



**GÜNEŞ IŞINIMI ALTINDA FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMENİN ISI
DEPOLAMA DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Mehmet Emin CANLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2017

Mehmet Emin CANLI tarafından hazırlanan “GÜNEŞ IŞINIMI ALTINDA FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMENİN ISI DEPOLAMA DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Ekin ÖZGİRGİN YAPICI

Makine Mühendisliği, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Emin CANLI

19/06/2017

GÜNEŞ IŞINIMI ALTINDA FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMENİN ISI DEPOLAMA DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Emin CANLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2017

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yapay güneş ışıını altında organik faz değıştiren malzeme olarak kullanılan parafinin ısı depolama davranışını laboratuvar koşullarında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, bakır malzemeden imal edilmiş bir termal enerji depolama ünitesi (TEDÜ) tasarlanmıştır. Kızılötesi bir lamba aracılığıyla elde edilen $q=800, 900$ ve 1000W/m^2 değeriindeki üç farklı güneş ışıını, 1mm kalınlığındaki bakır malzemeden imal edilmiş emici yüzeye sahip TEDÜ üzerine uygulanmıştır. Parafin waxın düşük ısı iletimi sorununu bertaraf etmek için kanatsız ve $t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlıklarındaki $n=3, 5$ ve 7 adet kanat emici yüzeyin altına, parafinin depolandığı TEDÜ hacmi içerisine yerleştirilmiştir. Isıl enerji depolanması sırasında, kanat sayısının ve kalınlığının parafinin ergime ve katılaşma süresi üzerine olan etkileri incelenmiştir. Kanat sayısının artması parafinin ergime süresini kısaltırken, kanat kalınlığının artması ergime süresinin uzamasına neden olmuştur. Kanatsız ve kanatlı TEDÜ’lerdeki faz değıştiren malzemenin ergime süreleri karşılaştırılarak zamana bağıli iyileştirme oranı (ZBİÖ) tanımlanmıştır. En yüksek ZBİÖ $t=1\text{mm}$, $n=7$ kanattan oluşan ve $q=1000\text{W/m}^2$ güneş ışıını altındaki enerji depolama ünitesinde 1,82 olarak bulunmuştur. Bunun yanında, farklı geometrilerde tasarlanmış olan TEDÜ’lerin depolamış oldukları ısı enerji miktarı hesaplanmış ve sonrasında, her bir ünitenin depolamış olduğu ısı güç bulunmuştur. Kanatlı ve kanatsız TEDÜ’lerin depolamış oldukları ısı güçler karşılaştırılarak ısı güç iyileştirme oranı (IGİÖ) elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, ZBİÖ ve IGİÖ değeriinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. En yüksek IGİÖ değeri $t=1\text{mm}$, $n=7$ kanatlı ve $q=1000\text{W/m}^2$ ışıını altındaki enerji depolama ünitesinde 1,67 olarak hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 92802

Anahtar Kelimeler : Termal enerji depolama, gizli ısı depolama, faz değıştiren malzeme, iyileştirme oranı

Sayfa Adedi : 120

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT STORAGE BEHAVIOUR IN A PHASE CHANGE MATERIAL UNDER SOLAR RADIATION

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Emin CANLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2017

ABSTRACT

In this thesis, the heat storage behavior of paraffin which is used as organic phase change material under artificial solar radiation was experimentally investigated in laboratory conditions. In the scope of the experimental study, a thermal energy storage unit (TESU) made of copper material was designed. In the experimental study, three different solar radiation with $q=800, 900$ and 1000W/m^2 , obtained by means of infrared lamp, were applied on TESU with the absorber plate made of 1mm thick copper material. In order to avoid the low heat conduction problem of paraffin wax, $n=3, 5$ and 7 fins at $t=1, 1,5$ and 2mm thickness were placed under the absorber plate inside the volume of TESU which paraffin was stored in. During the storage of thermal energy, the effects of fin number and thickness on melting and solidification time of paraffin wax were investigated. The increase in the number of fins shortened the melting time of paraffin, but the increase in fin thickness caused the prolongation of the melting time. The time dependent enhancement ratio (TDER) was defined by comparing the melting time of the phase change material in the finless and finned TESUs. The highest TDER was found as $1,82$ in the energy storage unit with $t=1\text{mm}$, $n=7$ fins and under $q=1000\text{W/m}^2$ solar radiation. In addition, the amount of stored thermal energy by TESUs designed in different geometries was calculated and then, the stored thermal power by each unit was found. The thermal power enhancement ratio (TPER) was obtained by comparing the thermal power stored by the finned and finless TESUs. As a result of the study, it was seen that the TDER and TPER values were in good agreement with each other. The highest TPER was calculated as $1,67$ in the energy storage unit with $t=1\text{mm}$, $n=7$ fins and under $q=1000\text{W/m}^2$ solar insolation .

Science Code : 92802

Key Words : Thermal energy storage, latent heat storage, phase change materials, enhancement ratio

Page Number : 120

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında, çalışma konusunun belirlenmesinde bana tecrübe ve birikimlerini aktaran ve ortaya çıkan problemlerde bana bilgi birikimiyle yol gösterici olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Adem ACIR' a, çalışmama katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ' a, ayrıca deney düzeneğinin hazırlanması aşamasında metal malzemelerin temin edilmesine yardımcı olan dostum Makine Mühendisi Ahmet BÜNGÜŞ' e teşekkür ederim.

Araştırma görevlisi olarak bu mesleğe adım attığım günden beri yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen iş arkadaşlarıma ve özellikle Sayın Arş. Gör. Himmet Erdi TANÜRÜN' e minnetlerimi sunarım.

Ayrıca bu zamana kadar bana her türlü maddi ve manevi desteğini veren aileme ve her zor anımda bana olan inancını kaybetmeyen ve beni hep destekleyen sevgili eşim ve hayat arkadaşım Sayın Arş. Gör. Elif Süreyya KANYILMAZ CANLI' ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ DEPOLAMA	13
2.1. Mekanik Enerji Depolama	14
2.2. Kimyasal Enerji Depolama	14
2.3. Biyolojik Depolama	15
2.4. Manyetik Depolama.....	15
2.5. Termal Enerji Depolama.....	15
2.5.1. Termal enerji depolamanın faydaları	18
2.5.2. Duyulur ısı depolama	18
2.5.3. Gizli ısı depolama	20
3. MATERYAL - METOT	37
3.1. Materyal	37
3.1.1. Termal enerji depolama ünitesi.....	38
3.1.2. Işınım kaynağı ve kontrol ünitesi.....	48
3.1.3. Veri toplama ünitesi.....	52

	Sayfa
3.2. Metot	53
3.2.1. Depolanan enerji miktarının hesaplanması	55
3.2.2. Depolanan ısıl güç miktarının hesaplanması	59
3.3. Belirsizlik Analizi	59
3.3.1. Toplam duyulur ısı için belirsizlik	61
3.3.2. Toplam gizli ısı için belirsizlik	61
3.3.3. Toplam ısıl güç için belirsizlik	61
4. BULGULAR - TARTIŞMA.....	63
4.1. Zamana Bağlı Sıcaklık Dağılımı.....	63
4.1.1. Tip-I (kanatsız) için sıcaklık dağılımı.....	63
4.1.2. Tip-II (n=3. t=1mm) için sıcaklık dağılımı.....	65
4.1.3. Tip-III (n=3. t=1,5mm) için sıcaklık dağılımı	66
4.1.4. Tip-IV (n=3. t=2mm) için sıcaklık dağılımı	67
4.1.5. Tip-V (n=5. t=1mm) için sıcaklık dağılımı	70
4.1.6. Tip-VI (n=5. t=1,5mm) için sıcaklık dağılımı	71
4.1.7. Tip-VII (n=5. t=2mm) için sıcaklık dağılımı.....	72
4.1.8. Tip-VIII (n=7. t=1mm) için sıcaklık dağılımı	75
4.1.9. Tip-IX (n=7. t=1,5mm) için sıcaklık dağılımı	76
4.1.10. Tip-X (n=7. t=2mm) için sıcaklık dağılımı	77
4.1.11. Termal kamera görüntüleri	80
4.2. Kanat Kullanımının Enerji Depolama Süresine Etkisi	86
4.3. Depolanan Enerji Miktarı	94
4.4. Depolanan Isıl Güç Miktarı	98
5. SONUÇ - ÖNERİLER.....	109

	Sayfa
5.1. Sonuçlar	109
5.2. neriler	111
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	119



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gizli ısı ve duyulur ısı şeklinde enerji depolama ortamlarına örnekler.....	17
Çizelge 2.2. Enerji depolama teknolojilerinin anahtar özelliklerinin karşılaştırılması ...	17
Çizelge 2.3. Duyulur ısı depolama	19
Çizelge 2.4. Karbon atomu sayısının ergime derecesi ve gizli ısı değerine etkisi	26
Çizelge 2.5. FDM olarak kullanılan bazı parafinlerin termo-fiziksel özellikleri.....	27
Çizelge 2.6. FDM olarak kullanılan bazı yağ asitlerinin termo-fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 2.7. FDM olarak kullanılan bazı şeker alkollerin termo-fiziksel özellikleri	30
Çizelge 2.8. FDM olarak kullanılan bazı glikollerin termo-fiziksel özellikleri.....	31
Çizelge 2.9. FDM olarak kullanılan bazı tuz hidratların termo-fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 2.10. FDM olarak kullanılan bazı tuzların termo-fiziksel özellikleri	34
Çizelge 2.11. FDM olarak kullanılan bazı metal ve metal alaşımlarının termo-fiziksel özellikleri.....	35
Çizelge 2.12. FDM olarak kullanılan bazı ötektik malzemelerin termo-fiziksel özellikleri.....	36
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan emici yüzeylerin tasarım ölçüleri	40
Çizelge 3.2. TEDÜ’de kullanılan bakırın termo-fiziksel özellikleri	42
Çizelge 3.3. TEDÜ’de kullanılan parafin waxın termo-fiziksel özellikleri	42
Çizelge 3.4. Ölçüm ve hesaplama belirsizlikleri	62
Çizelge 4.1. n=3 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki ZBİÖ değerleri	88
Çizelge 4.2. n=5 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki ZBİÖ değerleri	89
Çizelge 4.3. n=7 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki ZBİÖ değerleri	91
Çizelge 4.4. Her bir TEDÜ tarafından depolanan enerji miktarı	95
Çizelge 4.5. Her bir TEDÜ tarafından depolanan ısı güç miktarı	98
Çizelge 4.6. n=3 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki IGİÖ değerleri	100

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.7. n=5 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki IGİO değerleri	101
Çizelge 4.8. n=7 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki IGİO değerleri	103
Çizelge 4.9. Deneysel sonuçlara göre elde edilen optimum kanat sayısı, kanat kalınlığı, ZBİO ve IGİO değerleri	106



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. a) TEP cinsinden yıllara bağlı birincil enerji tüketim miktarları, b) Yıllara bağlı birincil enerji tüketim oranları	1
Şekil 2.1. Enerji depolama yöntemleri.....	14
Şekil 2.2. Termal enerji depolama teknikleri.....	16
Şekil 2.3. Bir katı-sıvı faz değişiminde enerji depolanması	21
Şekil 2.4. FDM sınıflandırılması	22
Şekil 2.5. Gizli ısı depolama malzemelerinin sınıflandırılması.....	25
Şekil 3.1. Şematik deney düzeneği	37
Şekil 3.2. a) n=3 kanatlı, b) n=5 kanatlı, c) n=7 kanatlı FDM deposu CAD tasarımları	39
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan parafine ait DSC analiz grafiği	44
Şekil 3.4. TEDÜ içindeki ısı çift konumları, a) Boş (kanatsız) TEDÜ, b) n=3 kanatlı TEDÜ, c) n=5 kanatlı TEDÜ, d) n=7 kanatlı TEDÜ.....	47
Şekil 3.5. Işınım şiddeti haritası.....	50
Şekil 4.1. Tip-I için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	64
Şekil 4.2. Tip-II için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	65
Şekil 4.3. Tip-III için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	67
Şekil 4.4. Tip-IV için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	68
Şekil 4.5. Tip-I, Tip-II, Tip-III ve Tip-IV için ısınım şiddetiyle FDM ergime süresi değişiminin karşılaştırılması	69
Şekil 4.6. Tip-V için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	70
Şekil 4.7. Tip-VI için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	72

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Tip-VII için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	73
Şekil 4.9. Tip-I, Tip-V, Tip-VI ve Tip-VII için ısıtım şiddetiyle FDM ergime süresi değişiminin karşılaştırılması	74
Şekil 4.10. Tip-VIII için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	75
Şekil 4.11. Tip-IX için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	77
Şekil 4.12. Tip-X için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m ² , b) 900W/m ² , c) 1000W/m ²	78
Şekil 4.13. Tip-I, Tip-VIII, Tip-IX ve Tip-X için ısıtım şiddetiyle FDM ergime süresi değişiminin karşılaştırılması	79
Şekil 4.14. 3 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO’ya etkisi.....	88
Şekil 4.15. 5 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO’ya etkisi.....	90
Şekil 4.16. 7 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO’ya etkisi.....	91
Şekil 4.17. t=1mm sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin ZBİO’ya etkisi	92
Şekil 4.18. t=1,5mm sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin ZBİO’ya etkisi	93
Şekil 4.19. t=2mm sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin ZBİO’ya etkisi	94
Şekil 4.20. 3 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin IGİO’ya etkisi.....	100
Şekil 4.21. 5 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin IGİO’ya etkisi.....	102
Şekil 4.22. 7 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin IGİO’ya etkisi.....	103
Şekil 4.23. t=1mm sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin IGİO’ya etkisi	104

Şekil	Sayfa
Şekil 4.24. $t=1,5\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin IGİO'ya etkisi	105
Şekil 4.25. $t=2\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin IGİO'ya etkisi	106



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Gerçek deney düzeneği, a) Işık kaynağı açık durumda, b) Işık kaynağı kapalı durumda	40
Resim 3.2. İmal edilen kanatlı emici yüzeyler	42
Resim 3.3. Mat siyah boya ile boyanmış emici yüzey	43
Resim 3.4. Deneylerde kullanılan TEDÜ	47
Resim 3.5. E-TC15-K-K30-TT ürün kodlu K tipi ısı çift.....	48
Resim 3.6. Deneylerde kullanılan kızılötesi (infrared) lamba.....	50
Resim 3.7. Güneş ışımasını ölçer (KIMO SL-100)	51
Resim 3.8. Dimmer	52
Resim 3.9. 3 zamanlı elektrik sayacı	53
Resim 3.10. ELIMKO E-680 tipi veri kaydedici (datalogger)	54
Resim 3.11. HP masaüstü bilgisayar	54
Resim 3.12. Datalogger sıcaklık yazılımı	54
Resim 4.1. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 0 ve 15dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	83
Resim 4.2. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 30 ve 45dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	83
Resim 4.3. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 60 ve 75dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	84
Resim 4.4. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 90 ve 105dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	85
Resim 4.5. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 105 ve 135dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	85
Resim 4.6. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 0 ve 30dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	86
Resim 4.7. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 60 ve 90dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	87

Resim	Sayfa
Resim 4.8. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 120 ve 1500dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	88
Resim 4.9. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 180 ve 210dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri	89



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

a_m	Ergiyen malzeme kesri
c_{ey}	Emici yüzeyin özgül ısısı (kJ/kgK)
c_p	Sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kgK)
c_k	Kanadın özgül ısısı (kJ/kgK)
c_{lp}	Sıvı fazın özgül ısısı (kJ/kgK)
c_p	Parafinin özgül ısısı (kJ/kgK)
c_{sp}	Katı fazın özgül ısısı (kJ/kgK)
Δh_m	Ergime entalpisi (kJ/kg)
Δt	Zaman (s)
m	Kütle (kg)
m_{ey}	Emici yüzey kütlesi (kg)
m_k	Kanat kütlesi (kg)
m_p	Parafin kütlesi (kg)
n	Kanat sayısı (-)
t	Kanat kalınlığı (mm)
T_i	Enerji depolama öncesi sıcaklık (°C)
T_f	Enerji depolama sonrası sıcaklık (°C)
T_m	Faz değiştiren malzemenin ergime sıcaklığı (°C)

Kısaltmalar

Açıklamalar

BP	British Petroleum
DID	Duyulu ısı depolama
EMK	Elektro motor kuvveti
FDM	Faz değiştiren malzeme

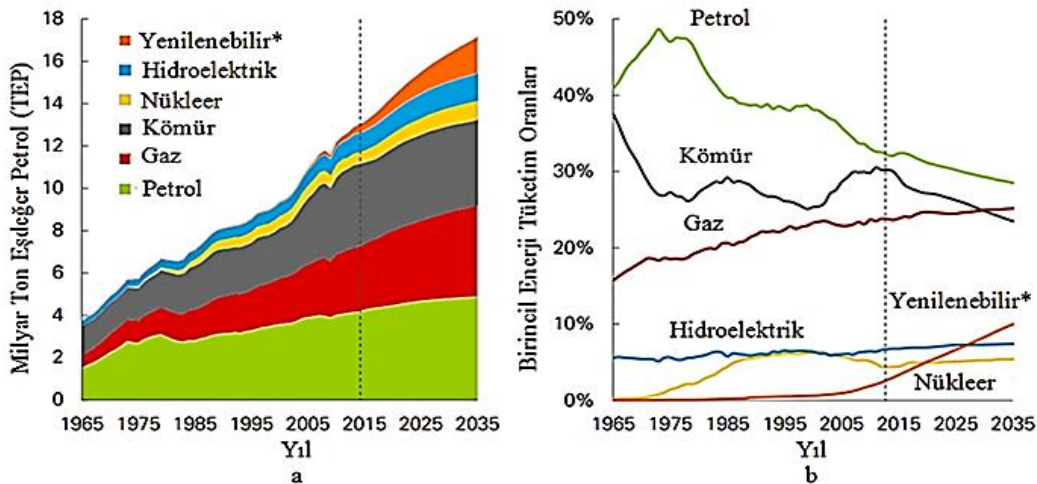
Kısaltmalar**Açıklamalar**

GİD	Gizli ısı depolama
İGİÖ	Isıl güç iyileştirme oranı
PCM	Phase change material
PEG	Polietilen glikol
PEO	Polietilen oksit
POE	Polioksietilen
TDER	Time dependent enhancement ratio
TED	Termal enerji depolama
TEDÜ	Termal enerji depolama ünitesi
TEP	Ton eşdeğer petrol
TESU	Thermal energy storage unit
TESUs	Thermal energy storage units
TM	Ticari marka
TPER	Thermal power enhancement ratio
UEA	Uluslararası Enerji Ajansı
VTÜ	Veri toplama ünitesi
ZBİÖ	Zamana bağlı iyileştirme oranı

1. GİRİŞ

Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri ile enerji tüketim oranlarının doğrusal olduğu günümüzde üretim yapabilmek ve yaşamı kolaylaştırıcı faaliyetleri sürdürebilmek için enerji talebinin karşılanması gerekmektedir. Bu talebin karşılanmasında, yenilenemez (tükenen) ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) biyoenerji, jeotermal, hidroelektrik, okyanus, güneş ve rüzgâr enerjilerini yenilenebilir, bunun yanında ham petrol, doğal gaz, kömür ve nükleer enerjiyi ise yenilemez enerji kaynakları olarak sınıflandırmaktadır [1]. Bu kaynaklardan elde edilen enerji genel olarak elektrik enerjisi, ısıtma, soğutma ve üretim faaliyetlerini sürdürmek amacıyla kullanılmaktadır.

British Petroleum (BP) firması tarafından hazırlanmış olan Outlook 2017 çalışmasına göre dünya nüfusunun tüketmekte olduğu birincil enerji kaynaklarının milyar TEP cinsinden yıllara göre değişimi Şekil 1.1’de verilmiştir. Şekil 1.1 incelendiğinde birincil enerji kaynakları içerisinde en büyük oran fosil kaynaklara aittir. Raporda yer alan gelecek planlarında, birincil enerji tüketim oranlarındaki fosil kaynaklardan elde edilen enerjinin payında, yenilenebilir, nükleer ve hidroelektrik kaynaklardan elde edilecek enerjideki artışa bağlı olarak kademeli bir düşüş meydana geleceği öngörülmektedir. Aynı raporda, birincil enerji tüketim oranları içerisindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının 2015 yılındaki %3 oranının, 2035 yılında %10 seviyelerine ulaşması beklenmektedir [2].



Şekil 1.1. a) TEP cinsinden yıllara bağlı birincil enerji tüketim miktarları, b) Yıllara bağlı birincil enerji tüketim oranları [2]

Mevcut enerji tüketim ve üretim miktarları arasında, fosil enerji kaynaklarının oranı yüksektir. Fakat üzerinde yaşamakta olduğumuz Dünya için olumsuz yönleri bulunmaktadır. Fosil kaynakların kullanımı sonucu atmosferde karbon dioksit (CO_2), metan (CH_4) vb. gazlarının miktarı artmakta ve bu artış küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Küresel ısınma, Güneş' den gelen ışıının yeryüzü tarafından geri yansıtılan kısmının atmosferde biriken CO_2 tarafından tutulması ve buna bağlı olarak atmosfer sıcaklığının artmasıdır [3]. Fosil yakıtların bu olumsuzluğunu bertaraf etmek için, araştırmacılar tarafından farklı enerji kaynakları bulma konusunda uğraş verilmektedir. Ayrıca kullanılmakta olan mevcut sistemlerin daha verimli ve güvenli çalışması için gerekli düzenlemeler yapılmakta ve bir farkındalık oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda CO_2 salınım değerlerinin düşürülmesi konusunda ilk somut örnek, 1992 yılında İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin kabul edilip; 1994 yılında yürürlüğe girmiş olmasıdır. Bu sözleşmeye imza atan ülkeler, sera gazları salınım değerlerini, yapacakları ulusal çalışmalarla 1990 yılı seviyesine düşürmeyi ve geliştirmekte olan ülkelere kendilerinin kullanmakta olduğu gelişmiş sistemlerin kurulumu için teknolojik ve mali kaynak aktarmayı kabul etmişlerdir [3].

Yapılan bu çalışmalar fosil kaynaklı enerji üretim sistemlerinin mevcut enerji arzı içinde kullanılabilirliğini iyileştirmeye ve kullanımları sonucu ortaya çıkan olumsuzlukları bertaraf etmeye yöneliktir. Fakat fosil kaynakların doğaya vermiş oldukları zararı yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak bertaraf etmek daha umut verici sonuçlar ortaya çıkaracaktır. Bu açıdan bakıldığında, doğa bize karşılıksız olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğa dostu olmalarıyla birlikte çok az atık ürün meydana getirmelerinden dolayı enerji talebinin karşılanmasında mevcut sistem içerisinde her geçen gün daha fazla kullanım alanına sahip olmaktadır.

Isı ve ışık formundaki en bol yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin atmosferden geçerek Dünya'ya gelen toplam $3,8 \times 10^{23}$ kW'lık gücünün, $1,8 \times 10^{14}$ kW kadarlık miktarı yeryüzü tarafından emilmekte diğer kısmı ise yansıtılmaktadır. Güneş enerjisinin en muhtemel uygulamaları özellikle kış sezonunda ortam ısıtması için tüketilen enerjinin azaltılmasına yardımcı olan güneş enerjisi destekli bina ısıtma sistemleri, tarım, tekstil ve deniz ürünlerinin kurutulması için sıcak havanın temin edilmesi, kışın kullanım amacının aksine yazın da gerekli ortamların soğutulması için tercih edilmesidir. Bunun yanında fotovoltaiik sistemlerin kullanımıyla da bu enerjiden elektrik elde edilmesidir [4].

Güneş enerjisini de içinde bulunduran çoğu yenilenebilir enerji kaynağının dezavantajı ise kesintili olmasıdır. Ayrıca yer, hava, ortam ve zamana bağlı olarak değişkenlik göstermesidir [4-36]. Bu olumsuz yönlerini bertaraf etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin sonraki kullanımlar için depolanması gerekmektedir [5]. Enerji depolama sadece arz ve talep arasındaki uyumsuzluğu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji sistemlerinin performansını ve güvenilirliğini geliştirmede ve enerjinin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Enerji depolama uygulamalarında çoğunlukla mekanik, kimyasal, elektrik ve ısı enerjisi depolama türleri tercih edilmektedir. Güneş enerjisi açısından bakıldığında ısı enerjisi depolama teknikleri ön plana çıkmaktadır. Isı enerjisi depolama, duyulur ve gizli ısı formunda olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır [5,22,31,32].

Duyulur ısı

Maddede faz değişimine neden olmadan sıcaklığını arttırmak veya azaltmak için gerekli olan ısı miktarıdır.

Gizli ısı

Bir maddenin sabit sıcaklık ve basınçta faz değişimi sırasında aldığı veya verdiği ısı miktarıdır.

Duyulur ve gizli ısı formunda enerji depolamak için depolama malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. En çok tercih edilen duyulur ısı depolama malzemesi su iken; gizli ısı depolama da ise faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanılmaktadır. Suyun kullanılması ile güneşin var olduğu gündüz saatlerinde su ısıtılmakta ve gece saatlerinde de bir tanka depolanmış bu sıcak su örneğin evsel kullanım amacıyla kullanılabilir. Fakat gizli ısı depolama yöntemine göre birim kütle başına daha az miktarda ve kısa süreli enerji depolanabilmektedir.

FDM genel olarak katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz hal değişimlerine sahiptir. En çok kullanılan FDM malzemesi, C_nH_{2n+2} kimyasal formülüne sahip alkanlar olarak ifade edilen parafinlerdir [5, 16-40]. Parafinlerin kimyasal olarak kararlı olması, metaller

üzerinde korozif etki göstermemesi ve uzun kullanım döngülerine sahip olması, gizli ısı formunda enerji depolama çalışmalarında kullanılmasının ana sebepleri olarak gösterilebilir. Bunun dışında birçok madde de FDM olarak kullanılmaktadır.

Kullanım oranı her geçen gün artan güneş enerjisi sistemlerine enerji depolama ünitelerinin dâhil edilmesiyle daha güvenli ve daha verimli çalışma şartları sağlanmaktadır. Güneş enerjisinin duyulur ve gizli ısı formunda depolanmasına yönelik birçok araştırmacı tarafından çalışma yürütülmektedir. Literatürde bulunan deneysel ve teorik çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

Fath, hava akışkanlı güneş kolektörlerinde enerji depolanması üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında, geleneksel düzlemsel tip hava akışkanlı güneş kolektörü ile bakır borulardan imal ettiği emici yüzeye sahip iki farkı yapıyı karşılaştırmıştır. Ayrıca bakır boruların içerisinde FDM olarak glauber tuzu ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve ticari olarak imal edilen parafin wax (Sunoco- P116) bulunması ve bulunmaması durumlarının kolektör performansına olan etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu basit tasarımla, hava akışkanlı güneş kolektörünün 0,01kg/s kütleli hava debisinde 21 saat süreyle sıcak hava temin etmesinin mümkün olduğu sonucuna varmıştır [6].

Benzer şekilde Enibe, FDM ile enerji depolamak için doğal sirkülasyonlu ısı geçişine sahip düzlemsel yüzeyli hava akışkanlı bir güneş kolektörünün performans incelemesini yapmıştır. Enerji depolamak amacıyla kolektöre entegre ettiği FDM'yi makro kapsül yöntemiyle belirli bir hacmin içerisine doldurmuş ve kolektörü gündüz şartlarında test etmiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmayla, 0,058kg/s kütleli hava debisinde ve maksimum kullanılabilir verimin %22 olması durumunda, kolektörden elde edilen havanın sıcaklığındaki artışın 15 K olduğu bilgisine ulaşmıştır. Bu sıcaklık değerine sahip havanın da tarımsal ürün kurutma veya yumurta kuluçka makinelerinde kullanılabileceğini ifade etmiştir [7].

Saman ve diğerleri tarafından bir evin ısıtılması için ısı enerjisi depolamalı çatıya entegreli güneş enerjili ısıtma sistemi tasarımı yapılmıştır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmada, hava akışkanlı güneş kolektöründen elde ettikleri sıcak havayı, makro kapsül haline getirilmiş FDM kapsüllerinden oluşan depo içerisinden geçirerek FDM'nin duyulur ve gizli ısı depolamasını sağlamışlardır. Sonrasında ortamı ısıtmak için kullanılan hava

öncelikle bu enerji depolama ünitesinden geçirilmiş ve böylece FDM üzerinde depolanmış olan ısı enerjisinin havaya aktarılmasıyla geri kazanılması sağlanmıştır. Böylece FDM üzerinde depolanmış olan ısı enerjisi, iç ortamın ısıtılması aşamasında ısı kaynağı olarak görev yapmıştır [8].

Mettawee ve Assassa, gizli ısı depolama malzemelerinden olan parafin wax entegre edilmiş güneş kolektörüyle su ısıtma amacıyla deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, su debisinin ve güneş ışınım şiddeti değişiminin ısı enerjisi depolanması ve geri kazanılması üzerine olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi emici yüzey arkasına bir FDM deposu yerleştirilerek gizli ve duyulur ısı formunda depolanmıştır. Enerji depolama işlemi süresince katı haldeki parafin wax eriyerek sıvı faza geçmiştir. Akşam saatlerinde güneş ışınımının azaldığı ve güneş enerjisinin yaklaşık sıfır olduğu durumda ise sıvı fazdaki parafin wax katılaşıp bünyesinde depolanmış olduğu gizli ve duyulur ısıyı FDM deposunun orta kısmına yerleştirilmiş olan bakır boru içerisinden geçen soğuk suya aktarmıştır. Deneysel çalışmada ısının depolanması aşamasında, katı haldeki FDM içerisinde iletimle ısı geçişine ek olarak faz değişimini izleyen süreçte doğal taşınım ile ısı transferi mekanizması baskın hale gelmiş ve ortalama ısı transfer katsayısında keskin bir artış söz konusu olmuştur. Depolanmış olan ısı enerjisinin geri kazanılması süresinde ise sisteme verilen soğuk suyun debisinin artırılması, depolanmış olan enerjiden kazanılan kullanılabilir ısı oranının artmasını sağlamıştır [9].

Summers ve diğerleri tarafından nemlendirme-nem alma ve tuzdan arındırma işlemlerinde kullanılmak üzere enerji depolama ünitesine sahip bir hava akışkanlı güneş kolektörünün tasarımı ve deneysel performans testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada, öncelikle sürekli sıcak hava temininde kolektör emici yüzeyinin altına konan FDM'nin optimum kalınlığı iki boyutlu zamana bağlı sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda 8cm kalınlığındaki FDM sistemi istenilen sıcak havayı temin etmektedir. Sonrasında yapılan deneysel çalışma ile elde edilen verilerin nümerik olarak modellenerek bulunan sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür [10].

Khalifa ve diğerleri, evsel ihtiyaçları karşılamak için kullanılmakta olan bir su ısıtmalı güneş kolektörünün emici yüzeyinin arkasına FDM deposu ekleyerek ısı enerjisi depolanması konusunda bir çalışma yapmışlardır. Sistemin performansı, kolektörün çeşitli performans faktörlerinin hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir. FDM ünitesi ilave edilmeyen yapı ile karşılaştırıldığında, iş akışkanı sisteme girdikten sonra sürekli bir sıcaklık atışına

maruz kalmaktadır. Fakat FDM ünitesinin kullanılması ile sistemden yaklaşık sabit sıcaklıkta akışkan elde edilmektedir. Güneş battıktan sonra, ısı kaynağı görevini FDM üstlenmekte ve bünyesindeki gizli ısıyı iş akışkanına aktarmaktadır [11].

Bouadila ve diğerleri, küresel kapsüllerden oluşan dolgu yataklı gizli ısı depolamalı bir hava akışkanlı güneş kolektörünün termal performansını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, küresel kapsüller kullanarak dolgu yataklı bir emici yüzey oluşturmuş ve bu kapsüllerin içerisinde bulunan FDM ile gizli ısı depolamışlardır. Yaptıkları ölçümler ile tasarladıkları kolektörün termal performansını, sistemi açık/kapalı ve açık çevrimler halinde çalıştırarak Termodinamiğin I. ve II. yasalarıyla günlük enerji ve ekserji verimlerini elde ederek incelemişlerdir. Açık/kapalı çevrim şeklinde çalıştırılan güneş kolektörünün günlük enerji verimi %32 ile %45 arasındayken; günlük ekserji verimi %13 ile %25 arasında bulunmuştur [12].

Charvat ve diğerleri, gizli ısı depolama ünitesi ile kompakt bir şekilde tasarlanmış olan hava akışkanlı bir güneş kolektörünün teorik olarak simülasyonunu MATLAB ve TRNSYS 17 ticari programlarını kullanarak yapmışlardır. Güneş kolektörün emici yüzeyini oluşturan gizli ısı depolama ünitesi MATLAB programında modellenmiş; hava akışkanlı güneş kolektörünün tamamı ise TRNSYS modelleme programı aracılığıyla tasarlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda beklenildiği gibi gündüz saatlerinde gizli ısı depolama ünitesi içeren hava akışkanlı güneş kolektöründen, enerji depolama ünitesi içermeyen yapıya göre daha düşük sıcaklığa sahip hava akışı temin edilmektedir. Bu bir dezavantaj gibi görülebilir fakat gece saatlerinde geleneksel düz plakalı güneş kolektörü çalışamaz durumunda iken enerji depolama üniteli sistemden hala sıcak hava temini mümkün olmaktadır [13].

Öztürk ve Demirel, yaptıkları çalışmada hava akışkanlı bir güneş kolektörünün hava kanallarına Raschig rings (Raschig halkaları) koyarak duyulur ısı şeklinde enerji depolanmasını sağlamışlardır. Tasarımı yapılan havalı güneş kolektörü dolgu yataklı güneş kolektörü sınıfında bulunmaktadır. Ayrıca yapmış oldukları tasarımın Termodinamiğin I. yasasına göre enerji ve Termodinamiğin II. yasasına göre ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, net enerji veriminin %2,05 ile %33,78 arasında değiştiği, net ekserji veriminin ise %0,01 ile %2,16 arasında olduğu

bulunmuştur. İş akışkanının çıkış sıcaklığı arttıkça dolgu yataklı güneş enerjili hava akışkanlı ısıtıcının enerji ve ekserji verimliliği artmıştır [14].

Tyagi ve diğerleri, gizli ısı depolama malzemesi olarak parafin wax ve duyulur ısı depolama malzemesi olarak hytherm oil maddelerini ihtiva eden bir vakum tüplü hava akışkanlı güneş kolektörünün performans analizlerini deneysel olarak elde ettikleri verileri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma ile kolektör çıkış havası sıcaklığının farklı termal enerji depolama malzemeleri ile güneş ışıını, hacimsel hava debisi ve giriş havası sıcaklıklarının değişimiyle ilişkisini incelemişlerdir. Vakum tüplü kolektörün çıkış havası sıcaklığı parafin wax kullanılması durumunda hytherm oile göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca FDM kullanılan sistemin veriminin kullanılmayan sisteme göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. FDM'li sistem tarafından güneş battıktan sonra 4 saat daha sıcak hava sağlanmaya devam etmiştir. Artan hava debisi ile kolektör çıkış havası sıcaklığı ve termal verim artmıştır. Çünkü FDM'nin depolamış olduğu gizli ısı yüksek debili hava ile birlikte daha az ısı kaybının meydana gelmesiyle birleşerek daha fazla ısı geri kazanımı imkânı ortaya çıkmıştır. Güneş ışıınının gün içerisinde değişiklik göstermesinden ötürü vakum tüplü hava akışkanlı güneş kolektörünün verimi de dalgalanma göstermiştir [15].

Kabeel ve diğerleri, düz plakalı ve v-oluklu plakalı hava akışkanlı güneş kolektörlerinde FDM kullanılması ve kullanılmaması durumlarında kolektörlerin termal performanslarını incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda 0,062kg/s hava debisinde, güneş battıktan sonra v-oluklu plakalı ve FDM'li güneş kolektörünün 3,5 saat süreyle çevre sıcaklığından 1,5-7,2°C sıcaklık aralığında daha sıcak hava sağladığı fakat düz plakalı ve FDM'li güneş kolektörünün ise 2,5 saat süreyle çevre sıcaklığından 1-5,5°C sıcaklık aralığında daha sıcak hava sağladığı bilgisine ulaşmışlardır. 0,062kg/s hava debisiyle çalışan v-oluklu FDM'li güneş kolektörün günlük veriminin aynı kolektörün FDM'siz düzeneğinden %12 daha yüksek olduğu hesaplanmıştır [16].

Kabeel ve diğerleri, kanatçık plakalı hava akışkanlı güneş kolektöründe FDM kullanılarak enerji depolanmasının kolektör performansına olan etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, emici yüzey üzerine dikdörtgen şekilli kanatlar koyarak ısı transferi yüzey alanını arttırmışlar ve aynı zamanda emici yüzeyin altına organik FDM grubundan olan parafin wax koyarak gizli ısı depolamışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, artan

hava debisine bağılı olarak kolektör çıkış havası sıcaklığı düşmüş, fakat FDM'li ve FDM'siz kolektör tasarımlarının anlık ve günlük verimleri artış göstermiştir. FDM'li kanatçıklı kolektör, güneş battıktan sonra 4 saat kadar daha çevre sıcaklığından 8,6°C yüksek sıcaklıkta hava sağlamaya devam etmiştir [17].

Yukarıda bahsedilen literatür çalışmaları, güneş enerjisinin ısıı enerji depolama teknikleri kullanılarak sonraki kullanımlar için depolanması üzerine yapılmıştır. Bahsi geçen çalışmalar incelendiğinde, sıcak hava ve sıcak su farklı kullanım amaçlarına yönelik olarak yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden temin edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında tüm çalışmalar havalı, sulu ve enerji depolama sistemli kompakt bir kolektör tasarımını gerekli kılmakta ve dış ortam şartlarında test edilmesini gerektirmektedir. Güneş enerjisinin kesintili yapısından dolayı kararlı deney şartlarının oluşturulması bazen zor olabilmektedir. Ayrıca yağmur, rüzgâr vb. doğa olayları da dış ortamda yapılacak olan deneyleri zorlaştırmaktadır. Ayrıca dış ortam şartlarında yapılan deneylerde, deney süreleri çok uzun olmaktadır. Bu olumsuzlukları laboratuvar koşullarında test edilebilen sistem tasarımları ile yenmek mümkündür. Laboratuvar koşullarında yapılacak deneyler ile deney süreleri kısaltılmakta ve hem zamandan hem de deneysel çalışmaların maliyetlerinden tasarruf edilmektedir.

Güneş enerjisinin ısıı enerji olarak depolanması amacıyla iç ortam şartlarında yapılacak deneylerde, güneş ışıınımına yakın dalga boylarında ışıınım sağlayacak olan yapay ışıınım kaynaklarının kullanımı zorunludur. Bu amaçla güneş simülatörleri kullanılmaktadır. Maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, zamandan tasarruf edilmesi gereken çalışmalarda güneş simülatörleri aktif olarak kullanılmaktadır. Yapay güneş ışıınımının, laboratuvar koşullarında depolanması amacıyla yapılan çalışmalara aşağıdaki örnekler verilebilir:

Garg ve diğerleri tarafından iç ortam testleri için bir güneş simülatörünün geliştirilmesi ve foto-termal güneş cihazlarının sertifikalandırma prosedürü tartışılmıştır. 14 adet quartz halojen lamba kullanılarak, 400 ile 1500W/m² arasında değişen ışıınım yoğunluğuna sahip bir güneş simülatörü elde edilmiştir. Ayrıca tek bir lambanın radyasyon çıkış özellikleri incelenmiştir. 1,20x1,20m'lik kapalı alan üzerindeki ışıınım yoğunluğunun dağılımı hassas bir Eppley piranometre kullanılarak kaydedilmiştir. Vakum tüplü ve düzlemsel yüzeyli hava akışkanlı ve sulu güneş kolektörleri tasarlanan düşük maliyetli güneş simülatörü kullanılarak laboratuvar şartlarında test edilmiştir [18].

Alkilani ve diğeri, laboratuvar koşullarında borulu tip emici yüzeyden oluşan bir hava akışkanlı güneş kolektörünün performans analizini güneş simülatörü kullanarak yapmışlardır. Çalışmalarında ticari bir parafin waxı çelik ve alüminyum malzemelerden üretilmiş olan boruların içerisine, külece %0,5 oranında alüminyum (Al) tanecikleri ile birlikte doldurmuşlardır. Güneş simülatöründen gelen yapay güneş ışınımı parafin wax-Al karışımından oluşan gizli ısı depolama ortamında depolanmıştır. Sistemin performansı deneysel ve her bir metal boru içerisindeki parafinin ergime ve katılaşma süresi MATLAB programı ile nümerik olarak modellenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, depolanan ısı enerjisinin geri kazanılması için kolektöre gönderilen iş akışkanının debisinin artırılması kolektör çıkış havası sıcaklığını düşürmüş ve aynı zamanda düşük debilerde ısı enerjisinin geri kazanılma süresi uzamıştır [19,20].

