



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FAZ DEĞİŞTİREN MADDE

KAPSÜLLENMİŞ/KAPSÜLLENMEMİŞ T-DİRENÇLİ

HAVALI GÜNEŞ ISITICILARIN MAHAL ISITMA

PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

MEHMET MELETLİ

Çorum - 2023

**FAZ DEĞİŞTİREN MADDE KAPSÜLENMİŞ/KAPSÜLENMEMİŞ
T-DİRENÇLİ HAVALI GÜNEŞ ISITICILARIN MAHAL ISITMA
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet MELETLİ

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ**

Çorum 2023

Mehmet MELETLİ tarafından hazırlanan "Faz Değiştiren Madde Kapsüllenmiş/Kapsüllenmemiş T-Dirençli Havalı Güneş Isıtıcıların Mahal Isıtma Performansına Etkisinin İncelenmesi" adlı tez çalışması 24/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sinan ÇALIşKAN

.....

Prof. Dr. İrfan KURTBAş

.....

Prof. Dr. Oğuz ARSLAN

.....

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile Mehmet MELETLİ'nin Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Muhammed Asıf Yoldaş
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür Vekili

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Mehmet MELETLİ



**FAZ DEĞİŞTİREN MADDE KAPSÜLLENMİŞ/KAPSÜLLENMEMİŞ T-DİRENÇLİ HAVALI
GÜNEŞ ISITICILARIN MAHAL ISITMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet MELETLİ

ORCID: 0000-0002-7694-9314

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

Nisan 2023

ÖZET

Bu deneysel çalışmada içerisinde makro boyutlu kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) faz değiştiren malzeme kapsüllenmiş/kapsüllenmemiş T dirençlerin havalı güneş kolektörü performansına etkisi ve bir konutun belirli bir mahalının ısıtılmasındaki performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler çalışma akışkanının(hava) dört(4) farklı debisinde, Reynolds sayısının 4175, 8350, 12525 ve 16700 değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir akışkan debisi için en az üç(3) gün deneyler yapılmıştır. Deneyler 2021 yılının 5-26 Aralık tarihleri arasında, kış iklim şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kolektör içerisine 32 T direnç şaşırtmalı şekilde yerleştirilmiş, kolektörlerin birisinde T dirençler FDM kapsüllenecek şekilde, diğerinde ise FDM'siz (sadece direnç olacak şekilde) eşit sayıda yerleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan kolektör faydalı enerjisi, kolektör verimi ortam ısıtma performansı, ekserji verimi, ısı performans katsayısı gibi bağımlı parametreler belirlenmiştir. Kolektör içerisinde kullanılan FDM'lerin hem direnç hem akışa karşı direnç, hem de ısı depolayan direnç şeklinde tasarlanması kolektörden elde edilen faydalı ısı enerjisini boş kolektöre göre 4,5 kata kadar arttırabilmektedir.

Anahtar Kavramlar: Faz değiştiren malzeme (FDM), gizli ısı depolama, havalı güneş kolektörü

Bilim Kodu: 92802

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PHASE CHANGE MATERIAL
CAPSULATED/UNCAPSULATED T-RESISTANCES AIR SOLAR HEATER ON SPACE
HEATING PERFORMANCE**

Mehmet MELETLİ

ORCID: 0000-0002-7694-9314

HİTİT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science Thesis

April 2023

ABSTRACT

In this experimental study, the effect of macro-dimensional calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) phase change material encapsulated/non-encapsulated T resistors on the performance of air solar collector and its performance in heating a certain space of a house were experimentally investigated. Experiments were carried out at four(4) different flow rates of the working fluid (air), between the values of Reynoldss number 4175, 8350, 12525 and 16700. At least three(3) days of experiments were carried out for each fluid flow rate. Experiments were carried out in winter climate conditions between 5th and 26th of December 2021. 32 T resistors are placed in a staggered manner in the collector, T resistors are placed in one of the collectors in such a way that FDM is encapsulated, and in the other, without FDM (only resistors) are placed in equal numbers. From the experimental results, dependent parameters such as collector useful energy, collector efficiency, space heating performance, exergy efficiency, thermal performance coefficient were determined. The design of the FDMs used in the collector as both resistance and resistance to flow, and heat-storing resistance can increase the useful heat energy obtained from the collector up to 4,5 times compared to the empty collector.

KeyTerms: Phase change material (FDM), latent heat storage, air solar collector

Science Code: 92802

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda bilimsel temeller ışığında desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmada yol gösteren danışmanım Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ'a, ve bu süreç zarfında yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Öğr. Gör. Mehmet ŞENER ve Arş. Gör. Selçuk KIZILCAOĞLU'na, yardımlarından dolayı arkadaşım Mak. Müh. İsmail ÖZDEMİR'e, her zaman maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme ve bu süreçte vefat eden en büyük destekçim annem Serab MELETLİ'ye çok teşekkür ederim.

Mehmet MELETLİ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

1.1. Yenilenebilir Enerji ve Kaynakları.....	2
1.2. Güneş Enerjisi ve Teknolojisi	2
1.2.1. Güneş kolektörleri.....	3
1.3. Enerji Depolama Teknolojileri	4
1.3.1. Termal enerji depolama.....	5
1.3.1.1. Duyulur Isı Depolama	6
1.3.1.2. Gizli Isı Depolama	8
1.3.1.2.1. Gizli ısı termal enerji depolama için gereklilikler	8
1.3.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama.....	9
1.4. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)	10
1.4.1. FDM'lerin ömürleri	12
1.4.2. Organik FDM'ler	13
1.4.3. İnorganik FDM'ler	13
1.4.4. Ötektik FDM'ler	14

1.5. Kaynak Araştırması	14
1.5.1. FDM'li güneş kollektörü içeren çalışmalar.....	14
1.6. Kuramsal Temeller	30
1.6.1. Havalı güneş kollektörleri I. Kanun (enerji) analizi	30
1.6.2. Havalı güneş kollektörleri II. Kanun (ekserji) analizi.....	32
1.6.3. Hidrodinamik ve ısı transferi teorik analizi	34
1.6.4. Isıtma mahali ve ısı yükü hesabı	35

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

2.1. Deney Sisteminin Tasarlanması ve İmalatı.....	37
2.2. Test Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar.....	41
2.2.1. Radyal fan	41
2.2.2. Kontrol ünitesi.....	42
2.2.3. Hava dağıtıcı	43
2.2.4. Debi ölçer	43
2.2.5. Sıcaklık ve basınç ölçer.....	44
2.2.6. Veri kopyalayıcı ve kaydedici.....	44
2.2.7. Işınlam cihazı.....	45
2.2.8. Kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	45
2.2.9. Deneysel yöntem	45
2.2.10. Belirsizlik ve hata analizi	46

3. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Kollektör Çıkış Sıcaklıkları Açısından Değerlendirme	48
SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR.....	62

EKLER..... 67

EK-1.....68

EK-2.....69

EK-3.....70

EK-4.....72

EK-5.....73

EK-6.....74

EK-7.....76

EK-8.....77

EK-9.....78

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.1. Havalı güneş kollektör kasasına entegre faz değıştiren malzeme uygulamaları.....	20
Tablo 1.2. Havalı güneş kollektörlerinde kapsüllenmiş faz değıştiren malzeme uygulamaları.....	26
Tablo 2.1. Deney parametreleri.....	41
Tablo 2.2. Kalsiyum klorür hekzahidrat'ın ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) termofiziksel özellikleri.....	45
Tablo 2.3. Toplam hata miktarları.....	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Havalı güneş kolektörlerinin sınıflandırması	4
Şekil 1.2. Enerji depolama teknolojileri	5
Şekil 1.3. Termal enerji depolama tekniklerinin sınıflandırılması	6
Şekil 1.4. Isıtma ve soğutma sürecinde faz değiştiren malzemenin sıcaklık değişimi.....	7
Şekil 1.5. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması.....	11
Şekil 1.6. Isı yükünün karşılama oranı için kullanılan mahalın ölçüleri Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 1.7. Isıtma yükü hesabı excel programı.....	36
Şekil 2.1. Deney sisteminin şematik görünümü	37
Şekil 2.2. a)Geometrik ölçüler b)Deney sistemi ölçüm konumları	39
Şekil 3.1. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısıtım değerinin günün zamanına göre değişimi (Re=4175).....	48
Şekil 3.2. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısıtım değerinin günün zamanına göre değişimi (Re=12525).....	49
Şekil 3.3. Kollektör faydalı ısıısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamanına göre değişimi (Re=4175).....	50
Şekil 3.4. Kollektör faydalı ısıısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamanına göre değişimi (12525).....	50
Şekil 3.5. FDM'li, FDM'siz ve boş kolektörün Re=4175 için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi.....	51
Şekil 3.6. FDM'li, FDM'siz ve boş kolektörün Re=8350 için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi.....	51
Şekil 3.7. FDM'li, FDM'siz ve boş kolektörün Re=12525 için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi.....	52
Şekil 3.8. FDM'li, FDM'siz ve boş kolektörün Re=16700 için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi.....	53
Şekil 3.9. Ortalama Nusselt ve sürtünme katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi	53

Şekil 3.10. FDM'li ve FDM'siz kolektörün $Re=4175$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi	55
Şekil 3.11. FDM'li ve FDM'siz kolektörün $Re=12525$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi	56
Şekil 3.12. FDM'li ve FDM'siz kolektörün $Re=4175$ için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değişimi	57
Şekil 3.13. FDM'li ve FDM'siz kolektörün $Re=12525$ için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değişimi	57
Şekil 3.14. Yok olan ekserjinin zamana göre değişimi ($Re=4175$).....	59
Şekil 3.15. Yok olan ekserjinin zamana göre değişimi ($Re=12525$)	59
Şekil 3.16. FDM'li ve FDM'siz ve boş kolektörlerde Isıl Performans Faktörünün (IPK) Reynolds sayısına göre değişimi	59
Şekil 3.17. Nusselt sayısındaki artış oranının Reynolds sayısına göre değişimi	59

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Deney sisteminin görünümü.....	38
Resim 2.2. FDM’siz T dirençler	40
Resim 2.3. FDM’li T dirençler	40
Resim 2.4. FDM’li T direnç sıcaklık ölçüm noktaları.....	41
Resim 2.5. Radyal fan.....	42
Resim 2.6. Sürücü.....	42
Resim 2.7. Hava dağıtıcı.....	43
Resim 2.8. Debi ölçer	43
Resim 2.9. Sıcaklık ve basınç bağlantı elemanı	44
Resim 2.10. Veri toplayıcı ve kaydedici	44
Resim 2.11. Işınım cihazı	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Alan [m^2]
C_p	Sabit basınçta özgül ısı [kJ/kgK]
D_h	Hidrolik çap [m]
Ex	Ekserji [W]
f	Sürtünme kayıp katsayısı [-]
H	Yükseklik [m]
h	Isı taşınım katsayısı [W/m^2K]
L	Uzunluk [m]
$\dot{m}$	Kütle debisi [kg/s]
Nu	Nusselt sayısı [-]
Nu_m	Ortalama Nusselt Sayısı [-]
P	Basınç [bar]
Pr	Prandtl [-]
Re	Reynolds sayısı [-]
Q	Isı enerjisi [W]
T	Sıcaklık [$^{\circ}C$]
U	Isı kayıp katsayısı [W/m^2K]
V	Hacim [m^3]
W	Genişlik [m]
α	Kollektör Açısı [$^{\circ}C$]
μ	Viskozitesi [Ns/m^2]
η	Enerji verimi [%]

Kısaltmalar

A	Alt
AK	Kanal Kesit Alanı
AT	Kollektör Yüzey Alanı
Ç	Çıkan
D	DeneySEL
DP	Depolanan
FDM	Faz Değiştiren Malzeme

F	Faydalı
FL	Fdm'li Kollektör
FS	Fdm'siz Kollektör
G	Giren
HG	Hava Giriş
HÇ	Hava Çıkış
HF	Faydalı Isı Transfer Katsayısı
h	Hava
K	Kaybolan
KA	Kanatçık Alt
KÜ	Kanatçık Üst
IPK	Isıl Performans Katsayısı
O	Orta
S	Sayısal
Y	Yutulan
YK	Yok olan
U	Üst
W	Su, Watt

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla artan önemi, enerji kıtlığı zamanlarında enerjiyi depolamak, toplamak ve yeniden kullanmak için ciddi önem taşımaktadır. Artan çevre bilinci ve kaynakların sonlu oluşunun yanında eş zamanlı olarak yükselen enerji kaynaklarının fiyatları ise günümüzde yenilenebilir enerjinin önemini birkez daha bizlere hatırlatmıştır. Enerji depolamak için çeşitli yöntemler ve malzemeler kullanılmaktadır. Yakın zamanda ise faz değiştiren malzemelerin güneş enerjisi ve atık ısı depolamada kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. (Şenpınar, A., ve ark. 2006).

Gizli ısı depolama, son yıllarda önem kazanan enerji verimliliğini artırmanın yollarından birisidir. Gizli ısı enerjisi depolamak için kullanılan,ısı kapasitesi yüksek olan ve belirli sıcaklık değerlerinde faz değişimine uğrayarak enerjiyi emen veya serbest bırakan maddelere faz değiştiren malzemeler(FDM) denir. FDM'ler üç ana gruba ayrılır: organik bileşikler, inorganik bileşikler ve ötektik bileşikler. Organik FDM'ler, katı-sıvı faz değişimi sergilerken, küçük hacim değişimleri ve yüksek gizli ısı enerjisi depolama kapasiteleri nedeniyle diğer FDM'lere göre tercih edilirler. Hava kolektörleri, güneş enerjisi kullanımının önemli bir parçasıdır. Enerji üretimi ve kullanımında dışa bağımlılık ve olumsuz çevresel etkiler, enerji verimliliği ve tasarrufu konularının önemini artırmıştır. Termal enerji depolama(TED) teknolojisi, elektrik üretiminde, endüstride ve binalarda yenilenebilir enerjinin payının artırılmasına ve enerji sistemlerine entegre edilmesine yardımcı olur. Termal enerji depolama, ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliği artırmak için faz değiştiren malzemelerde(FDM) kullanılır. Bu çalışmada, hava kaynaklı güneş kolektörleri kullanılarak ısıtma yüklerinin verimini artırmak için inorganik faz değiştiren malzemeler kullanılmıştır.

Bu tez çalışması birinci bölüm kuramsal temeller ve kaynak araştırması, ikinci bölüm materyal ve metod, üçüncü bölüm deneysel bulguların değerlendirilmesi ve dördüncü bölüm sonuçlar ve öneriler olmak üzere dört(4) ana bölümden oluşmaktadır. Bu çalışmanın amacı aynı geometrik ölçülere sahip FDM'li ve FDM'siz T dirençli hava ısıtmalı güneş kolektörlerinin mahal ısıtma performansına etkisini deneysel olarak belirlemektir.

1. BÖLÜM

KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

1.1. Yenilenebilir Enerji ve Kaynakları

Dünyada enerji kaynaklarına olan talep her geçen gün artmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde nüfus artışı, sanayileşme, teknolojik gelişme ile birlikte önümüzdeki yıllarda enerjiye olan talep daha da artacaktır. Fosil enerji kaynaklarının dünyada ciddi çevre sorunlarına yol açması, kaynaklarının yakın gelecekte tükenecek olması, fiyat istikrarsızlığı gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerjiye olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. (Yılmaz M., 2012).

Son on yılda, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi odak alan olmuştur. Ancak rüzgâr ve güneş enerjili sıcak su teknolojileri, toplam enerji üretiminde %20'lere yaklaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, her yerde bulunabilmesi, temiz olması ve dönüştürülmesinin kolay olması nedeniyle yüksek potansiyelli kaynaklar olarak tanımlanmaktadır. Bu durum PV teknolojilerindeki gelişmelerle güneş destekli elektrik üretimini son on yılda 3 kat artmıştır.

Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi için birincil kaynaklar olarak görülmüştür. Rüzgâr enerjisi ile karşılaştırıldığında, güneş enerjisi dönüşümü, ısıtma, kurutma, pişirme ve damıtma gibi evsel ve endüstriyel uygulamaları karşılamak için de yaygın ve etkin olarak kullanılabilirdiğinden, üzerindeki çalışmalarda sürekli artmaktadır (Matheswaran M. M., 2020).

1.2. Güneş Enerjisi ve Teknolojisi

Güneş enerjisi, dünyanın yüzeyinde güneş radyasyonu şeklinde alınır. Nükleer füzyon nedeniyle, elektromanyetik dalgalar güneş radyasyonu şeklinde yayılır. Güneş'in ortalama yüzey sıcaklığı yaklaşık 5600 K olup, çapı 13.9×10^5 km ve Dünya'dan uzaklığı 14.96×10^7 km'dir. Güneş yüzeyinden yayılan enerji yaklaşık olarak $6,33 \times 10^7$ W/m²'ye eşittir ve yeryüzüne ulaştığında yaklaşık 1367 W/m² yüzeye düşmektedir. Dünya yüzeyinde güneşten kazanılan toplam enerji yaklaşık 17×10^{13} kW'ya eşittir ve elde edilen bu toplam enerji, hidroelektrik, nükleer enerji ve fosil yakıt sektörleri tarafından üretilen küresel enerjinin yaklaşık 20000 katından fazladır (Aksungur K. M. ve ark. 2009).

Güneş radyasyonu 2×10^2 ile 3×10^3 nm arasında bir dalga boyuna sahiptir ve 6000 K'da siyah bir cismin spektrumu altına düşmektedir. Dünya yüzeyine düşen güneş radyasyonunun toplam miktarının içinde toz, su buharı ve hava moleküllerinin varlığı nedeniyle yayılan radyasyonun yaklaşık %30'u bulunmaktadır. Ayrıca yeryüzüne düşen güneş ışınımının %19'u emilir ve geriye kalan %51'lik kısım doğrudan güneş ışınımı olarak adlandırılır. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama

toplam radyasyon değeri 1.311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Çorum ilinde ise yıllık toplam güneşlenme süresi 2.511 saat (günlük toplam 6,84 saat), ortalama toplam radyasyon 1.419 kWh/m²-yıl değerine sahiptir (Aksungur K. M. ve ark. 2009).

Güneş-Fotovoltaik (PV) sistemlerinde, güneş ışıınım enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş panelleri aracılığıyla güneş ışığından gelen fotonlar, fotovoltaik hücrelerde elektrik enerjisine çevrilir. Bu elektrik enerjisi ardından kullanıma veya depolamaya yönlendirilebilir. Tüm güneş enerjisi uygulamalarında, sistemin performansı doğrudan, sistemin güvenilirliğini, ekonomik kullanımını ve genel performansını etkilediği için önemlidir. Sıcak su üretimi için güneş enerjisi kolektörleri yeterince gelişmiştir ve sektör olarak hem yaygınlaşmakta hem de hızlı bir şekilde büyümektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin zayıf yönleri; yüksek ilk yatırım, uzun geri ödeme süreleri, düşük ısı performans olarak sıralanabilir. Bu dezavantajlar; sistemin verimliliğini artıran teknolojik gelişmeler ile giderilebilir.

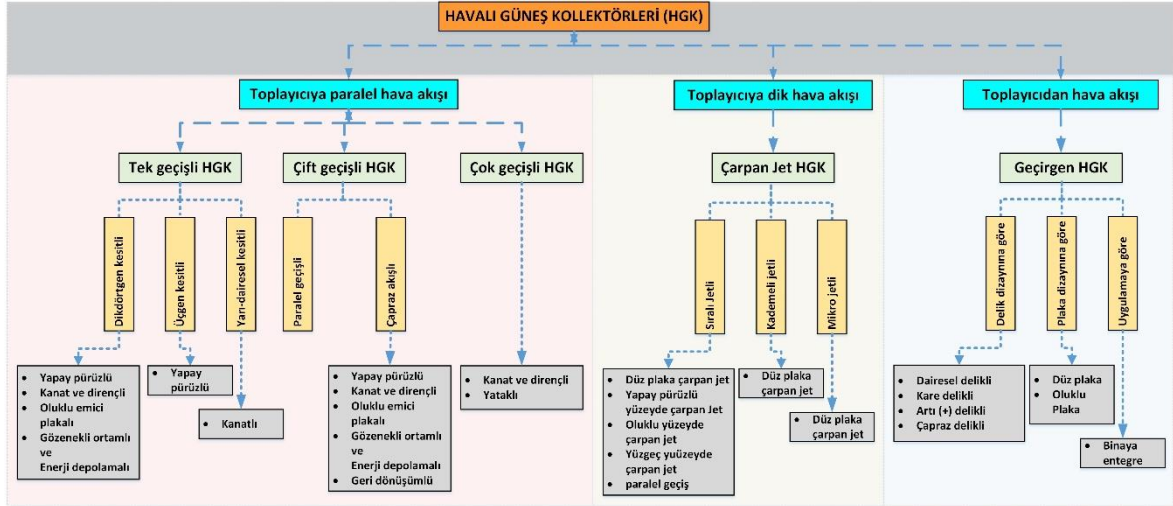
1.2.1. Güneş kolektörleri

Güneş kolektörü, güneş ışıınımını ısı enerjisiye dönüştürmek ve ısı uygulamalar için su, yağ, hava gibi çalışma akışkanına aktarmak için kullanılan basit bir cihazdır. Havalı güneş kolektörleri toplam güneş kolektörü kullanımındaki payı %0,3 civarındadır. Borulu su ısıtıcılar ise bu oranda yaklaşık %71 paya sahiptir (Weiss ve ark. 2017).

Havalı güneş ısıtıcıları, kurutma ve alan ısıtma gibi endüstriyel uygulamalarda kullanımı büyük hızla artmaktadır. Havalı güneş kolektörleri ve sınıflandırması Şekil 1.1'de detaylandırılmıştır (Matheswaran M. M., 2020).

Enerji ihtiyacı tarih boyunca farklı kaynaklardan karşılanmıştır. Eskiden, odun gibi biyokütle kaynakları enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılırken, zamanla kömürün keşfiyle birlikte fosil yakıtlar önemli bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Daha sonra petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar da enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yakın gelecekte, enerji ihtiyacının artması ve çevresel etkilerin azaltılması hedefiyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artacaktır. Teknolojik gelişmeler ve inovasyonlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini artırmakta ve maliyetlerini düşürmektedir. Ayrıca, enerji depolama teknolojileri alanlarında yapılan çalışmalar da yenilenebilir enerji kullanımını kolaylaştırmaktadır.

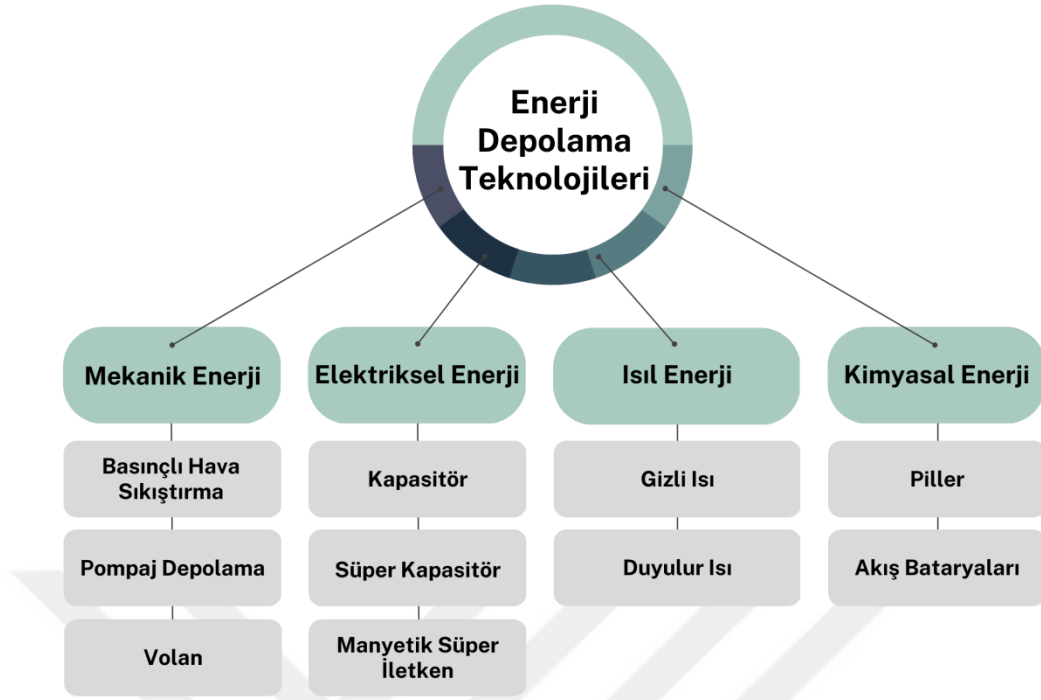


Şekil 1.1. Havalı güneş kolektörlerinin sınıflandırması

Hiç şüphe olmaksızın yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en kolay faydalanılabilenlerin başında güneş enerjisi ve en önemli sorunların başında ise enerjiyi depolamak gelmektedir. Günümüzde birçok nedenden dolayı enerji depolama teknolojilerini geliştirmek üzere bilim insanları ve mühendisler yeni imkanlar sağlamak üzere çalışmaktadırlar. Havalı güneş kolektörleri de enerjiyi depolamak için kullanılan sistemlerin en önemlilerinden birisidir. Bu hava ısıtıcıları güneş ışınlarını emer ve soğurucu yüzeydeki enerjiyi ısı enerjisine çevirdikten sonra kolektör içindeki akışkana aktarır. Sade yapısı nedeniyle havalı güneş kolektörleri maliyeti düşük ve en çok kullanılan kolektörlerden biridir. Sistemde kullanılan havanın düşük entalpisi nedeniyle geniş ısı transfer yüzeyine ve yüksek üfleme debisine sahip olmalıdırlar. Bu sistemin genel olarak plastik veya camdan oluşan geçirgen örtü, emici plaka, plakaya monte edilmiş veya alt kısmına yerleştirilmiş boru veya kolektör kanalları, yalıtkan malzemesi ve kolektör yapısından oluşmaktadır. Havalı güneş ısıtıcıları genel olarak ortam ısıtılması, endüstriyel kurutma sistemleri ve tarım ürünleri kurutma amaçlı kullanılır (Matheswaran M.M., 2020).

1.3. Enerji Depolama Teknolojileri

Enerjinin uygun şekilde depolanması yalnızca arz ve talebi dengelemekle kalmaz, aynı zamanda enerji akışını düzenleyerek enerji ağlarını daha verimli ve güvenli hale getirir. Enerji depolama teknolojileri günlük, haftalık veya mevsimsel olarak değişen yük profiline ve talep yüküne bağlı şekilde yanıt vermekte ve ihtiyaca göre çalışmaktadır. Ayrıca şarj/deşarj sürecindeki kayıpları minimuma indirmekte olup verimlilik açısından daha karlıdır. Enerji depolama dört farklı şekilde yapılabilir: mekanik, elektriksel, ısı ve kimyasal olarak. (Mert M.S. ve ark., 2018)



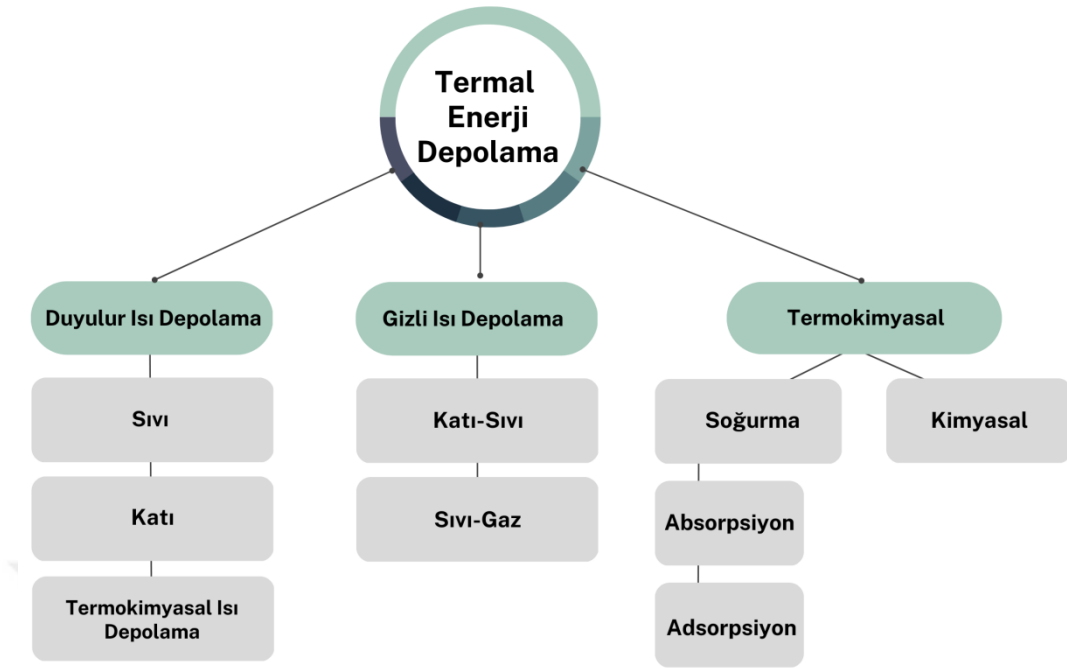
Şekil 1.2. Enerji depolama teknolojileri (Mert M.S. ve ark., 2018)

1.3.1. Termal enerji depolama

Bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamına termal enerji depolama denir. Moleküler veya atomik titreşim sonucunda oluşur ve bu enerjinin aktarımı ısı akışıyla gerçekleşir. Bu da sıcaklık farkından kaynaklıdır. Termal enerji depolama (TED), yenilenebilir enerji kaynaklarının elde edilmesiyle, yeryüzü arasındaki uyumsuzluğu, arz-talep arasındaki farkı giderirken, hem soğutma hem de ısıtma için çözümler sunar. Ulaşım, konut, sanayi, ulaşım ve tarım sektörlerinde uygulama olanağı bulunan TED, elektrik enerjisi ve kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan tasarruf sağlayarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Bu nedenle son yıllarda bu yöntemle ilgili birçok yöntem geliştirilmiştir.

