



**TERMOELEKTRİK JENERATÖR İLE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ BİR
TERMAL ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTESİNİN GÜNEŞ IŞINIMI ALTINDA
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Oğuz Kaan ÇİNİCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

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.

Oğuz Kaan ÇİNİCİ

29/06/2022

TERMoeLEKTRİK JENERATÖR İLE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ BİR TERMAL ENERJİ
DEPOLAMA ÜNİTESİNİN GÜNEŞ IŞINIMI ALTINDA DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuz Kaan ÇİNİCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında termoelektrik jeneratör (TEJ) ile bütünleştirilmiş bir faz değıştiren malzeme (FDM) tabanlı termal enerji depolama ünitesi (TEDÜ) yapay güneş ışıınımlı altında deneysel olarak incelenmiştir. Deney kapsamında bakır malzemeden 15x15x5 cm boyutlarında bir TEDÜ tasarlanmıştır. TEDÜ üzerine birbirine seri bağlanmış dokuz adet TEJ montajı yapılarak bütünleşik bir TEJ/TEDÜ tasarlanmıştır. Tasarımda TEDÜ içerisinde FDM olarak farklı termofiziksel özelliklere sahip iki tip parafin ve farklı güç değerlerine sahip iki model TEJ kullanılmıştır. TEC1-12706/P1, TEC1-12706/P2, TEC1-12710/P1 ve TEC1-127010/P2 olmak üzere farklı parametrelere sahip dört ayrı TEJ/TEDÜ tasarımı yapılmıştır. Her tasarımın 800, 1000 ve 1200 W/m² ışıınımlı şiddetleri altında şarj-deşarj süreçleri incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, kullanılan TEJ'in gücü arttıkça, parafinin erime süresinin kısaldığı ve termal enerji depolama verimi (TEDV) ile enerji dönüştürme verimlerinin (EDV) ise arttığı görülmüştür. Ayrıca ışıınımlı şiddetinin artmasıyla erime süresinin düştüğü, TEDV'nin ve EDV'nin arttığı tespit edilmiştir. En kısa erime süresi 135 dakika, en yüksek TEDV'i %80,72 ve en yüksek EDV'i %2,32 ile 1200 W/m² ışıınımlı altındaki TEC1-12710/P2 tasarımından elde edilirken en uzun erime süresi 240 dakika, en düşük TEDV'i %64,62 ve en düşük EDV'i %2,04 ile 800 W/m² ışıınımlı altındaki TEC1-12706/P1 tasarımından elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 92802

Anahtar Kelimeler : Güneş enerjisi depolama, faz değıştiren malzeme, termoelektrik jeneratör

Sayfa Adedi : 109

Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A THERMAL ENERGY STORAGE UNIT
INTEGRATED WITH THERMOELECTRIC GENERATOR UNDER SOLAR
RADIATION

(M. Sc. Thesis)

Oğuz Kaan ÇİNİCİ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

In this thesis, a phase change material (PCM) based thermal energy storage unit (TESU) integrated with thermoelectric generator (TEG) was experimentally investigated under artificial solar radiation. Within the scope of the experiment, a TESU with the dimensions of 15x15x5 cm was designed from copper. An integrated TEG/TESU was designed by assembling nine TEGs connected in series on the TESU. In the design, two types of paraffin with different thermophysical properties values as PCM in TESU and two models of TEGs with different power were used. Four different TEJ/TEDU designs with different parameters were made, namely TEC1-12706/P1, TEC1-12706/P2, TEC1-12710/P1 and TEC1-12710/P2. Charge-discharge processes of each design were investigated under radiation intensities of 800, 1000 and 1200 W/m². According to the results of the experiment, it was observed that as the power of the TEG used increased, the melting time of the paraffin was shortened, the thermal energy storage efficiency (TESE) and energy conversion efficiency (ECE) increased. In addition, it was determined that the melting time decreased and the TESE and ECE increased with the increase of the radiation intensity. The shortest melting time of 135 minutes, the highest TESE of 80,72% and the highest ECE of 2,32% were obtained from the TEC1-12710/P2 design under 1200 W/m² radiation. The longest melting time of 240 minutes, the lowest TESE of 64,62% and the lowest ECE of 2,04% were obtained from the TEC1-12706/P1 design under 800 W/m² radiation.

Science Code : 92802

Key Words : Solar energy storage, phase change material, thermoelectric generator

Page Number : 109

Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında, konu belirleme aşamasından itibaren tüm süreçlerinde çalışmalarına yön veren, tecrübelerini esirgemeyen ve karşılaştığım sorunlarda bilgi birikimiyle bana rehberlik eden danışmanım Sayın Prof. Dr. Adem ACIR' a, teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince sorularımı her zaman içtenlikle cevaplayan Doç. Dr. Ahmet AKTAŞ' a ve araştırma görevlisi olarak mesleğe adım attığım ilk günden beri yardımlarını esirgemeyen Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde büyük emeği olan aileme ve her zaman yanımda olup beni destekleyen sevgili eşim Eda Nur ÇİNİCİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde maddi imkan sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
3. ENERJİ DEPOLAMA	13
3.1. Enerji Depolama Yöntemleri	13
3.1.1. Elektriksel enerji depolama	13
3.1.2. Manyetik enerji depolama	14
3.1.3. Kimyasal enerji depolama	14
3.1.4. Mekanik enerji depolama	15
3.1.5. Termal enerji depolama	15
4. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM)	23
4.1. FDM'lerin Sınıflandırılması	23
4.1.1. Organik FDM'ler	25
4.1.2. İnorganik FDM'ler	30
4.1.3. Ötektik FDM'ler	35
5. TERMOELEKTRİK	39

Sayfa

5.1. Termoelektrik Etkiler	39
5.1.1. Seebeck etkisi	39
5.1.2. Peltier etkisi	40
5.1.3. Thomson etkisi	41
5.1.4. Joule etkisi	42
5.2. Termoelektrik Jeneratörler (TEJ)	43
5.2.1. TEJ performansını etkileyen faktörler	46
5.2.2. Performans katsayısı (ZT) ve TEJ malzemeleri.....	46
5.2.3. TEJ enerji dönüşüm denklemleri	47
6. MATERYAL – METOT	51
6.1. Materyal	51
6.1.1. TEDÜ	53
6.1.2. Yapay güneş ışınlam kaynağı ve kontrollü	58
6.1.3. TEJ ve yük	60
6.1.4. Veri kayıt sistemi	63
6.2. Metot	65
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	69
7.1. Bulgular	69
7.1.1. Zamana bağlı sıcaklık dağılımı	69
7.1.2. Deney parametrelerinin erime süresine etkisi	77
7.1.3. Deney parametrelerinin termal enerji depolama miktarına ve termal enerji depolama verimine (TEDV) etkisi	78
7.1.4. Termal kamera ile zamana bağlı sıcaklık değişimini gözlemleme	80
7.1.5. Zamana bağlı V_{OC} ve I_{SC} değişimi	83

	Sayfa
7.1.6. TEJ/TEDÜ tasarımlarının I-V ve P-V eğrileri	89
7.1.7. Deney parametrelerinin TEJ güç üretim miktarına ve enerji dönüşüm verimine (EDV) etkisi	96
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
8.1. Sonuçlar	99
8.2. Öneriler	100
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Faklı TED sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması	16
Çizelge 3.2. DID katı malzemelerinin özellikleri	19
Çizelge 3.3. DID sıvı malzemelerin özellikleri	19
Çizelge 4.1. FDM olarak kullanılan bazı parafinlerin karbon atom sayısına göre termofiziksel özellikleri	27
Çizelge 4.2. FDM olarak kullanılan bazı yağ asitlerinin karbon atom sayılarına göre termofiziksel özellikleri	28
Çizelge 4.3. FDM olarak kullanılan bazı esterlerin termofiziksel özellikleri	29
Çizelge 4.4. FDM olarak kullanılan bazı glikollerin termofiziksel özellikleri	30
Çizelge 4.5. FDM olarak kullanılan bazı alkollerin termofiziksel özellikleri	30
Çizelge 4.6. FDM olarak kullanılan bazı tuz hidratların termofiziksel özellikleri	32
Çizelge 4.7. FDM olarak kullanılan bazı bileşimlerinin termofiziksel özellikleri	33
Çizelge 4.8. FDM olarak kullanılan bazı metalik alaşımların termofiziksel özellikleri	34
Çizelge 4.9. FDM olarak kullanılan bazı ötektik malzemelerin termofiziksel özellikleri	36
Çizelge 5.1. Bazı malzemelerin termoelektrik özellikleri	47
Çizelge 6.1. Deney düzeneğinde kullanılan materyallerin açıklamaları	52
Çizelge 6.2. TEDÜ tasarımında kullanılan bakır malzemenin termo fiziksel özellikleri	54
Çizelge 6.3. P1 ve P2'nin bazı termofiziksel özellikleri	55
Çizelge 6.4. TEC1-12706 ve TEC1-12710 TEJ'lerin bazı elektriksel - mekanik özellikleri	61
Çizelge 6.5. Tez çalışma kapsamında yapılan deneyler	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Toplam birincil enerji talebi ve enerjiyle ilgili CO ₂ emisyonlarının değişimi	1
Şekil 1.2. Kaynaklara göre türkiye'deki kurulu güç oranları-mart	3
Şekil 3.1. Enerji depolama yöntemleri	13
Şekil 3.2. Bir FDM'in faz değişimi sırasındaki sıcaklık davranışı	20
Şekil 4.1. FDM'lerin Sınıflandırılması	25
Şekil 5.1. Tipik bir TEM	39
Şekil 5.2. Peltier ve seebeck etkisi	41
Şekil 5.3. Thomson etkisi	42
Şekil 5.4. Tipik TEJ ve eşdeğer elektrik devresi	43
Şekil 5.5. TEJ elektrik eşdeğer devresi ve yük direncinin bir fonksiyonu olarak tipik akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri	45
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	51
Şekil 6.2. P1 DSC eğrisi	57
Şekil 6.3. P2 DSC eğrisi	58
Şekil 6.4. Termokupların yerleşimi	63
Şekil 7.1. TEC1-12706/P1 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	70
Şekil 7.2. TEC1-12706/P2 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	72
Şekil 7.3. TEC1-12710/P2 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	74
Şekil 7.4. TEC1-12710/P1 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	76
Şekil 7.5. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışıınım şiddetiyle Parafin erime süresinin değişimim karşılaştırılması ..	77
Şekil 7.6. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışıınım şiddetiyle toplam depolanan enerji miktarının karşılaştırılması .	78

Şekil	Sayfa
Şekil 7.7. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışınlm şiddetiyle TEDV'lerinin karşılaştırılması	79
Şekil 7.8. TEC1-12706/P1 tasarımı için zamana bağılı V_{OC} ve I_{sc} a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	84
Şekil 7.9. TEC1-12706/P2 tasarımı için zamana bağılı V_{oc} ve I_{sc} a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	86
Şekil 7.10. TEC1-12710/P1 tasarımı için zamana bağılı V_{oc} ve I_{sc} a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	87
Şekil 7.11. TEC1-12710/P1 tasarımı için zamana bağılı V_{oc} ve I_{sc} a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	89
Şekil 7.12. TEC1-12706/P1 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	91
Şekil 7.13. TEC1-12706/P2 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	92
Şekil 7.14. TEC1-12710/P2 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	94
Şekil 7.15. TEC1-12710/P1 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m ² , b)1000 W/m ² , c)1200 W/m ²	95
Şekil 7.16. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışınlm şiddetiyle TEJ'ler tarafından üretilen güç miktarının karşılaştırılması	96
Şekil 7.17. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışınlm şiddetiyle EDV'lerinin karşılaştırılması	97

