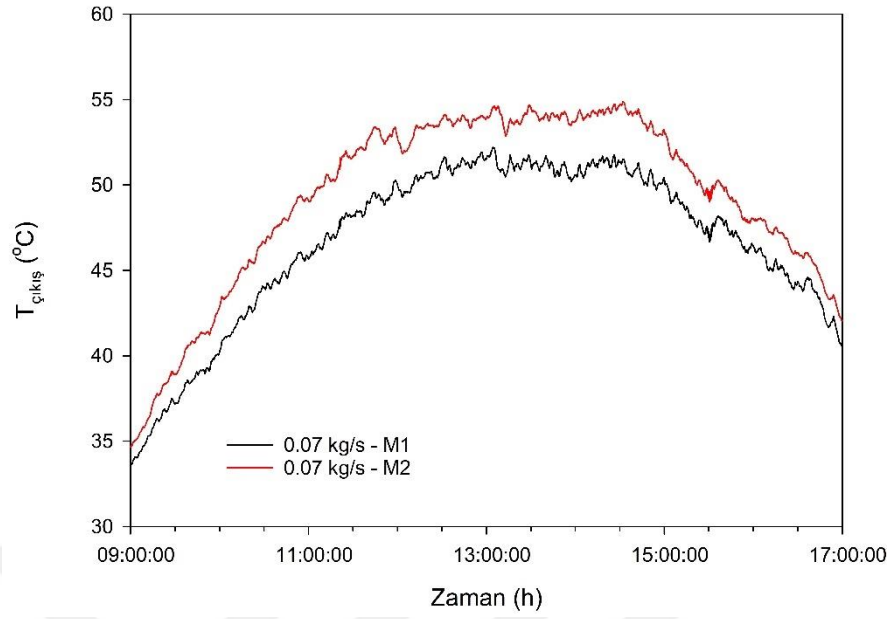
Şekil 6.4 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,02 kg/s)



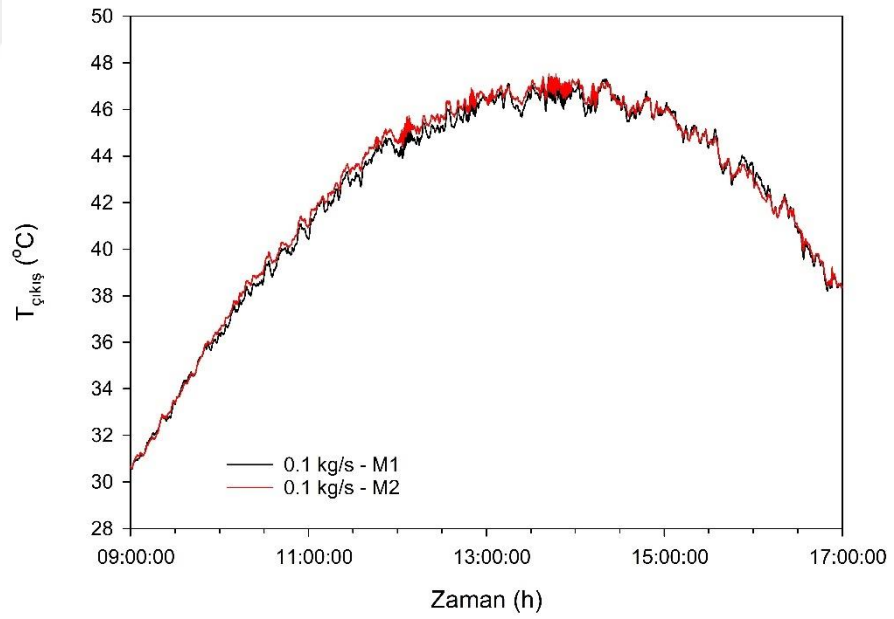
Şekil 6.5 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,03 kg/s)



Şekil 6.6 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,05 kg/s)



Şekil 6.7 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,07 kg/s)

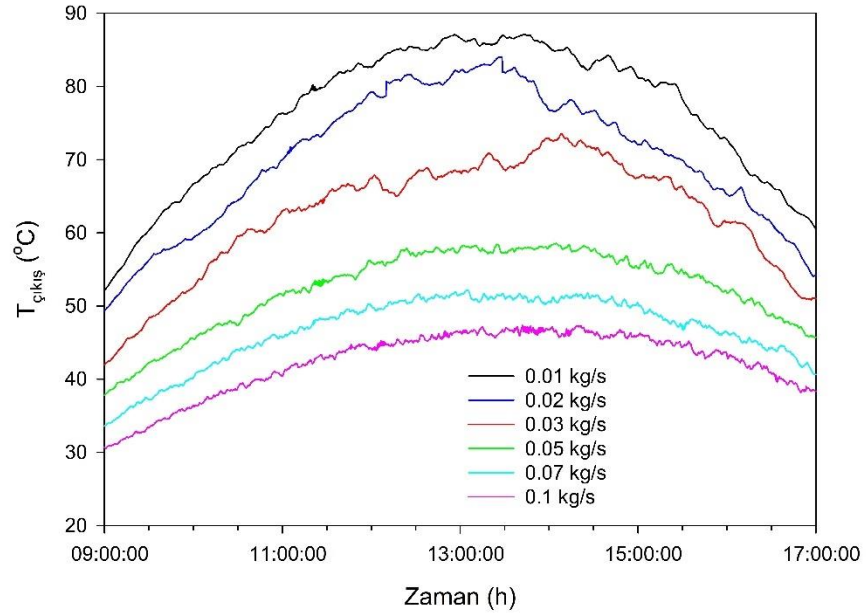


Şekil 6.8 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (0,1 kg/s)

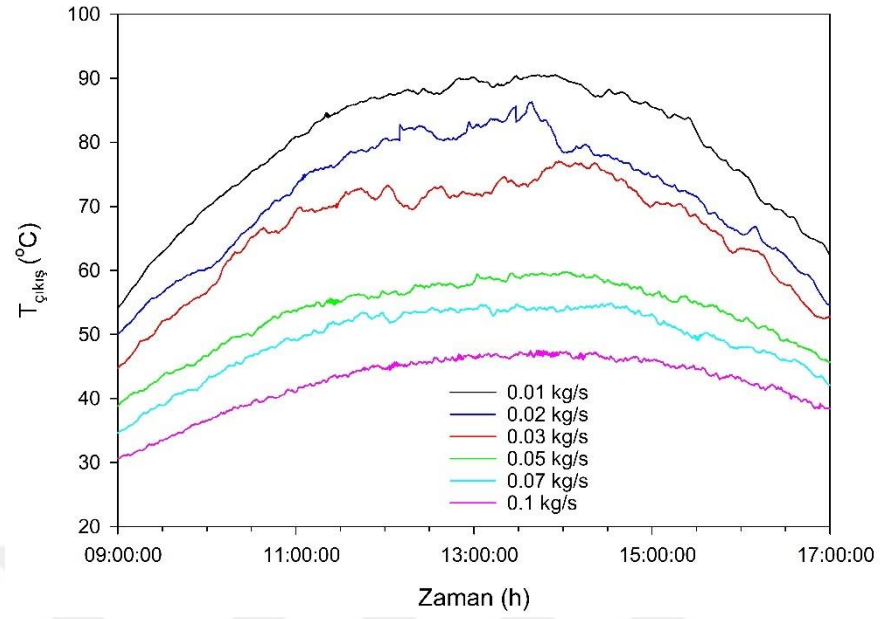
Şekiller 6.3–6.8 incelendiğinde havanın kütle debisinin artışı ile M1 ve M2 kolektörlerde hava çıkış sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. En yüksek hava çıkış sıcaklığı M1 kolektörde 0,01 kg/s debide, en yüksek ısınım değeri için 85 °C iken, M2

kollektörde ise aynı koşullarda 90 °C’dir. En düşük hava çıkış sıcaklığı en yüksek hava debisi 0,1 kg/s’de gözlenmiştir. M1 ve M2 için en düşük hava çıkış sıcaklığı sırası ile 44 °C ve 47 °C ‘dir. Düşük debilerde hava akış hızının yavaş olmasından dolayı, havanın kollektör içerisinde daha uzun zaman geçirmesi, yutucu plakadan havaya olan ısı transferini artırmaktadır. Bu nedenle düşük hava debilerinde havanın çıkış sıcaklıkları yüksek ölçülmüştür. M2 için çıkış sıcaklıklarının M1’den yüksek olması, trapez yutucu plakanın yüzey alanının düz plakadan daha fazla olması nedeniyle kollektöre giren havanın daha fazla yüzeyle temas ederek daha çok ısınması ile açıklanmaktadır. Ayrıca M2 kollektördeki trapez çıkıntılar akışın daha iyi karışmasını, daha yüksek ısı taşınım katsayısı ile birlikte yutucu plakadan daha fazla ısı çekilmesini sağlamaktadır.

M1 ve M2 kollektör modelleri için farklı debilerde havanın çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi sırası ile Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da verilmiştir. Hava debisinin artması ile hava çıkış sıcaklığının düşüşü, beklendiği gibi eğrilerde de görülmektedir. 0,01 kg/s hava debisi için M2 kollektörde havanın çıkış sıcaklığı M1 kollektöre göre 4 °C daha yüksek olup maksimum 90 °C’ye ulaşmaktadır. M2 kollektörde 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s debiler için maksimum hava çıkış sıcaklıkları sırası ile 85, 76, 59, 54 ve 46 °C iken aynı debiler için M1 kollektörde sıcaklıklar sırası ile 83, 72, 57, 50 ve 45 °C’dir.

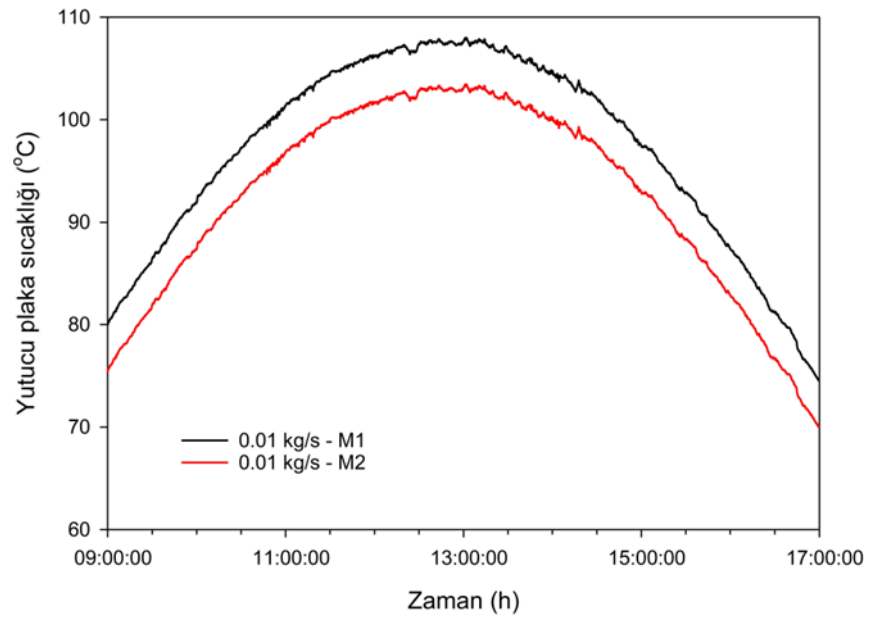


Şekil 6.9 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (M1 model)

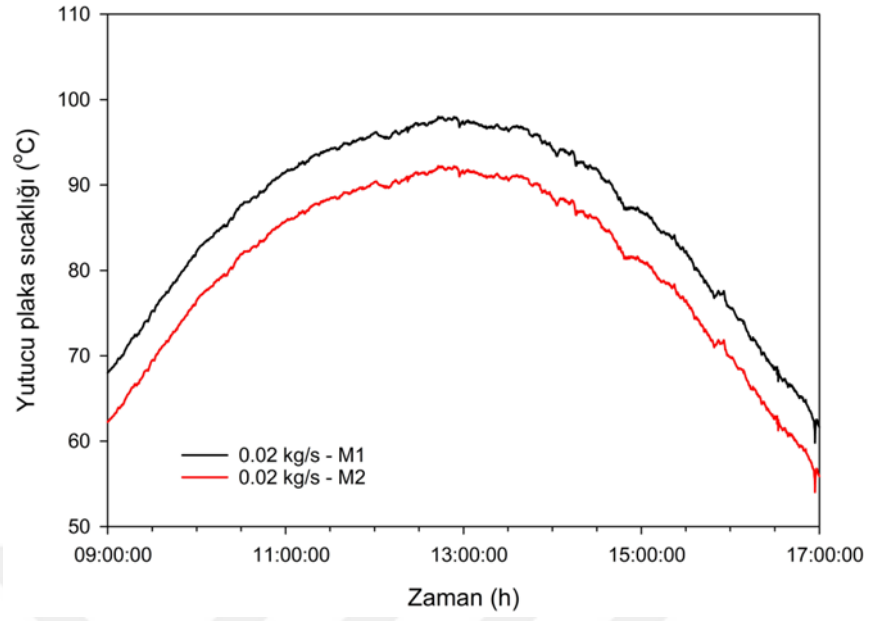


Şekil 6.10 Havanın çıkış sıcaklığının zamanla değişimi (M2 model)

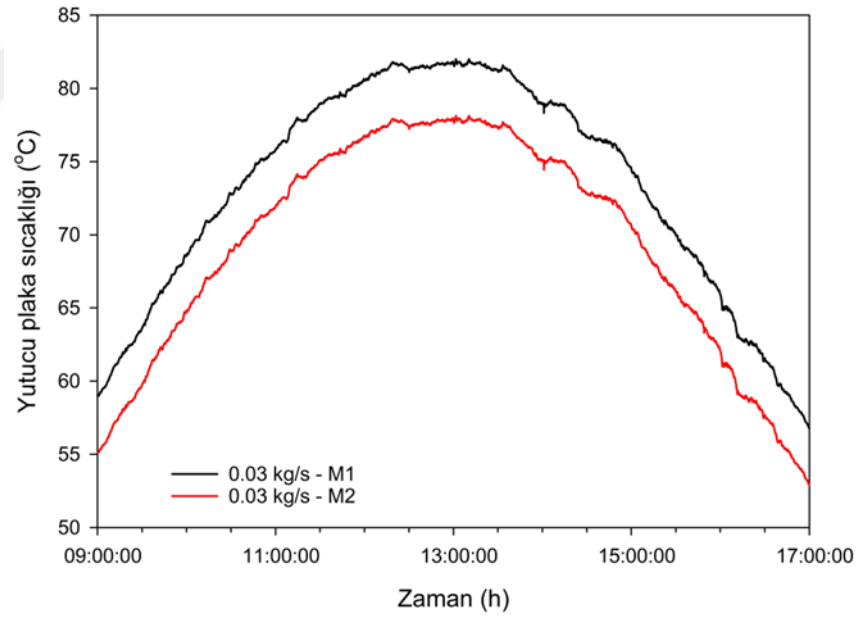
M1 ve M2 kollektörlerde yutucu plakaların ortalama sıcaklıklarının farklı debiler için zamana bağlı değişimleri Şekil 6.11-6.16 arasında gösterilmiştir.



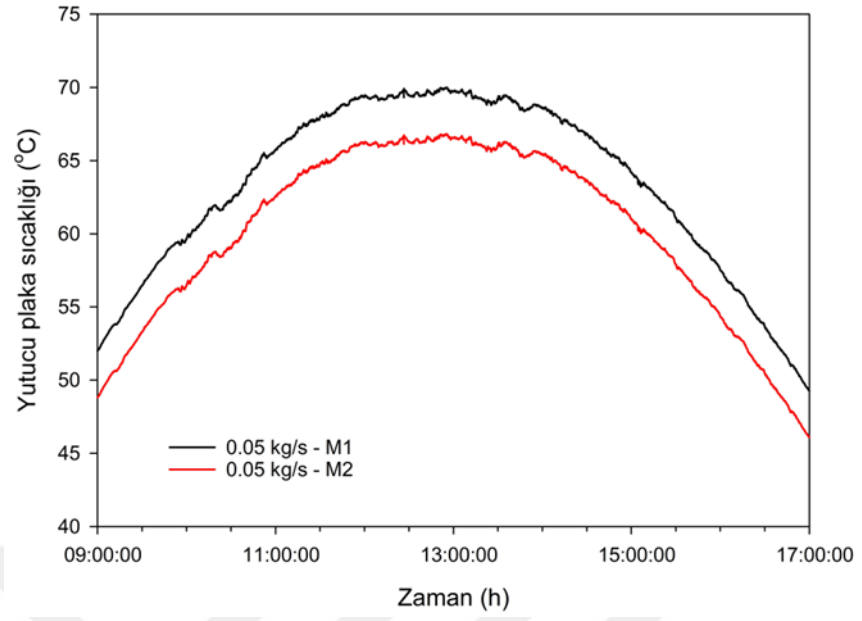
Şekil 6.11 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,01 kg/s)



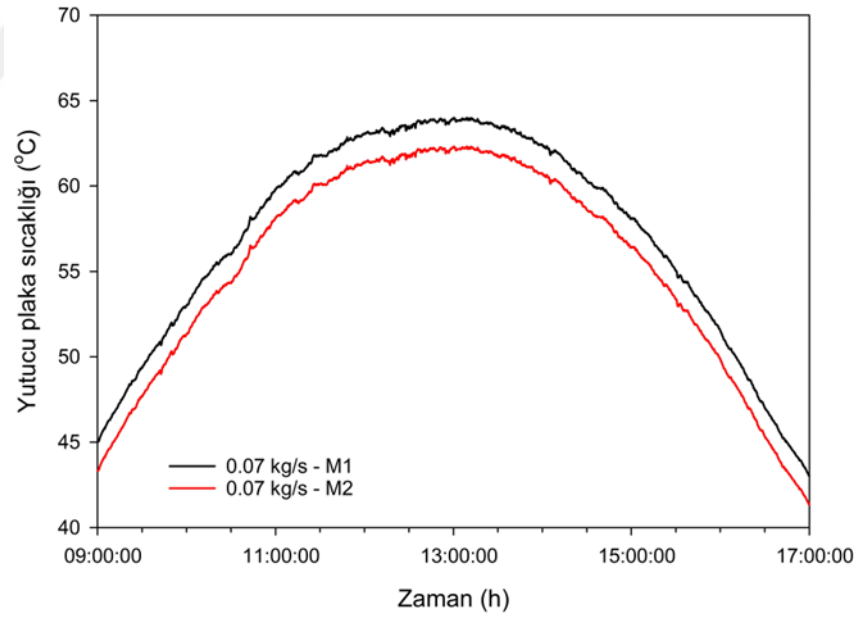
Şekil 6.12 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,02 kg/s)



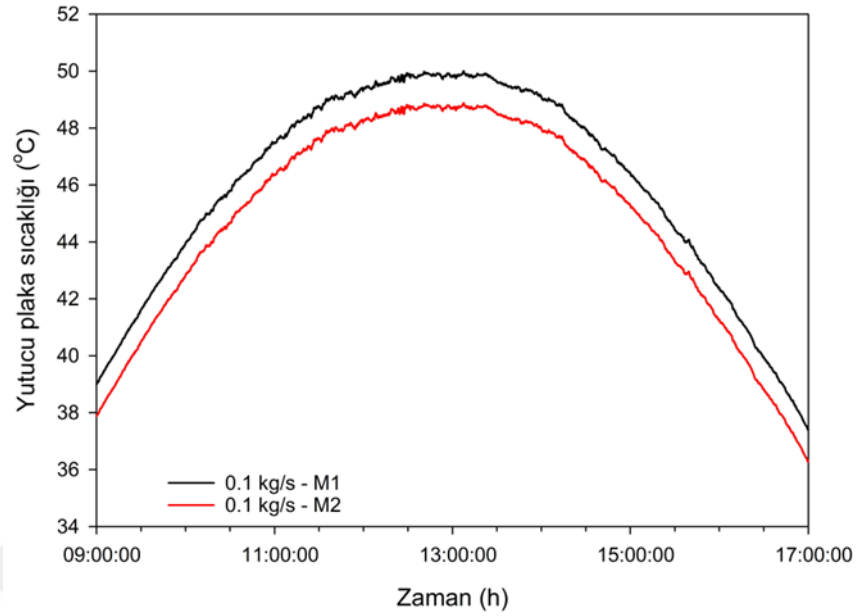
Şekil 6.13 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,03 kg/s))



Şekil 6.14 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,05 kg/s)



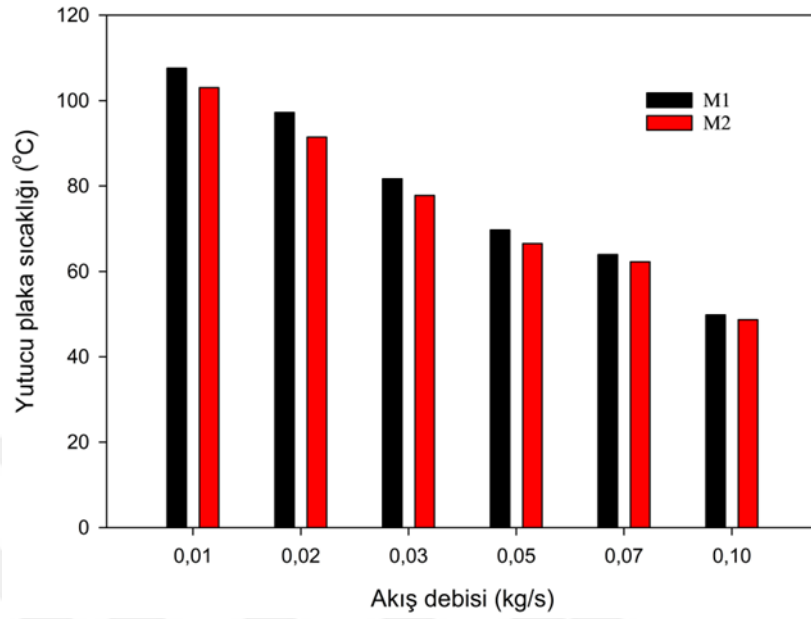
Şekil 6.15 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,07 kg/s)