Termal enerji depolama tekniklerinin sınıflandırılması Şekil 1.3'de gösterilmektedir. Sınıflandırma üç farklı şekilde gerçekleştirilir.

- 1) Duyulur Isı Depolama
- 2) Gizli Isı Depolama ve
- 3) Termokimyasal Isı Depolamadır.



Şekil 1.3. Termal enerji depolama tekniklerinin sınıflandırılması

Termal enerji depolamanın, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli olarak kullanılmasını sağlaması, kojenerasyon santrallerinin daha etkili çalışmasını sağlaması, sıcaklıkları farklı olan atık ısıdan faydalanılmasını sağlaması ve elektrik maliyetinin ucuz olduğu zamanlarda depolama yapılabilir olması gibi yararları vardır (Bulut, F., 2020)

1.3.1.1. Duyulur Isı Depolama

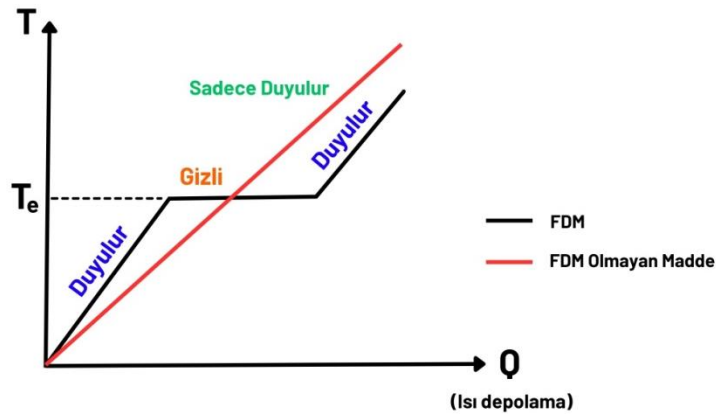
Termal enerji depolama materyalinin sıcaklığındaki değişimden faydalanarak yapılan depolamaya duyulur ısı depolama denir. Depolanabilecek ısının miktarı; sıcaklıktaki değişim miktarına, ortamın ısı kapasitesine ve depolama materyalinin miktarına bağlıdır. Katı veya sıvı materyalde duyulur ısı depolanabilir. Duyulur ısının depolanmasında kullanılabilen sıvılar; ötektik karışımlar, bazı alkoller ve su-etilen glikol (%50-%50) dür. Duyulur ısı depolamada en çok kullanılan sıvı madde sudur. Ucuz, fazla bulunabilen ve kullanıldığı alanlarda da sağlığı tehdit edecek herhangi bir yapıya sahip değildir. Su birim hacimde fazla miktarda ısı depolaması yapabilir. Isı depolama ve geri kazanma işlemleri duyulur ısı depolamada tersinir olarak gerçekleşir. Yani duyulur ısı depolama sisteminin ömrü boyunca maddelerdeki bu özellikler değişmez.

Duyulur ısı depolamada, Depolama sıcaklığı ısı depolama esnasında sürekli yükseldiğinden kaybedilen ısının miktarı fazladır, ısı sistemden geri kazanılırken, depolama sıcaklığı daima azaldığından ısının akış dağılımı gizli ısı depolamaya göre kararsızdır, Sistemde yalıtıma olan

ihtiyaç maliyeti artırmaktadır. Duyulur ısı depolama, depolama ortamına göre 3'e ayrılır; katı ortamda depolama, sıvı ortamda depolama ve hibrid (katı+sıvı) ortamda depolamadır (Bulut, F., 2020).

Duyulur ısı depolamada su kullanılmasının birçok üstünlüğü vardır;

- Ucuz ve kolay elde edilir.
- Yanıcı ve zehirleyici özelliği yoktur.
- Kimyasal, fiziksel ve termodinamik karakteristikleri çok iyi bilinmektedir.
- Enerji depolaması olarak faydalanılırken aynı zamanda enerji toplayıcı akışkan olarak da kullanılabilir.
- Isı kapasite değeri büyüktür.
- Soğutma ve ısıtma sistemlerinde gerekli sıcaklık aralığında kararlı bir sıvı buhar dengesi bulunmaktadır.
- Akışkan dinamiği ve ısı transferi iyi bilinmektedir.
- Paslanma (korozyon) etkisini azaltmak için bir çok teknoloji geliştirilmiştir. Suyun sayılan üstünlükleri yanında bazı kusurları da bulunmaktadır:
- Donduğunda genişlemektedir. O nedenle, donmaya karşı önlem alınması gerekir.
- Korozyon yapabilme özelliği nedeniyle depo içine korozyonu önleyen madde ilave edilmelidir.
- Suyun erime ve kaynama noktaları arasında küçük fark bulunmaktadır (Kocaman B., 2021).



Şekil 1.4. Isıtma ve soğutma sürecinde faz değiştiren malzemenin sıcaklık değişimi

Isı depolama ve geri kazanma işlemleri duyulur ısı depolamada tersinir olarak gerçekleşir (Şekil 1.4). Yani duyulur ısı depolama sisteminin ömrü boyunca maddelerdeki bu özellikler değişmez (Bulut, F., 2020).

1.3.1.2. Gizli Isı Depolama

Isı depolamada kullanılacak olan materyallerin faz değişimi esnasında materyallerin aldığı veya verdiği ısıya gizli ısı denir. Bu faz değişimi sırasında erime-kaynama gibi düzensizliğin arttığı durumlarda sistemden enerji alınırken donma-yoğunlaşma gibi düzensizliğin azaldığı durumlarda ısı verilir. Gerçekleşen bu faz değişimleri sırasında ısı, gizli ısı olarak depolanmaktadır.

Gizli ısıyı depolayan maddelere faz değiştiren maddeler (FDM) denir. Organik FDM grubuna giren parafinler, geniş bir sıcaklık aralığına sahip olup yüksek gizli ısı değerlerine sahip olmaları, ucuz olup bol miktarda bulunmaları, kimyasal açıdan kararlı davranmaları, uzun ömürlü olup sabit sıcaklıkta yüksek enerji depo edebilme yoğunluğuna sahip olmaları sebebiyle ısı depolamada yaygın bir şekilde kullanılırlar. Ancak parafinlerin termal enerji depolama sistemlerinde FDM olarak kullanılmasındaki en büyük sorun düşük ısıl iletkenliğe sahip olmalarıdır. Bu problemin önüne geçmek adına bazı metotlar geliştirilmiştir. Bunlardan nanopartiküllerin FDM'ye ilave edilmesi yaygın olan yöntemlerdendir. Burada nanopartiküllerin yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmalarıyla ilave edilen FDM'nin ısıl iletkenliklerinde artışa yol açarken, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanında boyutlarının küçük olmasına bağlı olarak artan yüzey/hacim oranıyla birlikte ise ısı transfer hızını arttırmaktadırlar (Ülker N. ve ark. 2020).

1.3.1.2.1. Gizli ısı termal enerji depolama için gereklilikler

Gizli ısı termal enerji depolama, termal enerjinin depolanması ve geri kazanımı için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, depolama maddesi içinde gerçekleşen endotermik bir reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı enerjisi depolanır. Bu yöntemin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için bazı gereklilikler vardır:

Depolama Maddesi Seçimi: Depolama maddesi, endotermik bir reaksiyon gerçekleştirerek ısı enerjisini depolamalıdır. Bu nedenle, uygun bir depolama maddesi seçmek çok önemlidir. Depolama maddesi, yüksek depolama kapasitesine ve düşük maliyete sahip olmalıdır.

Depolama Tankı Tasarımı: Depolama tankı, yüksek sıcaklık ve basınçta dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, tankın izolasyonu da çok önemlidir. İyi bir izolasyon, depolama maddesinin kaybını önler ve enerji verimliliğini artırır.

Depolama Süreci Kontrolü: Depolama süreci, sıcaklık, basınç ve akış hızı gibi parametrelerin kontrol edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, depolama maddesinin verimli bir şekilde depolanmasını sağlar.

Depolama Maddesi Döngüsü: Depolama maddesi, termal enerjinin depolanması için kullanıldıktan sonra geri kazanılmalıdır. Bu nedenle, depolama maddesi döngüsü tasarımı, depolama maddesinin geri kazanılması ve tekrar kullanılabilmesi için önemlidir.

Depolama Maddesi Performansı: Depolama maddesi, uzun ömürlü olmalı ve yüksek depolama kapasitesine sahip olmalıdır. Ayrıca, depolama maddesinin performansı, depolama süresi boyunca sabit kalmalıdır. Bu gereklilikler, gizli ısı termal enerji depolama sistemlerinin etkili bir şekilde çalışmasını sağlar ve enerji verimliliğini artırır.

1.3.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama

Termokimyasal sistemler, tamamen geri dönüşümlü kimyasal reaksiyonlarda moleküler bağların oluşumu ve parçalanması yoluyla açığa çıkan ısının depolanmasına veya serbest bırakılmasına dayanır. Termokimyasal enerji depolaması karmaşık bir süreç gibi görünebilir, ancak özünde ısıyı emen ve onu ekzotermik bir reaksiyonla geri döndüren endotermik bir reaksiyondur.

Gizli ısı depolama, termal enerjinin depolanması ve geri kazanımı için kullanılan bir yöntemdir. Duyulur ısı depolamaya kıyasla, gizli ısı depolamanın birçok avantajı vardır:

- **Daha Yüksek Enerji Depolama Kapasitesi:** Gizli ısı depolama maddeleri, daha yüksek enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu, aynı hacim veya kütleye sahip olan duyulur ısı depolama maddelerinden daha fazla enerji depolanabilmesi anlamına gelir.
- **Daha Küçük Depolama Alanı:** Gizli ısı depolama sistemleri, aynı enerji miktarı için daha küçük bir depolama alanı gerektirir. Bu, gizli ısı depolama sistemlerinin, yerleşim alanları gibi sınırlı alanlarda kullanım için daha uygun olmasını sağlar.
- **Sabit Sıcaklık:** Gizli ısı depolama sistemleri, depolama süresince sıcaklığı neredeyse sabit tutar. Bu, sabit sıcaklıkta enerji depolama ve geri kazanım uygulamaları için çok uygun olmasını sağlar.
- **Daha Uzun Depolama Süresi:** Gizli ısı depolama maddeleri, daha uzun depolama süresine sahiptir. Bu, enerjinin daha uzun süre depolanmasını ve ihtiyaç duyulduğunda geri kazanılmasını mümkün kılar.
- **Daha Az Enerji Kaybı:** Gizli ısı depolama sistemleri, depolama süresi boyunca daha az enerji kaybına neden olur. Bu, enerjinin daha verimli bir şekilde depolanmasını ve geri kazanılmasını sağlar.

Bu avantajlar, gizli ısı depolamanın duyulur ısı depolamaya kıyasla daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Ancak, her iki yöntemin de kendi avantajları ve dezavantajları vardır ve uygulama koşullarına bağlı olarak hangisinin tercih edileceği belirlenmelidir (Ülker N. ve ark. 2020).

1.4. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

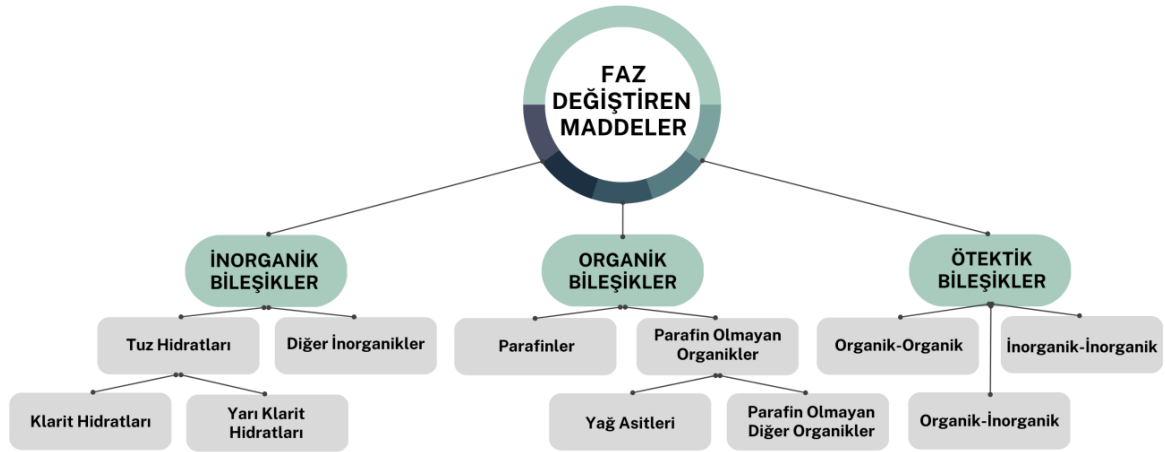
Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) son zamanlarda enerji depolama teknolojileri arasında popüler bir seçenek haline geldi. Bu malzemeler, ısı depolaması ve geri kazanımı için kullanılan bir tür termal enerji depolama teknolojisidir.

FDM'ler, sıcaklığı arttığında faz değiştiren bir malzeme olarak davranır. Bu, malzeme ısındığında, içindeki kimyasal bağların düzeni değişir ve bu da malzemenin fazını değiştirir. Bu faz değişikliği sırasında, malzeme çevresindeki havadan veya sudan ısı alır veya ısı verir. Bu şekilde, FDM'ler, faz değiştirme işlemi sırasında büyük miktarda ısı depolayabilir veya serbest bırakabilirler.

FDM'lerin avantajlarından biri, diğer enerji depolama sistemlerine kıyasla daha yüksek bir ısı depolama kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu, birim hacim veya birim kütleye daha fazla enerji depolama kapasitesi anlamına gelir. Ayrıca, diğer enerji depolama sistemlerine göre daha az hacim gerektirirler, bu da daha az alan kapladıkları anlamına gelir.

FDM'ler aynı zamanda sabit sıcaklıkta enerji depolama ve geri kazanım uygulamaları için de oldukça uygundur. Bu, FDM'lerin enerji depolama süresince sıcaklıklarını hemen hemen sabit tutabilmesi anlamına gelir. Bu özellik, birçok endüstriyel uygulama için son derece önemlidir.

Sonuç olarak, Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) termal enerji depolama teknolojileri arasında önemli bir yer tutar. Bu malzemeler, yüksek ısı depolama kapasitesi, düşük hacim gereksinimleri ve sabit sıcaklıkta enerji depolama özellikleri ile enerji depolama ve geri kazanımı için çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bu nedenle, FDM'lerin daha fazla araştırılması ve kullanılması, enerji depolama ve geri kazanımı teknolojilerinin gelişimine önemli bir katkı sağlayabilir (Mert, M. ve ark. 2018).



Şekil 1.5. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması (Mert, M. ve ark. 2018).

Faz değıştiren malzemeler (FDM), ısının depolanması ve serbest bırakılması için kullanılan ileri teknolojik malzemelerdir. Bu malzemeler, sıcaklığı değıştiğinde faz değıştiren bir reaksiyon gösterirler ve böylece ısı enerjisini depolayabilirler. Bu özellikleri nedeniyle FDM, birçok farklı endüstride kullanılmaktadır.

FDM'lerin kullanım alanları;

- Isı depolama sistemleri: Faz değıştiren malzemeler, ısı depolama sistemleri için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. FDM'ler, ısıyı emen ve depolayan bir sistem içerisindeki sıcaklığı sabit tutan faz değışimi sürecini kullanarak enerji depolayabilirler. Bu sistemler, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Termal yönetim: Faz değıştiren malzemeler, elektronik cihazların termal yönetimi için de kullanılabilir. Özellikle, yoğunluğu ve hacmi sabit olan bu malzemeler, sıcaklığın artmasıyla birlikte faz değıştirerek ısının emilmesini sağlayabilirler.
- İzolasyon malzemeleri: Faz değıştiren malzemeler, binaların izolasyonu için de kullanılabilir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda faz değıştirerek ısıyı emer ve daha sonra sıcaklık düştüğünde tekrar salarlar. Bu özellikleri sayesinde, binanın iç sıcaklığını düzenler ve enerji tasarrufu sağlarlar.
- Soğutma sistemleri: Faz değıştiren malzemeler, soğutma sistemleri için de kullanılabilir. Özellikle, FDM'ler buzdolabı ve klima sistemlerinde kullanılan soğutucu gazların yerini alabilirler. Bu sayede, daha az enerji tüketen ve çevre dostu sistemler oluşturulabilir.
- Gıda saklama: Faz değıştiren malzemeler, gıdaların uzun süre saklanması için de kullanılabilir. Özellikle, soğuk zincirin bozulduğu durumlarda, faz değıştiren

malzemelerin kullanımı ile gıdaların sıcaklığı kontrol altında tutulabilir ve bozulma süresi uzatılabilir.

- Isıtma sistemleri: Faz değıştiren malzemeler, ısıtma sistemlerinde de kullanılabilir. Özellikle, yüksek enerji tasarrufu sağlayan ve daha az maliyetli olan bu sistemler, evlerde ve sanayi tesislerinde kullanılabilir.
- Uzay araştırmaları: Faz değıştiren malzemeler, uzay araştırmalarında da kullanılmaktadır. Özellikle, uzay araçlarının yüksek sıcaklıklarda çalışmasında ve uzay istasyonlarında ısı kontrolünde kullanılmaktadır.

Bir faz değıştiren maddede aranan özellikler; termodinamiksel, fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikler olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

a) Termodinamik özellikler: Bu özellikler, maddenin ısıl davranışını açıklamaya yöneliktir. Bu özellikler arasında, madde için gerekli olan ısı değışimi, sıcaklık, basınç ve entalpi değışimi gibi faktörler yer alır.

b) Fiziksel özellikler: Madde için mekanik ve yapısal özellikleri ifade eder. Bu özellikler arasında, yoğunluk, viskozite, yüzey gerilimi, iletkenlik, termal iletkenlik ve elastikiyet gibi faktörler yer alır.

c) Kimyasal özellikler: Maddenin kimyasal bileşimindeki değışiklikleri ifade eder. Bu özellikler arasında, madde için reaktivite, asit-baz özellikleri, kimyasal ayrışma ve kimyasal reaksiyonlar gibi faktörler yer alır (Bulut, F., 2020).

1.4.1. FDM'lerin ömürleri

FDM ömrü ile ilgili yapılan araştırmalar, bu malzemelerin ömrünü etkileyen faktörleri incelemiştir. Faz değıştiren malzemeler, ısıl enerji depolama ve termal yönetim gibi birçok uygulamada kullanılır.

Faz değıştiren malzemelerin ömrünü belirleyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar arasında malzeme türü, kristal yapı, faz değıştirme sıcaklığı, faz değıştirme hacmi, termal stabilite ve çevresel faktörler sayılabilir. Faz değıştiren malzemelerin bu faktörler tarafından etkilenmesi, özellikle uzun süreli depolama veya tekrarlı ısıtma ve soğutma döngüleri gibi zorlu koşullar altında, malzeme ömrünü etkileyebilir.

Bununla birlikte, faz değıştiren malzemelerin ömrünü artırmak için farklı stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında, malzeme üretim yöntemlerinin ve yapıların optimize edilmesi, faz değıştiren malzemelerin korunması için uygun ambalajlama ve depolama koşullarının sağlanması, malzemelerin çevresel koşullara karşı dayanıklılığının artırılması ve

diğer malzemelerle birlikte kullanıldığında uygun termal uyumu sağlamak gibi faktörler yer almaktadır.

Sonuç olarak, faz değiştiren malzemelerin ömrünü belirleyen birçok faktör vardır ve bu faktörler, malzemelerin kullanım alanına ve koşullarına bağlı olarak değişebilir. Faz değiştiren malzemelerin ömrünü artırmak için geliştirilen farklı stratejiler, malzeme ömrünü artırmak için kullanılabilir (Mert, M. ve ark. 2018).

1.4.2. Organik FDM'ler

Organik faz değiştiren malzemeler, sıcaklık değişimlerine duyarlı olarak faz değiştirerek ısı depolayabilen malzemelerdir. Organik FDM, parafinik FDM ve parafinik olmayan FDM olarak sınıflandırılır. Parafinlerin lineer yapısından dolayı karbon zincir uzunluğu arttıkça erime sıcaklığı ve faz değişim entalpisi artar. Bu malzemeler, birçok uygulamada termal enerji depolama için kullanılabilirler. Organik faz değiştiren malzemeler, inorganik faz değiştiren malzemelere göre daha düşük erime noktalarına ve daha yüksek faz değiştirme sıcaklıklarına sahip olabilirler.

Faz değişimi sırasında küçük hacim değişimi gösterirler ve faz ayırımına uğramazlar. Uzun vadede ısı olarak dayanıklıdır. Yüksek gizli erime ısısına sahiptirler (120 J/g dan 210 J/g'a kadar). Toksik ve tahriş edici özellik göstermezler. Tehlikesiz oldukları için geri dönüştürülebilirler. Donma sırasında aşırı soğuma göstermezler ya da çok az gösterirler. Bu malzemelerin bir diğer avantajı ise düşük maliyetli olmalarıdır. Bunların yanında, düşük ısı iletkenliğe sahip olmaları (0,2 W/mK civarında) ve buna istinaden daha büyük bir yüzey alanı gerektirmeleri, organik FDM'lerin dezavantajları olarak sayılabilir (Mert M. S. ve ark. 2018).

1.4.3. İnorganik FDM'ler

İnorganik faz değiştiren malzemeler, sıcaklık değişimlerine duyarlı olarak faz değiştirerek ısı depolayabilen malzemelerdir. Genellikle metaller, tuzlar, alaşımlar ve seramikler gibi inorganik bileşiklerden sentezlenirler. Sodyum sülfat dekahidrat (Glauber tuzu), kalsiyum klorür heksahidrat, sodyum tiyosülfat pentahidrat, sodyum asetat trihidrat ve baryum hidroksit oktahidrat gibi tuz hidratlar düşük maliyetlerinden dolayı geniş araştırma alanı bulmuştur. İnorganik maddeler organik maddelere göre birim hacimde iki kat daha fazla depolama kapasitesine sahiptir. Ayrıca inorganik FDMler yüksek sayıdaki erime/donma çevrimden sonra dahi erime ısısını (350 MJ/m³) koruyabilmelerine rağmen, uyumsuz erime özelliğine sahiptirler. Hacimsel olarak yüksek gizli erime ısısına sahip olmaları, yüksek ısı iletkenliğe sahip olmaları ucuz ve kolay bulunabilmeleri inorganik FDMlerin avantajları olsa da tuz ve tuz hidratların aşırı soğuma göstermeleri ve faz ayırımına uğramaları, çoğu

metallere karşı korozif olmaları, tahriş edici olmaları ve yüksek hacim değişimi göstermeleri dezavantajları olarak sayılabilir (Mert M.S. ve ark. 2018).

1.4.4. Ötektik FDM'ler

Ötektik faz değiştiren malzemeler, iki veya daha fazla bileşiğin birleşimi ile oluşan ve sıcaklık değişimlerine karşı duyarlı olarak faz değiştirerek ısı depolayabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, organik ve inorganik bileşiklerin kombinasyonundan oluşabilirler. Üç farklı ötektik türü olmasına rağmen, günümüzde yaygın olarak iki tür kullanılmaktadır, organik-organik faz değiştiren malzemeler ve organik-inorganik faz değiştiren malzemeler (Bayraktar, F. S. ve ark. 2022).

Ötektik faz değiştiren malzemeler, organik ve inorganik faz değiştiren malzemelere göre daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptirler. Ötektik maddeler eş anlı erime ve donma özelliği gösterirler ve faz ayırmasına uğramazlar. Aynı zamanda tek bir erime sıcaklığına sahip olması, hacimsel ısı depolama yoğunluğunun yüksek olması ötektik FDMlerin avantajlarıdır. Termofiziksel özellikleriyle ilgili sınırlı veri olması ise dezavantajlarıdır (Mert, M. S. ve ark. 2018).

1.5. Kaynak Araştırması

1.5.1. FDM'li güneş kolektörü içeren çalışmalar

Tyagi ve Buddhi(2008), gizli ısı depolama malzemesi olarak kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) inorganik tuzunun erime ısı ve erime sıcaklığındaki değişikliklerini incelemek için hızlandırılmış bir termal çevrim testini deneysel olarak incelemişler. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın sabit bir sıcaklık süresinde eridiği ve termal çevrim işlemi sırasında erime ısısında küçük değişiklikler gösterdiğini fark etmişlerdir. Dolayısıyla bu FDM'nin çeşitli bina/depolama sistemleri ve ısıtma soğutma uygulamaları için gelecek vadede bir faz değişim malzemesi olabileceğini belirtmişlerdir.

Lazaro ve arkadaşları(2009), güneş hava kolektörü ve hava ısı eşanjörünün gerçek ölçekli bir prototipi için deneysel bir modele dayalı yeni tasarım üzerinde çalışmışlardır. Deneysel sonuçlardan, farklı durumlarda test edilen ısı eşanjöründeki termal davranışı simüle etmeyi amaçlayan deneysel bir model oluşturulmuştur. Bu simülasyonlar, uygulamasının teknik uygulanabilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda FDM-hava ısı alışverişi için elde edilen sonuçlar, test edilen geometriyi kullanan diğer ısı eşanjörü uygulamaları için FDM'yi seçmek için yararlı olabilir sonucuna varılmıştır.

Tyagi ve arkadaşları(2012), faz değişim malzemesi (FDM) olan ve olmayan bir güneş enerjili hava ısıtıcısının deneysel çalışmasını ve performans analizini yapmışlardır. Üç farklı yöntem ile FDM olmadan, FDM ile ve hytherm yağı ile bu deneysel sistemin karşılaştırmalı performansını incelenmiştir. Zamana göre giriş, çıkış sıcaklıkları ve radyasyon kaydedilmiş ve termal enerji depolama (TES) durumunda çıkış sıcaklığının TES içermeyenlerden daha yüksek olduğu, ayrıca parafin mumu ile çıkış sıcaklığının biraz daha yüksek olduğu bulunmuştur. Verilere dayanarak, sistemin verimliliği hesaplandı ve belirtildi. Isı depolama durumunda verimlilik, TES olmadan parafin balmumu hytherm yağından biraz daha yüksek çıkmıştır.

Esakkimuthu ve arkadaşları(2013), bu çalışmada güneş hava ısıtma uygulamaları için termal depolama sistemine faz değiştirici malzeme ile birlikte deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma, HS 58 inorganik bir tuz ile gizli bir ısı depolama ünitesi kullanmanın uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamışlardır. Deneysel çalışma sonucunda giriş akış hızının şarj ve boşaltma işlemleri sırasında etkileri ölçülmüş ve rapor edilmiştir. Mevcut araştırmada dikkate alınan depolama tankı konfigürasyonu ve FDM bilya boyutu için, kütle akışı 200 kg/saat'lik oran, yükleme ve boşaltma işlemleri sırasında neredeyse tekdüze bir ısı transferi hızı sağlayabilir. Dahası, düşük kütle akışı oranı, depolama sisteminin maksimum kapasitesini kullanabilir ve daha uzun süre ısı sağlayabilir sonucuna varılmıştır.

Tyagi ve arkadaşları(2013), faz değişim malzemesi kullanarak, iki farklı tür ısı taşıyıcı olarak kalsiyum klorür heksahidrat kullanan termal yönetim sistemini (TMS-I ve TMS-II) tipik iklim koşullarında ısıtma ve soğutma uygulamaları için tasarlayıp, imal edip deneysel çalışmışlardır. Her iki sistemin performans analizini şarj (katılma) ve deşarj (erime) işlemleri sırasında gerçekleştirildi. Çalışma, her iki termal yönetim sistemi için hem enerji hem de ekserji verimliliklerinin neredeyse sabit olduğunu buldu. TMS-I'nin verimlilikleri, TMS-II'nin verimliliklerinden daha yüksektir ancak güneş enerjisi kullanarak ısıtma durumunda tersine döner. Enerjik verimlilik her iki durumda da ekserjetik verimlilikten her zaman daha yüksektir.

Bouadila ve arkadaşları(2014), havalı güneş kolektörü kullanarak en çok kullanılanlardan biri olan küresel kapsül sistemi ile faz değişim malzemesindeki kompakt gizli termal enerji üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bouadila ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada günlük enerji verimliliği % 32 ile % 45 arasında değişirken, günlük ekserji verimliliği % 13 ile % 25 arasında değişmiştir. Kütle akışının etkisi güneş hava ısıtıcısının çıkış sıcaklığında hava oranını incelemiştir.

Charvát ve arkadaşları(2014), hava bazlı güneş enerjisi sistemlerinde termal enerji depolaması için faz değişim malzemelerinde (FDM'ler) gizli füzyon ısını kullanma olasılığını, laboratuvar deneyleri ve sayısal simülasyonlar kullanılarak araştırmışlardır. Araştırmalarda parafin bazlı bir FDM ile doldurulmuş 100 alüminyum panel içeren bir ısı depolama ünitesi

kullanıldı. Deneyler, bir ısı kaynağı olarak bir elektrikli hava ısıtıcısı ile bir laboratuvar ortamında gerçekleştirildi. TRNSYS 17 simülasyon aracında tip olarak ünitenin sayısal modeli geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Geliştirilen model ile simülasyonların sonuçları deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir. Daha sonra model, belirli parametrelerin etkisini analiz eden parametrik bir çalışma için kullanılmıştır. Gerçekleştirilen araştırmalar, dar bir sıcaklık çalışma aralığına sahip hava bazlı termal sistemlerde gizli ısı termal depolamanın kullanım potansiyelini göstermiştir.