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Deney düzeneğinin gerçek görüntüsü	52
Resim 6.2. TEDÜ	53
Resim 6.3. Mat siyaha boyanmış emici yüzey	54
Resim 6.4. Alüminyum soğutucu plakaların montajı yapılmış TEDÜ	54
Resim 6.5. a) Parafin-1 (P1), b) Parafin-2 (P2)	55
Resim 6.6. Goldenfer marka 500W-240 V-E27 model kızılötesi lamba	59
Resim 6.7. Kimo marka SL-100 model solarimetre	59
Resim 6.8. Dimmer	60
Resim 6.9. a) TEC1-1207 ve b) TEC1-12710	60
Resim 6.10. TEJ montajı tamamlanmış TEDÜ	61
Resim 6.11. Seri bağlanmış reostalar	62
Resim 6.12. Multimetre	62
Resim 6.13. Elimko marka k-tipi termokupl	63
Resim 6.14. 16 Kanallı veri kayıt cihazı	64
Resim 6.15. Acer marka masaüstü bilgisayar	64
Resim 6.16. Elimko Emanager program ara yüzü	65
Resim 7.1. Şarj süreci termal kamera görüntüleri (0-45 dk)	80
Resim 7.2. Şarj süreci termal kamera görüntüleri (60-135 dk)	81
Resim 7.3. Deşarj süreci termal kamera görüntüleri (0-90 dk)	82
Resim 7.4. Deşarj süreci termal kamera görüntüleri (90-210 dk.)	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Q	Enerji miktarı, (kJ)
m	Kütle, (kg)
ΔH	Entalpi değişimi, (kJ)
c_p	Özgül ısı kapasitesi, (kJ/kg°C)
ΔT	Sıcaklık farkı, (°C)
T_f	Enerji depolama işlemi sonundaki sıcaklık, (°C)
T_i	Enerji depolama malzemesini ilk sıcaklığı, (°C)
T_m	Depolama malzemesinin erime sıcaklığı, (°C)
a_m	Erimiş malzeme kesri
a	Seebeck katsayısı, (V/°C)
π	Peltier sabiti, (kJ/A)
τ	Thomson katsayısına, (kJ/A°C)
N	Yarıiletken çift sayısı
ρ	Elektriksel öz direnç, (Ω .cm)
L	Uzunluk, (m)
S	Kesit alanı, (m ²)
P	Güç, (W)
η	Verim
T_c	Soğuk yüzey sıcaklığı, (°C)
T_h	Sıcak yüzey sıcaklığı, (°C)
V_{max}	Maksimum gerilim, (V)
I_{max}	Maksimum akım, (A)
P_{max}	Maksimum güç, (W)
V_{oc}	Açık devre gerilimi, (V)
I_{sc}	Kısa devre akımı, (A)
$R_{iç}$	İç direnç, (Ω)

Simgeler**Açıklamalar****R_L**Yük direnci, (Ω)**k_{th}**

Isı transfer katsayısı, (W/mK)

Kısaltmalar**Açıklamalar****TEJ**

Termoelektrik jeneratör

FDM

Faz değıştiren malzeme

TEDÜ

Termal enerji depolama ünitesi

TEJ/TEDÜ

Termoelektrik ile bütünleştirilmiş termal enerji depolama ünitesi

TEDV

Termal enerji depolama verimi

EDV

Enerji dönüştürme verim

PCM

Phase change material

TESU

Thermal energy storage unit

TEG

Thermoelectric generator

TESE

Thermal energy storage efficiencies

ECE

Energy conversion efficiencies

BP

British Petroleum

TEİAŞ

Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

UEA

Uluslararası enerji ajansı

TED

Termal enerji depolama

OFDM

Organik faz değıştiren malzeme

FV

Fotovoltaik

DID

Duyulur ısı depolama

GID

Gizli ısı depolama

TKD

Termo-kimyasal depolama

PEG

Polietilen glikol

TEM

Termoelektrik modül

MPPT

Maksimum güç noktası izlemeli

ZT

Performans katsayısı

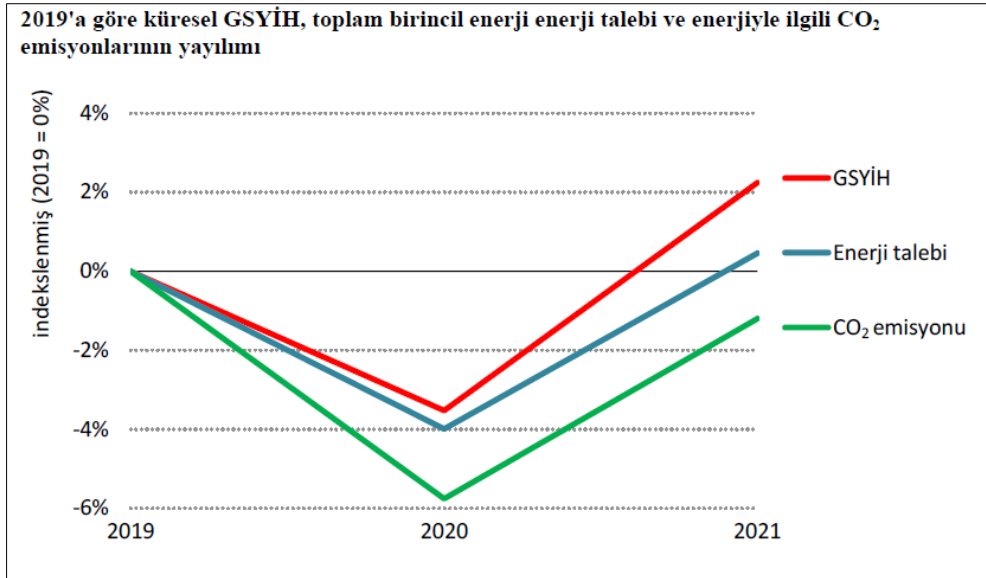
DSC

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusuyla birlikte enerji ihtiyacı da artmaktadır. BP 2021 dünya enerji istatistikleri raporuna göre 2020 yılında başlayan Covid-19 salgını dönemine kadar artan enerji talebinde salgının başlangıcıyla birlikte küresel enerji piyasalarında %4,5'luk olağan dışı bir düşüş yaşandığı görülmüştür. Bu düşüş 1945 yılında II. Dünya Savaşından beri yaşanan en büyük düşüş oranı olmuştur [1]. Aşırı ile normalleşme sürenin başlamasıyla enerji talebi de artmaya başlamıştır ancak enerji piyasalarındaki arz-talep dengesizliğinden dolayı enerji kaynakları fiyatlarında yüksek oranda artışlar meydana gelmiştir. Brent Petrol fiyatı Covid-19 küresel salgın sürecinde azalırken salgın sonrasında ise hızlı bir artış göstermiştir. Bu fiyat artışı ile 2014'ten beri görülen en yüksek fiyat seviyelerindedir [2].

Uluslararası enerji ajansının yayımlanmış olduğu 2021-Küresel Enerji Raporuna göre Covid-19 salgını ile düşen enerji talebi salgın öncesi seviyelerinin %0,5 oranında üzerine çıkması tahmin edilmektedir. Şekil 1.1'de görüleceği üzere artan enerji talebi ile CO₂ emisyon oranı da yükselmektedir [3]. Atmosfere salınan sera gazlarının yaklaşık %35'ine enerji santralleri sebep olmaktadır [4].



Şekil 1.1. Toplam birincil enerji talebi ve enerjiyle ilgili CO₂ emisyonlarının değişimi [3]

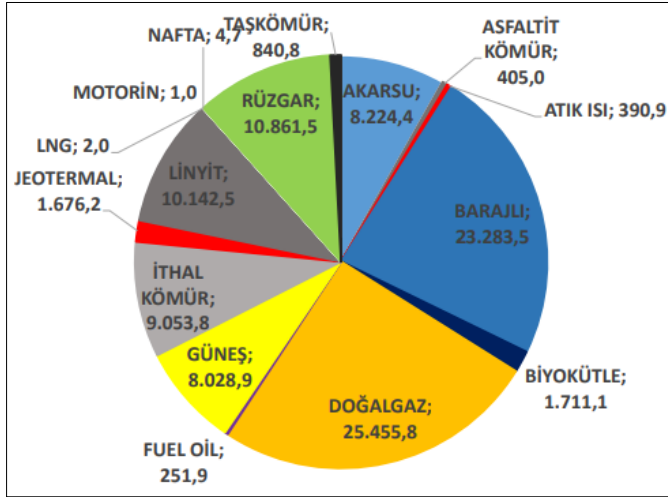
Havadaki CO₂ oranının artması sera etkisi ve iklim değişikliğinin birincil sebebidir. Küresel ısınma etkilerini azaltmak amacıyla 2015 Paris İklim zirvesine 195 ülke katılmıştır ve

lkeler bu anlaşma ile net sıfır emisyon hedeflerini ilan etmişlerdir. 2021 Enerji Dönüşüm Raporuna göre dünyada 2050 yılına kadar enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının %45 daha düşük olması bekleniyor [5].

Öte yandan fosil yakıtların enerji arzındaki payı hızlı bir şekilde azalmaktadır. 2021 Enerji Dönüşüm Raporuna göre 2050’de bu pay %50 oranlarına kadar düşeceği tahmin ediliyor [5]. Ayrıca bu yakıt rezervleri gün geçtikçe azalmaktadır. Sharfee ve Toplan’ın yapmış olduğu araştırmada klass modeli kullanılarak petrol, kömür ve gaz için sırasıyla yaklaşık 35,107 ve 37 yıllık fosil yakıt rezerv tükenme sürelerini hesaplamışlardır [6]. Bu da 2042’den sonra sadece kömür rezervlerinin kalacağını ve bu rezervlerin de 2112’ye kadar süreceği anlamına gelmektedir.

Paris İklım Anlaşması sonrası ülkelerin rüzgar, hidroelektrik, jeotermal ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ayırdıkları bütçeler artmaktadır ve buna bağlı olarak da elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı hızla artmaktadır [7]. Küresel elektrik üretiminde yenilebilir enerji santrallerinin payı %11,7’ye yükselirken bu payda güneş enerjisi %20’lik rekor bir artış göstermiştir [1].

Türkiye Elektrik İletim A.ř. (TEİAş)’ın yayınlamış olduğu 2022 Mart Kuru G Raporuna göre toplam 10.631 santral ile Türkiye’deki kuru güç 100.334 MW seviyelerine ulaşmıştır. Kaynaklara göre toplam kurulu güçte 25.455 MW’lık g ile ilk sırada Doğalgaz bulunurken onu 23.283 MW ile barajlar takip etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile toplam kurulu gcn yaklaşık %54’n oluşturmaktadır. 2021 Mart’a göre bir yıl içerisinde 966 yeni santral devreye girerek 3.265 MW gcnde bir artış olmuştur. 2021 Mart ayında kurulu gcn %7,17’ini güneş enerji santralleri oluştururken mevcut kurulu gteki bu oran %8 oranlarına çıkmıştır [8].



Şekil 1.2. Kaynaklara göre türkiye'deki kurulu güç oranları-mart 2022 [8]

Kurulu güç oranının hızla arttığı fotovoltaik sistemlerin enerji kaynağı güneştir. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon olayı ile meydana gelen ve dünyamıza ışınlam ile ulaşan bir enerjidir. Güneşten dünyaya gelen enerjinin $1,7 \times 10^{11}$ MW olduğu bilinmektedir. Bu enerjinin üçte biri atmosferden geri yansırken kalan kısmı ise yeryüzüne düşmektedir. Ancak insanlar bu enerjinin çok küçük bir kısmını kullanabilmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi termal sistemler ve fotovoltaik sistemler olmak üzere iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Fotovoltaik sistemler en bilinen güneş enerji santralleridir. Parabolik oluk kollektörlü güç santralleri, Parabolik çanak kollektörlü güç santralleri, merkezi alıcılı güç santralleri ve güneş bacaları ise en yaygın olan güneş ısıll güç santralleridir. Bu teknolojilere ek olarak güneş enerjisinden faydalanılarak Termoelektrik Jeneratörlerle (TEJ) elektrik üretimi yapılabilmektedir.

Soğutma sistemlerinde kullanılan TEJ'ler son zamanlarda özellikle atık ısıdan faydalanarak alternatif elektrik üretim sistemleri olarak kullanılmaktadır [9-11]. TEJ'ler Seebeck etkisi ile termal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme özelliğine sahiptirler. Hareketli parçalarının olmaması, sessiz çalışabilmeleri, güvenilir ve uzun ömürlü olmaları gibi birçok avantajından dolayı termoelektrik sistemler son yıllarda yeşil enerji üretimi için diğer teknolojiler arasında umut verici bir alternatif olmaktadır [9,11].

Yenilenebilir enerji kaynakların birçok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlardan en önemlisi yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli kaynaklar olmaması. Kesintili enerji kaynakları elektrik şebekesinin kararlılığını ve güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu dezavantajı giderebilmek için enerji depolama yöntemleri geliştirilmektedir. Uygulamada en çok kullanılan yöntemlerin başında kimyasal, elektrik, mekanik ve ısı enerjisi depolama yöntemleri gelmektedir [12].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanarak ihtiyaç duyulduğu zaman şebekeye enerji verilmesi sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini arttıracaktır. Enerji depolama teknolojisinin gelişmesi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı daha çok yaygınlaşacaktır. UEA, 2026 yılına kadar küresel enerji depolama kapasitesinin 270 GW seviyelerine kadar çıkmasını bekliyor [7]. Bu oran 2022 yılı mevcut küresel kurulu gücün yaklaşık %5'ini kapsamaktadır.