Li ve diğeri, güneş bacalarında kullanılan bir enerji depolama ünitesinde ısı iletkenliğinin enerji depolama malzemesi üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, parafin wax kullanarak elde edilen enerji depolama ünitesi içerisine 4 farklı yapıda kanatçık ilave etmiş ve kanatçıkların parafinin düşük ısı iletkenliğini hangi oranda iyileştirdiğini incelemişlerdir. Tasarlamış oldukları termal enerji depolama ünitesini quartz halojen lambalardan oluşan bir güneş simülatörü kullanarak laboratuvar koşullarında test etmişlerdir. Parafin içerisinde kanatçık kullanımının parafinin ergime süresine etkisinin önemli olduğu sonucuna varmışlardır [21].

Termal enerji depolama yönteminde göz önünde bulundurulması gereken en önemli unsurlar temel olarak, depolanacak ortamın uygun sıcaklık değerlerine sahip olması ve depolanan enerjisinin uygun bir ısı değıştiricisi tasarımıyla geri kazanılmasıdır. Ayrıca gizli ısı formunda enerji depolamak için kullanılan parafinin düşük ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Parafin dışındaki FDM'ler için de bu olumsuz durumu ortadan kaldırıcı çalışmalar yapılmalıdır. Bu amaca yönelik olarak mevcut FDM'li enerji depolama tasarımlarında örneğin parafin içerisine kanatçık eklenmesi, ısı iletkenliği yüksek olan metal parçacıklarının eklenmesi, gözenekli ortam oluşturulması, grafitler ile kompozit bir yapı oluşturulması ve FDM'nin mikro kapsül haline getirilmesi gibi yöntemler tercih edilmektedir. Ayrıca termal enerji depolama ünitesinin performansını test etmede ısı kaynağının pozisyonu da çok önemlidir. Isı kaynağının konumuna göre enerji depolama ortamında iletimle ve doğal taşınım ile ısı transferi mekanizmaları etkili

olmaktadır. Kapalı hacimler içerisinde alttan ve yandan ısıtma konumunda iletme ek olarak doğal taşınım da etkiliyken yukarıdan ısıtma konumunda sadece iletimle ısı transferi mümkün olmaktadır [22]. FDM'lerin TEDÜ olarak kullanıldığı ve performanslarının test edildiği çalışmalara, literatürde bulunan aşağıdaki örnekler verilebilir:

Zeng tarafından yüksek sıcaklık uygulamalarına sahip güneş enerjisi santrallerinde kullanılmak üzere kapsüllü FDM'ler kullanılarak termal enerji depolanması üzerine bir doktora tezi yapılmıştır. Çalışmada, inorganik FDM grubunda yer alan tuz hidratlar ve ötektik karışımlar farklı metaller ile kapsül oluşturularak, uzun ısı depolama ve geri kazanım döngüsü altında deneysel olarak test edilmiş ve aynı zamanda ısı transferi için uygun simülasyon incelemesi yapılmıştır. Elde ettiği bulgulara göre, çalışmada kullanılan FDM'ler ile yüksek oranda enerji kararlı şartlar altında uzun çalışma döngülerinde depolanıp geri kazanılabilmektedir [23].

Yatağanbaba, açık gözenekli metal köpüklü ve metal köpüksüz bir ortamda ısıtma yüzeyi konumunun ısı depolama süresi üzerine olan etkisini incelemiştir. Bu amaca yönelik olarak küp şeklindeki bir enerji depolama ünitesi tasarımı yapmış ve farklı ısıtma konumlarında FDM'nin ergime süresinin nasıl değiştiğini deneysel olarak incelemiştir. Aynı zamanda deneysel olarak elde ettiği ergime sürelerini yapmış olduğu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile sayısal olarak modellemiştir. Çalışma sonucunda gözenekli ortam kullanımının FDM'nin düşük ısı iletkenliğini önemli oranda iyileştirdiği ve ısıtma konumunun da ısı transferine olan etkisinin yüksek olduğu sonucuna varmıştır [24].

Avacı ve Yazıcı, ticari bir parafin kullanarak yatay konumdaki iç içe borulu bir ısı değiştiricisi içerisinde parafin ile termal enerji depolama karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, ısı transferi akışkanı olarak saf su kullanmışlar ve borunun etrafına ısıl çiftler yerleştirerek sıcak iş akışkanından FDM'ye doğru meydana gelen ısı transferi mekanizmasını incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan ısı transferi akışkanı debisinin artırılması enerjinin depolanması ve geri kazanılması sürelerini kısaltmıştır. Bunun yanında katı haldeki parafinde ilk başlarda etkili olan iletimle ısı geçişine ek olarak, parafinin faz değiştirmesiyle birlikte doğal taşınım ile ısı transferi de meydana gelmiştir [25].

Hosseini ve diğerkleri, gövde borulu bir ısı değıştiricisinde FDM kullanarak enerji depolanması üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Gövde borulu ısı değıştiricisi üzerine farklı uzunluklarda kanatçık ekleyerek, kanatçık kullanımının FDM'nin ısı depolama ve geri kazanım süreleri ve mekanizması üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda, ısı transferi akışkanı olarak kullanmış oldukları suyun debisinin artışı ergime süresini kısaltmış ve kanatçık uzunluğunun yükseltilmesi ise depolanan enerjinin geri kazanılması aşamasında depolanmasına göre daha fazla etkili olmuştur [26].

Vadwala, termal enerji depolama uygulamaları için açık hücreli metal köpük malzemesinin kullanımı üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmanın amacı yüksek gözenekli açık hücreli metal köpük kullanarak parafin waxın ısı iletkenliğini arttırmaktır. Metal köpüklü ve metal köpüksüz farklı termal enerji depolama sistemleri tasarlanmış ve test edilmiştir. Metal köpük eklenerek, FDM'lerin termal iletkenliği saf haldeki parafin waxa göre 16-18 artış göstermiştir. Ergime ve katılaşma esnasında bakır metal köpüğün ısı transferi üzerindeki etkisi, taşınım ısı tranferi katsayısının belirlenmesi ile analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, FDM içerisindeki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için sayısal bir kod geliştirilmiştir [27].

Literatürde yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde, FDM kullanılarak gizli ısı formunda enerji depolanması için geleneksel enerji depolama üniteleri kullanılmaktadır. FDM'nin ısı depolama davranışını inceleyen birçok çalışmada elektrikli ısıtıcı ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, elektrikli ısıtıcı yerine yenilenebilir enerji kaynağı gibi davranan bir güneş simülatörü (kızılötesi lamba) ısı kaynağı olarak kullanılmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin depolanabilirliği laboratuvar koşullarında araştırılmıştır. Yapay olarak elde edilen güneş ışınımı bir TEDÜ tasarımı yapılarak duyulur ve gizli ısı formunda depolanmıştır. TEDÜ'nün tasarımında ışınımı emici yüzeyler (siyah yüzey, seçici yüzey vb.) esas alınmıştır. Bu nedenle kızılötesi lambanın oluşturduğu güneş ışınımı, mat siyah boya ile boyanmış bir emici yüzey tarafından emilmiş ve emilen bu ışınım kanatlar sayesinde parafinin depolanmış olduğu TEDÜ içerisine düşey yönde iletilmiştir. Böylece parafinin ergimesi sağlanmış ve faz değışimi yoluyla ergime gizli ısı depolanmıştır. TEDÜ tasarımında $n=3, 5$ ve 7 adet $t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlıktaki kanatlar dikkate alınmış ve sırasıyla $q=800, 900$ ve 1000W/m^2 ışınım şiddetinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan alışma ile optimum kanat sayısı ve

kalınlığı bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca tüm sistemin depolayacağı ısı enerji miktarı hesaplanmış ve elde edilen veriler ile TEDÜ'lerin depolayabileceği maksimum ısı güç bulunmaya çalışılmıştır.



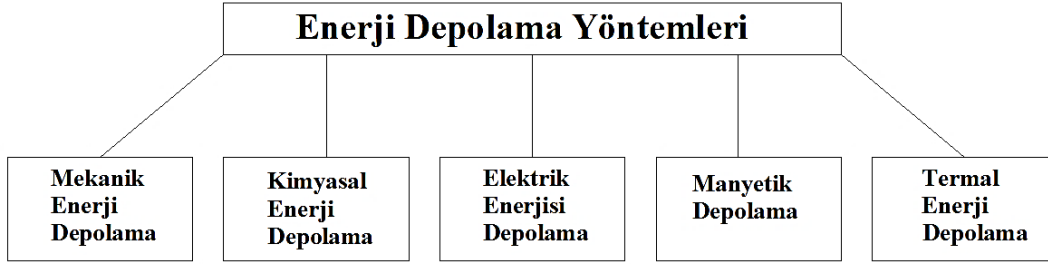
2. ENERJİ DEPOLAMA

Enerji depolama en geniş anlamda mevcut enerjinin sonraki kullanımlar için geçici bir süre depolanması veya tutulmasıdır [5]. Örnek olarak güneş enerjisinden elde edilen enerjinin kış mevsiminde de kullanılabilmesi için uzun süreli depolama çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Ayrıca gündüz saatlerinde maksimum enerji üretim kapasitelerine ulaşılan güneş enerji santrallerinin veya sıcak hava ve su üretim sistemlerinin gece şartlarında da aktif olarak çalışabilmesi için enerji depolama teknolojilerinin kullanılması gerekmektedir.

Enerji depolama sistemleri bina ısıtması ve soğutması, uzay çalışmaları ve faydalı uygulamalarda toplumun talebi olan daha verimli ve daha çevreci enerji kullanımı açısından çok önemli katkı sağlamaktadır. Ayrıca enerji depolama sistemlerinin kullanılması ile aşağı sıralanmış olan faydalar sağlanmaktadır [5]:

- Enerji maliyetlerinde düşüş,
- Enerji tüketiminde azalma,
- Geliştirilmiş iç ortam hava kalitesi,
- Çalışma esnekliğinde artış,
- İlk yatırım ve bakım maliyetlerinde düşüş,
- Ekipman boyutlarında küçülme,
- Ekipmanların daha verimli ve efektif kullanımı,
- Fosil yakıtların korunması,
- Çevreyi kirleten emisyonlarda düşüş,

Enerji depolama, sadece arz ve talep arasındaki uyumsuzluğu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji sistemlerinin performansını ve güvenilirliğini geliştirir ve enerjinin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır [4-48]. Bu olumlu yönlerinden dolayı farklı uygulamalar şeklinde enerji depolanmaktadır. Enerji en genel anlamda Şekil 2.1' de gösterilen şekilde depolanmaktadır [5,28].



Şekil 2.1. Enerji depolama yöntemleri [5,28]

2.1. Mekanik Enerji Depolama

Mekanik enerji depolama, basit bir enerji depolama yöntemidir. Mekanik enerji kinetik enerji ve momentum enerjisi olarak depolanabilmektedir. Yer çekimi kuvvetinden yararlanılarak özellikle barajlarda veya akarsularda kot farkı ve suyun yerçekimi etkisine bağlı olarak hızının artmasıyla kinetik enerjisi artar ve bünyesinde depolamış olduğu enerjiyi elektrik üretmek için türbin kanatlarına aktarır ve böylece türbin kanatlarının dönmesiyle açısal hız elde edilir. Elde edilen açısal hız türbin mili ile jeneratöre aktararak elektrik elde edilmiş olur. Aynı şekilde pompalanan sıvı akışkanlar ve basınçlandırılmış gaz akışkanlar bünyesinde enerji depolamaktadır. Kompresörler, mekanik enerjinin gazlarda depolanmasında kullanılan örneklerden biridir.

Son olarak dairesel hareketin depolanabilmesi için kullanılan volanlar bu kategoride verilmektedir. Araçlarda kullanılan volanlar, aracın durduktan sonra tekrar harekete geçmesi için harcaması gereken enerjinin düşmesine yardımcı olmaktadır. Motorda üretilen hareket enerjisini kinetik enerji olarak bünyesine alarak gerekli durumlarda bünyesinde depolamış olduğu enerjiyi sisteme geri vermektedir. Böylece yakıt tasarrufu meydana gelmektedir. Ayrıca bazı uzak yerleşim yerlerinde veya adalarda yaşayan halkın elektrik ihtiyacını gidermek için volan ile birlikte tasarlanmış dizel yakıtlı jeneratörler kullanılmaktadır [5]

2.2. Kimyasal Enerji Depolama

Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak kimyasal enerji depolama yönteminin önemi artmıştır. Çünkü kimyasal enerji depolama uygulamalarında en büyük pay pil teknolojilerine aittir. Yeni nesil elektrikli araçların kullanılmaya başlanması ile birlikte bu

alandaki yapılan çalışmalar hız kazanmış ve geri döndürülebilir kimyasal reaksiyonları referans alan piller geliştirilmiştir. Kimyasal enerji depolama yöntemi farklı kimyasalların birbirleri ile kimyasal tepkime oluşturmaları ve tepkime esnasında ısı ortaya çıkması ve ortaya çıkan bu ısıya depolanması esasına dayanmaktadır [5,28-32]. Depolanmış olan bu ısı gerekli durumlarda elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır. Pillerin potansiyel uygulamaları; kapalı tepe enerjisinin kullanılması, yük dengelemesi ve rüzgâr türbini ile fotovoltaik tesisler tarafından üretilen elektrik enerjisinin depolanmasıdır [30] .

2.3. Biyolojik Depolama

Biyolojik depolama, enerjinin kimyasal formda biyolojik süreçler aracılığıyla depolanması olarak tarif edilmektedir [5,32]. Bu yöntem uzun süreli enerji depolama için önemlidir. Fakat literatürde bu yöntem üzerinde yapılan çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle hala geliştirilmeyi bekleyen bir konu başlığıdır.

2.4. Manyetik Depolama

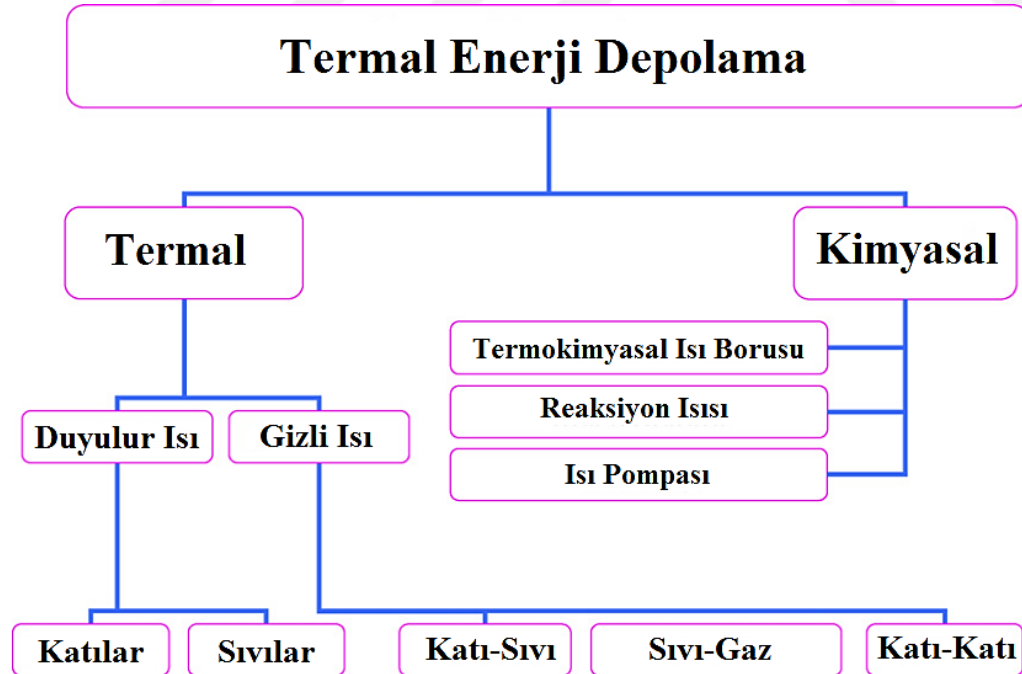
Enerji büyük elektro mıknatıslar kullanılarak manyetik alanlara depolanabilmektedir. Bu amaçla süper iletken malzemeler geliştirilme aşamasındadır. Mutlak sıfır noktasına yakın sıcaklıklarda, bazı metaller neredeyse hiç elektrik direncine sahip değildir ve büyük boyutlardaki akımlar neredeyse kayıp olmaksızın bu metallerin içinde dolaşım yapabilir. Bu metallerin kullanıldığı sistemler doğrusal akım (DC) depolayabildiği için, DC akımın alternatif akıma (AC) dönüştürülmesi sırasında kayıplar meydana gelmektedir. Ayrıca bu dönüşüm sırasında sistem elemanlarının fazla ısınmasını engellemek için soğutma yapmak gerekmektedir. Bahsedilen kayıplara rağmen teorik olarak süper iletken malzemeler kullanılarak yapılan manyetik enerji depolamanın toplam veriminin %80-90 arasında olacağı öngörülmektedir [5,40,41].

2.5. Termal Enerji Depolama

Karbondioksit (CO₂) kaynaklı küresel ısınma ve fosil yakıtların tüketilmesi enerji araştırmalarının temelini oluşturmaktadır. 1973-74 yılında meydana gelen enerji krizinden sonraki 30 yıl içerisinde yenilenebilir enerji kaynakları ve termal enerji depolama (TED) alanındaki gelişmeler bu alanın önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır [34]. Enerji

talebindeki artış ve fosil yakıtların tükenmesi, enerji arzı ve talebinin arasındaki doğrusal ilişkiyi bozmakta ve tüketimin üretimden daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından enerji arzı ve talebinin arasındaki bu boşluğu doldurmak için yapılan çalışmalarda, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin enerji krizini yenmede bir çözüm olacağı söylenmiştir. Fakat güneş enerjisinin doğası gereği kesintili olması ve sadece gündüz şartlarında kullanılabilir olması, güneş enerjisinin kullanıldığı su ısıtma, ortam ısıtma, havalandırma, pişirme, kurutma vb. uygulamalarda TED tekniklerinin kullanılarak güneşin olmadığı zamanlarda da depolanmış olan güneş enerjisinden yararlanılmasını mümkün kılmaktadır [35]. Güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımı, onlara gelecek vaat eden bir çözüm olarak ve insanlar için sürdürülebilir bir gelişme sağlama aracı olarak gittikçe daha çok kabul edilmektedir [36].

Termal enerji, bir maddenin iç enerjisinde duyulur ısı, gizli ısı ya da termo-kimyasal veya bunların birleşimi şeklinde bir değişim yoluyla depolanabilmektedir. TED tekniklerinin sınıflandırılması Şekil 2.2’ de yapılmıştır.



Şekil 2.2. Termal enerji depolama teknikleri [4,5,23-48]

Duyulur ısı, gizli ısı ya da termo-kimyasal depolama metotlarıyla depolanan ısı veya enerji için bir depolama ortamına veya malzemeye ihtiyaç vardır. Bu uygulamalar için örnek bir depolama ortamı Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Gizli ısı ve duyulur ısı şeklinde enerji depolama ortamlarına örnekler [23]

Duyulur Kısa Süreli Depolama	Duyulur Uzun Süreli Depolama (Yıllık)	Gizli Kısa Süreli Depolama
Kaya yatakları	Kaya yatakları	İnorganik malzemeler
Toprak yataklar	Toprak yataklar	Organik malzemeler Yağ asitleri
Su tankları	Büyük hacimli su tankları	Aromatikler
-	Akifer	-
-	Güneş havuzları	-

TED’in üç farklı alt sınıfa ayrılmış olduğu daha önceki açıklamalarda ifade edilmiştir (Bkz. Şekil 2.2). Bu üç yöntemin birbiri ile kapasite, güç, verim, depolama süresi ve maliyet gibi anahtar özellikleri açısından kısa bir değerlendirmesi Çizelge 2.2’ de yapılmıştır.

Çizelge 2.2. Enerji depolama teknolojilerinin anahtar özelliklerinin karşılaştırılması [23]

Anahtar Özellik	Depolama Teknolojisi		
	Duyulu Isı Depolama	Gizli Isı Depolama	Termo-kimyasal Depolama
Kapasite (kWh/ton)	10-50	50-150	120-250
Güç (MW)	0,001-10	0,001-1	0,01-1
Verim (%)	50-90	75-90	75-100
Depolama Süresi (saat, gün, ay)	gün, ay	saat, gün, ay	Saat, gün
Maliyet (\$/kWh)	0,2-20	20-100	15-180

2.5.1. Termal enerji depolamanın faydaları

TED teknikleri çok geniş uygulama alanına sahip olmasına rağmen genellikle anlık, günlük ve mevsimlik zaman dilimlerinde bir döngü oluşturma yoluyla çalışmak için tasarlanmaktadır. Bu yöntemin sağladığı yararlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [5]:

- Enerji talebinin az fakat arzının çok olduğu zamanlarda üretilen fazla enerjinin veya ısının depolanması, talebin artış gösterdiği zaman aralığında enerji veya ısı üretimine katkı sağlayarak üretim kapasitesinin artmasına yardımcı olur.
- Birleşik ısı ve güç ya da kojenerasyon sistemleri bağlantılı termal yük taleplerini karşılamak için elektrik talebinin az olmasına rağmen fazla elektrik üretimi yapmaya devam etmektedir. TED metoduyla depolanmış olan enerji kojenerasyon sistemine katkı sağlayarak, sistemin gereğinden fazla yük altında çalışması engellenmiş olur.
- TED yöntemiyle depolanan enerji elektrik fiyatlarının yüksek olduğu zaman diliminde şebekeden daha az elektrik kullanılmasına imkan verir.
- Elektrikli sistemlerin fazla ısınmasından dolayı bir takım yapısal problemlerle karşılaşmaktadır. TED tekniğiyle bahsedilen yapılarda oluşan fazla ısı FDM'ler tarafından depolanır ve tasarımların güvenilirliğini artırır.
- Diğer uygulamalarla bütünleşmiş bir şekilde çalıştırılabilir.

2.5.2. Duyulur ısı depolama

Maddede faz değişimine sebep olmadan, enerjinin depolanacağı ortamın türüne göre katı ya da sıvının sıcaklığının değişmesi esasına dayanarak yapılan enerji depolama yöntemine duyulur ısı depolama (DID) denir. DID yöntemi, enerjinin depolanması ve geri kazanılması süresince malzemelerin sıcaklık ve ısı kapasitelerinin (özellik ısının) değişimini kullanmaktadır. Duyulur ısı formunda depolanan enerji miktarı, enerjinin depolandığı ortamın ısı kapasitesine, ilk ve son hallerdeki sıcaklıkların farkına ve depo malzemesinin miktarına bağlıdır [5,28-47]. DID malzemeleri olarak su, mineral yağlar, eriyik tuzlar, sıvı metaller ve alaşımlar, kaya, beton, kum, metal parçalar vb. kullanılmaktadır. Fakat ucuz ve diğer malzemelere göre daha yüksek özgül ısı değerine sahip olmasından dolayı su en fazla tercih edilen DID malzemesidir [38]. DID malzemeleri Çizelge 2.3'de daha geniş çaplı

olarak verilmiştir. Duyulu ısı formunda depolanan enerjinin miktarı Eş. 2.1’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [5-14-17,23,28,30]:

$$E = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dt = mc_p(T_f - T_i) \quad (2.1)$$

Burada E (kJ) depolanan enerji miktarını, m (kg) depolama malzemesinin kütlesini, c_p (kJ/kg°C) depolama malzemesinin özgül ısısını ve T_f ve T_i sırasıyla depolama malzemesinin, enerji depolama işlemi sonundaki ve öncesindeki sıcaklıklarını ifade etmektedir. Eş. 2.1’den de anlaşılacağı üzere DID sisteminde depolanan enerji, depolama malzemesinin miktarı, özgül ısı değeri ve işlem öncesindeki ve sonrasındaki sıcaklık değerleri arasından fark ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca DID yöntemi, kullanılan ısı depolama malzemesine göre;

- Sıvı maddelerde DID,
- Katı maddelerde DID,
- Sıvı ve katı maddelerde, birlikte DID şeklinde incelenmektedir [32].

Çizelge 2.3. Duyulur ısı depolama malzemelerine örnekler [35]

Malzeme	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Özgül Isı Kapasitesi (kJ/kgK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Su	0-100	4,190	1000
Terminol	-9-343	2,100	750
Motor yağı	160’a kadar	1,880	888
Lityum	180-1300	4,190	510
Sodyum	100-760	1,300	960
Etanol	78’e kadar	2,400	790
Bütanol	118’e kadar	2,400	809
Oktan	126’a kadar	2,400	704
Alüminyum	660’a kadar	0,896	2707
Tuğla	1000	0,840	1698
Beton	1000	1,130	2240
Dökme demir	1100’e kadar	0,837	7900

Çizelge 2.3. (devam) Duyulur ısı depolama malzemelerine örnekler [35]

Bakır	1000'e kadar	0,383	8954
Sodyum karbonat	850'ye kadar	1,090	2510
Çimento	825'e kadar	0,900	2500
Magnezyum oksit	2800'e kadar	0,960	3570

2.5.3. Gizli ısı depolama

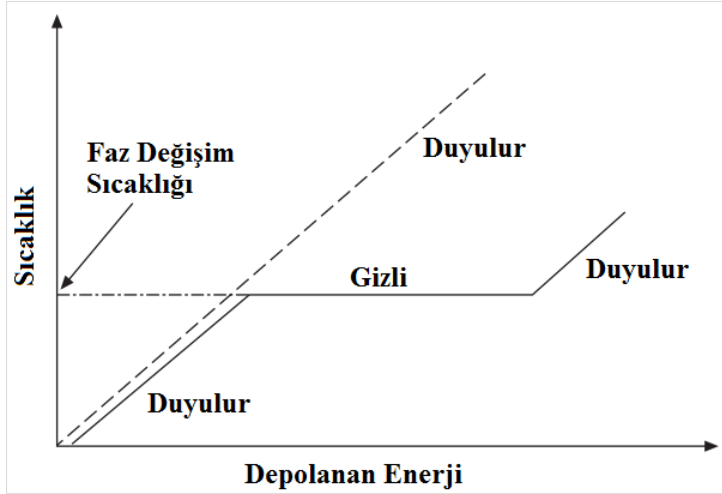
Isı depolama malzemelerinin iç enerjilerindeki değişim, malzemelerin kimyasal bağlarının kopmasıyla faz değiştirmesine sebep olmakta ve katı halden sıvı hale geçmesi sırasında gizli füzyon ısısı veya ergime gizli ısısı ve sıvıdan gaz haline geçmesi esnasında ise buharlaşma gizli ısısı açığa çıkmaktadır [32]. FDM'nin depoladığı veya geri verdiği enerjinin temelinde faz değişim entalpisinde meydana gelen değişim vardır [44]. Belirli koşullar altında faz değişimi sırasında ortaya çıkan bu gizli ısı depolanabilmektedir. Isı depolama malzemelerinin yaklaşık sabit basınç ve sıcaklık altında faz değiştirmeleri sırasında ortaya çıkan gizli ısısının depolanmasıyla elde edilen enerji depolama yöntemine gizli ısı depolama (GID) denir. GID yöntemi katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz ya da tam tersi faz değişimine maruz kalarak ortaya çıkan gizli füzyon ısısı ve buharlaşma gizli ısısını depolayan ya da bırakan depolama malzemelerinin kullanılmasına dayanmaktadır (Bkz. Şekil 2.3) [5-48].

GID tekniğinde en çok karşılaşılan faz dönüşümü katı-sıvı faz geçişidir. Sıvı-gaz faz değişimi esnasında diğer faz değişimlerine kıyasla daha fazla gizli ısı açığa çıkmaktadır. Fakat gaz fazındaki materyali depolamanın zor ve ağır bir işlem olmasından dolayı çok fazla tercih edilmemektedir [20]. GID yönteminde depolanan ve geri kazanılan enerji miktarı Eş. 2.2 kullanılarak hesaplanmaktadır [5-48].

$$E = m a_m \Delta h_m \quad (2.2)$$

Burada E (kJ) gizli ısı biçiminde depolanan enerji miktarını, m (kg) FDM malzemesinin kütlesini, a_m ergiyen FDM yüzdesini ve Δh_m (kJ/kg) birim kütle başına FDM'nin sahip olduğu ergime gizli ısısını ifade etmektedir.

GID yöntemine göre tasarlanan enerji depolama sistemlerinde ağırlıklı olarak gizli ısı depolanması mümkün olmakla beraber sistemde bir miktar da duyulur ısı depolanmaktadır. Bu durum Şekil 2.3’de açıkça görülmekte ve böyle bir sistemde depolanan enerji miktarı Eş. 2.3 ve Eş. 2.4 kullanılarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.3. Bir katı-sıvı faz değişiminde enerji depolanması [40-42]

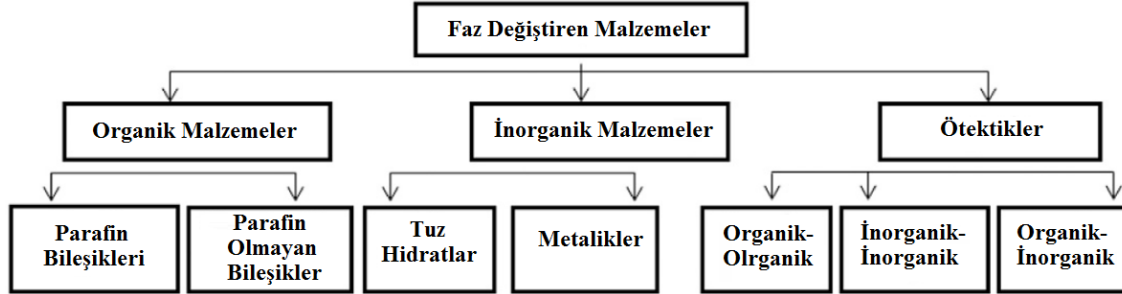
$$E = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dt + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dt \quad (2.3)$$

$$E = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (2.4)$$

FDM’ ye ısı verilmesiyle ilk başta depolama malzemesinin sıcaklığı artmakta ve aynı zamanda duyulur ısı miktarı yükselmektedir. Bir müddet sonra faz değişimi yaklaşık sabit sıcaklıkta veya çok az sıcaklık farkında meydana gelmektedir. Son olarak, FDM üzerine ısı akısı uygulanmaya devam ederse, malzeme tekrardan duyulur ısı depolamaya devam edecektir. (Bkz. Şekil 2.3)

GID tekniğinin temelini oluşturan FDM’ler Şekil 2.4’de görüldüğü gibi organik, inorganik ve ötektik malzemeler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar [5-22]. FDM’ler katıdan sıvıya geçiş yapan malzeme grubunun alt dalları olarak kabul edilmektedir. Organik FDM grubunda, parafinler ve parafin olmayan bileşikler bulunmakta ve inorganik FDM grubunda ise tuz hidratlar ve metalikler yer almaktadır. Organik ve inorganik FDM

çeşitlerinin beraber yer aldığı grup ise ötektikler olarak adlandırılmaktadır. Belirli oranlarda organik ve inorganik yapıların karışımlarından oluşmaktadır.



Şekil 2.4. FDM sınıflandırılması [37]

GID yönteminde FDM kullanılmasının birçok avantajı vardır. Elde edilen bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [5,23-48]:

- DID yönteminde kullanılan malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek enerji depolama kapasitesine sahiptirler. Örneğin 30°C’ de, 1 bardak ergimiş kalsiyum klorür heksahidrat ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) katılaşıırken bünyesinde depolamış olduğu 0,1515MJ değerindeki gizli ısıyı geri verirken, aynı boyutlardaki bardağa konan 60°C sıcaklıktaki su, kalsiyum klorür heksahidratın vermekte olduğu gizli ısının sadece yarısı kadarlık bir miktarı geri verebilir [28]. Böylece aynı miktar malzeme kullanılarak GID yöntemiyle, DID yöntemine göre daha fazla enerji depolanıp sonrasında uygun ısı değiştirici tasarımıyla geri kazanılabilir.
- FDM’lerin yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olmasından dolayı depolama hacminden ve kütlesinden tasarruf edilmektedir. Az miktarda FDM ile çok miktarda enerji depolanabilmektedir.
- Düşük depolama sıcaklıklarında çalışmakta ve daha az yalıtıma ihtiyaç duyulmaktadır.
- Faz değişimi izotermal sınır şartlarında gerçekleştiği için daha basit kontrol ve daha sade tasarımlar kullanılabilir.

Faz değiştiren malzemeler

Bir malzeme ergidiği veya buharlaştığı zaman bünyesine ısı eker, aynı malzeme katılaştığı veya sıvılaştığı diğer bir ifadeyle kristalize olduğu veya yoğunlaştığı zaman bünyesine çekmiş olduğu ısıyı geri verir. Bu faz değişimi FDM’de ısı depolamak için kullanılır. FDM’ler gizli ısıyı fiziksel ve kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişim olmaksızın yüksek çevrim sayıları süresince korurlar. Tipik FDM’ler su-buz karışımı, tuz hidratlar ve bazı polimerlerdir. GID yönteminde, enerji yoğunluğunun DID yöntemine göre fazla olmasından dolayı, daha küçük ve daha hafif cihazlar ve sistemler kullanılmakta ve daha düşük depolama kayıpları meydana gelmektedir [5].

FDM kullanılarak yapılan GID alışmaları çok farklı alanlarda kendine yer bulmaktadır. Örneğin; bina inşasında, bina ısıtması, bina soğutması ve binaya sıcak su temininde, atık ısıının geri kazanılmasında, meyve ve sebze kurutulmasında, elektronik cihazların fazla ısınmasını engelleyip güvenli çalışmasında, hava ve su akışkanlı güneş kolektörlerinde, güneş ocaklarında, metal şekillendirmede, uzay aracı termal uygulamalarında ve soğutma uygulamalarında geniş sıcaklık aralığında kullanılmaktadır [45].

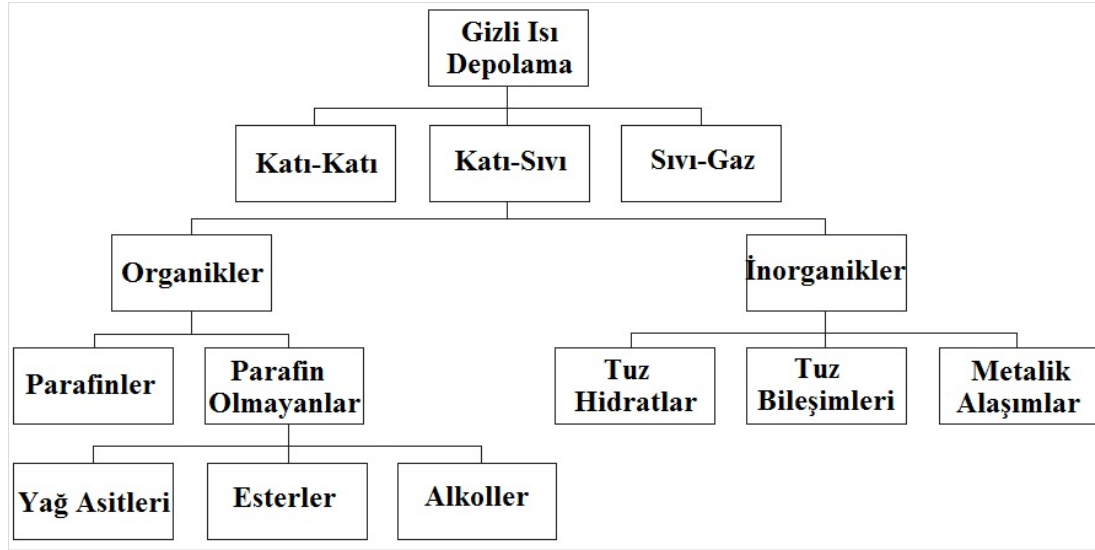
FDM’ler organik, inorganik ve bunların karışımları olan ötektik malzemeler olarak sınıflandırılmıştır (Bkz. şekil 2.4). Bu materyallerin GID sistemlerinde kullanılabilmesi için, termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik yönden bazı ölçütlere uygunluk göstermeleri gerekmektedir. Amaca yönelik FDM seçiminde dikkate alınması gereken hususlar aşağıdaki gibidir [5,23,28,35,36,39-48]:

- FDM’nin ergime derecesi çalışma sıcaklığı aralığında olmalıdır.
- Birim kütle başına yüksek ergime gizli ısısına sahip olmalıdır.
- Yoğunluk değeri yüksek olmalıdır.
- Gizli ısı depolamaya ek olarak yüksek duyulur ısı depolayabilmek için yüksek özgöl ısı değerine sahip olmalıdır.
- Isıl iletkenliği yüksek olmalıdır.
- FDM’nin tümü mevcut ısı akısı veya sıcak akışkanla teması sonucunda uyumlu bir şekilde ergimelidir. Bir uyumsuzluk olması durumunda katı ve sıvı haldeki yoğunluk farkı maddenin kimyasal yapısının değişmesine yol açmaktadır.

- Faz geçişi sırasında hacimsel değişiklikler az olmalıdır.
- Sıvı halde gizli ve duyulur ısı depolamış olan bir FDM'nin katılaşması esnasında çok az ya da mümkünse aşırı soğuma olayı ile hiç karşılaşılmamalıdır ve sıvı haldeki FDM, kendine ait termodinamik özelliği olan donma sıcaklığında kristalize olmalıdır.
- Kimyasal kararlılık göstermelidir.
- Enerji depolama sistemlerinde uzun süre kullanılabilmesi için kimyasal bozunma (dekompozisyon) meydana gelmemelidir.
- Temas halinde oldukları yapı malzemeleri üzerinde korozyona sebep olmamalıdır.
- Zehirli, tutuşabilir ve patlayıcı olmamalıdır.
- Piyasada çok miktarda ve kolayca bulunabilir olmalıdır.
- Pahalı olmamalıdır.

Organik faz değiştiren malzemeler

Karbon atomu (C) içeren FDM'ler organik FDM olarak bilinmektedir. Organik FDM'ler parafinler ve parafin olmayanlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Bkz. şekil 2.4 ve 2.5). Organik materyallerin temel özellikleri, faz ayrışması olmaksızın uzun süreli kimyasal ve termal olarak istikrarlı halde çalışabilmeleri ve kristalleşirken çok az ya da hiç aşırı soğuma göstermemeleridir. Organik malzemeler, faz ayrışması olmaksızın uyumlu ergime kabiliyetine sahiptir. Bu malzemelerin en büyük dezavantajı ise ısı iletim katsayılarının 0,1-0,35W/mK gibi düşük değer aralığında olmasından dolayı GID sistemlerinde kullanıldığı zaman çok büyük ısı transfer yüzey alanlarına ihtiyaç duymalarıdır. 0-150°C gibi düşük ergime derecelerine sahip oldukları için yüksek sıcaklıklarda çalışılan enerji santrallerinde kullanımları çok kısıtlıdır. Çoğu durumda, yoğunlukları 1g/cm³' den daha büyüktür. Bu nedenle parafinler ve yağ asitleri genellikle inorganik FDM'ler ile karşılaştırıldığında birim hacim başına daha düşük ergime entalpilerine sahiptir. İstenilen ergime derecesine sahip organik FDM elde etmek için karışım haline getirilebilirler. Organik FDM'ler parafinler, yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikoller olarak sınıflandırılabilir [5,28,31,33,40-43]. Bu sınıflandırma şekil 2.5'de görüldüğü gibi yapılmıştır.



Şekil 2.5. Gizli ısı depolama malzemelerinin sınıflandırılması [5,28,31,33,40-43]

Parafinler

Parafinler, $CH_3 - (CH_2)_n - CH_3$ düz zincir formunda ve C_nH_{2n+2} kimyasal formülüne sahip alkan kategorisinde olan malzemelere verilen isimlendirmedir. Petrol türevi olarak imal edilmektedir. Parafin, esas olarak, az miktarda dallanma ile düz zincirli hidrokarbonlardan oluşur ve oda sıcaklığında katı halde bulunur. Oda sıcaklığında katı halde bulunduğu için endüstriyel olarak çoğunlukla *parafin wax* olarak tarif edilmekte ve %75 ile %100 oranında n-parafin (normal parafin) ihtiva etmektedir.

Parafinler sahip oldukları gizli ısıyı $(CH_2)_n$ zincirinin kristalizasyonu ile kazanır. Parafin, içindeki alkanın zincir uzunluğuna bağlı olarak, eşit zincirli (n-parafin) veya tek zincirli (izo-parafin) olabilir. Oktadekan ($C_{18}H_{38}$) gibi saf parafinler sadece alkanlardan oluşur. Karbon atomu sayısı 14-40 arasında olan alkanların ergime sıcaklıkları $6-80^{\circ}C$ arasında değişmektedir. Ticari parafinlerin karbon atomu sayıları ise 8-15 arasındadır [5, 28,31,33,40-43]. Karbon atomu sayısı çift olan parafinler piyasada bol, kolay bulunabilir ve ucuzdur. Bu nedenle ısı depolama çalışmalarında daha çok tercih edilmektedir [31,32]. Parafinlerdeki karbon atomu sayısı arttıkça, malzemelerin faz geçiş sıcaklıkları olan ergime dereceleri ve genel olarak gizli füzyon ısıları değerleri de Çizelge 2.4'deki gibi artmaktadır. Bunun yanında karbon sayısının artması parafinlerin ergime sıcaklıklarında ilk önce hızlı sonrasında ise yavaş bir artışa sebep olmaktadır fakat çok uzun zincirli alkanlar için ergime sıcaklığı yaklaşık sabit bir değere ulaşmaktadır [38,41].