Shalaby ve arkadaşları (2014), enerji depolama ortamı olarak faz değişim malzemesi (FDM) kullanan yeni bir dolaylı güneş kurutucu tasarımını deneysel olarak araştırılmışlardır. Sistem iki özdeş güneş hava ısıtıcısından oluşur, kurutma bölümü, FDM saklama birimleri ve bir fan ile dolaylı güneş kurutucusu deneysel olarak test edilmiştir. Kurutma havasının sıcaklığı, beş saat boyunca gün batımından sonra 2,5 – 7,5°C ortam sıcaklığından daha yüksektir. Ek olarak, 0,1204 ve 0,0894 kg/s kütle akış hızları, kurutmanın en yüksek değerlerini vermektedir. Yeni tasarım her gün ardışık yedi saat boyunca istenen sıcaklığı başarıyla korumaktadır.

El Khadraoui ve arkadaşları(2016), termal ısı depolamasını kullanarak basit bir fabrikasyon Güneş Enerjili Hava Isıtıcısının verimliliğini artırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Gizli depolama ünitesi olarak Parafin mumu ile doldurulmuş dikdörtgen bir boşluk kullanılmıştır. FDM biriminin önemini değerlendirmek için benzer şekilde tasarlanmış iki güneş hava kollektörünün (Faz Değiştirme Malzemeli ve Malzemesiz) deneysel bir çalışması yapılmıştır. Deneyler sonucunda, gece boyunca SAH'nin çıkış hava sıcaklığının FDM kullanılarak artırıldığını göstermektedir.FDM'siz günlük enerji verimliliği %17'ye ulaşırken, güneş enerjili hava ısıtıcısının FDM ile günlük enerji verimliliği %33'e ulaşmıştır.

Arfaoui ve arkadaşları(2017), kompakt bir faz değişim malzemesi ile güneş hava ısıtıcı kollektörünün performansı araştırmışlardır. Bu güneş kollektöründe, iki dolgu yatak soğurucu ünite iki işlevi yerine getirir: güneş enerjisini emmek ve termal ısıyı FDM'ye depolamak. Güneş enerjisi, küresel kapsüller oluşurken kapsüllenmiş fdM'de hissedilebilir ısı ve gizli ısı olarak depolanmıştır. Tunus'taki Enerji Araştırma ve Teknoloji Merkezi'nde tasarlanan ve gerçekleştirilen deneysel aparat. Ayrıca, FDM'li güneş enerjili hava ısıtıcısı sadece geceleri doğal konveksiyon modunda kullanılır. Koleksiyonların performanslarını değerlendirmek, Bu güneş kollektörünün hava ısıtma uygulaması için kullanılabilirliğini doğrulamak için dış mekan deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel test sırasında, güneş kollektörünün farklı yatağındaki giriş ve çıkış hava sıcaklığı, bağıl nem, dış rüzgar hızı, küresel güneş radyasyonu ve FDM sıcaklık dağılımı kaydedildi. Deneysel olarak elde edilen ölçümler, FDM sisteminin performansını analiz etmek için kullanılmış, depolanan, emilen termal anlık ve şarj ve deşarj işlemi sırasında faydalı enerji hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, şarj sürecinde depolanan ısıнын soğurulan güneş radyasyonu ile arttığını göstermiş ve günlük enerji verimliliği % 47 civarında gerçekleşmiştir.

Poshtiri ve arkadaşları(2017), bir binanın FDM içeren bir adsorpsiyon sistemi ile 24 saat soğutulmasını incelemişlerdir. FDM içeren gizli ısı depolama ünitesini gündüz güneş enerjisini depolamak, geceleri korunan termal enerji ve yardımcı bir ısıtıcı ile adsorpsiyonlu soğutucuyu çalıştırmışlardır. Oda sıcaklığı ile odanın termal konforunun sağlanabileceği maksimum soğutma talebini tahmin etmişler ve bunu gerçekleştirmişlerdir. Buna ek olarak farklı parametrelerin oda sıcaklığı ve güneş fraksiyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak saatteki hava değişimi ve taze hava oranının yükselmesinin güneş fraksiyonunu azalttığı ve yardımcı enerji tüketimini arttırdığı bulunmuştur. Saatteki hava değişimi %4 ve taze hava oranı %20 olduğunda, günlük güneş fraksiyonunun 0,76 ve 24 saat boyunca 217 MJ yardımcı enerji gerektiği hesaplanmıştır. Bu koşullar altında 24 saat süre boyunca maksimum soğutma talebi 4000 W olan termal konfor elde edilmiştir.

Acır ve arkadaşları(2018), havalı güneş kollektörü kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Emici plaka üzerindeki geçiş sayısını artırarak havanın yüzeyi ile temas oranını yükseltmişlerdir ve ısıtıcı yüzeyde daha fazla ısının emilmesine izin verilmiştir. Acır ve arkadaşları bu çalışmada enerji ve ekserji verimliliğinde belirli oranlarda artışlar bulmuşlardır. Enerji verimliliği, $58,3 \pm \%0,63$ ve $53,7 \pm \%0,59$ olarak hesaplandı, Exergy verimlilikler, $\dot{m} = 0,0055 \text{ kg / s}$ için $20,7 \pm 1,00$ ve $\%18,4 \pm \%0,73$ olarak hesaplamışlardır.

Lakshmi ve arkadaşları(2018), trapez şeklinde oluklu soğurucu plakaya sahip güneş enerjili hava ısıtıcısının, hissedilebilir ısı depolama malzemesi ile birlikte enerji ve ekserji analizleri yapmışlardır. Çakıl, hassas bir ısı depolama malzemesi olarak kullanılır ve emici plakanın altına yerleştirilir. Hassas ısı depolama malzemeleri olan ve olmayan güneş hava ısıtıcısının termal performans analizi yapılır ve düz plakalı güneş hava ısıtıcı ile karşılaştırılır. Güneş radyasyonu yoğunluğu, güneş hava ısıtıcısında çeşitli pozisyonlardaki sıcaklıklar, günlük termal ve ekserji verimliliği gibi parametreler hesaplanır. Deneyler sonucunda, düz plaka güneş hava ısıtıcısının ortalama günlük ısı verimi ve trapez oluklu olanlar sırasıyla %8,5 ve %12,2 iken, hassas ısı depolama malzemeli trapez oluklu yutucu emici %36,6 ısı verim göstermektedir.

Baddadi ve arkadaşları(2019), gizli termal depolamalı bir güneş enerjili hava ısıtıcısı üzerine çalışmışlardır. Tunus'taki Enerji Araştırma ve Teknoloji Merkezi'nde yeni bir Hidroponik Sera tasarlandı ve kuruldu. Faz Değiştirme Malzemesi kullanan gizli termal depolamalı bir Güneş Enerjili Hava Isıtıcısı Hidroponik sera ısıtması için de özel uygulamanın termal ısı yükleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, hidroponik tasarımın performansını değerlendirmek için seranın ısıtması mikroklimi takip edilmiştir. Hidroponik sera, geleneksel seralardan daha iyi bir çevre sağlamıştır. Gündüz, yeni sera sıcaklığı 18°C'yi aştı ve iç ve dış sıcaklık arasındaki fark çoğunlukla 6°C'ye ulaştı. Bağıl nem, gündüz %20 ile %35 ve gece %70-85 arasında değişiyordu.

Raj ve arkadaşları(2019), çift geçişli güneş enerjili hava ısıtıcı sisteminin termal tepkisini faz değişim malzemesinin (FDM) termal gecikmesi üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu analiz, metalik makrokapsüllemenin çift geçişli güneş enerjili hava ısıtıcı sisteminin içine entegre edilmiş FDM'den ısı depolama ve geri kazanım üzerindeki rolünü araştırmaktadır. Amaçları, depolama için kullanılan kapsülleme geometrisinin etkisini araştırmak ve ayrı birimlerin organik parafin mumunun (FDM) daha hızlı yüklenmesine ve boşaltılmasına izin verip vermediğini incelemektir. Bu çalışmada, dikdörtgen ve silindirik makrokapsüller donanımlı çift geçişli güneş enerjili hava ısıtıcı sistemi için sırasıyla %47,2 ve %67'lik bir ortalama kapsülleme verimliliği elde edilmiştir.

Sajawal ve arkadaşları(2019), artan enerji depolama ve ısı transfer hızına sahip olmak için metal kanatlı tüplerde bulunan faz değişim malzemelerinden (FDM) oluşan çift geçişli güneş hava ısıtıcısının ısı performanslarını araştırmışlardır. Hava ısıtıcısı, üç farklı konfigürasyon için incelenmiştir. İlk konfigürasyonda FDM kullanmamışlardır. İkinci konfigürasyonda, termal depolama ortamı (TDO) olarak çift geçişli güneş enerjili hava ısıtıcısının çift geçişli güneş enerjili hava ısıtıcı sisteminin üst geçişinde yarı dairesel kanatlı tüplere doldurulmuş daha yüksek erime noktasına sahip RT44HC kullanılmamıştır. Üçüncü konfigürasyon, ikinci konfigürasyon ve daha düşük erime noktasına sahip RT18HC'nin bir kombinasyonu iken, Güneş enerjili hava ısıtıcısının termal depolama kapasitesini arttırmak için alt geçide TDO yerleştirildiği için dairesel kanatlı tüplere doldurulur. Isıtıcının termal performansı tüm konfigürasyonlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda ilk konfigürasyon, TSM'li diğer konfigürasyonlara kıyasla yüksek verimliliği göstermektedir. Bu davranışın nedeni daha önce giriş ısısının da depolama ortamlarında depolanması olarak açıklanmıştı. Bununla birlikte, günün geri kalanında ikinci ve üçüncü konfigürasyonlar, bir termal depolama ortamı olarak daha iyi termal verimlilikler gösterir ve artan ısı transfer alanı, ısı çıkışlarını arttırmıştır. Belirlenen maksimum anlık ısı verimleri sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü konfigürasyonlar için %85, %91,4 ve %91,9'dur. İkinci konfigürasyon için diğer konfigürasyonlara kıyasla standart sapmalar büyük ölçüde geçici gökyüzü koşulları nedeniyle yüksek olarak gerçekleşmiştir.

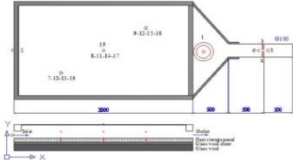
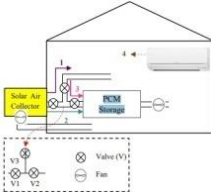
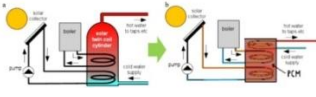
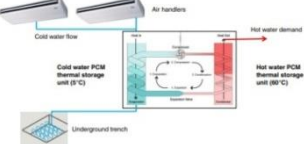
Salih ve arkadaşları(2019), çift geçişli güneş hava ısıtıcısının deneysel ve sayısal analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Faz değişim malzemesi FDM'ye dayalı parafin mumu ile doldurulmuş çoklu dikdörtgen kapsüllerin kullanılarak, bir şarj / deşarj işlemi sırasında yeni bir sistemi test etmek için iç mekan projektör simülatörü kullanılmış. Sırayla bu değerlerin doğruluğunu doğrulamak için, sonlu hacimli şemaya dayanan matematiksel bir model SIMPLE çift geçitte üç boyutlu zorlanmış konveksiyon türbülanslı akışı çözmek için algoritma uygulanmıştır. Araştırmalar da çeşitli hava akımı hızında (0,6, 0,9, 1,2, 1,5 ve 1,8) kg/dak. ve 625, 725 ve 825 W/m²'lik üç güneş ışıınımı yoğunluğu arttığını gösterdi. Hava akımı hızı erime periyodunda gecikmeye neden olur ve sırasında parafinin erime sıcaklığını azaltır sonucuna varılmıştır.

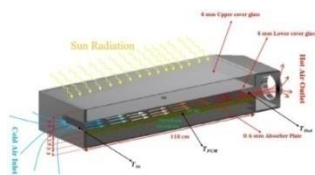
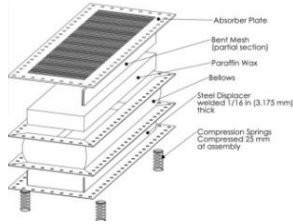
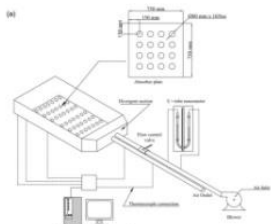
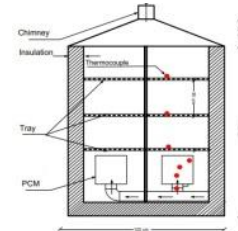
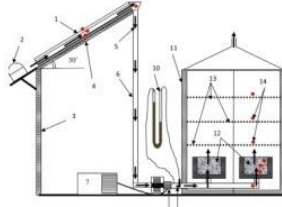
Kalaierasi ve arkadaşları (2020), iyi bir çıkış havası sağlamak için yeni bir düz plakalı güneş enerjili hava ısıtıcısı tasarlamışlardır. Güneş enerjili hava ısıtıcısı; FDM olarak parafin balmumu ile Tanta şehrinin geçerli hava koşulları altında tasarlandı ve test edildi. Çalışma sonucunda, düz ve v-oluklu termal performansını etkileyen parametreler plaka güneş hava ısıtıcı FDM ile ve FDM'siz sonuçları sunuldu. Termal performans parametreleri, kütle akış hızları 0,062, 0,028 ve 0,009 kg/s. FDM'nin emici plakanın altındaki kalınlığını değiştirmenin etkisi de incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan, FDM'yi kullanırken, çıkış sıcaklığının V-Oluklu plaka güneş hava ısıtıcı, 3,5 saat sonra 1,5 – 7,2°C ortam sıcaklığından daha yüksektir. Kütle akışı sırasında düz plaka güneş hava ısıtıcı için gün batımından sonra 1-5,5°C ile karşılaştırıldığında gün batımı oranı 0,062 kg/s'dir.. FDM, FDM'yi kullanmadan karşılık gelenlerine göre %12 daha yüksek ve %15 ve %21,3'tür.. Düz plaka, FDM ile kullanıldığında ilgili değerlerden daha yüksek şekilde akış hızı 0,062 kg/s idi.

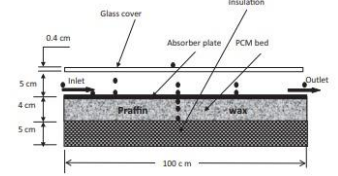
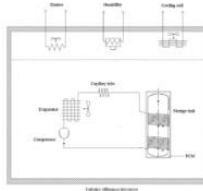
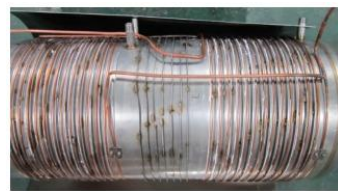
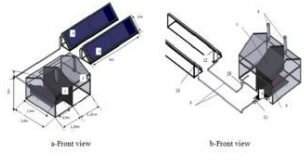
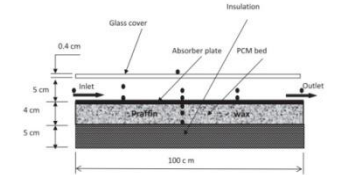
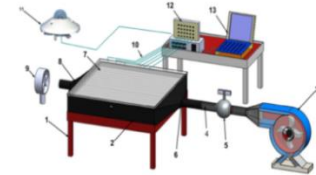
Ahmed Khouya(2020), güneş enerjili hava kolektörü kullanarak deneysel bir çalışma yapmıştır. Güneş enerjili hava kolektörleri, termal gizli depolama birimi, hidrolik devre, eşanjör, fanlar ve kurutma odası kullanılarak enerji verimliliğinin iyileştirilmesi ve modellenmesi için deneysel çalışmalar yapmış ve kapalı bir besleme hava ısıtıcısı, 0,75'lik bir etkinliğe sahip, güneş kurutucusunda, kolektör ve kurutma verimliliği değerleri, sırasıyla 0,48 ile 0,56 ila 0,43 ila 0,88 arasında arttığını belirlemişlerdir.

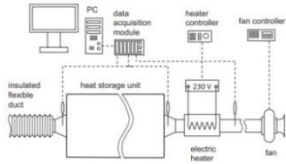
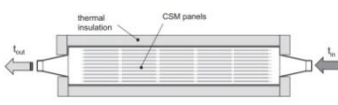
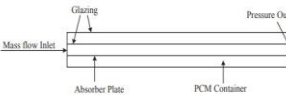
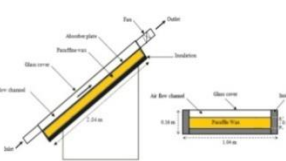
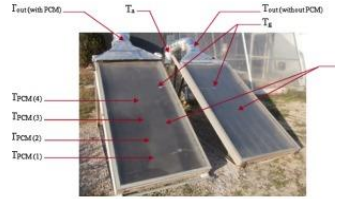
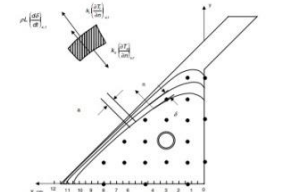
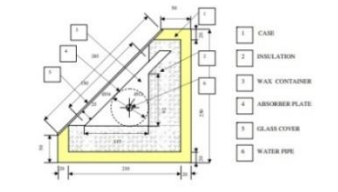
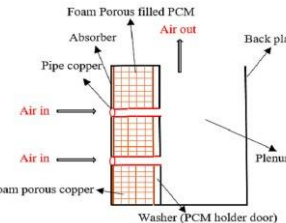
Hava ısıtmalı güneş kolektörleri ve bu kolektörler içerisine yer alan FDM uygulama çalışmalarının yer aldığı literatürdeki çalışmaların bazıları tablo 1.1 ve tablo 1.2 de özetlenmiştir. Bu tez çalışmasında aynı ölçülerde iki adet hava ısıtmalı güneş kolektörü imal edilmiştir. Bu kolektörlerden birinin ısıtma yüzey altı T geometrik yapıya sahip kanatçıklı engellerden, diğeri ise içerisinde FDM malzemesi kapsüllenmiş T geometrilili engeller yerleştirilmiştir. Havanın 4175, 8350, 12525 ve 16700 Reynolds sayısı değerlerinde 3 gün boyunca deneyler gerçekleştirilmiştir. Her 15 dakikada belirlenen ölçüm noktalarından sıcaklık ve ışıyım değerleri kayıt altına alınmıştır.

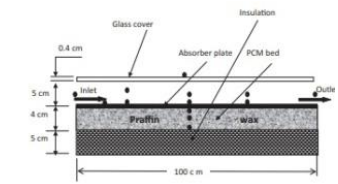
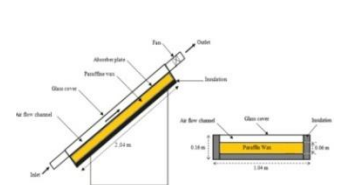
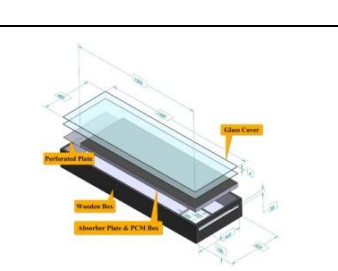
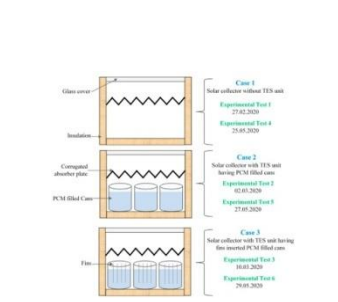
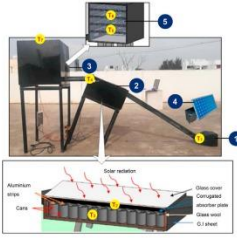
Tablo 1.1. Havalı güneş kolektör kasasına entegre faz değıştiren malzeme uygulamaları

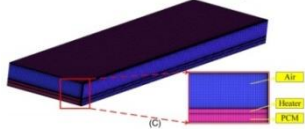
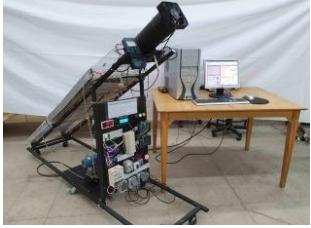
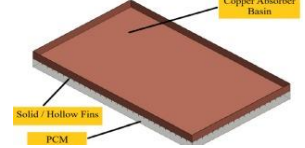
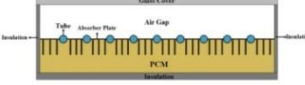
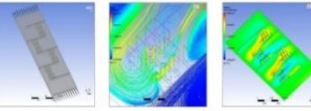
Yazar	DeneySEL (D) Sayısal (S)	Akışkan	FDM	Geometrik Parametriler	Çalışma Parametrileri	Çalışma Geometrileri	
				Kollektör			
Abuşka vd. (2019)	D	Hava	Rubitherm RT54HC	Düz plaka Düz plaka+FDM Bal peteği+FDM L = 2 m W = 1 m H = 0.2 m	Reh=962-1925-2888-3851-4814-5776		
Gholamiboz anjani vd. (2020)	D	Hava	Paraffin	L = 2,7 m W = 2,7 m H = 2,7 m	Belirtilmedi		
Shabtay vd. (2014)	D	Su	Parafin Wax	Su tüpleri 12 mm çapında.	FDM ünitesi, 40 ° C ila 52 ° C aralıkta sudan 5 kat daha fazla enerji depolayabilir. Simüle edildiği birim akış hızı 10 litre/dakikadır. Termal iletkenlik 0,2W/m-K.		

Ghiamivd. (2018)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 1,1 \text{ m}$ $W = 0,6 \text{ m}$ FDM Kalınlığı $t = 0,03 \text{ m}$	Ekserji verimliliği = 4,86 - 20,47%		
Summers vd. (2012)	D	Hava	Parafin Wax	Düz plaka $\alpha = 26,4^\circ$	$T_g = 30^\circ\text{C}$ $Re = 4000-6000-$ 8000-10000-12000- 14000-16000		
Sudhakar vd. (2019)	D	Hava	Parafin Wax	Düz yüzey Düz yüzey+FDM Eğimli düz yüzey+FDM $L = 0,75 \text{ m}$ $W = 0,75 \text{ m}$ $D_{FDM,k} = 0,6 \text{ m} \cdot 4 \cdot 4$	mh=0,009 kg/s		
Shalaby vd. (2014)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 0,6 \text{ m}$ $W = 1,2 \text{ m}$ $H = 1,7 \text{ m}$	Belirtilmedi		

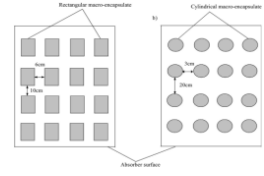
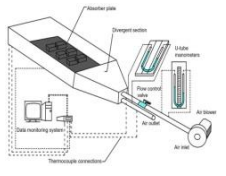
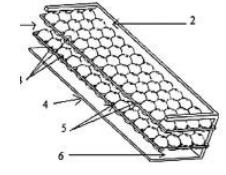
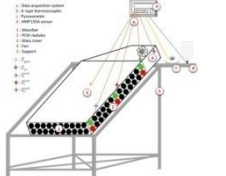
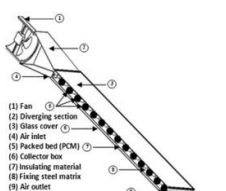
Kabeel (2016)	D	Hava	Parafin Wax	Düz plaka+FDM V-yüzey $L = 1 \text{ m}$ $W = 1 \text{ m}$ $H = 0,001 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,009-0,028-0,062 \text{ kg/s}$		
Zouvd. (2017)	D	Hava	Parafin	$H = 0,996 \text{ m}$ $\varnothing = 1 \text{ m}$	Belirtilmedi		
Azaiziavd. (2020)	D	Hava	Paraffin Wax	$L = 1,8 \text{ m}$ $W = 2,5 \text{ m}$ $H = 2 \text{ m}$	Belirtilmedi		
Mahmoud vd. (2020)	D	Hava	Parafin Wax	Düz yüzey Düz yüzey+FDM $L = 1 \text{ m}$ $W = 0,9 \text{ m}$	Belirtilmedi		
Kabeel vd. (2017)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 1 \text{ m}$ $W = 1 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,062, 028, 0,009 \text{ kg/s}$		

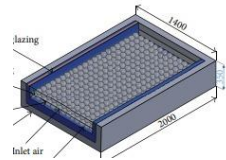
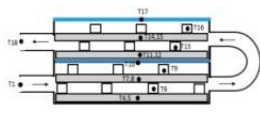
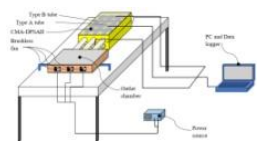
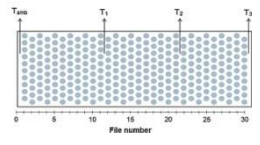
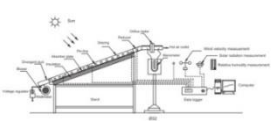
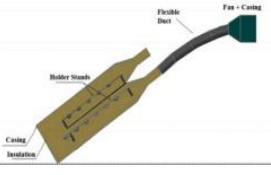
Charvát vd. (2014)	D	Hava	Parafin	$L = 0,45 \text{ m}$ $W = 0,3 \text{ m}$ $H = 0,01 \text{ m}$	Belirtilmedi		
Moradi vd. (2017)	D	Hava	Parafin	$L = 1,1 \text{ m}$ $W = 0,6 \text{ m}$ $H = 0,22 \text{ m}$	$\dot{m} = 25, 46, 65, 85, 125 \text{ kg/s}$		
El Khadraoui vd. (2016)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 2,04 \text{ m}$ $W = 1,04 \text{ m}$ $H = 0,1 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,018, 0,055 \text{ kg/s}$		
Mettawee vd. (2007)	D	Hava	Parafin Wax	Belirtilmedi	$\dot{m} = 9 - 20,4 \text{ kg/s}$		
Jahromi vd. (2023)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 0,6 \text{ m}$ $W = 0,6 \text{ m}$ $H = 0,8 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,125, 0,125, 0,015, 0,015 \text{ kg/s}$		

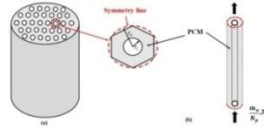
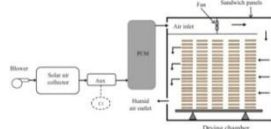
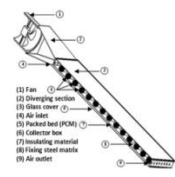
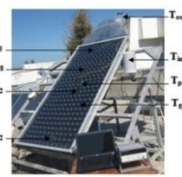
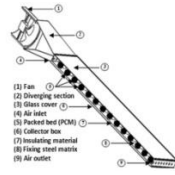
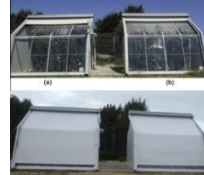
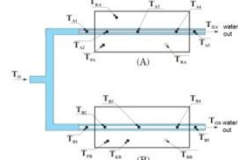
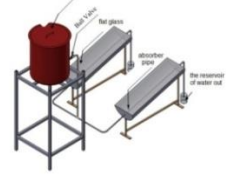
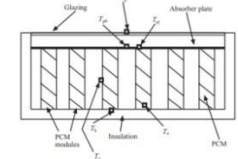
Kabeel vd. (2016)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 0,1 \text{ m}$ $W = 0,1 \text{ m}$ $H = 0,4 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,062, 0,028,$ $0,009 \text{ kg/s}$		
El Khadraoui vd. (2017)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 2,04 \text{ m}$ $W = 1,04 \text{ m}$ $H = 0,1 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,0041 \text{ kg/s}$		
Farzan vd. (2023)	D	Hava	Parafin	$L = 1,5 \text{ m}$ $W = 0,5 \text{ m}$ $H = 0,2 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s}$		
Madhankumar vd. (2021)	D	Hava	Parafin Wax	Kollektör Kollektör + Kap. FDM Kollektör + Kap. FDM +Kanatçık	$E_x = 2,97, 3,89 \text{ ve}$ $1,74 \text{ J/s}$		
				$L = 0,4 \text{ m}$ $W = 0,2 \text{ m}$ $H = 0,2 \text{ m}$			

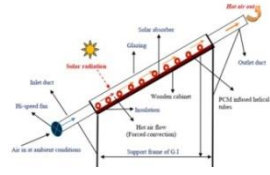
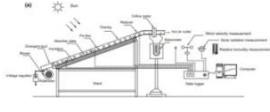
Sadri vd. (2021)	D	Hava	Parafin	$L = 1,6 \text{ m}$ $W = 0,4 \text{ m}$ $H = 0,04 \text{ m}$	$\dot{m} = 0,02, 0,04 \text{ kg/s}$		
Suraparaju vd. (2021)	D	Hava	Parafin	$L = 0,1 \text{ m}$ $W = 0,06 \text{ m}$ $H = 0,005 \text{ m}$	Belirtilmedi		
Baghbani vd. (2022)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 0,8 \text{ m}$ $W = \text{N/A}$ $H = \text{N/A}$	Belirtilmedi		

Tablo 1.2. Havalı güneş kolektörlerinde kapsüllenmiş faz değıştiren malzeme uygulamaları

Yazar	Deneysel (D) Sayısal (S)	Akışkan	FDM	Geometrik Parametreler		Çalışma Parametreleri	Çalışma Geometrileri	
				Kollektör	Kapsül			
Raj vd. (2019)	D	Hava	Parafin	L = 1,5 m W = 0,67 m V = 0,25 m ³	Derinlik = 0,25 m Kalınlık = 0,004 m	$\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$		
Arfaoui vd. (2017)	D	Hava	Tuz Hidrat (CaCl ₂ .6 H ₂ O)	L = 1 m W = 1 m V = 0,28 m ³	Küresel Nodül Kalınlık = 0,002 m	$\lambda = 0,028 \text{ W/m}^\circ\text{C}$		
Baddadi vd. (2019)	D	Hava	Tuz Hidrat (CaCl ₂ .6 H ₂ O)	L = 0,72 m W = 0,35 m	Küresel Nodül	$\lambda = 0,028 \text{ W/mK}$		
Bouadila vd. (2014)	D	Hava	Parafin	L = 2 m W = 1 m V = 0,28 m ³	Küresel Nodül Dış çap = 0,077 m	$\lambda = 0,028 \text{ W/mK}$		

Al Ghuol vd. (2016)	D	Hava	Parafin	L = 2 m W = 1,4 m	Derinlik = 0,0015 m Kollektör Kalınlığı = 0,075 m	$\lambda = 0,2 \text{ W/m K}$		-
Sharol vd. (2020)	S	Hava	Parafin	L = 0,525 m W = 0,4 m H = 0,18 m	L = 0,326 - 0,427 m W = 0,0191 m H = 0,0191 m	$\dot{m} = 0,004 \text{ kg/s}$		
Reyes vd. (2015)	D	Hava	Parafin Wax	L = 2,9 m W = 1,16 m H = 0,12 m	Silindir İçecek Kutuları	$\lambda = 0,3 \pm 0,01$ W=m K		
Kumar vd. (2017)	D	Hava	Parafin Wax	L = 2 m W = 1 m	Üçgen ve Dairesel Tüpler	$\dot{m} = 0,01, 0,02,$ $0,03, 0,04$ ve $0,05 \text{ kg/s}$		
Sajawal vd. (2019)	D	Hava	Parafin Wax	Belirtilmedi	Dairesel Tüpler	$\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s}$		

Lamrani vd. (2020)	D	Hava	Belirtilmedi	$L = 2,5 \text{ m}$ $W = 5 \text{ m}$ $H = 3 \text{ m}$	Belirtilmedi	Belirtilmedi		
Bouadila vd. (2013)	D	Hava	Parafin	$L = 2 \text{ m}$ $W = 1 \text{ m}$ $\text{Vol} = 0,28 \text{ m}^3$	Küresel Nodül Dış çap: 0,077 m	$\lambda = 0,028 \text{ W/m K}$		
Kooli vd. (2015)	D	Hava	Parafin	$L = 2 \text{ m}$ $W = 1 \text{ m}$ $V = 0,28 \text{ m}^3$	Küresel Nodül Dış çap: 0,77 m	$\lambda = 0,028 \text{ W/m K}$		
Harun vd. (2019)	D	Hava	Parafin	$\varnothing = 0,555 \text{ m}$ ve $L = 0,1 \text{ m}$ uzunluğunda bir tambur kullanılmıştır.	İki bakır silindir tüp $\varnothing 0,0254 \text{ m}$ ve $\varnothing 0,0191 \text{ m}$ $L = 1,9 \text{ m}$	Belirtilmedi		
Enibe (2003)	D	Hava	Parafin	Belirtilmedi	Belirtilmedi	$Re = 260\rho VL/\mu$		

Saxena vd. (2020)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 1,51 \text{ m}$ $W = 0,54 \text{ m}$	Belirtilmedi	Belirtilmedi		
Kumar vd. (2016)	D	Hava	Parafin Wax	$L = 2 \text{ m}$ $W = 1 \text{ m}$	Belirtilmedi	$\dot{m} = 0,01, 0,02,$ $0,03, 0,04 \text{ ve}$ $0,05 \text{ kg/s}$		

1.6. Kuramsal Temeller

1.6.1. Havalı güneş kolektörleri I. Kanun (enerji) analizi

Havalı güneş ısıtıcı enerji verimi üzerinde; güneş ışınlam şiddeti, güneşin geliş açısı (bölgesel enlem-boylam değerlerine bağlı), toplayıcı özellikleri ve akışkan kütle akısının etkisi vardır. Havalı güneş ısıtıcı sistemlerin enerji analizi için Termodinamiğin I kanunu kullanılır. FDM'li hava kolektörü için genel enerji ve ekserji dengesi için;

- Sistem kararlı rejimde olduğu,
- Eşdeğer bir gökyüzü sıcaklığında uzun dalga boylu radyasyon için gökyüzünün siyah bir cisim olduğu,
- Havanın tüm termo-fiziksel özelliklerinin sabit olduğu,
- Toplayıcının enerji yutmadığı
- Kimyasal ve nükleer reaksiyonların ihmal edildiği
- Kinetik enerji ve potansiyel enerjinin ihmal edildiği

kabulleri yapılmıştır (Duffie ve Beckman, 1991).