Güneş enerjisinin depolanma çalışmalarında termal enerji depolama (TED) teknikleri son zamanlarda dikkat çekmektedir [13-17]. TED, depolanan enerjiyi ihtiyaç halinde kullanabilmek için termal enerji depolama ünitesini (TEDÜ) ısıtılarak veya soğutarak ısının bir süre depolanmasıdır. TED günümüzde elektrik üretimi, soğuk zincir tedariki, ısıtma-soğutma gibi çeşitli alanlarda test edilmiştir ve kullanılmaya başlamıştır. Özellikle güneş ve rüzgar gibi sürekli olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını optimize eder. Bu sayede TED teknolojileri mevsimsel enerji talebinin dengelemesine katkı sağlar ve yenilenebilir enerji sistemlerine geçişi destekler [18].

Termal enerji depolama, gizli ısı ve duyulur ısı formunda olmak üzere iki farklı teknikle yapılabilmektedir [19-22]. Duyulur ısı, hal değişimi olmadan maddenin sıcaklığının artması veya azalması sırasındaki gerekli olan ısıdır. Gizli ısı ise maddenin hal değişimi sırasında sıcaklık ve basınç değişmeden aldığı veya verdiği ısıdır.

Gizili ve duyulur ısı formunda enerji depolayabilmek için depolama malzemelerine ihtiyaç duyulur. Birim kütle başına gizli ısı kapasitesi duyulur ısı kapasitesine göre daha fazladır. En yaygın kullanılan termal enerji depolama malzemesi su iken Gizli ısı depolama (GID) amacıyla kullanılan faz değiştiren malzemeler (FDM) son zamanlarda popüler olmuşlardır [13,16,17,23,26].

FDM'ler faz değişimi sırasında gizli formdaki ısıyı uzun süre depolayabilme özelliklerine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı TED sistemlerinde kullanımı yaygınlaşmıştır. FDM'ler organik ve inorganik olarak iki farklı türe ayrılmaktadır. Kimyasal olarak kararlı olmaları, ucuz olmaları ve uzun ömürlü olmalarından dolayı TED sistemlerinde en çok kullanılan FDM türleri C_nH_{2n+2} kimyasal formülüne sahip organik alkanlardır [27]. Alkanlar grubunda yer alan $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ zincir formunda oluşan parafinler ticari olarak TED sistemlerinde kullanılan en yaygın FDM'dir [28].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür detaylı incelediğinde güneş enerjisinin ısıl formda depolanması duyulur ve gizli olmak üzere iki farklı teknikle ele alınmaktadır. Bilim insanları çalışmalarda daha çok erime süresi, konumsal sıcaklık dağılımları, enerji verimliliği ve depolanan enerji miktarı gibi performans göstergeleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu konulara ek olarak, ekserji analizleri veya termodinamiğin 2. yasa analizleri ile TEDÜ içinde depolanan termal enerjinin hem kapasitesi hem de kalitesi gibi konularda da çalışılmaktadır [29]. Literatürde güneş enerjisinin ısıl formda depolanması üzerine nümerik ve deneysel birçok çalışma bulunmaktadır.

Dinesh ve diğerleri, ticari olarak kullanılan organik faz değiştiren malzeme (OFDM) entegre edilmiş bir hava ısıtıcı güneş kolektörünün performansı incelemek amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Deneyler hava debisi sabit 0,18 kg/s'de, şubat ayında iki özdeş güneş kolektörü ile aynı konumda ve eş zamanlı gerçekleştirilmiştir. Araştırma ile OFDM kullanımının güneş kolektörünün günlük enerji verimliliğini %11,25 arttırdığı sonucuna varmışlardır [30].

Cabeza ve diğerleri, FDM'lerin gerçek bir sistemde kullanımını analiz edebilmek için Lleida Üniversitesinde güneş kolektörlerinin ve su tanklarının olduğu bir deneysel sistem kurmuştur. Özdeş iki farklı kolektörde sürekli çalışabilmesi için güneşin olmadığı zamanlarda çalışabilecek bir elektrikli ısıtıcı bağlanmıştır. İki kolektör arasındaki tek fark birine içerisinde FDM olan TEDÜ'lerin eklenmesiydi. TEDÜ'ler iki, dört ve altı adet olmak üzere farklı deneyler yapılmış ve depo içerisine bir TEDÜ dahil edilmesinin bile uzun süre sıcak su elde edilebileceğine ve bunun umut verici bir teknoloji olduğu sonucunda varmıştır [31].

Acır ve Canlı, yapay bir güneş radyasyonu altında FDM'in erime süresi için kanatçık kullanımının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı kanatçık kalınlıkları ve farklı kanatçık sayılarına sahip TEDÜ'ler tasarlamış ve bu TEDÜ'ler içerisindeki FDM'in erime süreleri farklı güneş ışıınım şiddetleri altında incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda FDM erime süresi iyileştirme oranının kanat sayısı ile doğru orantılı, kanat kalınlığı ile ters orantılı olduğu sonucuna varmışlardır [17].

Mettawee ve Assassa, FDM olarak kullanılan parafin mumu ile gizli ısı depolamaya dayalı geliştirilmiş bir güneş kolektörünün performansını deneysel olarak incelemiştir. Kolektörde güneş enerjisini absorbe ederken aynı zamanda parafin mumunda ısıyı depolamışlardır ve depolanan ısıyı su ısıtmak için kullanmışlardır. Kolektörden geçen suyun debisi değiştirerek farklı deneyler yapmışlar. Deneylerde şarj ve deşarj süresince FDM'in zamana göre sıcaklıkları termokupllarla ölçülerek kaydedilmiştir ve ısı yayılım incelenmiştir. Ayrıca şarj işlemindeki ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda şarj süresince erimiş kısmın kalınlığının artmasıyla ortalama ısı transfer katsayısının da arttığını, deşarj sürecinde ise kolektörden geçirilen suyun debisi arttıkça kazanılan ısı miktarının da arttığını gözlemlemişlerdir [32].

Palacio ve diğerleri, geleneksel düz plakalı güneş kolektörünün ve FDM ile entegre edilmiş düz plakalı güneş kolektörünün karşılaştırmalı analizini yapmıştır. İki özdeş kolektörün ısı performansları nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Her iki kolektörü de aynı ortam koşullarında eş zamanlı olarak çalıştırmış ve analiz etmişlerdir. Deneylerde gece FDM'li kolektördeki suyun çıkış sıcaklığının 2 °C arttığını enerji miktarının da saatte 630 W arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda FDM entegre edilerek termal enerji depolamalı bir güneş kolektörünün performansı üzerinde ciddi bir etkisi olduğunu göstermişlerdir [33].

Acir ve diğerleri, yapay bir güneş radyasyonu altında FDM'in termal enerji depolama kapasitesinin kanatçık kullanımının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı kanatçık kalınlıkları ve farklı kanatçık sayılarına sahip TEDÜ'ler tasarlanmış ve bu TEDÜ'lerde termal enerji depolama verimlilikleri farklı güneş ışıyım şiddetleri altında incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda termal enerji verimliliğinin kanat sayısı ile doğru orantılı, kanat kalınlığı ile ters orantılı olduğu sonucuna varmışlardır [34].

Hamed ve diğerleri, FDM entegreli bir güneş enerjili su ısıtıcının performansını değerlendirmek amacıyla matematiksel bir modelleme yapmışlar. Sistemin davranışlarını termodinamiğin birinci yasasına dayanarak maksimum çıkış sıcaklığı sağlamaya yönelik farklı giriş suyu sıcaklığı, su debisi, FDM kalınlığı ve özelliklerini değiştirerek hesaplamalar yapmışlardır. Araştırma sonucunda FDM ile gizli ısı depolama yapılan ısıtıcının geleneksel ısıtıcıya göre gece çalışma gereksinimlerini sağladığını ve en iyi

sonuçların en yüksek girişli su sıcaklığında, kullanılan en kalın FDM’de ve en düşük su debisinde elde edildiğini gözlemlemiştir [35].

Benli ve Durmuş, Elâzığ’da bir sera uygulamasında 10 adet güneş hava kolektörlerinden gelen ısı enerjisi depolamak amacıyla silindirik bir tankta 300 kg’lık kalsiyum klörür heksahidrat kullanılmışlardır. FDM depolama tankı ve sera arasındaki hava akışını kontrol etmek için iki adet diferansiyel termostat ve santrifüj fan kullanmışlardır. FDM tarafından depolanan ısı ortalama 3-4 saat boyunca seranın bir günlük enerji ihtiyacının %23’ünü karşılayabilmiş ve tasarlanan sistem ile sera içindeki sıcaklığı geleneksel seralara göre 6-9 °C daha sıcak tutabilmişlerdir [36].

Çinici ve diğerleri, Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz kullanarak yapay bir güneş enerjisi ile TEDÜ içerisindeki parafinin erime süresini iyileştirmek için kullanılan yay tipi kanatçıkların optimizasyonunu yapmışlardır. Kanatçık olarak kullanılan yayların tel çapını, yay çapını ve yay adım sayılarını değiştirerek deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarını gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimize ederek en iyi sonucun en yüksek tel çapı, en yüksek yay adımı ve en düşük yay çapı olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca Varyans Analizi kullanarak hangi faktörün erime süresi üzerinde daha çok etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir ve Regresyon Analizi ile de parametrelere bağlı erime süresinin denklemini çıkarmışlardır [16].

Afshan ve diğerleri, güneş enerjisi uygulamaları için depolama tankı en boy oranının gizli ısı TEDÜ sisteminin depolama performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak analiz etmiştir. Bu çalışmada güneş enerjisinin değişken doğası göz ardı edilmiş ve şarj deneyleri sırasında sabit bir ısıtma akısı tanımlanmıştır. Araştırma sonunda güneş enerjisi uygulamaları için FDM tabanlı bir TEDÜ tasarlayanın verimi arttırdığı sonucuna varmışlardır [37].

Yukarıdaki çalışmalardan da görüleceği üzere FDM tabanlı TEDÜ’leri güneş enerji uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca literatür detaylı tarandığında TEJ’lerin performansını arttırmak için FDM’lerin kullanımı araştırılmaktadır. Alternatif enerji kaynağı olarak kullanılabilecek TEJ’ler ile termal depolama yapabilen FDM’lerin hibrit uygulamaları son yıllarda ilgi çeken çalışma alanı haline gelmiştir.

Anbang ve diğerleri, FDM ile birleştirilerek tasarladıkları enerji depolama ünitesinde FDM'in TEJ sisteminin performansına etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada TEJ ve ısı eşanjörü arasındaki yüzey termal iletimini düzenlemek için farklı termal iletkenliklere sahip termal ara yüz malzemeleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, termal ara yüz malzemenin FDM ile birleştirilen TEJ'lerin performansına önemli ölçüde etki ettiğini göstermiştir. Ara yüzey termal iletimin artırılması ile, soğutma sırasında FDM'lerin sıcaklığının sabit kalma süresini kısaltırken TEJ çıkışındaki elektrik gücünün artırıldığı tespit edilmiştir [38].

Milad ve diğerleri, FDM ve TEJ kullanarak güç üretimini ve fotosel verimliliğini arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarındaki ikinci hedefleri ise geceleri elektrik üretmektir. Yani ısı kaybetmek yerine termoelektrik jeneratör kullanarak sistem ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeye çalışmışlardır. Önerilen sistemi güneş pili sıcaklığı, verimi ve çıkış gücü açısından bir solo fotovoltaiik sistemle karşılaştırmak için aynı koşullarda sayısal simülasyonlar geliştirmişlerdir. Sonuçlar, güneş pili sıcaklığının 74,43 °C'den 53,72 °C'ye düştüğünü ve sistemin elektrik çıkışının %100 ve güneş pili veriminin %1,38 oranında arttığını göstermiştir [39].

Tuoi ve diğerleri, Bir FDM ile entegre bir TEJ sisteminin teorik modellemesini yapmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Önerilen cihaz, günlük ortam sıcaklık değişimlerini bir FDM kullanarak TEJ ile bir sıcaklık farkına dönüştürür, böylece sıcaklık değişimleri elektrik enerjisi üretebilir. Geliştirilen termal modelleme sistemi, gerçek bir ortamın yanı sıra sıcaklık kontrollü bir fırın kullanılarak değerlendirilmiştir. FDM'li ve FDM'siz her iki durumda da TEJ'in çıkış gücü üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve FDM'in etkisi doğrulanmıştır. Ayrıca, elektrik enerjisi üretmek için sadece FDM'in faz değişim durumlarına değil, aynı zamanda düşük güç uygulamaları olasılığını oluşturabilecek faz değişimi olmayan duruma da odaklanmışlardır [40].