Çizelge 2.4. Karbon atomu sayısının ergime derecesi ve gizli ısı değerine etkisi [5,23]

Karbon Atomu Sayısı	Ergime Derecesi (°C)	Gizli Isı Değeri (kJ/kg)
14	5,5	228
15	10	205
16	16,7	237,1
17	21,7	213
18	28	244
19	32	222
20	36,7	246
21	40,2	200
22	44	249
23	47,5	232
24	50,6	255
25	49,4	238
26	56,3	256
27	58,8	236
28	61,6	253
29	63,4	240
30	65,4	251
31	68	242
32	69,5	170
33	73,9	268
34	75,9	269

Parafin waxın iyi olduğu kadar eksik olduğu birkaç nokta vardır. Yapısı çözünür bileşenlerden oluştuğu için tamamen uyumlu ergime sergilediği söylenemez fakat diğer organik bileşiklerle karşılaştırıldığında daha iyi teknik özellik göstermektedir. Buhar basınçları çok düşüktür. Ergimleri sırasında hacimsel değişime uğrarlar, benzer şekilde katılaşmaları sırasında içinde bulundukları tankın veya depolama ünitesinin duvarlarını kendilerine doğru çekerek ısı transferini zorlaştırırlar. Organik FDM'lerin genel özelliği olması üzere düşük yoğunluğa sahiptirler [38,41].

Parafinin eksik olduğu bazı özelliklerinin bulunması onun uygulamalarda tercih edilmesine engel teşkil etmemektedir. Çünkü sıvı halden katı hale geçişi esnasında bünyesine depolanmış olduğu gizli ısıyı verirken çok az veya hiç aşırı soğuma davranışı göstermezler. Bu nedenle diğer FDM gruplarında faz değişimi sırasında çekirdeklenmeyi başlatan nükleatör kullanımına burada ihtiyaç yoktur. Kristalizasyon hızı yeterli ve katılaşma işlemi ısı transferi mekanizması ile sınırlandırılmıştır. Kimyasal olarak istikrarlıdır ve çok uzun kullanım döngülerine sahiptir. Zehirsiz ve kokusuzdur. Metal tanklarda kolayca depolanabilir ve korozif etki göstermez. Sadece yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında plastik tanklarda ve depolama bölgelerinde problemler meydana gelmektedir. Piyasada birçok firma tarafından ticari olarak üretilmektedir. Enerji depolama uygulamalarının yanında, tıbbi, kozmetik ve dekoratif amaçlarla da geniş bir kullanım alanına sahiptir [38,41]. GID malzemesi olarak kullanılmakta olan parafinler için Çizelge 2.5’de bazı parafinlerin termo-fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.5. FDM olarak kullanılan bazı parafinlerin termo-fiziksel özellikleri [47]

Malzeme	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
n-Tetradecano $C_{14}H_{30}$	6	230	0,21 (katı)	760 (sıvı, 20°C)
n-Pentadecano $C_{15}H_{32}$	10	212	m.d.	770 (sıvı, 20°C)
n-Hekzadecano $C_{16}H_{34}$	18	210,238	0,21 (katı)	760 (sıvı, 20°C)
n-Heptadecano $C_{17}H_{36}$	19	240	m.d.	776 (sıvı, 20°C)
n-Octadecano $C_{18}H_{38}$	28	200, 245	0,148 (sıvı, 40°C) 0,358 (katı, 25°C)	774 (sıvı, 70°C) 814 (katı, 20°C)
n-Eicosano $C_{20}H_{42}$	38	283	m.d.	779
n-Triacontano $C_{30}H_{62}$	66	m.d.	m.d.	775
n-Tetracontano $C_{40}H_{82}$	82	m.d.	m.d.	m.d.

Çizelge 2.5. (devam) FDM olarak kullanılan bazı parafinlerin termo-fiziksel özellikleri [47]

n-Pentacontano $C_{50}H_{102}$	95	m.d.	m.d.	779
Polietilen C_nH_{2n+2} n 10000'e kadar	110	200	m.d.	870-940 (katı, 20°C)

Yağ asitleri

Yağ asitleri, $CH_3(CH_2)_nCOOH$ kimyasal formunda ifade edilmektedir. Düşük sıcaklık GID malzemesi olarak ideal termo-fiziksel özelliklere sahiptirler. Yağ asitlerinin ergime ve kaynama noktaları parafinlere kıyasla nispeten yüksektir ve doymuş yağ asitleri düşük faz geçiş hacmi değişiklikleri sergilerler. Çok az veya hiç olmayan, tekrarlanabilir ergime ve katılaşma davranışlarına sahiptirler. Ticari parafinlere oranla daha pahalı ve metallerle etkileşimleri sırasında biraz korozif etki göstermekte ve hoş olmayan kokuya sahiptirler. Doğada yanıcıdır. Genellikle ergime ve donma noktaları, erime sıcaklığı ve yağ asitlerinin kristalleşme derecesi moleküllerinde bulunan karbon atomlarının sayısı ile artmaktadır [5,29,31-34,38-40,42]. Uygulamalarda kullanılmakta olan yağ asitlerine ait örnekler Çizelge 2.6'da verilmiştir. Çizelge 2.6 incelendiğinde, artan $(CH_2)_n$ bileşimi sayısının yağ asidi çeşidinin ergime derecesi ve ergime entalpisi üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Bileşimdeki n sayısı arttıkça bahsedilen değerler artmakta ve birim kütle başına daha fazla gizli ısı depolanabilmektedir.

Esterler

Esterler, bir hidroksil (-OH) grubunun bir alkil (-O) grubu ile yer değiştirdiği asitlerden türetilmektedirler. Ağ asidi esterleri, dar bir sıcaklık aralığında katı-sıvı faz geçişi gösterirler. Ötektikleri, aşırı soğutma olmadan veya az miktarda soğutma ile oluşturabilirler. Esterlerin ötektik karışımları, yüksek geçiş entalpisi ile oda sıcaklığına yakın faz geçiş sıcaklığına sahiptirler. Yağ asidi esterleri, polimer, kozmetik ve akıllı giyim endüstrisinde büyük oranlarda kullanıldığı için piyasada kolayca bulunabilirler [38].

Çizelge 2.6. FDM olarak kullanılan bazı yağ asitlerinin termo-fiziksel özellikleri [47]

Materyal	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Kaprilik asit $CH_3(CH_2)_6COOH$	16	149	0,149	901(sıvı, 30°C) 981(katı, 13°C)
Kaprik asit $CH_3(CH_2)_8COOH$	32	153	0,149	886 (sıvı, 40°C) 1004 (katı, 24°C)
Laurik asit $CH_3(CH_2)_{10}COOH$	42-44	178	0,147	870 (sıvı, 50°C) 1007 (katı, 24°C)
Miristik asit $CH_3(CH_2)_{12}COOH$	58	186, 204	0,17	861 (sıvı, 55°C) 990 (katı, 24°C)
Palmitik asit $CH_3(CH_2)_{14}COOH$	61,64	185, 203	m.d.	850 (sıvı, 65°C) 989 (katı, 24°C)

Alkoller

Polialkoller olarak da bilinen şeker alkolü 90-200°C çalışma sıcaklığında, orta sıcaklığa sahip FDM olarak kabul edilir. Bu gruptaki GID malzemeleri üzerinde çok fazla çalışma yapılmamıştır. Önceki araştırmalar, ksilitol, eritritol ve mannitol gibi alkollerin, bu ailenin diğer maddelerinden çok daha yüksek bir değere, yaklaşık 300 kJ/kg'a yakın gizli füzyon ısısına sahip olduklarını ortaya koymuştur. Alkoller, diğer GID gruplarındaki malzemelere göre sadece son 40 yıldır potansiyel FDM olarak test edilmektedir [38]. Bazı şeker alkollerin termo-fiziksel özellikleri Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Glikoller

Polietilen glikol (PEG), polioksietilen (POE) veya polietilen oksit (PEO) gibi farklı tanımlara sahiptirler. PEG, $HO-CH_2-(CH_2-O-CH_2)_n-CH_2-OH$ kimyasal formunda, sonunda hidroksil grubu olan dimetil eter zincirlerinden oluşmaktadır. Suda ve organik bileşikler içinde çözünürler. Ticari PEG malzemeleri Union Carbide, Dow, Olin, BASF Wyandotte and Texaco gibi firmalar tarafından üretilmektedir. Lakin hiçbiri özel olarak ısı depolama sınıfında bulunan malzeme arz etmemektedirler. PEG'ler 200 ile 8000 arasında değişen ortalama moleküler ağırlıklarda bulunmakta ve uygulamada en çok 7, 23, 34, 38

ve 46°C sıcaklıklarda ergiyen ve sırasıyla ortalama moleküler ağırlıkları 400, 600, 900, 1000 ve 1450 olan PEG'ler kullanılmaktadır [38,41].

Çizelge 2.7. FDM olarak kullanılan bazı şeker alkollerin termo-fiziksel özellikleri [47]

Materyal	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ksilitol $C_5H_7(OH)_5$	94	263	m.d.	1500 (katı, 20°C)
D-Sorbitol $C_6H_8(OH)_6$	97	185	m.d.	1520 (katı, 20°C)
Eritritol $C_4H_6(OH)_4$	120	340	0,326 (sıvı, 140°C) 0,733 (katı, 20°C)	1300 (sıvı, 140°C) 1480 (katı, 20°C)
D-Manitol $C_6H_8(OH)_6$	167	316	m.d.	1520 (katı, 20°C)
Galaktitol $C_6H_8(OH)_6$	188	351	m.d.	1520 (katı, 20°C)

Kimyasal ve termodinamik olarak kararlı yapıda olmakla birlikte yanıcı, zehirli, korozif etki göstermezler. Maliyetleri düşüktür. PEG'lerin ergime noktaları ve ergime gizli ısı değerleri, artan moleküler ağırlıkla yükselir. Diğer organik FDM'ler gibi PEG'ler de düşük ısı iletim katsayısı problemiyle karşı karşıya kalmaktadırlar [19]. Bazı glikollerin sahip olduğu termo-fiziksel özellikler Çizelge 2.8'de verilmiştir.

İnorganik faz değiştiren malzemeler

İnorganik malzemelerin hacimsel gizli ısı yoğunlukları 350MJ/m³ civarındadır. Çok sayıda termal çevrimden sonra bile kararlı özelliklerini kaybetmezler ve organik malzemelerle karşılaştırıldığında yaklaşık 0,5W/mK gibi daha yüksek ısı iletim katsayısına sahiptirler. İnorganik FDM'ler, organik FDM'lere göre daha yüksek ergime entalpisine sahiptirler. Düşük buhar basıncı değerine sahip olmalarından dolayı yanıcı değildirler. Fakat uyumsuz şekilde ergimekte, faz ayrışması ve aşırı soğuma eğilimi göstermektedirler. İnorganik malzemelerin bir diğer önemli dezavantajı ise inorganik FDM'lerin en önemlisi olan tuz hidratların metal depolarda tutulması durumunda paslanmaya sebep olmasıdır

[28,31,32]. İnorganik FDM'ler, tuz hidratlar, tuzlar (tuz bileşikleri) ve metal ve metal alaşımları olmak üzere üç gruba ayrılmıştır (Bkz. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5) [5,29,31-33].

Çizelge 2.8. FDM olarak kullanılan bazı glikollerin termo-fiziksel özellikleri [47]

Materyal	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Dietilen glikol $C_4H_{10}O_3$	-10/-7	m.d.	m.d.	1120 (sıvı, 20°C)
Trietilen glikol $C_6H_{14}O_4$	-7	m.d.	m.d.	1120 (sıvı, 20°C)
PEG400	8	100	0,19 (sıvı, 38°C)	1125 (sıvı, 25°C) 1228 (katı, 3°C)
PEG600	17-22	127	0,19 (sıvı, 38°C)	1126 (sıvı, 25°C) 1232 (katı, 4°C)
PEG1000	35-40	m.d.	m.d.	m.d.
PEG3000	52-56	m.d.	m.d.	m.d.
PEG6000	55-60,66	190	m.d.	1085 (sıvı, 7 0°C) 1212 (katı, 25°C)
PEG10000	55-60	m.d.	m.d.	m.d.

Tuz hidratlar

Tuz hidratlar, ayrı bir karışım oranındaki su ve tuzdan oluşur. Tuz hidratlarının katı-sıvı faz dönüşümü, aslında, tuzun hidrasyonunun dehidrasyonudur, ancak bu işlem termodinamik olarak ergime ya da donma ile benzer karakteristik özellik göstermektedir. $AB.nH_2O$ (AB, inorganik bileşik) kimyasal formülü ile gösterilen tuz hidratlar, genellikle 0-150°C ergime sıcaklığında yüksek hacimsel ısı depolama kapasitesine sahiptir. Yapıları kristalizasyon suyu içeren inorganik tuzdur. Faz dönüşümü sırasında tuzun dehidrasyonu oluşur. Tuzun dehidrasyonu, daha az su molekülü içeren bir tuz hidrat oluşabilir ya da tuzun susuz formu şeklinde iki farklı yapıda oluşabilir. Tuz hidratlar, ergime davranışlarına göre üç farklı kategoriye ayrılır:

1. Uyumlu tuz hidratlar: Tuz, ergime sırasında hidratasyon suyunda çözünür.

2. Uyumsuz tuz hidratlar: Tuz, ergime sırasında hidratasyon suyunda kısmen çözünebilir.
3. Yarı uyumlu tuz hidratlar: Faz değişiminden sonra, katı ve sıvı fazlar, tuz hidratının az miktarda hidratasyon suyuyla bir tuz hidratına dönüşmesi nedeniyle farklı kompozisyonlara sahip olurlar.

Bununla birlikte, uygun ergime sıcaklığına ve yüksek ergime füzyon ısısına sahip, inorganik FDM olma potansiyelinde olan çok sayıda tuz hidrat uyumsuz şekilde ergimektedir. Faz geçişinde salınan su, dehidratasyon işlemi sırasında oluşan kristal tuzu çözemez. Tuz ve su arasındaki yoğunluk farkından dolayı, malzemelerin depolanmış olduğu enerji depolama ünitelerinde faz ayrışması ve çökme meydana gelir. Bu pratik uygulamalarda ciddi bir teknik problemdir. Faz ayrışmasının sebebi zayıf moleküler bağların varlığıdır. Suyun kristalleşme sırasında tuz hidrattan buharlaşarak uzaklaşması su ayrışması olarak tanımlanmaktadır. Bu istenmeyen durum, FDM'nin kapsül içerisine yerleştirilmesiyle bertaraf edilebilir [39,48].

Daha ağır fazın çökmesini ve faz ayrışmasını önlemede kullanılan yöntemlerden bir tanesi jelleştirici veya yoğunlaştırıcı maddeler eklemektir [39]. Polimerik veya selülozik jelleşen malzemenin tuza eklenmesi, tuz çökmesini engeller, aynı zamanda yoğunlaştırıcı madde tuz hidratın viskozitesini artırır ve tuz hidrat moleküllerini bir arada tutmaya yardımcı olur. Tuz hidratlarının diğer bir dezavantajı önemli derecede istenmeyen aşırı soğuma özelliği göstermeleridir. Zayıf çekirdeklenme yeteneğinden dolayı bu problemi önlemek için çekirdeklendirici maddeler eklenmektedir. Boraks ve karbon gibi çekirdeklendirici maddeler aşırı soğumayı engellemek için yardımcı olmakta, ancak tuz hidratların ısı iletkenlik katsayısını düşürerek ısı transfer oranını azalmaktadırlar [38,39].

Aşırı soğumanın meydana gelmesi halinde, katılaşma ve kristalleşme FDM'nin termal özelliği olan ergime derecesinde gerçekleşmez. Bu durumda, FDM'nin depolamış olduğu ısı istenildiği gibi ergime derecesi sıcaklık aralığında geri kazanılmaz ve düzensiz bir kristalleşme ve faz ayrışması meydana gelir. Tuz hidratlardaki aşırı soğuma sorunu, kristalleşmeyi başlatıcı maddeler eklenmesiyle aşılabilmektedir. Fazlardan malzeme eklemekten de mekanik yollarla bu olumsuz durumu bertaraf etmek mümkündür. Enerji depolamak için kullanılan tuz hidratların depolandığı bölgenin duvarları ve FDM'de depolanan enerjinin geri kazanılması sürecinde kullanılan ısı değiştirici yüzeylerinin pürüzlü hale getirilmesi aşırı soğumayı engelleyerek, düzgün bir kristal yapının ortaya

çıkmasına imkân sağlar [32]. Enerji depolama uygulamalarında kullanılan tuz hidratlardan bazılarının termo-fiziksel özellikleri Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. FDM olarak kullanılan tuz hidratların termo-fiziksel özellikleri [30,31]

Tuz Hidrat	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)	Özgül Isı (kJ/kgK)	Yoğunluk (kg/dm ³)
Kalsiyum klorit hekzahidrat $CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29,7	171	1,45 (katı)	1,710 (20°C) 1,496 (sıvı)
Sodyum sülfat dekahidrat $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32,4	254	1,93 (katı)	1,485 (katı)
Disodyum bifosfat dodekahidrat $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	35	281	1,70 (katı) 1,95 (sıvı)	1,520 (katı) 1,442 (sıvı)
Sodyum tiyosülfat pentahidrat $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48	201	1,46 (katı) 2,93 (sıvı)	1,73 (katı) 1,67 (sıvı)
Baryum hidroksit hidrat $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	267	1,17 (katı)	2,180 (katı) 1,57 (20°C)
Magnezyum klorit hekzahidrat $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	116	165	1,72 (katı) 2,82 (sıvı)	1,442 (78°C)

Tuzlar

150 °C'nin üzerinde FDM olarak farklı tuzlar kullanılabilir. Ana avantajları çok yüksek ergime entalpisi, iyi termal iletkenlik, iyi kimyasal kararlılık ve çok düşük buhar basıncıdır. Buhar basıncının düşük olması doğada kendiliğinden tutuşmasını engeller. Ana sakıncaları, aşırı soğuma ve buna bağlı faz ayrışması ve metaller üzerinde korozyona sebep olmasıdır. Katıdan durumdaki sıvı hale faz değiştirmesi sırasında %10'a hacim değişimi meydana gelebilir. Nitratlar, karbonatlar, hidroksitler ve klorürler gibi birçok alt grupta bulunurlar ve çok geniş ergime sıcaklıklarına sahiptirler [38]. Çizelge 2.10’da FDM olarak kullanılmakta olan tuz bileşimleri örnek olması açısından verilmiştir. Görüldüğü üzere

tuzlar 150°C'den daha yüksek sıcaklık aralıklarında çalışılan yapılarda kullanım için uygundurlar.

Çizelge 2.10. FDM olarak kullanılan bazı tuzların termo-fiziksel özellikleri [47]

Tuzlar	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
LiNO ₃	254	360	0,58 (sıvı) 1,37 (katı)	1780 (sıvı) 2140 (katı)
NaNO ₃	307	172	0,51 (sıvı) 0,59 (katı)	1900 (sıvı) 2260 (katı)
KNO ₃	333	266	0,50 (sıvı)	1890 (sıvı) 1900 (katı)
MgCl ₂	714	452	m.d.	2140 (sıvı)
NaCl	800	492	m.d.	2160 (sıvı)
Na ₂ CO ₃	854	276	m.d.	2533 (sıvı)
KF	857	452	m.d.	2370 (sıvı)
K ₂ CO ₃	897	236	m.d.	2290(sıvı)

Metal ve metal alaşımları

Metalik FDM'ler, düşük ergime noktalı metalleri ve metal ötektiklerini içermektedir. Bu malzemeler genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılmaktadır. Ancak yüksek ağırlıkları nedeniyle TED sistemlerinde kullanımları oldukça sınırlıdır. Birim hacim başına sahip oldukları yüksek ergime ısısı, yüksek ısı iletkenlik ve düşük buhar basıncı kullanımlarındaki tercih sebepleri iken, ağır olmaları, birim kütle başına düşük ergime ısısına ve düşük özgül ısı değerlerine sahip olmaları olumsuz yönleri olarak değerlendirilmektedir [47].

Bunların dışında metal ve metal alaşımları iyi termal kararlılık, güvenilirlik ve tekrarlanabilir özelliğe sahiptirler. Faz değişimi esnasında ihmal edilebilir derece küçük hacimsel değişim göstermektedirler. TED uygulamalarında tasarım önceliği hacimdeyse aynı grupta oldukları tuzlar ile yarışır [39]. FDM olarak kullanılmakta olan bazı metal ve metal alaşımlarına ait örnekler Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11. FDM olarak kullanılan bazı metal ve metal alaşımlarının termo-fiziksel özellikleri [47]

Metal ya da Metal Alaşımı	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Entalpisi (kJ/kg)
Cu(83)-10P-7Si	840	92
Cu(74)-19Zn-7Si	765	125
Cu(91)-9P	715	134
96Zn-4Al	381	138
Mg(55)-28-17Zn	400	146
Zn(49)-45Cu-6Mg	703	176
Mg(52)-25Cu-23Ca	453	184
46.3Mg-53.7Zn	340	185
Cu(80)-20Si	803	197
Zn2Mg	588	230
Mg2Cu	847	243
Mg(60)-25Cu-15Zn	452	254
Mg(84)-16Ca	790	272
34.65Mg-65.35Al	497	285
Al(54)-22Cu-18Mg-6Zn	520	305
Si(49)-30Mg-21Ca	865	305
Al(59)-35Mg-6Zn	443	310
Mg(47)-38Si-15Zn	800	314
64.3-34.0Cu-1.7Sb	545	331
68.5Al-5.0Si-26.5Cu	525	364
60.8Al-33.2Cu-6.0Mg	506	365
Cu(69)-17Zn-14P	720	368
66.92Al-33.08Cu	548	372
64.1Al-5.2Si-28Cu-2.2Mg	507	374
46.3Al-4.6Si-49.1Cu	571	406
Cu(56)-27Si-17Mg	770	420
Al(54)-30Cu-5Si	571	422
86.4Al-9.4Si-4.2Sb	471	471
83.14Al-11.7Si-5.16Mg	555	485
87.76Al-12.24Si	557	498
Si(56)-44Mg	946	757

Ötektik faz değiştiren malzemeler

Ötektik FDM'ler, organik-organik, organik-inorganik ve inorganik-inorganik gibi iki veya daha fazla bileşenin birleşmesiyle oluşurlar. Her biri kendi safhasını uyumlu bir şekilde değiştirir, yani kesin ergime/katılaşma noktasına sahiptirler ve kristalizasyon esnasında bir bileşen kristali karışımı oluştururlar. Ötektikler genellikle benzer bir ergime ve katılaşma gösterirler. Faz değişimi sırasında bileşenlerin ayrışma şansı yoktur [30]. Nitrat, klorit ve magnezyum, potasyum, lityum ve kalsiyum gibi alkali ve alkalın metallerin sülfat tuzları, iyonik sıvılar olarak bilinen orta sıcaklık ötektik karışımları oluşturmak için temel bileşiklerdir [48]. Çizelge 2.12'de FDM olarak kullanılan bazı ötektik karışımların termo-fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.12. FDM olarak kullanılan bazı ötektik malzemelerin termo-fiziksel özellikleri [35]

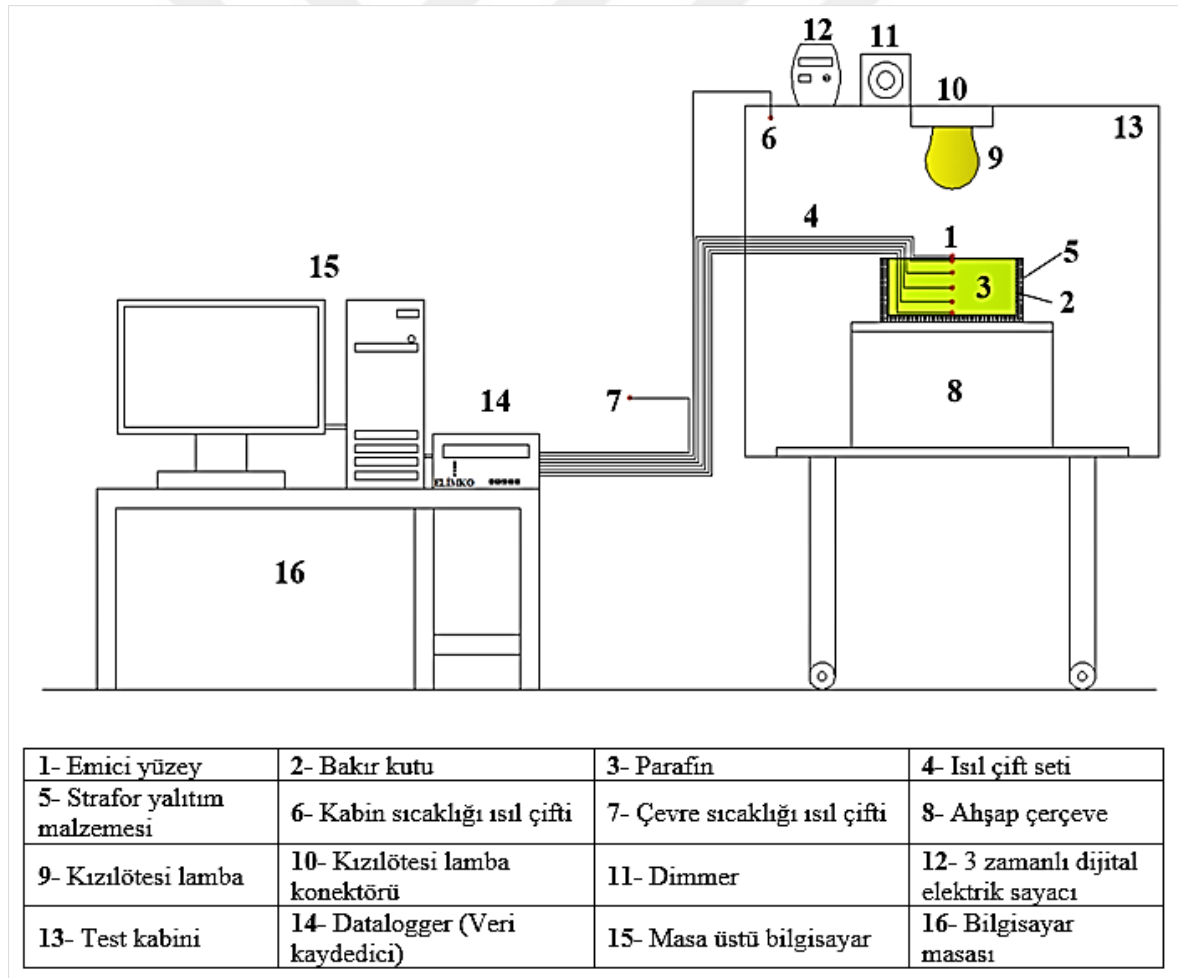
Malzeme Bileşimi (%Kütlece)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Ergime Isısı (kJ/kg)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)
NaF–MgF ₂ (75 + 25)	832	650	4660	2,68
NaF–MgF ₂ (67 + 33)	832	616	4650	2,14
LiF–MgF ₂ (67 + 33)	746	947	-	2,63
NaF–CaF ₂ –MgF ₂ (65 + 23 + 12)	745	574	-	1,58
LiF–NaF ₂ –MgF ₂ (33.4 + 49.9 + 17.1)	650	860	1150	2,82
LiF–NaF ₂ –MgF ₂ (46 + 44 + 10)	632	858	1200	2,24
Na ₂ CO ₃ –Li ₂ CO ₃ (56 + 44)	496	368	2110	2,33
NaCl–MgCl ₂ (50 + 50)	450	429	960	2,24
Li ₂ CO ₃ –K ₂ CO ₃ –Na ₂ CO ₃ (31 + 35 + 34)	397	275	2040	2,31
MgCl ₂ –NaCl–KCl (63 + 22.3 + 14.7)	385	461	950	2,25
NaCl–Na ₂ CO ₃ –NaOH (7.8 + 6.4 + 85.5)	282	316	-	2,13
LiCl–LiOH (37 + 63)	262	485	1100	1,55
KCl–NaCl–CaCl ₂ (5 + 29 + 66)	504	279	1000	2,15
KCl–BaCl ₂ –CaCl ₂ (24 + 47 + 29)	551	219	950	2,93

3. MATERYAL – METOT

3.1. Materyal

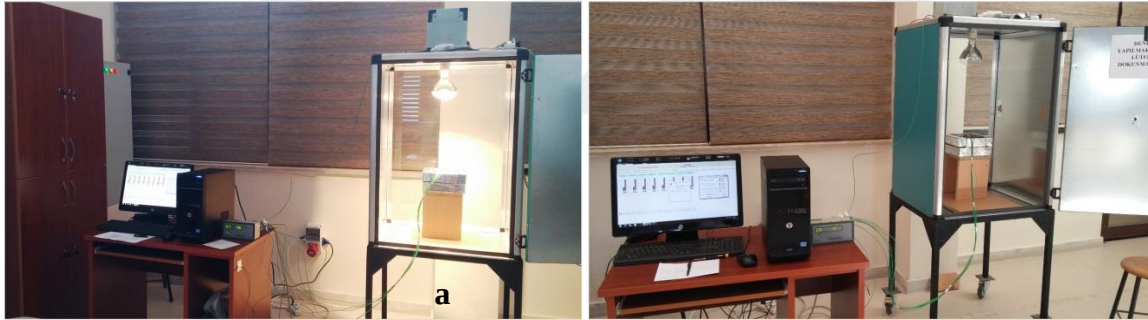
Deneysel çalışma kapsamında, bakır malzemeden imal edilmiş bir termal enerji depolama ünitesi Şekil 3.1’de verilmiştir. Deney düzeneği genel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu ana bölümler aşağıdaki gibidir:

1. Termal enerji depolama ünitesi (TEDÜ),
2. Güneş ışınlıma kaynağı ve kontrol ünitesi,
3. Veri toplama ünitesi (VTÜ),



Şekil 3.1. Şematik deney düzeneği

Şekil 3.1’de şematik çizimi verilen deney düzeneğinin gerçek resmi Resim 3.1’de verilmiştir. Deney düzeneğinde ısı kaynağı olarak Goldenfer marka 500W-240V-E27 tipi bir kızılötesi lamba kullanılmıştır. TEDÜ içerisinde parafin wax depolanmış ve aynı ünite bir kabin içerisine konulmuştur. Işık kaynağından gelen güneş ışınımı, KIMO marka solarimetre kullanılarak ölçülmüştür. Işınım şiddeti değerlerini ayarlamak için 500W güçte çalışabilen bir adet dimmer kullanılmıştır. Kızılötesi lambanın tüketmiş olduğu elektrik enerjisi 3 zamanlı bir elektrik sayacı ile kayıt altına alınmıştır. Isıl enerji depolama ünitesinin, güneş ışınımı altındaki enerji depolama davranışının tayini için depo içerisindeki belirli noktalardan ısı çiftleri (termokupllar) ile sıcaklık değerleri okunmuş ve bu değerler veri kaydedici (data logger) kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Veri kaydedici kullanılarak alınan veriler masaüstü bilgisayara data logger firması tarafından temin edilen program sayesinde her 5s’de bir kaydedilmiştir. Ölçülen sıcaklık değerleri kullanılarak parafin waxın ergime soğuma davranışı incelenmiştir. Ergime ve soğuma davranışını takiben her bir TEDÜ tasarımının depolamış olduğu ısı enerji miktarı hesaplanmıştır.



Resim 3.1. Gerçek deney düzeneği, a) Işık kaynağı açık durumda, b) Işık kaynağı kapalı durumda

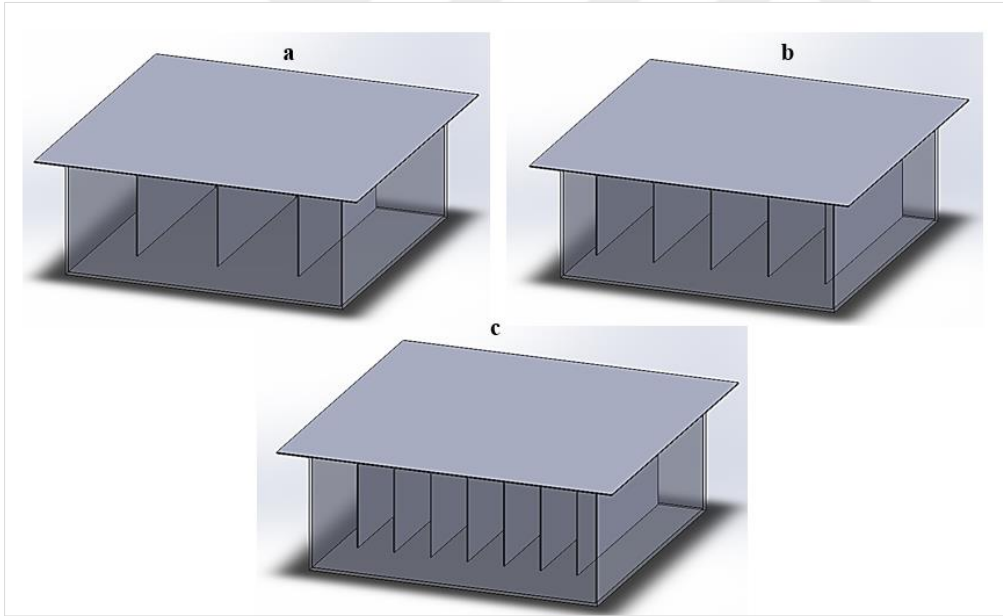
3.1.1. Termal enerji depolama ünitesi

Emici yüzey ve parafin deposu

TEDÜ, yapay güneş ışınımının absorplandığı emici yüzey, FDM olarak kullanılan parafinin içerisine konulduğu depo hacmi, depolanan ısı enerjinin çevreye yayılmasını engelleyen ısı yalıtım malzemesi ve parafinden oluşmaktadır. TEDÜ tasarımı yapılırken FDM olarak seçilen, organik FDM grubunda yer alan (Bkz. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5) parafin waxın düşük ısıl iletkenlik özelliği emici yüzeyin altına kanat eklenerek iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle 3, 5 ve 7 adet kanat (n), emici yüzeyin altına belirli aralıklarla

lehimleme işlemiyle montajlanmıştır. Üretim işlemine başlamadan önce Şekil 3.2’de görülmekte olan TEDÜ tasarımları yapılmıştır. Kanat eklenmesinin sağlayacağı yararların tahmini için detaylı literatür araştırması yapılmıştır.

Düz veya borulu TEDÜ tasarımlarında FDM’nin ısı kaynağından gelen enerjiyi bünyesinde depolayabilmesi ve depolanan enerjinin faz değişimi yoluyla geri kazanılabilmesi için ısı kaynağı ile FDM arasında iyi bir ısı transferi mekanizmasının kurulması gerekmektedir. FDM’lerin sahip oldukları düşük ısı iletim katsayısının iyileştirilmesi amacıyla ısı transfer yüzey alanlarının artırılması, ısı transferini artırıcı nano boyuttaki maddelerin eklenmesi ve FDM’lerin makro veya mikro kapsül içerisine konulması yöntemlerinden biri kullanılabilmektedir. Böylece parafin waxın veya diğer FDM’lerin olumsuz özelliği olan düşük ısı iletkenlik değerleri yükseltilmiş olmaktadır [5-27].



Şekil 3.2. a) $n=3$ kanatlı, b) $n=5$ kanatlı, c) $n=7$ kanatlı FDM deposu CAD tasarımları

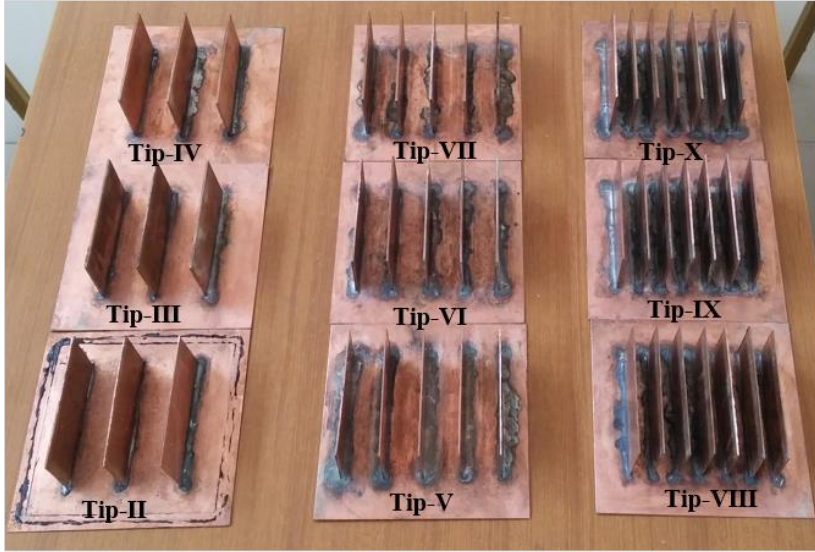
Şekil 3.2’de verilen TEDÜ tasarımları için üç boyutlu bilgisayar destekli çizim (CAD) programı olan Solidworks™ kullanılmıştır. TEDÜ’nün metal kısımları, yüksek ısı iletkenlik kabiliyetinden dolayı 1mm kalınlığındaki bakır malzemeden imal edilmiştir. Emici yüzey 142x142mm boyutlarında kare bir yapı olarak imal edilmiştir. İçerisine parafin doldurulan bakır depo ise 120mm eninde, 120mm boyunda ve 5cm derinliğinde olacak şekilde dikdörtgenler prizması geometrisinde tasarlanmıştır. Emici yüzey ve depo

kısımının kalınlıkları sabit ve 1mm olarak belirlenmiştir. Fakat kanatlar 1, 1,5 ve 2mm kalınlığa (t) sahip olacak şekilde farklı kalınlıklarda, 90mm boyunda ve 45mm yüksekliğinde imal edilmiştir.

Kanatların montajında emici yüzeyin ortasında bulunan kanat, tüm kanat çeşitlerinde sabit kabul edilmiş ve geriye kalan kanatlar bu kanadın sağına ve soluna yerleştirilmiştir. Kanatları lehimleme işlemi, 1, 1,5 ve 2mm kalınlıktaki (t) kanatlar için sırasıyla aralarında 35mm, 25mm ve 15mm boşluk (p) olacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilmiş olan emici yüzeyler aşağıda görülmekte olan Resim 3.2’de verilmiştir. Toplamda 10 adet emici yüzey kullanılmış ve bu emici yüzeylerden bir tanesi kanatsız (boş) ve diğerleri ise farklı sayı ve kalınlıktaki kanatlardan oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan kanatlı ve kanatsız emici yüzeylerin tasarım ölçüleri Çizelge 3.1’de detaylı şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan emici yüzeylerin tasarım ölçüleri

Ad	Kanat Sayısı (n, adet)	Kanat Kalınlığı (t, mm)	Kanatlar Arası Boşluk Mesafesi (p, mm)	Emici Yüzey Boyutları (en x boy x kalınlık, mm)
Tip-I	Kanatsız	-	-	142x142x1
Tip-II	3	1	35	
Tip-III	3	1,5	35	
Tip-IV	3	2	35	
Tip-V	5	1	25	
Tip-VI	5	1,5	25	
Tip-VII	5	2	25	
Tip-VIII	7	1	15	
Tip-IX	7	1,5	15	
Tip-X	7	2	15	



Resim 3.2. İmal edilen kanatlı emici yüzeyler

Emici yüzeyin üzerine kızıllötesi lambadan gelen güneş ışınımı, ışınım ile ısı transferi mekanizması esasına dayanarak, emici yüzeyden başlayarak düşey yönde iletilmektedir. Işınım ile ısı geçişinde, emici yüzeyin ısı veya ışık kaynağından gelen radyasyonu soğurma değerinin yüksek olması ışınım ile ısı geçişinin en önemli noktasıdır. Diğer bir ifade ile emici yüzey olarak kullanılacak olan metalin hem ısıyı absorbe (soğurma) etme hem de iletme özelliğinin diğer yapılara göre daha iyi olması istenmektedir. Bu nedenle tasarlanan ve imal edilen emici yüzeyler ısıya dayanıklı mat siyah boya ile boyanarak, kızıllötesi lambanın yaymış olduğu güneş ışınımının emici yüzey tarafından absorbe edilme miktarı artırılmıştır. Boyama işlemine tabi tutulmuş emici yüzey örneği Resim 3.3’de verilmiştir.



Resim 3.3. Mat siyah boya ile boyanmış emici yüzey

Emici yüzeylerin üst kısımlarına 12mm çapında birer adet delik açılmıştır (Bkz. Resim 3.3). Bu deliklerin açılmasının amacı, parafin deposu içerisinde FDM’nin ergime ve akışını kontrol etmektir.

katılaşma davranışının incelenmesi için kullanılacak olan ısı çiftlerinin montajının yapılması ve aynı zamanda parafin waxın bu delik aracılığıyla depolama bölümüne eklenmesidir. Deliğin emici yüzeyin üst kısmına açılmasıyla, katı haldeki parafinin faz değiştirdikten sonra herhangi bir sızıntıya maruz kalması önlenmiştir.

Sistemde kullanılan bakır malzemeye ait termo-fiziksel özellikler aşağıda görülmekte olan Çizelge 3.2’de verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan değerler literatürden alınan verilerdir.