Tasarlanan sistemin hem şarj hem de deşarj süreci için ısı enerji dengesi(Khadraoui ve ark 2017):

$$Q_Y = Q_F + Q_D + Q_K \quad (1.1)$$

burada QY, QF, QD ve QK sırasıyla yutulan, faydalı, depolanan ve kaybolan ısı enerjisidir. Toplayıcıdan elde edilen faydalı ısı kazancı:

$$Q_F = \dot{m}C_p(T_C - T_G) \quad (1.2)$$

Toplayıcı yüzeyinden soğurulan ışınlam;

$$Q_Y = A_y(\alpha\tau) \quad (1.3)$$

burada ($\alpha\tau$) etkin ürün geçirenlik yutma değeridir. Şarj ve deşarj aşamaları sırasında depolanan ısı akısı:

$$Q_{sj} = m_{FDM} \left[\int_{t=0, sj, FDM}^{t=erime} C_{p_{katı}}(T) dT + L_F + \int_{t=erime}^{t=gün} C_{p_{sıvı}}(T) dT \right] \quad (1.4)$$

$$Q_{dsj} = m_{FDM} \left[\int_{t=\text{gün batımı}}^{t=\text{katılaşma başlangıcı}} C_{p_{sıvı}}(T) dT + L_F + \int_{t=\text{katılaşma başlangıcı}}^{t=\text{denge}} C_{p_{sıvı}}(T) dT \right] \quad (1.5)$$

Kayıp ısı miktarında, U_k toplayıcının toplam ısı kayıp katsayısıdır. Isıl enerji, iletim, taşınım ve ışınım yoluyla kollektörden çevreye kaybolmaktadır.

$$Q_k = U_k A_y (T_{m,y} - T_{çv}) \quad (1.6)$$

burada U_k , toplayıcıların üstten ($U_{KOL-Ç}$), alttan (U_{TB}) ve kenarlardan ($U_{KŞ}$) ısı kaybı katsayılarının toplamına eşittir (Duffie ve Beckman, 1991)

$$U_K = U_{KOL-Ç} + U_{TB} + U_{KŞ} \quad (1.7)$$

Havalı güneş kollektörü ile ortam arasındaki en yüksek kayıp katsayısı:

$$\frac{1}{U_{KOL-Ç}} = \left(\frac{1}{h_H + h_{C-Y}} + \frac{1}{h_{RZ} + h_{C-ÇV}} \right) \quad (1.8)$$

Kollektör akış kanalında havanın faydalı ısı taşınım katsayısı (h_F)

$$h_F = \frac{Q_F}{A_y \Delta T_{LOSF}} = Nu \frac{k_H}{e} \quad (1.9)$$

Toplayıcılar ve camlar arasındaki ışınım yoluyla ısı transfer katsayısı:

$$h_{C-Y} = \frac{\sigma(T_Y^2 + T_C^2)(T_Y + T_C)}{\left[\frac{1}{\varepsilon_Y} + \frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right]} \quad (1.10)$$

Kollektör üst kısmındaki rüzgar hızına bağlı ısı transfer katsayısını hesaplamak için Hottel ve Woertz (Duffie ve Beckman, 1991) bağıntısı kullanılır.

$$h_{RZ} = 5,67 + 3,86 V_{RZ} \quad (1.11)$$

$$h_{C-ÇV} = \varepsilon_C \sigma (T_C^2 - T_G^2) (T_C + T_G) \quad (1.12)$$

Gökyüzü sıcaklığı için genel kabul gören bağıntı Swinbak tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir (Duffie ve Beckman, 1991).

$$T_G = 0,0552 T_{ç}^{1,5} \quad (1.13)$$

Kollektör alt (U_{TB}) ve kenarları ($U_{KŞ}$) için geçerli enerji kaybı denklemleri:

$$U_{TB} = \frac{k_{IZO}}{\delta_{IZO}} \quad (1.14)$$

$$U_{K\delta} = \frac{(L_1 + L_2)L_3k_{IZO}}{(L_1L_2\delta_{IZO})} \quad (1.15)$$

1.6.2. Havalı güneş kollektörleri II. Kanun (ekserji) analizi

Enerji sistemlerini, ekserji analizine dayalı tasarlanması mühendislik uygulamalarında uygun ve etkin bir yaklaşım olarak bilinmektedir. Ekserji analizinde, Termodinamiğin I ve II yasaları birlikte dikkate alınarak sistem tasarımı ya da sistem bileşenlerinin analizi gerçekleştirilir. Ekserji kavramı, enerjinin optimum kullanımı için çok faydalıdır ve bu, termal sistemlerin operasyonlarında verimli kullanım için tasarlanmasında kullanılabilir. Ekserji, bir referans ortamla dengeye gelen bir sistem, madde veya enerji akışı tarafından üretilebilen maksimum iş miktarı olarak tanımlanmaktadır (Kotas, 1995). Kütle dengesi denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

Genel olarak, enerji ve ekserji dengesi denklemleri;

$$\sum_G E = \sum_{\dot{C}} E \quad (1.16)$$

$$\sum_G Ex = \sum_{\dot{C}} Ex \quad (1.17)$$

$$\sum_G Ex - \sum_{\dot{C}} Ex = \sum_K Ex \quad (1.18)$$

FDM'li güneş kollektörü için geçerli olan ekserji dengesi denklemi (Farahat vd., 2009; Khadraoui ve ark 2017):

$$Ex_G = Ex_{\dot{C}} + Ex_K + Ex_{YK} + Ex_{DP} \quad (1.19)$$

Ex_G , giren, $Ex_{\dot{C}}$, çıkan, Ex_K , kaçak, Ex_{YK} , yok olan ve Ex_{DP} depolanan ekserji oranlarını ifade etmektedir. Toplam giriş ekserji oranı (Ex_G) şunları; hava akışı ile giriş ekserji oranını ($Ex_{G,H}$) ve güneşi bir sonsuz ısı kaynak kabulü yapılarak yutulan güneş ışıma ekserji oranını ($Ex_{G,Y}$) içermektedir (Altfeld ve diğerleri, 1988; Bejan, 1988)

$$Ex_{G,H} = \dot{m}Cp \left[T_G - T_{\dot{C}V} - T_{\dot{C}V} \ln \left(\frac{T_G}{T_{\dot{C}V}} \right) \right] + \dot{m}RT_{\dot{C}V} \ln \left(\frac{P_G}{P_{\dot{C}V}} \right) \quad (1.20)$$

$$Ex_{G,Y} = \eta_0 I A_Y T_{\dot{C}V} \left(\frac{1}{T_{\dot{C}V}} - \frac{1}{T^*} \right) \quad (1.21)$$

burada T^* ; ekserji kaynağı olarak görünen güneş sıcaklığıdır. Bu analizde Petela (1964) tarafından önerilen değer benimsenmiştir. Bu öneride T^* , güneş sıcaklığının yaklaşık olarak 3/4'e eşittir. Güneş sıcaklığı yaklaşık 6000 K, siyah cisim sıcaklığıdır. Buna bağlı olarak, $T^*=4500$ K olarak dikkate alınmıştır (Khadraoui ve ark 2017).

Çıkış ekserji oranı (Ex_C) ise yalnızca çıkış hava akış oranını ($Ex_{C,H}$) içerdiği farzedilmektedir (Kotaş, 1995, Khadraoui ve ark 2017):

$$Ex_{C,H} = \dot{m}C_p \left[T_C - T_{CV} - T_{CV} \ln \left(\frac{T_C}{T_{CV}} \right) \right] + \dot{m}RT_{CV} \ln \left(\frac{P_C}{P_{CV}} \right) \quad (1.22)$$

Kaçak ekserji oranı, toplayıcıdan çevreye olan ısı kaçak oranından (Ex_K) kaynaklanır (Altfeld ve diğerleri, 1988):

$$Ex_K = U_K A_Y T_{CV} (T_Y - T_{CV}) \left(1 - \frac{T_{CV}}{T_Y} \right) \quad (1.23)$$

Yok edilen ekserji oranı (Ex_{YK}); toplayıcı yüzey ve güneş sıcaklığına bağlı ($Ex_{YK,Y-GUNES}$) (Dutta Gupta ve Saha, 1990), kolektördeki basınç kayıplarına bağlı ($Ex_{YK,DP}$) ve toplayıcı yüzey ile çalışma akışkanı arasındaki sıcaklık farkına bağlı ($Ex_{YK,H}$) ekserji oranlarının toplamına eşittir.

$$Ex_{YK} = Ex_{YK,Y-GUNES} + Ex_{YK,DP} + Ex_{YK,H} \quad (1.24)$$

$$Ex_{YK,Y-GUNES} = -\eta_0 I A_Y T_{CV} \left(\frac{1}{T_Y} - \frac{1}{T^*} \right) \quad (1.25)$$

$$Ex_{YK,DP} = - \left(\frac{\Delta P T_{CV}}{\rho} \right) \left[T_{CV} \ln \left(\frac{\left(\frac{T_C}{T_G} \right)}{T_C - T_G} \right) \right] \quad (1.26)$$

$$Ex_{YK,H} = \dot{m}C_p T_{CV} \left[\ln \left(\frac{T_G}{T_{CV}} \right) - \left(\frac{T_C - T_G}{T_Y} \right) \right] \quad (1.27)$$

Depolanan ekserji oranı (Ex_{DSJ}), şarj durumu için FDM içerisindeki hem duyulur hem de gizli ısı değişiminden kaynaklanır (MacPee ve Dincer, 2009), bu eşitlik;

$$Ex_{DSJ} = \frac{1}{\Delta t_{DSJ}} \left[m_{FDM} C_{p_{sıvı}} \left(T_{ER} - T_{M,FDM} - T_{CV} \ln \left(\frac{T_{ER}}{T_{M,FDM}} \right) \right) + m_{FDM} C_{p_{katı}} \left(1 - \frac{T_{CV}}{T_{ER}} \right) + m_{FDM} C_{p_{katı}} \left(T_{M,FDM} - T_{ER} - T_{CV} \ln \left(\frac{T_{M,FDM}}{T_{ER}} \right) \right) \right] \quad (1.28)$$

Havalı güneş ısıtıcısının günlük ortalama ekserji verimi, enerji verimine benzer olarak, ısı deşarj sürecinde istenen ekserji çıkışının, şarj işlemleri sürecinde gerekli olan toplam ekserji girdisine oranı olarak tanımlanır (Khadraoui ve ark 2017).

$$\psi = \frac{\int_{DSJ} Ex_{DSJ}}{\int_{SJ} Ex_{G,Y}} \quad (1.29)$$

1.6.3. Hidrodinamik ve ısı transferi teorik analizi

Havalı güneş kollektörler için literatürde deneysel ve teorik analize dayalı birçok bağıntı sunulmuştur. Bu bağıntılar genel olarak Reynoldss sayısı, Prandtl sayısı ve geometrik parametrelere bağlı olarak geliştirilmiştir. Geçiş bölgesi (genel olarak $2300 < Re < 6000$ ve türbülanslı ($Re > 6000$) akış rejimi için Reynolds sayısının farklı aralıkları için farklı bağıntılar sunulmuştur. Bunlar içerisinde en yaygın olarak kabul görmüş bağıntılardan birisi;

$$Nu = 0.116(Re^{2/3} - 125)Pr^{1/3} \left[1 + \left(Dh/L \right)^{2/3} \right] \left(\mu/\mu_w \right)^{0.14} \quad (1.30)$$

$$2300 < Re < 6000$$

olarak verilmektedir (Hausen, 1943). Türbülanslı akış rejimi için ise Sieder ve Tate (1936) tarafından önerilen;

$$Nu = \frac{hDh}{k} = 0,027Re^{0.8}Pr^{1/3} \left(\mu/\mu_w \right)^{0.14} \quad (1.31)$$

$$Re > 6000$$

Bağıntısı kullanılmaktadır (Ong, 1995). Burada Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine, Prandtl sayısı ise ısı difüzyonunun moleküler difüzyona oranıdır;

$$Re = \frac{\rho V D h}{\mu} \quad (1.32)$$

$$Pr = \frac{\alpha}{\vartheta} \quad (1.33)$$

olarak verilmektedir. Dikdörtgen boş kanllarda akış için sürütünme kayıp katsayısı için;

$$f = (1,82 \log Re - 1,64)^{-2} \quad (1.34)$$

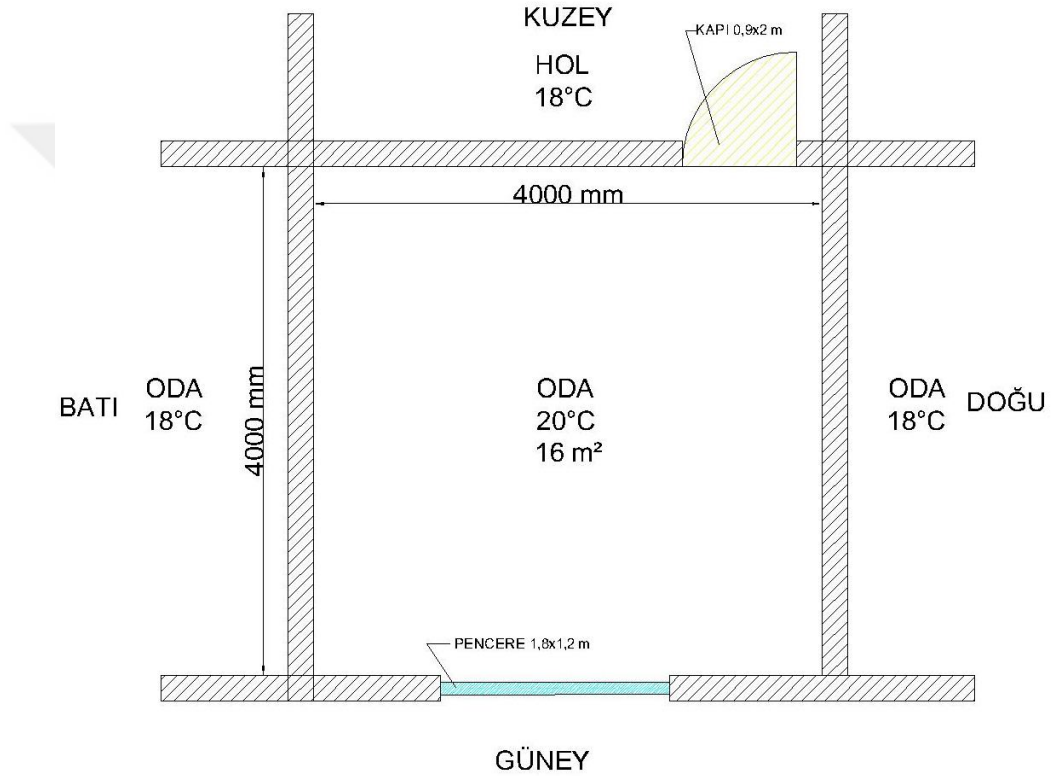
bağıntısı önerilmektedir (Ong, 1995).

Benzer ısı sistemlerde ısı transfer artışı ile pompa gücündeki artışın oranını veren ısı performans katsayısı (IPK) tasarım parametresi olarak göz önüne alınır. Denklem 1.35 kullanılarak IPK hesaplanmıştır. Burada; m ve o sırasıyla ortalama ve boş kollektörü ifade ederken Nu ve f sırasıyla Nusselt sayısı ve sürtünme basınç kaybını ifade etmektedir.

$$IPK = \frac{Nu_m / Nu_o}{f_m / f_o} \quad (1.35)$$

1.6.4. Isıtma mahali ve ısı yükü hesabı

Tasarlanan kollektörler ile bir evin Güney-Batı cephesinde 4x4x3 m ebatlarında bir odanın ısıtılması durumunda oda ısı yükünün karşılanma oranı incelenmiştir.



Şekil 1.6. Isı yükünün karşılama oranı için kullanılan mahalin ölçüleri

Göz önüne alınan ısıtma mahali Şekil 1.6'da detaylandırılmıştır. Ev müstakil olarak farzedilmiştir. Oda'nın güney cephesinde 1.8x1.2 m ebatlarında çift cam, Kuzey cephesinde ise koridora açılan 0,9x2 m ebatlarında kapı uygulanmıştır. Isıtma odasının Doğu cephesi mutfak, batı cephesi ise koridor olarak farzedilmiştir. Oda'nın taban ve çatı sıcaklığı çevre sıcaklığına bağlı olarak değişken olduğu kabul edilmiştir. Oda'nın batı cephesi penceresiz duvar olarak varsayılmıştır.

Odanın ısı yükü hesabı için basit bir excel tabanlı program yapılmıştır (Şekil 1.6). Deneysel çalışmalarda ölçülen sıcaklık değerleri göz önüne alınarak, odanın her 15 dakika aralıklarla ısı yükü belirlenmiş, kollektörden elde edilen ısı miktarı ile karşılaştırılmıştır. Isı yükü hesaplamasında Çorum ili için (3. Bölge) belirlenen şartlar kullanılmıştır.

ISI KAYBI HESABI														Sayfa		1
														Kat		BK
ESİSİN Adı:														Tarih		
İşletme Bileşeni		Alan Hesabı				Isı Kaybı Hesabı					Zamlar					
İşaret	Yön	Kalınlık	Uzunluk	Yükseklik veya Genişlik	Toplam Alan	Miktar	Çıkarılan Alan	Hesaba Giren Alan	Isı İletim Katsayısı	Sıcaklık Farkı	Zamsız Isı Kaybı	İşletme	Kat Yükseklik	Yön	Toplam	Toplam Isı İhtiyacı
		cm	*m	*m	m ²	Ad	m ²	m ²	Kcal m ² h°C	°C	Kcal h	%	%	%	1+%	Kcal h
B01	Qd-G	>	4,0	3,0	12,0	1	2,2	9,8	0,6	30,0	4320,0	7,0		5,0	1,1	198,4
Zemin 1 Kat, 16m2 oda	Qp-G	>	1,8	1,2	2,2	1		2,2	2,8	30,0		7,0		5,0	1,1	203,2
	QD-B	>	4,0	3,0	12,0	1		12,0	0,4	30,0		7,0		5,0	1,1	161,3
	QD-K	>	4,0	3,0	12,0	1		12,0	1,6	2,0		7,0		0,0	1,1	41,1
	QD-D	>	4,0	3,0	12,0	1		12,0	1,6	2,0		7,0		0,0	1,1	41,1
	Q-KAPI		0,9	2,0	1,8	1		1,8	2,0	2,0		7,0		5,0	1,1	8,1
	Q-TA		4,0	4,0	16,0	1		16,0	0,4	21,6		7,0		0,0	1,1	147,7
	Q-DÖ		4,0	4,0	16,0	1		16,0	0,6	12,0		7,0		0,0	1,1	113,0
	Qe	>								30,0		7,0		5,0	1,1	760,4
	Ti=	20	Td	-10,0	T m	15,0					Isı Kaybı İhtiyacı(kcal/h)					1674,3
											Artırım kats					1,6989
	Isı Yoğunluğu(kcal/h.m2)					237					Toplam Isı İhtiyacı(kcal/h)					2844,4
						1										3307,99
																watt
3.BÖLGE		S	C	Kdd												
		2940	7	0,6												
					T çatı	-2	.nci Ka	1								
	T ısımah	8	Ttp-dö	7	Tkmsu	18	H2	0,05								

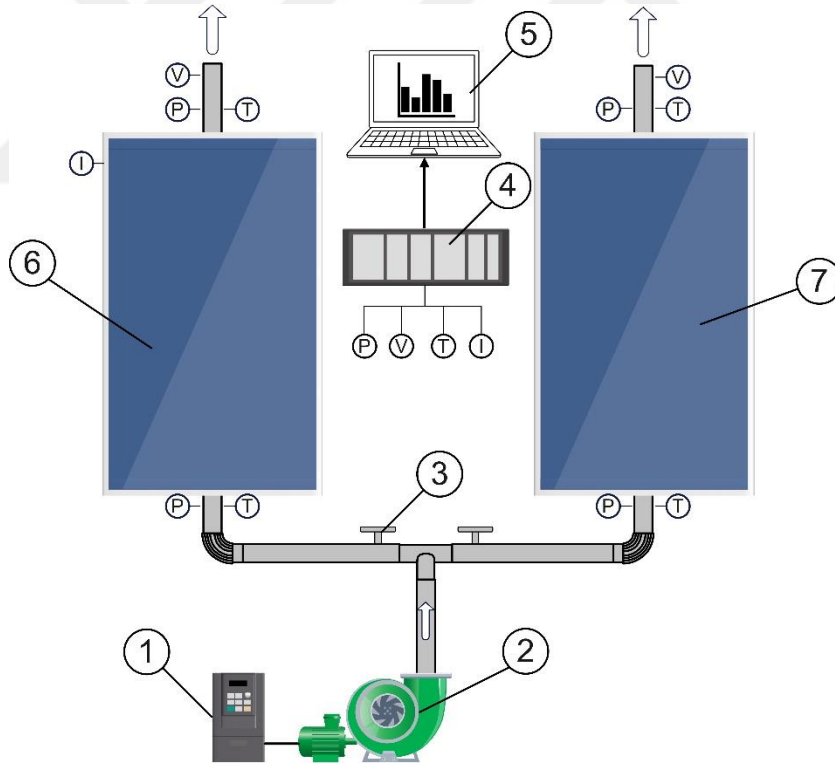
Şekil 1.7. Isıtma yükü hesabı excel programı

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

2.1. Deney Sisteminin Tasarlanması ve İmalatı

Deney sisteminin şematik görünümü Şekil 2.1 da gösterilmiştir. Deney sistemi kollektör ve veri kayıt bölümü olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Ortam havası kontrol ünitesi (7) ile kontrol edilen bir radyal fan (2) yardımıyla deney sistemine belirlenen debiler de gönderilmesi sağlanmıştır. Kollektör çıkışlarına uygun bağlantı elemanı yerleştirilerek anemometre (V) ile havanın debisi belirlenmiştir. Aynı geometrik ölçülere sahip iki kollektöre (6-7) de havanın eşit debilerde girebilmesi için fan çıkışındaki hava hattına ayarlanabilir bir hava dağıtıcı (3) konumlandırılmıştır. Kollektörlerin girişlerine, çıkışlarına, yüzeylerine ve kollektör içerisindeki kapsüllerin yüzeylerine ısı çiftleri (T) konumlandırılmıştır. Kollektör giriş ve çıkışına yerleştirilen basınç ölçerler (P) ile deneyler boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri ve basınç farkı bir veri toplayıcı (4) kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Ayrıca deneyler esnasında ısıtım ölçüm aleti kullanılarak güneş ısıtım değerleri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.1. Deney sisteminin şematik görünümü



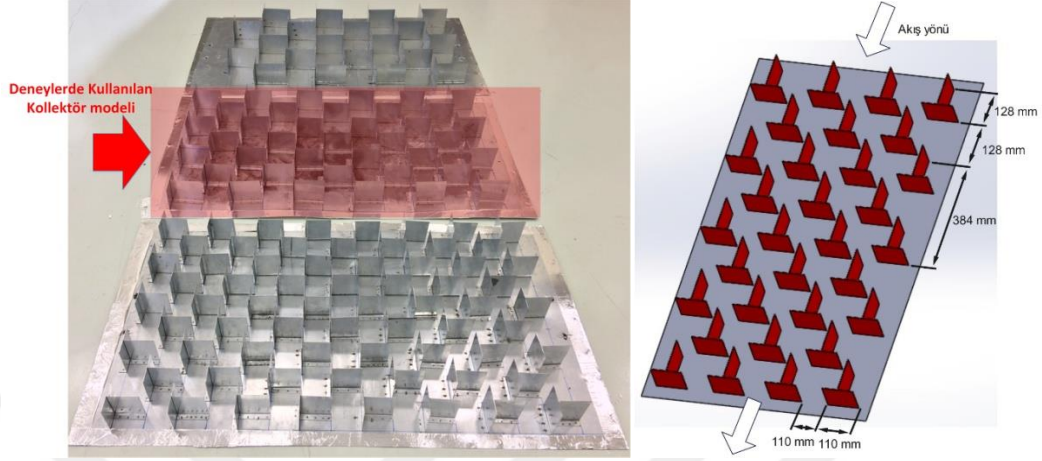
Resim 2.1. Deney sisteminin görünümü

Deney sisteminin geometrik ölçüleri Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Deney sistemi için 860 mm genişliğe ve 1450 mm uzunluğa sahip kolektörler tasarlanmış ve sac levhadan imal edilmiştir. Bu kolektörlerin uygun açıda konumlandırılabilmesi amacıyla 20x20 mm kesit ölçülerinde ve 3 mm kalınlığa sahip demir profil Şekil 2.2 de gösterildiği gibi ön tarafı 1297 mm ve arka tarafı 2095 mm yüksekliğinde kaynak birleştirme yöntemi ile imal edilmiştir. Deney sisteminde kolektör içerisinde iki farklı geometri bulunmaktadır. Her iki geometride 110 mm genişlik, 128 mm uzunluk ve 93 mm yüksekliğe sahip T formundadır. Bu geometrilerin bir tanesi ince sac malzemeden imal edilmiştir. Diğeri ise 40 mm genişliğinde imal edilerek içerisi faz değiştiren malzeme ile doldurulmuştur.