Darkwa ve diğerleri, fotovoltaiik (PV) güneş pili verimliliğini artırmak için entegre bir TEJ-FDM sistemi kavramını araştırmışlardır. Teorik araştırmalar sonucunda, doğal konveksiyon koşulları altında küçük sıcaklık farkı nedeniyle TEJ'lerin küçük güç çıkışına sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte FDM, ısı depolama işlemi sırasında PV sıcaklık artışını engellemede etkili olmuştur. Yapılan çalışmada, entegre sistemin termal

simülasyonları için sayısal bir model geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Çeşitli FDM kalınlıklarının, iletkenliklerinin ve faz değişim sıcaklıklarının etkisi değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, kalın bir FDM katmanının TEJ ve PV katmanları üzerindeki yalıtım etkisini azaltmak için yüksek FDM iletkenliğinin önemini vurgulamıştır. Sonuç olarak, PV/TEJ/FDM sistemi için en yüksek termal performans, 5 W/m K termal iletkenliğe ve 40–45 °C faz değişim sıcaklığına sahip 50 mm kalınlığında bir FDM katmanı ile elde edilmiştir [41].

Jaworski ve diğerleri, TEJ için deneysel bir sistem kurmuşlardır. TEJ modelini, güneş radyasyonunun bir ısı kaynağı olarak kullanılması için tasarlamışlardır. Çalışmalarında termoelektrik modüllerin soğutulma yöntemine dikkat çekilmiştir. FDM erimesi işlemi sırasında ısıyı absorbe etmiş, böylece TEJ'in soğuk tarafının sıcaklığını stabilize etmiştir. Farklı elektriksel ve termal konfigürasyonlarda ünitenin temel performans özellikleri, yani zamana karşı üretilen gerilim ve akım ölçülmüştür. Sonuç olarak FDM'lerin TEJ'lerde hem soğutucu hem de ısı kaynağı olarak etkin bir şekilde kullanılabileceği kanıtlanmıştır [42].

Wang ve diğerleri, FDM'in TEJ'in çıkış performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, TEJ'in sıcak tarafına FDM uygulayarak bir FDM-TEJ sistemi kurmuşlardır. Ayrıca, FDM'in ısı transfer özelliklerinin TEJ çıkış performansı üzerindeki etkisini, farklı termal sınır koşulları altında ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, FDM'in TEJ'i korumak ve sıcaklık farkı çalışma süresini uzatmak için sıcaklık dalgalanmasını azaltabileceğini göstermiştir [43].

Xinzhong ve diğerleri, TEJ'in sıcak ve soğuk tarafına FDM tabanlı TEDÜ'ler yerleştirerek TEJ'in performansını arttırmayı amaçlamışlardır. Tasarlanan sistem 0-40 °C aralığında değişen bir ortamda üç gün boyunca test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre çift taraflı FDM tabanlı TEJ'in tek taraflı FDM tabanlı TEJ'e göre çıkış gücünün %35,8 daha yüksek performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir [44].

Yapılan detaylı literatür çalışmasında hibrit sistemler için genellikle ısı kaynağı olarak atık ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Ayrıca FDM ile depolanan termal enerjinin şarj ve deşarj süresince termal ve elektriksel analizlerinin eksikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada FDM-TEJ ile bütünleşik bir TEDÜ tasarımı yapılmıştır. Farklı model TEJ ve farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM'ler kullanılarak farklı güneş ışıyım değerleri altında deneyler

yapılmıştır ve deneyden elde edilen sayısal sonuçlar ile şarj ve deşarj süresince termal ve elektriksel analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde FDM'in erime süresi, FDM'de depolanan termal enerji miktarı, TEJ'lerde üretilen elektrik gücü miktarı ve TEJ'lerin verimleri hesaplanarak yorumlanmıştır.

3. ENERJİ DEPOLAMA

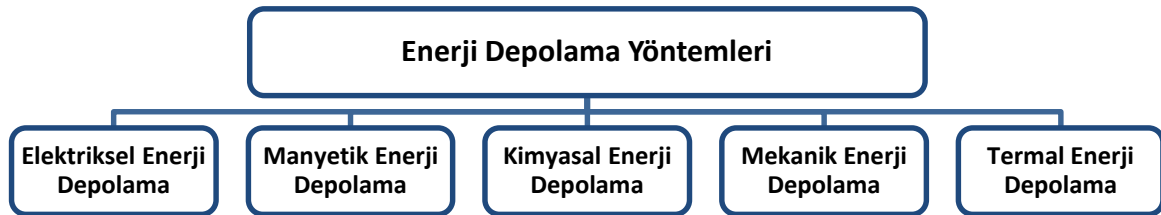
Enerji depolama, hâlihazırda kullanılabilecek enerjinin ihtiyaç durumunda daha sonra kullanılabilmesi için tutulmasıdır. Enerji depolamanın birçok faydası vardır; enerji yönetimini kolaylaştırır, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca güç sistemlerinin planlanmasına, çalışmasına ve frekans düzenlemesine de yardımcı olur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük dezavantajı doğası gereği sürekli olmayan kesintili kaynaklar olmalarıdır. Enerji depolama sistemleri yenilenebilir enerji santrallerine entegre edilerek üretilen fazla enerji depolanabilir ve ihtiyaç durumunda bu enerji kullanılabilir bu sayede yenilenebilir enerji kaynakları sürekli hale getirilebilir.

Bir enerji depolama sisteminde; depolama kapasitesi, kullanım ömrü, şarj-deşarj süresi ve maliyet gibi unsurlar önemlidir. Bu unsurlar dikkate alınarak çeşitli enerji depolama yöntemleri geliştirilmiştir.

3.1. Enerji Depolama Yöntemleri

Enerjinin çok değişik formlarda depolama yöntemleri vardır, bunlardan başlıca enerji depolama yöntemleri aşağıdaki şemada gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Enerji depolama yöntemleri [45]

3.1.1. Elektriksel enerji depolama

Elektrik şebekelerinde yükü dengeleme işlemi genellikle geçiş zamandaki verilerin istatistiği ile saatlik ve mevsimsel tahminlere göre yapılmaktadır. Yük dengesizliğinde gaz

türbini ve hidroelektrik santralleri gibi hızlı devreye alınabilen sistemler ile dengelenir. Ancak kesintili enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjinin yaygınlaşmasıyla elektrik şebekelerinde zamana bağlı arz-talep dengesizlikleri oluşmaya başlamıştır bu da elektriğin depolanmasını zorunlu hale getirmiştir [46]. .

Elektriksel enerji süper kapasitörlerde elektrokimyasal olarak depolanır. Kapasitörler gerilim verilen iki iletken metal arasındaki dielektrik malzemede elektrik yüklerini depolar. Bu yüzden bataryanın elektriksel depolama kapasitesi dielektrik malzemenin cinsine, metal plaka boyutlarına ve ayırma mesafesine bağlıdır. Bataryaların Lityum iyon (Li-iyon), sodyum-kükürt (NaS), nikel-kadmiyum (NiCd), kurşun asit (Pb-asit), kurşun-karbon gibi çeşitli türler mevcuttur [47].

3.1.2. Manyetik enerji depolama

Bu sistemde enerji süper iletken bobinden geçen elektriğin oluşturmuş olduğu manyetik alanda depolanır. Manyetik enerji depolama sistemi temel olarak şu bileşenlerle oluşur; süper iletken bobin, enerji dönüşüm sistemi (bobin içi ve dışına enerji transferi için) ve kriyojenik soğutma sistemidir. Süper iletken bobin enerji kaybını azaltmak için sıvı helyum ve nitrojen kapları içerisinde tutulmalıdır. Manyetik enerji depolama kapasitesi manyetik alanın yoğunluğuna ve malzemenin geçirgenliğine bağlıdır. Manyetik enerji depolamada neredeyse hiç ısı kaybı olmaması ve hızlı şarj-deşarj süresi gibi birçok avantajı vardır ancak geliştirilen sistemler henüz elektrokimyasal enerji depolayan bataryalar kadar enerji depolama kapasitesine ulaşamamıştır. Manyetik enerji depolama sistemlerinin uygulanabilirliği için çalışmalar devam etmektedir [48].

3.1.3. Kimyasal enerji depolama

Kimyasal enerji depolama fosil ürünleri değiştirerek sera gazlarını önemli ölçüde azalttığı için dünyanın dikkatini çekmektedir. En popüler kimyasal enerji depolama yöntemlerinden birisi hidrojen enerjisi depolama yöntemidir. Enerji kimyasal bileşiklerin oluşturduğu bağlarda depolanabilir ve bir katalizör (enzim, ısı vb.) yardımıyla ısı açığa çıkaran (ekzotermik) reaksiyonlar ile tekrar kazanılabilir. Hidrojen enerjisi depolama sistemlerinde, hidrojen foto dönüştürme ve elektroliz gibi yöntemlerle üretilir ve bir süre

depolandıktan sonra enerjiyi tekrardan geri kazanmak için reaksiyona sokulur. Hidrojen depolama sistemlerinin verimi ve kapasitesini arttırabilmek için çalışmalar devam etmektedir [47, 48, 49].

3.1.4. Mekanik enerji depolama

Mekanik enerji depolama elektriği çeşitli enerji türlerine dönüştürerek depolama yapar. Hidroelektrik santrallerinde pompaj depolama sistemi ile gün içerisindeki elektrik tüketiminin yoğun olduğu zamanlarda kullanılmak üzere enerji talebinin az olduğu zamanda su yukarı doğru pompalanarak depolanır.

Basınçlı hava depolaması enerji talebinin az olduğu zaman aralığında havayı basınçlandırarak doğal veya insan yapımı bir rezervuarda depolandığı başka bir sistemdir. Enerji talebinin arttığı zaman aralığında sıkıştırılan hava serbest bırakılarak bir gaz türbini jeneratörüyle elektrik üretilir.

Volanlar başka bir mekanik enerji depolama sistemleridir. İlk çıktıkları zaman sadece mekanik-mekanik dönüşümleri yapsa da gelişen günümüz teknolojisiyle mekanik-elektrik dönüşümü yapılmaktadır. Giriş enerjisi olarak elektrik verilerek motor çalışmasıyla kinetik enerjiye dönüşüm olur ihtiyaç duyulduğunda bu kinetik enerji jeneratör çalışmasıyla tekrardan elektrik olarak geri kazanılır [12, 48, 50].

3.1.5. Termal enerji depolama

Termal enerji depolama (TED), yalıtılmış bir depolama ortamında ısının veya soğukun depolanması anlamına gelir ve en çok uygulanan enerji depolama biçimlerinden biridir. TED, bir sistem içinde soğutma, ısıtma, eritme, katılaştırma, buharlaştırma veya diğer termo-kimyasal işlemlerden geçerek gerçekleştirilebilir. Uygun bir TED seçimi; depolama süresi, maliyeti, arz ve talep gereksinimleri, depolama kapasitesi ve ısı kayıpları gibi birçok faktöre bağlıdır [48]. Termal enerji -40 °C ila 400 °C arasında geniş bir sıcaklık aralığında depolanabilmesi nedeniyle birkaç farklı yöntemle yapılabilir ve düşük sıcaklık veya yüksek sıcaklık TED uygulamaları olarak sınıflandırılır.

TED ısı arz ve talepteki dengeyi kurmak, enerjinin kullanım verimliliğini arttırmak ve çevreyi korumak için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilir. Güneş enerjisi kullanımı, atık ısı geri kazanımı, iklimlendirme sistemlerinde ve enerji tasarrufunda kullanımı gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Duyulur ısı depolama (DID), gizli ısı depolama (GID) ve termo-kimyasal depolama (TKD) olmak üzere üç ana TED yöntemi vardır. DID, bir ortamın sıcaklığını yükselterek depolanan termal enerji şeklindedir ve üçü arasında basiti olarak bilinir. Bu tür enerji depolama örnekleri arasında sıcak su depolaması ve yer altı termal enerji depolaması sayılabilir. GID, katı-gaz, sıvı-gaz ve katı-katı faz değişiklikleri arasında mevcut olmasına rağmen genellikle katı ve sıvı fazları arasında faz değişimi sırasında depolanan termal enerji şeklindedir. Termo-kimyasal enerji depolama sistemleri, termal enerji gerektiren veya serbest bırakılan kimyasal reaksiyonları kullanır. Bu ısı depolama biçimi endotermik reaksiyon adımı sırasında ısının depolandığı ve ekzotermik reaksiyon adımı sırasında serbest bırakıldığı tersinir bir reaksiyon içerir [47].