Şekil 6.16 Yutucu plaka sıcaklıklarının zamanla değişimi (0,1 kg/s)

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi, gün içerisinde zamanın ilerlemesiyle yutucu plaka sıcaklığı, güneş ışınımı yoğunluğuna karşılık gelen öğle vakti en yüksek değerlere ulaşana kadar aşamalı olarak artmakta, öğleden sonra ise gün batımına kadar azalmaktadır. Şekillerden, M2 kollektör için yutucu plaka sıcaklıklarının M1'den daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, M2 kollektörde M1'deki düz yutucu plakaya kıyasla trapez şeklinde bir plaka kullanıldığı için daha fazla yüzey alanı ile açıklanabilir. Ayrıca şekillerden, hem M1 hem de M2 kollektör için havanın kütle debisi arttıkça plaka sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Daha yüksek kütle debisinde, havanın sıcak yüzeyden ısı kaldırma kapasitesi artarak yutucu sıcaklığında düşüşe neden olmaktadır. Şekil 6.11-6.16'daki sonuçlar havanın kütle debisinin 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s değerlerinde M1 kollektör için yutucu plaka ortalama sıcaklığının sırasıyla 97,1, 86,33, 73,2, 63,34, 57 ve 45,9 °C olduğunu göstermektedir. M2 kollektör için aynı debilere karşılık gelen plaka sıcaklık değerleri ise sırası ile 92,57, 80,6, 69,4, 60, 55,4 ve 44,8 °C'dir. M2 kollektörde yutucu plaka yüzeyinin trapez geometrilili olması hava dağılımını iyileştirmekte, kollektör içinde akışın türbülans düzeyini arttırmakta ve plakadan havaya daha fazla ısı transferi sonucunda plaka sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Yutucu yüzey geometrisinin farklı oluşu daha düşük plaka sıcaklığı ile daha yüksek bir ısı taşınım katsayısı sağlarken aynı zamanda ısı kaybını azaltarak ısı verimliliğinin artması sonucunu doğurmaktadır. M1 ve M2

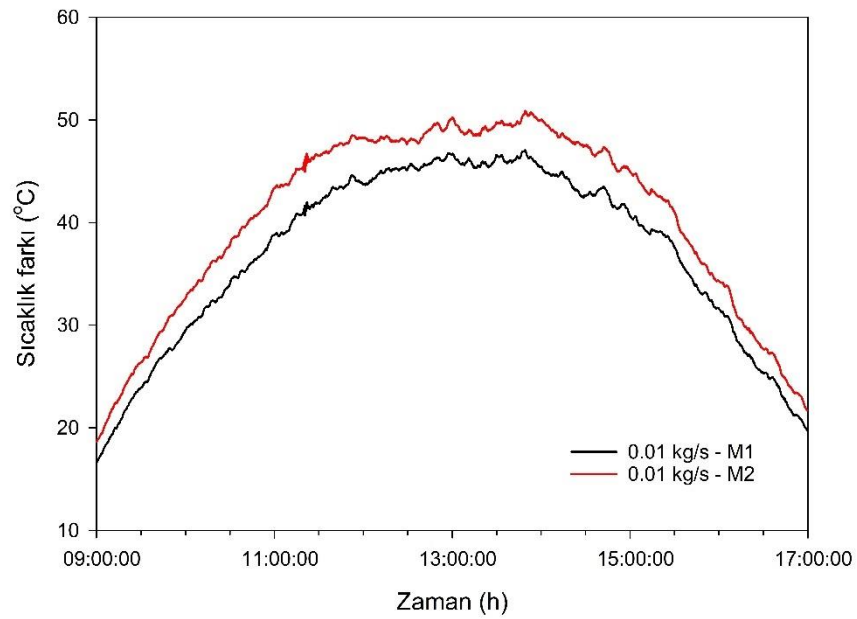
kollektörler için yutucu plaka sıcaklıklarının saat 13:00'deki pik değerlerinin havanın kütle debisiyle değişimi Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



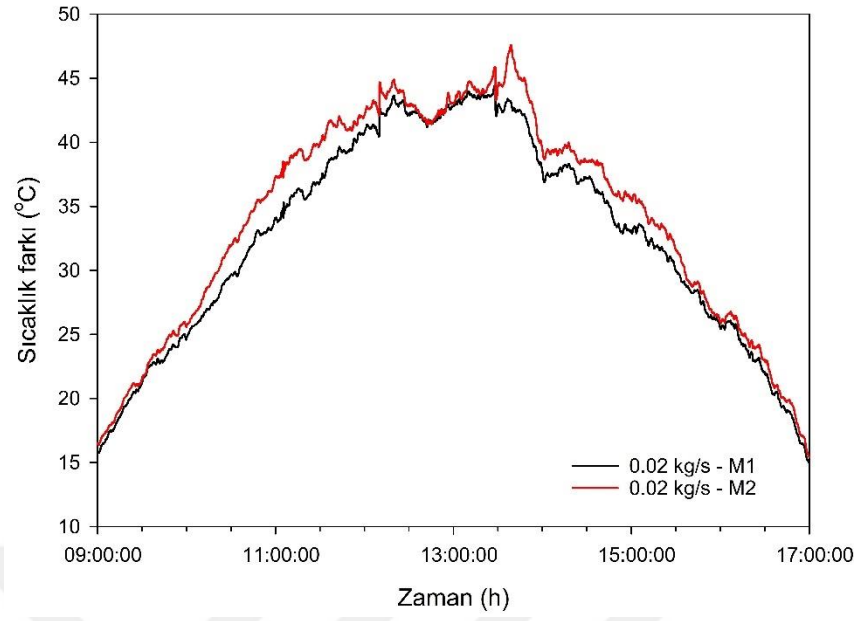
Şekil 6.17 Yutucu plaka sıcaklıklarının pik değerleri (saat 13:00)

6.1.2. Havanın sıcaklık farkı sonuçları

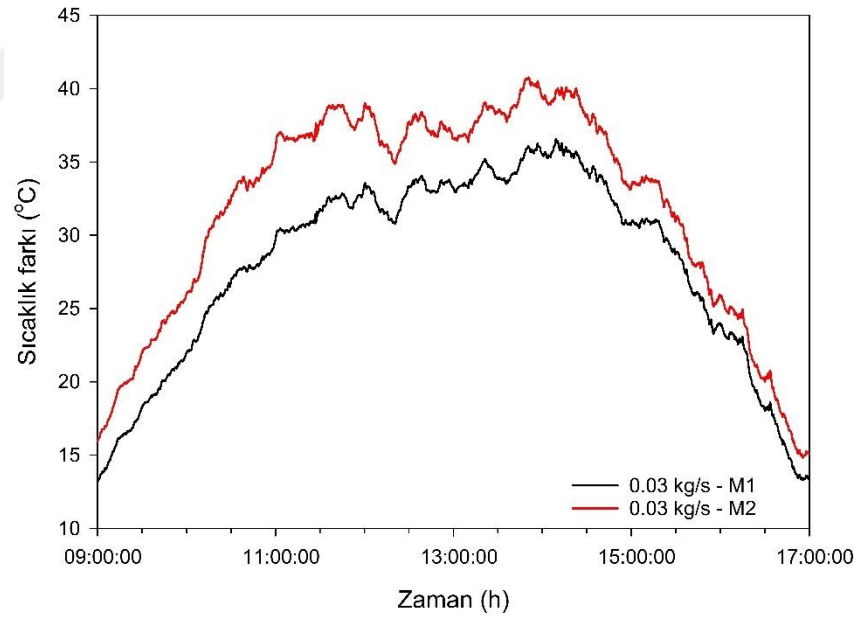
Model 1 ve Model 2 kollektörler için havanın kollektörlere giriş ve çıkış sıcaklık farkının zamana göre değişimi havanın farklı kütle debileri için Şekil 6.17-6.22'de gösterilmiştir.



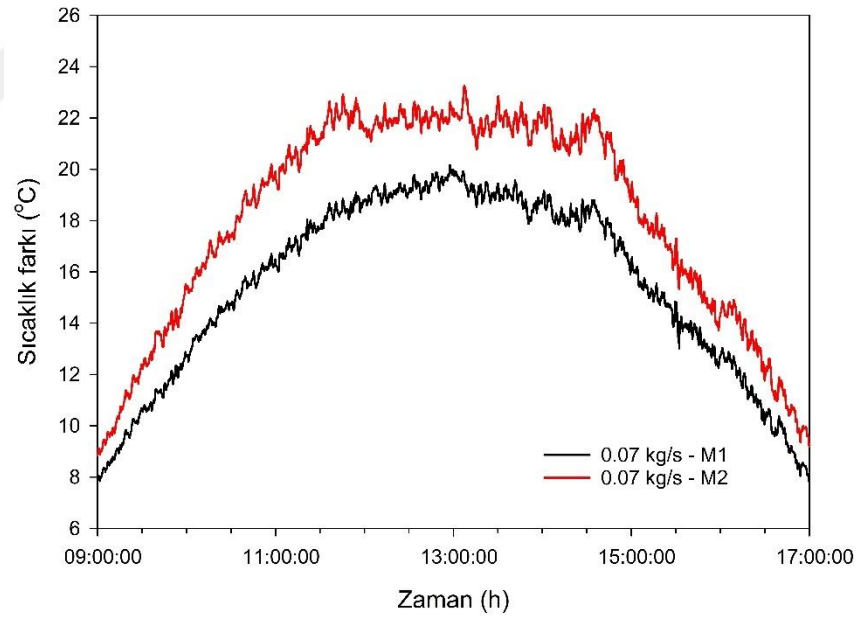
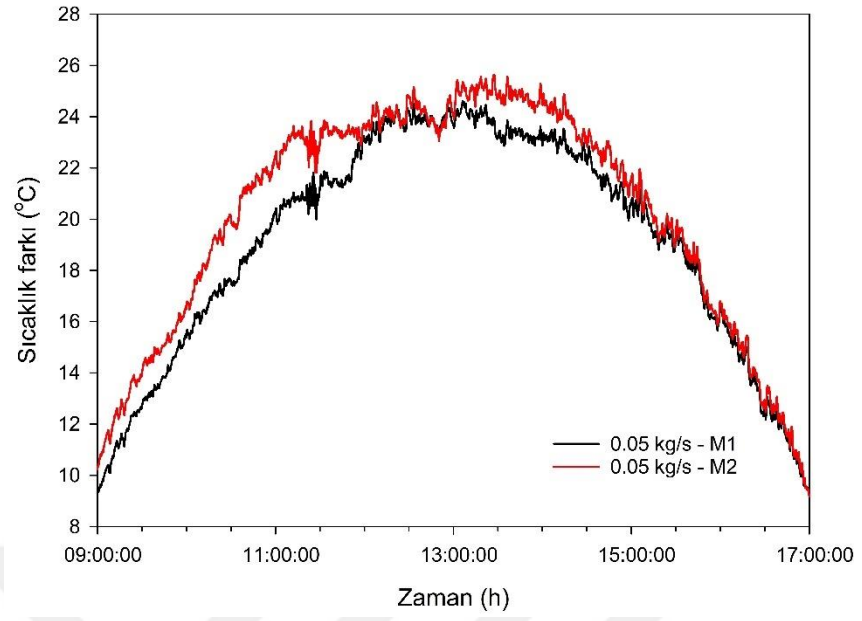
Şekil 6.18 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,01 kg/s)

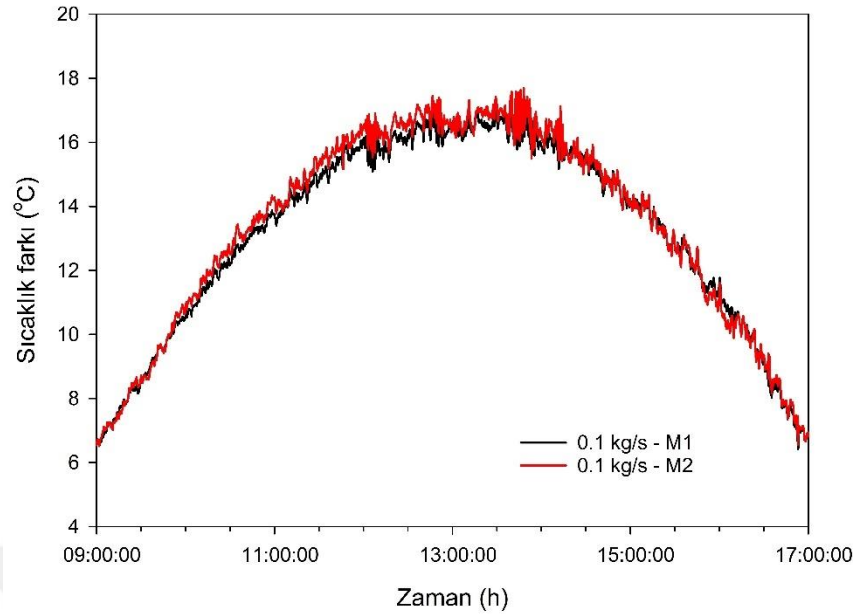


Şekil 6.19 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,02 kg/s)



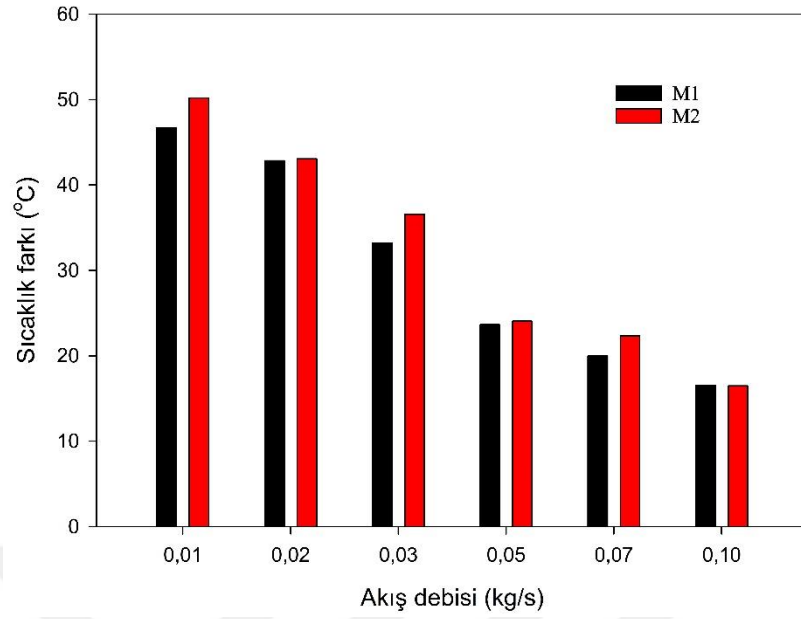
Şekil 6.20 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,03 kg/s)





Şekil 6.23 Havanın sıcaklık farkının zamanla değişimi (0,1 kg/s)

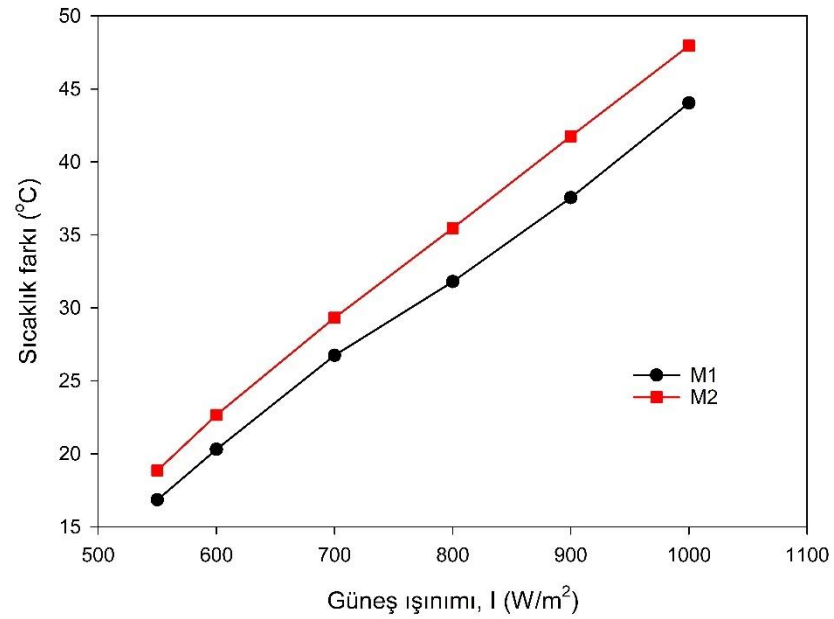
Yukarıdaki şekiller, havanın sıcaklık farkı eğrilerinin yutucu plaka sıcaklığı ve güneş ışıınımı ile aynı yolu izlediğini, öğle vaktinde en yüksek değerine ulaştığını, ardından gün batımına kadar tekrar azaldığını göstermektedir. Şekillerde görüldüğü gibi, M2 kollektörde havanın sıcaklık farkı, M1 kollektöre kıyasla daha fazla taşınım ile ısı transferi nedeniyle daha yüksektir ve bu da yutucu plakadan havaya daha fazla ısı çekilmesini sağlar. Ayrıca şekillerden, kollektörden geçen havanın daha kısa akış süresinin bir sonucu olarak hem M1 hem de M2 için havanın kütle akış debisi arttıkça sıcaklık farkının azaldığı görülmektedir. Şekillere göre, kütle akış debisinin 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s değerlerinde M1 kollektör için havanın ortalama sıcaklık farkı sırası ile 37, 32,5, 27,9, 19, 15,5 ve 13,2 °C'dir. M2 kollektör için aynı debilere karşılık gelen ortalama sıcaklık farkı değerleri ise sırası ile 40,5, 34, 31,8, 20,2, 18 ve 13,6 °C'dir. Bu çalışmada dikkate alınan en yüksek kütle debisi 0,1 kg/s için M1 ve M2 kollektörlerde havanın sıcaklık farkı değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Havanın kollektöre giriş ve kollektörden çıkış sıcaklık farklarının saat 13.00'deki pik değerlerinin kütle debisi ile değişimi Şekil 6.24 'te verilmiştir.



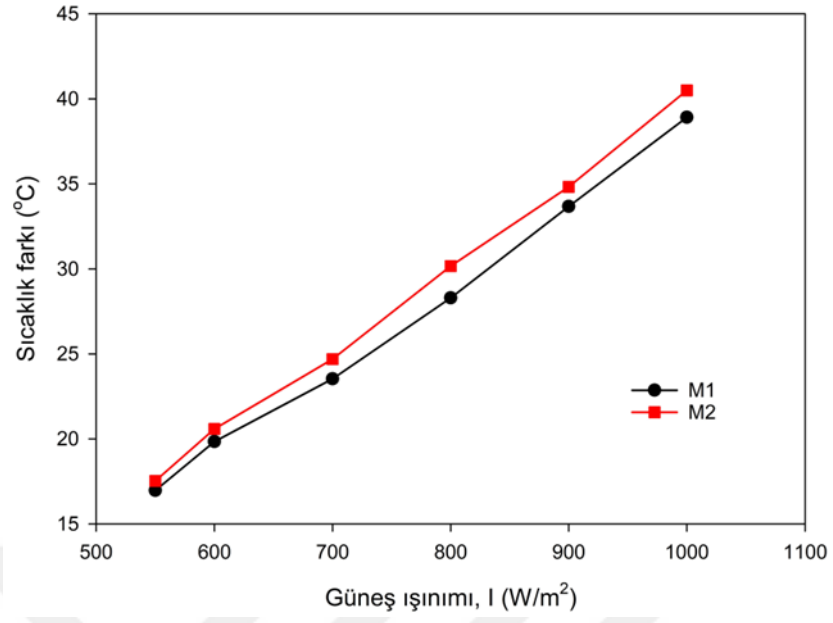
Şekil 6.24 Havanın sıcaklık farklarının pik değerleri (saat 13.00)

6.1.3. Güneş ışınlamının havanın sıcaklık farkına etkisi

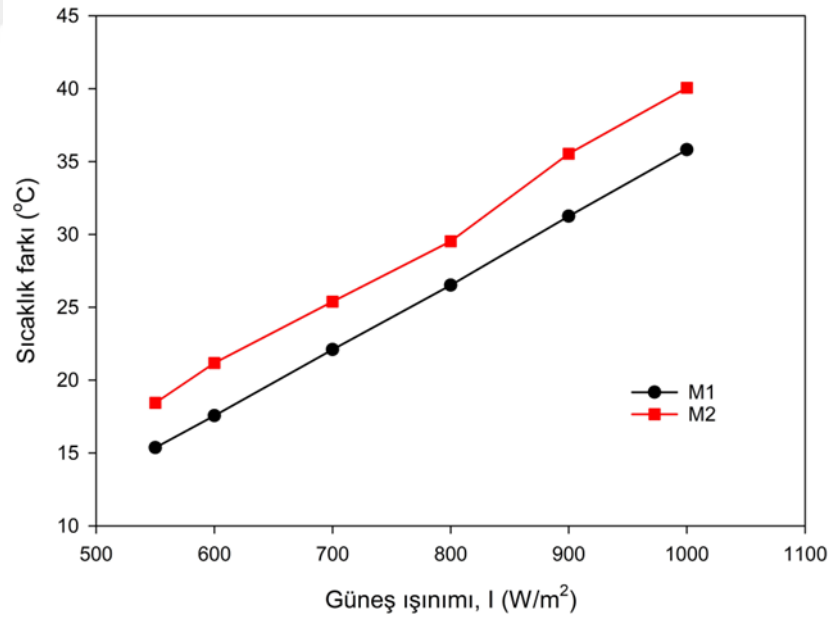
Deney yapılan günlerde yutucu plaka yüzeylerine gelen toplam güneş ışınlamı ile kolektörlerde havanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın değişimi aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