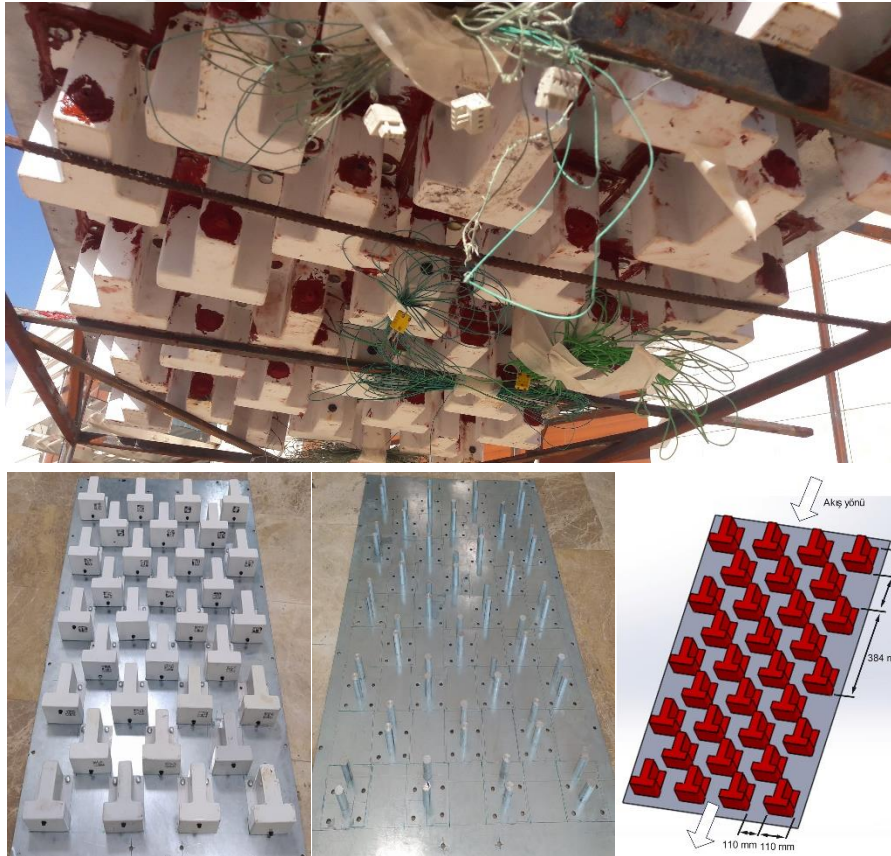


39

Deney parametreleri Tablo 2.1’de verilmiştir. Deneyler her iki kollektör için 4 farklı hava akış hızlarında ve 3 gün süreyle gerçekleştirilmiştir. Deneyler boyunca her 15 dakikada bir ölçüm değerleri veri toplayıcı ile kayıt altına alınmıştır.



Resim 2.2. FDM'siz T dirençler



Resim 2.3. FDM'li T dirençler



Resim 2.4. FDM'li T direnç sıcaklık ölçüm noktalar

Tablo 2.1. Deney parametreleri

Kollektör	FDM'li	FDM'siz
Zaman	3 gün	
Hava akış hızı (m/s)	3	
	6	
	9	
	12	

2.2. Test Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar

2.2.1. Radyal fan

Havayı koşullandırmak için Euroofan APE 801/B marka ve model numaralı Radyal fan kullanılmıştır. Radyal fan 4 ile 22 m³/dk arasında hava debisi sağlayabilmektedir. Ortalama olarak 1400 m³/h hava debisi üretebilir. Bu, orta ve büyük ölçekli endüstriyel uygulamalar için yeterli bir kapasiteye sahiptir. Fanın maksimum basıncı 800 Pa'dır. Bu, fanın yüksek basınç gerektiren uygulamalar için de uygun olduğu anlamına gelir. Fan, 0,75 kW gücünde bir motorla çalışır. Bu, fanın yüksek performanslı bir şekilde çalışmasını sağlar. Ses seviyesi 72 dB(A) civarındadır. Bu, fanın çalışması sırasında yüksek gürültü seviyelerine neden olmaz. Euroofan APE 801/B radyal fan, 350 mm x 390 mm x 300 mm boyutlarında ve 11 kg ağırlığındadır.



Resim 2.5. Radyal fan

2.2.2. Kontrol ünitesi

Frekans konvertörü olarak 19 kW gücünde Omron RX serisi fan hızının ayarlanabilmesi amacıyla deneylerde kullanılmıştır. Endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılan bir kontrol ünitesidir. RX serisi kontrol üniteleri, ağı bağlı makine ve ekipmanların kontrolü için tasarlanmıştır ve programlanabilir mantık kontrolörleri olarak da adlandırılır. Yüksek performanslı işlemciler ve geniş bir bellek kapasitesine sahiptir. RX serisi kontrol üniteleri, dijital ve analog giriş/çıkışlarla donatılmıştır. Bu sayede, farklı türde sensörler ve aktüatörlerle kolayca entegre edilebilirler.



Resim 2.6. Sürücü

2.2.3. Hava dağıtıcı

Fan yarımı ile kollektörlere gönderilen havanın eşit debilerde kollektörlere girebilmesi için kollektör girişinde bir daha dağıtıcı kullanılmıştır. T geometriye sahip bu dağıtıcının üzerinde bulunan klepe vanalar yardımı ile geçen hava miktarı ayarlanarak eşit hava akışı sağlanmıştır. Hava dağıtıcı sistemleri, farklı tiplerde olabilirler ve farklı alanlarda kullanılabilirler. Örneğin, kanallı hava dağıtıcı sistemleri, havayı kanallar aracılığıyla farklı odalara veya bölümlere dağıtmak için kullanılırlar. Bu sistemlerin avantajları arasında hava akışını ve sıcaklık kontrolünü kolaylaştırmaları, enerji verimliliğini artırmaları ve bakım işlerinin kolaylığı yer alır.



Resim 2.7. Hava dağıtıcı

2.2.4. Debi ölçer

Kanal içerisindeki havanın debisini ölçmek amacıyla Kimo marka LV 110 model numaralı anemometre kullanılmıştır. Kullanımı kolay bir arayüzle birlikte hava akışını ölçmek için kullanılan bir anemometre sensörü içerir. Cihaz ayrıca sıcaklık ve nem ölçümleri için termometre ve nem ölçer sensörleri içerir. Kimo LV 110 debi ölçer cihazının özellikleri arasında hava akış hızı ölçüm aralığı 0,25 - 35 m/s arasında değişen geniş bir ölçüm aralığı, 2 hatlı LCD ekran, maksimum ve minimum değer ölçümü, akış ölçümü için çeşitli hava akış başlıkları ve bir USB portu yer alır. Bu özellikler sayesinde, Kimo LV 110 debi ölçer cihazı, hava akış hızı, sıcaklık ve nem ölçümleri için güvenilir ve kullanımı kolay bir çözüm sunar..



Resim 2.8. Debi ölçer

2.2.5. Sıcaklık ve basınç ölçer

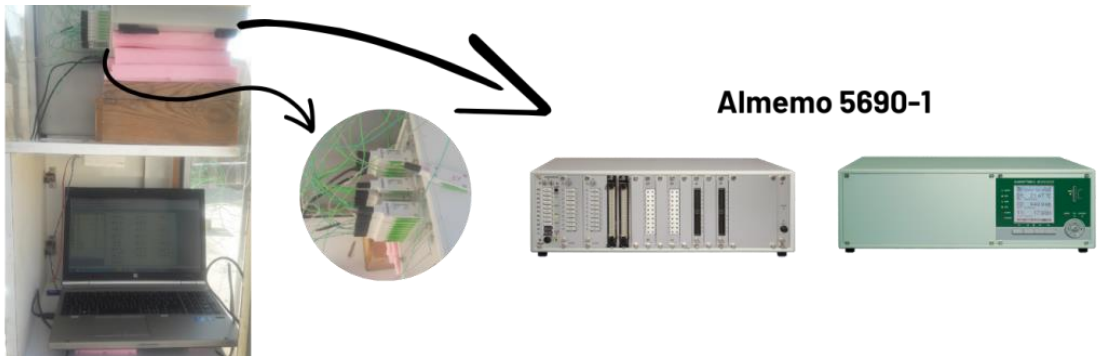
Test sisteminde 0,2 mm kalınlığında ve -250 °C ile +205 °C arasında ölçüm aralığı olan Ahlborn marka K-tipi ısı çiftleri ve basınç ölçer bağlantı elemanları kullanılmıştır. Resim 2.9 'de gösterilen uygun bağlantı (ZA 9020-FS) elemanı ile veri toplayıcıya bağlanan ısı çiftleri, sıcaklığa bağlı mikro volt cinsinden oluşan voltaj farkını sıcaklık cinsinden ölçebilmektedir. Kollektör giriş ve çıkışına yerleştirilen basınç ölçüm probaları vasıtasıyla kollektör giriş ve çıkış basıncı uygun bağlantı (FDA 612-SR) elemanı ile ölçülmüştür (Resim 2.9).



Resim 2.9. Sıcaklık ve basınç bağlantı elemanı

2.2.6. Veri toplayıcı ve kaydedici

Deneyler esnasında elde edilen veriler Almemo 5690-1 marka ve model veri toplayıcısı kullanılarak kayıt altına alınmıştır (Resim 2.10). Deney düzeneğinde yer alan ısı çiftleri, nemölçerler, basınçölçerler veri toplayıcıya uygun bağlantı elemanları ile bağlanmıştır. Veri toplayıcısı da bilgisayara bağlanarak veri kayıt altına alınmıştır. Almemo 5690-1, Almemo markası tarafından üretilen bir ölçüm cihazıdır. Bu cihaz, farklı fiziksel parametreleri ölçmek için kullanılabilir ve yüksek hassasiyetle veri toplayabilir. Almemo 5690-1'in özellikleri arasında birçok sensör tipi ile uyumlu olması, veri kaydı için dahili belleğe sahip olması, farklı ölçüm aralıklarını desteklemesi ve verileri RS232 ve USB aracılığıyla bilgisayara aktarabilmesi yer alır. Bu özellikleri sayesinde, Almemo 5690-1 çeşitli endüstriyel, araştırma ve ölçüm uygulamaları için kullanışlı bir cihazdır.



Resim 2.10. Veri toplayıcı ve kaydedici

2.2.7. Işınım cihazı

Deneyler sırasında ısınım değerleri Resim 2.11’de gösterilen Kimo marka SL 100 model ısınım ölçme cihazı kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Her 15 dakika bir ısınım değerleri cihaz üzerinden okunarak kayıt edilmiştir.



Resim 2.11. Işınım cihazı

2.2.8. Kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Deney sisteminde faz değiştiren malzeme olarak kalsiyum klorür heksahidrat kullanılmıştır. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ’nun termofiziksel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir (Khetib ve ark., 2021).

Tablo 2.2. Kalsiyum klorür heksahidrat’ın ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) termofiziksel özellikleri

Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	29	
Erime gizli ısısı (kJ/kg)	192	
Kinematik viskozite (m^2/s)	0,000003	
Termal genleşme katsayısı ($1/^{\circ}\text{C}$)	0,003	
	Katı	Sıvı
Termal iletkenlik (W/mK)	1,008	0,561
Yoğunluk (kg/m^3)	1802	1562
Özgül ısı (kJ/kgK)	1,4	2,1

2.2.9. Deneysel yöntem

Bu çalışmada Tablo 2.1’de belirtilen parametreler için deneyler gerçekleştirilmiştir. Aynı geometrik ölçülere sahip iki(2) adet kollektör aynı yükseklikte ve pozisyonda konumlandırılmıştır. Şekil 2.2’de geometrik ölçüleri verilen kollektörler içerisinde FDM ve FDM’siz geometriler yerleştirilmiştir. Kinematik parametre için havanın farklı Reynolds sayısında üç(3) gün boyunca deneyler gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak radyal fan sürücüsü kontrol edilerek havanın hızı ayarlanmıştır. Hava hızının deney parametrelerine uygunluğunun kontrolü ise kollektör çıkışına konumlandırılan anemometre ile ölçülmüştür. Hava akışı için $\text{Re}=4175, 8350, 12525, 16700$ değerlerinde kollektöre gönderilmiştir. Radyal fan sürücüsü kontrol edilerek anemometre değerinin istenilen deney

parametresinde olup olmadığı belirlenmiştir. Her iki kollektörde eşit hava Reynolds sayısının elde edilmesi amacıyla hava dağıtıcı kullanılmıştır (Resim 2.7). Hava dağıtıcı üzerinde yer alan ayar vanası ile hava akışı her bir kollektör için ayarlanmıştır. Böylelikle her iki kollektöre eşit miktarda havanın girmesi sağlanmıştır. Kollektörlerde konumlandırılan ısı çiftlerinden gelen sıcaklık verilerinin kaydı için bir veri toplayıcıya uygun konektörler ile bağlanmıştır. Veri toplayıcı her 15 dakikada bir veri kayıt yapacak şekilde ayarlanarak üç(3) gün boyunca veri kayıt yapması sağlanmıştır.

2.2.10. Belirsizlik ve hata analizi

Deneyisel çalışmada ölçülen değerlerin ve elde edilen bulguların belirsizliği kullanılan ölçüm ekipmanlarının doğruluğu ile belirlenmektedir. Belirsizlik; ölçüm cihazlarının hassasiyeti, kullanılan yöntemlerin doğruluğu, ölçümlerin tekrarlanabilirliği, ölçüm koşullarının kontrol edilebilirliği ve diğer faktörlerin etkisiyle ortaya çıkabilir. Genel olarak hatalar sabit, kişisel ve rastgele meydana gelen hatalar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır.

Bu çalışmada hava akış hızı ölçümleri anemometre, sıcaklık ölçümleri ısı çiftler ve basınç farkı ölçümleri ise fark basınç ölçüm cihazı kullanarak ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Belirsizlik analizi, denklem 2.1’de yer alan Kline S. J., (1953) yöntemine göre hesaplanmıştır.

$$U_R = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial V_i} U_{V_i} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

burada, R bağımlı değişken ve V_i bağımsız değişkendir. U_R ve U_{V_i} ise sırasıyla bağımlı ve bağımsız değişkenlerin belirsizlikleridir. Hata değerleri, ölçülen ve hesaplanan büyüklükler için, kullanılan ölçüm aletlerinin üretici firmaları tarafından hazırlanan katalog ve test değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Hata değerleri sıcaklık için $\pm 0,1$ basınç ölçümü için $\pm 0,02$ hava hızının 3 m/s ve büyük değerleri için ± 1 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2.3. Toplam hata miktarları

Ölçülen ve hesaplanan değerler	Toplam hata
Kanal kesit alanı, AK	% 1,5
Yüzey alan, AT	% 0,42
Hidrolik çap, DH	%1,55
Kütleli debi, m	%1,8
Reynolds sayısı, Re	%2,4
Ortalama Nusselt sayısı, Nu_m	%4,57
Faydalı ısı transfer katsayısı, HF	%1,93
Faydalı ısı, QF	%1,73
Yüzey ısısı, QY	%3,29
Verim, η_I	%3,66
Ekserji, Ex	%2,03

Deneyler sırasında meydana gelen toplam hata miktarları ölçülen ve hesaplanan değerler için Tablo 1.2' de verilmiştir. Kollektör hava giriş kesit alanı, yüzey alanı, hidrolik çap, kütleli debi, Reynoldss sayısı, ortalama Nusselt sayısı, faydalı ısı transfer katsayısı, faydalı ısı miktarı, yüzey ısı, verim ve ekserji için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kollektör hidrolik çapındaki belirsizliğin hesaplanması için denklem 2.2 kullanılmıştır.

$$DH = 0,223655914$$

$$\Delta DH = \sqrt{\left(\frac{\partial DH}{\partial AK} \Delta AK\right)^2 + \left(\frac{\partial DH}{\partial U} \Delta U\right)^2} \quad (2.2)$$

$$= \sqrt{((2/U \times \Delta AK)^2 + (-(AK \times \Delta 2/U^2) \times \Delta U)^2}$$

$$= 0,0034743145$$

$$= 3,4743145 \times 10^{-3}$$

$$= 3 \times 10^{-3}$$

$$DH = (2,24 \pm 0,03) \times 10^{-1}$$

$$DH = (0,00345/0,2236) \times 100 = \%1,55$$

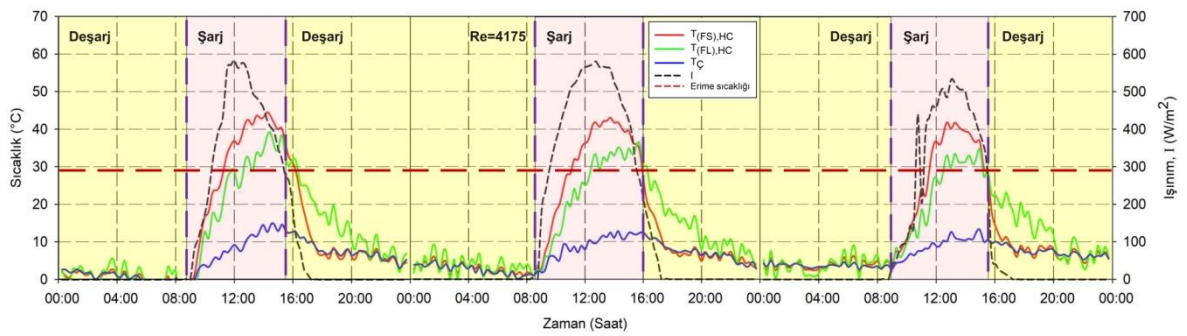
burada hidrolik çap 0,224 m değerinde hesaplanmıştır (denklem 2.2). Tablo 2.3'de yer alan diğer belirsizlikler için hesaplamalar EK-9 da sunulmuştur.

3. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Kollektör Çıkış Sıcaklıkları Açısından Değerlendirme

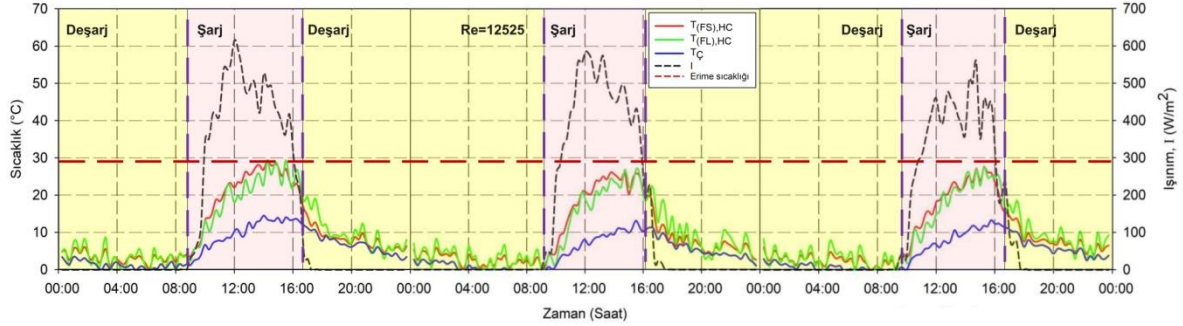
Deneyler 05.12.2021 ile 26.12.2021 tarihleri arasında kış mevsiminde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak dirençsiz boş kollektör deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra FDM'li ve FDM'siz tek dirençli kollektörler eş zamanlı olarak deneylere tabi tutulmuştur. Her bir gün için bir kütesel debi değerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Üç(3) gün boyunca yapılan deneyler sonucunda kayıt altına alınan veriler analiz edilmiştir. Kütle akısının en küçük değerinde ($Re=4175$) 05.12.2021 – 07.12.2021 tarihlerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu tarihlerde ışının değerleri maksimum yaklaşık 580 W/m^2 değerine ulaşmaktadır. Kış aylarında maksimum ısınım değeri öğlen saat 12.00 gibi maksimuma ulaşmakta saat 14.30'a kadar maksimuma yakın değerde seyredebilmektedir. Işınım değeri ile kollektör yüzeylerinden ve giriş çıkışından alınan sıcaklık değerleri birebir aynı olmasa da benzer harmoni değişmektedir. Deney tarihlerinde ortam sıcaklığı minimum -2 ve maksimum 18 değerlerine çıkmaktadır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi ortam sıcaklığı maksimum 15°C 'lere kadar çıkmaktadır ve bu değer saat 14.00 ile 16.00 arasında gözlemlenmektedir. FDM'siz kollektör çıkış sıcaklığı ısınım trendi ile benzer olarak değişmekte FDM'li kollektör çıkış sıcaklığına göre günün ilk yarısında daima daha yüksek olmaktadır. Bu durum kollektör içerisinde kapsüllenmiş FDM'nin kollektör yüzey sıcaklığı artışına bağlı olarak ısıyı çekmesi ve duyulur-gizli olarak depolanmasının bir sonucudur. Günün ikinci yarısında ısınım değeri azalırken yine FDM'siz dirençli kollektör çıkış sıcaklığı da azalmaktadır. Işınım değeri akşam 17.00 gibi yaklaşık sıfır(0) olmakta bu andan itibaren FDM'siz kollektör çıkış sıcaklığı çevre sıcaklığına yaklaşık eşit olmaktadır.



Şekil 3.1. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısınım değerinin günün zamanına göre değişimi ($Re=4175$)

FDM'li kollektörde yaklaşık saat 14:00'a kadar ısı şarj periyodu gözlemlenmektedir. Şarj periyodunun maksimum değeri ısınımın maksimum değerine tekabül eden zamandan yaklaşık 2 saat sonra meydana gelmektedir. Bu durum makrokapsüllenmiş FDM'lerin içine konulduğu T dirençlerin toplayıcı yüzeyle birlikte ısındığı giriş ve çıkış sıcaklığından daima

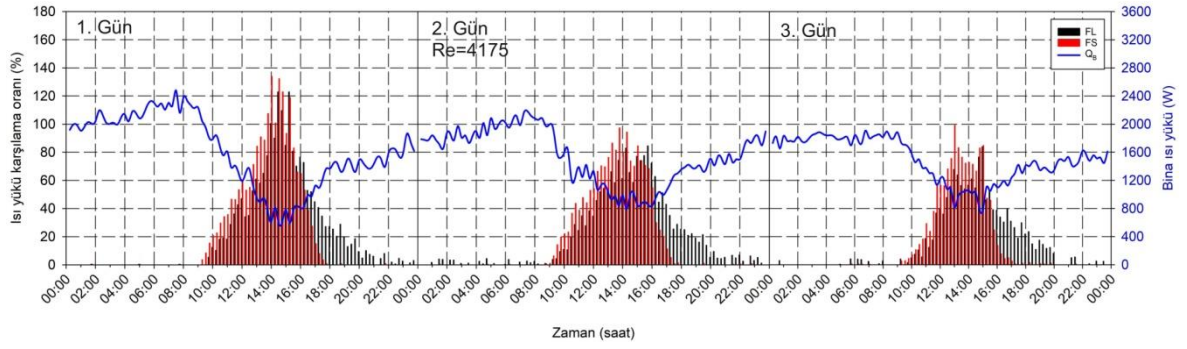
daha yüksek değerde olduğu ısıtım azalsa bile akışkan hava çıkış sıcaklığının nispeten daha yüksek olmasıyla sonuçlanmaktadır. Deneysel verilerin analizinde FDM'li kolektörler şarj vedeşarj periyodu olarak iki farklı süreçte incelenmiştir. (Şekil 3.2.)



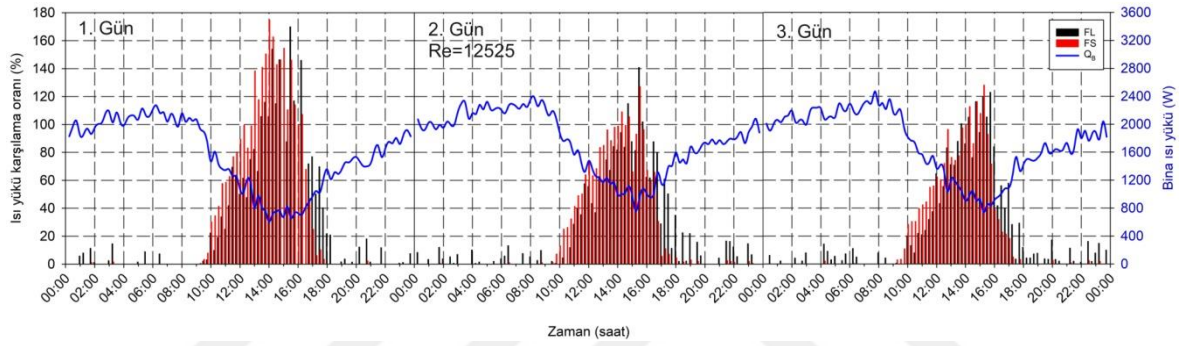
Şekil 3.2. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısıtım değerinin günün zamanına göre değişimi (Re=12525)

Deneylerde kullanılan kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) termofiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Kullanılan FDM'nin erime sıcaklığı yaklaşık 29°C 'de gerçekleşmektedir. Yapılan deneylerde düşük Reynolds sayılarında kolektör çıkış sıcaklığının FDM erimesi sıcaklığının üzerine çıktığı yüksek Reynolds sayılarında ise periyodik olarak azaldığı gözlemlenmektedir. FDMdeşarj periyodunda kolektör çıkış sıcaklığı FDM'siz kolektöre göre daha yavaş azalmakta ısıtım sıfır olduğu zamandan sonra 2 ile 4 saate kadar çevre sıcaklığının üzerinde bir değere sahip olmaktadır.

Şekil 3.3 de kolektörlerin bina ısı yükünü karşılama oranı ve bina ısı yükü değerinin günün saatlerine göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi ısıtımın maksimum olduğu saatlerde çevre sıcaklığının artmasına bağlı olarak bina ısı yükü azalmaktadır. Isıtma mahali için konfor şartı olarak 20°C belirlenmiştir. Deney yapılan tüm günlerde kolektörün sağlamış olduğu ısı miktarı bina ısı yükünün minimum olduğu saatlerde bina ısı yükünün tamamını ya da tamamına yakını karşılayabilmektedir. Saat 14.00 ile 16.00 arasında bina ısı yükünün yaklaşık 800 ile 1000 W arasında değiştiği bu ısı ihtiyacının kolektörler tarafından fazlasıyla karşılandığı görülmektedir. FDM'siz dirençli kolektörün ısıtımın maksimum olduğu zamanlarda bina ısı yükünün karşılanmasında FDM'li kolektöre göre daha etkin olduğu görülmektedir (Şekil 3.4).



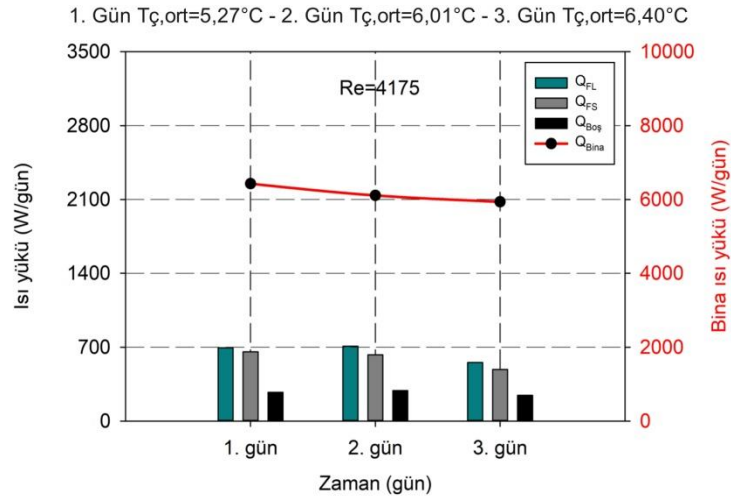
Şekil 3.3. Kollektör faydalı ısısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamanına göre değişimi (Re=4175)



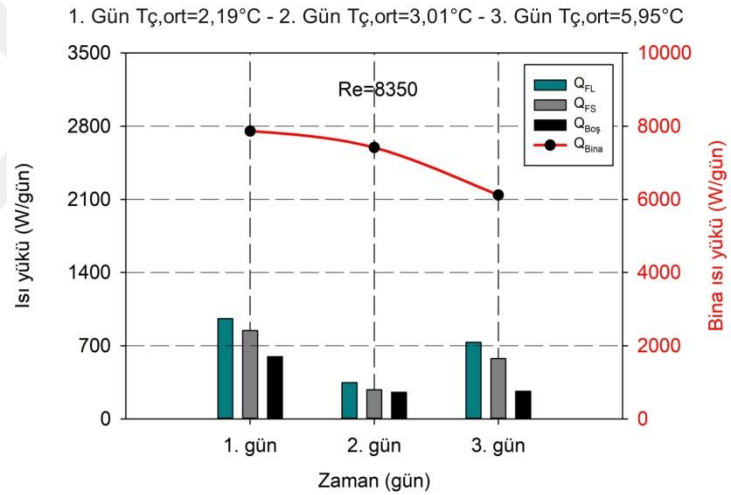
Şekil 3.4. Kollektör faydalı ısısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamanına göre değişimi (12525)

Bunun sebebi olarak FDM'li ve FDM'siz kollektörlerde kütle akısı eşit olmasına karşın FDM'siz dirençli kollektör çıkış sıcaklığının nispeten daha yüksek olması görülmektedir. Ancak hemen hemen tüm deney günleri saat yaklaşık 16:00'dan sonra FDM'siz kollektörü bina ısı yükünü karşılama oranı hızlı bir periyotta düşmekte ve ıının değerinin sıfır(0) olmasıyla yaklaşık sıfır(0) değerine ulaşmaktadır ancak FDM'li kollektörde saat 16:00'dan sonra bina yükünü karşılama oranı azalma trendine girse de saat 20.00 olduğunda bina ısı yükünün hala %20'sine yakınının karşılandığı gözlemlenmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir durumda FDM sıcaklığı ne kadar yüksek olursa deşarj periyodunda bina ısı yükünün karşılanmasında daha fazla etkili olmaktadır.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 arasında bina ısı yükü ile her bir kollektörün faydalı ısı miktarının deney günleri için değişimi verilmiştir.