Temel ısı depolama yöntemlerinin bazı özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır ve bu karşılaştırma Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı TED sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması [51]

Özellikleri	Termal Enerji Depolama Sistemleri		
	TKD	DID	GID
Enerji Depolama Yoğunluğu	Yüksek(1.8 GJm^{-3})	Küçük($0,18 \text{ GJm}^{-3}$)	Orta ($0,36 \text{ GJm}^{-3}$)
Isı Depolama Değeri	$f_r m \Delta H_{TCM}$	$m C_p \Delta T_{DID}$	$m H_f$
Isı Depolama Tekniği	Reaksiyon entalpisi	Sıcaklık artışı	Faz geçiş ısısı
Depolama Sıcaklık Aralığı	• En fazla: 100°C (su depoları) • 50°C (akiferler ve zemin depolama) • 400°C (beton)	• 20°C - 40°C (parafinler) • 30°C - 80°C (tuz hidratları)	• 20°C - 200°C
Depolama Süresi	Teorik olarak sınırsız	Isı kaybına bağlı olarak değişir	Isı kaybına bağlı olarak değişir

Çizelge 3.1. (devam) Faklı TED sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması [51]

Teknolojinin Durumu	Laboratuvar ölçekli	Ticarileşmiş	Pilot ölçekli
Sistem Karmaşıklığı	Yüksek	Düşük	Düşük
Depolama Sırasında Isı Kaybı	Küçük	Yüksek	Yüksek
Maliyet	Yüksek	Düşük	Orta

Termo-Kimyasal enerji depolama (TKD)

Termokimyasal enerji depolama sisteminde, enerji, enerjiyi serbest bırakan ve daha sonra geri dönüşümlü bir kimyasal reaksiyonda geri kazanılan moleküler düzeyde kimyasal bağların kopması veya ayrışması reaksiyonundan sonra depolanır. TKD’da depolanan ısı miktarı aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$Q = a_t m \Delta H \quad (3.1)$$

Burada Q (kJ) depolanan enerji miktarını, a_r reaksiyon katsayısını, m (kg) reaktansın kütlesini, ΔH (kJ/kg) reaktansın birim kütlesi başına entalpi değişimini ifade etmektedir.

Diğer ısıl enerji depolama sistemlerine benzer şekilde termokimyasal ısı depolama sistemleri de şarj etme, depolama ve boşaltma işlemlerine tabi tutulabilir. Ayrıca, termokimyasal ısı depolama, tersinir kimyasal ve fotokimyasal reaksiyonlar, zeolitler ve hidratlardan su salınımı ve yakıt üretimini içeren çeşitli işlemlere tabi tutulabilir. Bu yöntemin avantajları, DIS ve GID'ye kıyasla daha yüksek enerji yoğunluklarına sahip olmasıdır [52].

Duyulur ısı depolama (DID)

DID, termal enerjiyi depolamanın en basit yöntemidir. Katı veya sıvı bir malzeme faz değiştirmeden doğrudan ısıtılarak enerji depolanır. Bu depolama yönteminin uygulanabilirliği, kütle, ısı kapasitesi, malzeme kararlılığı, malzeme maliyeti, sıcaklık farkı ve sistem yalıtımına büyük ölçüde bağlıdır [53].

DID yönetimde yüksek sıcaklık TED için kullanılan en yaygın malzemeler şunlardır: beton, dökme seramikler ve erimiş tuzlar. Güneş enerjisi uygulamalarında erimiş tuzlar kullanılmıştır. Bunların en büyük dezavantajı, çoğunun enerji kayıplarına yol açabilecek yüksek donma noktasına (yaklaşık 100 °C) sahip olmasıdır [45].

Bir DID sistemi için malzemede depolanan ısı kapasitesi veya ısı enerjisi, malzemenin kütlesi (m), özgül ısı kapasitesi (c_p) ve sıcaklık farkı (ΔT) ile doğrudan ilişkilidir. Buna göre DID miktarı Eş. 3.2 ile hesaplanabilir.

$$Q = m \int_{T_i}^{T_f} C_p dT = mc_p \Delta T = mc_p (T_f - T_i) \quad (3.2)$$

Burada Q (kJ) depolanan enerji miktarını, m (kg) depolama malzemesinin kütlesini, C_p (kJ/kg°C) depolama malzemesinin özgül ısısını, T_f (°C) enerji depolama işlemi sonundaki sıcaklık ve T_i (°C) enerji depolama malzemesini ilk sıcaklığını ifade etmektedir [54].

Duyulur ısı depolamanın temel avantajları ve sınırlamaları aşağıdaki gibidir [55];

- Sabit bir sıcaklıkta, enerji depolanamaz veya serbest bırakılamaz.
- Katı veya sıvıya dönüştürmediği için ısı depolama ve salma işlemi daha verimlidir.
- Şarj etmek ve deşarj etmek kolaydır.
- Yalıtım kolay bir şekilde yapılabilir.
- Duyulur ısı sistemleri, aynı miktarda enerjiyi depolamak için gizli ısı sistemlerinden çok daha fazla depolama ortamına ihtiyaç duyabilir.

DID teknolojisinin temel kısmı, termal enerjiyi verimli bir şekilde şarj ve deşarj edebilmek için uygun malzemelerin seçimine ve özelliklerine bağlıdır. DID malzemeleri katı depolama malzemeleri ve sıvı depolama malzemeleri olmak üzere iki ana tipte sınıflandırılabilir . Katı depolama malzemeleri arasında kayalar, taşlar, tuğla, beton, toprak, demir, ahşap, alçıpan vb. bulunur. Aynı şekilde, su, yağlar ve alkol türevleri de sıvı depolama malzemeleri olarak sınıflandırılabilir [56].

Çizelge 3.2. DID katı malzemelerinin özellikleri [55]

Malzeme	Sıcaklık aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül termal kapasite kJ/(kgK)	Hacimsel termal kapasite kJ/(m ³ K)
Tuğla	0–1000	1400–1900	0.84	1176–1596
Sodyum	100–800	975–1203	1.3	750–925
Odun	20	700	2.390	1673
Cam	20	2710	0.837	2268
Kum	20	1555	0,8	1244
Alüminyum	20	2710	0.896	2428
Manyetit	20	5177	0.752	3893
Kaya çakılları	20	510	0.88	1410
Çelik	20	7850	0.48	3800
Manyetit	20	5177	0.752	3893

Çizelge 3.3. DID sıvı malzemelerin özellikleri [57]

Malzeme	Sıcaklık aralığı (°C)	Sıvı tipi	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül termal kapasite kJ/(kgK)	Hacimsel termal kapasite kJ/(m ³ K)
Termal yağ	0–400	Sıvı yağ	850–900	1.6–2.1	1360–1620
Motor yağı	≤160	Sıvı yağ	885	1.88	1669
Propan	≤96	Organik sıvı	800	2.5	2000
Etanol	≤76	Organik sıvı	785	2.5	1962

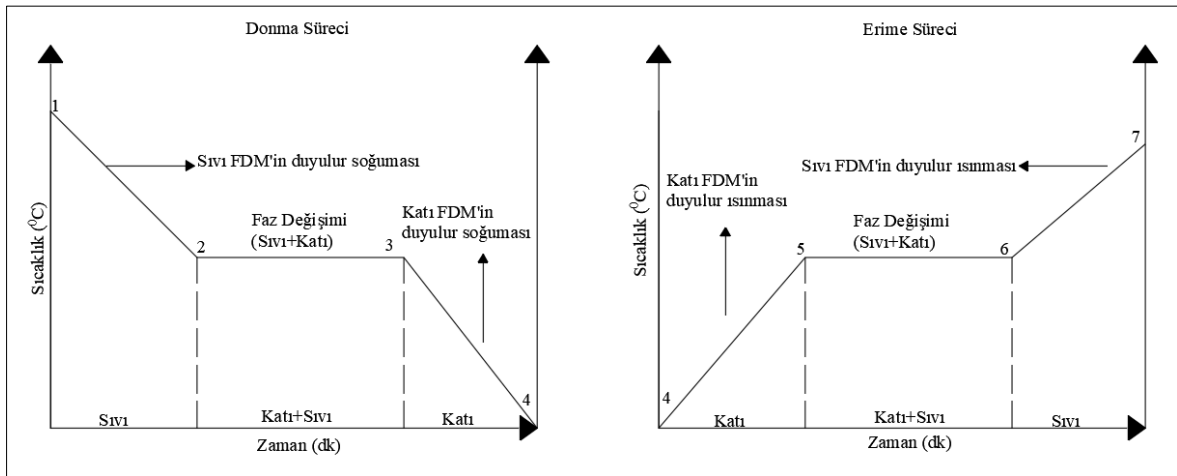
Çizelge 3.3.(devam) DID sıvı malzemelerin özellikleri [57]

Bütan	≤ 115	Organik Sıvı	805	2.4	1932
Oktan	≤ 125	Organik Sıvı	705	2.4	1692

Gizli ısı depolama (GID)

GID yöntemi, adından da anlaşılacağı gibi malzemeler depolama ortamında katıdan sıvıya veya sıvıdan gazı faz değişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkan gizli ısıyı depolar. Örneğin, erime işlemi sırasında malzeme, verilen ısı enerjisini absorbe ederek katı halden sıvı hale faz geçişine uğrar. Böylece faz değişim sürecinde ısı enerjisinin büyük bir kısmı malzemede gizli ısı şeklinde depolanabilir.

Bu sistemlerde kullanılan malzemeler genellikle FDM olarak bilinirler. GID sistemleri, eritme işlemi sırasında enerji depolamanın ve katılaşma işleminde bu ısıyı serbest bırakmanın verimli bir yolu olarak kullanılan FDM'in şarj ve deşarjına dayalı olarak çalışır. Daha iyi anlaşılması için Şekil 3.2'de bir termal enerji depolama malzemesinin faz değişimi sırasındaki sıcaklık davranışı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bir FDM'in faz değişimi sırasındaki sıcaklık davranışı

GID sistemde depolanan enerji miktarı malzemenin kütlesine ve erime ısısına bağlı olarak Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 kullanılarak hesaplanmaktadır [58].

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{sp}dT + ma_m\Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_{lp}dT \quad (3.3)$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m\Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (3.4)$$

Burada Q (kJ) depolanan enerji miktarını, m (kg) depolama malzemesinin kütlesini, C_{sp} (kJ/kg°C) depolama malzemesinin katı kısmının özgül ısısını, C_{lp} (kJ/kg°C) depolama malzemesinin sıvı kısmının özgül ısısını, T_m (°C) depolama malzemesinin erime sıcaklığını, T_f (°C) enerji depolama işlemi sonundaki sıcaklığını ve T_i (°C) enerji depolama malzemesini ilk sıcaklığını, Δh_m (kJ/kg) birim kütle başına gizli füzyon ısısını, a_m erimiş malzeme kesrini ifade etmektedir.

GID malzemesi olarak kullanılan FDM'lerin ticari olarak kullanılabilmesi için gerekli özellikler aşağıda özetlenmiştir [59].

- Erime sıcaklığının istenilen çalışma sıcaklıkları arasında olmalıdır.
- Birim hacim başına yüksek gizli füzyon ısısına sahip olmalıdır.
- Yüksek özgül ısı değerine sahip olmalıdır.
- Termal iletkenliğinin yüksek olmalıdır.
- Faz değişiminde yüksek hacim değişikliği olmamalıdır.
- Faz değişim çevrim sayısı fazla olmalıdır.
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmalıdır ve faz değişiminden sonra kimyasal bozulma olmamalıdır.
- Dayanıklı ve uzun ömürlü olmalıdır.
- Çevreye zarar vermemeli ve kolaylıkla geri dönüşüme girebilmelidir.
- Kolay temin edilebilir olmalıdır.
- Ucuz olmalıdır.

4. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM)

FDM'ler, faz değişimi sırasında yüksek miktarda ısı emer veya serbest bırakır. Bu ısı, gizli füzyon ısısı olarak bilinir ve bu süreç boyunca ısıl formda enerji depolanır. FDM'ler 1800'lerden beri çeşitli ısı depolama sistemleri için kullanılmaktadır. Çok sayıda TED yöntemleri geliştirilmiştir ancak FDM'in kullanıldığı TED sistemleri, diğer TED yöntemlerine göre daha avantajlı ve umut verici bir teknoloji olduğunu kanıtlamıştır. FDM'lerin kullanıldığı TED sistemleri son zamanlarda solar ısıtma sistemleri, pasif binalar, akıllı kentsel konutlar, seralar vb. çeşitli uygulamalarla entegre edilmiştir [60].

En yaygın olarak kullanılan GID sistemleri, büyük ısı depolama kapasitesi ve faz değişimi sırasındaki küçük hacim değişikliği nedeniyle katı-sıvı faz geçiş prensibi ile oluşturulmuş GID sistemleridir. Sıcaklık erime sıcaklık eşiğini açtığı zaman FDM iç molekülleri düzenli bir kristal yapıdan düzensiz bir amorf forma dönüşür. Tam tersinde ise sıcaklık donma sıcaklık eşiğinin altına düştüğü zaman moleküller kristal bir kafes halinde yeniden düzenlendiği bir çekirdeklenme süreci başlar [61].