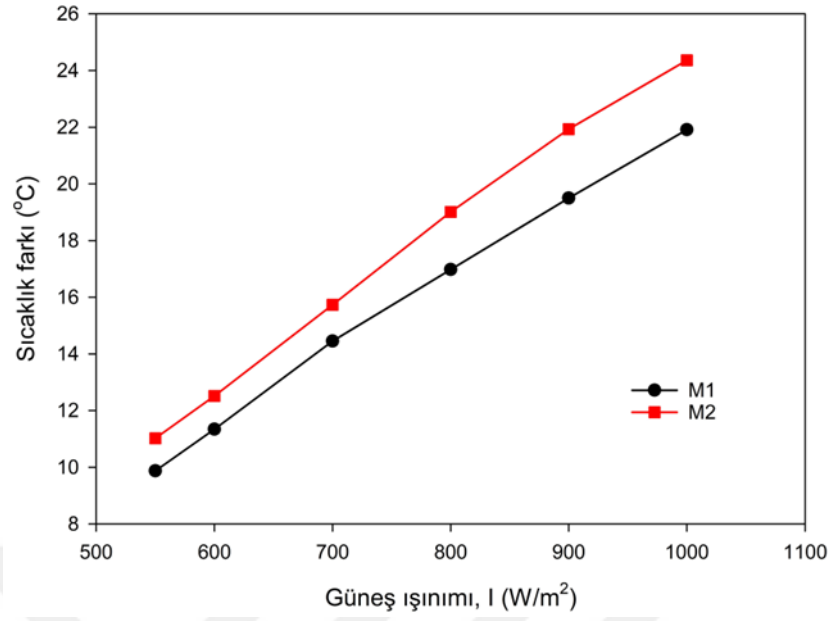
Şekil 6.25 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,01 kg/s)



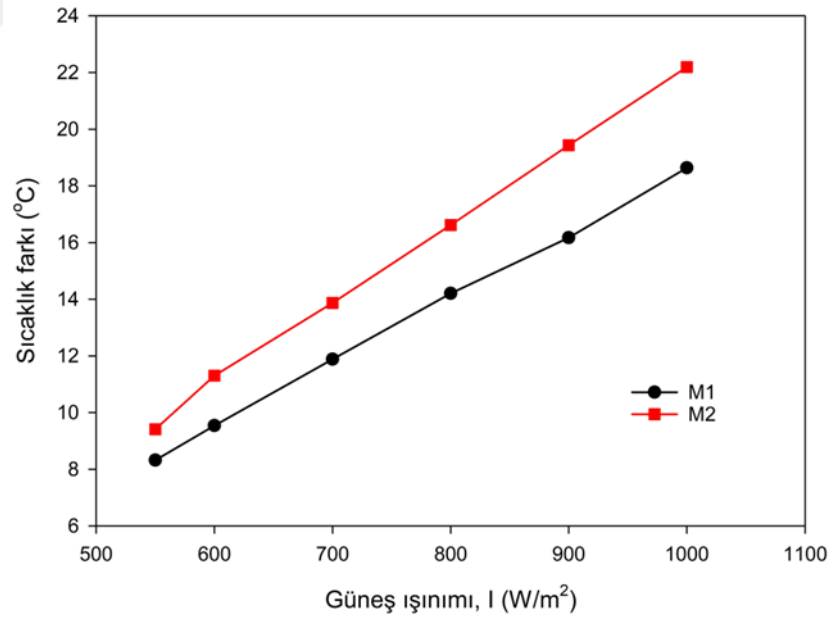
Şekil 6.26 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,02 kg/s)



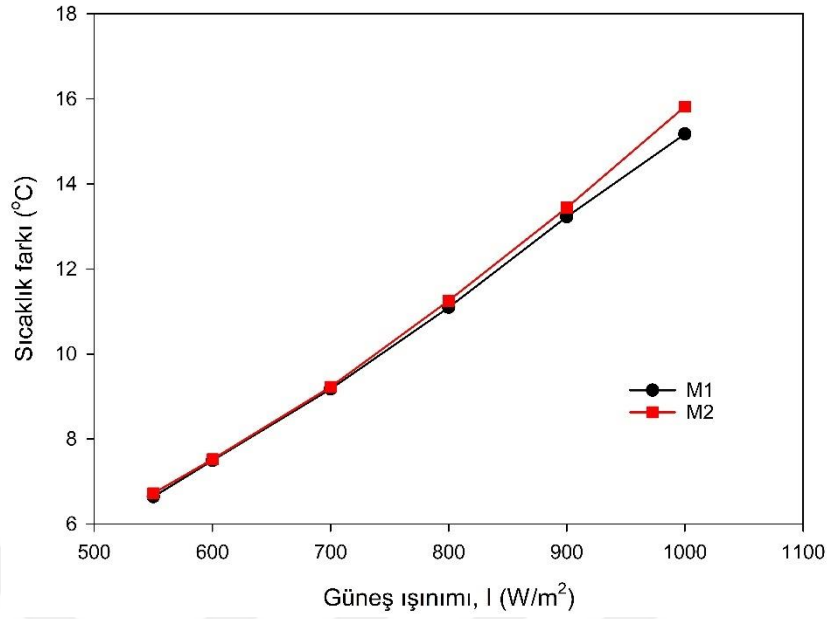
Şekil 6.27 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,03 kg/s)



Şekil 6.28 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,05 kg/s)



Şekil 6.29 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,07 kg/s)

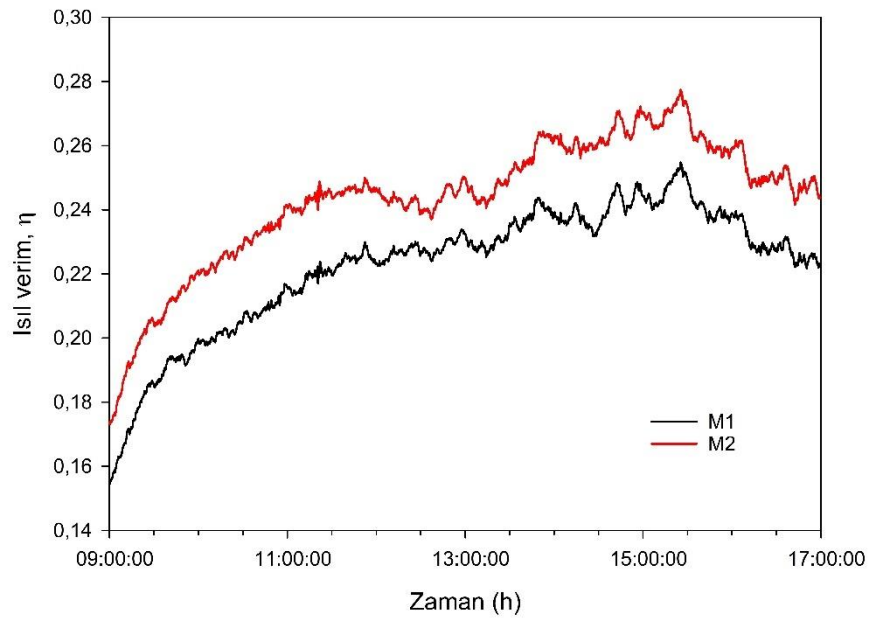


Şekil 6.30 Havanın sıcaklık farkının güneş ışınlamı ile değişimi (0,1 kg/s)

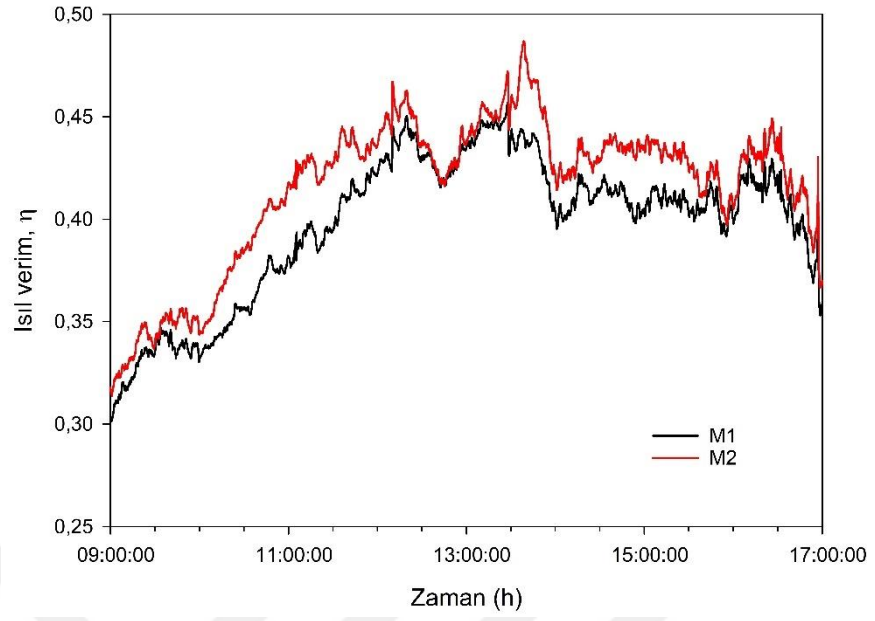
Şekil 6.23-6.28 incelenirse, havanın sabit kütle akış debisinde güneş ışınlamındaki artış ile M1 ve M2 kollektör için havanın kollektöre giriş-çıkış sıcaklık farkının doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Herhangi bir sabit kütle debisinde, kollektörlere gelen güneş ışınlamının artışı ile plaka sıcaklığı ve buna bağlı olarak havanın sıcaklık farkı artmaktadır. Güneş ışınlamının artması, yutucu plakanın daha fazla ısı absorbe etmesine neden olmakta ve bu da plakadan havaya aktarılan ısıнын ve sonuç olarak havanın çıkış sıcaklığının artmasını sağlamaktadır. Sabit güneş ışınlamında kütle akış debisinin artışı ile havanın sıcaklık farkı azalmaktadır. 550-1000 W/m² güneş ışınlamı aralığında düz plakalı kollektörün yutucu plakası trapez geometrili hale dönüştürüldüğünde havanın kütle akış debisinin 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s değerleri için havanın ortalama sıcaklık farkı değerleri sırası ile 3,5, 2,7, 2,2, 1,9, 1,2, 0,9 ve 0,6 °C olmuştur. En yüksek sıcaklık farkı, 1000 W/m² güneş ışınlamında ve 0,01 kg/s hava debisinde M1 kollektör için 43 °C, M2 kollektör için 47 °C olarak gerçekleşmiştir. Şekil 6.28' göre, her iki model için sıcaklık farkı eğrileri birbirine çok yaklaşmıştır. Bunun nedeni, artan hava akış hızı ile kollektörden daha kısa sürede geçtiğinden havanın fazla ısınamamasıdır.

6.1.4. Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin değişimi

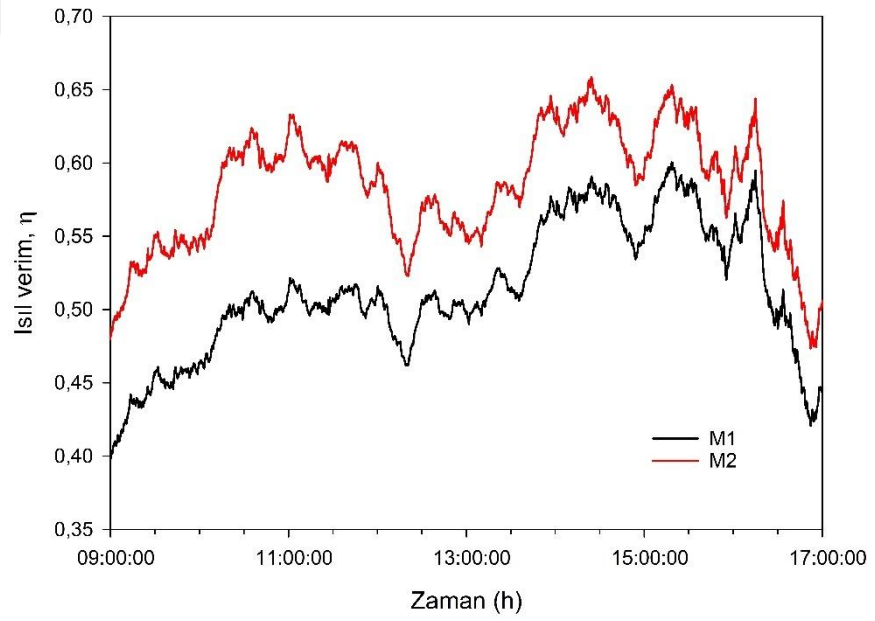
Kollektör modelleri için farklı debilerde ısı veriminin zamanla değişimini incelemek için Şekil 6.29-6.34 hazırlanmıştır. Şekiller incelenirse, M1 ve M2 kollektörlerde tüm debiler için sabah saatlerinden itibaren ısı verimlerinin % 16 ile %50 arasında değerlerden başlayarak güneş ışıınının artması ile öğle saatlerine kadar arttığı görülmektedir. Öğle 12:00-14:00 saatleri arasında ısı verim değerlerinin en yüksek değerine ulaştığı, öğleden sonra ise azalan güneş ışıınımlarına paralel olarak azaldığı gözlenmektedir.



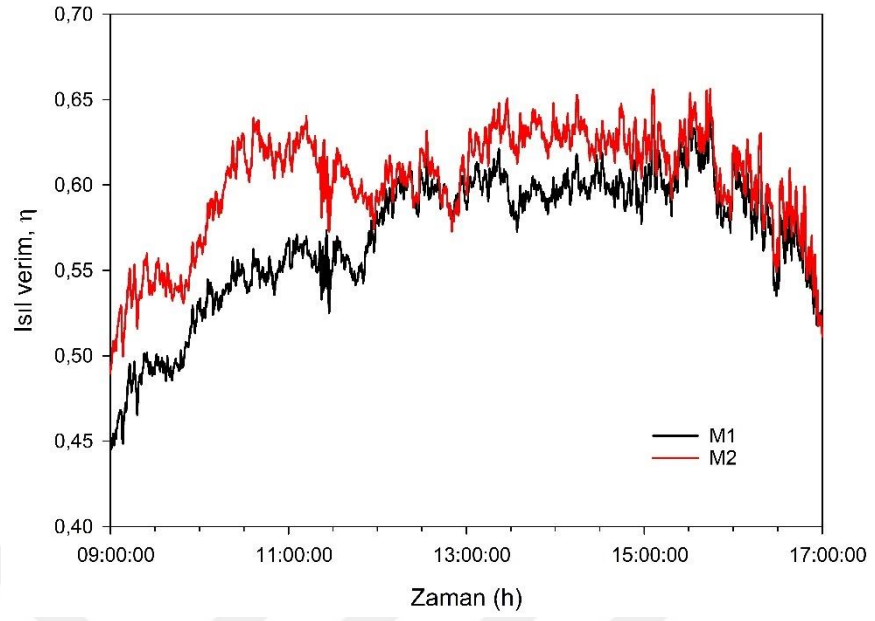
Şekil 6.31 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,01 kg/s)



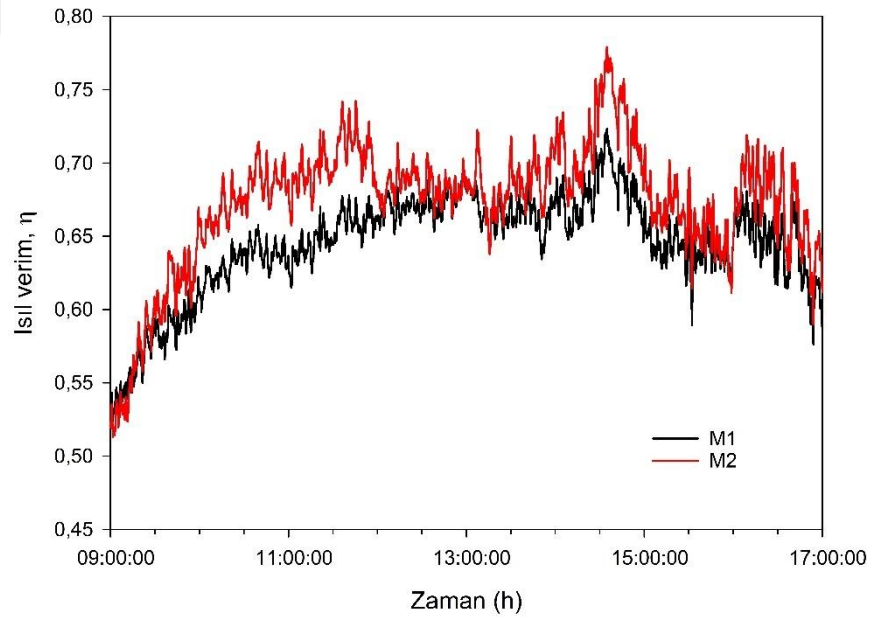
Şekil 6.32 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,02 kg/s)



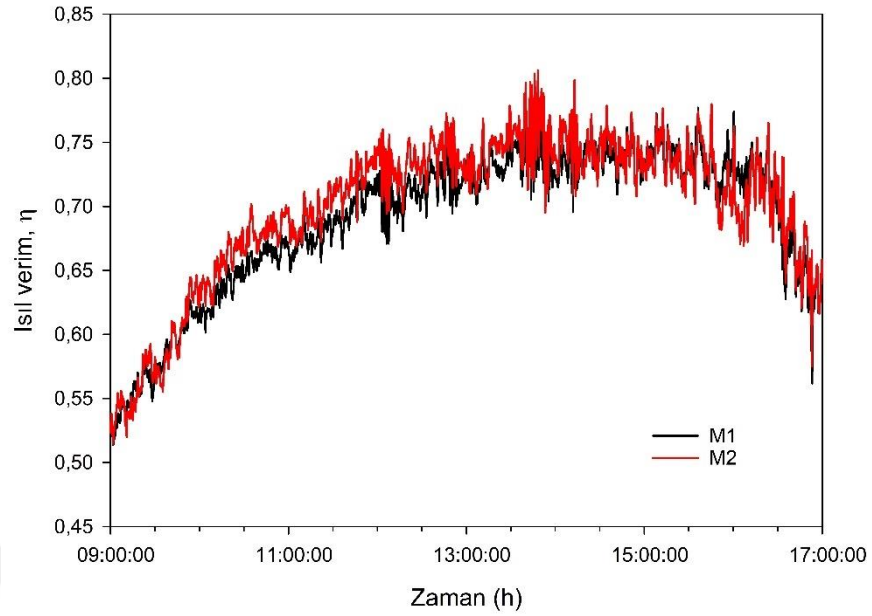
Şekil 6.33 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,03 kg/s)



Şekil 6.34 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,05 kg/s)



Şekil 6.35 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,07 kg/s)



Şekil 6.36 Kollektörlerin anlık ısı verimlerinin zamanla değişimi (0,1 kg/s)

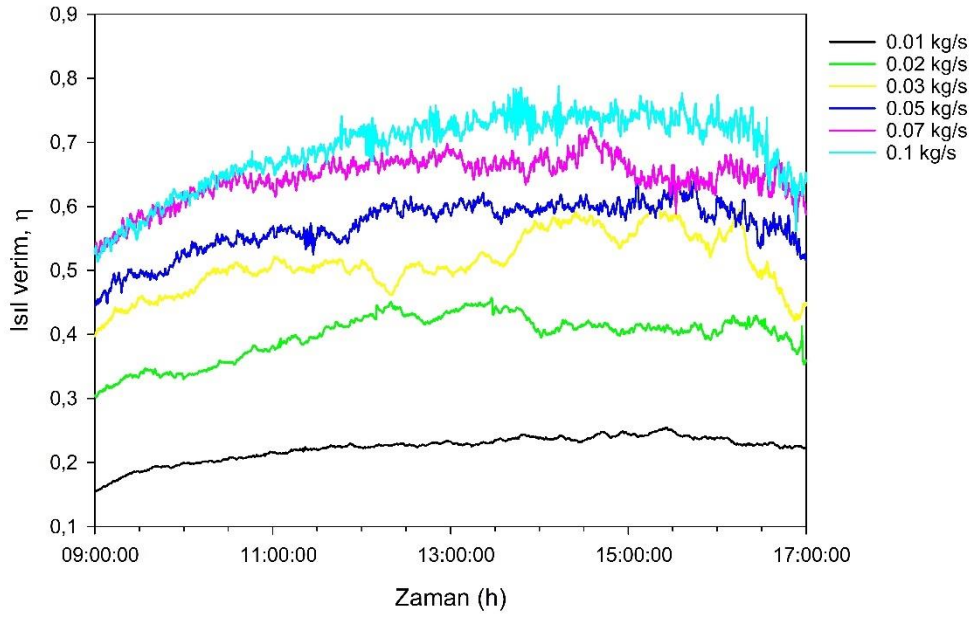
Şekil 6.29'da görüldüğü gibi, en düşük hava debisi 0,01 kg/s'de ısı verimin en yüksek değerleri M1 ve M2 için sırası ile % 24 ve % 28'dir. Diğer debiler için de M2 kollektörün ısı veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, M2 kollektörde trapez yüzey geometrisinden dolayı yüzey alanının daha fazla olması ve ayrıca akışın türbülans seviyesinin yüksek olmasıdır. Her iki kollektörde akışın kütle debisindeki artış ile birlikte ısı verimler de yükselmektedir. Yüksek akış debilerinde havanın plakadan ısı kazancı artar. Bu durumda plakanın sıcaklığı ve çevreye kaybolan ısı miktarı düşük olur. Sonuçta kollektörün ısı verimliliği artmaktadır. Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'den ısı verimin % 45-60 değerlerine yükseldiği görülmektedir. Akışın laminardan geçiş bölgesi rejimine geçmesi de en yüksek ısı verim M1 kollektör için % 75 iken, M2 kollektörde yaklaşık % 80 olmaktadır.