Şekil 3.5. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörün $Re=4175$ için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi

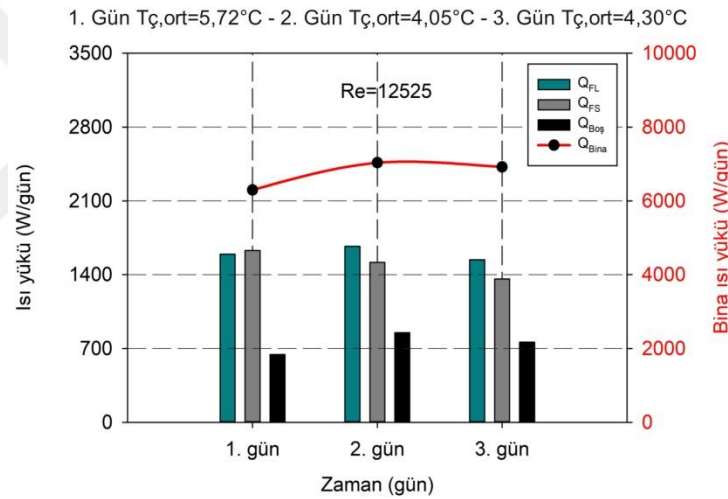


Şekil 3.6. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörün $Re=8350$ için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi

Bina ortalama artan ısı yükü çevre sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık 6,2 – 6,9 kW arasında değişmektedir. Reynolds sayısının 4175 değerinde deney günlerine ait bina ısı yükü yaklaşık 6,4 kW civarındadır. Günlük ortalama ortam sıcaklığının $5,2^{\circ}\text{C}$ olması durumunda (FDM'li dirençli) kollektörden bina ısı yükünün yaklaşık %11'i karşılamaktadır. FDM'siz durumda ise bu değer %10 civarındadır. Boş kollektörde elde edilen verilere göre ise toplam ısı yükünün %4'ü kollektör tarafından karşılanmaktadır. Reynolds sayısının 4175 değerinde FDM dirençli kollektörden bina ısı yükünün yaklaşık %11'i FDM'siz dirençli kollektörden %9'u, boş kollektörde ise %4 ü karşılanmaktadır. Reynolds sayısının 4175 değeri için ortalama çevre sıcaklığı $5,5^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiş minimum ortam sıcaklığı $-1,1^{\circ}\text{C}$, maksimum ortam sıcaklığı ise $14,6^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Reynolds sayısının 8350 değerine yükseltilmesi durumunda

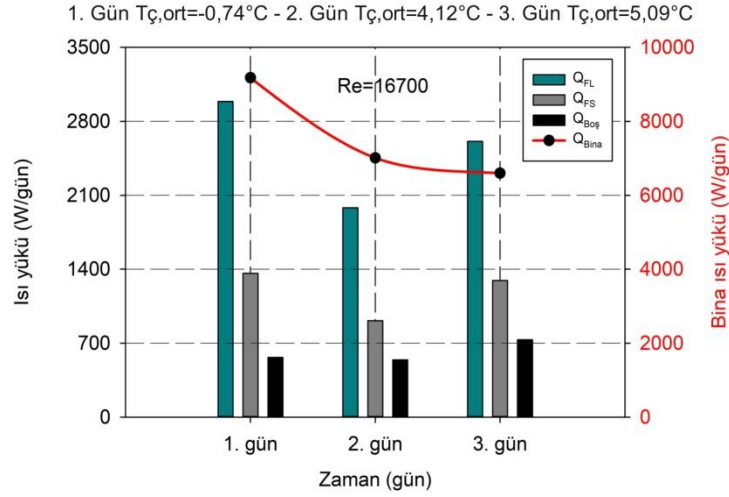
FDM dirençli kollektörün ısı yükünü karşılama arası yaklaşık %1 arasında artmakta ve %12'lere çıkmaktadır. (Şekil 3.6)

Reynolds sayısının yaklaşık iki(2) kat artmasına rağmen FDM'siz dirençli kollektör bina ısı yükü karşılama kapasitesi önemsiz oranda artmaktadır. Bu arada çevre sıcaklığının yaklaşık 2°C azalmasına rağmen ve ortalama ısınım değerinin %45 daha az olmasına rağmen kollektörlerin bina ısı yükü karşılama oranının artmış olması Reynolds sayısının kollektör ısıtma performansı üzerinde etkin bir parametre olduğunu göstermektedir. Reynolds sayısının 12525 değerlerine tekabül eden anlık ısınım değerleri gün ortasında 550 W/m² değerlerine ulaşmıştır. Çevre sıcaklığı ise yaklaşık 4,5°C'lerde gözlemlenmektedir. Çevre sıcaklığının Reynolds sayısının 4175 değeri için gözlenen çevre sıcaklığına yakın olmasına rağmen FDM dirençli kollektörün bina ısı yükünü karşılama oranı %22 ile %26 arasında değişmektedir. Bu değere FDM'siz dirençli kollektörde %19 ile %26, dirençsiz (boş) kollektör de ise %10 ile %12 arasında değişmektedir. (Şekil 3.7)



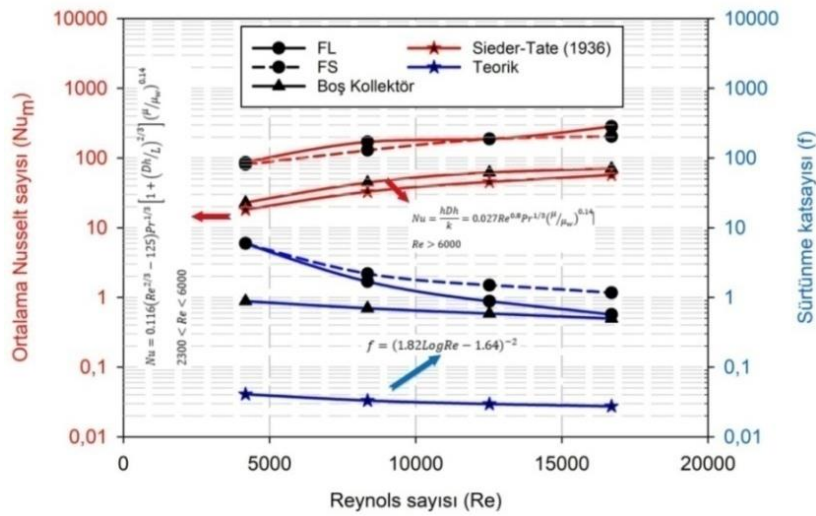
Şekil 3.7. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörün Re=12525 için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi

Reynolds sayısının 16700'e çıkarılması durumunda FDM'li kollektörün bina ısı yükünü karşılama oranı %28-%39 arasında değişmektedir. Bu değer FDM'siz dirençli kollektör %20'lere, boş kollektörlerde ise %11'lere ulaşmaktadır (Şekil 3.8). Buradan anlaşılabileceği üzere yüksek Reynolds sayılarında akışkan debisine bağlı olarak kollektör ısı transfer miktarı artmasıyla birlikte FDM'li kollektörün ısı şarj ve deşarj etkinliği de artmaktadır.



Şekil 3.8. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörün $Re=16700$ için bina ısı yükünü karşılama oranlarının günlere göre değişimi

Şekil 3.9'da kollektörler için ortalama Nusselt sayısı ve sürtünme katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Teorik Nusselt sayısı için kullanılan ampirik bağıntılar literatürde genel ve yaygın olarak kullanılan ampirik bağıntılardır. Buna göre baş kollektör için elde edilen Nusselt sayıları ile teorik Nusselt sayıları arasında önemli bir uyum gözlemlenmektedir. Kollektör içerisinde T direnç kullanılması durumunda FDM'li yada FDM'siz olmasına bakılmaksızın ortalama Nusselt sayısı dirençsiz(baş) kollektöre göre 4 ile 5 kat artmaktadır. Bu durum T dirence bağlı olarak kollektör içerisinde akışın dağıtılması sınır tabakanın parçalanarak ısı taşınım katsayısının nispeten artmasının bir sonucu olarak görülmektedir. FDM'li dirençli kollektördeki ortalama Nusselt sayısının FDM'siz dirençli kollektör ortalama Nusselt sayısına göre daha düşük elde edilmesi beklemesine karşı nispeten daha yüksek olduğu görülmüştür.



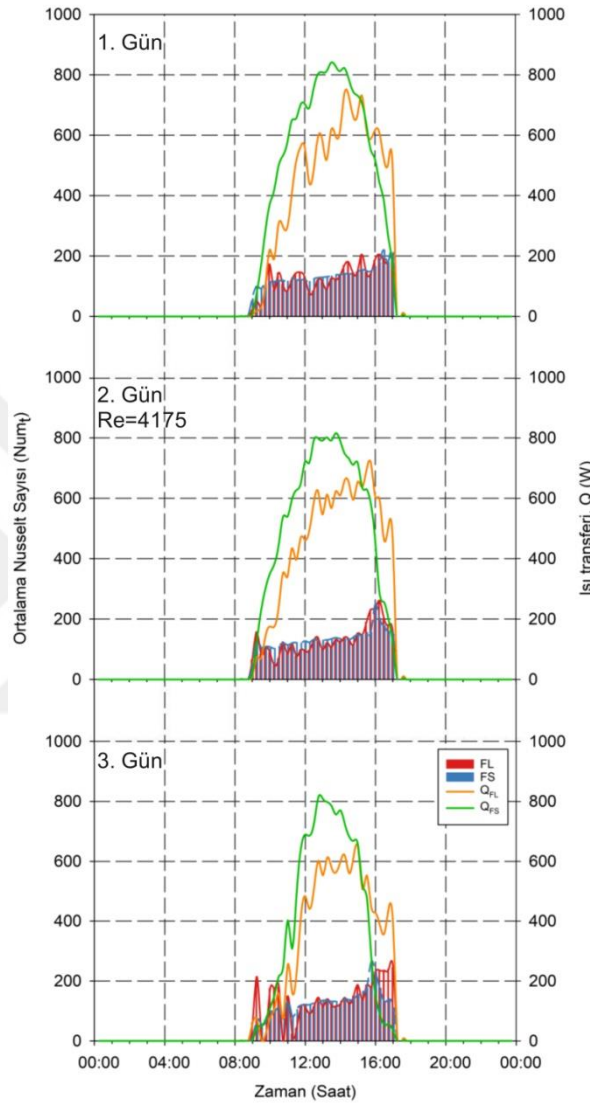
Deneysel çalışmalarda toplayıcı yüzeydeki ısıнын bir bölümü FDM tarafında depolanarak sonucu olacak FDM'siz dirence göre nispeten daha düşük olması beklenmekteydi ancak T direnç içerisinde makrokapsülleşmiş FDM'lerin sıcaklığının artmasına bağlı olarak T kabın yüzey sıcaklığında artmasının sonucu olarak ısı taşınım katsayısı FDM'siz dirençli kollektöre göre daha yüksek elde edilmiştir. Bununla birlikte sürtünme katsayısı için genel olarak kabul edilen ampirik bağıntıya göre ortalama sürütünme katsayısının boruya göre oldukça düşük çıkmaktadır. Reynolds sayısına bağlı olarak boş borudaki sürtünme katsayısı ile dirençli kollektör sürtünme katsayısı 2 ile 8 kat arasında değişmektedir. Düşük Reynolds sayılarında T dirençli kollektör sürtünme katsayısı boş boruya göre yaklaşık 8 kat artmaktadır.

Reynolds sayısının 16700 değerinde ise bu değer 2,5 katına kadar düşmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir durum ise FDM dirençli kollektörlerdeki ortalama Nusselt sayısı FDM'siz dirençli kollektörün ortalama Nusselt sayısından nispeten düşüğe olsa daima yüksek olmasına karşın sürtünme katsayısı daha düşüktür. Bu durum standart ısı transfer uygulamalarında çok fazla karşılaşılan bir durum değildir. Çünkü basınç kaybının ne kadar artarsa ısı transferinin aynı oranda artması genel olarak beklenen bir durumdur. Ancak tasarlanan sistemde ısı taşınım katsayısı ile birlikte FDM'li direncin yüzey alanının fazla olması durumundan dolayı ısıtma yüzeyi arasındaki artış doğal olarak çıkış sıcaklığındaki artış nispeten düşük basınç kaybında yüksek ısı taşınım katsayısı ile sonuçlanmaktadır. (Şekil 3.9)

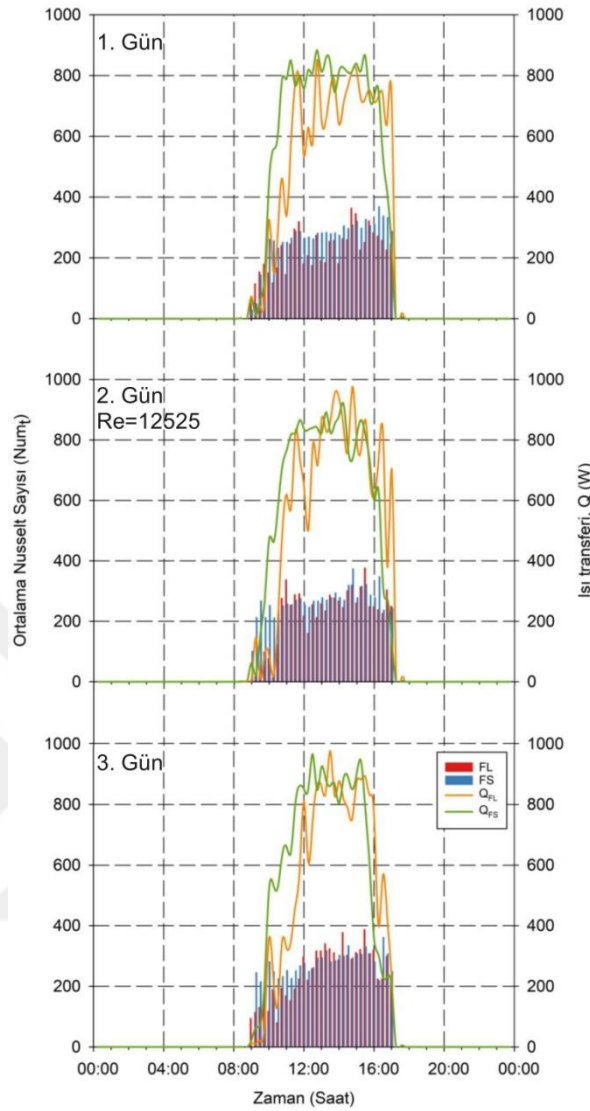
Şekil 3.10'da kollektör ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferi günü zamana göre değişimi FDM'li ve FDM'siz dirençli kollektörler için verilmiştir. Reynolds sayısının 4175 değeri için ortalama Nusselt sayısının günün zamanına göre değişimi tasarlanan sistem hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Günün ilk saatlerinde FDM'li ve FDM'siz kollektör ortalama Nusselt değerleri yaklaşık 100 değerine ulaşmakta ve günün saatlerine bağlı olarak yaklaşık lineer artmaktadır. Tüm gün deneyleri için FDM'siz dirençli kollektör ortalama Nusselt sayısından nispeten ortalama daha yüksek gözlemlenmektedir. Ancak saat iki(2)'den sonra FDM dirençli kollektör ortalama Nusselt sayısı artış trendi göstermekte. FDM'siz dirençli kollektör ortalama Nusselt sayısı yaklaşık %20 oranında geçmektedir. Bu periyot şarj ve deşarj periyodunun ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. FDM şarj periyodunda toplayıcı yüzey ısıнын bir bölümü FDM tarafında depolanırken bir bölümü çalışma akışkanına aktarılmaktadır. Bu durum ortalama Nusselt sayısının FDM'siz dirençli kollektörde daha yüksek meydana gelmesine neden olmaktadır. Ancak bu fark oldukça düşüktür. Deşarj periyodunda ise FDM dirençli kollektör yüzey sıcaklık farkının etkisiyle taşınım katsayısı artmakta ortalama Nusselt sayısının FDM deşarj periyodunda %20'lerde daha fazla oranda yüksek olmasıyla sonuçlanmaktadır (Şekil 3.10). Bu durum kollektör ısı transfer miktarlarında da açık ve net olarak görülmektedir. Şarj periyodunda FDM'siz dirençli

kollektörün ısı transfer miktarı nispeten daha yüksek olmasına karşın Deşarj periyoduna geçildiği FDM dirençli kollektörünün ısı transfer miktarı aynı oranda sürmektedir. Bu durum tüm Reynolds sayılarında benzer olarak gözlemlenmektedir. Ancak Reynolds sayısının artmasıyla ısı transfer miktarının mutlak değeri de artmaktadır (Şekil 3.11).



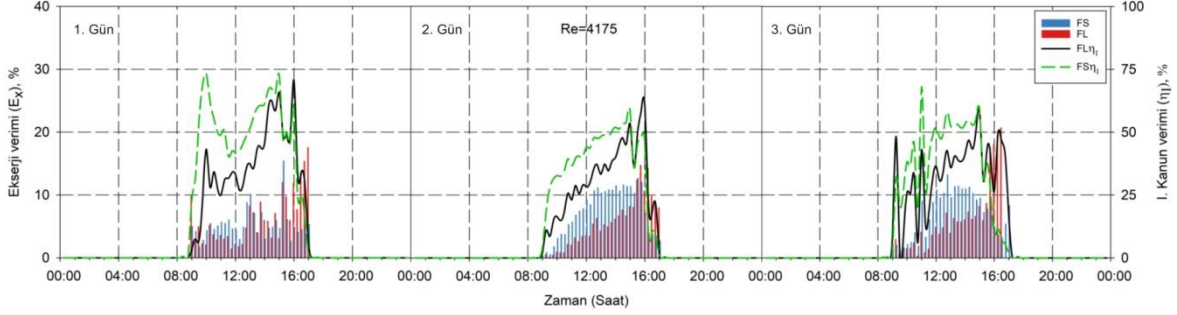
Şekil 3.10. FDM'li ve FDM'siz kollektörün $Re=4175$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi



Şekil 3.11. FDM'li ve FDM'siz kolektörün $Re=12525$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi

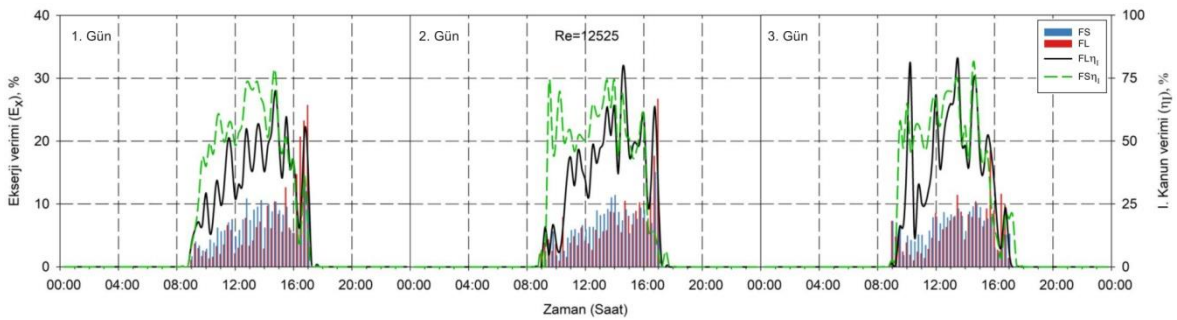
Ekserji tersinir bir süreç sonunda elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanmaktadır. Ekserji kaybı ise sisteme giren ve çıkan ekserji farkının sisteme giren ekserjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Enerji verimini (I. kanun verimi) ise sistemden alınan faydalı enerjinin sisteme verilen toplam enerjiye oranıdır. Buna göre tasarlanan kolektörlerin nicelik ve nitelik yönünden değerlendirilmesinin enerji ve ekserji verimi üzerinden yapılması yararlı görülmektedir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi Reynolds sayısının 4175 değerinde FDM'li ve FDM'siz dirençli kolektörün maksimum verimleri %65 ile %74 arasında değişmektedir. Günün ilk saatlerinde FDM'siz dirençli kolektörün I. Kanun veriminin FDM'li dirençli kolektörün I. kanun veriminden daima daha yüksektir. Günün ilerleyen saatlerinde her iki kolektörün verimi de ortak ilerlemesine karşın FDM'li dirençli kolektörün I. Kanun verimi artmaya devam etmektedir. Bunun sebebi olarak FDM'li dirençli kolektörlerde elde edilen faydalı

enerjinin deşarj süresi boyunca devam etme sonucunda sisteme verilen ısıнын enerjisinin azalması sonucu olarak görölmektedir. Bu durum Reynolds sayısının tüm değęerlerinde benzer olarak görölmektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.12. FDM'li ve FDM'siz kollektörün $Re=4175$ için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değışimi

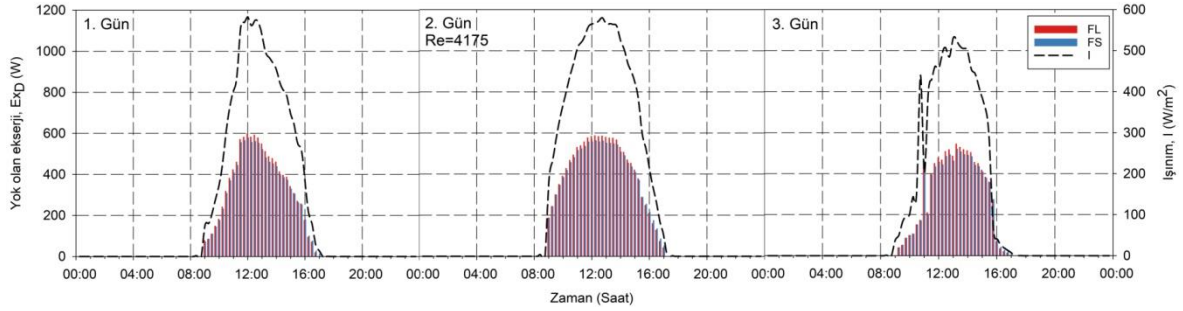
I. Kanun veriminin %75 değęerlerine ulaşmasına karşın kollektör ekserji verimleri maksimum %13'lerde elde edilmektedir. Bu durumun sebebi olarak güneşin kaynak sıcaklığının yüksek olması nitelikli enerjinin artan ısıtma gibi niceliksiz bir enerjiye dönüştürmede ekserji verimini olumsuz yönde etkilemesinin sonucu olarak görölmektedir. Burada dikkate alınması gereken önemli bir durumda şarj periyodu boyunca FDM'siz dirençli kollektör ekserji veriminin FDM'li dirençli kollektör ekserji verimine göre daha yüksek olduğu ancak deşarj periyodunda çevre sıcaklığının azalmasına karşın çıkış ekserji değęerinin artması sonucunda FDM dirençli kollektörün ekserji veriminin maksimum değęerlere ulaştığı görölmektedir. Bu çalışmada elde edilen önemli bir bulgu ise FDM'siz dirençli kollektör ekserji verimi güneşin ışıınım değęeri ve çevre sıcaklığı ile benzer periyotta değışmesine karşın FDM'li dirençli kollektör ekserji veriminin ışıınının azaldığı periyotta bile artarak devam etmesidir.



Şekil 3.13. FDM'li ve FDM'siz kollektörün $Re=12525$ için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değışimi

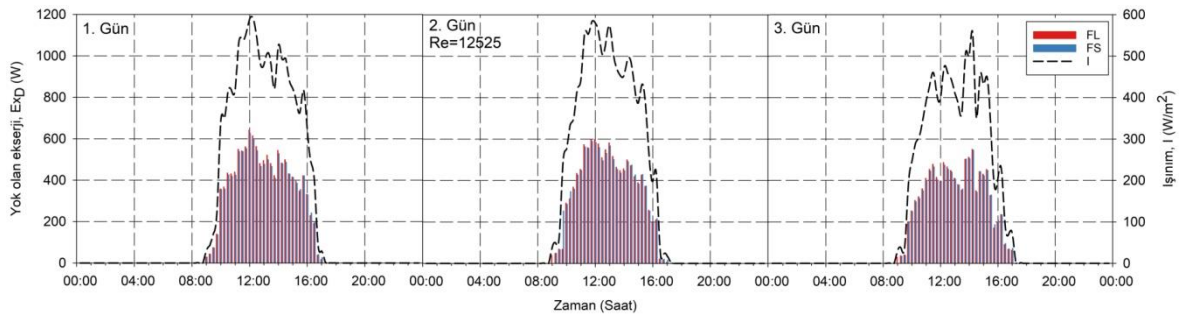
Isıl sistemlerin ekserji ve enerji analizleri yapılırken sistemin tasarlanmasındaki en önemli etken enerjinin niteliğine uygun parametrelerin belirlenmesidir. Ekserji veriminin değęerlendirilmesinde yok olan ekserji ile ısı kaynağı arasındaki ilişkinin belirlenmesi hem

sistemin tasarlanmasında hem sistemin etkinliğini belirleyen parametrelerin belirlenmesinde hem de optimum tasarım parametrelerinin ortaya konulmasında önemli etkisi olduğu söylenebilir. Şekil 3.14'te FDM'li ve FDM'siz dirençli kollektördeki yok olan ekserji ile ısı kaynağı olarak ışıınım değerinin günün zamanına göre değişimi farklı günler için verilmiştir.



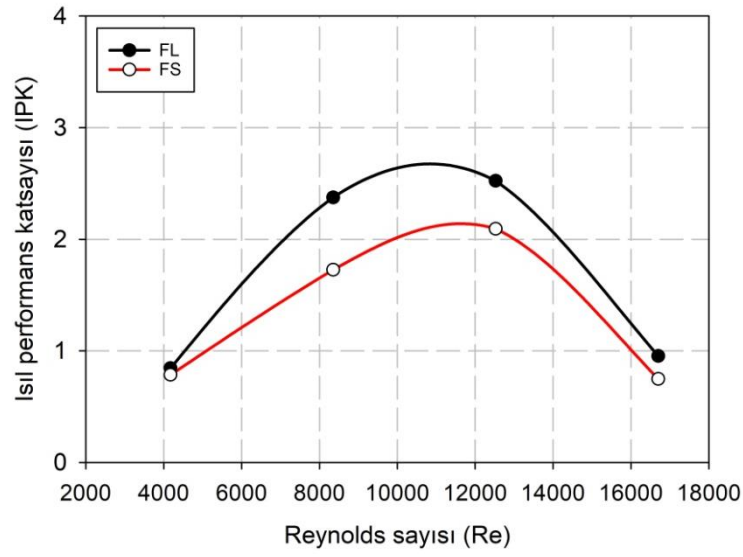
Şekil 3.14. Yok olan ekserjinin zamana göre değişimi (Re=4175)

Görüldüğü gibi ışıınım değeri ile yok olan ekserji değerinin günün zamanına göre değişimi hemen hemen aynı periyotlarda gerçekleşmekte bu durum farklı oranlarda olsa da farklı Reynolds sayılarında da aynen gözlemlenmektedir. (Şekil 3.15). Tasarlanan kollektör sisteminde FDM'li ve FDM'siz dirençli kollektörlerin yok olan ekserji değeri kollektör yüzeyine düşen ekserji değerine göre %87 ile %96 arasında değişmektedir. Aslında bu durum ekserji verimindeki elde edilen değerlerin bir göstergesidir.