Termofiziksel, kinetik ve kimyasal özelliklerin yanı sıra ekonomik ve çevresel hususlar FDM'lerin seçiminde ana faktörlerdir. Son 30 yılda en çok kullanılan FDM'ler parafin mumları, tuz hidratları, yağ asitleri ve ötektik organik/inorganik olmayan bileşiklerdir.

4.1. FDM'lerin Sınıflandırılması

FDM'den tam olarak yararlanmak için özellikleri keşfetmek ve kategorilere ayırmak önemlidir. Çoğu malzeme doğada faz değiştirme özelliğine sahiptir. Örneğin su, kaynama noktasının üzerinde su buharına, donma noktasının altında buza dönüşür. Bu malzemeler, FDM olarak tanımlanabilir ancak bunlardan yalnızca bazıları TED sistemlerinde kullanılabilir. FDM sınıflandırması, özellikle kullanılacak sistem için mükemmel FDM seçiminde yardımcı olur.

Stearik asit , miristik asit, palmitik asit , laurik asit, parafin mumları gibi bazı organik maddeler ve amidler, ketonlar , dienler, oleokimyasal karbonatlar ve şekerler gibi bileşikler 5-150 °C erime sıcaklığı aralığında kullanılabilirler. Tuz hidratları ve tuzlar gibi inorganik

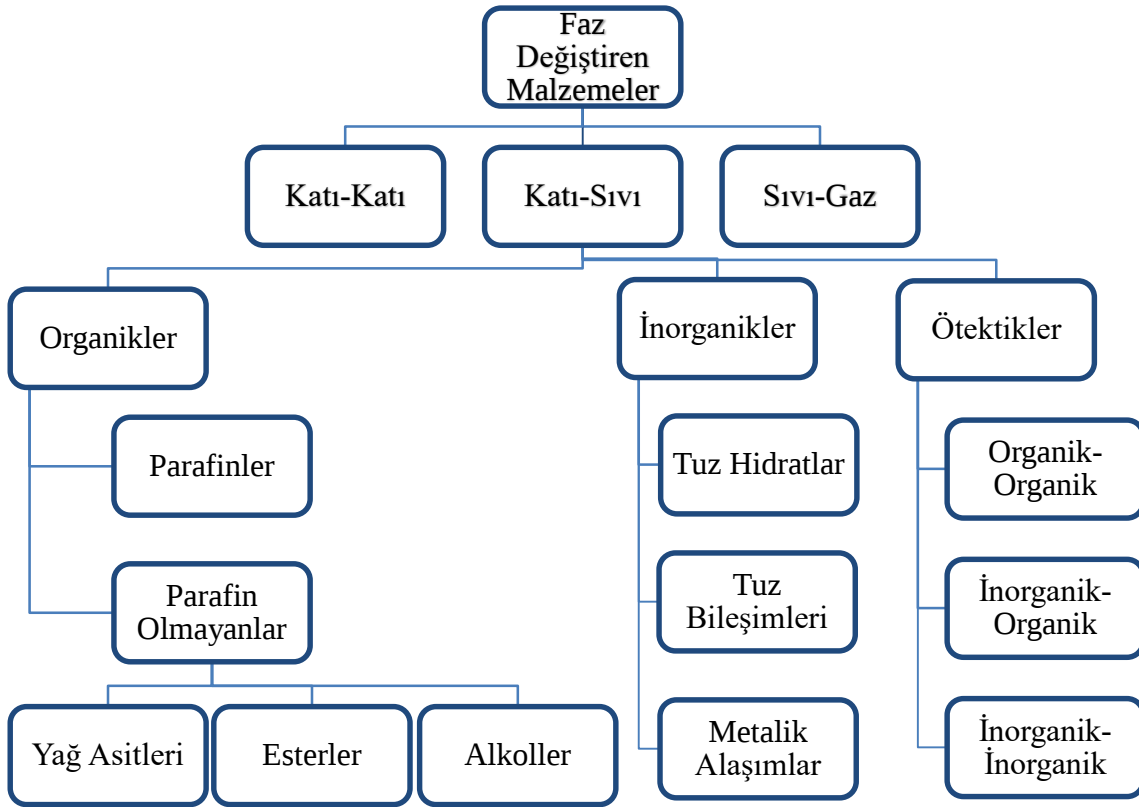
maddeler 10-900 °C sıcaklık aralığında kullanılırken, öte yandan ötektik FDM'ler, ötektik noktada iki veya daha fazla FDM'den oluşan ve tek bir FDM olarak hareket eden özel olarak tasarlanmış malzemelerdir. Seçilen ötektik FDM'ler, 10-600 °C sıcaklık aralığında termal enerjinin depolanması için istenen termofiziksel özellikleri elde etmek üzere uyarlanabilir. Ötektik FDM'ler, organik FDM'lerin, inorganik FDM'lerin veya her ikisinin karışımından oluşabilir [62].

Bazı FDM'lerde, düşük termal kararlılık, düşük termal iletkenlik, yüksek yanıcılık ve faz değişimi sırasında hacim değişiklik gibi dezavantajlar vardır. Bu dezavantajlar FDM'lerin ticari olarak uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, FDM'lerin termofiziksel özelliklerini geliştirmek için araştırmacılar, bu teknolojiyi ticari olarak uygulanabilir kılmak için yukarıdaki dezavantajlara yoğun bir şekilde odaklanmaktadır. FDM'lerin makro/mikro malzeme ile kapsüllenmesi , şekil/biçim stabilizasyonu, ısıtılmış malzemeler ve özellikle FDM'lerin verimliliğini artırabilen, termal iletkenliğin iyileştirilmesi gibi nano-gelişmiş FDM'ler gibi çeşitli teknikler vardır. Ayrıca, makro/mikro/nano-malzemelerin ve katkı maddelerinin kapsüllenmesi için çeşitli tekniklerin, FDM'lerin termal enerji depolama sisteminin çevresine sızmasını ortadan kaldırması da beklenir. Belirli bir uygulama için tipik bir FDM'nin kullanımı, istenen sıcaklık aralığı, ısı kaynağının mevcudiyeti ve özerklik tarafından yönetilir. Örneğin solar pasif binalarda , kullanılan FDM'lerin sıcaklık aralıkları insan konforu aralığında olacaktır. Benzer şekilde, güneş enerjili su ısıtma için 60-70 °C civarında olacaktır, elektrik üretimi için ise aşırı ısıtılmış buhar üretme gereksinimlerini karşılayacaktır. Bu nedenle, belirli bir sistem için belirli bir sıcaklık aralığına sahip FDM'ler, yukarıda bahsedildiği gibi, başka bir sıcaklık aralığına sahip başka bir sistemden tamamen farklı olabilir [62].

Tuz hidratları ve tuz kompozitleri gibi inorganik bileşikler organik bileşiklerle karşılaştırıldığında birim hacim başına çok daha yüksek gizli ısıya sahiptirler, termal iletkenlikleri daha yüksektir, daha düşük maliyetlidirler ve yanıcı değildir. Ancak önemli bir dezavantajı ise çoğu metal için aşındırıcı olmalarıdır, bu da kısa ömürlerinin yanı sıra paketleme ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasına neden olmaktadır.

Farklı FDM türleri vardır ve bunlar bazı kriterlere göre sınıflandırılır. Maddelelere dayalı olarak, FDM'ler katı-katı FDM'ler, katı-sıvı FDM'ler, katı-gaz FDM'ler ve sıvı-gaz

FDM'ler olarak dörde ayrılmıştır. Ayrıca, kimyasal yapıya dayalı olarak, katı-sıvı FDM'ler, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi organik FDM'ler, inorganik FDM'ler ve ötektik FDM'ler olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 4.1. FDM'lerin Sınıflandırılması [22, 23, 26, 27, 58, 59, 62]

4.1.1. Organik FDM'ler

Ortam ısıtma, elektronik cihaz soğutma, soğutma sistemleri, güneş enerjisiyle ısıtma, otomobiller, gıda işleme ve depolama ve uzay endüstrileri gibi çeşitli uygulamalarda organik gizli ısı depolama malzemeleri üzerinde birçok başarılı deney yapılmıştır. Organik FDM'lerin en büyük avantajı faz değişimi esnasında yüksek bir gizli füzyon ısısına sahip olmalarıdır. Bir diğer avantajı düşük erime sıcaklı noktalarına sahip olmalarıdır bu da onları düşük sıcaklık uygulamalarında tercih edilmesini sağlar. Ancak organik FDM'ler düşük termal iletkenliğe sahiptir ($0,1 - 0,35 \text{ W/mK}$), bu nedenle gerekli ısı transfer oranını sağlamak için daha büyük bir yüzey alanına ihtiyaç vardır [63].

Organik FDM'ler, doğal malzemeler olarak bilinirler. Bu malzemeler parafin ve parafin olmayan olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Parafinler, en çok dikkat çeken organik FDM'lerdir.

Parafinler

Parafin mumu genellikle n tane alkanın ($\text{CH}_3\text{--CH}_2\text{--CH}_3$) düz zincirlerin birleşimiyle oluşur. Parafindeki zincir uzunluğu yani karbon miktarı arttıkça erime sıcaklığı ve gizli füzyon ısı miktarı da artmaktadır. Saf parafin mumları çok pahalıdır ve bu nedenle sadece teknik sınıf parafin kullanılabilir. Ticari parafin mumları, orta derecede termal depolama yoğunluğu 200 kJ/kg ve zincir uzunluğuna bağlı olarak erime sıcaklıkları $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ila $67\text{ }^\circ\text{C}$ arasında değişiklik göstermektedir. Parafin mumu ısı depolama sistemlerinde kullanılması açısından düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenliği ($0,2\text{ W/mK}$) gibi dezavantajları vardır. Ancak bu dezavantajların yanında parafin mumu ucuz, kararlı, güvenli, uzun ömürlü, zararsız, kokusuz ve erimede küçük hacim değişikliği göstermesi gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca yapılan bir çalışmada parafin 1500 defa ısı döngüye sokulmuş ve termal özelliklerinde herhangi bir bozukluk yaşanmadığı tespit edilmiştir. Bu avantajlarından dolayı gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan en yaygın FDM parafinlerdir. Isı depolama sistemleri için çalışmalarda en yaygın kullanılan parafinle n -pentedekan ($n=15$, erime sıcaklığı= $10\text{ }^\circ\text{C}$) ve n -triacontana ($n=30$, erime sıcaklığı= $65\text{ }^\circ\text{C}$)'dir [64]. Çizelge 4.1'de karbon sayısına göre sınıflandırılmış bazı parafinlerin termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.1. FDM olarak kullanılan bazı parafinlerin karbon atom sayısına göre termofiziksel özellikleri [65]

Parafin ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$)	Yoğunluk (kg/m^3)	Erime Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
n - (Karbon atomları-16)	773	20	236
n - (Karbon atomları-17)	778	22,6	214
n - (Karbon atomları-18)	776	28,4	244
n - (Karbon atomları-19)	785	32	222
n - (Karbon atomları-20)	788	36,6	247
n - (Karbon atomları-21)	791	40,2	213
n - (Karbon atomları-22)	794	44	249
n - (Karbon atomları-23)	796	47,5	234
n - (Karbon atomları-24)	799	50,6	255
n - (Karbon atomları-25)	801	53,5	238
n - (Karbon atomları-26)	803	56,3	256
n - (Karbon atomları-27)	779	58,8	235
n - (Karbon atomları-28)	806	41,2	254
n - (Karbon atomları-29)	808	63,4	239
n - (Karbon atomları-30)	775	65,4	252

Yağ asitleri

$(\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} -\text{COOH})$ genel formülüne sahiptirler ve düşük sıcaklıkta gizli ısı depolama malzemesinin ideal termofiziksel özelliklerine sahiptirler. Yağ asitlerinin erime ve kaynama sıcaklıkları, parafinlere göre daha yüksektir ve doymuş yağ asitleri, faz

değişiminde düşük hacim değişikliği göstermektedirler. Ayrıca yağ asitleri hayvanlar ve bitkiler tarafından sınıflandırılıp üretildiğinden, yenilenebilir FDM olarak da bilinirler. Ancak bu avantajlarına rağmen parafinlerden daha pahalıdırlar, hafif aşındırıcıdırlar, hoş olmayan bir kokuya sahiptirler ve yanıcıdırlar [66].