6.1.5. Hava debisinin kollektörün ısı verimine etkisi

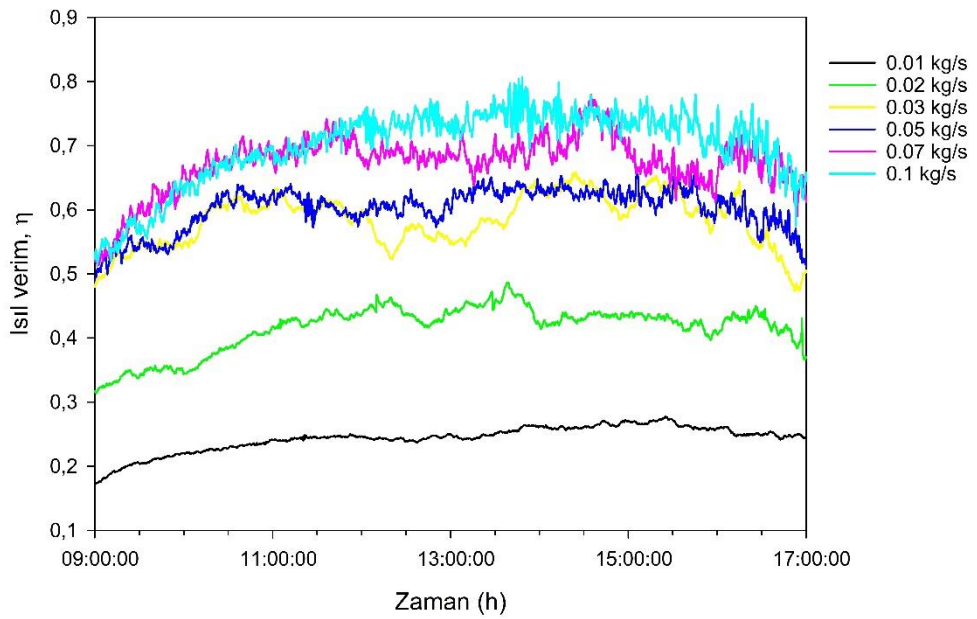
M1 ve M2 kollektör modellerinin havanın farklı kütle debileri için ısı verimlerinin anlık değişimleri Şekil 6.35 ve Şekil 6.36 'da gösterilmiştir.

Şekil 6.35 incelendiğinde M1 kollektör için en düşük ısı verim 0,01 kg/s 'de %20 iken, akışın biraz daha hızlandığı debiler 0,05 kg/s, 0,07 kg/s ve 0,1 kg/s için ısı verimler sırası ile %63, %74 ve %78 olarak görülmektedir. Şekil 6.36'da aynı

şekilde M2 kollektöründe de ısı verimleri, hava debisi arttıkça yükselmektedir. 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s debiler için ortalama ısı verim sırası ile %24, %45, %58, %65, %77 ve %80'dir. Hava akış hızının artması ile yutucu plakadan havaya gerçekleşen ısı transferi artarken plaka sıcaklığı düşmektedir. Düşük plaka sıcaklığında çevreye ısı kaybı daha az olduğundan ısı verimleri yükselmektedir.



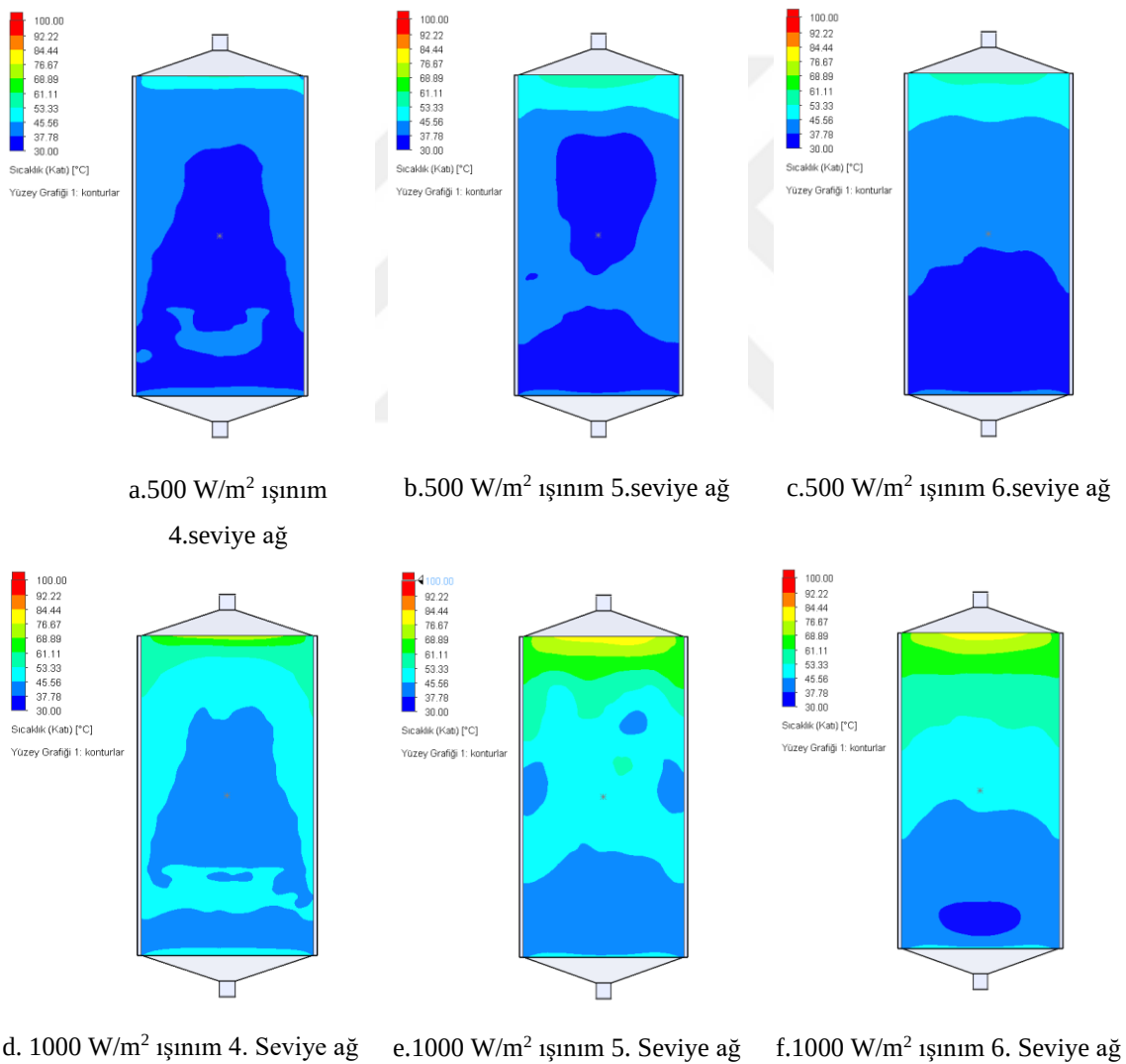
Şekil 6.37 M1 kollektör ısı veriminin zamanla değişimi



Şekil 6.38 M2 kollektör ısı veriminin zamanla değişimi

6.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Sonuçları

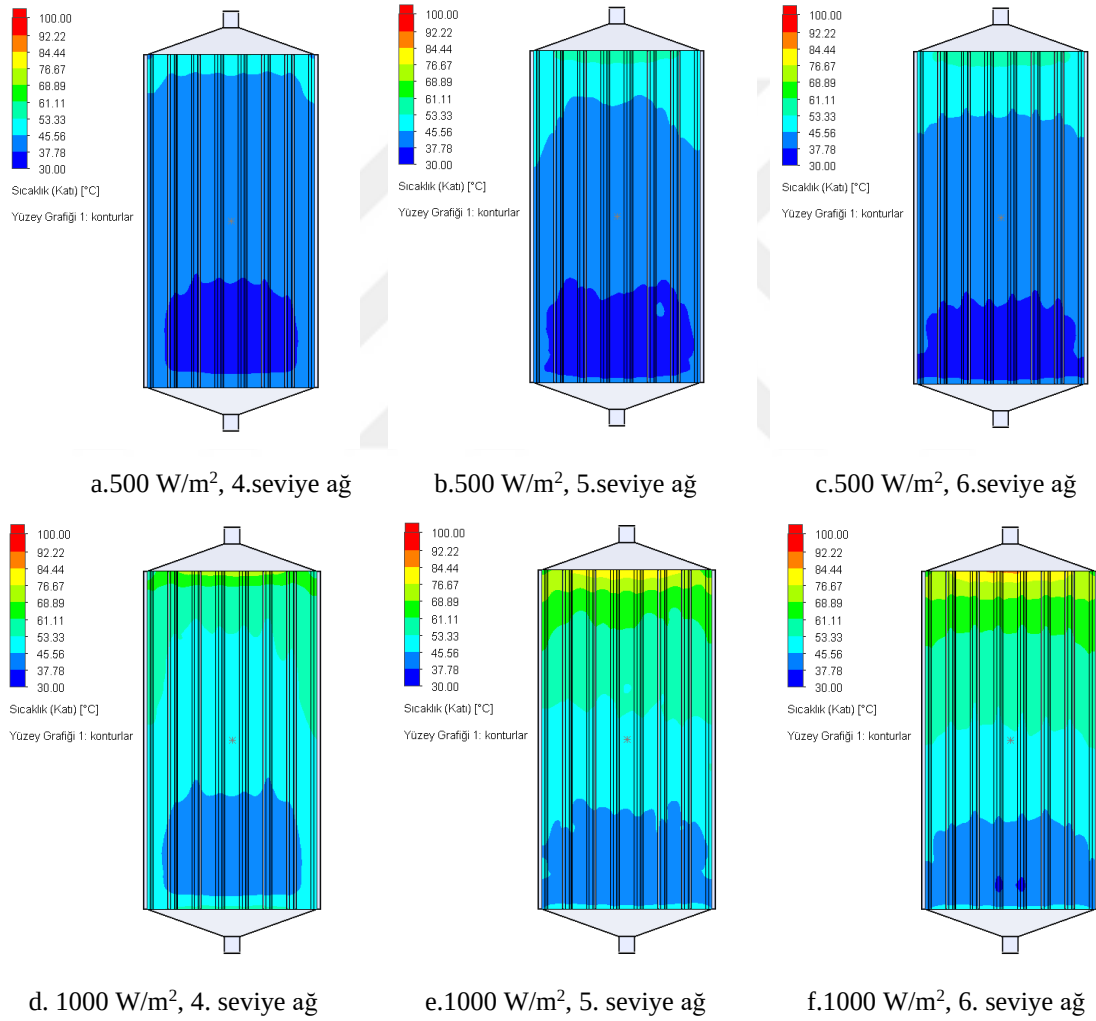
Tez kapsamında Model 1 ve Model 2 olarak adlandırılan havalı kollektörlerin üretimi gerçekleştirilerek bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda sağlanan çıktılar HAD analizleri için Solidworks Flow Simulation programında giriş verisi olarak kullanılmıştır. HAD analizlerine başlamadan önce M1 ve M2 kollektörlerde uygun eleman sayısının tespiti için ön analizler yapılmıştır. Düz ve trapez yutucu plaka modellerinde farklı seviyede eleman ağları için kollektörden geçen havanın sıcaklık profilleri Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’de gösterilmiştir. Eleman ağı sayılarına göre Reynolds sayıları ise Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 6.39 M1 kollektörde eleman ağı sayısına göre havanın sıcaklık profilleri

Çizelge 6.1 M1 kollektörde eleman ağı sayısına göre analiz değerleri

	a.	b.	c.	d.	e.	f.
Güneş ışınlımı (W/m^2)	500	500	500	1000	1000	1000
Eleman ağı seviyesi	4	5	6	4	5	6
Eleman sayısı	1200000	2450000	3300000	1200000	2450000	3300000
Reynolds sayısı	1036,6	1021,54	1071,94	1041,46	1031,66	1070,06
Yakınsama limiti	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}



Şekil 6.40 M2 kollektörde eleman ağı sayısına göre havanın sıcaklık profilleri

Çizelge 6.2 M2 kollektörde eleman ağ sayısına göre analiz değerleri

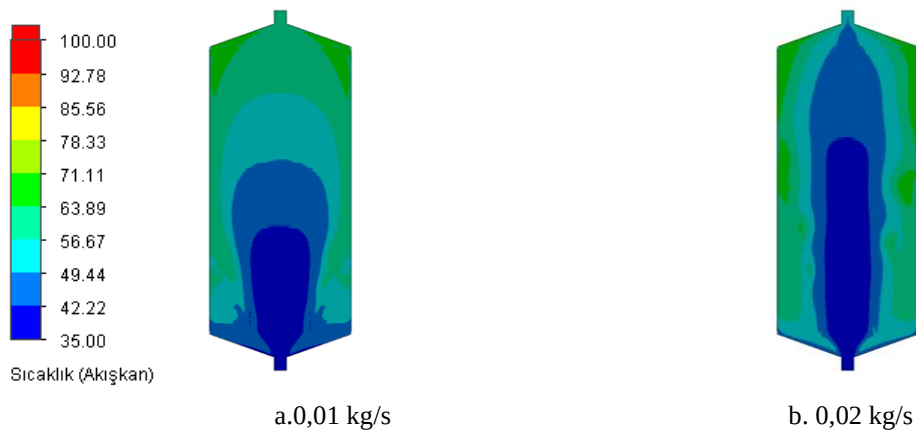
	a.	b.	c.	d.	e.	f.
Güneş ışınlımı (W/m^2)	500	500	500	1000	1000	1000
Eleman ağ seviyesi	4	5	6	4	5	6
Eleman sayısı	1400000	2500000	3700000	1400000	2500000	3700000
Reynolds sayısı	918,03	960,73	982,19	926,14	954,42	970,13
Yakınsama limiti	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

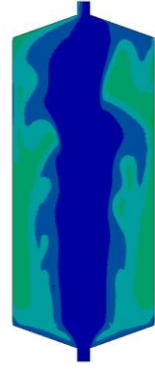
Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 incelendiğinde Reynolds sayılarındaki değişime göre; M1 düz plakalı kollektörün analizleri için 5., M2 trapez plakalı kollektörün analizleri için 6. seviye ağ yeterli görülmüştür. Analiz sonuçlarının gerçeğe yakın değerler verebilmesi ve hesaplamaların daha kararlı olması için uygun ağ seviyesi önem arz etmektedir.

Deneyleri yapılan M1 ve M2 kollektörlerin HAD analizleri 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s hava akış debileri için gerçekleştirilmiştir. Deney verileri baz alınarak kollektör yüzeylerine gelen toplam güneş ışınlımının 600, 800 ve 1000 W/m^2 değerleri analizlerde ışınlım girdisi olarak kullanılmıştır.

6.2.1. Model 1 kollektör HAD analiz sonuçları

Düz yutucu plakalı havalı kollektör için altı farklı akış debisi ve altı farklı güneş ışınlımı için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. 600, 800 ve 1000 W/m^2 ışınlım değerlerinde farklı hava debileri için havanın sıcaklık profilleri Şekil 6.39, Şekil 6.40 ve Şekil 6.41’de verilmiştir. Deneysel verilere göre ortam sıcaklığı 30 °C, giriş havası sıcaklığı ise 34 °C olarak alınmıştır.





c. 0,03 kg/s



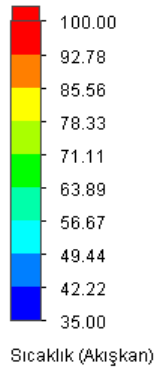
d. 0,05 kg/s



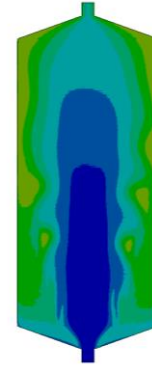
e. 0,07 kg/s



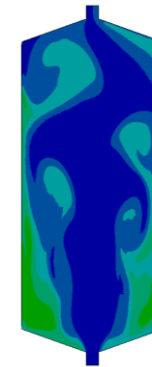
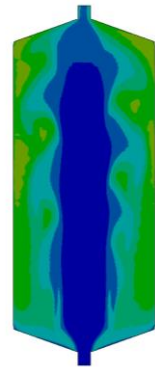
f. 0,1 kg/s

Şekil 6.41 M1 kollektör 600 W/m² için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri

a. 0,01 kg/s



b. 0,02 kg/s



c. 0,03 kg/s



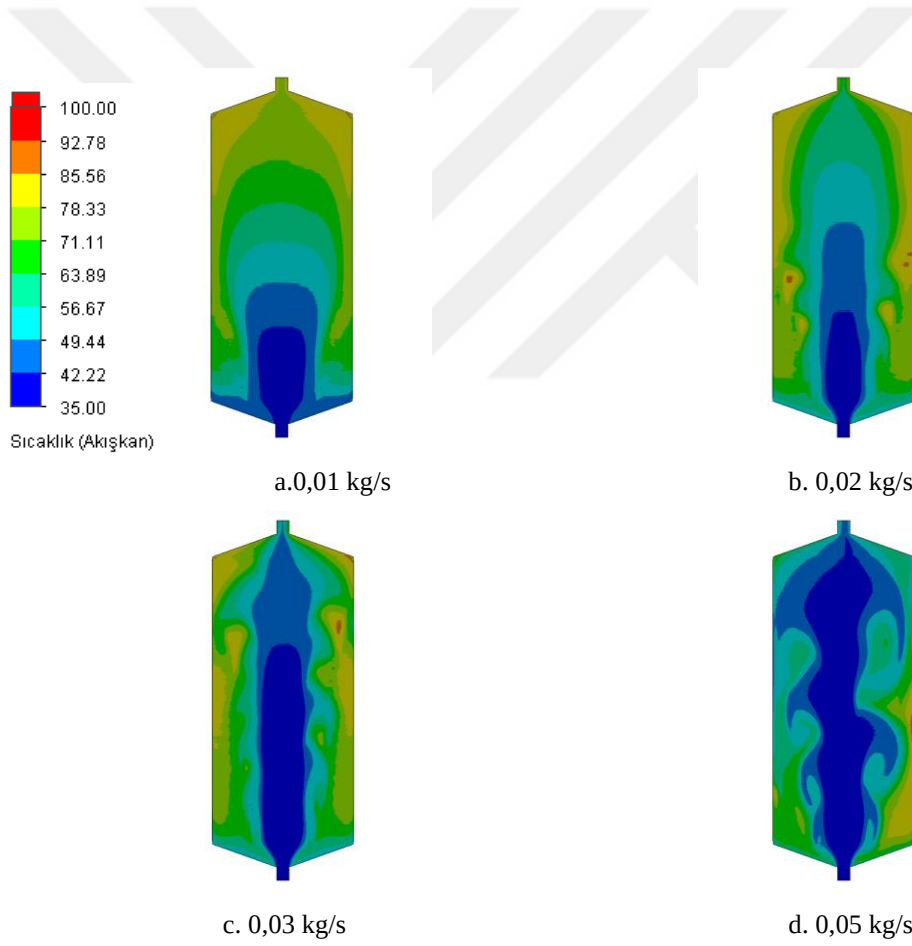
d. 0,05 kg/s

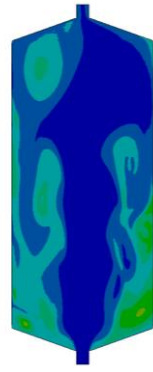


e. 0,07 kg/s

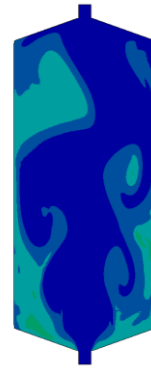
f. 0,1 kg/s

Şekil 6.42 M1 kollektör 800 W/m² için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri





e. 0,07 kg/s

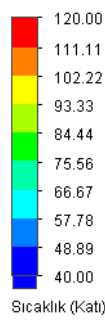


f. 0,1 kg/s

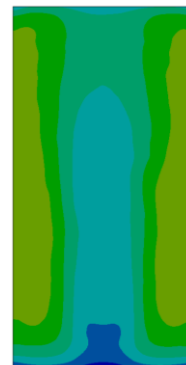
Şekil 6.43 M1 kollektör 1000 W/m² için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri

Şekil 6.39'a göre en düşük ısıtım değeri 600 W/m² için 0,01 kg/s debide hava çıkış sıcaklığı yaklaşık 60 °C'dir. Havanın sıcaklık profillerinden görüldüğü üzere, hava debisinin artması ile havanın çıkış sıcaklığı giderek azalmaktadır. Şekil 6.40 incelendiğinde 800 W/m² ısıtım için havanın en yüksek çıkış sıcaklığı 0,01 kg/s debide yaklaşık 71 °C iken, en düşük çıkış sıcaklığı 0,1 kg/s debide 38 °C'dir. En yüksek ısıtım değeri olan 1000 W/m² için Şekil 6.41 incelendiğinde M1 için en yüksek çıkış sıcaklığı 0,01 kg/s debide yaklaşık 78 °C olduğu görülmektedir.