Çizelge 3.2. TEDÜ’de kullanılan bakırın termo-fiziksel özellikleri [49]

Yoğunluk (ρ , kg/m ³)	Özgül Isı (C_p , kJ/kgK)	Isı İletim Katsayısı (k , W/mK)	Isıl Yayılm Katsayısı ($\alpha \times 10^7$, m ² /s)	Isıl Genleşme Katsayısı ($\beta_T \times 10^6$, 1/K)
8954	0,383	400	1163,1	16,7

Parafin wax

Yapılan tez çalışmasında kullanılmış olan parafin wax, İzmir’ de üretim yapmakta olan AGS Parafin firmasından temin edilmiştir. Waxa firma tarafından verilen ticari isim P-1/S’dir. Katı halde temin edilen parafin wax bir elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla ayrı bir kapta ergitilmiş ve sıvı haldeki wax emici yüzey üzerindeki delikten bir huni yardımıyla bakır kutu dolana kadar eklenmiştir. Kullanılan parafine ait termo-fiziksel özellikler aşağıdaki Çizelge 3.3’de detaylı şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.3. TEDÜ’de kullanılan parafin waxın termo-fiziksel özellikleri [50]

Ticari Ürün Kodu	P-1/S	Standart
Ergime Derecesi (°C)	47-50	ASTM D-938
Yağ Oranı (wt% max)	2	ASTM D-721
25°C’deki Penetrasyon (100g, 1/10mm, maks.)	24-28	ASTM D-1321
Alevlenme Noktası (°C)	en az 200	-
Asitlik	Yok	-
Konradson ** Karbon Kalıntısı (wt%)	<0.05	-
Renk	Beyaz (Saybolt+26)	ASTM D-1500
Özgül ısı (kJ/kgK)	2*	-

Çizelge 3.3. (devam) TEDÜ’de kullanılan parafin waxın termo-fiziksel özellikleri [50]

Yoğunluk (katı, kg/l)	0.85	-
Yoğunluk (sıvı, kg/l)	0.75	-
Isıl iletkenlik katsayısı (hem katı hem sıvı faz için, W/mK)	0.2*	-
Ergime Gizli Isısı*** (kJ/kg)	142	-

*Literatürden alınmıştır [51].

**Yağların uçucu kısımların uçmasından sonra geri kalan kok miktarıdır.

***DSC cihazından elde edilmiştir.

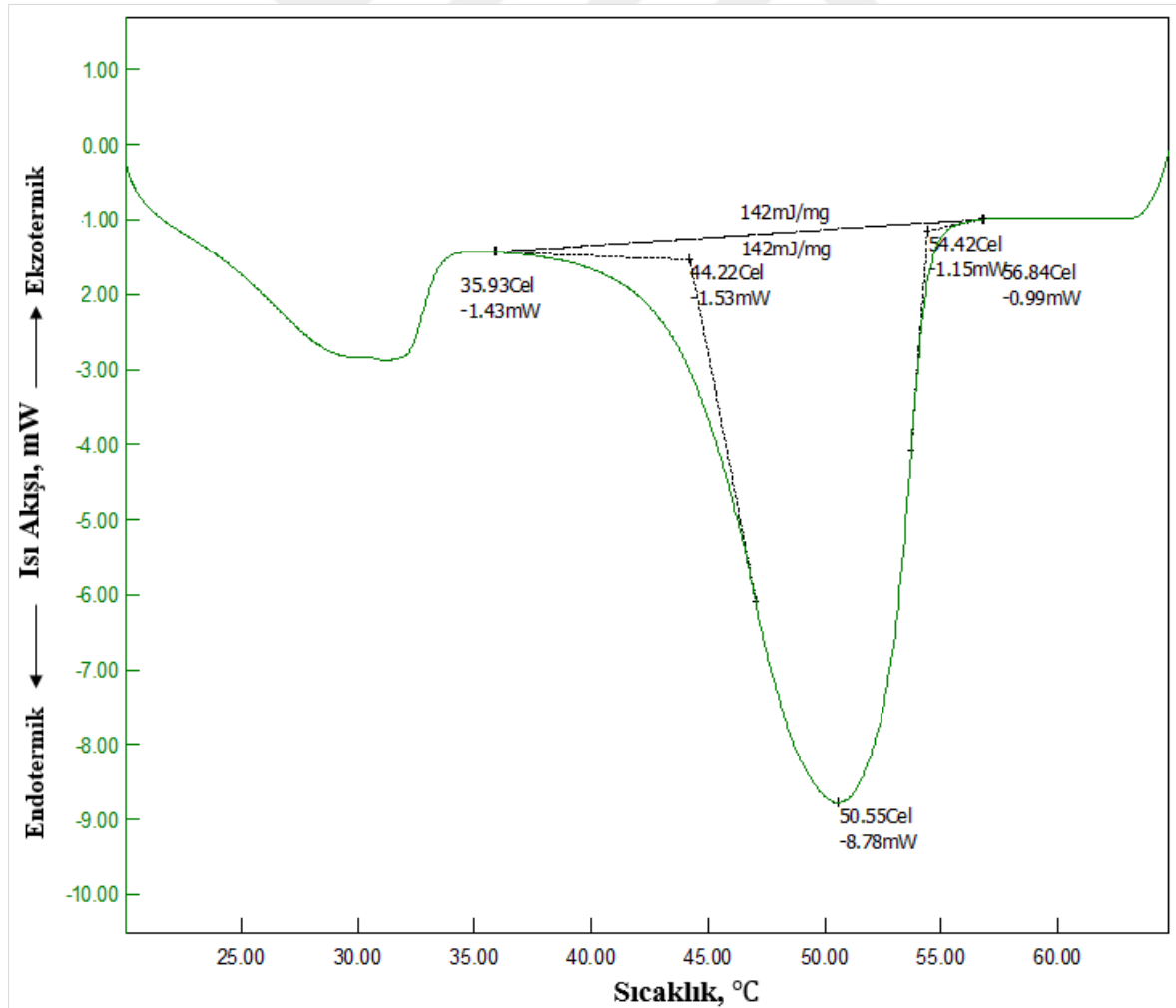
FDM olarak kullanılan parafin waxa ait termo-fiziksel özelliklerden bazıları firma tarafından sağlanmıştır. Fakat FDM’ler için en önemli özellik olan *ergime gizli ısı değeri*, diferansiyel taramalı kalorimetre analizi cihazı (*differential scanning calorimeter-DSC*) kullanılarak elde edilmiştir. DSC analizi farklı sıcaklıktaki malzemelerin termal davranışlarını incelemek için yapılmaktadır. Bu analiz yönteminde, referans ve numune malzemeler aynı sıcaklık seviyelerinde kalacak şekilde ısıtılmakta; referans ve numunenin sıcaklığını aynı oranda arttırmak için gereken ısı farkı ölçülmektedir. Diferansiyel ısı akışı, sıcaklığa veya zamana bağlı olarak grafik haline getirilmektedir. Çizilmiş olan sıcaklık-ısı akışı grafiği kullanılarak numuneye ait faz geçişleri, ergime noktası, sıvıdan katıya geçişte oluşan kristalizasyon sıcaklığı ve özgül ısı gibi termo-fiziksel özellikler belirlenebilmektedir. DSC analizi sırasında, numunenin sıcaklığı havanın çiğ noktası sıcaklığının altına düştüğünde ve test sırasında numuneden çıkan korozif gazları gidermek amacıyla DSC cihazı içerisinde yoğunlaşma meydana gelmesini önlemek için inert (asal, etkisiz) gaz olan nitrojen gazı numunenin bulunduğu kabın içine inert atmosferin devamlılığını sağlamak için gönderilmektedir. Genellikle numune ve referans malzeme ısıtma ve soğutma hızları 5-40°C/dk olarak DSC cihazında uygulanmaktadır. Numune 40°C/dk’nın üzerinde ısıtılır veya soğutulursa, doğrusal olmayan etkiler baskın hale gelmekte ve kalibrasyon parametreleri artık geçerli olmamaktadır [52].

Yapılan tez çalışmasında kullanılan parafin için, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan DSC analiz cihazı kullanılmıştır. 4,911mg kütlesindeki parafin numunesi, cihazın numune gözüne konulmuş ve numuneye 5°C/dk değerinde ısıtma hızı uygulanmıştır. Referans gözü ise boş bırakılmıştır. Maksimum 65°C sıcaklığa kadar numune ısıtılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak çizilen diferansiyel ısı akışı grafiği Şekil 3.3’de verilmiştir. DSC cihazı ile birlikte verilen yazılım

kullanılarak numunenin ergime gizli ısı değeri 142 mJ/mg cinsinde bulunmuştur (Bkz. Şekil 3.3). Literatürde ergime gizli ısı değeri çoğunlukla kJ/kg birimi cinsinden verilmektedir fakat burada SI birim sisteminde bulunmakta olan mJ/mg (mili Joule/mili gram) birimi cinsinden verilmiştir. Bulunmak istenen ergime gizli ısısı değerinin hesaplanmasında aşağıdaki Eş. 3.1 kullanılmaktadır:

$$\Delta H = K \cdot A \quad (3.1)$$

Burada ΔH [kJ/kg veya mJ/mg] faz değişim entalpisini, K [kJ/kgm² veya mJ/mgm²] kalorimetrik sabiti ve A [m²] sıcaklığa veya zamana bağlı olarak çizilen diferansiyel ısı akışı grafiğinde endotermik veya ekzotermik bölgede pik bölgenin alanını ifade etmektedir. Cihaz yazılımı kullanılarak elde edilen faz değişim entalpileri burada ifade edilen yöntemi kullanmaktadır.



Şekil 3.3. Deneyde kullanılan parafine ait DSC analiz grafiği

Çalışmada kullanılan parafine ait DSC analizi sonucu elde edilen diferansiyel ısı akışı sıcaklık grafiği Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekil 3.3 incelendiğinde parafin waxın endotermik bir reaksiyon gerçekleştirildiği görülmektedir. Açıkça belirtmek gerekirse faz değişimi için dışarıdan ısı verilmesi gerekmektedir. Parafin wax, dışarıdan yeterince ısı aldığı anda faz değiştirerek katı halden sıvı hale geçmektedir. Parafinin pik noktası sıcaklığı 50,55°C olarak ölçülmüştür. Firma tarafından tarafımıza iletilen ergime sıcaklık değeri de 47-50°C aralığında olduğu için DSC analizinden elde edilen değerin mevcut veriler ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, DSC cihazı ara yüz programı kullanılarak parafine ait ergime gizli ısı değeri 142 mJ/mg olarak elde edilmiştir.

Bağlantı elemanları

TEDÜ içerisindeki sıcaklık dağılımının düşey yönde değişimini incelemek için kullanılan ısı çiftleri, bakır malzeme üzerine Akfix firmasından temin edilen reçine ve sertleştiriciden oluşan çift solüsyonlu ve yüksek mukavemete sahip bir yapıştırıcı olan epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmıştır.

Mat siyah boya ile boyanmış ve üzerine 12mm çapında delik açılmış olan emici yüzey ve parafin waxın içerisine konulduğu bakır kutu Akfix firmasından temin edilen sıvı conta ile birleştirilmiştir. Yeterli sayıda ısı çiftiye sahip olunmamasından dolayı, emici yüzey ile parafin kutusunu birleştirmek için çözülebilen bir bağlantı şekli tercih edilmiştir. Sıvı conta ile hem sızdırmazlık hem de bağlantı işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yalıtım malzemesi

TEDÜ’den çevreye olan ısı kayıplarını engellemek için yan ve alt yüzeyler sırasıyla 4cm ve 5cm kalınlığında, ısı iletim katsayısı 0,039W/mK olan straforla yalıtılmıştır [53]. Isıl çiftleri takılmış, parafin wax eklenmiş ve yalıtılmış haldeki TEDÜ Resim 3.4’de verilmiştir.



Resim 3.4. Deneylerde kullanılan TEDÜ

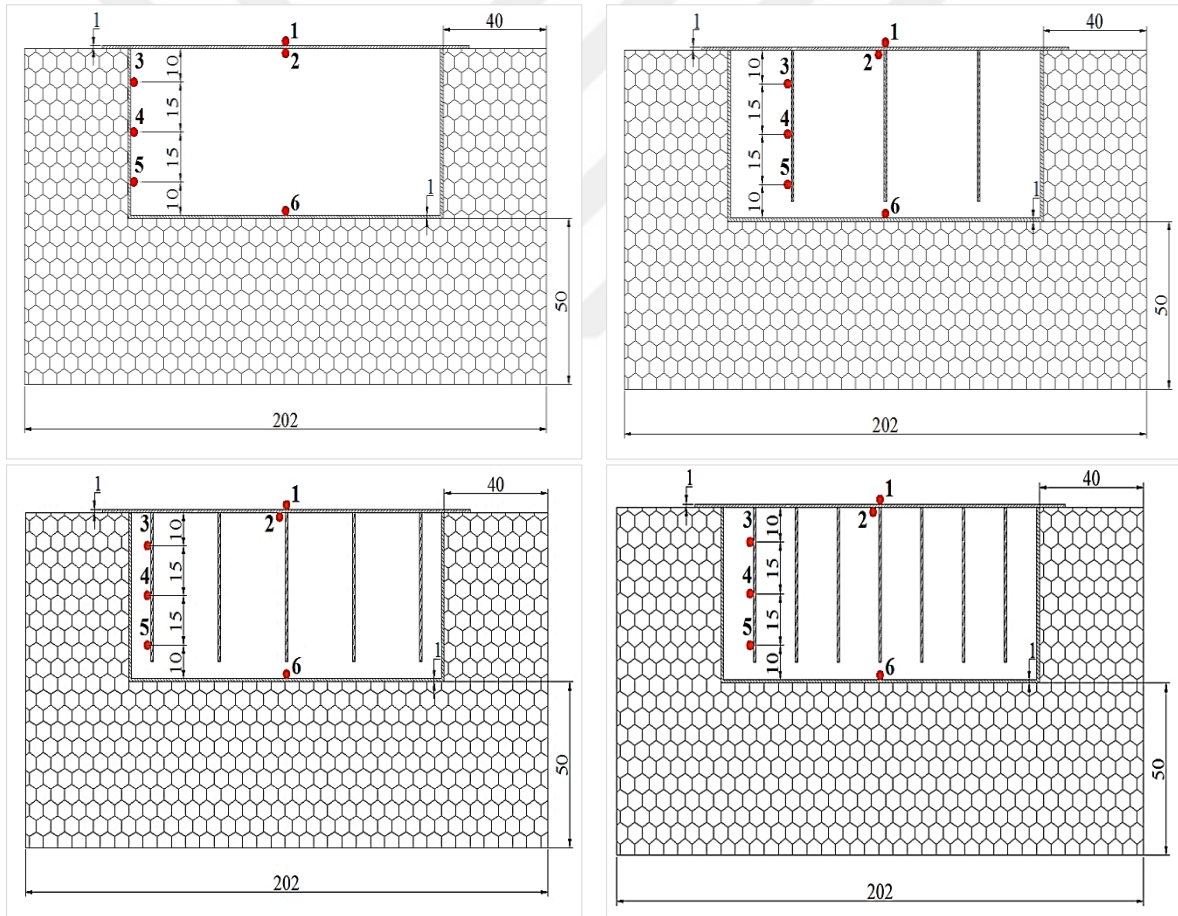
Isıl çift (Termokupl)

ELIMKO firması tarafından sağlanan, portatif tip ısıl çift kategorisinde yer alan, E-TC15-K-K30-TT ürün koduna sahip 1xNiCr-Ni türünde Resim 3.5’de görülmekte olan K tipi ısıl çift belirlenen noktalardaki sıcaklık değerlerini ölçmek için kullanılmıştır. Isıl çiftin ucu kaynaklı, 0,5mm çapında ve 2m boyundadır. 0,01°C ölçüm hassasiyetine sahiptir. NiCr-Ni metallereinden oluşan ısıl çift, teflon malzemesinden yapılmış kılıfa sahiptir. Farklı uygulamalar için kılıf malzemeleri de değişmektedir. Yapılan tez çalışmasında katı haldeki parafinin faz değiştirip sıvı hale geçmesi durumunun incelenmesi amacıyla ısıl çifti oluşturan NiCr-Ni metallereinin sıvı haldeki parafinden etkilenmemesi için teflon kılıf tercih edilmiştir. Temin edilen ısıl çiftler, Şekil 3.4’de gösterildiği gibi düşey yönde sıcaklık dağılımını incelemek üzere epoksi reçine kullanılarak altı noktadan yapıştırılmıştır.



Resim 3.5. E-TC15-K-K30-TT ürün kodlu K tipi ısıl çift

Yapılan tez çalışmasında kullanılan K tipi ısıl çift ucu kaynaklı elaman kablosu olmakla birlikte, ölçüm yapılan noktanın gerilimini ölçmeye yaramaktadır. Isıl çift, bir tür sıcaklık sensörüdür. Farklı iki iletken malzemeden oluşmakta ve bu malzemelerin iki ucu birleştirilip (sıcak nokta) ve ısıtıldığında, diğer uçlarda (soğuk nokta) gerilim elde edilmektedir. Bu gerilimin değeri kullanılan malzemenin cinsine ve birleşim noktasının ısınma miktarına bağlıdır. Sıcak nokta ile soğuk nokta sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkıyla orantılıdır. Sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkı ısıl çift üzerinde elektro motor kuvveti (EMK) oluşturmaktadır. Uygun ölçüm cihazları ile ısıl çiftler tarafından oluşturulan bu EMK istenilen sıcaklık birimi cinsinden okunmaktadır.



Şekil 3.4. TEDÜ içindeki ısıl çift konumları, a) Boş (kanatsız) TEDÜ, b) n=3 kanatlı TEDÜ, c)n=5 kanatlı TEDÜ, d) n=7 kanatlı TEDÜ

K tipi ısıl çift şu yapılardan oluşmaktadır: (kromal { %90 nikel ve %10 krom } —alümel { %95 nikel, %2 mangan, %2 alüminyum ve %1silikon }), en genel amaçlı ısıl çifttir.

Algılaması yaklaşık olarak $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 'dir. Maliyetleri düşük ve problemler -200°C ile $+1200^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında geniş kullanım alanına sahiptir.

Isıl çiftlerin farklı geometrik şekillere sahip TEDÜ içindeki konumları Şek. 3.4'de açıkça gösterilmiştir. Emici yüzeyden başlayarak altı noktadan sıcaklık ölçümü alınmıştır. Ölçülen değerler parafinin ergime süresinin tayininde ve tüm TEDÜ yapısının depolamış olduğu enerji ve ısı güç miktarının tayininde kullanılmıştır.

3.1.2. Işınım kaynağı ve kontrol ünitesi

Kızılötesi (İnfrared) lamba

Ölçüm aletleri ve deney düzenekleri üzerine çalışma yapan birçok firma tarafından yapay güneş kaynakları veya diğer adıyla güneş simülatörleri piyasada satışa sunulmaktadır. Fakat maliyetlerinin çok yüksek olmasından dolayı, küçük boyutlu projelerde yüksek maliyetlerini karşılamak imkânsızdır. Bu nedenle aynı amaca yönelik farklı donanımlar kullanmak suretiyle istenilen amaca ulaşılmaya çalışılmaktadır. Güneş simülatörlerinde çözülmesi gereken en büyük problem, incelenecek olan bölgeye gelen ışınımın her noktada aynı olmasıdır. Bu nedenle farklı filtreleme malzemeleri ve çok sayıda fakat düşük çalışma gücünde lambalar kullanılmaktadır. Yapay güneş ışınımı oluşturmak için LED, xenon ark, halojen/tungsten, akkor, kızılötesi vb. lamba çeşitleri kullanılmaktadır.

Yapılan tez çalışmasında amaç, laboratuvar şartlarında düşük maliyetle güneş ışınımı oluşturmak ve oluşturulan güneş ışınımının depolanabilirliğini incelemektir. Böylece yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin depolanabilme kabiliyeti üzerine bir inceleme yapılmış olmaktadır. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında, laboratuvar şartlarında güneş ışınımı elde etmek için Resim 3.6'da görülmekte olan Golden Fer firmasının üretmiş olduğu 220V 500W E27 tipi, 5000 saat çalışma ömrüne sahip kızılötesi lamba kullanılmıştır. Kızılötesi lamba ile emici yüzey arasındaki mesafe 38cm olarak belirlenmiştir. Kızılötesi ışınım mekanizmasının kullanılmakta olduğu bu teknoloji yeni olmamasına karşın son zamanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çünkü ultraviyole ışınları gibi zararlı bir ışın değildir. Tıp, gıda, kozmetik, savunma, haberleşme vb. sektörlerde aktif olarak bu altyapıyı kullanan cihazlar tercih edilmektedir.



Resim 3.6. Deneyde kullanılan kızılötesi (infrared) lamba

Kızılötesi lamba, yaymakta olduğu güneş ışınımının emici yüzeyin üzerine 90° olacak şekilde düşmesi için TEDÜ'nün konulduğu kabinin tavanına seramik duy kullanmak suretiyle takılmıştır. Kızılötesi lambanın çalışma mekanizması hem ışık hem de ısı yaymak olduğu için, lambanın montajında plastik duy kullanılması, duyun lambadan yayılan ısıdan etkilenmesine sebep olacaktır. Bu nedenle sağlıklı bir deney ortamının sağlanabilmesi için seramik duy kullanılarak bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Kızılötesi lambaların bir diğer hassas noktası ise çalıştırıldığı süre boyunca kesinlikle hareket ettirilmemesidir. Çünkü kızılötesi lamba hareket ettiği zaman kısa devre olmakta ve kullanım ömrü çabucak dolmaktadır. Böylece kullanıldığı sistem içerisinde ekstra maliyet artışlarına sebep olmaktadır.

Güneş ışınımı ölçer (Solarimetre)

Yapılan tez çalışmasında yapay güneş ışınımı oluşturmak için kullanılan kızılötesi lambadan TEDÜ'nün emici yüzeyi üzerine gelen ışınım şiddetinin, tıpkı güneşten gelen ışınım gibi ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle 0 ile 1300 W/m² aralığında ölçüm yapabilen Resim 3.7'de görülmekte olan KIMO marka SL-100 tipi güneş ışınımı ölçer kullanılmıştır. Ölçüm, spektral tepkisi 400 ile 1100 nm arasında olan bir güneş hücresi tarafından yapılmakta ve ışınım şiddeti değerleri cihaz ekranından W/m² olarak okunmaktadır. Işınımölçerin doğruluğu %5 ve ölçüm hassasiyeti 1W/m² olarak firma tarafından belirtilmiştir [54].



Resim 3.7. Güneş ışınlamı ölçer (KIMO SL-100)

Yapılan deneysel çalışmada, üç farklı ışınlam şiddeti değeri için enerji depolama ve depolanan enerjinin geri kazanılması süreçleri incelenmiştir. Hazırlanmış olan tüm TEDÜ'ler sırasıyla $q=800$, 900 ve 1000W/m^2 (q) güneş ışınlamı şiddetinde test edilmiştir. TEDÜ emici yüzeyine gelen ışınlamın heterojen bir dağılım gösterdiği bilinmektedir. Fakat yapılan ölçümlerde emici yüzeyin her bölgesine eşit şiddette ışınlam geldiği varsayılmıştır. Bu homojenleştirme işlemi için öncelikle emici yüzey Şekil 3.5'de görülmekte olan yapıdaki gibi 25 adet bölgeye ayrılmış ve toplamda 36 noktadaki ışınlam şiddeti ışınlamölçer aracılığıyla ölçülmüştür. Böylece ışınlam haritası elde edilmiştir. Ölçülen değerlerin ortalaması alınarak deneylerdeki $q=800$, 900 ve 1000W/m^2 'lik güneş ışınlamı değerlerine ulaşılmıştır.

1	2	3	4	5	6
12	11	10	9	8	7
13	14	15	16	17	18
24	23	22	21	20	19
25	26	27	28	29	30
36	35	34	33	32	31

Şekil 3.5. Işınlam şiddeti haritası

Işınım şiddetinin ayarlanması

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, TEDÜ emici yüzeyine gelen güneş ışınımı değerleri Resim 3.8’de görülmekte olan 500W çalışma gücünde SIMON marka bir dimmer ile ayarlanmıştır. Solarimetre kullanılarak ışınım şiddeti haritası çıkarıldıktan sonra, dimmer üzerinde sırasıyla 800W/m^2 ’lik ışınımı temsil etmesi için 8, 900W/m^2 ’lik ışınımı temsil etmesi için 9 ve son olarak 1000W/m^2 ’lik ışınımı temsil etmesi için 10 rakamları işaretlenmiştir. Kızılötesi lambadan yayılan ışınım şiddeti bahsedilen aparat kullanılarak ayarlanmış ve istenilen ışınım şiddetleri elde edilmiştir.



Resim 3.8 Dimmer

Tüketilen elektrik enerjisinin belirlenmesi

Kızılötesi lamba, FDM olarak kullanılan parafin waxın ergimesi süresince açık konumdadır (Bkz. Resim 3.1). Bu süre boyunca kızılötesi lambayı çalıştırmak için gerekli olan elektrik enerjisi kWh birimi cinsinden Resim 3.9’da verilen üç zamanlı sayaç kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Genel elektrik faturalandırma uygulamalarında kullanılan bu sayaç türü, T1, T2 ve T3 zaman aralıklarına göre ölçüm yapmaktadır. T1, T2 ve T3 zaman aralıkları Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Gündüz dönemi (T1): Saat 06.00 - 17.00
- Puant dönemi (T2): Saat 17.00 - 22.00
- Gece dönemi (T3): Saat 22.00 - 06.00



Resim 3.9. 3 zamanlı elektrik sayacı

Tez çalışması için yapılan deneyler, deney süresi boyunca genel olarak sabah saatlerinde yapıldığı için elektrik sayacından T1 zaman dilimine ait tüketim değerleri okunarak kaydedilmiştir. Her bir ışınlım şiddeti ve her bir deney için bu işlem tekrarlanmıştır.

3.1.3. Veri toplama ünitesi

TEDÜ'nün belirli noktalarına yerleştirilen ısıl çiftler ile kızılötesi lambadan gelen güneş ışınlımının emici yüzeyden başlayarak parafinin içinde bulunduğu bakır deponun tabanına kadar olan düşey yöndeki sıcaklık değişimi incelenmiştir. Bu inceleme, belirlenen noktalardan alınan sıcaklık değerlerinin Resim 3.10'da görülmekte olan ELIMKO firmasından temin edilen E-680 tipi veri kaydedici (datalogger) kullanılarak kayıt altına alınmasıyla yapılmıştır. E-680 tipi datalogger, ekranda gösterilen değerin $\pm 0,5^\circ\text{C}$ 'i ya da $\pm 1^\circ\text{C}$ doğruluk değerinde ölçüm almaktadır. Epoksi reçine ile daha önce belirlenen konumlara yapıştırılan ısıl çiftler dataloggera bağlanmıştır.



Resim 3.10. ELIMKO E-680 tipi veri kaydedici (datalogger)

Isıl çiftler kullanılarak ölçülen sıcaklık değerleri, datalogger ekranından okunabileceği gibi, dönüştürücü kullanmak suretiyle bir bilgisayara da aktarılabilir. Yapılan tez çalışmasında Resim 3.11’de görülmekte olan HP (Hewlett Packard) marka bir masaüstü bilgisayara veriler kaydedilmiştir. Bu kayıt işlemi için Resim 3.12’de görülmekte olan ve aynı firma tarafından geliştirilmiş olan bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Yazılım arayüzünden sıcaklık değerlerini kontrol edip kayıt altına alabilmek için sırasıyla cihaz, kanal ve kayıt konfigürasyonlarının yapılması gerekmektedir.



Resim 3.11. HP masaüstü bilgisayar

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde, ölçülen sıcaklık değerleri her 5 saniyede bir kayıt altına alınmıştır. Elde edilen değerler parafinin güneş enerjisini depolayabilme karakteristiğinin incelenmesinde kullanılmıştır.



Resim 3.12. Datalogger sıcaklık yazılımı

3.2. Metot

Farklı araştırmacılar tarafından güneş enerjisinin duyulur ve gizli ısı formunda depolanabilirliği üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar hava ya da sulu güneş kolektörlerinde güneş enerjisinin depolanabilmesi veya elektrikli ısıtıcının güneş

enerjisine benzetilmesi yoluyla sistemin güneş altında nasıl davranacağı üzerinedir. Dış ortam şartlarında yapılan bu deneysel çalışmalarda çevrenin olumsuz etkilerine sık sık maruz kalınmaktadır. Bu nedenle dış ortamın olumsuz etkilerini elimine etmek için laboratuvar şartlarında aynı ortam şartları deneysel olarak oluşturulmakta ve hem zamandan hem de maliyetten kazanç sağlanmaktadır.

Yapıla tez çalışmasında, laboratuvar koşullarında güneş enerjisinin FDM kullanılarak gizli ısı formunda depolanabilirliği incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaca yönelik olarak yapay güneş ışıınımı ortamı bir kızılötesi lamba kullanılarak oluşturulmuştur. Kızılötesi lambanın yaymış olduğu güneş ışıınımı mat siyah boya ile boyanmış bir emici yüzey tarafından emilmiştir. Emici yüzey, içerisinde organik FDM grubunda yer alan parafin wax bulunan 5cm derinliğinde bakır bir kutunun üzerine konulmuştur. Parafinin düşük ısı iletkenliğini geliştirmek için emici yüzeyin altına $t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlığa sahip 90mm boyunda ve 45mm yüksekliğe sahip kanatlar, sırasıyla $n=3, 5$ ve 7 adet olacak şekilde lehimleme yöntemiyle birleştirilmiştir. Belirli noktalara epoksi reçineyle ısı ııftler yapıştıırılarak emici yüzeyden itibaren düşey yönde parafinin ergime ve aynı şekilde soğuma davranışı incelenmiştir. Emici yüzey ile bakır kutu sıvı conta ile çözülebilir bir şekilde birleştirilmiş ve sızdırmazlık sağlanmıştır.

Deneyler, kızılötesi lambanın yaymakta olduğu ışıınım şiddeti dimmerle ayarlanarak $q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışıınımı altında yapılmıştır. Parafin waxın satıcı firma tarafından verilen erime derecesi $47-50^\circ\text{C}$ olmasına karşın, deneyler parafin wax kutusu tabanında bulunan T_6 numaralı ısı ııftin 60°C sıcaklık değeriini göstermesine kadar sürdürölmüştür. TEDÜ içerisindeki katı halde bir parafin bölgesinin bulunmasının istenmemesinden dolayı böyle bir yol izlenmiştir.

TEDÜ'nün güneş enerjisini depolama süreci ışıık kaynağının açılması ile başlamış ve ısı ııftlerden gelen sıcaklık değeriini izlenmiştir. Sıcaklıklarda duyulur olarak hızlı bir artış gözlenmiş ve sonrasında faz değışimi meydana geldiği zaman yaklaşık sabit sıcaklık değeriinde gizli olarak enerji depolanmıştır. Bakır kutunun tabanında bulunan T_6 numaralı ısı ııft 60°C 'yi gösterdiği anda ışıık kaynağı kapatılmış ve artık hem duyulur hem de gizli ısı formunda depolanan güneş enerjisinin geri kazanılması sürecine geçilmiştir. Enerjinin geri kazanılması süreci, TEDÜ içerisinde bulunan ısı ııftlerden ölçölen sıcaklık değeriilerinin kabin sıcaklığına ulaştığı ana kadar devam etmiştir. Emici yüzey üzerinde

bulunan 1 numaralı ısı çiftten alınan sıcaklık değerleri (T_1) kabin sıcaklığına (T_7) ulaştığında parafin tarafından depolanan ısı enerjinin geri kazanılma süreci tamamlandığı kabul edilmiştir. Farklı kanat ve ışıyım şiddeti değerleri için deneyler tekrarlanmış ve elde edilen veriler kullanılarak zamana bağlı ısı depolama ve geri kazanım grafikleri çizilmiştir.

3.2.1. Depolanan enerji miktarının hesaplanması

Deneysel çalışmada kızılötesi lambanın yaymakta olduğu farklı şiddetlerdeki güneş ışıyımı, tasarımı ve üretimi yapılan TEDÜ'ler üzerine gönderilmiştir. Yapay olarak elde edilmiş olan güneş ışıyımı FDM olarak kullanılan parafin wax bünyesinde hem duyulur hem de gizli ısı formunda depolanmıştır. Buna ek olarak, lambanın yaymakta olduğu enerji TEDÜ tasarımında kullanılan metal parçalar tarafından da duyulur ısı formunda depolanmıştır. Akhilesh ve diğerleri tarafından elektronik parçaların soğutulması için parafin ve kanat geometrisi kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada, ısı kaynağından itibaren tasarlanan sistem içerisinde meydana gelen ısı transferi mekanizmaları gerekli denklemler ile modellenmiş ve zamana bağlı olarak sayısal yöntemler kullanılarak çözülmüştür [55]. Benzer şekilde Atkin ve Farid tarafından yapılan bir çalışmada güneş hücrelerinin soğutulmasına için kanat ve FDM kullanımının güneş hücresi verimine olan etkisi incelenmiştir. Bu inceleme sırasında her bir tasarım parçasının depolamış olduğu gizli ve duyulur ısı formundaki enerji denklemleri türetilmiştir [56]. Bahsedilen çalışmalarda kullanılan ısı transferi denklemleri referans alınarak aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada enerji depolamak için kullanılan TEDÜ'lerde, Tip-I (kanatsız) yapı hariç, aşağıda sınıflandırıldığı gibi 3 farklı kısımda enerji depolanmıştır:

1. Emici yüzey ($E_{emici\ yüzey}$)
2. Kanat ($E_{kanat_{toplam}}$)
3. Parafin ($E_{parafin_{toplam}}$)

Her bir TEDÜ yapısının depolamış olduğu enerji miktarı, kızılötesi lambanın açılmasından parafin deposunun zemininde bulunan T_6 numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklık değerini gösterdiği zamana kadar geçen süre için hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda katı haldeki parafin tamamen ergiyerek faz değiştirmiş ve bünyesine duyulur ısıyın

yanında gizli ısı da depolamıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda her bir enerji depolama ünitesinin depolayabileceği maksimum enerji miktarı Eş. 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{toplam} = E_{emici\ yüzey} + E_{kanat_{toplam}} + E_{parafin_{toplam}} \quad (3.1)$$

Emici yüzeyde depolanan enerji

Bakır malzemeden üretilmiş olan emici yüzeyin sıcaklığı, kızılötesi lambadan gelen ışıma bağlı olarak zamanla artmaktadır. Buna bağlı olarak, maddede faz değişikliğine sebep olmadan duyulur ısı depolanmaktadır. Çalışmada emici yüzeyin depolamış olduğu duyulur ısı ($E_{emici\ yüzey}$, kJ) Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{emici\ yüzey} = m_{ey} C_{ey} (T_f - T_i) \quad (3.2)$$

Burada, m_{ey} (kg) emici yüzeyin kütlesini, C_{ey} (kJ/kgK) emici yüzeyin özgül ısısını, T_i ve T_f (°C) emici yüzeyin ışıma maruz kalmadan ve kaldıktan sonraki sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Emici yüzeyin özgül ısı değeri, bakır malzemeden imal edildiği ve sıcaklıkla değişmediği kabulü yapıldığı için 0,383 kJ/kgK olarak alınmıştır [49]. T_i ve T_f değerleri emici yüzeyin üzerinde ve altında bulunan T_1 ve T_2 numaralı ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak Eş. 3.3'deki gibi bulunmuştur.

$$T_i; T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.3)$$

Emici yüzeyde depolanan duyulur ısı, T_6 numaralı ısı çiftin başlangıçtan 60°C sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen sürede depolamış olduğu enerji miktarıdır.

Kanatta depolanan enerji

TEDÜ içerisindeki parafin waxın düşük ısı iletkenliğini iyileştirmek için kullanılan kanatlarda, emici yüzeyde meydana gelen enerji depolama mekanizmasına benzer olarak sadece duyulur ısı formunda enerji depolanmıştır. Kanatlar $t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlıklarda

ve n=3, 5 ve 7 adet imal edildikleri için farklı kalınlığa sahip kanat geometrileri için ayrı ayrı enerji miktarları hesaplanmıştır. Tek bir kanadın depolamış olduğu duyulur ısı formundaki enerji (E_{kanat} , kJ) miktarı Eş. 3.4 kullanılarak elde edilmiştir.

$$E_{kanat} = m_k C_k (T_f - T_i) \quad (3.4)$$

Burada, m_k (kg) kanadın kütlesini, C_k (kJ/kgK) kanadın özgül ısısını, T_i ve T_f (°C) kanadın ısıyı maruz kalmadan ve kaldıktan sonraki sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Kanadın özgül ısı değeri, bakır malzemeden imal edildiği ve sıcaklıkla değişmediği kabulü yapıldığı için 0,383 kJ/kgK olarak alınmıştır [49]. T_i ve T_f değerleri kanadın üzerinde bulunan T_2 , T_3 , T_4 ve T_5 numaralı ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak Eş. 3.5'deki gibi bulunmuştur.

$$T_i; T_f = \frac{T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{4} \quad (3.5)$$

Kanatta depolanan duyulur ısı, T_6 numaralı ısı çiftin başlangıçtan 60°C sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen sürede depolamış olduğu enerji miktarıdır. Eş. 3.3'de tek bir kanat için yapılmış olan hesaplama, n=3, 5 ve 7 adet kanada sahip TEDÜ'lerdeki toplam kanat sayısı ile çarpılmak suretiyle her bir TEDÜ tasarımındaki kanatların depolamış olduğu toplam duyulur ısı miktarı Eş. 3.6 kullanılarak bulunmuştur.

$$E_{kanat_{toplam}} = n m_k C_k (T_f - T_i); (n = 3; 5; 7) \quad (3.6)$$

Parafinde depolanan enerji

Sabit sıcaklık ve basınçta, maddede faz değişimine neden olan ısıya gizli ısı denilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan parafinin ergime sıcaklık değeri 47-50°C arasında olduğu için bünyesinde, artan sıcaklığa bağlı olarak hem duyulur hem de faz değişimine bağlı olarak gizli ısı formunda enerji depolanmıştır. Deneylerde kullanılan parafinin sıcaklığı önce duyulur olarak hızlı bir artış göstermiş, sonrasında T_6 numaralı ısı çift 47-50°C arasında yaklaşık sabit kalmış ve aynı ısı çift 60°C değerini gösterene kadar duyulur olarak daha yavaş artış göstererek 3 aşamalı olarak bünyesine duyulur ısı depolanmıştır.

Parafinde depolanan duyulur ısı miktarı ($E_{parafin_{duyulur}}$, kJ) Eş. 3.7’da gösterildiği gibi 3 aşamadan oluşmaktadır.

$$E_{parafin_{duyulur}} = [m_p C_p (T_f - T_i)]_1 + [m_p C_p (T_f - T_i)]_2 + [m_p C_p (T_f - T_i)]_3 \quad (3.7)$$

Burada, m_p (kg) TEDÜ deposu içerisindeki parafin kütlesini, C_p (kJ/kgK) parafinin özgül ısısını, T_i ve T_f (°C) parafinin ısıya maruz kalmadan ve kaldıktan sonraki sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Parafinin özgül ısı değeri, Rubitherm firmasının üretmekte olduğu en yakın parafin wax çeşidi için sıcaklıkla değişmediği kabulü yapılarak 2 kJ/kgK olarak alınmıştır [51]. T_i ve T_f değerleri emici yüzeyin altında bulunan T_2 değerinden başlayarak düşey yöndeki T_3 , T_4 , T_5 ve depo zemininde bulunan T_6 numaralı ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak Eş. 3.8’deki gibi bulunmuştur.

$$T_i; T_f = \frac{T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6}{5} \quad (3.8)$$

1. bölge kızılötesi lambanın açıldığı andan T_6 numaralı ısı çiftin 47°C sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen süre, 2. bölge T_6 numaralı ısı çiftin 47-50°C aralığındaki sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen süre ve son olarak 3. bölge T_6 numaralı ısı çiftin 50°C’den 60°C sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen süre olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklık değerlerinde parafin waxın bünyesinde depolanmış olan duyulur ısı miktarı her bir TEDÜ tasarımı için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Parafinin güneş ışınlamına bağlı olarak faz değiştirmesi sırasında bünyesine depolamış olduğu gizli ısı ($E_{parafin_{gizli}}$, kJ) ise Eş. 3.9 kullanılarak elde edilmiştir.

$$E_{parafin_{gizli}} = m_p a_m \Delta h_m \quad (3.9)$$

Burada, m_p (kg) TEDÜ deposu içerisindeki parafin kütlesini, a_m ergiyen parafin waxın oranını ve Δh_m (kJ/kg) parafinin ergime gizli ısı değerini ifade etmektedir. Parafinin depolanmış olduğu maksimum gizli ısı değeri, parafinin tamamen sıvı hale geçtiği andaki yapısı için hesaplanmıştır. Bu nedenle parafinin tamamen sıvı hale geçmesi a_m değerinin 1 alınmasıyla ifade edilmiştir. Parafinin ergime gizli ısı değeri diferansiyel taramalı

kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak 142kJ/kg olarak elde edilmiştir. Parafin tarafından depolanan toplam enerji miktarı, Eş. 3.10'da ifade edildiği gibi hem duyulur hem de gizli ısı formundadır.

$$E_{parafin_{toplam}} = E_{parafin_{duyulur}} + E_{parafin_{gizli}} \quad (3.10)$$

3.2.2. Depolanan ısı güç miktarının hesaplanması

Isıl (termal) güç, zaman içinde sistemdeki ısı değişimi ile verilen bir güç ölçüsüdür. Yakıtlı, çoğunlukla faydalı işlere ulaşmak amacıyla, bir güç santrali veya ısı makinesi gibi bir sisteme sağlanmaktadır. Isıl güç, bir elektrik santralinde elektrik üretmek için kullanılan bir kazanın ısı girdisi miktarının ölçüsü olabileceği gibi Güneş' den ışınlama yayılarak meydana gelen ısı çıktısının da bir ölçüsü olarak ifade edilebilmektedir [57].