Genel olarak yağ asitlerinin erime ve donma sıcaklıkları, erime ısısı ve kristalleşme noktası moleküllerindeki karbon atomu sayısı ile yükselmektedir. Çizelge 4.2’de karbon sayısına göre sınıflandırılmış bazı yağ asitlerinin termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.2. FDM olarak kullanılan bazı yağ asitlerinin karbon atom sayılarına göre termofiziksel özellikleri [65]

Yağ asitleri ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$)	Erime Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
Kaprilik asit (Karbon atomları-8)	16	148,5
Kaprik asit (Karbon atomları-10)	32	152,7
Laurik asit (Karbon atomları-12)	42	171
Miristik asit (Karbon atomları-14)	54	190
Palmitik asit (Karbon atomları-16)	64	185,4
Stearik asit (Karbon atomları-18)	69	209
Araşidik asit (Karbon atomları-20)	74	227
Undesilenik asit (Karbon atomları-22)	24,6	141

Esterler

Esterler, bir hidroksil ($-\text{OH}$) grubunun bir alkil ($-\text{O}$) grubu ile değiştirildiği asitlerden türetilir. Esterler, dar bir sıcaklık aralığında katı-sıvı geçişi gösterir. Esterlerin ötektik karışımları, yüksek geçiş entalpisi ile oda sıcaklığına yakın bir faz değişim sıcaklığına sahiptir. Esterler, büyük miktarlarda polimer, kozmetik ve akıllı giyim endüstrilerindeki ticari uygulamaları nedeniyle iyi bir kullanılabilirliğe sahiptir [67]. Çizelge 4.3’te FDM olarak kullanılan bazı esterlerin termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.3. FDM olarak kullanılan bazı esterlerin termofiziksel özellikleri [65]

Esterler	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
Metil Palmitat	27	163,2
Alil Palmitat	23	173
Propil Palmitat	20	190
Metil Stearat	39	160,7
İzopropil Palmitat	11	100
İzopropil Stearat	14	142
Butil Stearat	23	200
Etilen Glikol Distearat	63,2	215,8
Dimetil Sebakat	21	135
Metil-12-Hidroksistearat	43	126
Vinil Stearat	27	122

Glikoller

Polietilen glikol (PEG), polioksietilen (POE) veya polietilen oksit (PEO) gibi farklı isimlere sahiptir. PEG, sonunda hidroksil grubuna sahip dimetil eter zincirlerinden oluşur ve formülü $\text{HO}-\text{CH}_2-(\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2)_n-\text{CH}_2-\text{OH}$ 'dir . Suda ve organik bileşiklerde çözünürler. PEG'ler PEG400, PEG600 vb. gibi çeşitli derecelerde gelir. Geçmişte bu malzemeler üzerinde birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır. Kimyasal ve termal olarak kararlıdır, yanıcı değildir, toksik değildir, aşındırıcı değildir ve ucuzdurlar. PEG'lerin erime noktası ve gizli füzyon ısısı artan moleküler ağırlıkla artar. Diğer organik FDM gibi, PEG de düşük termal iletkenlik sorununa sahiptir [68]. Çizelge 4.4'te FDM olarak kullanılan bazı glikollerin termofiziksel özellikleri listelenmiştir [64].

Çizelge 4.4. FDM olarak kullanılan bazı glikollerin termofiziksel özellikleri [65]

Glikoller (HO-CH ₂ -(CH ₂ -O-CH ₂) _n -CH ₂ -OH)	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
(Poli Etilen Glikol) PEG400	4,2	117,6
PEG600	12,5	129,7
PEG1000	40	168,6
PEG3400	63,4	166,8
PEG10000	65,9	171,6
PEG20000	67,7	160,2
PEG35000	68,7	166,9
PEG100000	67	175,8
PEG1000000	70	174

Alkoller

Polialkoller olarak da bilinen şeker alkolü, orta sıcaklıkta (90–200 °C) FDM olarak kabul edilir. Araştırmacılar tarafından fazla ilgi görmemişlerdir ve önceki çalışmalar, ksilitol, eritritol ve mannitol gibi alkollerin bu ailedeki diğer malzemelerden çok daha yüksek bir değer olan 300 kJ/kg'a yakın bir gizli füzyon ısısına sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Alkoller, son kırk yılda potansiyel faz değiştiren maddeler olarak test edilmektedirler. Çizelge 4.5'te FDM olarak kullanılan bazı alkollerin termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.5. FDM olarak kullanılan bazı alkollerin termofiziksel özellikleri [65]

Alkoller	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
ksilitol	93	280
sorbitol	97	110
eritritol	117	344
mannitol	165	341

4.1.2. İnorganik FDM'ler

İnorganik malzemeler, organik olanlar kadar ısı depolama malzemeleri olarak araştırılmamıştır. Tuz hidratlar gibi olası ısı depolama malzemeleri, termal döngü sürecindeki dehidrasyonu ve yüksek derecede aşırı soğutmayı takiben kararsızlıklarından

dolayı dezavantajlara sahiptir. Diğer önemli sorun ise metal kaptaki tuzun korozyona sebep olmasıdır. İnorganik FDM'ler, tuz hidratlar, tuz bileşimleri ve metalik alaşımlar olarak üçe ayrılmıştır [64].

Tuz hidratlar

Tuz hidratlar genellikle 30–50 °C aralığındaki düşük çalışma sıcaklıklarında kullanılmaktadır . $AB.nH_2O$ Formülüne sahip tuz hidratlar kristalleşme suyu içeren inorganik tuzlardır. Faz değişimi sırasında tuzun dehidrasyonu meydana gelir. Bu iki şekilde gerçekleşebilir. Daha az miktarda su molekülü içeren bir tuz hidrat olabilir veya tuzun susuz formu olabilir.

Erime davranışına bağlı olarak , tuz hidratları şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Uyumlu tuz hidratları: Tuz, erime sırasında hidrasyon suyunda çözünür.
- Uyumsuz tuz hidratları: Tuz, erime sırasında hidrasyon suyunda kısmen çözünür.
- Yarı uyumlu tuz hidratlar: Faz değişiminden sonra, tuz hidratın daha az miktarda hidrasyon suyu ile bir tuz hidrata dönüşmesi nedeniyle katı ve sıvı fazlar farklı bileşimlere sahiptir.

Bununla birlikte, uygun erime sıcaklığı ve büyük bir gizli ısı ile FDM olma potansiyeline sahip çok sayıda tuz hidrat uyumsuz olarak erir. Faz geçişi sırasında açığa çıkan su, dehidrasyon işlemi sırasında oluşan kristal tuzu çözemez. Su ve tuz arasındaki yoğunluk farkından dolayı kaplarda faz ayrımı ve çökme meydana gelir. Bu, gerçek uygulamalarda ciddi bir problem oluşturur. Ağır fazın ayrışmasını ve çökmesini önlemek için kullanılan yöntemlerden biri jelleştirici veya koyulaştırıcı maddeler eklemektir. Polimerik veya selülozik ilavesi tuza jelleşen malzeme, koyulaştırıcı madde tuz hidratın viskozitesini arttırdığından ve tuz hidrat moleküllerini bir arada tutmaya yardımcı olduğundan, tuzun çökmesini engeller. Tuz hidratların bir başka dezavantajı da önemli derecede aşırı soğutmadır. Bunun nedeni zayıf çekirdeklenme yetenekleridir ve bu sorunu önlemek amacıyla çekirdekleştirici maddeler eklenir. Boraks ve karbon gibi çekirdekleştirici maddeler alt soğutmanın üstesinden gelmeye yardımcı olur, ancak termal iletkenliği düşürerek ısı transfer hızını azaltırlar [64]. Çizelge 4.6'da FDM olarak kullanılan tuz hidratların termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.6. FDM olarak kullanılan bazı tuz hidratların termofiziksel özellikleri [65]

Tuz Hidratlar	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	117	168,6
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	89	162,8
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78	265,7
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	200
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	36	280
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	36	247
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32	251
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29	190,8

Tuz bileşimleri

İnorganik tuzlar, duyarlı sıvı depolama ortamı olarak nispeten daha düşük erime sıcaklıklarına sahiptirler. Ancak 100 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklık uygulamaları için gizli ısı depolama malzemeleri olarak da işlev görebilirler. Hidroksitler, klörler, nitratlar ve karbonatlar gibi birçok malzeme alt grubuna girerler ve çok çeşitli erime sıcaklıklarına sahiptirler. Çizelge 4.7’de FDM olarak kullanılan tuz bileşimleri termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.7. FDM olarak kullanılan bazı bileşimlerinin termofiziksel özellikleri [65]

Tuz Bileşimleri	FDM	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
Nitrat Tuzları	Mg(NO ₃) ₂	426	146
	Ca(NO ₃) ₂	560	145
Karbonat Tuzları	Na ₂ CO ₃	854	276
	K ₂ CO ₃	897	236
	CaCO ₃	1330	142
	Li ₂ CO ₃	732	509
Hidroksit Tuzları	LiOH	462	873
Klorür Tuzları	NaCl	802	420
	KCl	771	353
	MgCl ₂	714	452
	LiCl	610	441
	CaCl ₂	772	253
Sülfat Tuzları	Na ₂ SO ₄	884	165
	Li ₂ SO ₄	858	84
	K ₂ SO ₄	1069	212
	MgSO ₄	1130	122
	CaSO ₄	1460	203
Florür Tuzları	LiF	850	1044
	NaF	996	794
	KF	858	468
	CaF ₂	1418	391

Metalik alaşımlar

Metalik alaşımlar, yüksek termal güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik sundukları için yüksek sıcaklık FDM'leri olarak kullanılabilirler. Kütle veya hacim bazında en büyük faz geçiş ısısı, nispeten bol Al, Cu, Mg ve Zn elementlerinin ikili ve üçlü alaşımları için bulunmuştur, ancak potansiyel malzemelerin tümü TED sistemlerinde kullanım için uygun değildir. Diğer gizli ısı enerjisi depolama malzemeleri ile karşılaştırıldığında, alüminyum alaşımları, uygun faz değişim sıcaklıkları, yüksek gizli ısı yoğunlukları ve yüksek termal kararlılıkları nedeniyle esas olarak yüksek sıcaklık TED sistemlerinde FDM olarak kullanım için araştırılmaktadır [69].

Çizelge 4.8'de FDM olarak kullanılan metalik alaşımlar termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.8. FDM olarak kullanılan bazı metalik alaşımların termofiziksel özellikleri [65]

Metalik Alaşımlar (% Kütlege)	Yoğunluk (kg/m ³)	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
Zn/Mg (53.7/46.3)	4600	340	185
Zn/Mg (52/48)	-	340	180
Zn/Al (96/4)	6630	381	138
Al/Mg/Zn (59/33/6)	2380	443	310
Al/Mg/Zn (60/34/6)	-	450,3	329,1
Mg/Cu/Zn (60/25/15)	2800	452	254
Mg/Cu/Ca (52/25/23)	2000	453	184
Al/Mg (65.35/34.65)	2155	497	285
Al/Cu/Mg (60.8/33.2/6)	3050	506	365
Al/Cu/Si/Mg (64.6/28/5.2/2.2)	4400	507	374
Al/Cu/Mg/Zn (54/22/18/6)	3140	520	305
Al/Cu/Si (68.5/26.5/5)	2938	525	364
Al/Cu/Sb (64.3/34/1,7)	4000	545	331
Al/Cu (66.92/33.08)	3600	548	372
Al/Si/Mg (83.14/11.7/5.16)	2500	555	485
Al/Si (87.76/12.24)	2540	557	498
Cu/Al/Si (49.1/46.3/4.6)	5560	571	406
Al/Cu/Si (65/30/5)	2730	571	422
Al/Si/Sb (86.4/9.6/4.2)	2700	575	471
Si/Al (86/12)	2700	576	560
Si/Al (80/20)		585	460

Çizelge 4.8. (devam) FDM olarak kullanılan bazı metalik alaşımların termofiziksel özellikleri [65]

Zn/Cu/Mg (49/45/6)	8670	703	176
Cu/P (91/9)	5600	715	134
Cu/Zn/P (69/17/14)	7000	720	368
Cu/Zn/Si(74/19/7)	7170	765	125
Cu/Si/Mg (56/27/17)	4150	770	420
Mg/Ca (84/16)	1380	790	272
Mg/Si/Zn (47/38/15)	-	800	314
Cu/Si (80/20)	6600	803	197
Cu/P/Si (83/10/7)	6880	840	92
Si/Mg/Ca (49/30/21)	2250	865	305
Si/Mg (56/44)	1900	946	757

4.1.3. Ötektik FDM'ler

Ötektik, inorganik-inorganik, organik-inorganik ve organik-organik gibi iki veya daha fazla bileşenden oluşmaktadır. Her biri fazını uyumlu olarak değiştirir, yani belirli bir erime/donma noktasına sahiptirler ve kristalleşme sırasında bir bileşen kristal karışımı oluştururlar. Ötektik FDM'ler genellikle uyumlu bir şekilde eriyip donarlar ve bu süreçte bileşenler ayrılmaz.