HAD analizleri kapsamında havanın çıkış sıcaklıklarının yanı sıra yutucu plaka sıcaklıkları da önem arz etmektedir. Üç farklı ısıtım 600, 800 ve 1000 W/m² için düz plaka sıcaklık profilleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



a. 0,01 kg/s



b. 0,02 kg/s



c. 0,03 kg/s



d. 0,05 kg/s

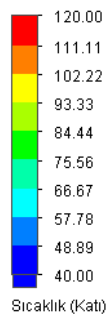


e. 0,07 kg/s

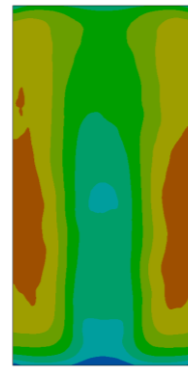


f. 0,1 kg/s

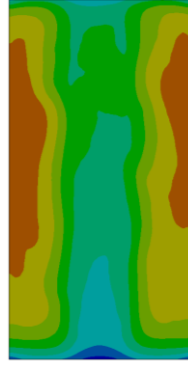
Şekil 6.44 M1 kolektör 600 W/m² güneş ışımasını için yutucu plaka sıcaklık profilleri



a. 0,01 kg/s



b. 0,02 kg/s



c. 0,03 kg/s



d. 0,05 kg/s

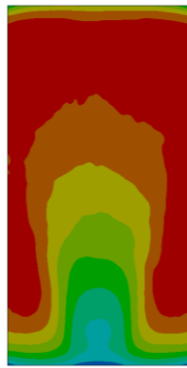
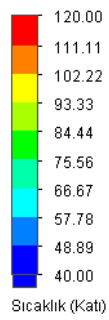


e. 0,07 kg/s

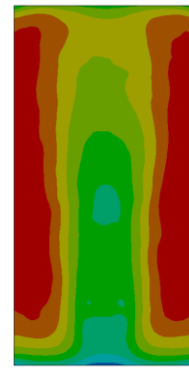


f. 0,1 kg/s

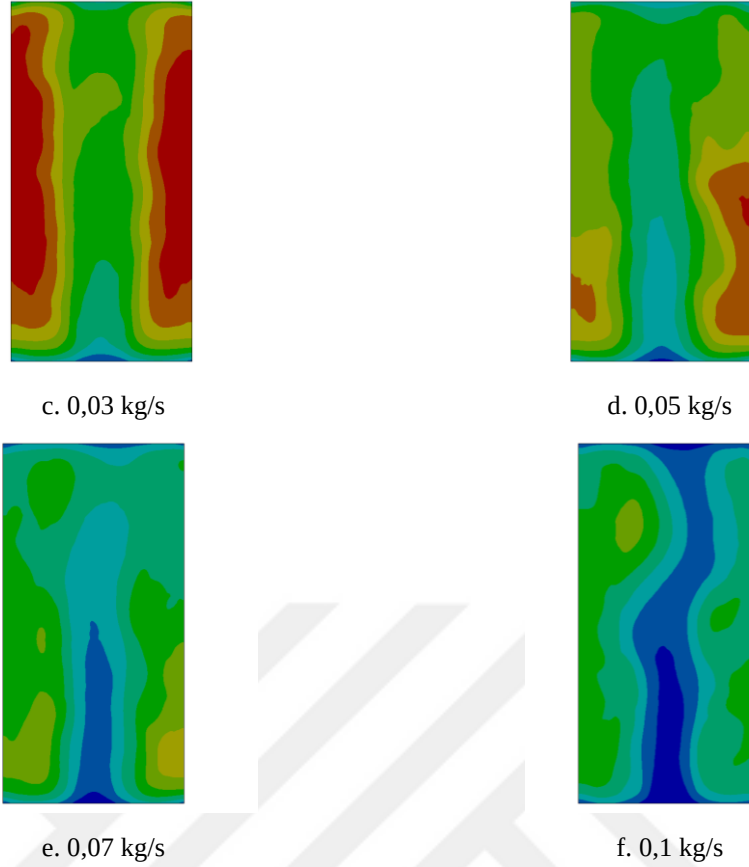
Şekil 6.45 M1 kolektör 800 W/m² güneş ışıınıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri



a.0,01 kg/s



b. 0,02 kg/s

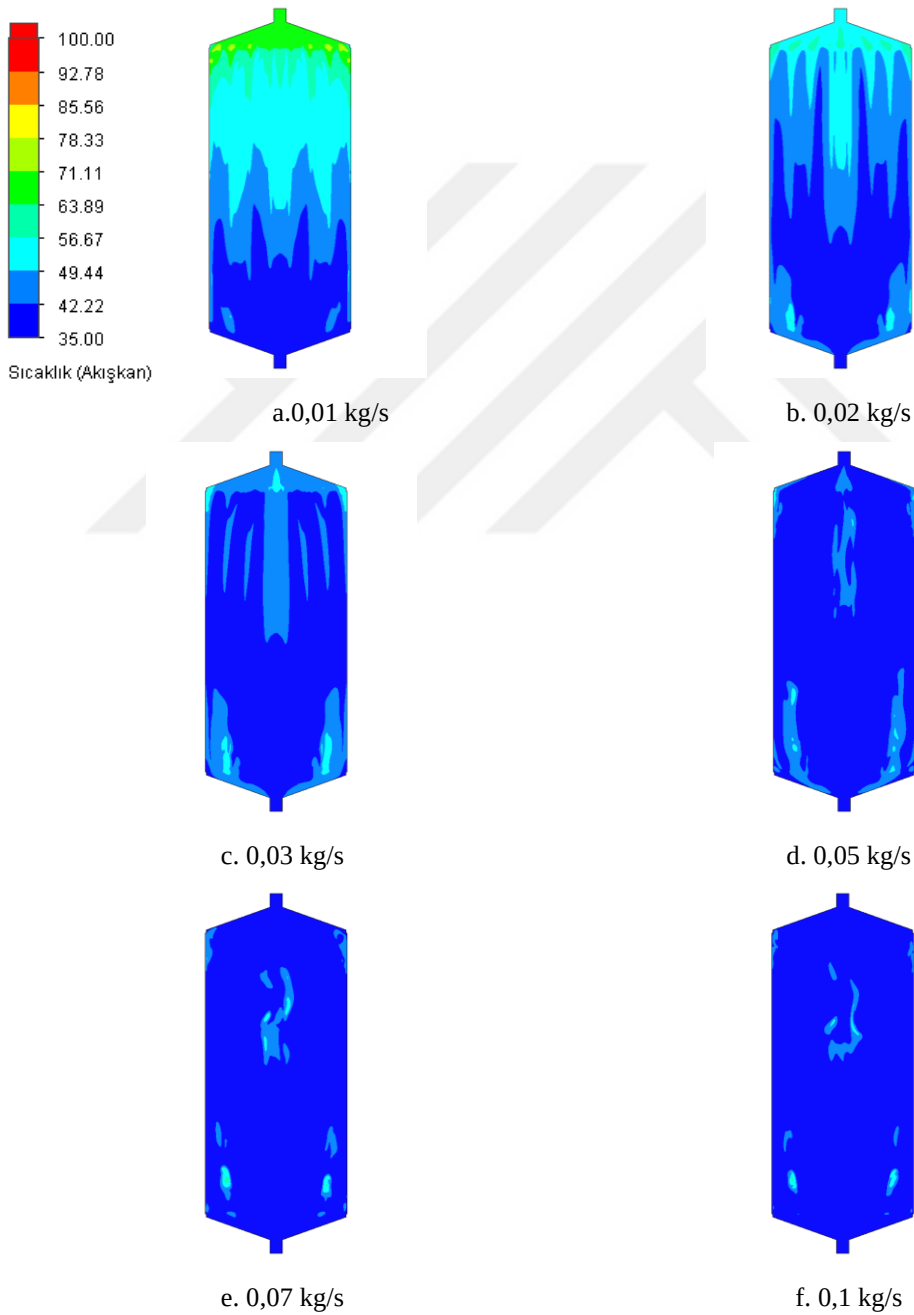


Şekil 6.46 M1 kollektör 1000 W/m² güneş ışınlımı için yutucu plaka sıcaklık profilleri

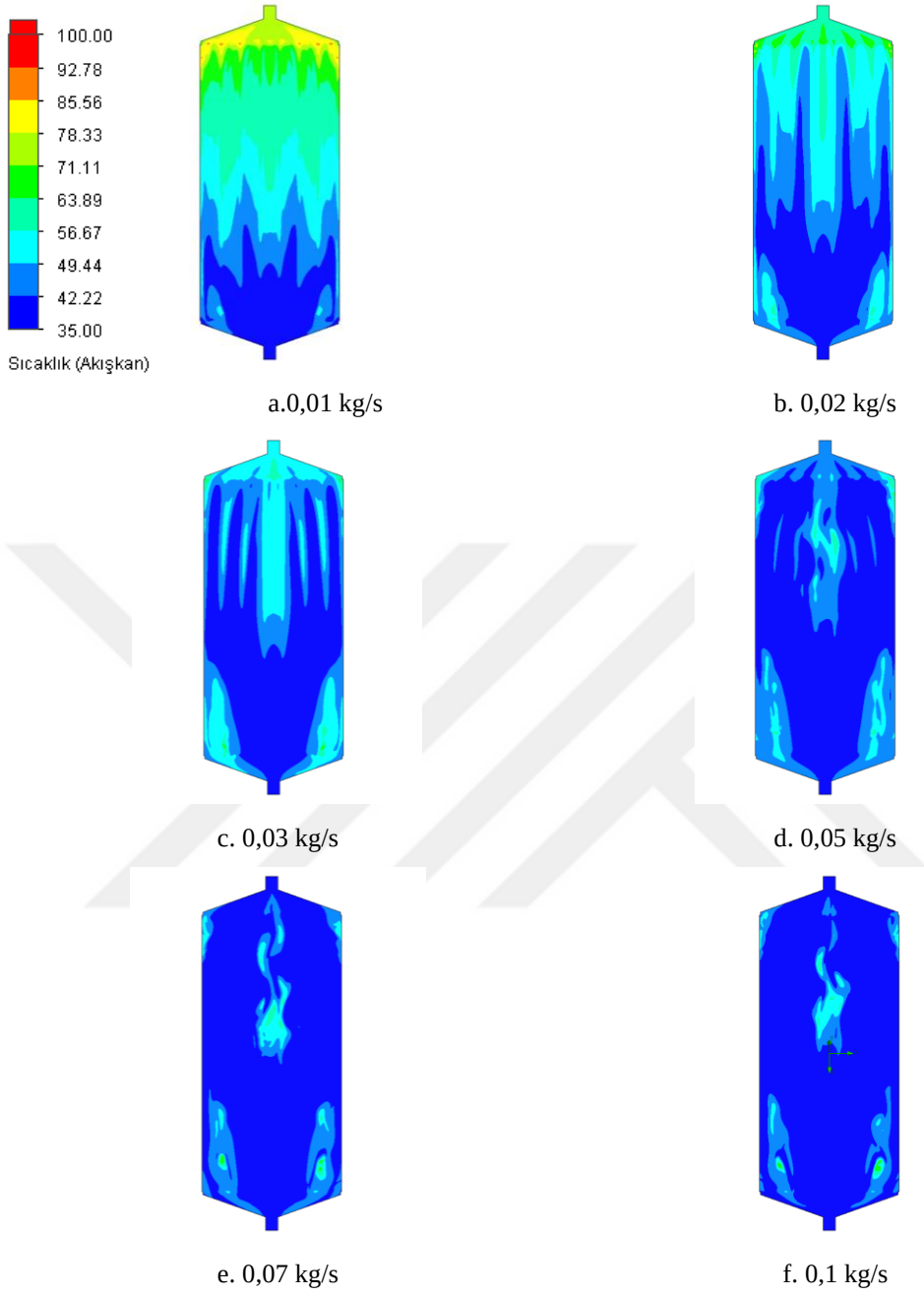
Şekil 6.42’de 600 W/m² ışınlım değeri için farklı debilere göre yutucu plaka sıcaklık profilleri görülmektedir. Şekilden, 0,01 kg/s debi için plaka sıcaklığı yaklaşık 85 °C iken, 0,05 kg/s debi için ortalama 57 °C’dir. En yüksek hava debisi 0,1 kg/s’de plaka sıcaklığı 40,8 °C’dir. Buradan anlaşılabacağı üzere, hava akış debisinin artması ile plaka yüzeyinden ısı transferi artmakta ve sonuçta plaka sıcaklıkları azalmaktadır. Şekil 6.43’de ise 800 W/m² ışınlım için 0,01 kg/s debide plaka sıcaklığı 101 °C iken, debinin artması ile sıcaklık değişimi giderek azalmaktadır. Şekil 6.44’ün incelenmesi ile en yüksek ışınlım 1000 W/m²’de en düşük debi için plaka sıcaklığının bölgesel olarak 118 °C’ye ulaştığı görülmektedir. 0,1 kg/s debide ise plaka sıcaklığı yaklaşık 48 °C’dir. Özellikle yüksek ışınlımlarda debi arttıkça plaka yüzeyinin kenar kısımları daha çok ısınırken, orta kısımlar ise daha düşük sıcaklıktadır. Bunun nedeni, kollektöre giren havanın akış hızı yüksek olduğunda kollektör içerisinde havanın fazla yayılmadığı için plakanın kenarlarına daha az temas etmesidir.

6.2.2. Model 2 kollektör HAD analiz sonuçları

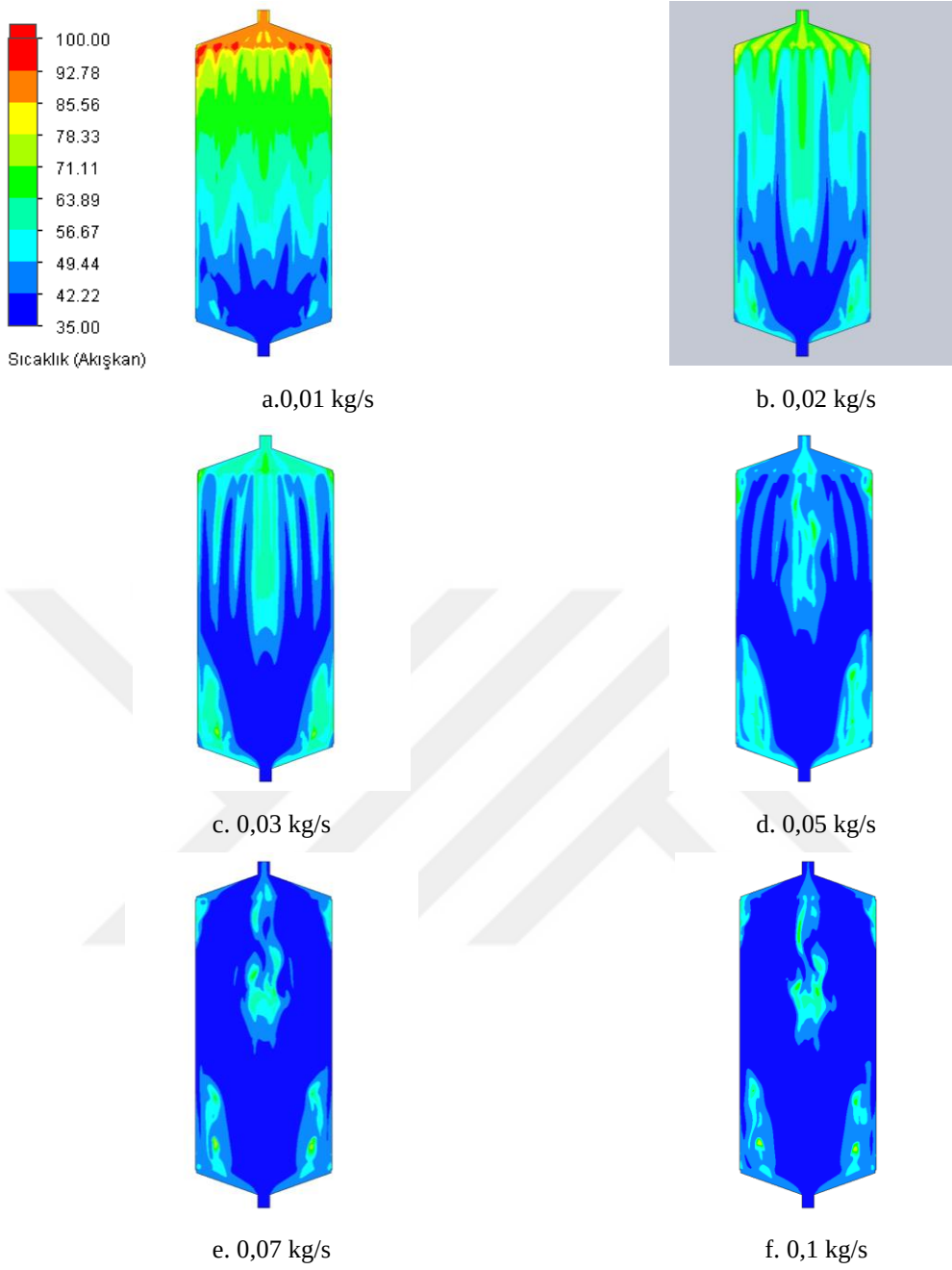
45° trapez açılı yutucu plaka için deney verileri baz alınarak 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s akış debileri ve 600, 800 ve 1000 W/m² güneş ışıınımı değerleri için sayısal olarak ısı analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde havanın ve trapez yutucu plakanın sıcaklıkları debilere göre karşılaştırılmıştır. Şekil 6.45-6.47 aralığında akış kanalındaki havanın sıcaklık profilleri; Şekil 6.48-6.50 aralığında ise trapez yutucu plakanın katı yüzey sıcaklık yüzey profilleri verilmiştir.



Şekil 6.47 M2 kollektör 600 W/m² ışıınım için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri



Şekil 6.48 M2 kolektör 800 W/m^2 ısıtım için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri

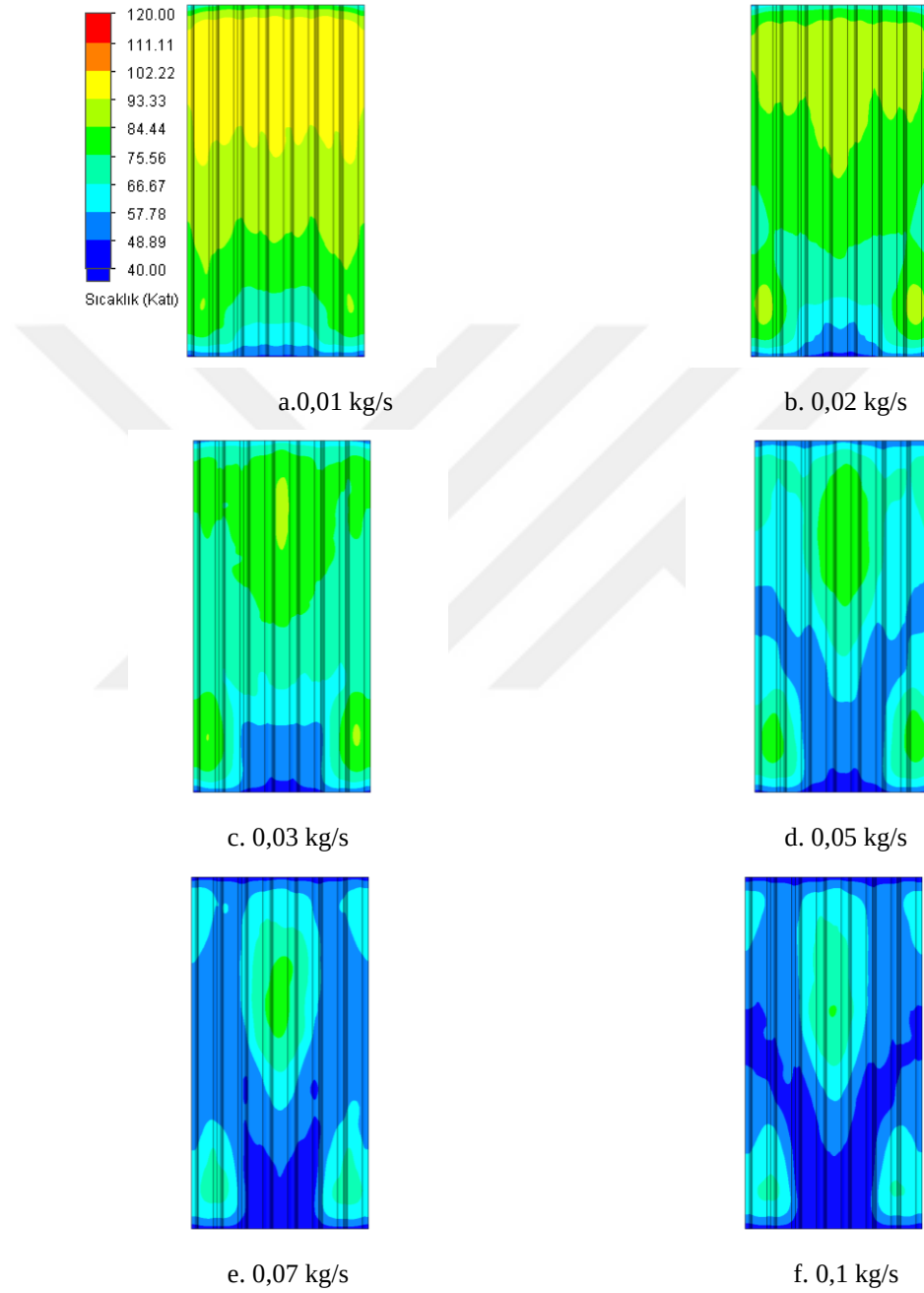


Şekil 6.49 M2 kollektör 1000 W/m² ışıınım için akış debilerine göre havanın sıcaklık profilleri

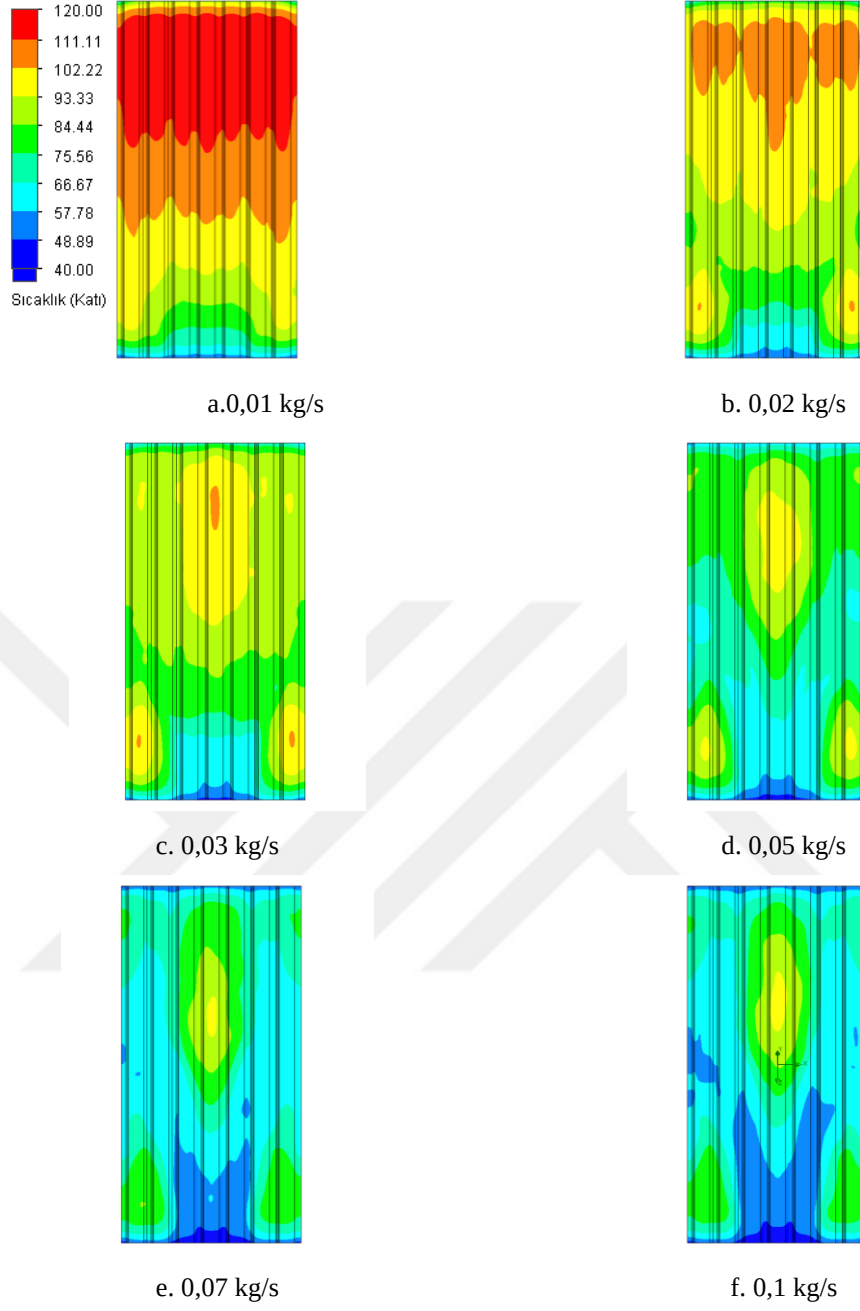
Şekil 6.45 incelendiğinde 0,01 kg/s debide kanal girişinde hava sıcaklığı yaklaşık 44 °C iken kollektör çıkışına doğru 64,3 °C'ye ulaştığı görülmektedir. 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s debiler için havanın çıkış sıcaklıkları sırası ile 59,6 °C, 49 °C, 42,7 °C, 39 °C ve 37,5 °C'dir. Şekil 6.46'ya göre, ışıınım yükseldikçe sıcaklık profillerinin görünümü daha belirgin hale gelmektedir. 800 W/m² ışıınımda en düşük debide havanın çıkış sıcaklığı 77 °C iken, en yüksek debide 38 °C'dir. En yüksek ışıınımda Şekil 6.47'ye göre, havanın çıkış sıcaklığı en düşük debide 86 °C iken, en yüksek debide 42 °C'dir. M2 trapez plakalı kollektörde havanın sıcaklık dağılımının

daha düzgün olduğu görülmektedir. Plakanın orta ve kenar bölgelerinin ısınması, ısı transferinin yüzeylerde eşit olduğunu göstermektedir.