Tez çalışması kapsamında önceki bölümlerde ifade edildiği gibi her bir TEDÜ'nün depolamış olduğu enerji miktarı kJ birimi cinsinden hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda kanat kullanımının depolanan enerji miktarı üzerine olan etkisini ifade edebilmek için her bir TEDÜ tasarımının sahip olduğu ısı güç (P_T , W) hesabı yapılmıştır. Yapılan ısı güç hesabı, farklı kanat kalınlığı ve sayısına sahip TEDÜ tasarımlarının depolayabilecekleri güneş enerjisi miktarlarının birbirleri ile termodinamik olarak daha anlaşılır bir şekilde yorumlayabilmek için yapılmıştır. Isıl güç, TEDÜ'lerde depolanan maksimum toplam enerji miktarının sistemin başlangıç (çevre) sıcaklığından T_6 numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklık değerini gösterdiği zamana kadar geçen süreye oranı olarak Eş. 3.11'de verilen şekilde bulunmuştur.

$$P_T(W) = \frac{E_{toplam} (J)}{\Delta t (s)} \quad (3.11)$$

3.3. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçlar kadar önemli bir başka nokta; ölçülen değerlerin doğruluğudur. Doğruluğu etkileyen en önemli etken ise, deneyler sırasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalardır. Literatürde belirtilen standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerde,

hata iki farklı şekilde ortaya çıkabilir. Bunlardan biri, deney setinin ve ölçü araçlarının yapısından kaynaklanan hatalar, diğeri ise, deneyi yapan kişiden kaynaklanan hatalardır. Bahsedilen ikinci tür hataların, yetenekli bir deneycinin deneyleri yapması ile giderilmesi mümkündür. Fakat birinci tür hataların giderilmesi ve belirlenmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bunun nedeni, hataların doğrudan deneyde kullanılan araç ve gereçlerin yapısından kaynaklanmasıdır [58]. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen hata miktarlarının ve etki derecelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle Kline ve McClintock tarafından deneysel bulgulardaki belirsizliklerin hesaplanabilmesi *belirsizlik analizi* olarak ifade edilen bir yöntem geliştirilmiştir [59].

n adet $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ adet bağımsız değişkene bağlı olarak ölçülen R boyutundaki bir büyüklük Eş. 3.12'de gösterilen şekilde ifade edilebilir.

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.12)$$

Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ olarak ifade edildiğinde R büyüklüğünün toplam hata oranı w_R ,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

veya

$$\frac{w_R}{R} = \left[\left(\frac{w_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{x_2}}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{x_3}}{x_3} \right)^2 + \dots + \left(\frac{w_{x_n}}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Yapılan tez çalışması kapsamında sıcaklık ölçümü, kütle ölçümü ve ergime gizli ısı değeri ölçümü yapılmıştır. Tüm bu değerler kullanılarak toplam duyulur ısı (E_{DT}), toplam gizli ısı (E_{GT}) formunda depolanan enerji miktarları ve toplam ısı güç (P_T) değerleri hesaplanmıştır. Sözü edilen bu değerler, ölçülen değerler cinsinden ifade edildikten sonra

belirsizlik analizinde kullanılacak denklemler elde edilmiştir. Bu belirsizlik ifadeleri şu şekilde verilmiştir:

3.3.1. Toplam duyulur ısı için belirsizlik

Toplam duyulur ısı, ölçülen değerler cinsinden,

$$E_{DT} = mc_p(T_f - T_i) \quad (3.15)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Toplam duyulur ısı için toplam belirsizlik ise

$$w_{E_{DT}} = \left[\left(\frac{\partial E_{DT}}{\partial m} w_m \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{DT}}{\partial c_p} w_{c_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{DT}}{\partial T_f} w_{T_f} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial E_{DT}}{\partial T_i} w_{T_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

3.3.2. Toplam gizli ısı için belirsizlik

Toplam gizli ısı, ölçülen değerler cinsinden,

$$E_{GT} = ma_m \Delta h_m \quad (3.17)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada hesaplanan gizli ısı değeri parafinin tamamen ergidiği ana ait olduğu için $a_m = 1$ olarak alınmıştır. Toplam gizli ısı için toplam belirsizlik ise

$$w_{E_{GT}} = \left[\left(\frac{\partial E_{GT}}{\partial m} w_m \right)^2 + \left(\frac{\partial E_{GT}}{\partial \Delta h_m} w_{\Delta h_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

3.3.3. Toplam ısıl güç için belirsizlik

Toplam ısıl güç, ölçülen ve hesaplanan değerler cinsinden,

$$P_T = \frac{E_T}{\Delta t} \quad (3.19)$$

eşitliği ile elde edilmiştir. Burada hesaplanan ısı güç değeri, TEDÜ içerisindeki parafinin tamamen ergiyerek T₆ numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklık değerini gösterene kadar geçen sürede depolanan güç miktarıdır. Toplam ısı güç için toplam belirsizlik,

$$w_{P_T} = \left[\left(\frac{\partial P_T}{\partial E_T} w_{E_T} \right)^2 + \left(\frac{\partial P_T}{\partial \Delta t} w_{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

DeneySEL çalışma kapsamında kullanılan ekipmanların ölçüm belirsizlikleri ve bu değerlerin kullanılmasıyla 800W/m² ışı nım şiddetinde Tip-I TEDÜ için hesaplanan belirsizlikler Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Ölçüm ve hesaplama belirsizlikleri

Belirsizlik Tipleri (w)	Ölçüm veya Hesap Belirsizliği
Kütle	±2x10 ⁻⁵ kg
Isı depolama öncesi başlangıç sıcaklığı	±0,1 °C
Isı depolama sonrası bitiş sıcaklığı	±0,1 °C
Parafin özgül ısısı	±1 J/kg°C
Bakır özgül ısısı	±1 J/kg°C
Ergime gizli ısısı	±%0,70 J/kg°C
Toplam duyulur ısı	±%0,26 J
Toplam gizli ısı	±%0,7 J
Depolanan toplam enerji	±%0,41
Toplam ısı güç	±%0,41

4. BULGULAR – TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasında, güneş ışınlamı altında organik FDM grubunda yer alan parafinin ısı depolama davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada güneş ışınlamı şiddeti altında, emici yüzey altına yerleştirilen farklı kanat sayısı ve kanat kalınlığı değişiminin FDM'nin ısı depolama karakteristiği üzerine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Tasarımı ve üretimi yapılan TEDÜ'ler $q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışınlamı şiddetinde test edilmiştir. Test sırasında katı haldeki parafinin faz değiştirmesi sağlanmış ve faz değişim süreleri kayıt altına alınmıştır. Parafinin düşük ısı iletkenliğini iyileştirmek için emici yüzeyin altına kanat yerleştirilmiştir.

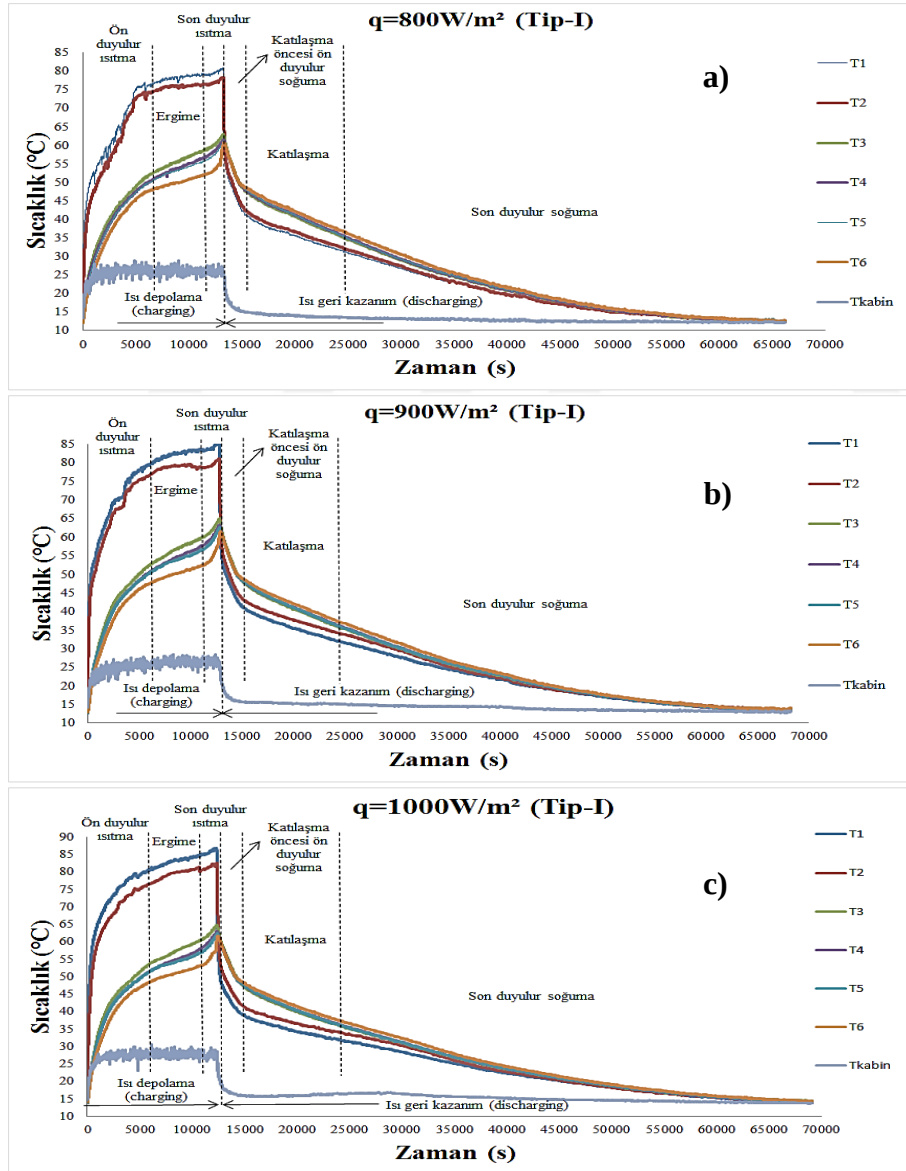
Deneysel çalışmanın bulguları, artan kanat sayısı (n), kanat kalınlığı (t) ve emici yüzeye düşen ışınlamı akısı (q) değişimine bağılı olarak sırasıyla sunulmuştur. Kanatların ısı depolama üzerine etkisi detaylı olarak tartışılmıştır. Tüm yapılarda kullanılan ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklık verileriyle TEDÜ içerisinde düşey yönlü zamana bağılı sıcaklık dağılımı grafikleri çizilerek, analizler yapılmıştır. Elde edilen sıcaklık değerleri kullanılarak her bir TEDÜ tasarımının depolamış olduğı enerji ve zamana bağılı olarak elde edilen ısı güç değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen tüm veriler sistematik bir şekilde bu başlık altında sunulmuştur.

4.1. Zaman Bağılı Sıcaklık Dağılımı

4.1.1. Tip-I (Kanatlı) için sıcaklık dağılımı

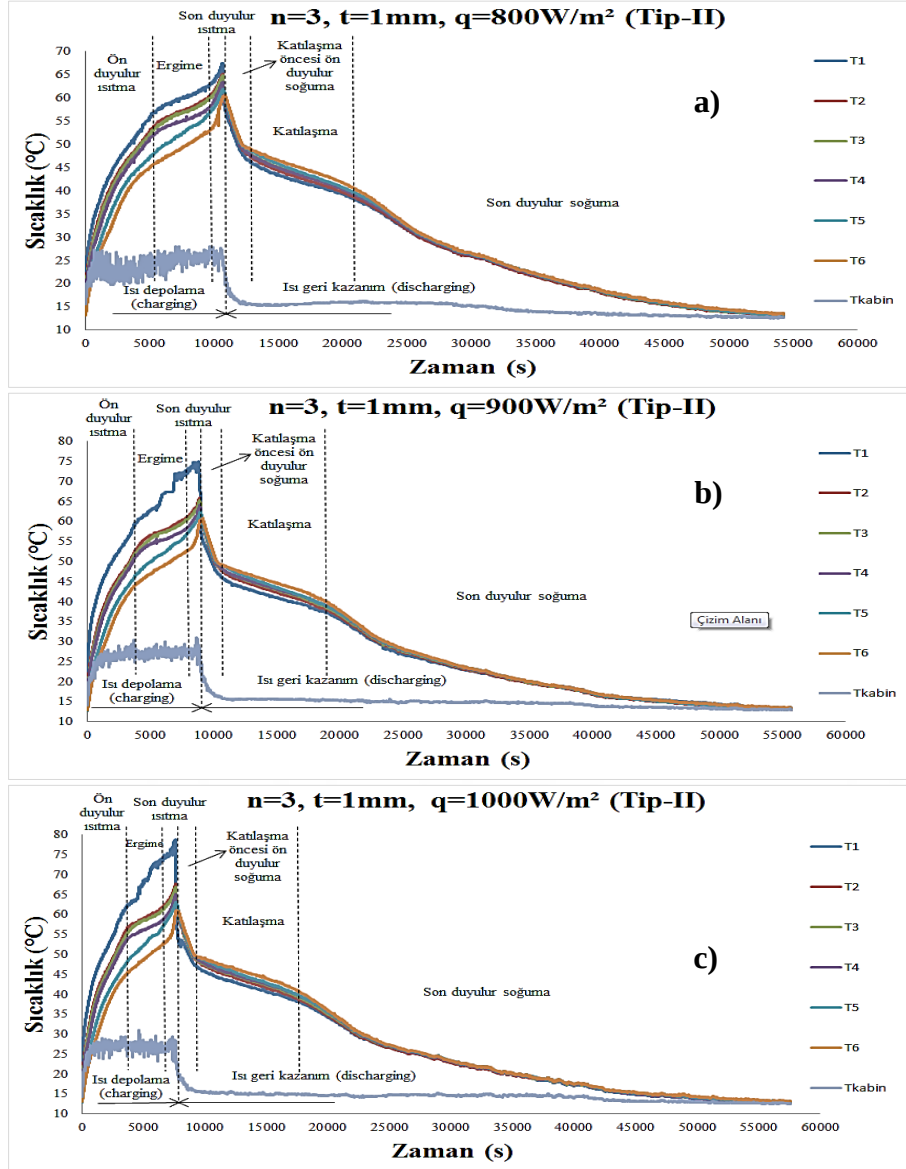
$q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışınlamı şiddetinde Tip-I (kanatlı) TEDÜ için, zamana bağılı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.1'de görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 221, 212 ve 204 dakikada tamamen ergimmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde, elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş ışınlamı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Elde edilen grafik incelendiğinde emici yüzeyin üst ve alt bölgelerinde sıcaklıklar maksimum değerlere ulaşmıştır. Katı fazdaki parafin emici yüzeyin alt kısmıyla temas halindedir. Bu nedenle kızılötesi lambadan gelen güneş ışınlamı ilk olarak emici yüzey tarafından ışınlamı yoluyla

emilmekte, sonrasında katı fazın içerisine iletimle transfer edilmektedir. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınlımı, TEDÜ içerisine verimli bir şekilde iletilemediği için TEDÜ'nün düşey yöndeki sıcaklık dağılımı istenilen özelliği göstermemiştir. Bu yapı içerisinde bulunan FDM'nin ısıyı depolaması ve benzer şekilde depoladığı ısıyı geri vermesi zor olmuştur. Çünkü sıcak bölgelerin daha hızlı soğuma göstermesinden dolayı, ışık kaynağı kapatıldıktan sonra en son eriyen bölge en geç katılaşma özelliği göstermektedir. Bu nedenle emici plakanın hemen altında bulunan bölgede, diğer bölgelere kıyasla daha hızlı bir soğuma gerçekleştiği için depolanan ısıyı geri kazanmayı engelleyici ısı direnç tabakaları oluşmuştur.



Şekil 4.1. Tip-I için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

4.1.2. Tip-II ($n=3$, $t=1\text{mm}$) için sıcaklık dağılımı



Şekil 4.2. Tip-II için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

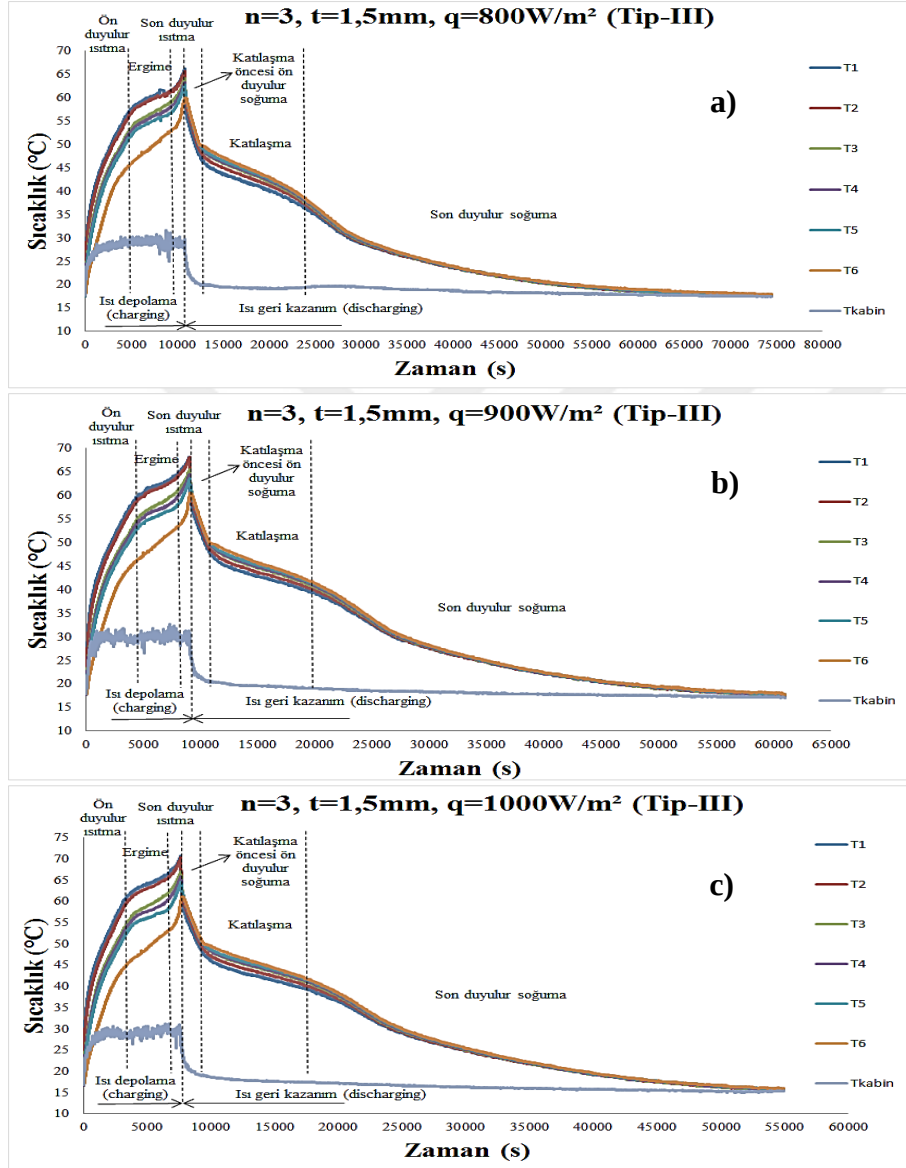
$q=800$, 900 ve 1000W/m^2 güneş ışınlı şiddetinde Tip-II ($n=3$, $t=1\text{mm}$) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.2’de görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 178, 147 ve 126 dakikada tamamen ergimiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınlı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Tip-I ile karşılaştırıldığında daha

düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek daha verimli bir şekilde geri kazanılmaktadır. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru kararlı bir iletim meydana gelmekte ve benzer şekilde ısı geri kazanım aşamasında da tüm sıcaklık değerleri bir uyum sergilemektedir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur. Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %19,46, %30,66 ve %33,24 oranında azalma göstermiştir.

4.1.3. Tip-III (n=3, t=1,5mm) için sıcaklık dağılımı

$q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışınımı şiddetinde Tip-III (n=3, t=1,5mm) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.3'de görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 183, 150 ve 127 dakikada tamamen ergimiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınımı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur.

Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %17,19, %29,25 ve %37,75 oranında azalma göstermiştir. Tip-II ($n=3$, $t=1\text{mm}$) yapısındaki emici plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında ise her bir akı değeri için %2,81, %2,04 ve %0,79 oranında artış göstermiştir.

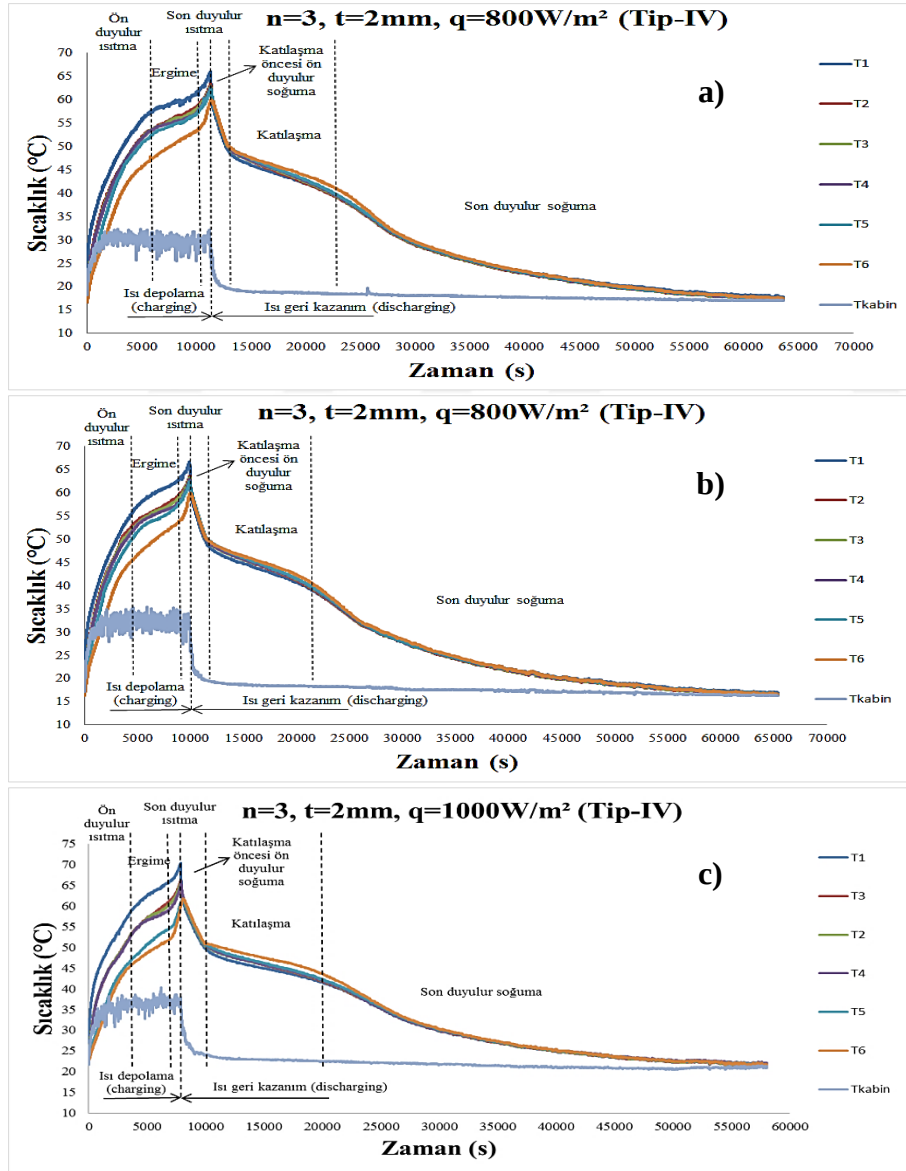


Şekil 4.3. Tip-III için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

4.1.4. Tip-IV ($n=3$, $t=2\text{mm}$) için sıcaklık dağılımı

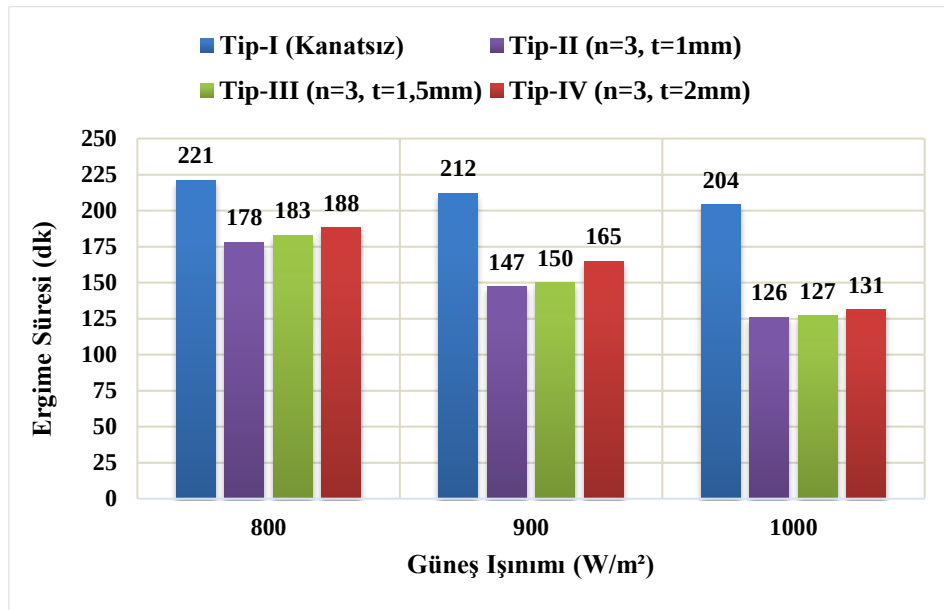
$q=800$, 900 ve 1000W/m^2 güneş ışıınımı şiddetinde Tip-IV ($n=3$, $t=2\text{mm}$) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.4'de görüldüğü

gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 188, 165 ve 131 dakikada tamamen ergimiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınımı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük, emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır.



Şekil 4.4. Tip-IV için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m², b) 900W/m², c) 1000W/m²

Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim söz konusudur. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısının artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur. Parafinin 3 farklı akı değerindeki ergime süresinin Tip-I, Tip-II ve Tip-III'e göre karşılaştırması Şekil 4.5'de verilmiştir.

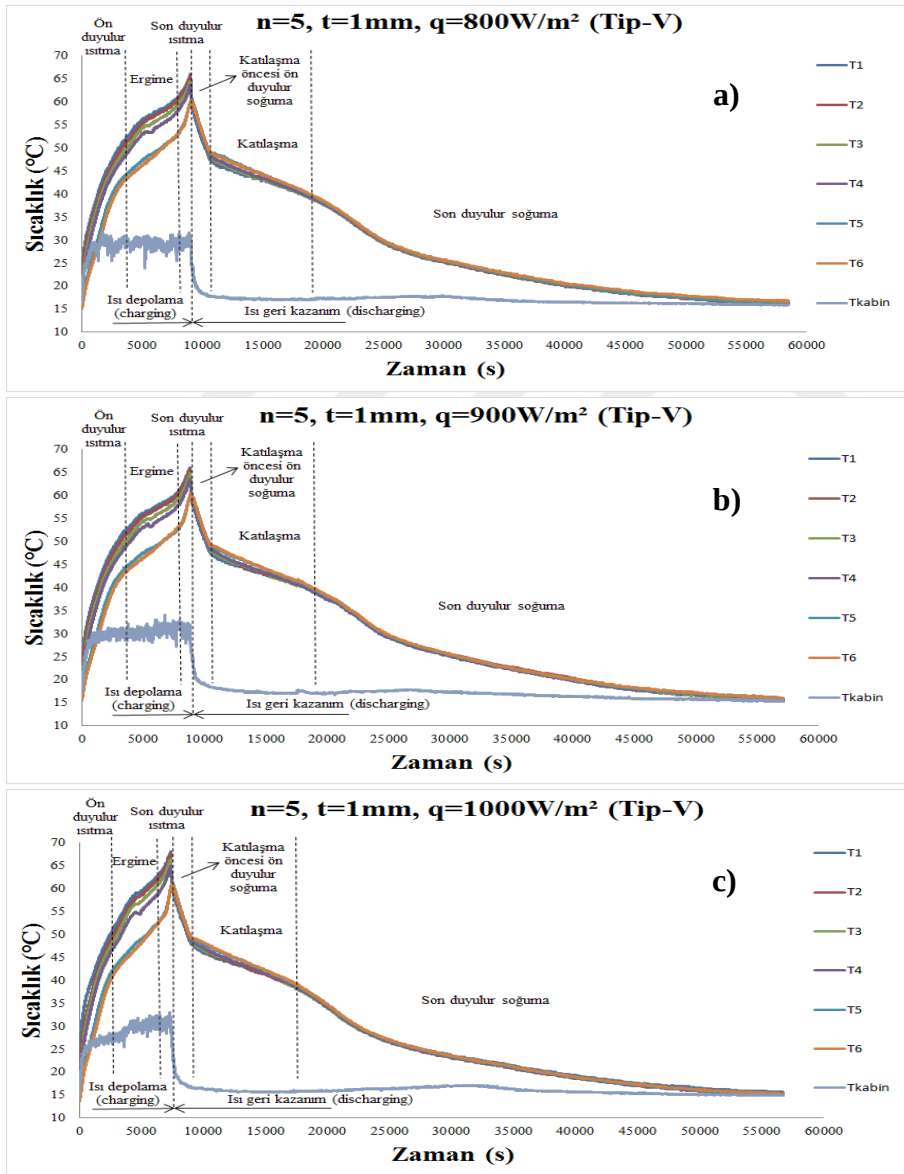


Şekil 4.5. Tip-I, Tip-II, Tip-III ve Tip-IV için ışınlam şiddetiyle FDM ergime süresi değişiminin karşılaştırılması

Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %14,93, %22,17 ve %35,78 oranında azalma göstermiştir. Tip-II (n=3, t=1mm) yapısındaki emici plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresinde her bir akı değeri için sırasıyla %5,62, %12,24 ve %3,97 oranında artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde Tip-III (n=3, t=1,5mm) yapısındaki emici plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için sırasıyla %2,73, %10 ve %3,15 oranında artmıştır. Kanat kalınlığına bağlı olarak parafine aktarılan ısının bir kısmı bakır kanatlar tarafından depolanmıştır. Böylece parafinin ergime süresi uzamıştır.

4.1.5. Tip-V ($n=5$, $t=1\text{mm}$) için sıcaklık dağılımı

$q=800$, 900 ve 1000W/m^2 güneş ışınlı şiddetinde Tip-V ($n=5$, $t=1\text{mm}$) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.6'da görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 151, 147 ve 121 dakikada tamamen ergimiştir. Şek. 4.6 incelendiğinde, elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınlı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değıştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır.



Şekil 4.6. Tip-V için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

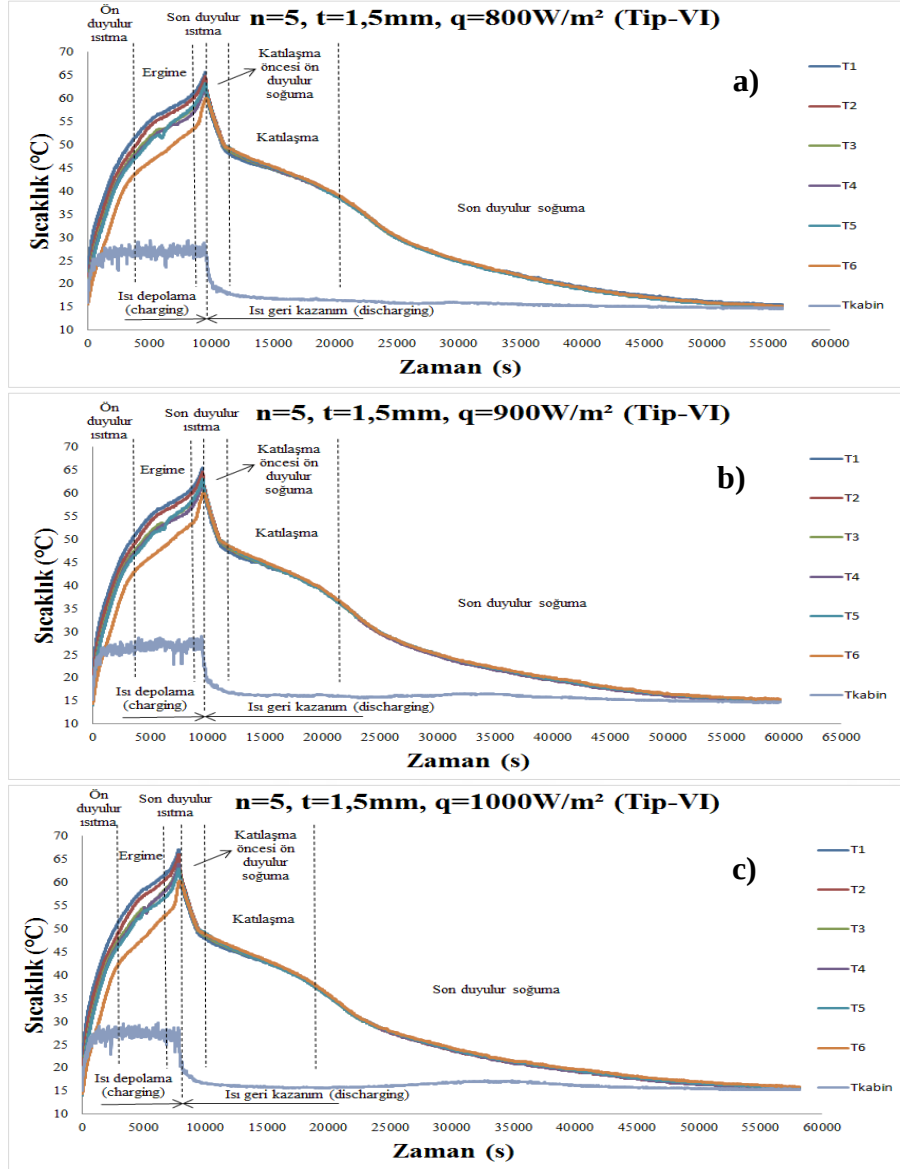
Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde dir. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur. Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %31,67, %30,66 ve %40,68 oranında azalma göstermiştir.

4.1.6. Tip-VI (n=5, t=1,5mm) için sıcaklık dağılımı

$q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışınımı şiddetinde Tip-VI (n=5, t=1,5mm) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.7’de görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 160, 140 ve 130 dakikada tamamen ergimiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınımı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde dir. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur.

Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %27,60, %26,88 ve %36,27 oranında azalma göstermiştir. Tip-V (n=5, t=1mm) emici

plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında ise her bir akı değeri için sırasıyla %5,96, %5,44 ve %7,44 oranında artış meydana gelmiştir.

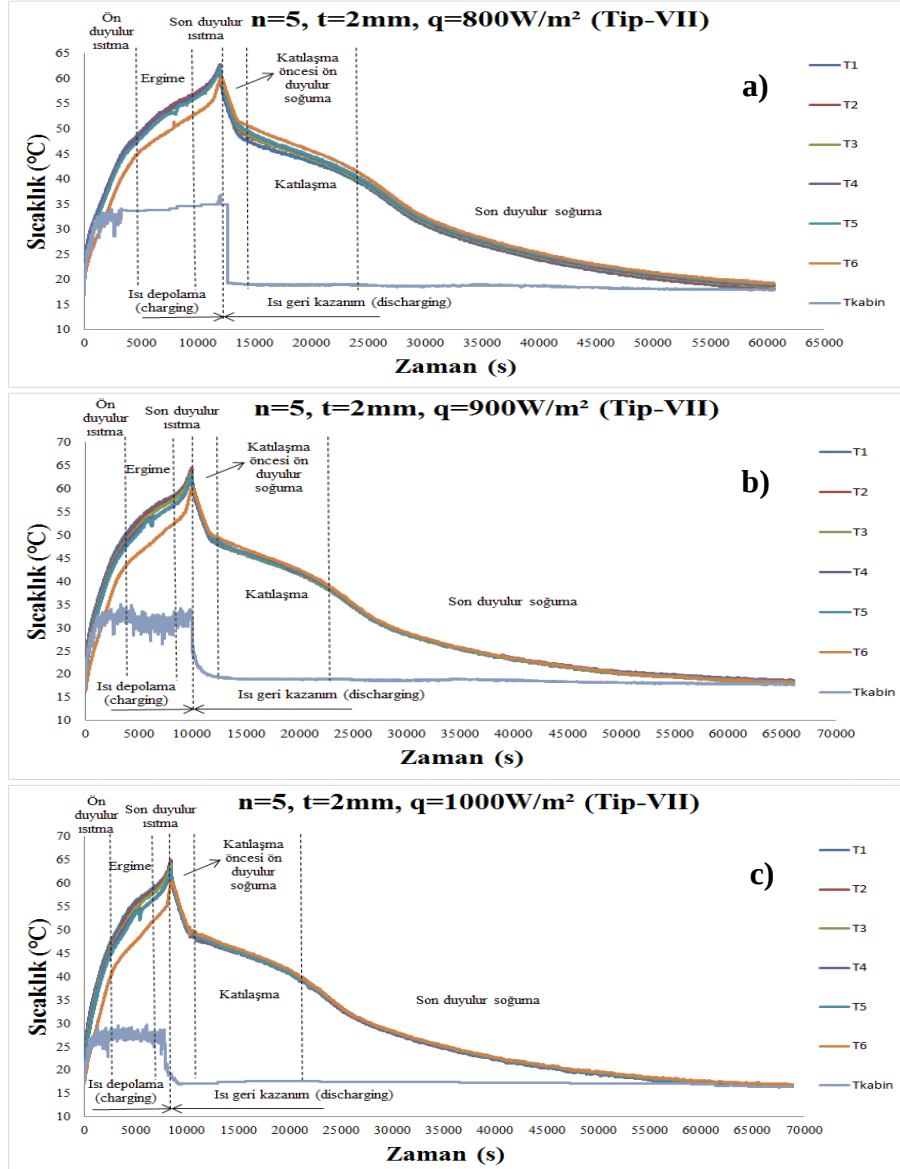


Şekil 4.7. Tip-VI için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m², b) 900W/m², c) 1000W/m²

4.1.7. Tip-VII ($n=5$, $t=2$ mm) için sıcaklık dağılımı

$q=800$, 900 ve 1000 W/m² güneş ışıınımı şiddetinde Tip-VII ($n=5$, $t=2$ mm) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.8’de görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 199, 165 ve 140 dakikada tamamen ermiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışıınımı,

duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değıştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır.

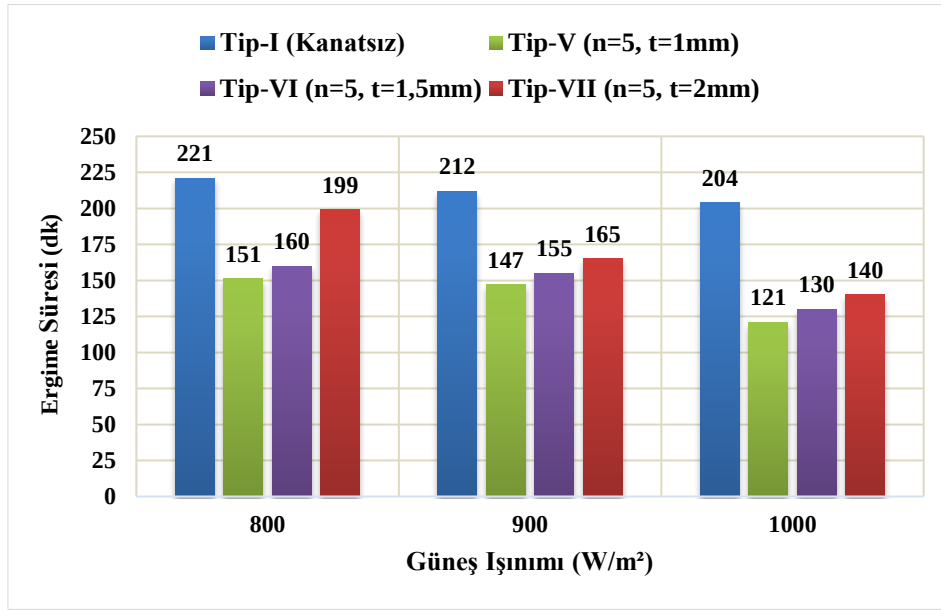


Şekil 4.8. Tip-VII için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısıl direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum

içerisindedir. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışıının parafin wax tarafından depolanmasında imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısının artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur.