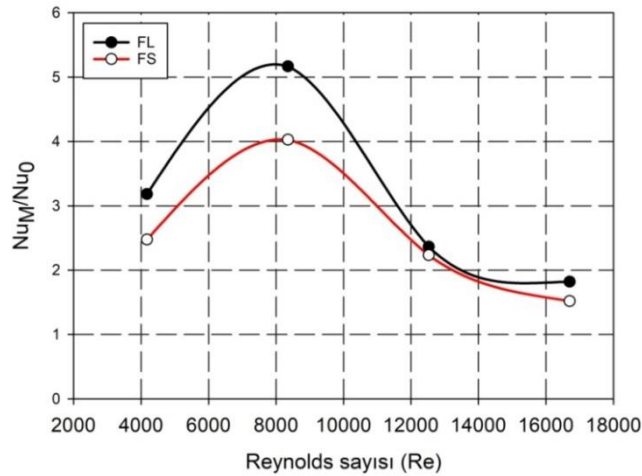
Şekil 3.15. Yok olan ekserjinin zamana göre değişimi (Re=12525)

Isıl sistemlerin tasarlanmasında ısı performans katsayısı (IPK) değerleride parametrelerden birisidir. Sistemde kullanılan yükseltilmiş yüzeylere dirençlere bağlı olarak ısı transferindeki artış oranının pompa gücündeki kollektörlü sistemler için üç(3) günlük ortalamaya bağlı olarak FDM'li ve FDM'siz dirençli kollektör ortalama Nusselt sayısının boş kollektör ortalama Nusselt sayısını'na oranının sürtünme katsayılarının oranlarından elde edilen değerlere göre Reynolds sayısının 12000 değerinden sonra IPK değerinin azaldığı 16000 değerinde sonra ise hem FDM'li dirençli hem de FDM'siz dirençli kollektör için yaklaşık bir(1) değerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.16). Burada anlaşılabacağı üzerine tasarlanan sistemde Reynolds sayısının 5000 değerinde büyük olması IPK bakımından değerlendirmede uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 3.16. FDM'li, FDM'siz kolektörlerde Isıl Performans Faktörünün (IPK) Reynolds sayısına göre değişimi

Bununla birlikte Re sayısının 16000 değerinden büyük olması durumunda ise ısı transferindeki artışa oranla pompa gücündeki artışın daha fazla olduğu buna bağlı olarak tasarlanan sistemde Reynolds sayısının 5000 ile 16000 değerleri arasında çalışılmasının makul ve uygun olduğu görülmektedir. Bu değerlendirmenin nicel olarak sebebinin Şekil 3.17'de daha açık olarak görebiliriz. Düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısındaki artış oranı nispeten yüksek olsada sürtünme kayıp katsayısındaki artış oranına göre daha düşük olduğu bu durumda pompa gücündeki artışa bağlı olarak IPK değerinde birinin altında olmasıyla sonuçlandığı görülmektedir. Bununla birlikte Re sayısının artmasıyla Nusselt artış oranı FDM'li ve FDM'siz kolektörler için yaklaşık eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 3.17. Nusselt sayısındaki artış oranının Reynolds sayısına göre değişim

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada içerisinde makro boyutlu kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) faz değiştiren malzeme kapsüllenmiş/kapsüllenmemiş T dirençlerin havalı güneş kolektörü performansına etkisi ve bir konutun belirli bir mahalının ısıtılmasındaki performansı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma akışkanının(hava) dört(4) farklı debisinde, Reynolds sayısının 4175 ile 16700 değerleri arasında deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir akışkan debisi için en az üç(3) gün deneyler yapılmıştır. Deneyler 2021 yılının 5-26 Aralık tarihleri arasında, kış iklim şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kolektör içerisine 32 T direnç şaşırtmalı şekilde yerleştirilmiş, kolektörlerin birisinde T dirençler FDM kapsüllenecek şekilde, diğerinde ise FDM'siz (sadece direnç olacak şekilde) eşit sayıda yerleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan kolektör faydalı enerjisi, kolektör verimi ortam ısıtma performansı, ekserji verimi, ısı performans katsayısı gibi bağımlı parametreler belirlenmiştir. Elde edilen veriler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir;

- Havalı kolektör içerisinde T direnç kullanımı kolektör çıkış sıcaklığını ve kolektör içerisindeki ısı taşınım katsayısını olumlu yönde etkilemekte kolektörden elde edilen faydalı ısı enerjisini arttırmaktadır.
- Kolektör içerisinde kullanılan FDM'lerin hem direnç hem akışa karşı direnç, hem de ısı depolayan direnç şeklinde tasarlanması kolektörden elde edilen faydalı ısı enerjisini boş kolektöre göre 4,5 kata kadar arttırabilmektedir.
- T dirençlerin makrokapsüllenmiş FDM'li dirençli olarak tasarlanması FDM'siz dirençli olarak tasarlanmış olan T dirençlere göre elde edilen faydalı ısı enerjisini anlık olarak daha düşük sağılasada günlük toplamda sağlanan ısı enerjisi daima daha fazladır.
- FDM'li ve FDM'siz T dirençli kolektörlerin I. Kanun verimleri ısıtım değerine bağlı olarak %70'ler de elde edilmesine karşın ekserji verimleri %13 olarak elde edilmektedir. Bu durum boş kolektöre göre önemli bir avantaj oluştursada sistem tasarımının optimize edilmesi gerektiği durumunu ortaya koymaktadır.
- Tasarlanan FDM'li ve FDM'siz T dirençli kolektörlerin ısı performans katsayısı cinsinden değerlendirilmesinde Reynolds sayısının $\text{Re} < 5000$ olması durumunda ya da $\text{Re} > 16000$ olması durumunda ısı transferindeki artış oranı pompa gücündeki artış oranına göre azalmakta ve yaklaşık bir(1)'in altına düşmektedir. Bu elde edilen bulgulara göre Reynolds sayısının bu aralıkta seçilmesinin uygun olacağı tespit edilmiştir.
- FDM'li ve FDM'siz T dirençli ısı kolektörlerin mahal ısıtmadaki ısı yükü karşılama oranı FDM'siz kolektöre göre 4-7 kat daha fazla olmaktadır. Ayrıca FDM'li dirençli kolektörün bina ısı yükü karşılama oranı, FDM'siz dirençli kolektör ısı yükü

karşılama oranından daha fazladır. Bu oran Reynolds sayısına bağı olarak %2 ile %40 arasında değişebilmektedir.

ÖNERİLER

- Çalışmanın neticesinde FDM'li dirençli havalı güneş kollektörün önemli bir avantaj ve fayda sağladığı görülmektedir. Ancak bu sistemlerin maliyet açısından karşılaştırılması yararlı görülmektedir.
- Reynolds sayısının çalışma aralığı ısı performans katsayısı kapsamında belirlenmiş ölçüde optimum çalışma şartlarının belirlenmesi araştırmanın niteliğine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.
- Araştırma kapsamı dikkate alındığında hem çalışma parametrelerinin hem de bağımlı parametrelerinin optimizasyonu için uygun bir yöntemin gerçekleştirilmesi yararlı görülmektedir.
- Çalışmanın sayısal modellenme ile desteklenmesi özellikle faz değişim projesinde FDM erime katılaşma periyodunun mikro ölçekli analizine dayalı incelemenin yapılması, bu kapsamda erime periyodundaki faz değişim fraksiyonunun, doğal taşınımın etkisini incelenmesi çalışmanın bilimsel katkısını artıracaktır.

KAYNAKÇA

- Abuşka, M., Şevik, S. ve Kayapınar, A. (2019). *A comparative investigation of the effect of honeycomb core on the latent heat storage with PCM in solar air heater*. Applied Thermal Engineering, 148(May 2018), 684–693. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.11.056
- Acır, A., Emin Canlı, M., Ata, İ. ve Erdi Tanürün, H. (2019). *Effects of a circular-shaped turbulator having varying hole numbers on energy and exergy efficiencies of a solar air heater*. International Journal of Ambient Energy, 40(7), 739–748. doi:10.1080/01430750.2017.1423385
- Aksungur, K. M., Kurban, M. ve Filik, Ü. B. (2009). *Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi*. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 3–6.
- Al Ghuol, F. O., Sopian, K. ve Abdullah, S. (2016). *Enhancement of integrated solar collector with spherical capsules pcm affected by additive aluminum powder*. Journal of Thermodynamics, 2016. doi:10.1155/2016/1604782
- Altfeld, K., Leiner, W. ve Fiebig, M. (1988). *Second law optimization of flat-plate solar air heaters Part I: The concept of net exergy flow and the modeling of solar air heaters*. Solar Energy, 41(2), 127–132. doi:10.1016/0038-092X(88)90128-4
- Arfaoui, N., Bouadila, S. ve Guizani, A. (2017). *A highly efficient solution of off-sunshine solar air heating using two packed beds of latent storage energy*. Solar Energy, 155, 1243–1253. doi:10.1016/j.solener.2017.07.075
- Arul Kumar, R., Ganesh Babu, B. ve Mohanraj, M. (2016). *Thermodynamic performance of forced convection solar air heaters using pin-fin absorber plate packed with latent heat storage materials*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 126(3), 1657–1678. doi:10.1007/s10973-016-5665-6
- Azaizia, Z., Kooli, S., Hamdi, I., Elkhail, W. ve Guizani, A. A. (2020). *Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper*. Renewable Energy, 145, 1972–1984. doi:10.1016/j.renene.2019.07.055
- Baddadi, S., Bouadila, S., Ghorbel, W. ve Guizani, A. A. (2019). *Autonomous greenhouse microclimate through hydroponic design and refurbished thermal energy by phase change material*. Journal of Cleaner Production, 211, 360–379. doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.192
- Baghbani, S. S., Fazelpour, F. ve Ahmadi-Danesh-Ashtiani, H. (2022). *Numerical simulation effect of PCM storage on flat storage on flat plate solar heater in different kinds of weather conditions*. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 13(1), 135–152. doi:10.1007/s40095-021-00436-7
- Barghi Jahromi, M. S., Kalantar, V., Sefid, M., Samimi Akhijahani, H. ve Iranmanesh, M. (2023). *Energy and exergy analysis of an unglazed transpired collector connected to a dryer with a porous plate and phase change material*. Journal of Energy Storage, 60(January), 106693. doi:10.1016/j.est.2023.106693
- Bejan, A. (1988). *Advanced engineering thermodynamics*, 758.
- Bouadila, S., Kooli, S., Lazaar, M., Skouri, S. ve Farhat, A. (2013). *Performance of a new solar air heater with packed-bed latent storage energy for nocturnal use*. Applied Energy, 110, 267–275. doi:10.1016/j.apenergy.2013.04.062
- Bouadila, S., Lazaar, M., Skouri, S., Kooli, S. ve Farhat, A. (2014). *Energy and exergy analysis of a new solar air heater with latent storage energy*. International Journal of Hydrogen Energy, 39(27), 15266–15274. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.04.074

Bulut, F., (2020). Palmitik Asit/Dekanoik Asit-Dekanoik Asit/Setil Alkol Ötektik Karışımlarının Hazırlanması ve Faz Değiştirici Malzeme (FDM) Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Charvát, P., Klimeš, L. ve Ostrý, M. (2014). *Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems*. Energy and Buildings, 68(PARTA), 488–497. doi:10.1016/j.enbuild.2013.10.011

El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A. ve Guizani, A. (2017). *Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM*. Journal of Cleaner Production, 148, 37–48. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.149

El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Guizani, A. ve Farhat, A. (2016). *Solar air heater with phase change material: An energy analysis and a comparative study*. Applied Thermal Engineering, 107, 1057–1064. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.004

Enibe, S. O. (2003). *Thermal analysis of a natural circulation solar air heater with phase change material energy storage*. Renewable Energy (C. 28). doi:10.1016/S0960-1481(03)00071-5

Esakkimuthu, S., Hassabou, A. H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J. ve Velraj, R. (2013). *Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications*. Solar Energy, 88, 144–153. doi:10.1016/j.solener.2012.11.006

Farahat, S., Sarhaddi, F. ve Ajam, H. (2009). *Exergetic optimization of flat plate solar collectors*. Renewable Energy, 34(4), 1169–1174. doi:10.1016/j.renene.2008.06.014

Farzan, H., Hasan Zaim, E. ve Amiri, T. (2023). *Performance study on a new solar air heater with integrated phase change materials and external recycle: A numerical and experimental study*. Applied Thermal Engineering, 223(January), 120000. doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.120000

Ghiami, A. ve Ghiami, S. (2018). *Comparative study based on energy and exergy analyses of a baffled solar air heater with latent storage collector*. Applied Thermal Engineering, 133, 797–808. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.11.111

Gholamibozanjani, G. ve Farid, M. (2020). *A comparison between passive and active PCM systems applied to buildings*. Renewable Energy, 162, 112–123. doi:10.1016/j.renene.2020.08.007

Haghighi Poshtiri, A. ve Jafari, A. (2017). *Refroidissement d'un bâtiment 24 heures sur 24 grâce à un système d'adsorption intégré à des matériaux à changement de phase*. International Journal of Refrigeration, 79, 57–75. doi:10.1016/j.ijrefrig.2017.03.025

Harun, D., Zulfadhli ve Akhyar. (2019). *The experimental performance of the semi-cylindrical type of solar concentrator collector on the addition of heat storage material*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 602(1). doi:10.1088/1757-899X/602/1/012082

Ülker N., Bulut H., Demirtaş Y., Demircan G., “Parafine Eklenen Farklı Nanopartiküllerin Isıl Performans Üzerine Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi”, Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 5(2): 134-145, (2020).

Kabeel, A. E., Khalil, A., Shalaby, S. M. ve Zayed, M. E. (2016). *Experimental investigation of thermal performance of flat and v-corrugated plate solar air heaters with and without PCM as thermal energy storage*. Energy Conversion and Management, 113, 264–272. doi:10.1016/j.enconman.2016.01.068

Kabeel, A. E., Khalil, A., Shalaby, S. M. ve Zayed, M. E. (2017). *Improvement of thermal performance of the finned plate solar air heater by using latent heat thermal storage*. Applied Thermal Engineering, 123, 546–553. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.126

- Kalaiarasi, G., Velraj, R., Vanjeswaran, M. N. ve Ganesh Pandian, N. (2020). *Experimental analysis and comparison of flat plate solar air heater with and without integrated sensible heat storage*. Renewable Energy, 150, 255–265. doi:10.1016/j.renene.2019.12.116
- Khouya, A. (2020). *Effect of regeneration heat and energy storage on thermal drying performance in a hardwood solar kiln*. Renewable Energy, 155, 783–799. doi:10.1016/j.renene.2020.03.178
- Kocaman, B., D. (2021). *Enerji depolama teknolojileri*. iksadyayinevi.com. <https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2021/12/ENERJI-DEPOLAMA-TEKNOLOJILERI.pdf>
- Kooli, S., Bouadila, S., Lazaar, M. ve Farhat, A. (2015). *The effect of nocturnal shutter on insulated greenhouse using a solar air heater with latent storage energy*. Solar Energy, 115, 217–228. doi:10.1016/j.solener.2015.02.041
- Kotas, T. J. (Tadeusz J. (1995). *The exergy method of thermal plant analysis*, 328.
- Kumar, R. A., Babu, B. G. ve Mohanraj, M. (2017). *Experimental investigations on a forced convection solar air heater using packed bed absorber plates with phase change materials*. International Journal of Green Energy, 14(15), 1238–1255. doi:10.1080/15435075.2017.1330753
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A. ve Nayak, P. K. (2018). *Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (Curcuma caesia) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage*. Renewable Energy, 120, 23–34. doi:10.1016/j.renene.2017.12.053
- Lamrani, B. ve Draoui, A. (2020). *Modelling and simulation of a hybrid solar-electrical dryer of wood integrated with latent heat thermal energy storage system*. Thermal Science and Engineering Progress, 18(April), 100545. doi:10.1016/j.tsep.2020.100545
- Lazaro, A., Dolado, P., Marín, J. M. ve Zalba, B. (2009). *PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes*. Energy Conversion and Management, 50(3), 439–443. doi:10.1016/j.enconman.2008.11.002
- MacPhee, D. ve Dincer, I. (2009). *Thermodynamic analysis of freezing and melting processes in a bed of spherical pcm capsules*. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 131(3), 0310171–03101711. doi:10.1115/1.3142822/419092
- Madhankumar, S., Viswanathan, K. ve Wu, W. (2021). *Energy, exergy and environmental impact analysis on the novel indirect solar dryer with fins inserted phase change material*. Renewable Energy, 176, 280–294. doi:10.1016/j.renene.2021.05.085
- Mahmoud, B. K., Ibrahim, S. I., Abass, K. I., Ali, A. J. ve Chaichan, M. T. (2020). *Flat solar air heater collector with phase change materials for domestic purposes in Iraqi climate*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 928(2). doi:10.1088/1757-899X/928/2/022099
- Matheswaran, M. M., Arjunan, T. V. ve Somasundaram, D. (2018). *Analytical investigation of solar air heater with jet impingement using energy and exergy analysis*. Solar Energy, 161, 25–37. doi:10.1016/j.SOLENER.2017.12.036
- Matheswaran, M. M. (2020). *Analytical and experimental investigation on jet impingement solar air heater*. University. <http://hdl.handle.net/10603/334332>
- Mert, M. S., Sert, M. ve Mert, H. H. (2018). *Isıl enerji depolama sistemleri için organik faz değiştiren maddelerin mevcut durumu üzerine bir inceleme*. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(1), 161–174. doi:10.21923/jesd.331998

- Mettawee, E. B. S. ve Assassa, G. M. R. (2007). *Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system*. Solar Energy, 81(7), 839–845. doi:10.1016/j.solener.2006.11.009
- Moradi, R., Kianifar, A. ve Wongwises, S. (2017). *Optimization of a solar air heater with phase change materials: Experimental and numerical study*. Experimental Thermal and Fluid Science, 89(January), 41–49. doi:10.1016/j.expthermflusci.2017.07.011
- Mutlu, Y. (2012). *Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi The energy potential of Turkey and its importance of renewable energy sources in terms of electricity production*. Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 4(2), 33–54.
- Raj, A. K., Srinivas, M. ve Jayaraj, S. (2019). *A cost-effective method to improve the performance of solar air heaters using discrete macro-encapsulated PCM capsules for drying applications*. Applied Thermal Engineering, 146(June 2018), 910–920. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.10.055
- Rathod, M. K., (2018). *Phase Change Materials and Their Applications*. Phase Change Materials and Their Applications. doi:10.5772/intechopen.71894
- Reyes, A., Henríquez-Vargas, L., Aravena, R. ve Sepúlveda, F. (2015). *Experimental analysis, modeling and simulation of a solar energy accumulator with paraffin wax as PCM*. Energy Conversion and Management, 105, 189–196. doi:10.1016/j.enconman.2015.07.068
- Sadri, S. A., Parsa, H., Saffar-Avval, M. ve Hajmohammadi, M. R. (2022). *Configuration optimization of the honeycomb core in the latent heat thermal energy storage of a solar air heater: Experimental and numerical study*. International Journal of Energy Research, 46(5), 5924–5954. doi:10.1002/er.7532
- Sajawal, M., Rehman, T. U., Ali, H. M., Sajjad, U., Raza, A. ve Bhatti, M. S. (2019). *Experimental thermal performance analysis of finned tube-phase change material based double pass solar air heater*. Case Studies in Thermal Engineering, 15(April), 100543. doi:10.1016/j.csite.2019.100543
- Salih, S. M., Jalil, J. M. ve Najim, S. E. (2019). *Experimental and numerical analysis of double-pass solar air heater utilizing multiple capsules PCM*. Renewable Energy, 143, 1053–1066. doi:10.1016/j.renene.2019.05.050
- Saxena, A., Agarwal, N. ve Cuce, E. (2020). *Thermal performance evaluation of a solar air heater integrated with helical tubes carrying phase change material*. Journal of Energy Storage, 30(March), 101406. doi:10.1016/j.est.2020.101406
- Shabtay, Y. L. ve Black, J. R. H. (2014). *Compact hot water storage systems combining copper tube with high conductivity graphite and phase change materials*. Energy Procedia, 48, 423–430. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.049
- Shalaby, S. M. ve Bek, M. A. (2014). *Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium*. Energy Conversion and Management, 83, 1–8. doi:10.1016/j.enconman.2014.03.043
- Sharol, A. F., Razak, A. A., Majid, Z. A. A., Azmi, M. A. A. ve Tarminzi, M. A. S. M. (2020). *Evaluation on the performance of cross-matrix absorber double-pass solar air heater (CMA-DPSAH) with and without thermal energy storage material*. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 70(2), 37–49. doi:10.37934/ARFMTS.70.2.3749
- Sudhakar, P. ve Cheralathan, M. (2019). *Encapsulated PCM based double pass solar air heater: A comparative experimental study*. Chemical Engineering Communications, 0(0), 1–13. doi:10.1080/00986445.2019.1641701

Summers, E. K., Antar, M. A. ve Lienhard, J. H. (2012). *Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage for use in humidification-dehumidification desalination*. Solar Energy, 86(11), 3417–3429. doi:10.1016/j.solener.2012.07.017

Suraparaju, S. K. ve Natarajan, S. K. (2021). *Productivity enhancement of single-slope solar still with novel bottom finned absorber basin inserted in phase change material (PCM): techno-economic and enviro-economic analysis*. Environmental Science and Pollution Research, 28(33), 45985–46006. doi:10.1007/s11356-021-13495-4

Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Buddhi, D. ve Tyagi, S. K. (2013). *Exergy and energy analyses of two different types of PCM based thermal management systems for space air conditioning applications*. Energy Conversion and Management, 69, 1–8. doi:10.1016/j.enconman.2012.12.028

Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Kaushik, S. C. ve Tyagi, S. K. (2012). *Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage An experimental study*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 107(3), 1345–1352. doi:10.1007/s10973-011-1617-3

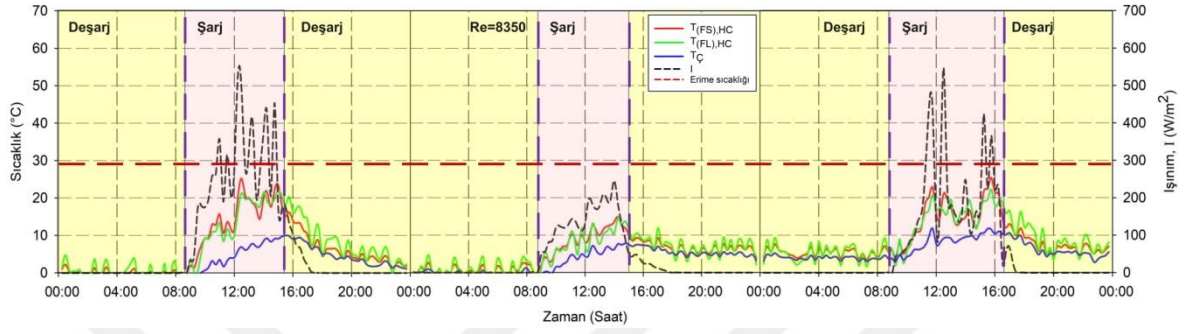
Tyagi, V. V., Panwar, N. L., Rahim, N. A. ve Kothari, R. (2012). *Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2289–2303. doi:10.1016/j.rser.2011.12.005

Şenpınar, A., Gençoğlu, M. T. (2006). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkileri açısından karşılaştırılması*. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi , 4 (2) , 49-54 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fudad/issue/47077/592040>

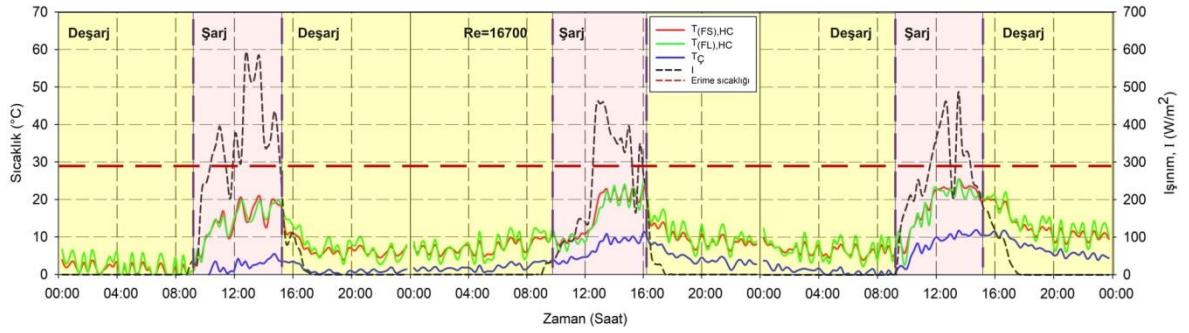
Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., Cai, B., Huang, J., ... Liu, M. (2017). *Experimental research of an air-source heat pump water heater using water-PCM for heat storage*. Applied Energy, 206(September), 784–792. doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.209

EKLER

EK-1. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısıtım değerinin günün zamanına göre değişimi

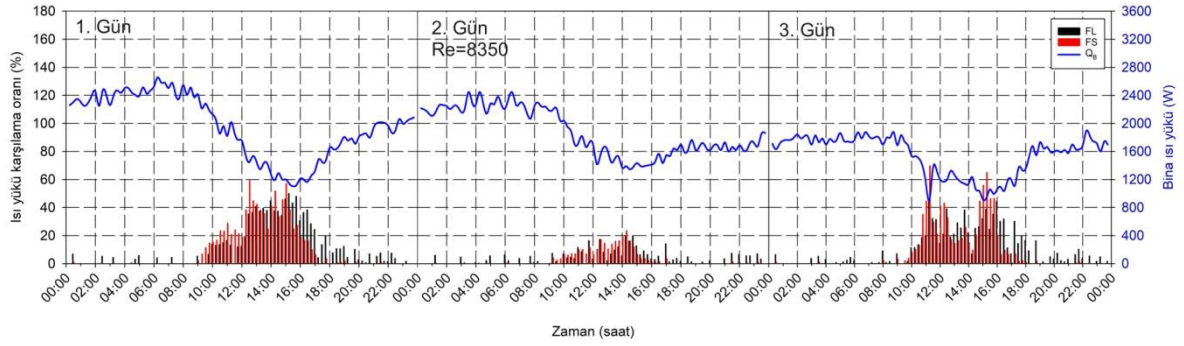


Şekil.Ek-1.1. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısıtım değerinin günün zamanına göre değişimi (Re=8350)

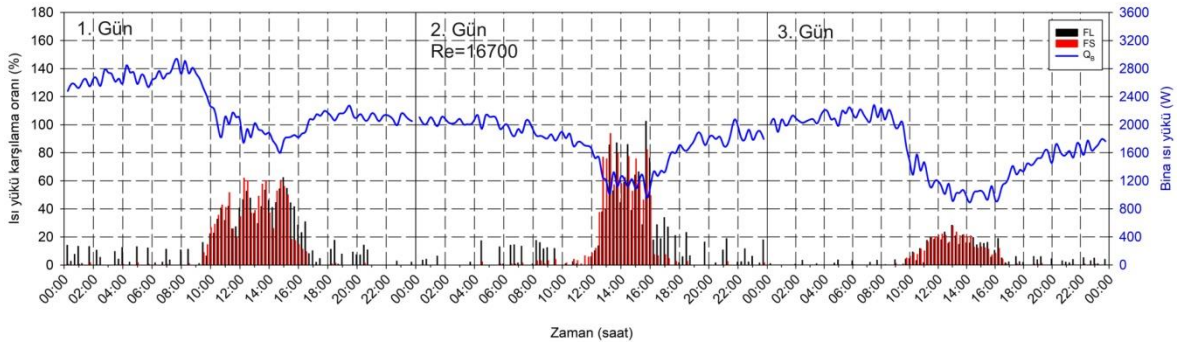


Şekil.Ek-1.2. Kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ve anlık ısıtım değerinin günün zamanına göre değişimi (Re=16700)

EK-2. Kollektör faydalı ısısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamanına göre değişimi

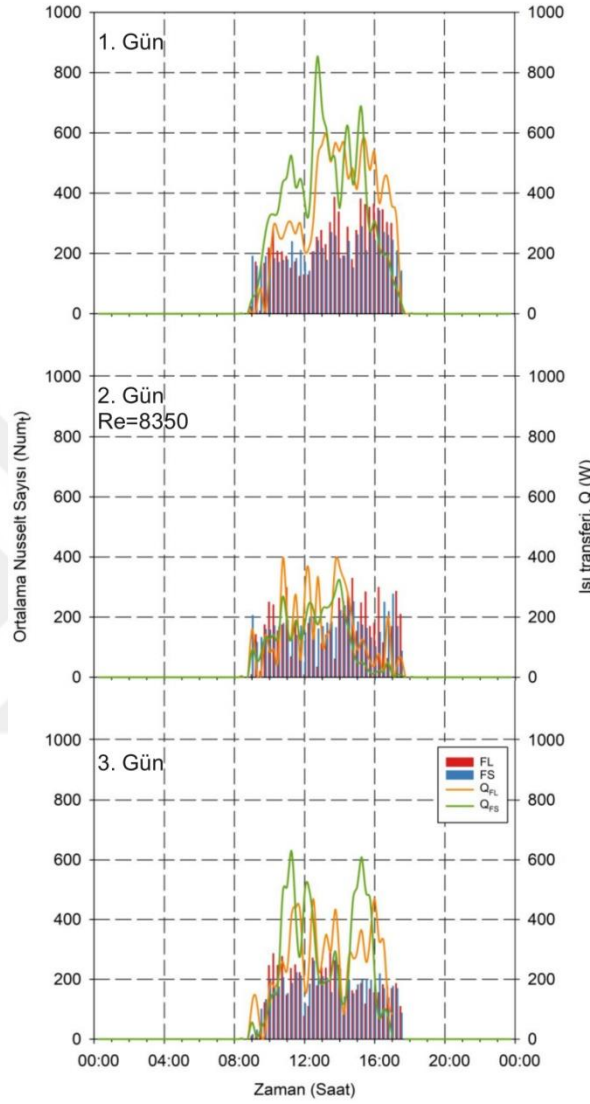


Şekil.Ek-2.1. Kollektör faydalı ısısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamana göre değişimi ($Re=8350$)

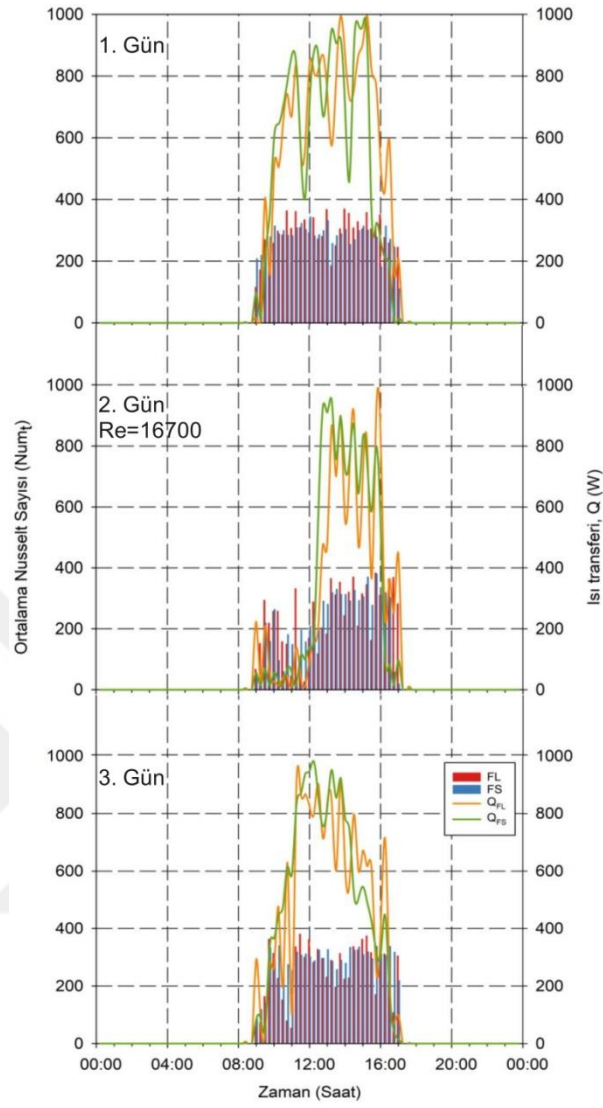


Şekil.Ek-2.2. Kollektör faydalı ısısının bina ısı yükünü karşılama oranının günün zamanına göre değişimi ($Re=16700$)

EK-3. FDM'li ve FDM'siz kollektörün $Re=8350$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi

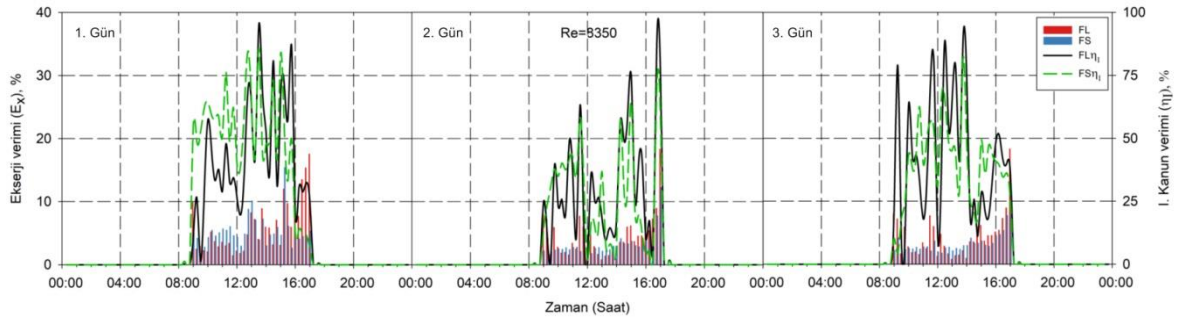


Şekil.Ek-3.1. FDM'li ve FDM'siz kollektörün $Re=8350$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi

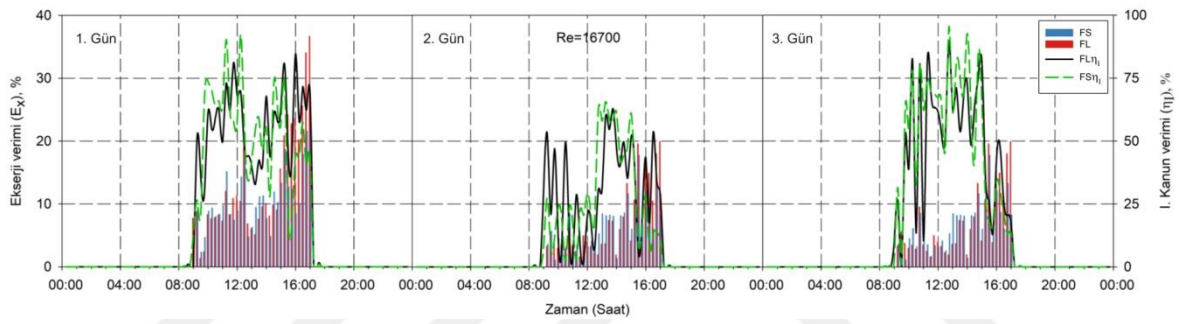


Şekil.Ek-3.2. FDM'li ve FDM'sız kollektörün $Re=16700$ için ortalama Nusselt sayısının ve ısı transferinin zamana göre değişimi

EK-4. FDM'li ve FDM'siz kollektörün belirlenen Reynolds için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değişimi

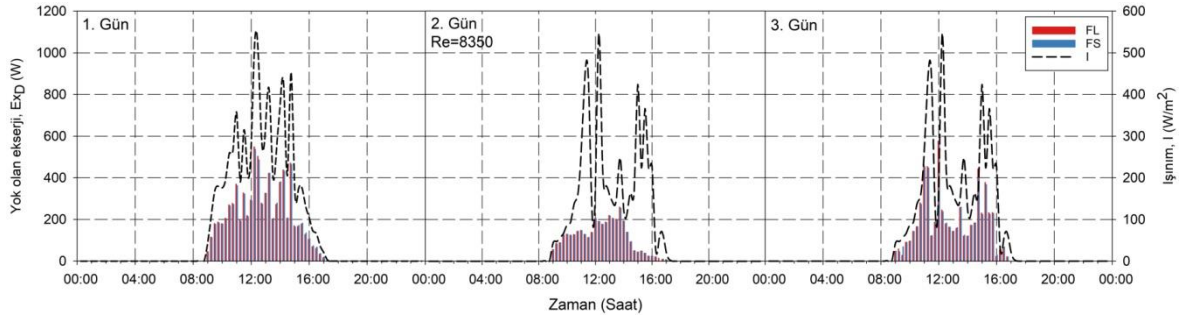


Şekil.Ek-4.1. FDM'li ve FDM'siz kollektörün Re=8350 için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değişimi

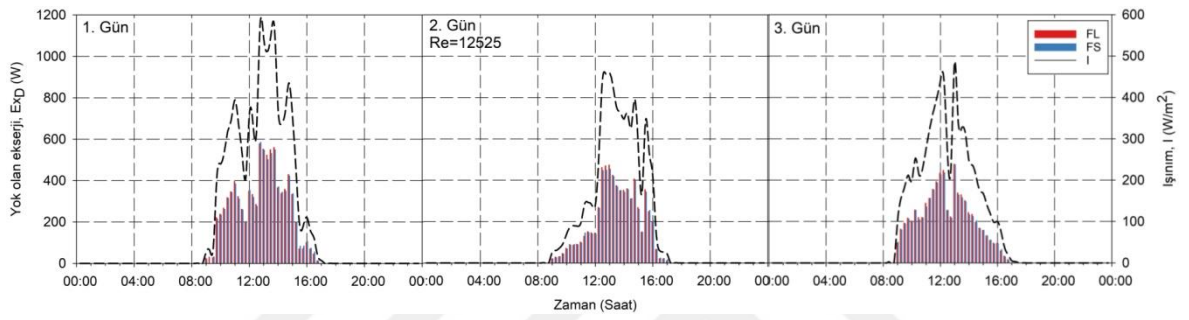


Şekil.Ek-4.2. FDM'li ve FDM'siz kollektörün Re=16700 için ortalama ekserji verimi ve I. kanun veriminin zamana göre değişimi

EK-5. Yok olan enerjinin zamana göre değişimi



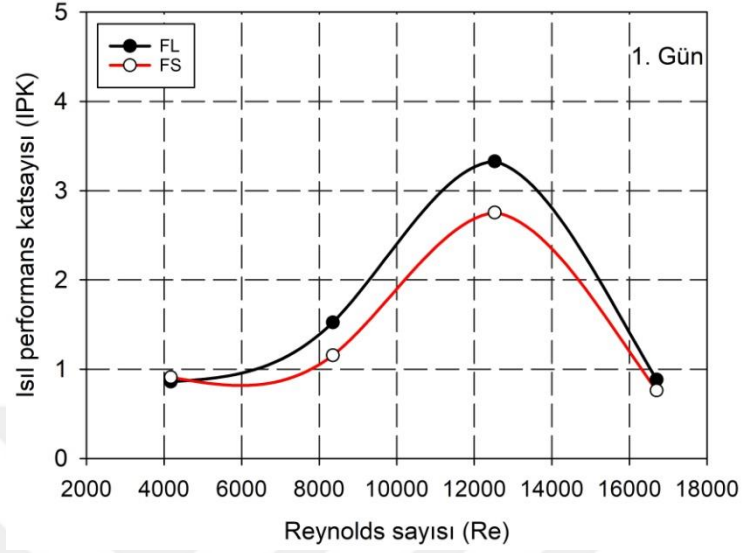
Şekil.Ek-5.1. Yok olan enerjinin zamana göre değişimi (Re=8350)



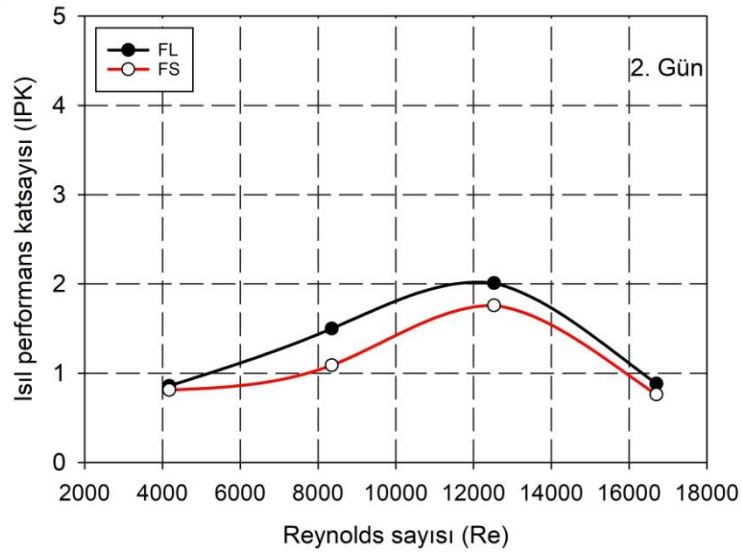
Şekil

Şekil.Ek-5.2. Yok olan enerjinin zamana göre değişimi (Re=12525)

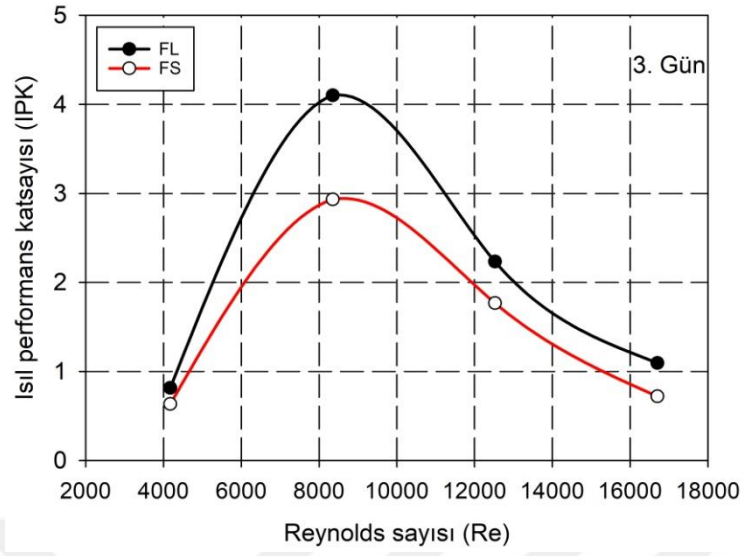
EK-6. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörlerde Isıl Performans Faktörünün (IPK) Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil.Ek-6.1. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörlerde Isıl Performans Faktörünün (IPK) Reynolds sayısına göre 1.gün değişimi

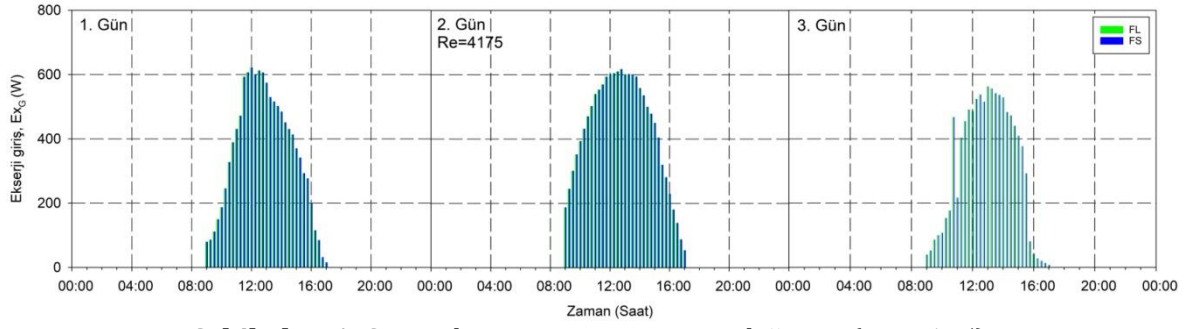


Şekil.Ek-6.2. FDM'li, FDM'siz ve boş kollektörlerde Isıl Performans Katsayısının (IPK) Reynolds sayısına göre 2.gün değişimi

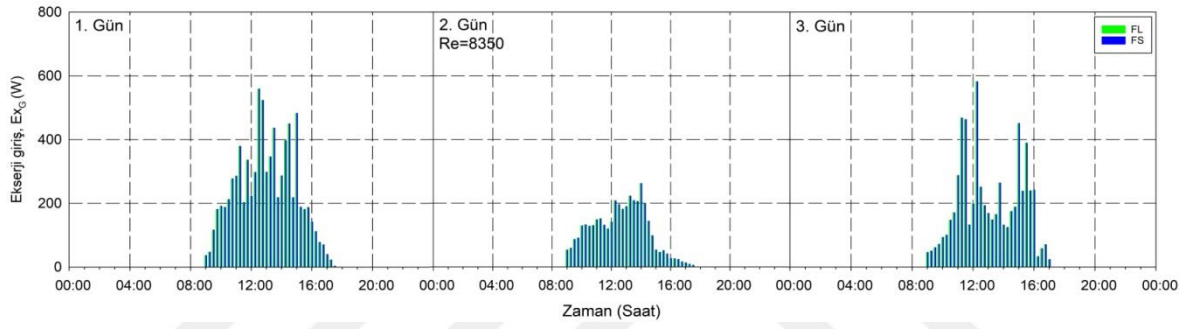


Şekil.Ek-6.3. FDM'li, FDM'siz ve boş kolektörlerde Isıl Performans Katsayısı (IPK) Reynolds sayısına göre 3.gün değişimi

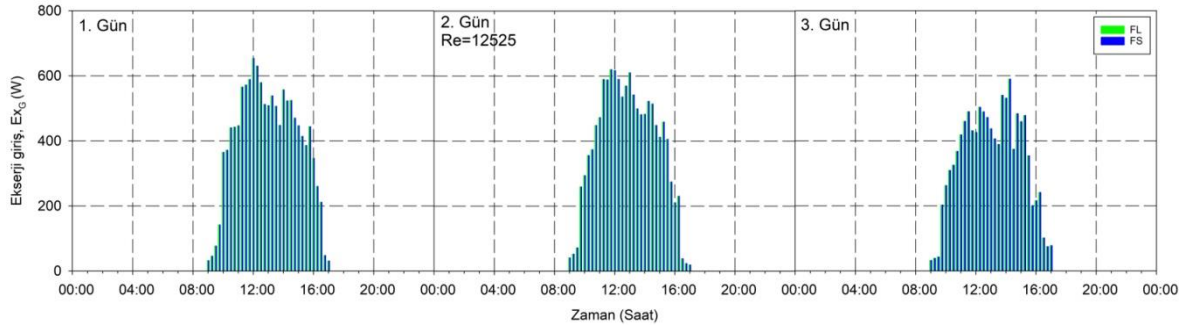
EK-7. Giren ekserjinin zamana göre değişimi



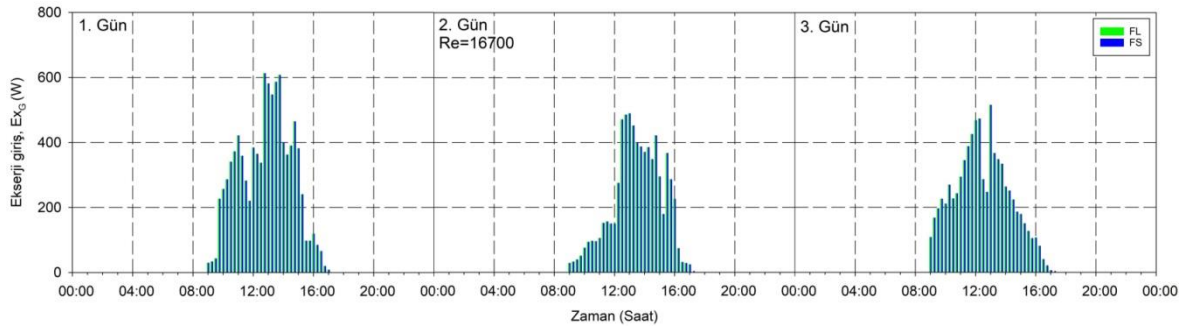
Şekil.Ek-7.1. Giren ekserjinin zamana göre değişimi (Re=4175)



Şekil.Ek-7.2. Giren ekserjinin zamana göre değişimi (Re=8350)

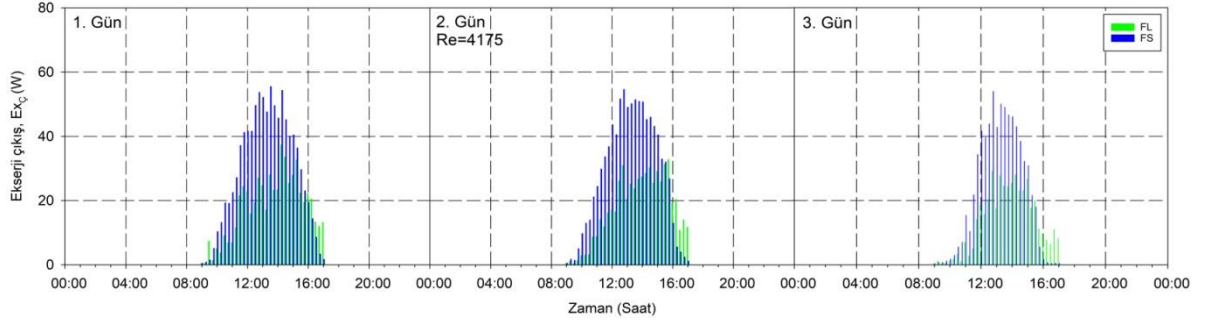


Şekil.Ek-7.3. Giren ekserjinin zamana göre değişimi (Re=12525)

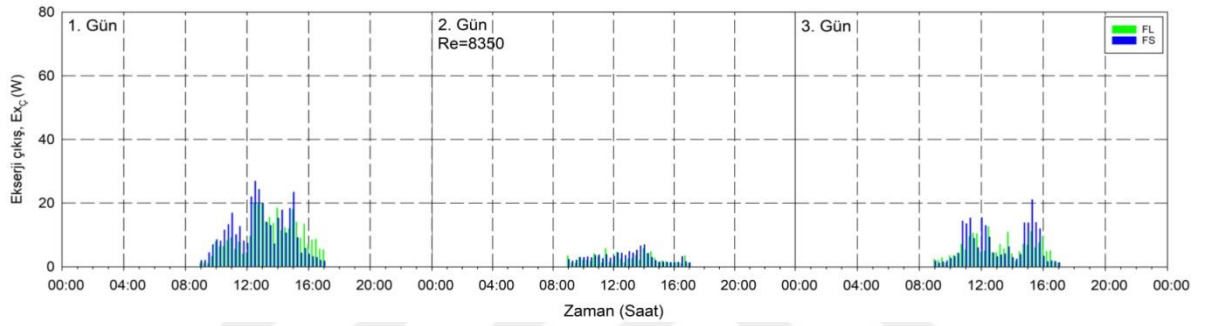


Şekil.Ek-7.4. Giren ekserjinin zamana göre değişimi (Re=167000)

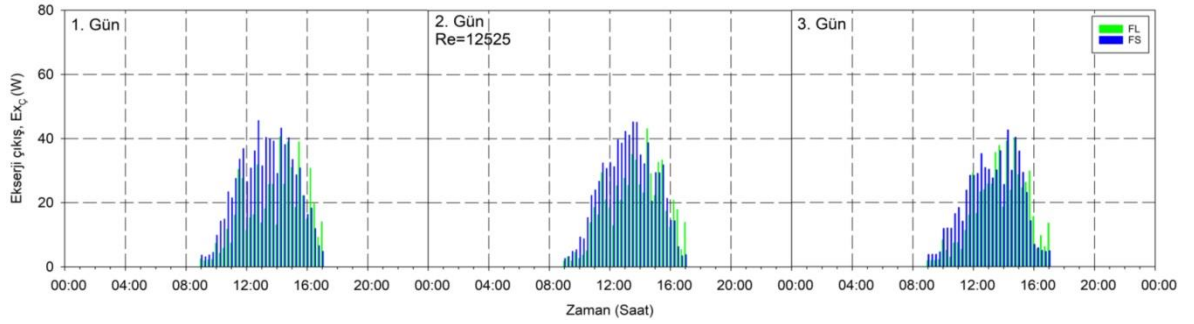
EK-8. Çıkan ekserjinin zamana göre değişimi



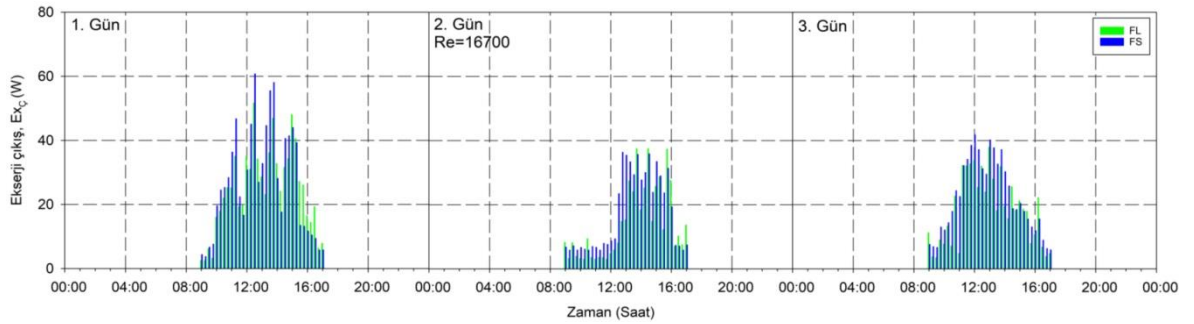
Şekil.Ek-8.1. Çıkan ekserjinin zamana göre değişimi (Re=4175)



Şekil.Ek-8.2. Çıkan ekserjinin zamana göre değişimi (Re=8350)



Şekil.Ek-8.3. Çıkan ekserjinin zamana göre değişimi (Re=12525)



Şekil.Ek-8.4. Çıkan ekserjinin zamana göre değişimi (Re=16700)

EK-9. Belirsizlik hesaplamaları

Hava kanal kesit alanı belirsizliği için Denklem **EK-9.1** kullanılmıştır.

$$AK = 0,104$$
$$\Delta AK = \sqrt{\left(\frac{\partial AK}{\partial H} \Delta H\right)^2 + \left(\frac{\partial AK}{\partial W} \Delta W\right)^2} \quad (\text{EK-9.1})$$

$$AK = \sqrt{(Wx\Delta H)^2 + (Hx\Delta W)^2}$$
$$= 0,0016209874$$

$$AK = 2x10^{-3}$$

$$AK = (1,04 \pm 0,02)x10^{-1}$$

$$AK = \%1,5$$

Yüzey alanı belirsizliği için Denklem **EK-9.2** kullanılmıştır.

$$AT = 1,16$$
$$\Delta AK = \sqrt{\left(\frac{\partial AT}{\partial L} \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial AT}{\partial W} \Delta W\right)^2} \quad (\text{EK-9.2})$$

$$AK = \Delta AK = \sqrt{\left(\frac{\partial AT}{\partial L} \Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial AT}{\partial W} \Delta W\right)^2}$$
$$= 0,0049406477$$
$$= 4,9406477x10^{-3}$$
$$= 5x10^{-3}$$

$$AT = (1,16 \pm 0,005)x10^0$$

$$AT = \%0,42$$

Hidrolik çap belirsizliği için Denklem **EK-9.3** kullanılmıştır.

$$DH = 0,223655914$$
$$\Delta DH = \sqrt{\left(\frac{\partial DH}{\partial AK} \Delta AK\right)^2 + \left(\frac{\partial DH}{\partial U} \Delta U\right)^2} \quad (\text{EK-9.3})$$

$$= \sqrt{((2/Ux\Delta AK)^2 + (-(AKx\Delta 2/U^2)x\Delta U)^2}$$
$$= 0,0034743145$$
$$= 3,4743145x10^{-3}$$
$$= 3x10^{-3}$$

$$DH = (2,24 \pm 0,03)x10^{-1}$$

$$DH = \%1,55$$

Kütlesel debi belirsizliği için Denklem **EK-9.4** kullanılmıştır.

$$\dot{m} = 0,13104$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{m} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial RO} \Delta RO\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial AK} \Delta AK\right)^2} \\ &= \sqrt{(AKxVx\Delta RO)^2 + (AKxROx\Delta V)^2 + (ROxVx\Delta AK)^2} \\ &= 0,0023735384 \\ &= 2,3735384x10^{-3} \\ &= 2x10^{-3}\end{aligned}\tag{EK-9.4}$$

$$\dot{m} = \%1,8$$

Faydalı ısı belirsizliği için Denklem **EK-9.5** kullanılmıştır.

$$QF = 2638,34$$

$$\begin{aligned}\Delta QF &= \sqrt{\left(\frac{\partial QF}{\partial M} \Delta M\right)^2 + \left(\frac{\partial QF}{\partial CP} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial QF}{\partial DT} \Delta T\right)^2} \\ &= \sqrt{(DTxCPx\Delta M)^2 + (DTxMx\Delta CP)^2 + (MxCPx\Delta DT)^2} \\ &= 48,163768953 \\ &= 4,8163768953x10^1 \\ &= 5x10^1\end{aligned}\tag{EK-9.5}$$

$$QF = (2,64 \pm 0,05)x10^3$$

$$QF = \%1,73$$

Yüzey ısısı belirsizliği için Denklem **EK-9.6** kullanılmıştır.

$$QY = 607,58016$$

$$\begin{aligned}\Delta QY &= \sqrt{\left(\frac{\partial QY}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial QY}{\partial AY} \Delta AY\right)^2 + \left(\frac{\partial QY}{\partial ALFA} \Delta ALFA\right)^2 + \left(\frac{\partial QY}{\partial TO} \Delta TO\right)^2} \\ &= \sqrt{(AYxALFAxTO. \Delta I)^2 + (IxTOxALFAx\Delta AY)^2 (IxTOxAYx\Delta ALFA)^2 + (IxAYxALFAx\Delta TO)^2} \\ &= 20,0109281656 \\ &= 2,0010928166x10^1 \\ &= 2x10^1\end{aligned}\tag{Ek-9.6}$$

$$QY = (6,1 \pm 0,2)x10^2$$

$$QY = \%3,29$$

Faydalı ısı transfer katsayısı belirsizliği için Denklem **EK-9.7** kullanılmıştır.

$$HF = 113.7068965517$$

$$\begin{aligned}\Delta HF &= \sqrt{\left(\frac{\partial HF}{\partial QF} \Delta QF\right)^2 + \left(\frac{\partial HF}{\partial AY} \Delta AY\right)^2 + \left(\frac{\partial HF}{\partial DTL} \Delta DTL\right)^2} \\ &= \sqrt{(DTL \times AY / (AY \times DTL)^2 \times \Delta QF)^2 + (- (QF / (AY \times DTL)^2 \times \Delta AY)^2 \times (QF / (AY \times DTL))^2 \times \Delta DTL)^2} \\ &= 2.2028176109 \\ &= 2.2028176109 \times 10^0 \\ &= 2 \times 10^0\end{aligned}\tag{EK-9.7}$$

$$HF = (1.14 \pm 0.02) \times 10^2$$

$$HF = \%1,93$$

Ortalama Nusselt sayısı belirsizliği için Denklem **EK-9.8** kullanılmıştır.

$$Num = 969.1923076923$$

$$\begin{aligned}\Delta Num &= \sqrt{\left(\frac{\partial Num}{\partial HF} \Delta HF\right)^2 + \left(\frac{\partial Num}{\partial DH} \Delta DH\right)^2 + \left(\frac{\partial Num}{\partial K} \Delta K\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{DH}{K} \times \Delta HF\right)^2 + (HF / K \times \Delta DH)^2 + (- (HF / K^2 \times DH) \times \Delta K)^2} \\ &= 44.3165010156 \\ &= 4.4316501016 \times 10^1 \\ &= 4 \times 10^1\end{aligned}\tag{EK-9.8}$$

$$Num = \%4,57$$

Reynold sayısı için Denklem **EK-9.9** kullanılmıştır.

$$RE = 14252.6086956522$$

$$\begin{aligned}\Delta RE &= \sqrt{\left(\frac{\partial RE}{\partial RO} \Delta RO\right)^2 + \left(\frac{\partial RE}{\partial DH} \Delta DH\right)^2 + \left(\frac{\partial RE}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial RE}{\partial MU} \Delta MU\right)^2} \\ &= \sqrt{(DH \times V / MU \times \Delta RO)^2 + (RO \times V / MU \times \Delta DH)^2 + (DH \times RO / MU \times \Delta V)^2 + (- (RO / MU^2 \times DH \times V) \times \Delta MU)^2} \\ &= 348.0568422228 \\ &= 3.4805684222 \times 10^2 \\ &= 3 \times 10^2\end{aligned}\tag{EK-9.9}$$

$$RE = \%2,4$$

Verim belirsizliği için Denklem **EK-9.10** kullanılmıştır.

$$ITA = 0.7176954733$$

$$\begin{aligned}\Delta ITA &= \sqrt{\left(\frac{\partial ITA}{\partial QF} \Delta QF\right)^2 + \left(\frac{\partial ITA}{\partial QY} \Delta QY\right)^2} \\ &= \sqrt{(1/QY \Delta QF)^2 + (- (QF/QY)^2 + \Delta QY)^2} \\ &= 0.266893323 \\ &= 2.66893323 \times 10^{-2} \\ &= 3 \times 10^{-2}\end{aligned} \quad (\text{EK-9.10})$$

$$ITA = (7.2 \pm 0.3) \times 10^{-1}$$

$$ITA = \%3,66$$

Ekserji belirsizliği için Denklem **EK-9.11** kullanılmıştır.

$$ExGY = 97.2544$$

$$\begin{aligned}\Delta ExGY &= \sqrt{\left(\frac{\partial ExGY}{\partial ITA} \Delta ITA\right)^2 + \left(\frac{\partial ExGY}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial ExGY}{\partial AY} \Delta AY\right)^2 + \left(\frac{\partial ExGY}{\partial T\dot{C}V} \Delta T\dot{C}V\right)^2 + \left(\frac{\partial ExGY}{\partial T} \Delta T\right)^2} \\ &= \sqrt{(IAY \Delta ITA)^2 + (ITAxAY \Delta I)^2 + (ITAxIx \Delta AY)^2 + (0x\Delta T\dot{C}V)^2 + (0x\Delta T)^2} \\ &= 1.9788129355 \\ &= 1.9788129355 \times 10^0 \\ &= 2 \times 10^{20}\end{aligned} \quad (\text{EK-9.11})$$

$$ExGY = \%3,66$$