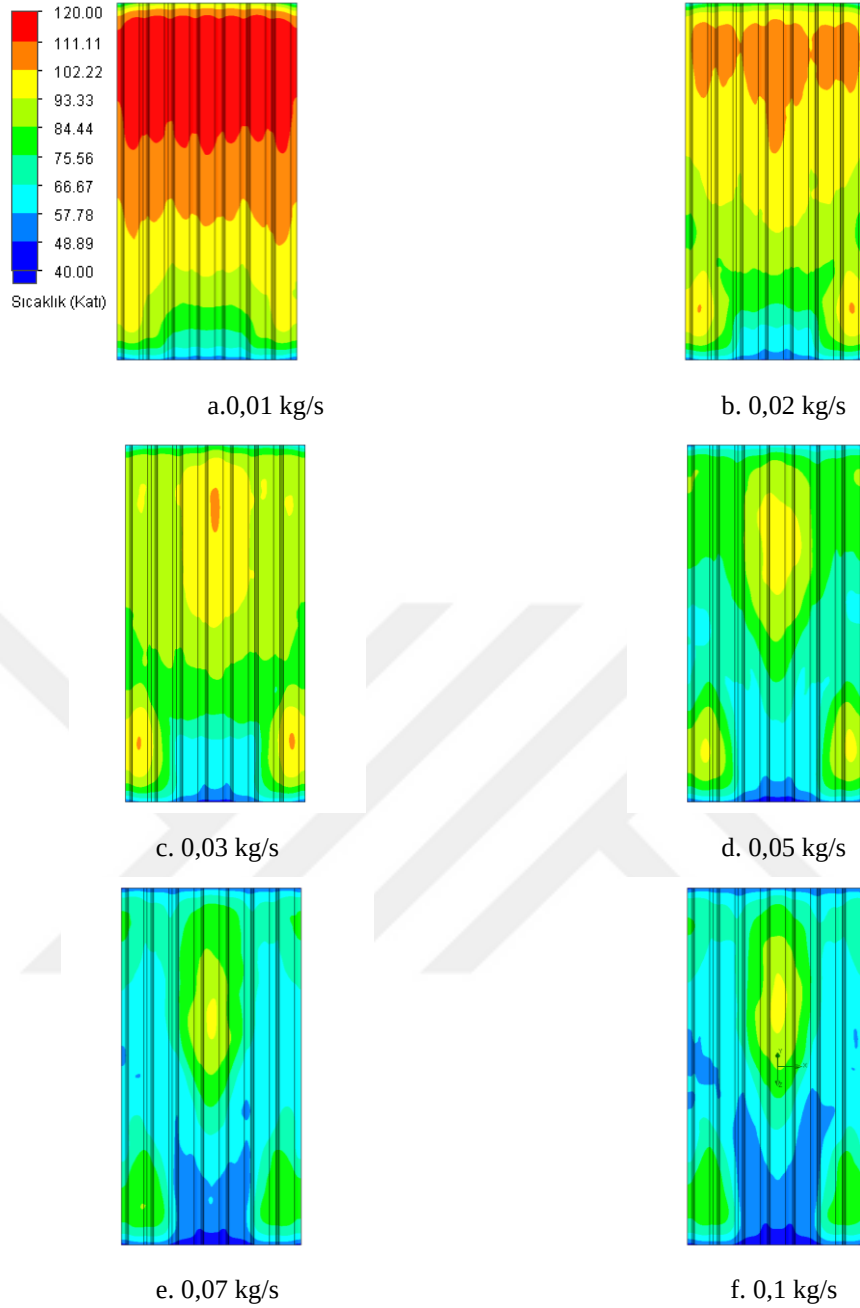
Isıl analizler neticesinde M2 kolektör için yutucu plakanın yüzey sıcaklık profilleri Şekil 6.48-6.50 aralığında verilmiştir.



Şekil 6.50 M2 kolektör 600 W/m² güneş ışınlamı için yutucu plaka sıcaklık profilleri



Şekil 6.51 M2 kolektörü 800 W/m^2 güneş ışınlımı için yutucu plaka sıcaklık profilleri



Şekil 6.52 M2 kollektör 1000 W/m² güneş ışıını için yutucu plaka sıcaklık profilleri

Şekil 6.48'den M2 trapez yutucu plakalı kollektörde 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,07 ve 0,1 kg/s akış debileri için ortalama plaka sıcaklıkları sırası ile 94,4 °C, 77,2 °C, 65,8 °C, 56 °C, 47 °C ve 42 °C'dir. Şekil 6.48 ile Şekil 6.49 kıyaslanırsa, ışıının artması ile plaka sıcaklıklarının da arttığı görülmektedir. 0,01 kg/s debi için trapez plaka yüzey sıcaklığı yaklaşık 120 °C'ye ulaşmıştır. Kollektöre giren havanın çıkışa doğru sıcaklığı ile plaka sıcaklığı arasındaki fark azalırken ısı transferi de azalmaktadır. Bu nedenle ısınan hava, plaka yüzeyinden daha fazla ısı çekemediğinden plaka sıcaklığı yüksek olmaktadır. Aynı durumun söz konusu olduğu Şekil 6.50'ya göre incelendiğinde 1000

W/m^2 ışınlımda 0,01 kg/s debi için plakanın büyük bir kısmı 120 °C sıcaklığa yaklaşmıştır. Düşük debili havanın kollektörden geçerken trapez plaka ile temas süresi daha fazla olduğu için havanın sıcaklığı artmaktadır. Bundan dolayı plakanın orta kısımlarında havaya ısı transferi azalmaktadır.

6.3. Deneysel ve HAD Analizi Sonuçlarının Kıyaslanması

M1 ve M2 kollektörler için sayısal çözümden bulunan ve deneylerde ölçülen bazı sıcaklık değerleri kıyaslanmıştır. Bu amaçla havanın kollektörden çıkış sıcaklığının deneysel ve HAD analiz sonuçları M1 ve M2 kollektör için sırası ile Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de; yutucu plaka yüzey sıcaklığının deneysel ve HAD analiz sonuçları M1 ve M2 kollektör için sırası ile Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6’da verilmiştir. Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’e göre, farklı kütle akış debileri ve güneş ışınlımlarında havanın çıkış sıcaklığı için deneysel ve sayısal sonuçlar arasında en yüksek ortalama sapma M1 kollektörde % 4.97, M2 kollektörde % 7.97’dir. Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6’dan, yutucu plaka sıcaklığı için deneysel ve sayısal sonuçlar arasında en yüksek ortalama sapmanın M1 kollektörde % 8.63, M2 kollektörde % 7.21 olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.3 M1 kollektör hava çıkış sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları

Debi	Işınım	Model 1 (Deneysel)			Model 1 (Sayısal analiz)			Ortalama sapma
		600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	
0.01 kg/s		56,1 °C	68,9 °C	83,5 °C	60,2 °C	72 °C	78,3 °C	%4,49
0.02 kg/s		54,4 °C	62 °C	80,1 °C	56,1 °C	63,3 °C	75 °C	%3,03
0.03 kg/s		47,4 °C	58 °C	65,9 °C	44 °C	55,5 °C	63,2 °C	%7,17
0.05 kg/s		39,9 °C	47,5 °C	54,1 °C	41 °C	43 °C	48,6 °C	%2,75
0.07 kg/s		36,2 °C	42 °C	49,1 °C	38 °C	40,7 °C	45,1 °C	%4,97
0.1 kg/s		31,8 °C	37 °C	43,5 °C	35 °C	37 °C	41 °C	%6,00

Çizelge 6.4 M2 kollektör hava çıkış sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları

Debi	Işınım	Model 2 (Deneysel)			Model 2 (Sayısal analiz)			Ortalama sapma
		600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	
0.01 kg/s		58,5 °C	72,6 °C	87,4 °C	64,3 °C	77 °C	86,4 °C	%1,15
0.02 kg/s		55,2 °C	63,9 °C	80,3 °C	59,6 °C	71 °C	81,2 °C	%7,97
0.03 kg/s		51,1 °C	64,0 °C	71,1 °C	49,2 °C	59,4 °C	73,8 °C	%3,86
0.05 kg/s		41,2 °C	49, °C	55,9 °C	42,7 °C	48 °C	54,5 °C	%3,64
0.07 kg/s		37 °C	45,2 °C	52,6 °C	39 °C	42,2 °C	49,3 °C	%5,40
0.1 kg/s		31,9 °C	37,3 °C	43,9 °C	37,5 °C	38 °C	42,4 °C	%1,87

Çizelge 6.5 M1 kollektör yutucu plaka sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları

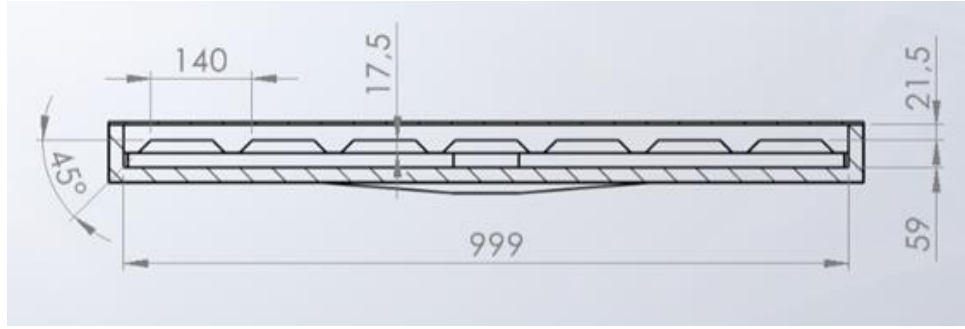
Debi	Işınım	Model 1 (Deneysel)			Model 1 (Sayısal analiz)			Ortalama sapma
		600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	
0.01 kg/s		83,4 °C	94,8 °C	106,5 °C	85 °C	101 °C	110 °C	%1,91
0.02 kg/s		72,5 °C	84,9 °C	97,3 °C	74 °C	86 °C	104 °C	%2,06
0.03 kg/s		63,2 °C	72,1 °C	81 °C	59 °C	75 °C	84 °C	%7,11
0.05 kg/s		54,5 °C	61,8 °C	69 °C	57 °C	69 °C	76 °C	%4,58
0.07 kg/s		47,8 °C	55,3 °C	62,8 °C	44 °C	59 °C	65 °C	%8,63
0.1 kg/s		40,3 °C	44,5 °C	49 °C	40,8 °C	48 °C	51 °C	%1,24

Çizelge 6.6 M2 kollektör yutucu plaka sıcaklığı deneysel ve HAD analiz sonuçları

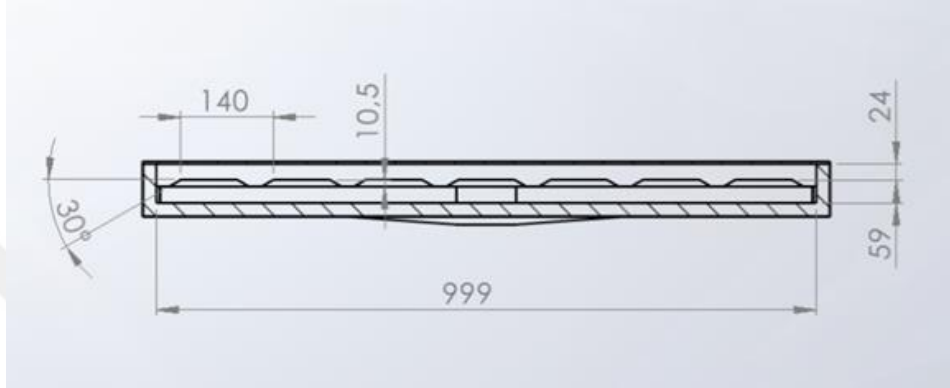
Debi	Işınım	Model 2 (Deneysel)			Model 2 (Sayısal analiz)			Ortalama sapma
		600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	600 W/m ²	800 W/m ²	1000 W/m ²	
0.01 kg/s		78,7 °C	90,31 °C	101,94 °C	81,2 °C	94,3 °C	104,9 °C	%3,17
0.02 kg/s		66,8 °C	79,2 °C	91,5 °C	69,6 °C	83,4 °C	96 °C	%4,19
0.03 kg/s		59,3 °C	68,2 °C	77 °C	56,8 °C	71,3 °C	78,8 °C	%4,21
0.05 kg/s		51,3 °C	58,6 °C	65,8 °C	55 °C	64,7 °C	71,1 °C	%7,21
0.07 kg/s		46,1 °C	53,6 °C	61,1 °C	42,8 °C	56,1 °C	62,9 °C	%7,15
0.1 kg/s		39 °C	43,4 °C	47,8 °C	38,4 °C	45,6 °C	48,4 °C	%4,1

6.3.1. Tüm kollektörlerin HAD analiz sonuçlarının kıyaslanması

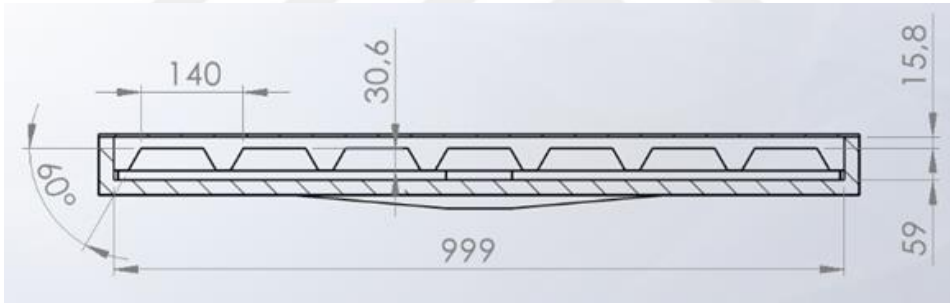
Model 1 ve Model 2 kollektörler için gerçekleştirilen deneysel ve HAD analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aralarındaki en yüksek sapma oranı yaklaşık % 8 olarak bulunmuştur. Bu değere göre, yapılan üç boyutlu modellemenin doğruluğu kabul edilebilir seviyededir. Model 3 (30° trapez açılı) ve Model 4 (60° trapez açılı) trapez yutucu plakalı kollektörlerin performans araştırması yalnız HAD analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Tezin bu bölümünde tüm kollektörlerin HAD analiz sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Trapez yutucu plakalı M2, M3 ve M4 kollektörlerin üç boyutlu kesit alınmış görselleri Şekil 6.51 'de verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, trapez açısının artışı ile trapez yüzeyler cama yaklaşmakta ve yutucu plaka ile cam arası mesafe azalmaktadır.



M2 kesit görünüm (tüm ölçüler mm cinsindendir)



M3 kesit görünüm (tüm ölçüler mm cinsindendir)



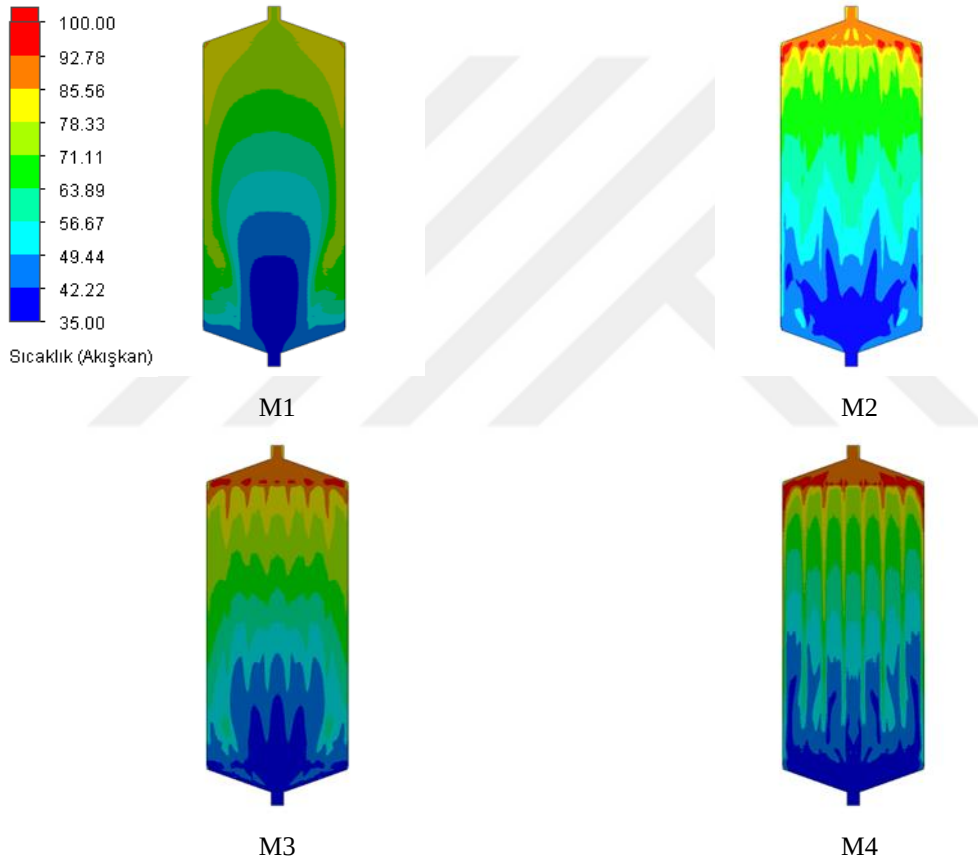
M4 kesit görünüm (tüm ölçüler mm cinsindendir)

Şekil 6.53 M2, M3 ve M4 kollektörlerin kesit alınmış görüntüleri

Bu çalışma kapsamında, yutucu plaka üzerinde trapez açıları değiştirilerek bağıl pürüzlülük yüksekliğinin (e/D_h) ve bağıl pürüzlülük mesafesinin (P/e) ısı verime etkisi incelenmiştir. Tüm modellerin HAD analizlerinden elde edilen hava akışının ve yutucu plakanın sıcaklık profilleri karşılaştırılmış, ayrıca kollektör modellerinin ısı verim eğrileri çizilmiş ve trapez plakalı kollektörler için uygun parametreler tespit edilmiştir. Şekil 6.52’de 0,01 kg/s akış debisi ve 1000 W/m² güneş ışıınımı için havanın sıcaklık profilleri görülmektedir. Şekil 6.53’de ise 0,01 kg/s debi 1000 W/m² ışıınım altında yutucu plaka sıcaklıkları verilmiştir.