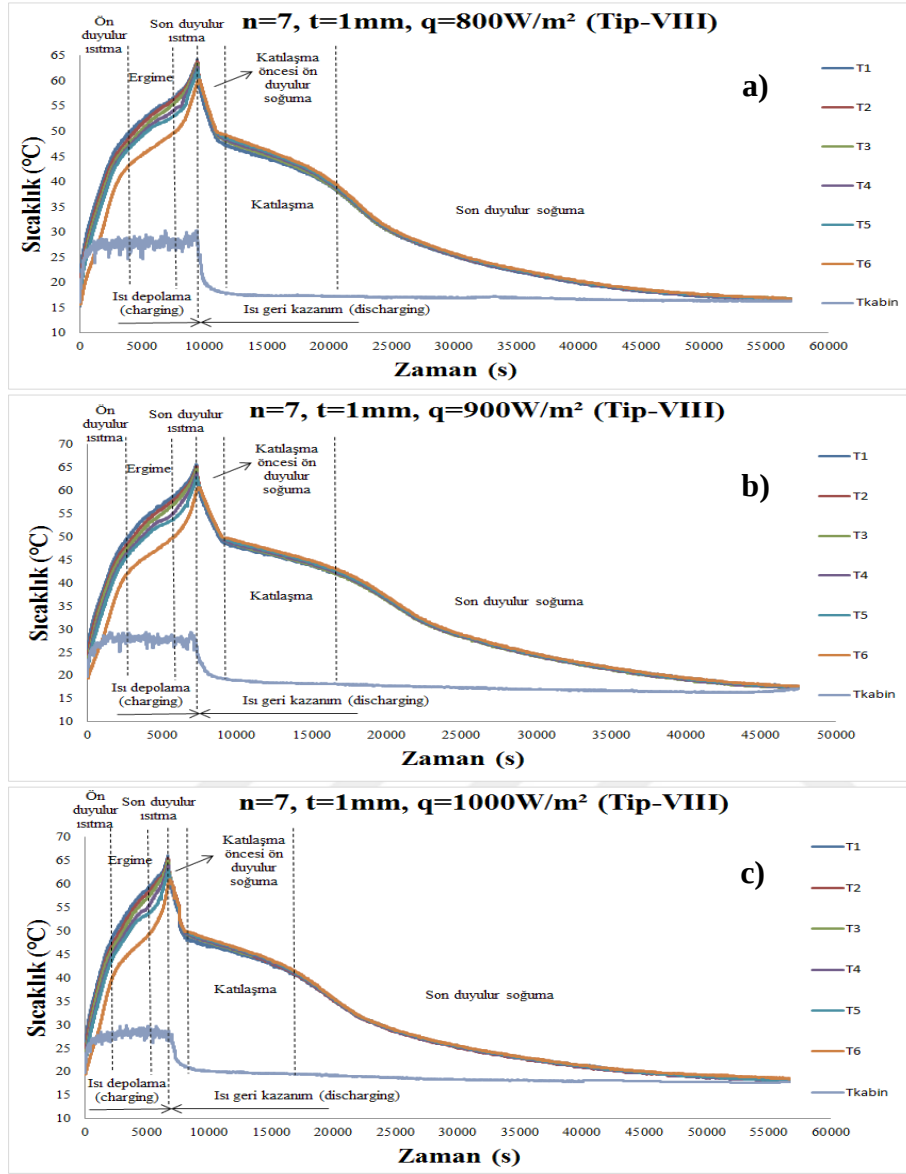
Parafinin 3 farklı akı değerindeki ergime süresinin Tip-I, Tip-V ve Tip-VI'ya göre karşılaştırması Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Tip-I, Tip-V, Tip-VI ve Tip-VII için ışıının şiddetiyle FDM ergime süresi değişiminin karşılaştırılması

Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %9,95, %22,17 ve %31,37 oranında azalma göstermiştir. Tip-V (n=5, t=1mm) emici plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresinde her bir ışıının şiddeti için %31,78, %12,24 ve %15,70 oranında bir artış meydana gelmekte ve benzer olarak Tip-VI (n=5, t=1,5mm) ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresinde %24,37, %6,45 ve %7,69 oranında artış gözlenmiştir. Kanat kalınlığına bağlı olarak parafine aktarılan ısının bir kısmı bakır kanatlar tarafından depolanmıştır. Böylece parafinin ergime süresi uzamıştır.

4.1.8. Tip-VIII (n=7, t=1mm) için sıcaklık dağılımı



Şekil 4.10. Tip-VIII için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

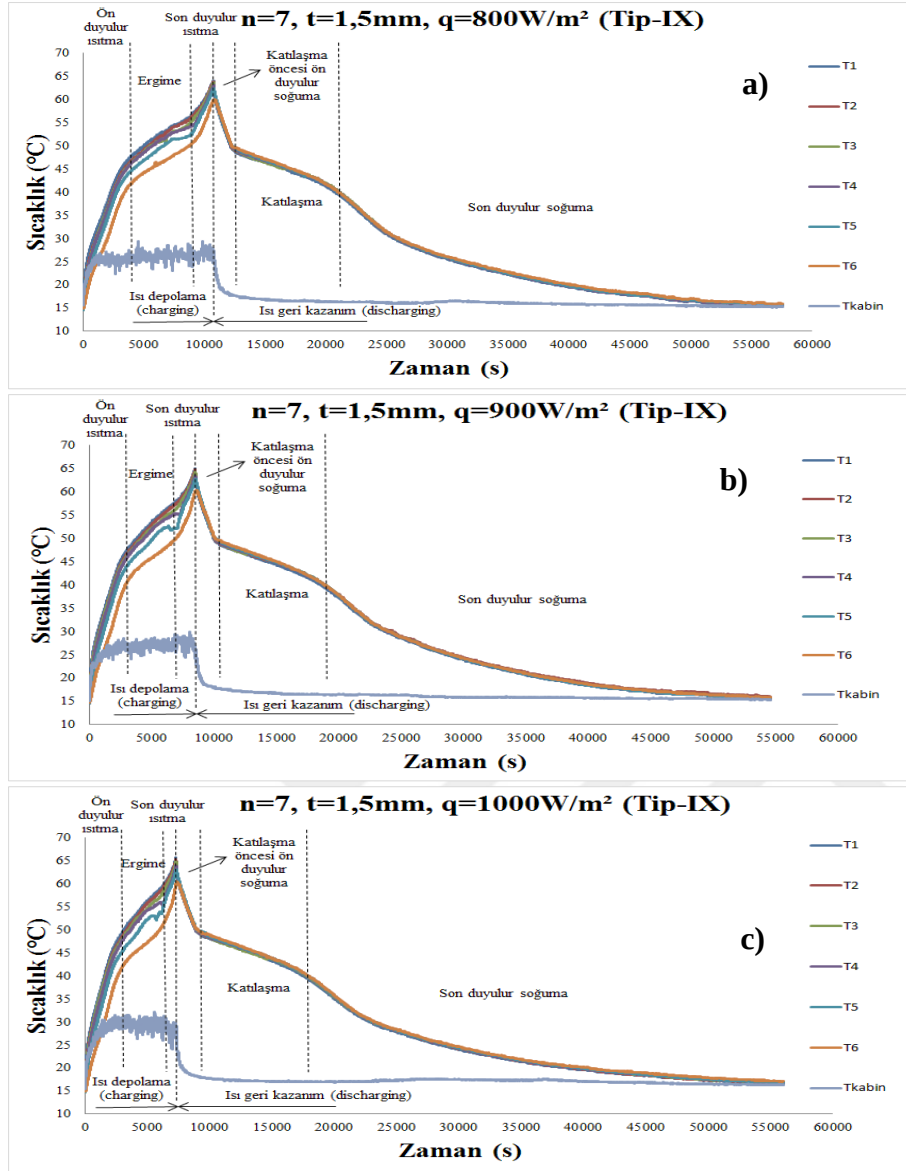
$q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışınlı şiddetinde Tip-VIII ($n=7, t=1\text{mm}$) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.10'da görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 157, 122 ve 112 dakikada tamamen ergimiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınlı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum

istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen güneş ışınımı, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde dir.

Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur. Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %28,96, %42,45 ve %45,09 oranında azalma göstermiştir.

4.1.9. Tip-IX (n=7, t=1,5mm) için sıcaklık dağılımı

$q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışınımı şiddetinde Tip-IX (n=7, t=1,5mm) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.11’de görüldüğü gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 179, 141 ve 122 dakikada tamamen erimştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınımı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değıştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır. Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısı direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı, kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen yapay güneş ışınımı, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde dir. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletim söz meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışınımının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur.



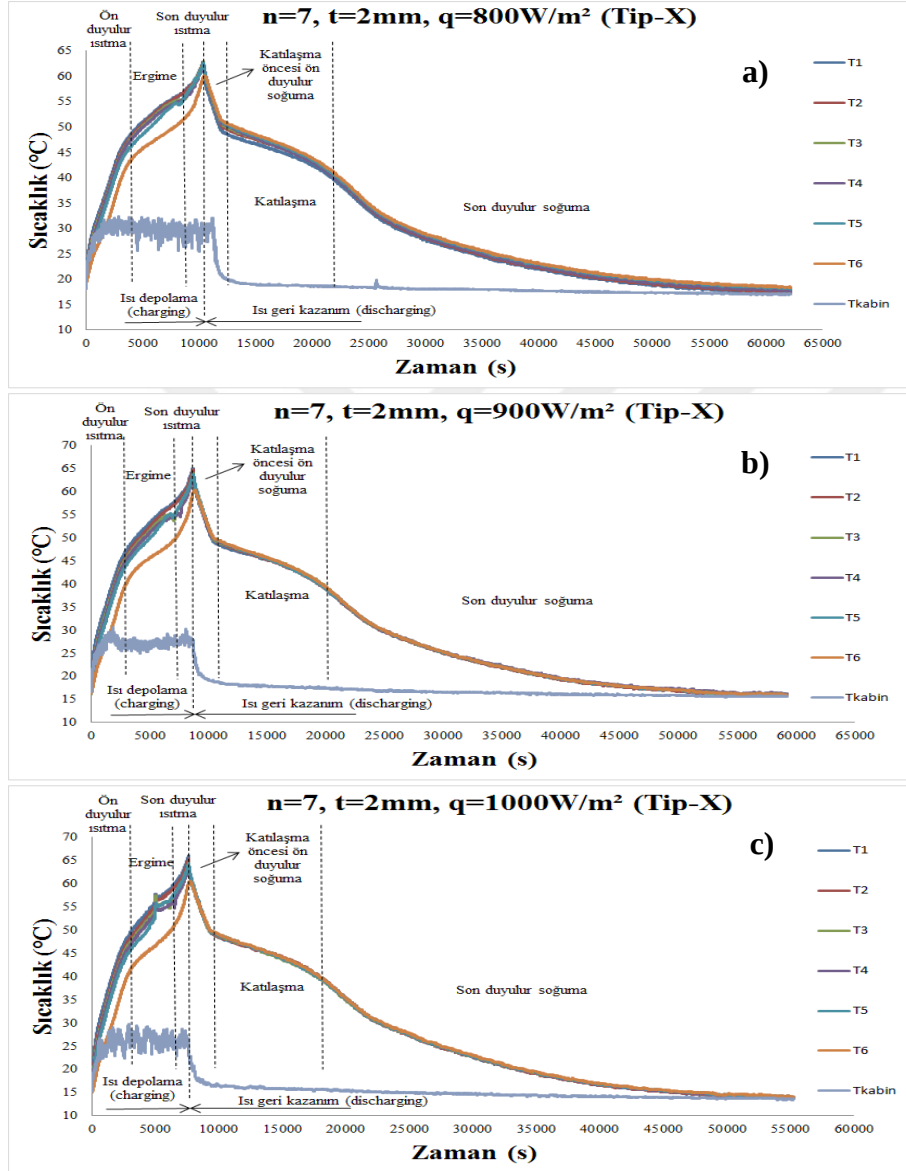
Şekil 4.11. Tip-IX için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %19, %33,49 ve %40,19 oranında azalma göstermiştir. Fakat Tip-VIII ($n=7, t=1\text{mm}$) emici plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında ise her bir ışıyım şiddeti için sırasıyla %14,01, %15,57 ve %8,93 oranında artış gözlenmiştir.

4.1.10. Tip-X ($n=7, t=2\text{mm}$) için sıcaklık dağılımı

$q=800, 900$ ve 1000W/m^2 güneş ışıyımı şiddetinde Tip-X ($n=7, t=2\text{mm}$) TEDÜ için, zamana bağlı olarak elde edilen farklı konumlardaki sıcaklıklar Şekil 4.12’de görüldüğü

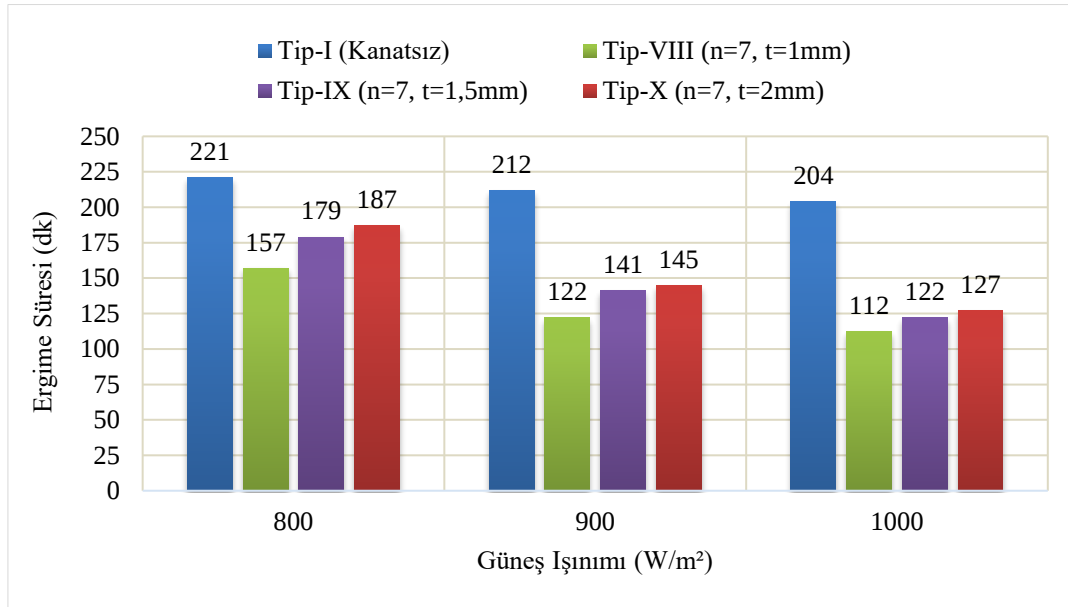
gibidir. Bu yapıda bulunan parafin wax sırasıyla 187, 145 ve 127 dakikada tamamen ergimiştir. Elde edilen grafik iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş ışınlımı, duyulur ve gizli ısı formunda parafin waxın faz değiştirmesiyle depolanmış; ikinci aşamada ise bu depolanmış olan enerji geri kazanılmıştır.



Şekil 4.12. Tip-X için zamana bağlı düşey yönde sıcaklık dağılımı, a) 800W/m^2 , b) 900W/m^2 , c) 1000W/m^2

Tip-I ile karşılaştırıldığında daha düşük emici plaka üst ve alt sıcaklıkları meydana gelmiştir. İlk bakışta bu durum istenmeyen bir durum gibi karşılanabilir. Fakat kanat kullanımı ile kanatsız yapıda meydana gelen ısıl direnç tabakası burada meydana gelmemektedir. TEDÜ tabanında bulunan gizli ve duyulur halde depolanmış olan ısı,

kanatlar aracılığıyla alttan üste doğru iletilerek geri kazanılmıştır. Emici plaka tarafından emilen yapay güneş ışıını, ısı çiftlerinden elde edilen sıcaklıklar incelendiğinde bir uyum içerisinde. Enerjinin depolanması aşamasında yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı bir iletimi meydana gelmiştir. Işınım şiddetinin artırılması daha fazla güneş ışıının parafin wax tarafından depolanmasına imkân sağlamış, aynı şekilde depolanan ısı artması da ısı geri kazanım süresinin uzamasına neden olmuştur. Parafinin 3 farklı akı değerindeki ergime süresinin Tip-I, Tip-VIII ve Tip-IX'a göre karşılaştırması Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Tip-I, Tip-VIII, Tip-IX ve Tip-X için ışıını şiddetiyle FDM ergime süresi değişiminin karşılaştırılması

Tip-I (kanatsız) TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresi her bir akı değeri için %15,38 %31,6 ve %37,75 oranında azalma göstermiştir. Tip-VIII (n=7, t=1mm) emici plakaya sahip TEDÜ ile karşılaştırıldığında parafinin ergime süresinde her bir ışıını şiddeti için %19,11, %18,85 ve %13,39 oranında bir artış meydana gelmekte ve benzer şekilde Tip-IX (n=7, t=1,5mm) TEDÜ ile karşılaştırıldığında %4,47, %2,84 ve %4,09 oranında artış meydana gelmiştir. Kanat kalınlığına bağlı olarak parafine aktarılan ısı bir kısmı bakır kanatlar tarafından depolanmıştır. Böylece parafinin ergime süresi uzamıştır.

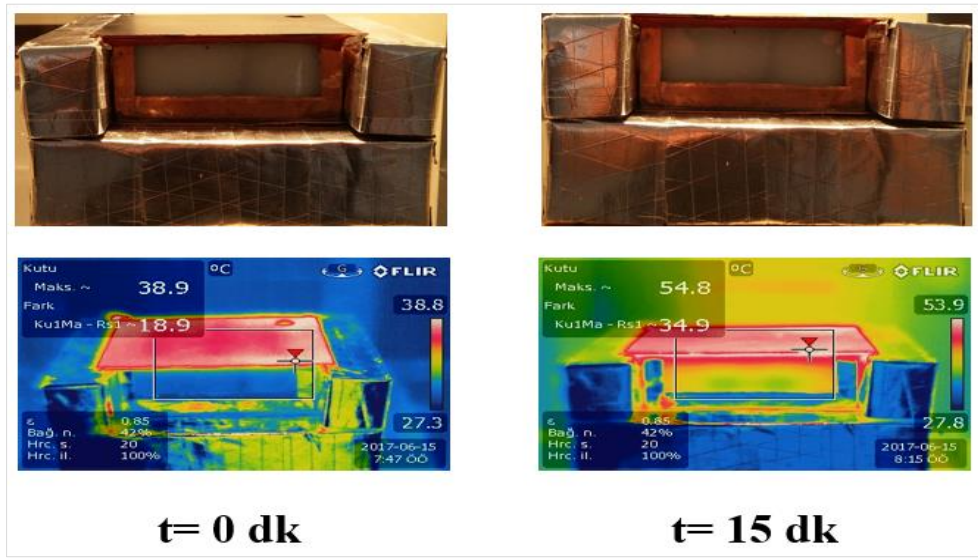
4.1.11. Termal kamera görüntüleri

Tez çalışması kapsamında bakır malzemeden imal edilmiş kapalı bir hacim şeklinde TEDÜ tasarımı yapılmıştır. Yapılan kapalı hacmin içerisine faz değişim yoluyla gizli ve sıcaklığın değişimiyle duyulur ısı depolayabilen katı haldeki parafin wax konulmuştur. Ayrıca emici yüzeyin altına yerleştirilen farklı sayı ve kalınlıktaki kanatlar yine bu hacim içerisine konulmuştur. Kapalı hacim içerisinde düşey yönde meydana gelen sıcaklık değişiminin izlenebilmesi bakımında belirli noktalara ısı çiftleri yerleştirilmiştir. Bu ısı çiftlerinden elde edilen veriler kullanılarak sistemin istenilen sıcaklık değerlerine ulaştığında ısı depolama evresinin tamamlanması sağlanmış ve ısı kaynağının kapatılmasıyla depolanan ısı geri kazanılması aşamasına geçilmiştir. Bahsedildiği gibi dışarıdan bakıldığından herhangi bir bölgede sıcaklık değişiminin izlenmesi bu tasarımda mümkün değildir. Işınım kaynağından emici yüzey ile elde edilen ısı düşey yönde iletilme davranışının incelenmesi için, örnek olarak mevcut Tip-II ($n=3$, $t=1\text{mm}$) TEDÜ $q=1000\text{W/m}^2$ ısıtım şiddeti altında termal kamera ile görüntülenmiştir.

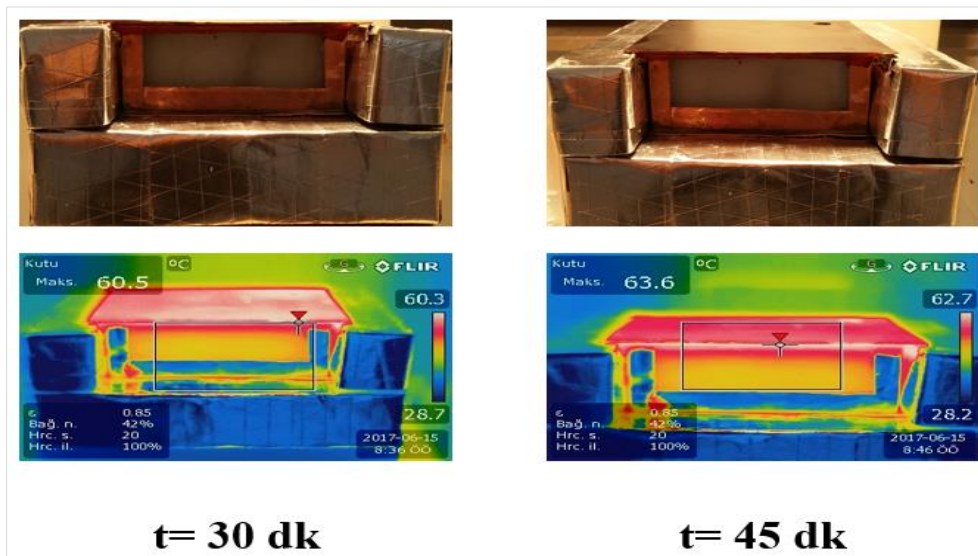
Yapılan çalışma kapsamında, TEDÜ'nün yan yüzeylerinden biri belirli ölçülerde kesilmiş ve bu kesilen bölgeye 2,5mm kalınlığında normal cam monte edilmiştir. Cam, bakır kutuya epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmıştır. Böylece cam ile bakır arasındaki sızdırmazlık bu şekilde sağlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, $q=1000\text{W/m}^2$ ısıtım şiddeti altında Tip-II yapısındaki TEDÜ'nün depo zeminindeki T_6 numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklığa ulaşması için geçen süre 126 dk'dır. Deney sonucu elde edilen bu sürenin doğru olup olmadığı kontrol etmek amacıyla, FLIR marka T440 modelinde termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera, yüzeylerin yaymakta olduğu ışınmı dikkate alarak çalışan bir cihazdır. Her madde bir sıcaklığa sahip olmasından dolayı, ısıtım yaymaktadır. Termal kamera da maddelerin yaymış olduğu bu ışınmı cihazın optik kısmıyla toplayarak cihaz ekranından görüntülü bir şekilde ölçüm alınan noktanın sıcaklığını okumamıza imkân sağlamaktadır.

Kızılötesi lambanın açılmasıyla ısı depolama süreci başlamış ve $t=0$ 'dan $t=135$ dk'ya kadar her 15 dk'da bir termal kamera görüntüsü alınmıştır. Ayrıca normal kamera kullanılarak da aynı zaman aralıklarında TEDÜ'nün resimleri çekilmiştir. Isı depolama süreci için elde edilen normal kamera ve termal kamera görüntüleri her 15 dk için Resim 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de verilmiştir.

Işık kaynağından emici yüzey ile absorblanan enerji, parafin deposu içerisinde düşey yönde kanatlar aracılığıyla iletilmektedir. Ayrıca emici yüzeyle temas halinde olan depo yan yüzeyleri de ısıyı iletilmesini sağlamaktadır. Bu durum Resim 4.1 ve 4.2’den açıkça görülmektedir. 0-45 dk için elde edilen görüntülerden katı haldeki parafinin ergimeye başlamadığı net bir şekilde görülmektedir. Sıcaklık dağılımı grafiklerinde belirtildiği gibi parafin bünyesinde öncelikle duyulur ısı formunda enerji depolanmış ve wax ergimesi için gerekli sıcaklığa ulaştıktan sonra ergimeye başlamıştır.

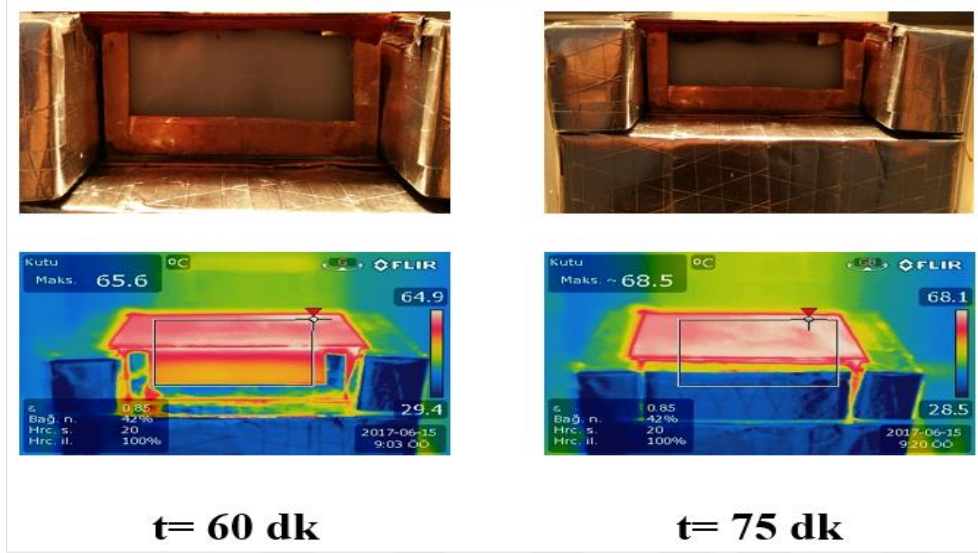


Resim 4.1. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 0 ve 15dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

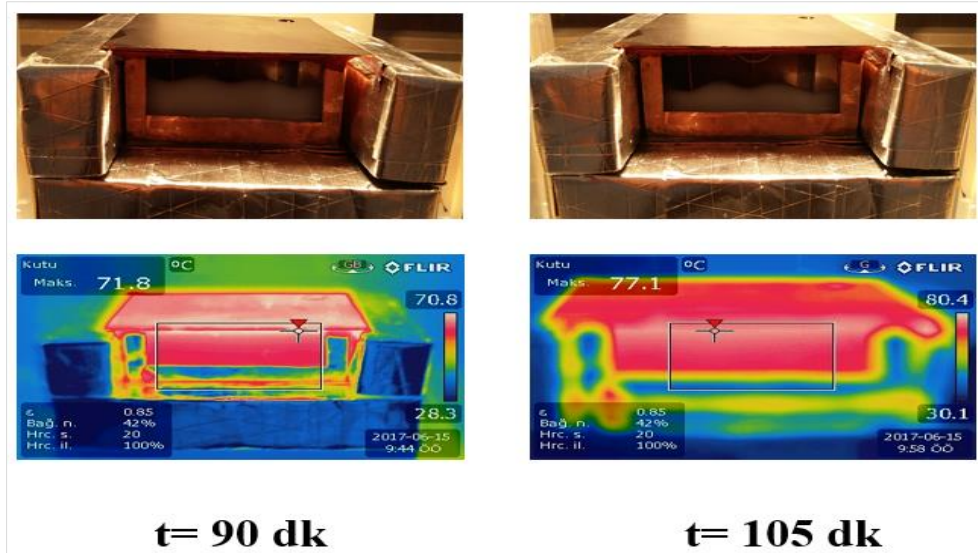


Resim 4.2. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 30 ve 45dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

Resim 4.3 ve 4.4 incelendiğinde, parafinin 60 dk'dan sonra en sıcak bölgeden başlayarak düşey yönde ergimeye başladığı açıkça görülmektedir. Faz değiştiren parafin kütlesi bünyesine gizli ısı depolamaktadır. Süre geçtikçe emici yüzeyin sıcaklığı direkt olarak ışınlıma maruz kalmasından dolayı artmaktadır.



Resim 4.3. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 60 ve 75dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

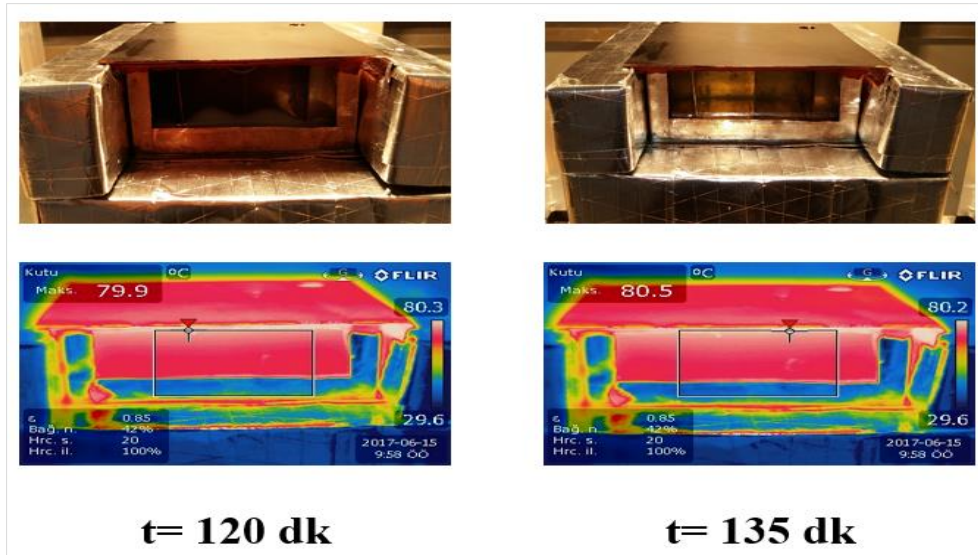


Resim 4.4. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 90 ve 105dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

75. dk'ya ait olan termal kamera görüntüsü incelendiğinde diğerlerinden farklı olduğu görülmektedir. Diğer zaman aralıkları için alınan görüntülerde cam yerleştirilen bölgede

bulunan yalıtım malzemesi çıkartılarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu resimde ise yalıtım malzemesi TEDÜ bünyesinde depolanan enerjinin çevreye saçılmasını veya transferini hangi derecede önlediğini göstermek için TEDÜ üzerinde bırakılmıştır.

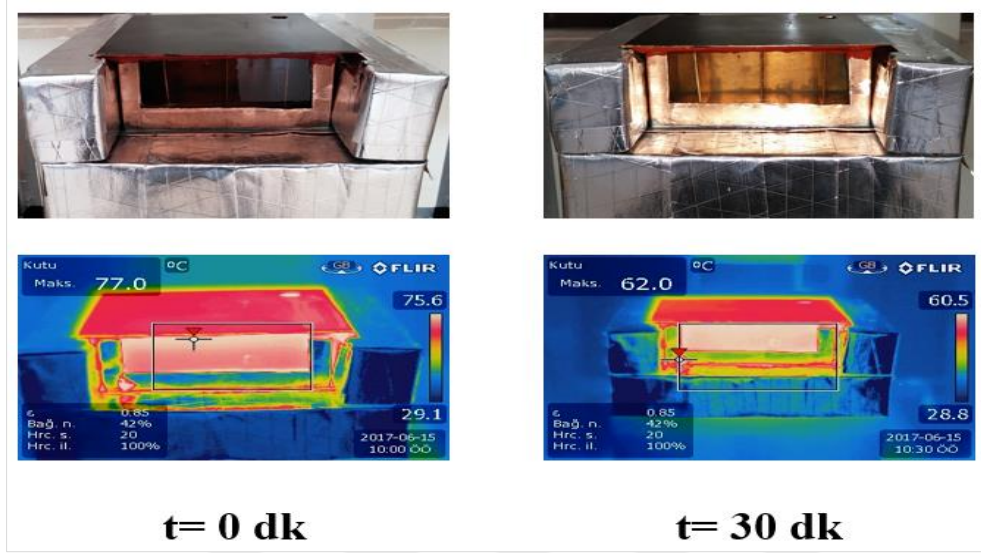
TEDÜ içerisinde bulunan parafin waxın tamamen eriyerek, T₆ numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklık değerini gösterdiği süre deneysel çalışmada 126 dk olarak bulunmuştur. Resim 4.5 incelendiğinde de yaklaşık aynı sürede istenilen deney şartları sağlanmıştır. t=135 dk'da tüm wax eriyerek sıvı hale geçmiş ve ışık kaynağı kapatılarak sistemin ısı depolama süreci tamamlanmıştır. 135 dk'dan sonra ısı geri kazanım süreci başlamıştır.



Resim 4.5. Isı depolama aşamasında Tip-II TEDÜ'ye ait 120 ve 135dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

Tip-II için $q=1000\text{W/m}^2$ ışıma şiddeti altında ısı depolama süreci için elde edilen termal ve normal kamera görüntüleri bir önceki sayfada detaylı bir şekilde irdelenmiştir. 135. dk'dan sonra ışık kaynağı kapatılarak ısı depolama işlemi son bulmuş ve sonrasında depolanan ısıya geri kazanılma süreci başlamıştır. Isının geri kazanımında da ısı depolama aşamasında olduğu gibi normal ve termal kamera görüntüleri elde edilerek sıvı haldeki parafinin ilk olarak hangi bölgelerde katılaşmaya başladığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Isı depolamanın son aşaması, geri kazanım sürecinde başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir. Tip-II için depolanan ısıya geri kazanılma aşamalarına ait termal ve normal kamera görüntüleri 0'dan 210 dk'ya kadar her 30 dk'da bir alınmıştır. Elde edilen görüntüler, Resim 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Başlangıçtan 30 dk'ya kadar geçen

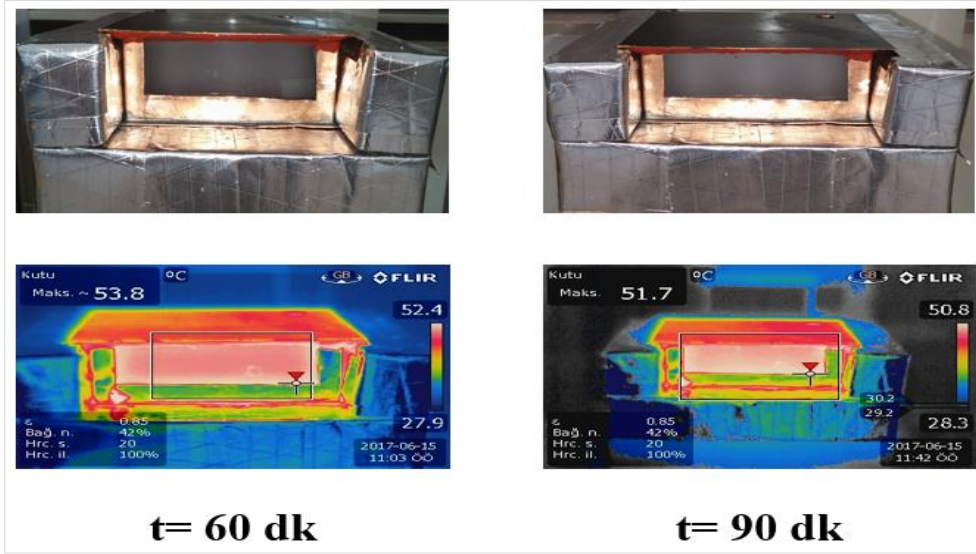
sürede, sıvı fazdaki parafin duyulur olarak ısı kaybetmekte ve buna bağlı olarak katılaşma meydana gelmemektedir.



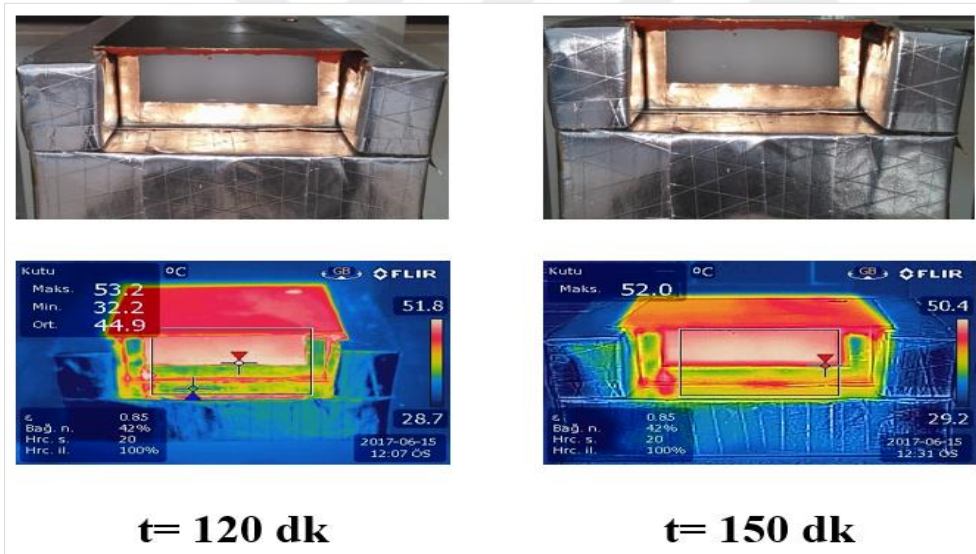
Resim 4.6. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 0 ve 30dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

Termal kamera görüntülerinden elde edilen sıcaklık dağılımı incelendiğinde maksimum sıcaklık değerleri ısı depolama aşamasında elde edilen değerlerden daha düşüktür. Bunun nedeni ısı kaynağının kapalı olmasıdır. Aynı zamanda cihazdan okunan sıcaklık değerleri gittikçe azalmaktadır. Çünkü TEDÜ bünyesinde depolanmış olan duyulur ve gizli ısı doğal taşınım ile TEDÜ'nün bulunduğu kabin içerisine bırakılmaktadır. Buradan ısı depolama aşamasında meydana gelen ısı transferinin iletimle olduğu bunun aksine depolanan ısı geri kazanım sürecinde ise iletime ek olarak doğal taşınımın baskın hale geldiği bilgisine ulaşılmaktadır.

t=60 dk'dan sonra Resim 4.7, 4.8 ve 4.9'da görüldüğü gibi parafin katılaşmaya başlamıştır. TEDÜ deposu içerisinde bulunan kanatlar, emici yüzeyden gelen ısı depo hacmi içerisine düşey yönde iletmeyi sağlamanın yanında, parafin hacminde depolanan duyulur ve gizli ısı emici yüzeye iletilmesini de sağlamaktadır. Bu nedenle ilk olarak kanat çevresinde bulunan sıvı wax katılaşmaya başlamıştır. Isı geri kazanım aşamasında süre arttıkça kanat etrafından bulunan katı haldeki beyaz renkli parafin miktarı artmaktadır. Bu durum Resim 4.7,4.8 ve 4.9 detaylı bir şekilde incelendiğinde açıkça görülmektedir.



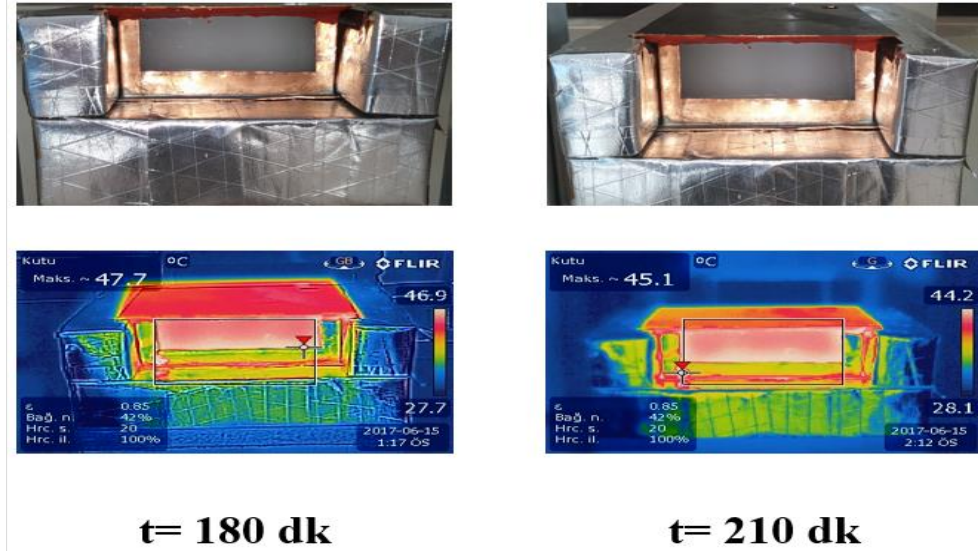
Resim 4.7. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 60 ve 90dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri



Resim 4.8. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ'ye ait 120 ve 150dk'daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

TEDÜ'nün soğuması aşamasında $t=210$ dk için elde edilen gerçek ve termal kamera görüntüleri Resim 4.9'da verilmiştir. Elde edilen termal kamera görüntüsü incelendiğinde TEDÜ'den okunan en yüksek sıcaklık değeri $45,1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Yapılan deneysel çalışmada, T_1 numaralı emici yüzeyin üst kısmında bulunan ısı çift T_{kabin} sıcaklığına ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Burada termal kamera kullanılarak gerçekleştirilen çalışma, ısı depolama ve geri kazanım sürecinde parafinin ve depo hacmi içerisindeki sıcaklık dağılımının değişimi üzerine bir fikir elde etmek amacıyla yapılmıştır. Uzun soğuma sürelerine ihtiyaç

duyulmasından dolayı sadece Resim 4.9’da belirtilen süreye kadar olan görüntüler elde edilmiştir.



Resim 4.9. Isı geri kazanım sürecinde Tip-II TEDÜ’ye ait 180 ve 210dk’daki gerçek ve termal kamera görüntüleri

4.2. Kanat Kullanımının Enerji Depolama Süresine Etkisi

Yapılan tez çalışmasında, emici plaka altına ısı transfer oranını arttırmak için yerleştirilen kanatların sayısı ve kanat kalınlığı değişiminin FDM’nin enerji depolama süresi üzerine olan etkisi üç farklı güneş ışınlımı altında deneysel olarak incelenmiştir. Her bir TEDÜ konfigürasyonundan elde edilen düşey yöndeki sıcaklık dağılımları bir önceki bölümde geniş çaplı olarak irdelenmiştir. Elde edilen ergime süreleri dikkate alınarak kanat kullanımı etkinliği incelenmiş ve zaman bağlı iyileştirme oranı tanımlanmıştır.

Arshad ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada elektronik cihazların soğutulmasında kullanılan pin-kanat geometrisine sahip bir soğutucu plakanın (heat sink) termal performansı incelenmiştir. Araştırmacılar tasarlamış oldukları pin-kanat şeklindeki soğutucu içerisine parafin ekleyerek yapının daha uzun süre, fazla ısınmadan çalışabilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel olarak tasarladıkları soğutucu plaka hacmini tamamen parafin wax ile doldurmuş ve sonrasında sırasıyla pin-kanat içermeyen (boş) yapı için ve birbirinden bağımsız ölçülere sahip farklı kalınlıklarda pin-kanat yapıları için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Isı kaynağı olarak düzlemsel yapıdaki bir ısıtıcı

kullanmış ve ısıtıcı bölgesinde sıcaklık değerini sırasıyla 60 ve 70°C referans değerinde tutmuşlardır. Deneysel incelemelerinin sonucunda plakalı soğutucuda FDM kullanımı, sistemde meydana gelen ısıнын duyulur ve gizli ısı formunda FDM bünyesine alınmasını ve sistemin güvenli çalışma süresinin uzamasını sağlamıştır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda, pin-kanat yapısı içeren soğutucu tasarımının referans sıcaklık değerlerine ulaşma süresinin, pin-kanat yapısı içermeyen soğutucu tasarımının referans sıcaklık değerlerine ulaşma süresinin oranına eşit olan bir iyileştirme oranı (İO) tarifi yapmışlardır. Bu oran Eş. 4.1'deki gibi ifade edilmiştir [60]:

$$\text{İyileştirme Oranı} = \frac{\text{Pin – kanat içeren soğutucu tasarımının tanımlanan referans sıcaklığa ulaşma süresi}}{\text{Pin – kanat içermeyen soğutucu tasarımının tanımlanan referans sıcaklığa ulaşma süresi}} \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'de ifade edilen İO, yapılan bu tez çalışmasına benzetilerek uygulanmıştır. Arshad ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada, İO'nun büyük çıkması sistemin daha uzun süre çalışmasına imkân sağlamıştır. Fakat yapılan tez çalışmasında ergime süreleri üzerinden bir zamana bağlı iyileştirme oranı (ZBİO) tanımlanmıştır. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, ZBİO'nun yapılan tez çalışmasında yüksek çıkması TEDÜ içerisinde FDM olarak bulunan parafin waxın daha kısa sürede ergidiği anlamına gelmektedir. Böylece kızılötesi lambayı çalıştırmak için tüketilen elektrik miktarında düşüş meydana gelmiştir. Benzer şekilde bu süreye bağlı olarak TEDÜ içerisinde daha kısa sürede faz değişimi meydana gelecek ve daha kısa sürede ısı geri kazanımı mümkün olacaktır. Isı depolama ve geri kazanım döngüsünün hızlı olması güneş gibi kesintili bir enerji kaynağından elde edilen ışınımın daha kısa sürede daha yüksek miktarda depolanabilmesine imkân sağlayacaktır. Deneysel bulguların elde edilmesi sonucu tanımlanan ZBİO Eş. 4.2 tanımlanmıştır.

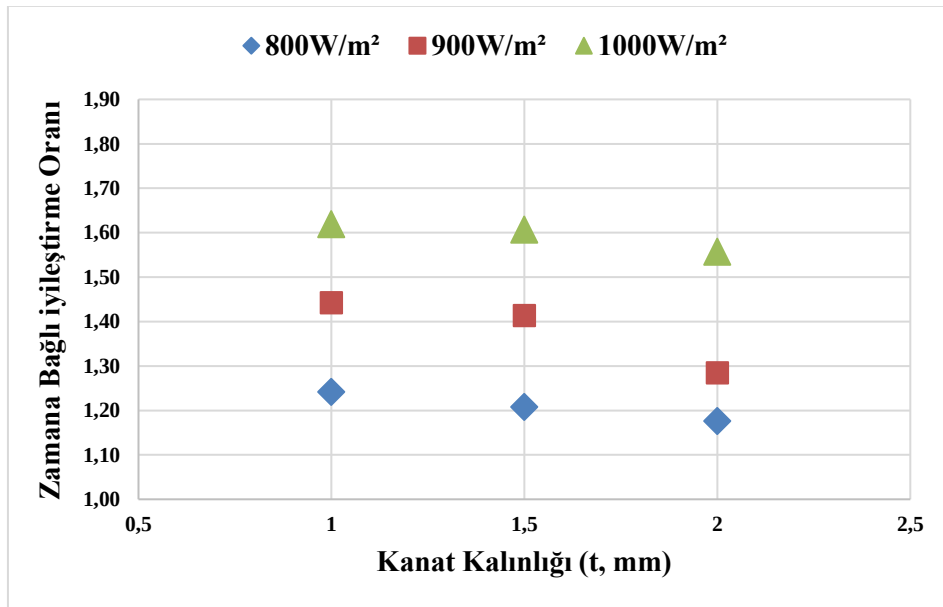
$$\text{Zamana Bağlı İyileştirme Oranı} = \frac{\text{Kanatlı TEDÜ'de bulunan parafinin ergimesi için geçen süre}}{\text{Kanatlı TEDÜ'de bulunan parafinin ergimesi için geçen süre}} \quad (4.2)$$

Burada parafinin ergimesi için geçen süre, 3. Bölümde anlatıldığı gibi TEDÜ'nün tabanında bulunan T₆ numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklığa ulaşmaya kadar geçen süre olarak tarif edilmiştir. t=1, 1,5 ve 2mm kalınlıkta n=3 adet kanat içeren TEDÜ'ler için ZBİO değerleri Çizelge 4.1'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. n=3 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki ZBİO değerleri

Fin Sayısı (n, adet)	Fin Kalınlığı (t, mm)	Güneş Işınımı (q, W/m ²)	Zamana Bağlı İyileştirme Oranı (ZBİO)
3	1	800	1,24
		900	1,44
		1000	1,62
	1,5	800	1,21
		900	1,41
		1000	1,61
	2	800	1,18
		900	1,28
		1000	1,56

Elde edilen deneysel ergime süreleri dikkate alınarak her bir TEDÜ ünitesi için farklı yapılarda ZBİO grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.14, n=3 kanatlı TEDÜ'de kanat sayısı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO üzerine olan etkisini ifade etmektedir.



Şekil 4.14. 3 kanatlı TEDÜ'de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO'ya etkisi

Şekil 4.14 incelendiğinde, kanat kalınlığının artması ZBİO'nun azalmasına neden olmuştur. Artan ısıtım şiddeti ise parafinin ergimesi için gereken sürenin düşmesini sağlamıştır. 800W/m^2 ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük ZBİO 1,24 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Aynı ısıtım şiddetinde, kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması ZBİO'yu %2,42 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise ZBİO'yu $t=1,5\text{mm}$ kalınlıktaki yapıya göre %2,48 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre ise %4,84 oranında azaltmıştır. 900W/m^2 güneş ısıtımını altında elde edilen en büyük ZBİO 1,44 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması ZBİO'yu %2,08 kadar düşürmektedir. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise ZBİO'yu $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %9,22 oranında ve $t=1\text{mm}$ ile kıyaslandığında %11,11 kadar düşürmüştür. 1000W/m^2 ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük ZBİO 1,62 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması ZBİO'yu %0,62 kadar küçültmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise ZBİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %3,08 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre %3,7 oranında azaltmıştır.

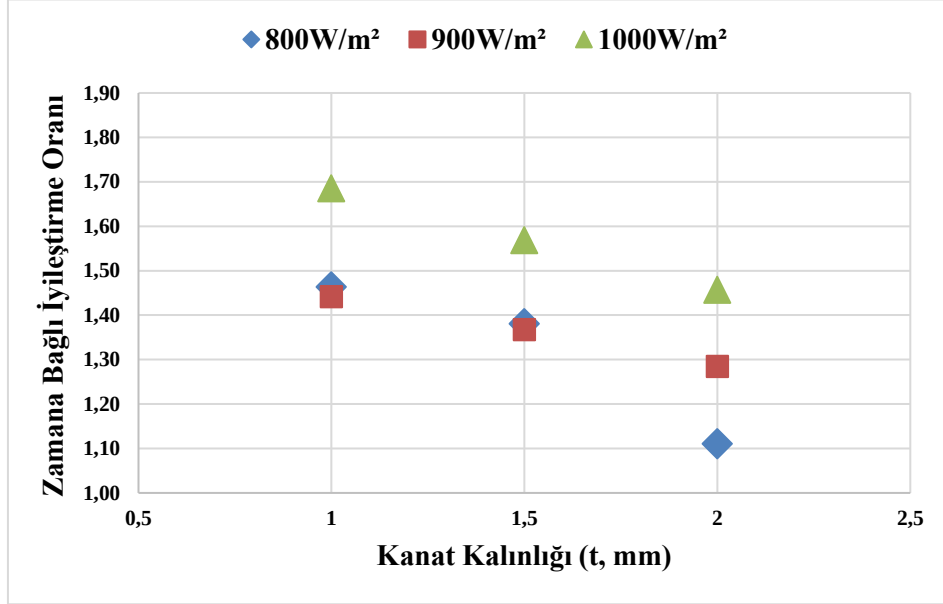
$t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlıkta $n=5$ adet kanat içeren TEDÜ'ler için ZBİO değerleri Çizelge 4.2'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. $n=5$ kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki ZBİO değerleri

Fin Sayısı (n, adet)	Fin Kalınlığı (t, mm)	Güneş Işıtlımı (q, W/m^2)	Zamana Bağlı İyileştirme Oranı (ZBİO)
5	1	800	1,46
		900	1,44
		1000	1,69
	1,5	800	1,38
		900	1,37
		1000	1,57
	2	800	1,11
		900	1,28
		1000	1,46

$n=5$ kanatlı TEDÜ'de kanat sayısı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO üzerine olan etkisini daha anlaşılır kılmak için Şekil 4.15 elde edilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde kanat kalınlığının artışı, parafinin ergime süresinin uzadığını ve buna bağli olarak elde edilen ZBİO'da azalma meydana geldiğini açıkça ifade etmektedir. Kanat kalınlığının ZBİO

değeri üzerine olan etkisinin aksine, ısıtım şiddetinin artışı her bir kanat kalınlığı için ZBİO değerinde artış meydana getirmiştir.



Şekil 4.15. 5 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin ZBİO’ya etkisi

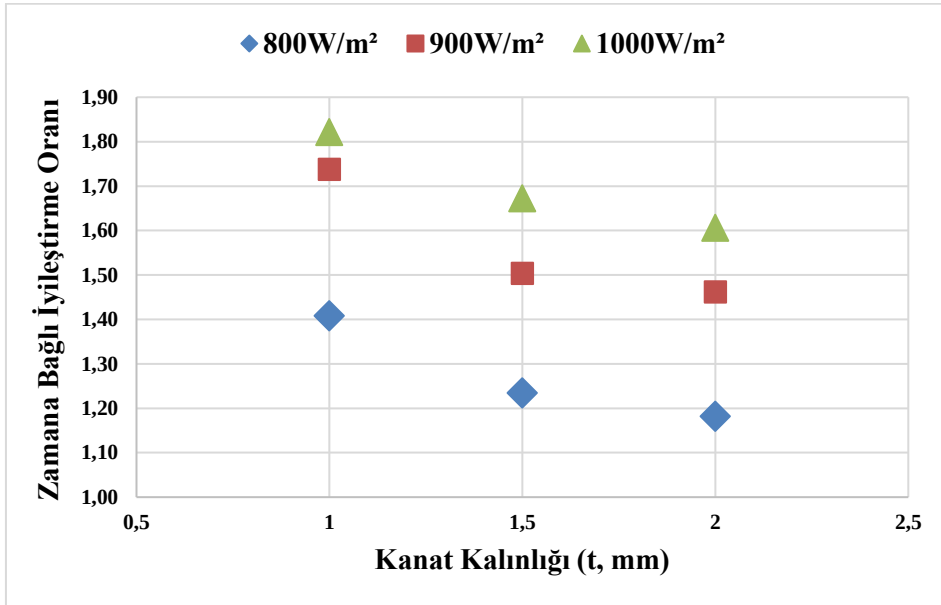
800W/m² güneş ısıtımı altında elde edilen en büyük ZBİO 1,46 ile t=1mm kalınlıktaki TEDÜ tasarımı aittir. Kanat kalınlığının t=1,5mm olması ZBİO’yu %5,48 kadar düşürmektedir. Benzer şekilde kanat kalınlığının t=2mm olması ise ZBİO değerini t=1,5mm’ye göre %19,56 oranında ve t=1mm’ye göre %23,97 oranında azaltmıştır. 900W/m² ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük ZBİO 1,44 ile t=1mm kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının t=1,5mm olması ZBİO değerini %4,86 kadar düşürmektedir. Benzer şekilde kanat kalınlığının t=2mm olması ise ZBİO’yu t=1,5mm’ye göre %6,57 kadar ve t=1mm ile kıyaslandığında ise %11,11 kadar küçültmektedir. 1000W/m² ısıtım şiddetinde ise elde edilen en büyük ZBİO 1,69 ile t=1mm kalınlıktaki tasarımda hesaplanmıştır. Kanat kalınlığının t=1,5mm olması ZBİO’yu %7,1 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının t=2mm olması ise ZBİO değerini t=1,5mm’ye göre %7,01 kadar ve t=1mm kalınlığa sahip TEDÜ ile kıyaslandığında ise %13,61 kadar küçültmüştür.

t=1, 1,5 ve 2mm kalınlıkta n=7 adet kanat içeren TEDÜ’ler için ZBİO değerleri Çizelge 4.3’deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. n=7 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarındaki ZBİO değerleri

Fin Sayısı (n, adet)	Fin Kalınlığı (t, mm)	Güneş Işınımı (q, W/m ²)	Zamana Bağlı İyileştirme Oranı (ZBİO)
7	1	800	1,41
		900	1,74
		1000	1,82
	1,5	800	1,23
		900	1,50
		1000	1,67
	2	800	1,18
		900	1,46
		1000	1,61

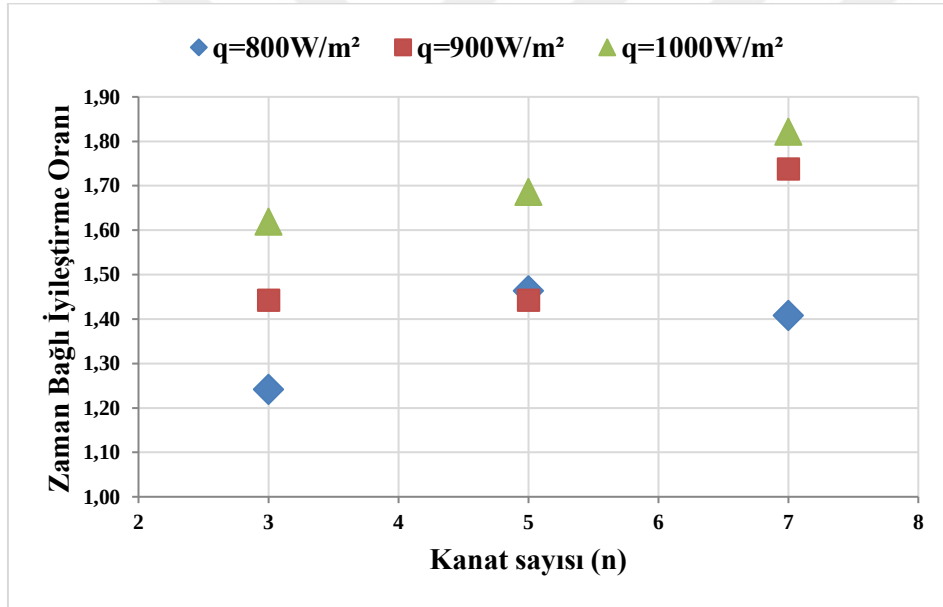
n=7 kanatlı TEDÜ’de kanat sayısı ve ışınlm şiddeti değışiminin ZBİO üzerine olan etkisini daha anlaşılır kılmak için Şekil 4.16’da görölmekte olan grafik elde edilmiştir. n=7 için elde edilen grafik n=3 ve n=5 için elde edilen Şekil 4.14 ve 4.15’de verilen grafiklere benzer davranış sergilemektedir. Artan kanat kalınlığı ergime süresini arttırarak ZBİO’nun düşmesine neden olmuştur.



Şekil 4.16. 7 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ışınlm şiddeti değışiminin ZBİO’ya etkisi

800W/m² ışınlm şiddeti altında elde edilen en büyük ZBİO 1,41 ile t=1mm kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının t=1,5mm olması ZBİO’yu %12,76 oranında

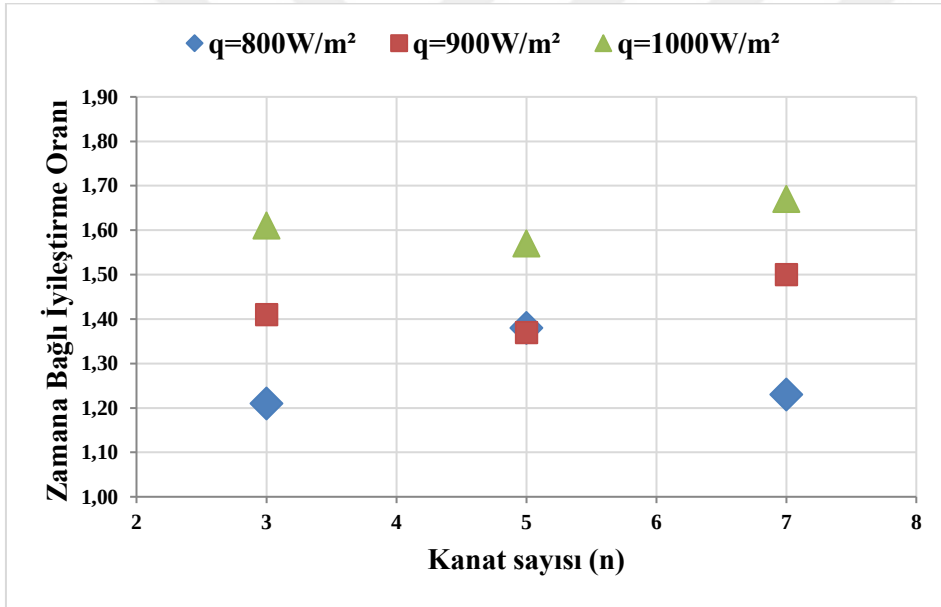
düşürmektedir. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise ZBİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %4,06 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre %16,31 oranında azaltmıştır. 900W/m^2 ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük ZBİO değeri 1,74 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki TEDÜ tasarımına aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması ZBİO'yu %13,79 kadar düşürmektedir. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise ZBİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %2,67 oranında ve $t=1\text{mm}$ kalınlığa sahip TEDÜ ile kıyaslandığında %16,09 kadar azaltmıştır. 1000W/m^2 ısıtım şiddetinde elde edilen en büyük ZBİO 1,82 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması ZBİO'yu %8,24 oranında küçültmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise ZBİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %3,59 oranında ve $t=1\text{mm}$ kanat kalınlığa sahip yapı ile kıyaslandığında %11,54 kadar düşürmüştür.



Şekil 4.17. $t=1\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin ZBİO'ya etkisi

Şekil 4.17'de $t=1\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin ZBİO üzerine olan etkisi görülmektedir. Şekil 4.17 dikkatle incelendiğinde, ısıtım miktarının kanat sayısına bağlı olarak artması ZBİO değerini genel olarak yükseltmiştir. 1000W/m^2 ısıtım şiddetinde, artan kanat sayısına bağlı olarak ZBİO değerlerinde de bir artış meydana gelmiştir. Tip-I (kanatsız) yapı ile karşılaştırılarak elde edilen ZBİO değerinin artması, kanatlı yapıdaki TEDÜ'lerin içerisinde depolanan parafin waxın tamamen ergiyerek T_6 numaralı ısı çiftin 60°C 'yi gösterene kadar geçen sürenin kısalmakta olduğunu ifade

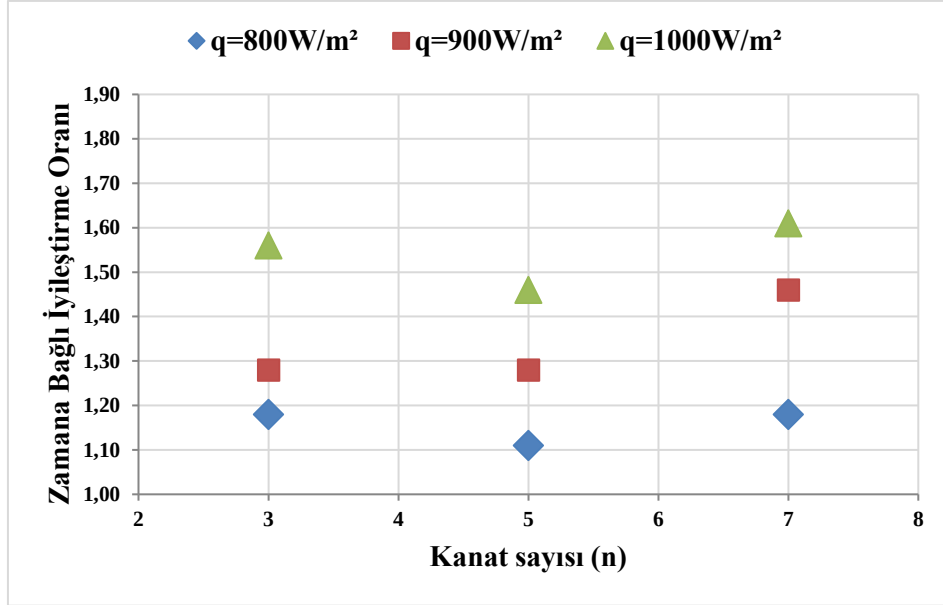
etmektedir. 800 ve 900W/m² ışınlm şiddetinde, 1000W/m²'lik güneş ışınlmı altında davranış sergileyen t=1mm kanat kalınlığına sahip TEDÜ'lerden elde edilen devamlı artan ZBİO'nun aksine n=5 kanatlı yapıda, bir önceki kanat sayısına kıyasla sırasıyla bir yükseliş ve bir düşüş meydana gelmiştir. Deneysel çalışma ile elde edilen tüm ergime süreleri incelendiğinde tüm kanatlı yapılarda bulunan parafinin ergimesi için geçen süre, kanatsız TEDÜ'deki parafin waxın ergimesi için geçen süreden daha düşüktür. Tüm TEDÜ'lerin ergime sürelerinde bir kazanç meydana gelmiştir. Fakat diğer kanatlı yapılar ile karşılaştırıldıklarında oransal olarak daha düşük ZBİO değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen değerler kullanılarak çizilen Şekil 4.17 dikkatle incelendiğinde 1000W/m² ışınlm şiddetinde n=7 kanatlı bir TEDÜ kullanmak daha iyi ergime süreleri elde etmeye imkân sağlayacaktır. Aynı yapıdaki en büyük iyileştirme oranı 1,82 olarak bulunmuştur.



Şekil. 4.18. t=1,5mm sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ışınlm şiddetinin ZBİO'ya etkisi

Şekil 4.18, t=1,5mm sabit kanat kalınlığında kanat sayısı ve ışınlm şiddeti değişiminin ZBİO üzerine olan etkisini ifade etmektedir. Artan ışınlm şiddetine bağlı olarak kanat sayısının artırılması ZBİO'yu yükseltmiştir. En büyük ZBİO'ya 1000W/m² ışınlm şiddeti altında n=7 için 1,67 olarak ulaşılmıştır. Fakat aynı şartlar altında t=1mm kanat kalınlığındaki TEDÜ tasarımına göre ZBİO değerinde %8,24 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Şekil 4.17 ve 4.18'e benzer olarak, t=2mm sabit kanat kalınlığında kanat sayısının ve ışınlm şiddetinin ZBİO üzerine olan etkisi Şekil 4.19'da ifade edilmiştir. En

yüksek ZBİÖ, diğer kanat kalınlıklarına benzer olarak $n=7$ kanatlı TEDÜ tasarımında $q=1000\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde 1,61 olarak bulunmuştur. Kanat kalınlığının artması genel olarak ZBİÖ'nün azalmasına ve en düşük oranın her kanat sayısında da 800W/m^2 ısıtım şiddetinde meydana gelmesine sebep olmuştur.



Şekil 4.19. $t=2\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin ZBİÖ'ya etkisi

Genel olarak bakıldığında, tüm grafiklerde kanat kalınlığının $t=1\text{mm}$ 'den $t=2\text{mm}$ 'ye artırılması FDM'nin ergime süresini uzatarak, enerji depolama sistemi üzerine olumsuz etki yapmıştır. Fakat kanat sayısının artırılması ise ZBİÖ değerlerine olumlu bir katkı sağlayarak, aynı kalınlıktaki kanatlarda artan kanat sayısı ile parafin ergime süresinin kısılmasını sağlamıştır.

4.3. Depolanan Enerji Miktarı

TEDÜ'lerde depolanan maksimum enerji miktarının hesaplanması için yapılan teorik analiz Bölüm 3.2.1'de detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tasarlanan TEDÜ'nün emici yüzeyinde ve kanatlarında duyulur ısı; FDM olarak kullanılan parafin wax bünyesinde hem duyulur hem de gizli ısı formunda olmak üzere üç yapıda enerji depolanmıştır. Kızılötesi lambadan gelen ısıtımın, bu yapılar tarafından depolanan miktarları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Her bir TEDÜ tarafından depolanan enerji miktarı

TEDÜ Türü	Işınım Miktarı (W/m ²)	$E_{Emici\ Yüzey}$ (Duyulur, J)	$E_{Parafin}$ (Duyulur + Gizli, J)	E_{Kanat} (Duyulur, J)	E_{Toplam} (J)
Tip-I (Kanatlı)	800	4415,23	132796,80	0	137212,03
	900	4843,96	134481,60	0	139325,56
	1000	4875,08	133466,40	0	138341,48
Tip-II (n=3, t=1mm)	800	3381,44	126903,35	2038,56	132323,35
	900	3651,12	129048,13	2141,68	134840,93
	1000	4021,08	129727,67	2176,06	135924,81
Tip-III (n=1,5, t=1mm)	800	3333,33	122866,77	2909,40	129109,50
	900	3460,96	123666,79	2973,46	130101,21
	1000	3702,99	126151,07	3140,65	132994,71
Tip-IV (n=3, t=2mm)	800	3284,63	121677,93	3847,95	128810,51
	900	3346,86	121865,77	3870,86	129083,49
	1000	3571,60	123326,74	4004,20	130902,54
Tip-V (n=5, t=1mm)	800	3481,71	124485,53	3355,93	131323,17
	900	3315,75	123645,83	3295,16	130256,74
	1000	3537,03	126584,78	3506,97	133628,78
Tip-VI (n=5, t=1,5mm)	800	3412,56	122187,76	4979,21	130579,53
	900	3498,99	123470,46	5112,02	132081,47
	1000	3609,63	124380,77	5221,39	133211,79
Tip-VII (n=5, t=2mm)	800	2945,79	115338,33	5934,07	124218,19
	900	3301,92	119680,34	6541,72	129523,98
	1000	3260,43	118661,09	6416,72	128338,24
Tip-VIII (n=7, t=1mm)	800	3357,24	122505,05	4642,40	130504,69
	900	3153,24	119019,13	4323,99	126496,36
	1000	3173,99	119226,63	4348,30	126748,92
Tip-IX (n=7, t=1,5mm)	800	3391,81	120746,37	7072,97	131211,15
	900	3457,50	121295,12	7167,76	131920,38
	1000	3492,08	121559,34	7218,81	132270,23
Tip-X (n=7, t=2mm)	800	3080,64	113802,38	8555,62	125438,64
	900	3346,86	117304,61	9275,07	129926,54
	1000	3488,62	118896,53	9605,63	131990,78

Kanat kalınlığının ve sayısının artması, kanatlarda depolanan duyulur ısı miktarını Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi arttırmıştır. Kanatlar tarafından depolanan en yüksek duyulur ısı 9605,63J ile $q=1000\text{W/m}^2$ ışınlım altında test edilen Tip-X ($n=3$, $t=2\text{mm}$)'dan elde edilmiştir. En düşük duyulur ısı miktarı ise 2038,56J ile $q=800\text{W/m}^2$ ışınlım altında test edilen Tip-II ($n=3$, $t=1\text{mm}$)'de bulunmuştur. Kanat kalınlığının ve sayısının artması ile kanatlarda depolanan en düşük miktardaki duyulur ısı %354,97 oranında artırılarak, Çizelge 4.4'de kanatlar tarafından depolanan en yüksek enerji miktarının depolanmasını sağlamıştır.

Aynı çizelgede bulunan parafin tarafından depolanan enerji miktarına bakılacak olursa, kanatsız TEDÜ tasarımı daha fazla miktarda duyulur ve gizli ısı formunda enerji depolanmıştır. Artan kanat sayısı ve kalınlığı, TEDÜ deposunda bulunan parafin kütlesinin azalmasına neden olduğu için kanat kullanımının parafin tarafından depolanan enerji miktarı üzerine olumsuz etki yaptığı söylenebilir. Fakat bu durum katı haldeki parafinin ergime süresi açısından değerlendirildiğinde, kanat kullanımı ile ZBİO değeri artmakta ve daha kısa sürede faz değişiminin gerçekleşmesi ile güneş enerjisinin kesintili yapısından dolayı meydana gelebilecek performans kayıplarının önüne geçilebilmektedir. Isı geri kazanım sürecinde, kanat kullanımı ile TEDÜ hacmi içerisinde depolanan parafinde meydana gelebilecek ısı direnç tabakalarının olumsuz etkisinden kaçınılmaktadır. Ayrıca ısı depolama sürecinin kısılmasıyla, tasarlanan TEDÜ'de depolanan ısıнын çevreye kaybı düşmektedir. TEDÜ'lerde parafin tarafından duyulur ve gizli ısı formunda depolanan enerji parafin kütlesiyle orantılı bir şekilde değişmektedir. Çünkü yapılan tüm deneylerde TEDÜ hacmi sabit tutulduğu için, artan kanat sayısı ve kalınlığı ile parafinin depolanacağı hacim düşmüştür. Buna bağlı olarak sisteme eklenen parafin kütlesi de azalmıştır. Parafin tarafından duyulur ve gizli ısı formunda depolanan en yüksek enerji 134481,60J ile $q=900\text{W/m}^2$ ışınlım şiddetinde test edilen Tip-I (kanatsız)'de depolanmıştır. En düşük ısı ise 113802,38J ile Tip-X ($n=7$, $t=2\text{mm}$)'da $q=800\text{W/m}^2$ ışınlım şiddetinde elde edilmiştir. Parafin tarafından depolanan en yüksek enerji miktarı, 0,54kg parafine sahip TEDÜ'de elde edilirken, en düşük enerji miktarı ise 0,4975kg'lık parafin kütlesine sahip TEDÜ'de bulunmuştur. Kütleli olarak meydana gelen %7,87 oranındaki düşüş, depolanan enerji miktarında %15,37 kadarlık bir azalma meydana getirmiştir.

Emici yüzeyde depolanan ısı miktarı 4875,08J ile $q=1000\text{W/m}^2$ ışınlım altında test edilen diğer tasarımlara oranla Tip-I (kanatsız) TEDÜ'de daha fazladır. Bunun nedeni $T_f - T_i$

sıcaklık farkının bu yapıda daha yüksek olmasıdır. Emici yüzeyin altına kanat eklenmesi ile emici yüzeyin üzerinde depolanan ısı, parafin deposu içerisine düşey yönde iletilmiştir. Böylece emici yüzeydeki $T_f - T_i$ sıcaklık farkı azalmakta ve bu azalma sonucu emici yüzeyde depolanan duyulur ısı miktarı da düşmüştür. Emici yüzeyde depolanan enerji miktarındaki düşüş, ilk bakışta bir kayıp olarak görülebilmektedir. Fakat katı fazdaki parafinin tamamen ergiyerek T_6 numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklık değerini göstermesi için gereken süre açısından bakıldığında ise olumlu bir sonucun varlığından söz edilebilmektedir. Emici yüzeydeki sıcaklık farkının azalması, TEDÜ içerisindeki her bölgede sıcaklık dağılımının yaklaşık aynı olduğunu ve ısı direnç oluşturacak bölgelerin depolanan ısının geri kazanılmasını engelleyici özelliklerinin bertaraf edilmesine imkân sağlamaktadır. Tüm TEDÜ'lerin emici yüzeyleri içerisinde, en düşük orandaki duyulur ısı $2945,79\text{J}$ ile $q=800\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde test edilen Tip-VII ($n=5$, $t=2\text{mm}$)'den elde edilmiştir. $T_f - T_i$ sıcaklık farkının $70,5^\circ\text{C}$ 'den $\%39,57$ oranında düşerek $42,6^\circ\text{C}$ 'ye gelmesi, elde edilen en yüksek enerji değerinin de aynı oranda düşmesini sağlamıştır.

Tez çalışması kapsamında tasarlanan ve üzerinde deneyler yapılan TEDÜ'lerde depolanan toplam enerji miktarları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Verilen değerler dikkatle incelendiğinde en yüksek toplam enerji $139325,56\text{J}$ ile $q=900\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde test edilen Tip-I (kanatsız) yapıda depolanmıştır. TEDÜ'lerdeki toplam en düşük enerji, $124218,19\text{J}$ ile $q=800\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde Tip-VII ($n=5$, $t=2\text{mm}$)'de depolanmıştır. Depolanan toplam en yüksek enerjinin, $\%3,47$ oranındaki $4843,96\text{J}$ 'si emici yüzeyde ve $\%96,52$ oranındaki $134481,60\text{J}$ 'si ise parafin tarafından depolanmıştır. Bu TEDÜ tasarımı kanat kullanılmadığı için en yüksek orandaki enerji parafin tarafından duyulur ve gizli ısı formunda depolanmıştır. Depolanan toplam en düşük enerjinin, $\%2,37$ oranındaki $2945,79\text{J}$ 'si emici yüzeyde, $\%92,85$ oranındaki $115338,33\text{J}$ 'si parafinde ve son olarak $\%4,77$ oranındaki $5934,07\text{J}$ 'si ise tasarımda kullanılan kanatlarda depolanmıştır. Tüm TEDÜ'ler incelendiğinde depolanan toplam enerjilerdeki en büyük pay parafin tarafından depolanan miktara bağlıdır. Çünkü parafin bünyesine hem duyulur ısı hem de gizli ısı depolamaktadır. Kanat kullanımı ile depolanan enerji miktarı $\%10,84$ oranında düşmüştür. Depolanan enerji açısından bakıldığında kanat kullanımının TED sistemi üzerine etkisinin olumsuz olduğu söylenebilir. Fakat birim saniye başına düşen enerji miktarı açısından bakıldığında ise kanat kullanımının avantajlı olduğu sonucuna varılmaktadır.

4.4. Depolanan Isıl Güç Miktarı

Birim saniye başına TEDÜ’de depolanan enerji miktarı ısııl güç (P_T) olarak tarif edilmektedir. Her bir TEDÜ tasarımının depolamış olduğu ısııl gücün hesaplanma yöntemi Bölüm 3.2.2’de detaylı bir şekilde ifade edilmiş ve bir oran tanımlanmıştır (Bkz. Eş. 4.2). Bu orana göre, her bir TEDÜ’nün depolamış olduğu J birimindeki toplam enerji miktarı, katı haldeki parafinin tamamen ergiyerek, parafin deposu zemininde bulunan T₆ numaralı ısııl çiftin 60°C’yi gösterdiği ana kadar geçen süreye bölünmüştür. Böylece tüm TEDÜ’ler için J/s (Joule/saniye)=W (Watt) biriminde ısııl güç değerleri bulunmuştur. Kızılötesi lambadan gelen ışınının, enerji depolama üniteleri tarafından depolanmasıyla elde edilen toplam ısııl güç miktarları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Her bir TEDÜ tarafından depolanan ısııl güç miktarı

TEDÜ Türü	Işınım Miktarı (W/m ²)	Ergime Süresi (dk)	Ergime Süresi (s)	Toplam Depolanan Enerji (J)	Toplam Isıl Güç (W)
Tip-I (Kanatlı)	800	221	13260	132796,80	10,35
	900	212	12720	134481,60	10,95
	1000	204	12240	133466,40	11,30
Tip-II (n=3, t=1mm)	800	178	10680	126903,35	12,39
	900	147	8820	129048,13	15,29
	1000	126	7560	129727,67	17,98
Tip-III (n=1,5, t=1mm)	800	183	10980	122866,77	11,76
	900	150	9000	123666,79	14,46
	1000	127	7620	126151,07	17,45
Tip-IV (n=3, t=2mm)	800	188	11280	121677,93	11,42
	900	165	9900	121865,77	13,04
	1000	131	7860	123326,74	16,65
Tip-V (n=5, t=1mm)	800	151	9060	124485,53	14,49
	900	147	8820	123645,83	14,77
	1000	121	7260	126584,78	18,41
Tip-VI (n=5, t=1,5mm)	800	160	9600	122187,76	13,60
	900	155	9300	123470,46	14,20
	1000	130	7800	124380,77	17,08

Çizelge 4.5. (devam) Her bir TEDÜ tarafından depolanan ısı güç miktarı

Tip-VII (n=5, t=2mm)	800	199	11940	115338,33	10,40
	900	165	9900	119680,34	13,08
	1000	140	8400	118661,09	15,28
Tip-VIII (n=7, t=1mm)	800	157	9420	122505,05	13,85
	900	122	7320	119019,13	17,28
	1000	112	6720	119226,63	18,86
Tip-IX (n=7, t=1,5mm)	800	179	10740	120746,37	12,22
	900	141	8460	121295,12	15,59
	1000	122	7320	121559,34	18,07
Tip-X (n=7, t=2mm)	800	187	11220	113802,38	11,18
	900	145	8700	117304,61	14,93
	1000	127	7620	118896,53	17,32

Çizelge 4.5 incelendiğinde en yüksek ısı güç değerinin 18,86W olarak Tip-VII (n=7, t=1mm)'de $q=1000\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde elde edildiği açıkça görülmektedir. En düşük ısı güç değerine ise 10,35W olarak Tip-I (kanatsız)'de $q=800\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde ulaşılmıştır. Elde edilen ısı güç değerleri ile TEDÜ'ler tarafından depolanan toplam enerji miktarları benzer özellik göstermiştir. Burada hesaplanan en yüksek ısı güç değeri için kullanılan ergime süresi 221dk iken, en düşük ısı güç için 199dk olarak deneylerden elde edilmiştir.