Şekil 6.52’ye göre 0,01 kg/s akış debisinde 1000 W/m² ışıınım altında M1, M2, M3 ve M4 model kollektörler için havanın çıkış sıcaklıkları sırası ile 78,32 °C, 86 °C, 80,5 °C, 83,9 °C ‘dir. En yüksek sıcaklık 45° açılı M2 kollektörde, en düşük sıcaklık M1

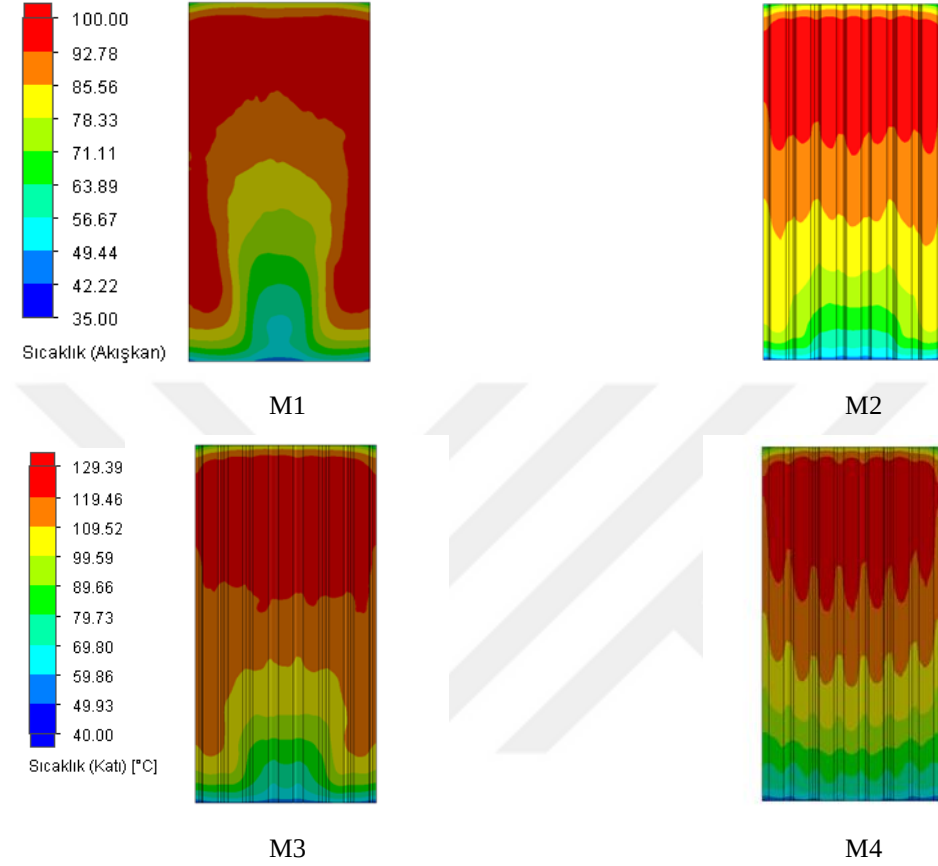
düz plakalı kollektörde elde edilmiştir. Trapez plakalı kollektörde trapez açısının artışı ile trapez yüksekliği ve plakanın toplam yüzey alanı artmaktadır. Sonuçlara göre, trapez açısının 30° den 45° 'ye değişmesi ile plakanın yüzey alanı artışına bağlı olarak havanın çıkış sıcaklığı artmaktadır. Bunun yanında, trapez açısının ve yüksekliğinin artışı ile sabit kütle akış debisinde akış kesiti bir miktar büyüdüğü için akış hızı ve buna bağlı olarak ısı transfer katsayısı azalmaktadır. Ancak bu açı 45° 'den 60° 'ye yükseldiğinde hava çıkış sıcaklığının artması beklenirken 2°C azalma gözlenmiştir. Burada, trapez açısının artışı ile plaka yüzey alanı artarken, plakadan ışıınım ile ve cam örtüden taşınım ile ısı kaybı daha fazla arttığı için havanın çıkış sıcaklığı azalmaktadır.



Şekil 6.54 1000 W/m^2 ışıınım için havanın sıcaklık profilleri ($0,01\text{ kg/s}$)

Şekil 6.53'de kollektör modelleri için yutucu plakanın sıcaklık profilleri görülmektedir. Kollektörlere taze hava girişinin olduğu alt kısımlarda plaka sıcaklığı daha düşük iken, kollektör çıkışına doğru plaka sıcaklıklarının yükseldiği görülmektedir. En düşük debi (0.01 kg/s) ve en yüksek ışıınım (1000 W/m^2) için M1, M2, M3 ve M4 model kollektörler için yutucu plakanın ortalama sıcaklık değerleri

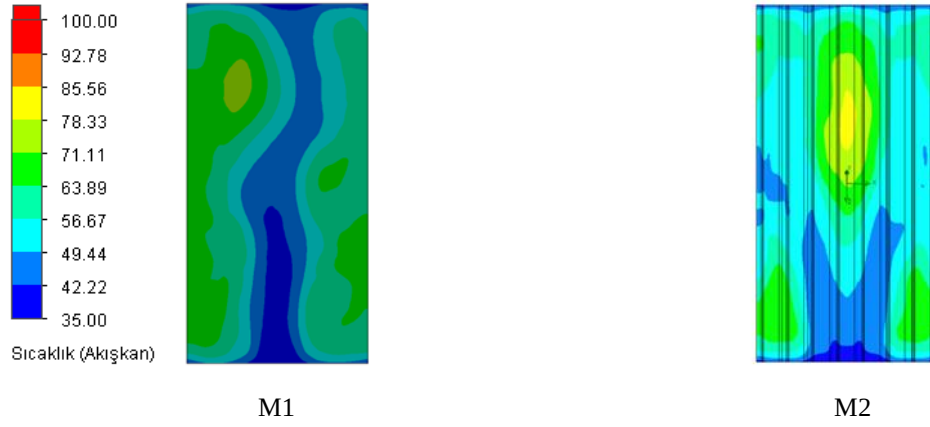
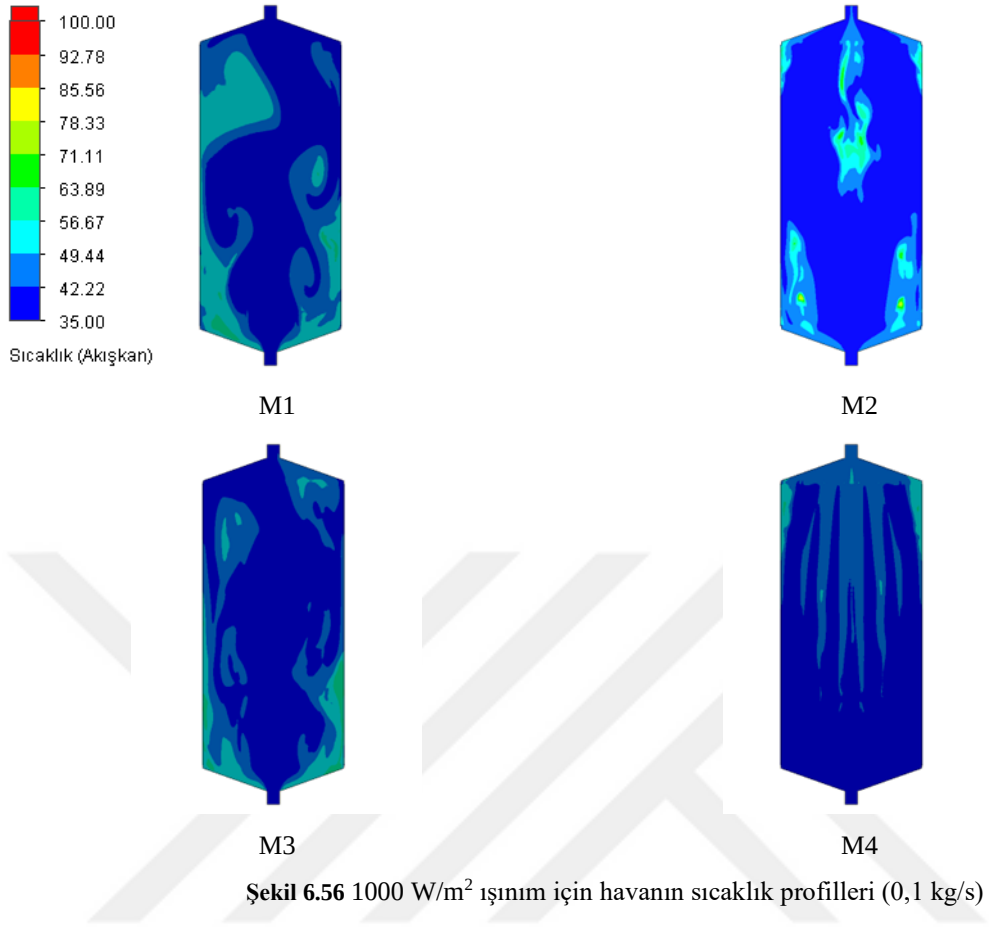
sırası ile 110 °C, 105 °C, 109 °C ve 106 °C ‘dir. Burada, trapez açısının artışı ile plaka yüzey alanı artmakta, plakadan cama doğru ışınlımla ve cam örtüden taşınım ile ısı kayıpları nedeniyle plaka sıcaklığı azalmaktadır.

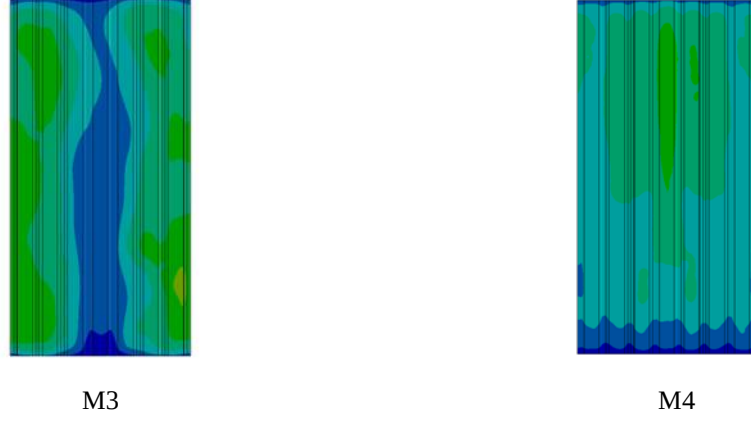


Şekil 6.55 1000 W/m² ısıtım için yutucu plaka sıcaklık profilleri (0,01 kg/s)

Şekil 6.54 ve Şekil 6.55’de en yüksek debi 0,1 kg/s ve 1000 W/m² güneş ışınlımında tüm modeller için havanın ve yutucu plakanın sıcaklık profilleri verilmiştir.

Şekil 6.54’e göre, en yüksek hava çıkış sıcaklığı M2 için 42 °C ‘dir. Diğer modeller M1, M3 ve M4 için havanın çıkış sıcaklıkları sırası ile 41 °C, 41,3 °C ve 41,6 °C ‘dir. Kütle akış debisi yüksek olduğundan (0,1 kg/s) kolektörlerde havanın çıkış sıcaklıkları düşük olup birbirlerine yakındırlar. Şekil 6.55’de verilen yutucu plaka sıcaklık profillerine göre en yüksek plaka sıcaklığı M1 ‘de 51 °C ‘dir. M2, M3 ve M4 için ortalama plaka sıcaklıkları sırası ile 48,4 °C, 50,1 °C ve 49,3 °C ‘dir. Şekil 6.54 ve Şekil 6.55 birlikte değerlendirilirse, havanın çıkış sıcaklığının artması yanında yutucu plaka sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Bu sonuç incelenen probleme göre ısı transferi açısından beklenen bir durumdur.

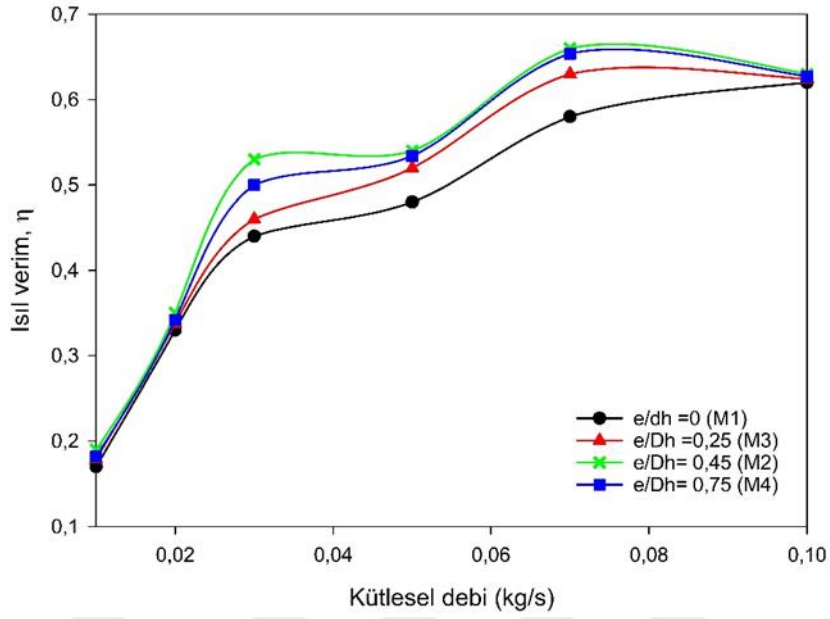




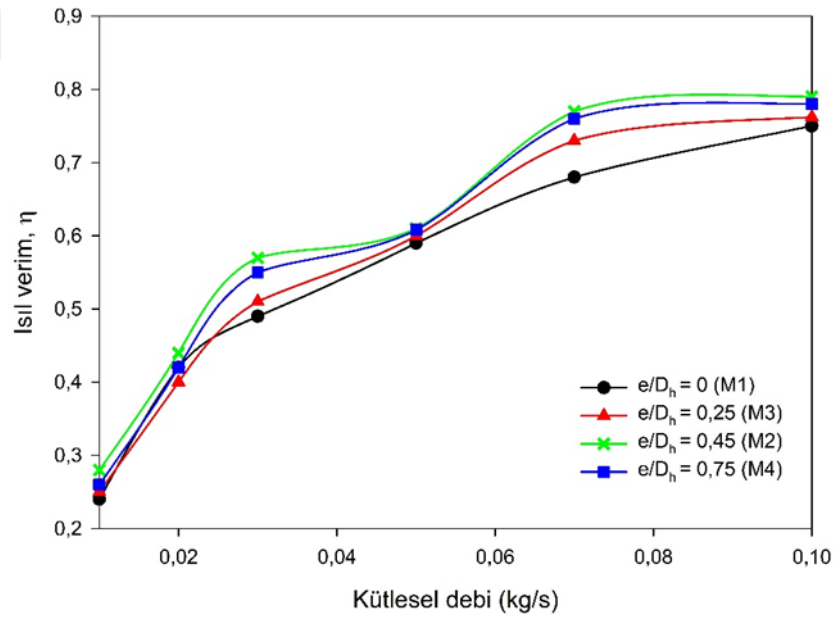
Şekil 6.57 1000 W/m² ışınlm için yutucu plaka sıcaklık profilleri (0,1 kg/s)

Parametrik analizler kapsamında bağıl pürüzlülük yüksekliği ($e/D_h=RRH$) ve bağıl pürüzlülük mesafesi ($P/e=RRP$)'nin farklı değerleri için kollektör ısı verimlerinin kütleli debi ile değişimi incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 6.56-6.59 aralığında verilen şekillerde sırası ile en düşük ve en yüksek ışınlm 600 ve 1000 W/m² için RRH ve RRP parametrelerinin ısı verime etkileri gösterilmiştir.

600 W/m² ve 1000 W/m² ışınlm altında bağıl pürüzlülük yüksekliği, e/D_h , değerlerinin ısı verime etkisi Şekil 6.56 ve Şekil 6.57'de görülmektedir. e/D_h 'ın tüm değerleri için kütle akış debisindeki artış ile ısı verimin arttığı görülmektedir. Sabit kütle debisinde e/D_h değeri artarken ısı verimin de arttığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, trapez yüksekliğinin artması ile akışın türbülans seviyesinin yükselmesi sonucu ısı transferinin artmasıdır. Ancak şekilden $e/D_h=0.75$ için ısı verimin $e/D_h=0.45$ 'e göre düşük olduğu görülmektedir. Burada plaka yüzey alanı ve buna bağılı ısı transferi artışının yanında plakadan cama doğru ışınlmla ısı kaybı daha fazla olduğundan ısı verim azalmaktadır.



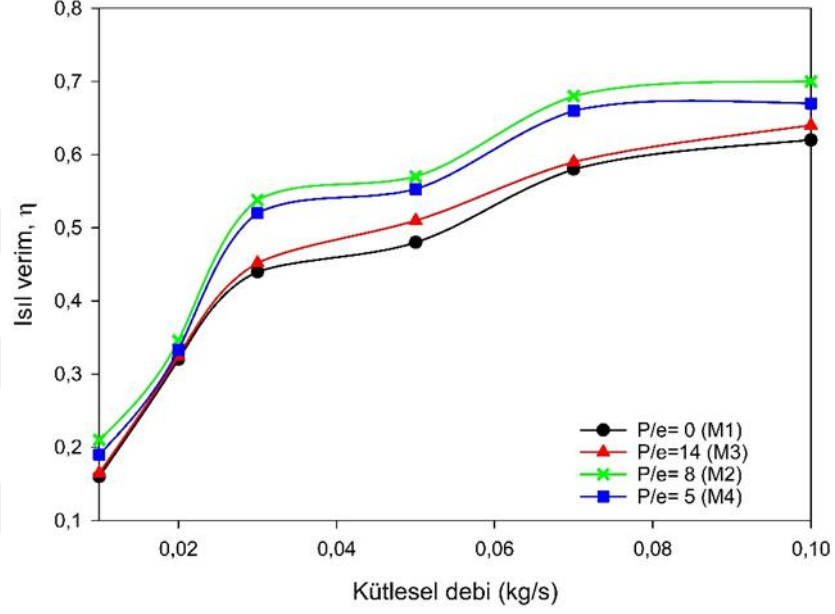
Şekil 6.58 e/D_h değerlerinin ısı verimine etkisi ($I=600 \text{ W/m}^2$)



Şekil 6.59 e/D_h değerlerinin ısı verimine etkisi ($I=1000 \text{ W/m}^2$)

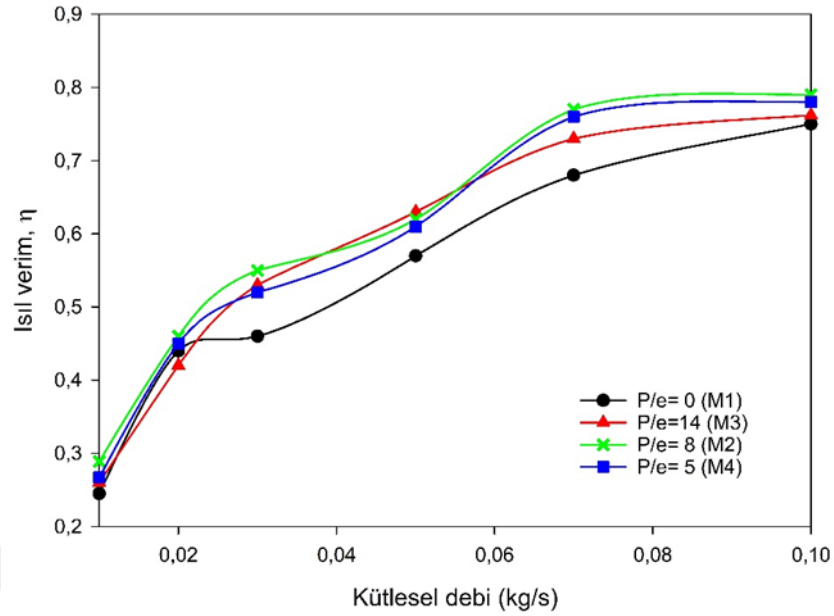
600 W/m^2 ve 1000 W/m^2 ışınlam altında bağıl pürüzlülük mesafesi, P/e , değerlerine göre ısı verimin kütleli debiye göre değişimi Şekil 6.58 ve Şekil 6.59'da görülmektedir. Şekil 6.58 incelenirse, bağıl pürüzlülük mesafesi, P/e 'nin azalması ile ısı verimlerinin arttığı görülmektedir. En yüksek ısı verim $0,1 \text{ kg/s}$ için 600 W/m^2

ışınımda, P/e 'nin 8 olduğu M2 kollektörde yaklaşık %70'tir. Şekiller, sabit kütle akış debisinde P/e 'nin artışı ile ısı verimin azaldığını göstermektedir. P/e 'nin artırılması, plakanın yüzey alanında azalmaya neden olurken, aynı zamanda ısı taşınım katsayısı da azalmaktadır. Bu ikisinin birleşik etkileri, ısı transferinde ve dolayısıyla ısı veriminde azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 6.58 P/e değerlerinin ısı verime etkisi ($I=600 \text{ W/m}^2$)

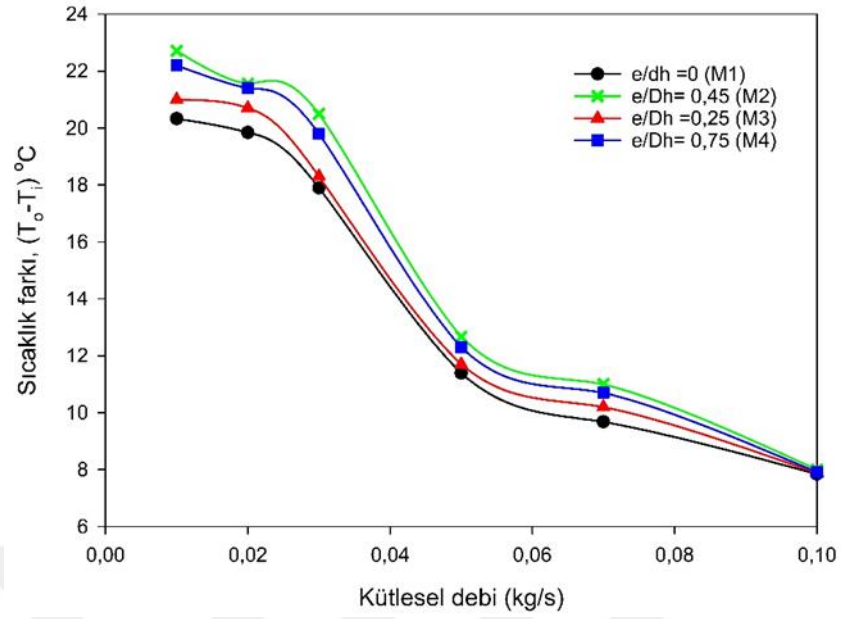
Şekil 6.59'da görüldüğü üzere, 1000 W/m^2 ışıınımda M1 için en düşük ısı verim %25 iken, en yüksek verim %71 'dir. M2, M3 ve M4 için P/e oranının azalması ile ısı verimler artmış ve sırası ile en yüksek ısı verimler %80, %73 ve %76 bulunmuştur. En yüksek verimin, en düşük P/e oranına sahip M4 kollektörde olması beklenirken, M3 kollektörün ısı veriminden büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, M4 kollektörde plaka yüzey alanındaki artışa karşılık plakanın trapez kısımlarının cam örtüye yakın olmasından dolayı ışıınımla çevreye ısı kayıpların daha fazla artması olarak açıklanabilir.



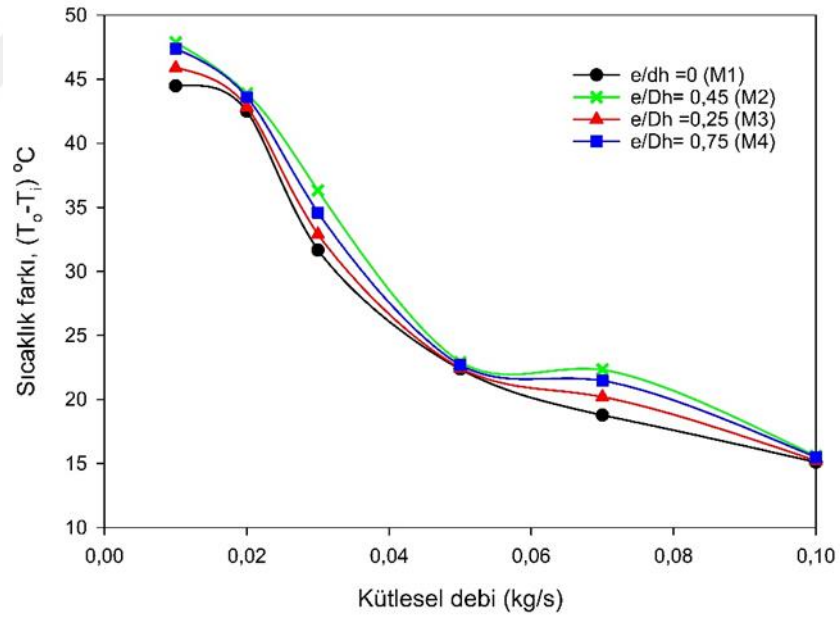
Şekil 6.60 P/e değerlerinin ısı verime etkisi ($I=1000 \text{ W/m}^2$)

Bağıl pürüzlülük yüksekliği ($e/D_h=RRH$) ve bağıl pürüzlülük mesafesi ($P/e=RRP$)'nin havanın giriş-çıkış sıcaklık farkına etkisini göstermek amacı ile Şekil 6.60-6.63 sunulmuştur. 600 ve 1000 W/m^2 ısıtım değerleri için ayrı şekiller oluşturulmuştur.

Şekil 60 ve Şekil 61, bağıl pürüzlülük yüksekliğinin (e/D_h), kütleli debiye karşılık havanın sıcaklık farkı değişimine etkisini göstermektedir. Şekilden, artan kütle akış debisi ile havanın sıcaklık farkının gittikçe azaldığı görülmektedir. Düz plakalı kollektöre kıyasla, bağıl pürüzlülük yüksekliği arttıkça trapez plakalı kollektörlerde havanın sıcaklık farkı artmaktadır. Bunun nedeni, trapez plakalı kollektörlerde ısı transferinin daha fazla olmasıdır. Ancak trapez yüksekliği en büyük olan M4 kollektörde sıcaklık farkı M3 kollektörden düşüktür. M4 kollektörde plakanın yüzey alanı ve ısı transferi artarken, plakadan yayılan ısıtım ile ısı kaybı arttığından havanın sıcaklık farkı azalmaktadır. ısıtım değerinin yükselmesi ile sıcaklık farkları artmıştır.



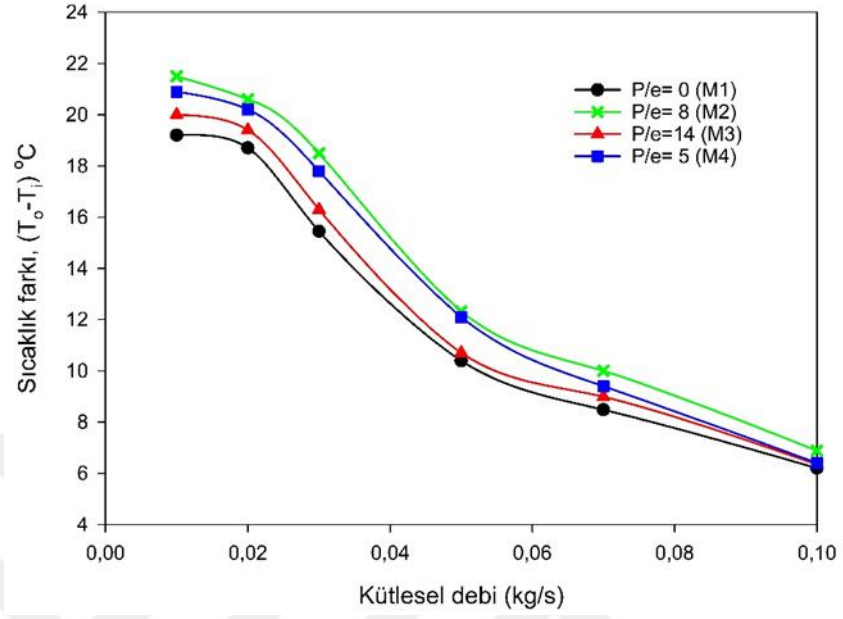
Şekil 6.60 e/Dh değerlerinin sıcaklık farkına etkisi ($I=600 \text{ W/m}^2$)



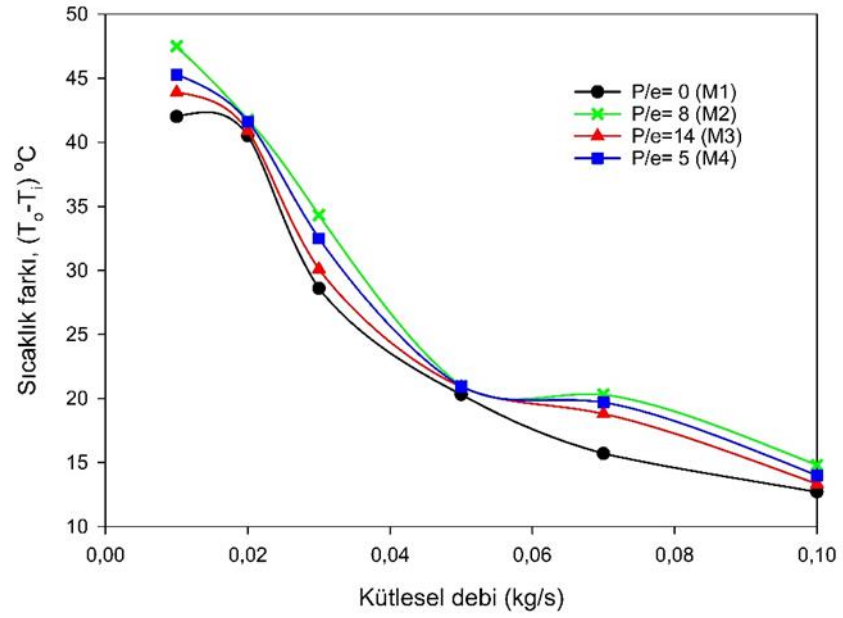
Şekil 6.61 e/Dh değerlerinin sıcaklık farkına etkisi ($I=1000 \text{ W/m}^2$)

Bağıl pürüzlülük mesafesinin (P/e) havanın sıcaklık farkına etkisini göstermek için Şekil 6.62 ve Şekil 6.63 verilmiştir. Kütle akış debisi ile havanın sıcaklık farkının gittikçe azaldığı görülmektedir. Şekillerden, P/e 'nin artması ile sıcaklık farkının azaldığı ancak M4 kolektörde buna ters bir durumun olduğu görülmektedir. Bu durum, M4 kolektörde plaka yüzey alanının artışı karşılıklı plakanın trapez kısımlarının cam

örtüye yakın olması nedeniyle ışınlımla çevreye ışınlımla ısı kaybının fazla olması ile izah edilebilir.



Şekil 6.62 P/e değerlerinin sıcaklık farkına etkisi ($I=600 \text{ W/m}^2$)



Şekil 6.63 P/e değerlerinin sıcaklık farkına etkisi ($I=1000 \text{ W/m}^2$)

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında biri düz, diğerleri trapez geometriye sahip yutucu plakalı dört havalı kollektörün analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında düz plakalı (M1 model) ve 45° trapez açılı yutucu plakalı kollektör (M2 model) için havanın farklı kütleli debilerinde farklı günlerde deneyler yapılmıştır. Çalışmanın sayısal analiz kısmında ise M1 ve M2 model kollektörlere ek olarak trapez açısı 30° ve 60° olan M3 ve M4 model kollektörlerin analizleri de yapılmıştır. Konya iklim şartlarında HAD analizi programının güneş ışıınımı hesaplama arayüzü kullanılarak üç boyutlu analiz gerçekleştirilmiştir. Kollektör çıkışında havanın sıcaklığı için deneysel ve sayısal sonuçlar arasında % 8'den az hata ile çözümler sağlanmıştır. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Elde edilen sonuçlar, havanın çıkış sıcaklığının güneş ışıınımından önemli oranda etkilendiğini, havanın kütle akış debisi ile ters orantılı olduğunu, kütle akış debisi azaldıkça arttığını ve bunun tersinin de geçerli olduğunu ortaya koymuştur.
- Kütle akış debisi, havanın sıcaklık artışı üzerinde doğrudan etkili olduğundan, deney süresince kollektörden alınan faydalı ısı miktarını kontrol eden, optimize eden ve sınırlayan birincil parametre olarak düşünülmesi gerekmektedir.
- Havanın çıkış sıcaklığı gün içerisinde ilerleyen zamanla birlikte artan güneş ışıınımına paralel olarak artmakta, 12.00-14.00 saatleri arasında maksimum bir değere ulaşmakta, öğleden sonra ise azalmaktadır. Deneylerde 0,01 kg/s debi ve 1000 W/m² güneş ışıınımı için havanın çıkış sıcaklığı M1 model kollektörde 83,5 °C, M2 model kollektörde 87,5 °C ölçülmüştür. En yüksek debi 0,1 kg/s'de M1 ve M2 kollektörler için havanın çıkış sıcaklıkları sırası ile 44 °C ve 45 °C 'dir. Yutucu plaka yüzey alanı daha büyük olan M2 model kollektörde artan türbülans seviyesi ve akışın plaka ile daha çok teması havanın çıkış sıcaklığını arttırmıştır.
- Kollektör verimi kütle akış debisine kuvvetle bağlıdır. Havanın kütle akış debisinin 0,01 kg/s ve 0,1 kg/s değerleri için M1 kollektörün günlük ortalama verimleri sırası ile %22 ve %75; aynı debi değerleri için M2 kollektörün günlük ortalama verimleri ise sırası ile % 24,4 ve %79 bulunmuştur.
- Isıl verim yönünden M2 kollektörün M1 kollektöre göre % 2-6 aralığında üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Yutucu plaka yapısının trapez şeklinde olması,

plaka yüzey alanını arttırmakta, akışı türbülanslı hale getirmekte, plakanın tüm yüzeylerinin hava ile daha iyi temas etmesi sonucunda plakadan havaya geçen ısı miktarı artmaktadır.

- Tüm modellerin ısı verimleri incelendiğinde en yüksek ısı verim M2 için %80, M4 için %78, M3 ve M1 için ise sırası ile %76 ve %75'dir. İncelenen trapez plakalı kollektörler içerisinde en uygun olanı, 45° trapez açılı yutucu plakalı kollektör (M2 model) olmuştur.
- En yüksek ısı verim M2 kollektörde $e/D_h = 0,45$ ve $P/e = 8$ için elde edilmiştir.
- M1 ve M2 kollektörler için üretim maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, M1'in maliyeti yaklaşık 4.280 ₺ iken, M2'nin maliyeti sadece işçilik farkından dolayı yaklaşık 4.400 ₺ olmuştur. Model 2 kollektörün ticari olarak iklimlendirme, kurutma, nem alma-verme gibi proseslerde kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

8. KAYNAKLAR

- A Path to Achieving Europe's 2020 - Solarwall. (2014). .
- Abdulkadhim, N. A. (2019). Collector with Micro-Channel Absorber Plate, 37(8).
- Abed, A. F., Dahham, R. B., Hashim, N. A. W., ve Hamad, R. F. (2023). Performance Enhancement of a Solar Air Collector Using a V-Corrugated Absorber. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 15, ss. 1–13.
- Abulkhair, H. (2011). Thermal Analysis of Unglazed Transpired Solar Collectors.
- ALIÇ, E., ve DAŞ, M. (2020). Trapez Yutucu Plaklı Bir Havalı Güneş Kolektörünün Deneysel Tasarımı ve Sayısal Analizi. *European Journal of Science and Technology*. European Journal of Science and Technology.
- Bansal, N. K. (1999). Solar air heater applications in India. *Renewable Energy*, 16(1–4 pt 2), ss. 618–623.
- Belmonte, J. F., Izquierdo-Barrientos, M. A., Molina, A. E., ve Almendros-Ibáñez, J. A. (2016). Air-based solar systems for building heating with PCM fluidized bed energy storage. *Energy and Buildings*, 130, ss. 150–165.
- Chabane, F., ve Aouissi, Z. (2023). Experimental investigations on the thermal efficiency of a solar air collector with transverse rectangular baffles incline by an angle of 135° . *Energy and Built Environment*, (January). Elsevier B.V. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.04.004> adresinden erişildi.
- Chabane, F., Moummi, N., ve Benramache, S. (2014). Experimental study of heat transfer and thermal performance with longitudinal fins of solar air heater. *Journal of Advanced Research*, 5(2), ss. 183–192. Cairo University. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2013.03.001> adresinden erişildi.
- Darici, S. (2020). Comparative study on the performances of solar air collectors with trapezoidal corrugated and flat absorber plates. *Heat and Mass Transfer*.
- Dassault Systèmes. (2020). Technical Reference Solidworks Flow Simulation 2021, ss. 79–83.
- El-Sebaai, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., Shalaby, S. M., ve Moharram, B. M. (2011). Thermal performance investigation of double pass-finned plate solar air heater. *Applied Energy*, 88(5), ss. 1727–1739. Elsevier Ltd. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.017> adresinden erişildi.
- Fahmi, M. S., Khalil, W. H., ve Shareef, A. J. (2020). Energy and Exergy Analysis of a

- Finned-Plate Double Pass Solar Air Heater with Different Arrangement. *Journal of Power and Energy Engineering*, 08(10), ss. 1–17.
- GEPA. (t.y.). . 8 Nisan 2023 tarihinde <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> adresinden erişildi.
- Güneş - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). . 9 Nisan 2023 tarihinde <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> adresinden erişildi.
- Hu, J., ve Zhang, G. (2019). Performance improvement of solar air collector based on airflow reorganization: A review. *Applied Thermal Engineering*, 155, ss. 592–611. Elsevier Ltd. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.021> adresinden erişildi.
- K Ghosh, S. (2020). Fossil Fuel Consumption Trend and Global Warming Scenario: Energy Overview. *Global Journal of Engineering Sciences*, 5(2), ss. 5–9.
- Kalogirou, S. A. (2004a). Environmental benefits of domestic solar energy systems. *Energy Conversion and Management*, 45(18–19), ss. 3075–3092.
- Kalogirou, S. A. (2004b). *Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science* (C. 30).
- Kumar, A., Saini, R. P., ve Saini, J. S. (2014). A review of thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, ss. 100–122. Elsevier. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.063> adresinden erişildi.
- Kumar, D., ve Premachandran, B. (2019). International Journal of Thermal Sciences Effect of atmospheric wind on natural convection based solar air heaters. *International Journal of Thermal Sciences*, 138(September 2018), ss. 263–275. Elsevier. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.010> adresinden erişildi.
- Kumar, R., ve Chand, P. (2017). Performance enhancement of solar air heater using herringbone corrugated fins. *Energy*, 127, ss. 271–279. Elsevier Ltd. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.128> adresinden erişildi.
- Li, S. L., Meng, X. R., ve Wei, X. L. (2015). Heat transfer and friction factor correlations for solar air collectors with hemispherical protrusion artificial roughness on the absorber plate. *Solar Energy*, 118, ss. 460–468. Elsevier Ltd. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.047> adresinden erişildi.
- Maheshwari, B. K., Karwa, R., ve Gharai, S. K. (2011). Performance Study of Solar Air

- Heater Having Absorber Plate with Half-Perforated Baffles. *ISRN Renewable Energy*, 2011, ss. 1–13.
- Mahmood, A. J., Aldabbagh, L. B. Y., ve Egelioglu, F. (2015). Investigation of single and double pass solar air heater with transverse fins and a package wire mesh layer. *Energy Conversion and Management*, 89, ss. 599–607. Elsevier Ltd. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.028> adresinden erişildi.
- Manjunath, M. S., Karanth, K. V., ve Sharma, N. Y. (2018). Numerical investigation on heat transfer enhancement of solar air heater using sinusoidal corrugations on absorber plate. *International Journal of Mechanical Sciences*, 138–139(January), ss. 219–228. Elsevier Ltd. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.037> adresinden erişildi.
- Maraba, G. (2012). *An experimental study on enhancement of heat transfer in a solar air heater collector by using porous medium*.
- Mund, C., Rathore, S. K., ve Sahoo, R. K. (2021). A review of solar air collectors about various modifications for performance enhancement. *Solar Energy*, 228, ss. 140–167.
- Ourworldindata. (2023). Renewable Energy - Our World in Data. 9 Nisan 2023 tarihinde <https://ourworldindata.org/renewable-energy#solar-energy> adresinden erişildi.
- Poongavanam, G. K., Panchabikesan, K., Leo, A. J. D., ve Ramalingam, V. (2018). Experimental investigation on heat transfer augmentation of solar air heater using shot blasted V-corrugated absorber plate. *Renewable Energy*, 127, ss. 213–229. Elsevier Ltd. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.056> adresinden erişildi.
- Prakash, A., Kumar, M., Manchanda, H., ve Grewal, R. (2022). A review on solar flat plate air collector with different design modifications, (February).
- Raj, A. K., Kunal, G., Srinivas, M., ve Jayaraj, S. (2019). Performance analysis of a double-pass solar air heater system with asymmetric channel flow passages. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(1), ss. 21–38. Springer International Publishing. tarihinde <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7762-1> adresinden erişildi.
- Rajaseenivasan, T., Srinivasan, S., ve Srithar, K. (2015). Comprehensive study on solar air heater with circular and V-type turbulators attached on absorber plate. *Energy*, 88, ss. 863–873. Elsevier Ltd. tarihinde

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.020> adresinden erişildi.
- Reddy, J., Jagadish, Negi, S., Das, B., Ali Ehyaei, M., ve Assad, M. E. H. (2022). Energy and exergy analysis of a trapezoidal absorber plate-based solar air collector. *Energy Science and Engineering*, 10(4), ss. 1067–1082.
- Rossi, S. (2019). Design and Prototyping of Innovative North's SolarStorm Solar Air Collector for Residential Applications, s. 147. tarihinde <https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/handle/10214/16092> adresinden erişildi.
- Saini, P. K. (2019). *A Preliminary Optimisation and Techno-economic Analysis of Solar Assisted Building Heating System Using Transpired Air Solar Collector and Heat Pump in Sweden*. European Solar Engineering School.
- Şevik, S., ve Abuşka, M. (2020). Enhancing the thermal performance of a solar air heater by using single-pass semi-flexible foil ducts. *Applied Thermal Engineering*, 179(July), s. 115746. Elsevier. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115746> adresinden erişildi.
- Singh, A. P., ve Singh, O. P. (2018). Performance enhancement of a curved solar air heater using CFD. *Solar Energy*, 174(April), ss. 556–569. Elsevier. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.053> adresinden erişildi.
- Singh, S. (2017). Performance evaluation of a novel solar air heater with arched absorber plate. *Renewable Energy*, 114, ss. 879–886. Elsevier Ltd. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.109> adresinden erişildi.
- Singh, S., Singh, A., ve Chander, S. (2019). Thermal performance of a fully developed serpentine wavy channel solar air heater. *Journal of Energy Storage*, 25(June), s. 100896. Elsevier. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100896> adresinden erişildi.
- Singh Yadav, A., ve Kumar Thapak, M. (2014). Artificially roughened solar air heater: Experimental investigations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, ss. 370–411.
- Velmurugan, P., ve Kalaivanan, R. (2015). Energy and exergy analysis of solar air heaters with varied geometries. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(4), ss. 1173–1186.
- Yadav, A. S., ve Bhagoria, J. L. (2014). A numerical investigation of square sectioned transverse rib roughened solar air heater. *International Journal of Thermal Sciences*, 79, ss. 111–131. Elsevier Masson SAS. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.008> adresinden erişildi.

- Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z., ve Wang, P. (2014). Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate. *Applied Energy*, 113, ss. 1349–1362. Elsevier Ltd. tarihinde <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.091> adresinden erişildi.
- Yildiz, M. E., ve Yilmaz, A. (2022). Investigation of the efficiency of air heated solar collectors with different geometries by experimental method. <https://doi.org/10.1177/09576509221101971>, 236(7), ss. 1389–1402. SAGE PublicationsSage UK: London, England. tarihinde <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09576509221101971?journalCode=piac> adresinden erişildi.
- Zhang, H., Ma, X., You, S., Wang, Y., Zheng, X., Ye, T., vd. (2018). Mathematical modeling and performance analysis of a solar air collector with slit-perforated corrugated plate. *Solar Energy*, 167(April), ss. 147–157. Elsevier. tarihinde <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.003> adresinden erişildi.