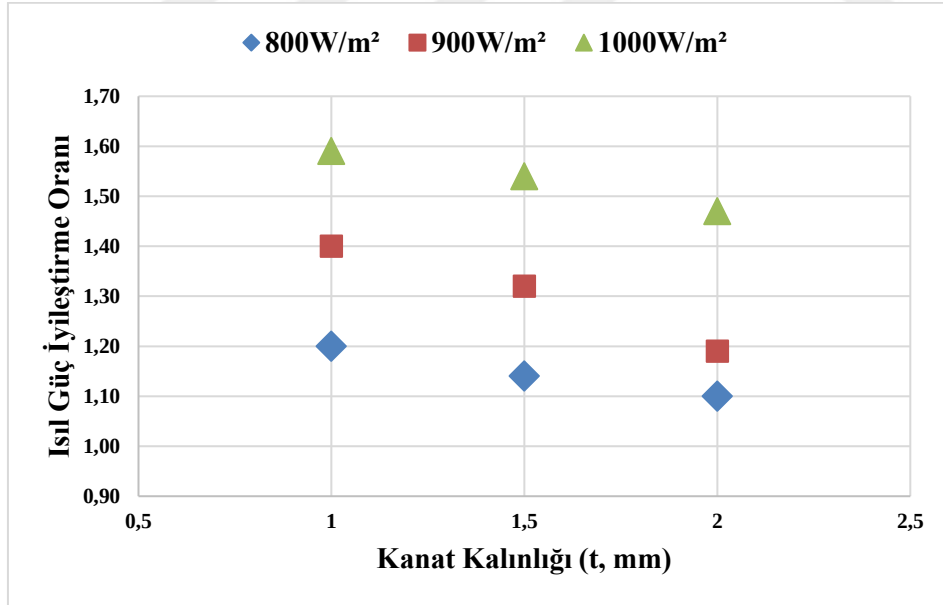
Yapılan tez çalışmasında ergime süreleri üzerinden zamana bağlı bir iyileştirme oranı (ZBİO) tanımlanmıştır (Bkz. Eş. 4.2). Deneysel bulguların elde edilmesi sonucu tanımlanan ZBİO'ya benzer şekilde ısı güç iyileştirme oranı da (IGİO) geliştirilmiştir. Burada geliştirilen IGİO, kanatlı enerji depolama ünitesinde depolanan ısı gücün, kanatsız yapılar kullanılmasıyla hangi oranda iyileştirildiğini ifade etmektedir. Isı güç için geliştirilen IGİO Eş. 4.3'de açıkça ifade edilmiştir.

$$\text{Isı Güç İyileştirme Oranı} = \frac{\text{Kanatlı TEDÜ'de depolanan toplam ısı güç}}{\text{Kanatlı TEDÜ'de depolanan toplam ısı güç}} \quad (4.3)$$

IGİÖ'nün yüksek olması kanatlı TEDÜ'de birim saniye başına depolanan enerji miktarının, kanatsız yapıya göre daha fazla olduğunu ifade etmektedir. Bir bakıma kanat kullanımının birim saniye başına depolanan toplam enerji miktarına olan etkisini tarif etmektedir. $t=1, 1,5$ ve 2 mm kalınlıkta $n=3$ adet kanat içeren TEDÜ'ler için geliştirilerek hesaplanan IGİÖ değerleri Çizelge 4.6'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.6. $n=3$ kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarında IGİÖ değerleri

Fin Sayısı (n, adet)	Fin Kalınlığı (t, mm)	Güneş Işınımı (q, W/m ²)	Isıl Güç İyileştirme Oranı (IGİÖ)
3	1	800	1,20
		900	1,40
		1000	1,59
	1,5	800	1,14
		900	1,32
		1000	1,54
	2	800	1,10
		900	1,19
		1000	1,47



Şekil 4.20. 3 kanatlı TEDÜ'de kanat kalınlığı ve ışınlm şiddeti değişiminin IGİÖ'ya etkisi

Elde edilen deneysel ısııl güç miktarları dikkate alınarak her bir TEDÜ ünitesi için farklı yapılarda IGİÖ grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.20, $n=3$ kanatlı TEDÜ'de kanat sayısı ve ışınlm şiddeti değişiminin IGİÖ üzerine olan etkisini ifade etmektedir. Şekil 4.20

incelendiğinde, kanat kalınlığının artması IGİÖ'nün azalmasına neden olmuştur. Artan ısıtım şiddeti ise TEDÜ'ler tarafından depolanan ısı gücünün artmasını sağlamıştır. 800W/m^2 ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük IGİÖ 1,20 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Aynı ısıtım şiddetinde, kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİÖ'yu %5 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİÖ'yu $t=1,5\text{mm}$ kalınlıktaki yapıya göre %3,51 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre %8,33 oranında azaltmıştır. 900W/m^2 güneş ısıtım altında elde edilen en büyük IGİÖ 1,40 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİÖ'yu %5,71 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİÖ'yu $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %9,85 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye kıyasla %15 oranında azaltmıştır. 1000W/m^2 ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük IGİÖ 1,59 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİÖ'yu %3,14 kadar küçültmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİÖ değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %4,55 kadar ve $t=1\text{mm}$ ile karşılaştırıldığında %7,55 oranında azaltmıştır.

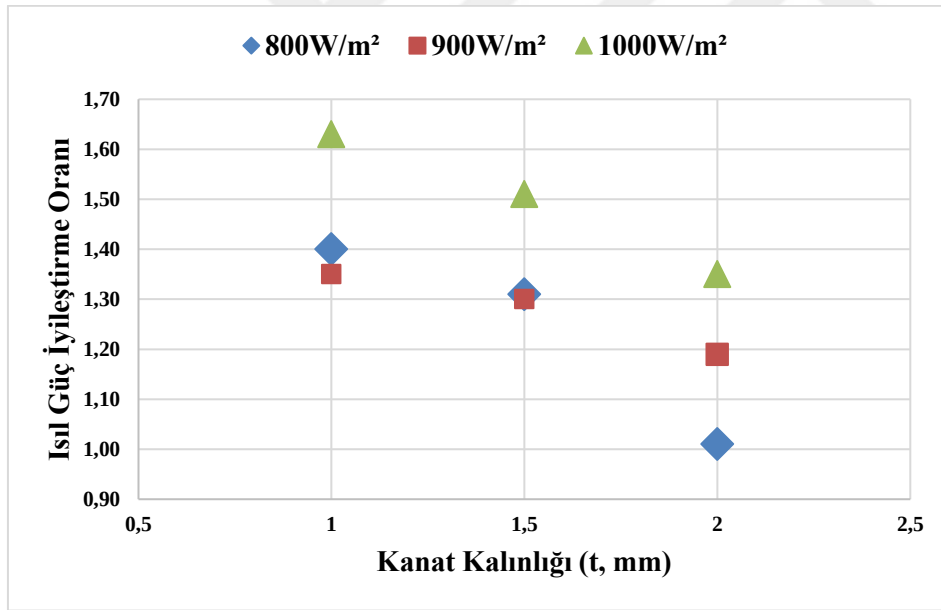
$t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlıkta $n=5$ adet kanat içeren TEDÜ'ler için hesaplanarak elde edilen IGİÖ değerleri Çizelge 4.7'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.7. $n=5$ kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarında IGİÖ değerleri

Fin Sayısı (n, adet)	Fin Kalınlığı (t, mm)	Güneş ısıtım (q, W/m^2)	Isıl Güç İyileştirme Oranı (IGİÖ)
5	1	800	1,40
		900	1,35
		1000	1,63
	1,5	800	1,31
		900	1,30
		1000	1,51
	2	800	1,01
		900	1,19
		1000	1,35

$n=5$ kanatlı TEDÜ'de kanat sayısı ve ısıtım şiddeti değişiminin IGİÖ üzerine olan etkisini daha anlaşılır kılmak için Şekil 4.21 elde edilmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde kanat kalınlığının artışı, içerisinde $n=5$ konfigürasyonunda kanat içeren TEDÜ'nün depolamış olduğu ısı gücünde düşme ve IGİÖ değerlerin de azalma meydana geldiğini açıkça ifade etmektedir. Kanat kalınlığının IGİÖ değeri üzerine olan etkisinin aksine, ısıtım şiddetinin

artışı her bir kanat kalınlığı için IGİÖ değerinde artış meydana getirmiştir. 800W/m^2 ısıtım şiddetinde elde edilen en büyük IGİÖ 1,40 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki TEDÜ tasarımına aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİÖ'yu %6,43 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİÖ değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %22,9 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre %27,86 oranında azalmıştır. 900W/m^2 ısıtım şiddeti altında elde edilen en büyük IGİÖ 1,35 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİÖ değerini %3,7 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİÖ'yu $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %8,46 kadar ve $t=1\text{mm}$ 'ye ile kıyaslandığında %11,85 kadar küçültmüştür. 1000W/m^2 ısıtım şiddetinde ise elde edilen en büyük IGİÖ 1,63 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarımda hesaplanmıştır. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİÖ'yu %7,36 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİÖ değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %10,59 oranında ve $t=1\text{mm}$ ile karşılaştırıldığında %17,18 kadar küçültmüştür.



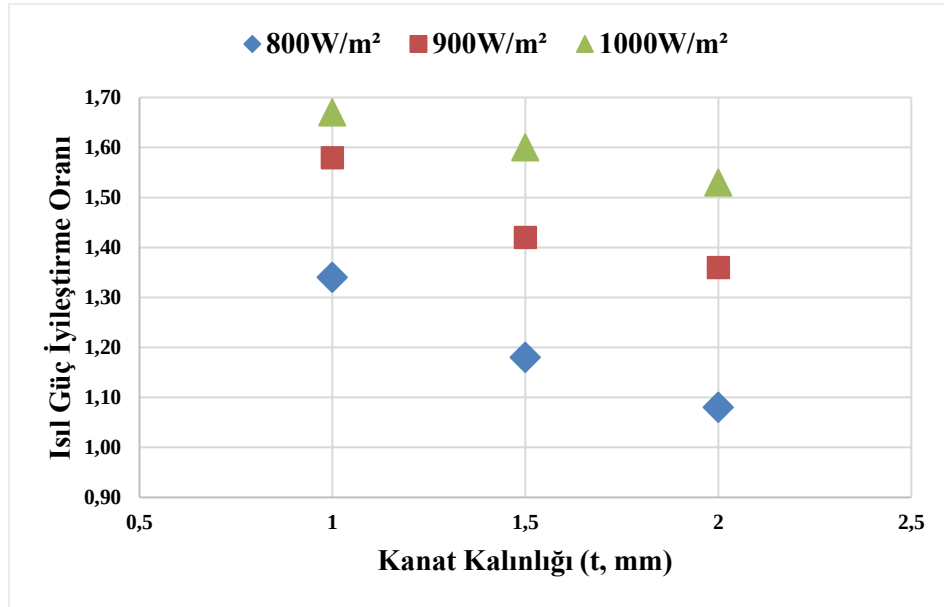
Şekil 4.21. 5 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ısıtım şiddeti değişiminin IGİÖ’ya etkisi

$t=1, 1,5$ ve 2mm kalınlıkta $n=7$ adet kanat içeren TEDÜ’ler için IGİÖ değerleri Çizelge 4.8’deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. n=7 kanatlı TEDÜ için farklı kanat kalınlıklarında IGİÖ değerleri

Fin Sayısı (n, adet)	Fin Kalınlığı (t, mm)	Güneş Işınımı (q, W/m ²)	Isıl Güç İyileştirme Oranı (IGİÖ)
7	1	800	1,34
		900	1,58
		1000	1,67
	1,5	800	1,18
		900	1,42
		1000	1,60
	2	800	1,08
		900	1,36
		1000	1,53

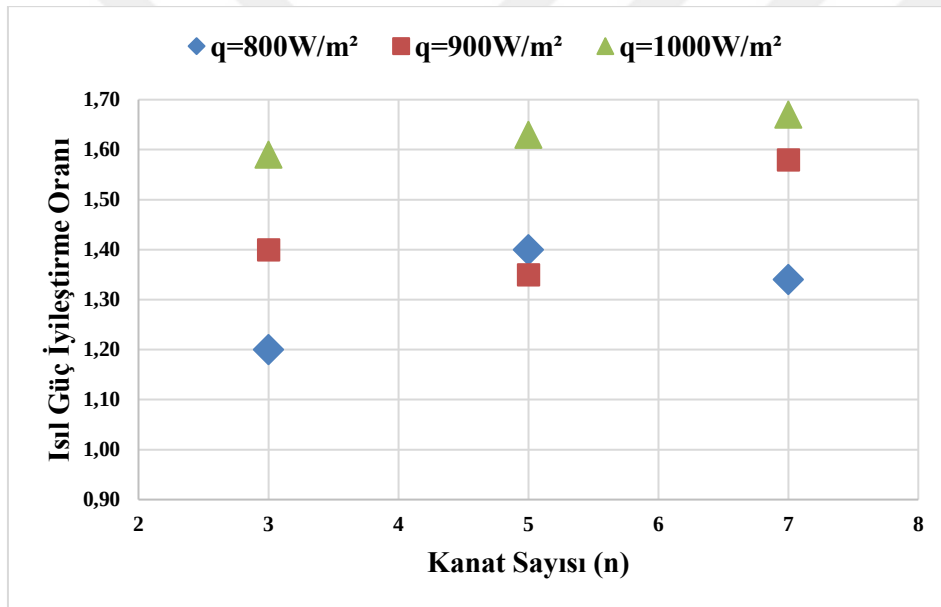
n=7 kanatlı TEDÜ’de kanat sayısı ve ışınlm şiddeti değışiminin IGİÖ üzerine olan etkisini daha anlaşılır kılmak amacıyla Şekil 4.22’de görölmekte olan grafik elde edilmiştir. n=7 için elde edilen grafik n=5 ve n=3 için elde edilen Şekil 4.20 ve 4.21’de verilen grafiklere benzer davranış sergilemiştir. Artan kanat kalınlığı, kanatlı TEDÜ’ler tarafından depolanan ısııl güç miktarının düşmesine ve buna bağılı olarak IGİÖ değęrlerinin de azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.22. 7 kanatlı TEDÜ’de kanat kalınlığı ve ışınlm şiddeti değışiminin IGİÖ’ya etkisi

800W/m² ışınlm şiddeti altında elde edilen en büyük IGİÖ 1,34 ile t=1mm kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının t=1,5mm olması IGİÖ’yu %11,94 oranında düşürmüştür.

Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %8,47 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre %19,4 oranında azaltmıştır. 900W/m^2 ışınlm şiddeti altında elde edilen en büyük IGİO değeri 1,58 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki TEDÜ tasarımı aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİO'yu %10,13 kadar düşürmüştür. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %4,23 oranında ve $t=1\text{mm}$ ile kıyaslandığında %13,92 kadar küçültmüştür. 1000W/m^2 ışınlm şiddetinde elde edilen en büyük IGİO 1,67 ile $t=1\text{mm}$ kalınlıktaki tasarıma aittir. Kanat kalınlığının $t=1,5\text{mm}$ olması IGİO'yu %4,19 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde kanat kalınlığının $t=2\text{mm}$ olması ise IGİO değerini $t=1,5\text{mm}$ 'ye göre %4,37 oranında ve $t=1\text{mm}$ 'ye göre %8,38 kadar düşürmüştür.

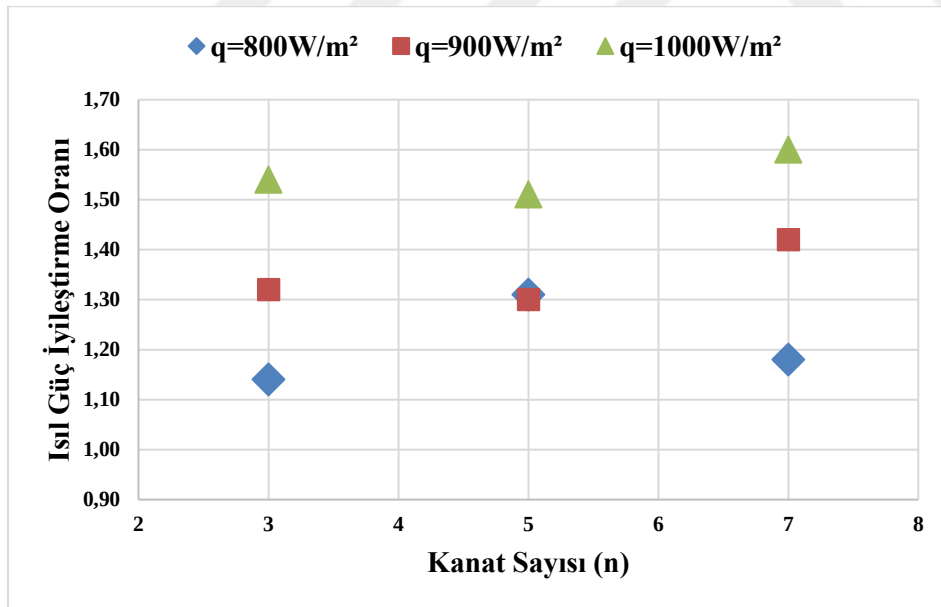


Şekil 4.23. $t=1\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ışınlm şiddetinin IGİO'ya etkisi

Şekil 4.23'de $t=1\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ışınlm şiddetinin IGİO üzerine olan etkisi görülmektedir. Şekil 4.23 dikkatle incelendiğinde, ışınlm miktarının kanat sayısına bağlı olarak artması IGİO değerini genel olarak yükseltmiştir. 1000W/m^2 ışınlm şiddetinde, artan kanat sayısına bağlı olarak IGİO değerlerinde de lineer bir artış meydana gelmiştir. 800 ve 900W/m^2 ışınlm şiddetinde, 1000W/m^2 'lik güneş ışınlmı altında davranış sergileyen $t=1\text{mm}$ kanat kalınlığına sahip TEDÜ'lerden elde edilen devamlı artan IGİO'nun aksine $n=5$ kanatlı yapıda, bir önceki kanat sayısına kıyasla sırasıyla bir yükseliş ve bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun nedeni, kanatlı TEDÜ'nün

depolamış olduğu ısı güç miktarının aynı ısıtım şiddetinde, diğer TEDÜ'lerde depolanan ısı güce kıyasla daha az miktarda depolama yapmasından kaynaklıdır. Elde edilen değerler kullanılarak çizilen Şekil 4.23 dikkatle incelendiğinde 1000W/m^2 ısıtım şiddetinde $n=7$ kanatlı bir TEDÜ kullanmak daha iyi ısı güç elde etmeye imkân sağlaması öngörülmektedir. Aynı yapıdaki en büyük IGİÖ 1,67 olarak bulunmuştur. ZBİÖ, bahsedilen depolama ünitesi için 1,82 olarak hesaplanmıştır. Her iki değer benzer özellik göstermesi yapılan tez çalışmasından elde edilen sonuçların doğru olduğu yorumunu yapmamıza imkân sağlamaktadır.

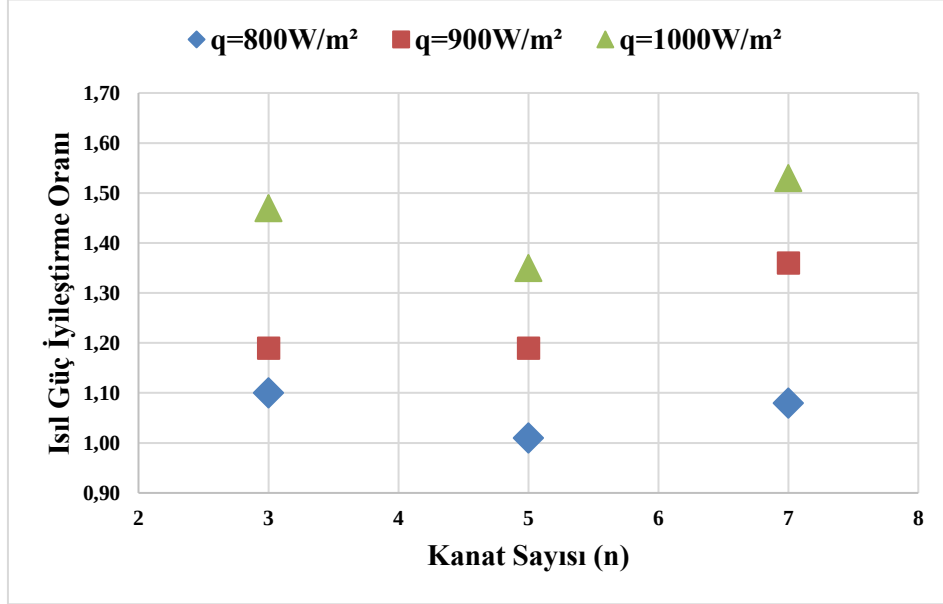
Şekil 4.24, $t=1,5\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında kanat sayısı ve ısıtım şiddeti değişiminin IGİÖ üzerine olan etkisini ifade etmektedir. Artan ısıtım şiddetine bağlı olarak kanat sayısının artırılması IGİÖ'yu yükseltmiştir. En büyük IGİÖ'ya 1000W/m^2 ısıtım şiddeti altında $n=7$ 'de 1,60 olarak ulaşılmıştır. Fakat aynı şartlar altında $t=1\text{mm}$ kanat kalınlığındaki TEDÜ tasarımı göre ZBİÖ değerinde %4,19 oranında düşüş meydana gelmiştir.



Şekil 4.24. $t=1,5\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin IGİÖ'ya etkisi

Şekil 4.23 ve 4.24'e benzer olarak, $t=2\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin IGİÖ üzerine olan etkisi Şekil 4.25'de ifade edilmiştir. En yüksek IGİÖ,

diğer kanat kalınlıklarına benzer olarak $n=7$ kanatlı TEDÜ tasarımımda $q=1000\text{W/m}^2$ ısıtım şiddetinde 1,53 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.25. $t=2\text{mm}$ sabit kanat kalınlığında, kanat sayısının ve ısıtım şiddetinin IGİÖ'ya etkisi

Genel olarak bakıldığında, tüm grafiklerde kanat kalınlığının $t=1\text{mm}$ 'den $t=2\text{mm}$ 'ye arttırılması, IGİÖ değerlerini düşürerek enerji depolama sistemi üzerine olumsuz etki yapmıştır. Fakat kanat sayısının arttırılması ise IGİÖ değerlerine olumlu bir katkıda bulunmuştur.

Çizelge 4.9. Deneysel sonuçlara göre elde edilen optimum kanat sayısı, kanat kalınlığı, ZBİÖ ve IGİÖ değerleri

Isıtım Şiddeti (W/m^2)	Kanat Kalınlığı (t, mm)	En Yüksek ZBİÖ	Kanat Sayısı (n, adet)	En Yüksek IGİÖ	Kanat Sayısı (n, adet)
800	1	1,46	5	1,40	5
	1,5	1,38	5	1,31	5
	2	1,18	3,7	1,10	3
900	1	1,74	7	1,58	7
	1,5	1,50	7	1,42	7
	2	1,46	7	1,36	7
1000	1	1,82	7	1,67	7
	1,5	1,67	7	1,60	7
	2	1,61	7	1,53	7

Tüm kanat kalınlıkları ve ışınlm miktarları için elde edilen ZBİO ve IGİO değeri Çizelge 4.9'da gösterildiğı gibi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tanımlanan her iki orana göre en iyi sonuçlar aynı TEDÜ tasarımlarından elde edilmiştir. 800W/m^2 ışınlm şiddetinde çalışılacak bir sistemde $t=1\text{mm}$ kanat kalınlığına sahip 5 kanatlı bir yapı kullanmak en iyi performansa ulaşılmasını sağlayacaktır. 900 ve 1000W/m^2 ışınlm şiddeti altında kullanılacak bir sistemde ise $t=1\text{mm}$ kanat kalınlığına sahip 7 kanatlı bir tasarım kullanmak en iyi performans değeriinin elde edilmesini mümkün kılacaktır. Yapılan çalışma ile en yüksek oranda ısıl güç $t=1\text{mm}$ kalınlığında 7 kanata sahip TEDÜ tasarımından elde edilecektir.





5. SONUÇ – ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan bu tez çalışmasında, güneş ışınlamı altında FDM'nin ısı depolama davranışı deneysel olarak incelenmiştir. GID tekniğine göre çalışan FDM'li termal enerji depolama sistemlerinde karşılaşılan en büyük sorun, kullanılan FDM'lerin düşük ısı iletkenliğe sahip olmasıdır. FDM'nin ısı iletkenliğinin düşük olması, ısı depolama ve depolanan ısı ın geri kazanılma süreçlerini zorlaştırmakta ve daha uzun depolama ve geri kazanım sürelerine ihtiyaç duymaktadır. Bu eksikliği gidermek için ısı depolama hacmi içerisine ısı iletkenliği arttıracak malzemeler ilave edilmektedir.

Bu çalışmada organik FDM olarak seçilen parafinin depolanmış olduğu hacmin içerisine farklı kalınlıklarda ve sayıda kanat eklemesi yapılmıştır. Kanatlar kızılötesi lambanın yaymış olduğu ışınlamın emildiği siyaha boyanmış bakır plakanın altına yerleştirilmiştir. Böylece kızılötesi lambanın yaymış olduğu ışınlam, emici yüzeye aktarılmakta sonrasında iletim yoluyla parafine aktararak faz değıştirmesi sağlanmaktadır. Benzer şekilde soğuma aşamasında da parafinde depolanmış olan gizli füzyon ısısı kanatlar tarafından emilerek, dış ortama aktarılmaktadır. Yapılan deneyler ve ölçümler sonucu elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

1. Kızılötesi lamba tarafından oluşturulan güneş ışınlamı, üç farklı yoğunluğa sahip olacak şekilde TEDÜ üzerine gönderilmiştir. Isıl çiftler ile belirli noktalardan alınan sıcaklık değeri karşılaştırıldığında artan ısı akısı, parafinin ergime süresini kısaltmıştır.
2. Güneş enerjisinin depolanması amacıyla yapılan deneylerde, TEDÜ içerisinde sadece iletimle ısı transferi gerçekleşmiştir.
3. Işık kaynağı kapatıldıktan sonra, depolanan enerji TEDÜ içerisinde emici yüzeye kadar iletimle, emici yüzeyden dış ortama ise doğal taşınım ile gerçekleşmiştir.
4. Kanat sayısının artması ısı enerji depolama süresini kısaltarak, emici yüzeyden parafin deposuna aktarılmakta olan ısı enerji miktarının artmasını sağlamıştır.
5. Kanat kullanımı ile parafin içerisinde meydana gelen ısı katmanlaşmanın önüne geçilmiş ve parafinde depolanmış olan duyulur ve gizli ısı formundaki termal enerji emici yüzeye aktarılmıştır.

6. 3 farklı güneş ışınlımı altında parafinin ergimesi için elde edilen en uzun süreler sırasıyla 221, 212 ve 204dk olarak artan ışınlım miktarıyla ters orantılı şekilde Tip-I (kanatsız) TEDÜ'de gözlenmiştir.
7. En düşük ergime süreleri 800, 900 ve 1000W/m² ışınlım şiddetinde sırasıyla, 151dk ile Tip-V (n=5, t=1mm)'de, 122dk ile Tip-VIII (n=7, t=1mm)'de ve son olarak 112 dk ile yine aynı TEDÜ tasarımında bulunmuştur.
8. Tip-I (kanatsız) yapıyla karşılaştırılarak elde edilen en yüksek ergime süresi farkı Tip-VIII (n=7, t=1mm)'de 1000W/m² ışınlım şiddetinde %45,09 olarak bulunmuştur.
9. TEDÜ içerisindeki parafinde meydana gelen ısı transferi miktarı, emici yüzey altında kanat kullanımı ile yükseltilmiştir.
10. Yapılan hesaplamalar sonucunda en yüksek ZBİÖ 1000W/m² ışınlım şiddetinde, Tip-VIII (n=7, t=1mm)'de 1,82 olarak bulunmuştur.
11. En düşük ZBİÖ 800W/m² ışınlım şiddetinde, Tip-VII (n=5, t=2mm)'de 1,11 olarak hesaplanmıştır.
12. Kanat kalınlığının 1mm'den 2mm'ye çıkarılması FDM'nin ergime süresini uzatarak ZBİÖ'nün düşmesine neden olmuştur.
13. TEDÜ tasarımlarında depolanan en yüksek enerji miktarı (E_{Toplam}) 139,3256kJ olarak 900W/m² ışınlım altında test edilen Tip-I (kanatsız) yapıda elde edilirken, depolanan en düşük enerji miktarı (E_{Toplam}) ise 124,2183kJ olarak 800W/m² ışınlım şiddetinde çalışan Tip-VII'de (n=5, t=2mm) bulunmuştur.
14. TEDÜ içerisinde bulunan katı haldeki parafinin tamamen ergimesi ve T₆ numaralı ısı çiftin 60°C sıcaklık değerini gösterdiği ana kadar geçen toplam sürede depolanan enerjinin birim saniye başına düşen miktarı ısı güç (P_T) olarak tarif edilmiştir.
15. En yüksek P_T , 18,8614W olarak 1000W/m² şiddetinde ışınlıma maruz kalan Tip-VIII (n=7, t=1mm)'de depolanmıştır.
16. En düşük P_T , 10,3478W değerinde 800W/m² miktarında ışınlıma maruz kalan Tip-I (kanatsız)'de depolanmıştır.
17. En yüksek IGİÖ 1000W/m² ışınlım şiddetinde, Tip-VIII (n=7, t=1mm)'de 1,67 olarak hesaplanmıştır.
18. En düşük IGİÖ 800W/m² ışınlım şiddetinde, Tip-VII (n=5, t=2mm)'de 1,01 olarak hesaplanmıştır.
19. Her bir ışınlım şiddeti için hesaplanan en yüksek ZBİÖ ve IGİÖ değerleri aynı TEDÜ tasarımlarından elde edilmiştir.

20. Tüm çalışmalar dikkate alındığında parafin kullanılarak güneş ışıınının laboratuvar koşullarında depolanabileceği bilgisine ulaşılmıştır.
21. Güneş ışıını miktarının yüksek olduğu saatlerde ergiyen FDM kullanılmasıyla duyulur ısıının yanında, duyulur ısıya oranla depolanan enerji yoğunluğu daha yüksek olan gizli ısı da depolanmış olmaktadır. Böylece güneş enerjisinin doğal özelliği olan kesintili yapısı iyi yönde geliştirilmektedir.

5.2. Öneriler

Çalışmanın devamında yapılabilecek farklı uygulamalara yönelik öneriler aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

1. Parafinin depolandığı TEDÜ malzemesi değiştirilebilir.
2. Düz kanat geometrisi yerine farklı yapıdaki kanatlar tasarlanarak uygulamada kullanılabilir.
3. Isıl iletkenliği arttırmak için kanat tasarımı yerine metal köpük malzemeler eklenerek güneş ışıınının depolanabilirliği araştırılabilir.
4. Hava akışkanlı veya sulu bir güneş kolektörü tasarımına parafin veya farklı FDM'ler eklenerek performans analizleri gerçekleştirilebilir.
5. Daha büyük ölçekli TEDÜ tasarımı yapılarak laboratuvar koşullarında güneş simülatörü ile enerji depolama uygulamaları gerçekleştirilebilir.
6. Kanatsız ve kanatlı TEDÜ'lerdeki ergime ve katılma süreçleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle sayısal (nümerik) olarak modellenenebilir.
7. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar dikkate alınarak daha verimli ve etkin bir ısı değiştiricisi tasarımı yapılabilir.
8. FDM'lerin sonraki kullanımlar için ısı enerjisi depolamasının yanında soğutma amaçlı kullanımı da incelenebilir. Örneğin fotovoltaiik uygulamalarda, panel geometrisi içerisine parafin entegre ederek, panelin soğuması sağlanabilir ve daha uzun süre verimli şekilde çalışması mümkün hale getirilebilir.
9. Elektronik donanımların soğutulmasında kullanılan ısı yutucu (heat sink) tasarımlarında farklı FDM'ler kullanılarak, yapılarda meydana gelen fazla ısınmanın önüne geçilebilir.



KAYNAKLAR

1. İnternet: International Energy Agency. Energy Resources Categorization. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.iew.org%2F&date=2017-05-22>, Son Erişim Tarihi: 22.05.2017.
2. İnternet: BP. Energy Outlook 2017 Edition. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fcontent%2Fdam%2Fbp%2Fpdf%2Fenergy-economics%2Fenergy-outlook-2017%2Fbp-energy-outlook-2017.pdf&date=2017-05-22>, Son Erişim Tarihi: 22.05.2017.
3. Özme, M. T. (2009). Sera gazı-küresel ısınma ve kyoto protokolü. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 453(1), 42-46.
4. Tyagi, V. V., Panwar, N. L., Rahim, N. A. and Kothari, R. (2012). Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2289-2303.
5. Dinçer, İ. and Rosen, M. A. (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications* (Second edition). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 51-190.
6. Fath, H. E. S. (1995). Thermal performance of a simple design solar air heater with built-in thermal energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 36(10), 989-997.
7. Enibe, S. O. (2002). Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renewable Energy*, 27, 69-86.
8. Saman, W., Bruno, F. and Halawa, E. (2005). Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system. *Solar Energy*, 78, 341-349.
9. Mettawee, E. B. S. and Assassa, G. M. R. (2006). Experimental study of a compact PCM solar collector. *Energy*, 31, 2958-2968.
10. Summers, E. K., Antar, M. A. and Lienhard V, 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, 3417-3429.
11. Khalifa, A. J. N., Suffer, K. H. and Mahmoud, M. Sh. (2013). A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 174-181.
12. Bouadile, S., Kooli, S., Lazaar, M., Skouri, S. and Farhat, A. (2013). Performance of a new solar air heater with packed-bed latent storage energy for nocturnal use. *Applied Energy*, 110, 267-275.
13. Charvat, P., Ostry, M., Mauder, T. and Klimes, L. (2012). A solar air collector with integrated latent heat thermal storage. *The European Physical Journal*, 25, 1-5.

14. Öztürk, H. H. and Demirel, Y. (2004). Exergy-based performance analysis of packed-bed solar air heaters. *International Journal of Energy Research*, 28, 423-432.
15. Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Kaushik, S. C. and Tyagi, S. K. (2012). Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 107, 1345-1352.
16. Kabeel, A. E., Khalil, A., Shalaby, S. M. and 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.
17. Kabeel, A. E., Khalil, A., Shalaby, S. M. and 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.
18. Garg, H. P., Shukla, A. R., Madhuri, I., Agnihotri, R. C. and Chakraverty, S. (1985). Development of a simple low-cost solar simulator for indoor collector testing. *Applied Energy*, 21, 43-54.
19. Alkilani, M. M., Sopian, K., Mat, S. and Alghoul, M. A. (2009). Output air temperature prediction in a solar air heater integrated with phase change material. *European Journal of Scientific Research*, 27(3), 334-341.
20. Alkilani, M. M., Sopian, K., Alghoul M. A. and Mat, S. (2009). Using paraffin wax-aluminum compound as a thermal storage material in a solar air heater. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(10), 74-77.
21. Li, Y., Liu, S. and Shukla, A. (2016). Experimental analysis on use of thermal conductivity enhancers (TCEs) for solar chimney applications with energy storage layer. *Energy and Buildings*, 116, 35-44.
22. Holman, J. P. *Isı transferi* (Çev. İ. Horuz). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Ticaret Limited Şirketi. (Eserin orijinali 2010'da yayımlandı), 347-351.
23. Zeng, Y. (2015). *Thermal energy storage with encapsulated phase change materials for high temperature applications* (Doctoral dissertation, Lehigh University, 2015). Dissertation Abstracts International, 1698.
24. Yatağanbaba, A. (2013). *Tuz hidrat ve parafinlerin gözenekli ortamlarda ısı depolama davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 1-28.
25. Avcı, M. and Yazıcı, Y. (2013). Experimental study of thermal energy storage characteristics of a paraffin in horizontal tube-in-shell storage unit. *Energy Conversion and Management*, 73, 271-277.

26. Hosseini, A. J., Rahimi, M. and Bahrampoury, R. (2015). Thermal analysis of PCM containing heat exchanger enhanced with normal annular fins. *Mechanical Sciences*, 6, 221-234.
27. Vadwala, P. H. (2011). *Thermal energy storage in copper foams filled with paraffin wax*. Master's Thesis, University of Toronto, Canada 1-8.
28. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. and Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
29. Patel, J. H., Darji, P. H. and Qureshi, M. N. (2017). Phase change material with thermal energy storage system and its applications: A systematic review. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(13), 1-10.
30. Kumar, A. and Shukla, S. K. (2015). A review on thermal energy storage unit for solar thermal power plant application. *Energy Procedia*, 74, 462-469.
31. Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*, 30(4), 313-332.
32. Öztürk, H. H. (2008). *Isı Depolama Tekniği*. (Birinci baskı). Ankara: Teknik Yayınevi-Mühendislik, Mimarlık Yayınları, 42-81.
33. Bahadori, M. N. and Sayigh, A. A. M. (1979). Solar thermal energy storage systems. Sayigh, A. A. M. (Ed.). *Solar energy application in buildings*. New York: Academic Press Incorporation, 97-98.
34. Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metsekaar, H. S. C. and Sandaran, S.C. (2015). Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193-228.
35. Raam Dheep, G. and Sreekumar, A. (2014). Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials-A review. *Energy Conversion and Management*, 83, 133-148.
36. Tian, Y. (2012). *Heat transfer enhancement in phase change materials (pcms) by metal foams and cascaded thermal energy storage*, Doctoral Thesis, University of Warwick, United Kingdom, 1-15.
37. Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Kumar, A. and Jain, A. (2016). Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 86-99.
38. Alva, G., Liu, L., Huang, X. and Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.

39. Pielichowska, K. and Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67–123.
40. Lane, G. A. (1983). *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume I*. (First edition). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Inc., 41-57.
41. Lane, G. A. (1986). *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume II*. (First edition). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Inc., 1-79.
42. Bruno, F., Belusko, M., Liu, M. and Tay, N. H. S. (2015). Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems. L. F. Cabeza (Ed.), *Advances in thermal energy storage systems*. Cambridge, United Kingdom: Elsevier Ltd., 201-204.
43. Mehling, H. and Cabeza, L.F. (2008) *Heat and Cold Storage with PCM: An Up To Date Introduction into Basics and Applications*, New York: Springer, 20-25.
44. Bashar, M. A. (2016). *Experimental investigation of the melting behavior and the transient heat transfer in a phase change material (PCM)* (Doctoral dissertation, The University of Western Ontario, 2016). Dissertation Abstracts International, 3719.
45. Paria, S., Baradaran, S., Amiri, A., Sarhan, A. A. D. and Kazi, S. N. (2016). Performance evaluation of latent heat energy storage in horizontal shell and finned tube for solar application. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123, 1371-1381.
46. Paksoy, H. Ö. (Editör). (2007). *Thermal energy storage for sustainable energy consumption: Fundamentals, case studies and design*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 257-277.
47. Simonei, A. (2015). *Modelling, design and analysis of innovative thermal energy storage systems using PCM for industrial processes, heat and power generation*. Doctoral Thesis, Università degli Studi di Cagliari, Cagliari, Italy, 8-29.
48. Cunha, J. R. and Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials-A review. *Applied Energy*, 177, 227-238.
49. Akçaoğlu, E., Arıcı, M. ve Ögüt, E. B. (2012). Bölmeli bir kare kapalı ortam içindeki nanoakışkanın doğal konveksiyonla ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 359-366.
50. İnternet: AGS Parafin. P-1/S Teknik Özellikleri. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ags.com.tr%2Furunleri.miz.aspx&date=2017-05-26>. Son Erişim Tarihi: 26.05.2017.
51. İnternet: Rubitherm Technologies GmbH. RT 50 Data Sheet. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.rubitherm.eu%2Fmedia%2Fproducts%2Fdatasheets%2FTechdata_-RT50_EN_31052016.PDF&date=2017-07-05. Son Erişim Tarihi: 05.07.2017.

52. Agarwal, A. and Sarviyaa, R. M. (2017). Characterization of commercial grade paraffin wax as latent heat storage material for solar dryers. *Materials Today: Proceedings*, 4, 779–789.
53. İnternet: Köpük Strafor. Strafor Teknik Özellikleri. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fkopukstrafor.com%2Fstrafor-teknik-ozellikleri&date=2017-05-19>, Son Erişim Tarihi: 19.05.2017.
54. İnternet: KIMO Instruments. KIMO SL-100 Data Sheet. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kimo.fr%2Fassets%2Fdocs%2Fportables2014%2Fportables2014_en.pdf&date=2017-07-05, Son Erişim Tarihi: 05.07.2017.
55. Akhilesh, R., Narasimhan, A. and Balaji, C. (2005). Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2759-2770.
56. Atkin, P. and Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217-228.
57. İnternet: Energy Education. Thermal Power. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fenergyeducation.ca%2Fencyclopedia%2FThermal_power&date=2017-07-05, Son Erişim Tarihi: 05.07.2017.
58. Genceli, O. F. (2012). *Ölçme Tekniği (Boyut, Basınç, Akış ve Sıcaklık Ölçmeleri)* (Beşinci baskı). İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 21-23.
59. Kline, S. J. and McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3-8.
60. Arshad, A., Ali, H. M., Ali, M. And Manzoor, S. (2017). Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics device: Effect of pin thickness and PCM volume fraction. *Applied Thermal Engineering*, 112, 143-155.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CANLI, Mehmet Emin
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.02.1990, Ödemiş
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 202 89 58
 0554 289 08 88
 e-mail : m.emin.canli@gazi.edu.tr
 m.emin.canli@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2013
Ön Lisans	Anadolu Üniversitesi / Dış Ticaret	2016
Lise	Hulusi Uçaçelik Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2014-2015	Artvin Çoruh Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013-2014	Hidroşec Hidrolik İş Makineleri Ltd. Şti.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Acır, A., Canlı, M. E., Ata, İ. and Çakıroğlu, R. (2017). Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis. *Applied Thermal Engineering*, 122, 330–338.

2. Acır, A., Ata, İ. and Canlı, M. E. (2016). Investigation of effect of the circular ring turbulators on heat transfer augmentation and fluid flow characteristic of solar air heater. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77, 45–54.
3. Canlı, M. E. and Acır, A. Experimental investigation of heat storage behaviour in a phase change material under solar radiation. *5th International Conference on Advanced Technology & Sciences*, May 09-12 2017, İstanbul.
4. Canlı, M. E., Ata, İ. and Acır A. Experimental and numerical analysis of a solar air heater. *8th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, May 11-13 2016, Afyonkarahisar.
5. Acır, A., Canlı, M. E. and Taş, S., Finite element analysis of the temperature distribution in nuclear fuel rod. *8th International Ege Energy Symposium*, May 11-13 2016, Afyonkarahisar.

Hobiler

Seyahat, Film izleme, Yürüyüş



GAZİ GELECEKTİR..