Ötektik FDM'lerde, bileşenlerin herhangi birinin erime noktasından daha düşük olan tek bir sıcaklıkta eriyen veya katılaştıran homojen bir madde karışımıdır. Ötektik FDM'ler, belirli özelliklere sahip yeni bir FDM elde etmek için iki veya daha fazla FDM'nin karıştırılması anlamına gelir [70]. Çizelge 4.9'da FDM olarak kullanılan metalik alaşımlar termofiziksel özellikleri listelenmiştir [65].

Çizelge 4.9. FDM olarak kullanılan bazı ötektik malzemelerin termofiziksel özellikleri [65]

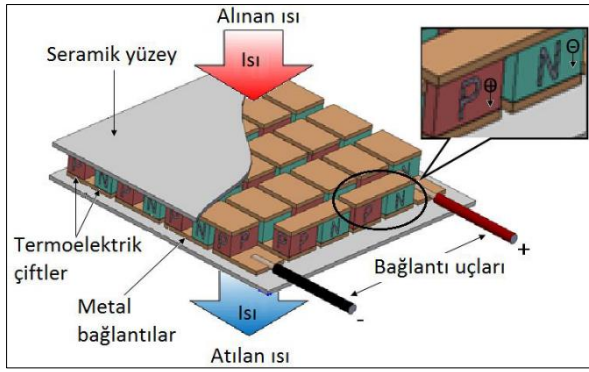
Ötektik FDM (% Kütlece)	Erime Noktası (°C)	Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg)
Laurik asit-kaprik asit (45/55)	21	143
Kaprik asit-palmitik Asit (76,5/23,5)	21,8	171,2
Laurik asit-miristik asit (66,0/34,0)	34,2	166,8
Laurik asit-palmitik asit (69,0/31,0)	35,2	166,3
Laurik asit-stearik asit (75,5/24,5)	37	182,7
Miristik asit-palmitik asit (58,0/42,0)	42,6	169,7
Miristik asit-stearik asit (64,0/36,0)	44,1	182,4
Miristik asit-stearik asit (65,7/34,3)	52	162
Palmitik asit-stearik asit (64,2/35,8)	52,3	181,7
Na ₂ SO ₄ /H ₂ O/NaCl/NH ₄ Cl (32.5 / 41,4/6,66/6,16)	13	146
CaCl ₂ ·6H ₂ O/CaBr ₂ ·6H ₂ O (45/55)	14,7	140
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O/NaCl (50/50)	18	-
CaCl ₂ ·6H ₂ O/MgCl ₂ ·6H ₂ O (66,6/33,3)	25	127
CaCl ₂ /MgCl ₂ ·6H ₂ O (50/50)	25	95
CaCl ₂ /NaCl/KCl/H ₂ O (48/4,3/0,4/47,3)	27	188
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O/Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (47/53)	30	136
CH ₃ COONa·3H ₂ O/NH ₂ CONH ₂ (40/60)	30	200,5
Mg(NO ₃)·6H ₂ O/NH ₄ NO ₃ (61,5/38,5)	51	131,3

Çizelge 4.9. (devam) FDM olarak kullanılan bazı ötektik malzemelerin termofiziksel özellikleri [65]

Mg(NO ₃)·6H ₂ O/MgCl ₂ ·6H ₂ O (58,3/41,7)	58	106
LiOH/KOH (40/60)	314	341
KNO ₃ /KCl (95,5/4,5)	320	74
KNO ₃ /KCl (96/4)	320	150
KNO ₃ /KBr/KCl (80/10/10)	342	140
NaCl/KCl/LiCl (33/24/43)	346	281
NaOH/NaCl (80/20)	370	370
MgCl ₂ /KCl/NaCl (60/20,4/19,6)	380	400
Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃ (32,1 /34,5/33,4)	397	276
MgCl ₂ /KCl (39/61)	435	351
MgCl ₂ /NaCl (52/48)	450	430
MgCl ₂ /KCl (64/36)	470	388
MgCl ₂ /KCl/CaCl ₂ (48/25/27)	487	342
CaCl ₂ /NaCl (67/33)	500	281
NaCl/KCl/CaCl ₂ (29/5/66)	504	279
BaCl ₂ /KCl/NaCl (53/28/19)	542	221
BaCl ₂ /KCl/CaCl ₂ (47/24/29)	551	219
LiF/MgF ₂ /KF (64/30/6 mol%)	710	782
LiF/CaF ₂ (%80,5/19,5 mol)	767	790

5. TERMoeLEKTRİK

Termoelektrik, termal olarak uyarılmış elektronların akışı nedeniyle bir iletken malzemede ısı ve elektriğin etkileşimini içerir. Elektrik ve ısı enerjisinin dönüşüm temellerine dayanan termoelektrik etkiler Thomas Johann Seebeck 1981 senesinde ve Charles Athanase Peltier 1934 senesinde yaptıkları deneyler sonucunda keşfedilmiştir. Şekil 5.1’de tipik bir Termoelektrik Modül (TEM) gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Tipik bir TEM [70]

5.1. Termoelektrik Etkiler

Termoelektrik etkiler seebeck etkisi, peltier etkisi, thomson etkisi ve joule etkisi olmak üzere dörde ayrılmaktadır.

5.1.1. Seebeck etkisi

Alman fizikçi Thomas Seebeck 1821 yılında, farklı metallerden yapılmış iki telin bir döngü oluşturmak amacıyla iki ucunda birleştirildiğinde ve iki bağlantı farklı sıcaklıklarda tutulursa devrede bir gerilim oluştuğunu keşfetmiştir. Bu nedenle termoelektrik olaya onun adı verilmiştir.

Seebeck etkisi, farklı elektrik iletkenleri veya yarı iletkenleri arasında bir sıcaklık farkı ($\Delta T = T_{sıcak} - T_{soğuk}$) meydana geldiği durumda elektrik potansiyel oluşumunu açıklar. Seebeck etkisi ile çalışan yarı iletkenlerden sıcaklık farkının bir °C değişmesi birkaç mikro volt kadar düşük gerilim üretilmektedir. Sıcaklık farkı ile üretilen gerilim

miktarı doğru orantılıdır. Sıcaklık farkının yeterli olduğu durumlarda bir yarı iletken çiftinden birkaç mili volta kadar gerilim üretilebilir. Bu tür termoelektrik modüller (TEM) çıkış gerilimi yükseltilebilmek için seri bağlanabilir.

Sıcaklık farkının neden olduğu gerilim kazancına Seebeck katsayısı S (V/°C) denir. Seebeck katsayısı Eş. 5.1.'de verildiği gibi bir sıcaklık farkının oluşturduğu potansiyel farktır ve katsayının işareti hangi tip yarı iletkenin malzemenin olduğunu belirtir. Pozitif işaret p tipi negatif işaret ise n tipi malzemeyi gösterir.

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (5.1)$$

5.1.2. Peltier etkisi

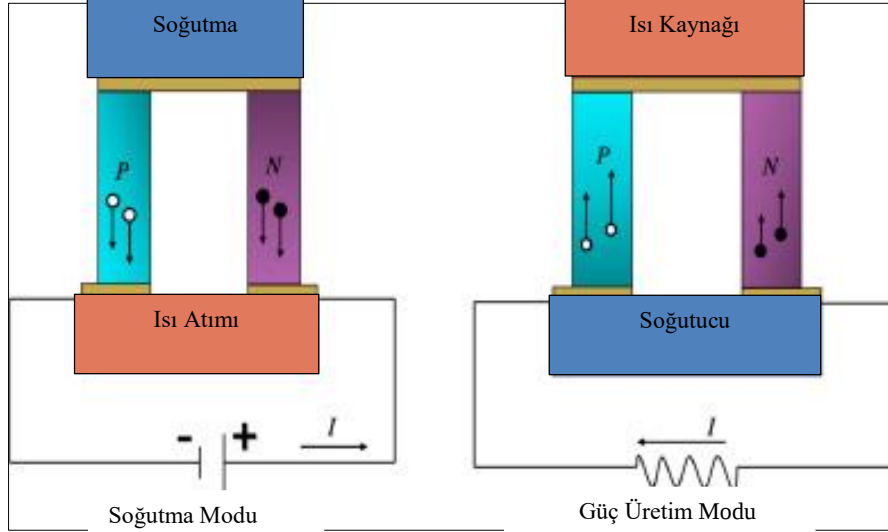
Gene Peltier, 1834'te Seebeck'in etkisini araştırırken, ısının farklı taraflardaki iki bağlantı metalleri arasında transfer edildiğini keşfetmiştir. Daha sonra 1850'lerde William Thomson, Seebeck ve Peltier etkilerinin sonuçlarını teorik olarak doğrulamayı ve aralarındaki bağlantıyı kurmayı başarmıştır.

Peltier etkisi, çeşitli iletkenlerdeki elektrik akımının iletilmesinde yer alan elektronların ortalama enerjisinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkar. Seebeck etkisinin tersi olgusudur; yani iki malzemeyi birbirine bağlayan bağlantıdan akan elektrik akımı, iki malzemenin kimyasal potansiyelindeki farkı dengelemek için bağlantı noktasında birim zaman başına ısı akısı olacaktır. Bu etki sayesinde Peltier soğutucu olarak bilinen elektronik bir soğutucu yapılabilmektedir. Elektronların enerji aralığı, iletkendeki dağılımları ve uygulanan gerilimin etkisi altında onları saçan atomlar gibi iki farklı iletkenin birleşimi gibi çok sayıdaki parametre, iletken üzerinde bir etkiye sahip olacaktır [72].

Peltier etkisi Eş. 5.2'de verildiği gibi; TEM tarafından absorbe edilen veya atılan ısı miktarı ($Q_{peltier}$), peltier sabiti (π) ve TEM üzerinden geçen akıma bağlıdır [73].

$$Q_{peltier} = \pi I \quad (5.2)$$

Şekil 5.2’de termoelektrik modülün elektrik üretimi (Seebeck etkisi) ve elektronik soğutma (Peltier etkisi) görülmektedir.



Şekil 5.2. Peltier ve seebeck etkisi [9]

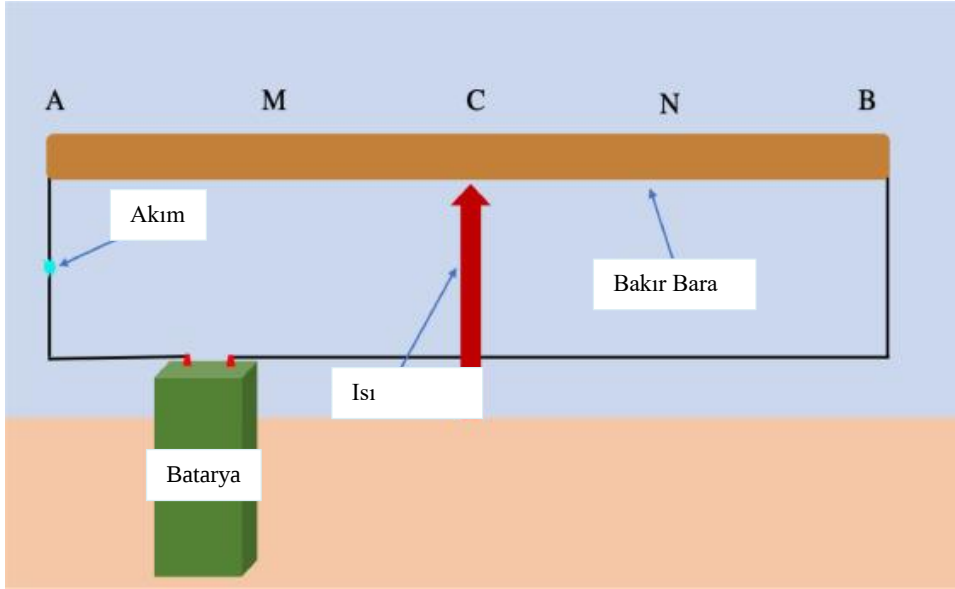
5.1.3. Thomson etkisi

Thomson etkisi, bir sıcaklık gradyanı ile akım taşıyan bir iletkenin ısınmasını veya soğumasını tanımlar. Bu durumda Thomson etkisi, elektrik akımının oluşması ile n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerinde üzerinden gözlemlenir. Thomson etkisi, Seebeck ve Peltier etkileri arasındaki bağlantıyı sağlar. Bu etkinin bir ölçüsü olarak, sıcaklıkları bir santigrat derece farklı olan iki nokta arasındaki bir metalde bir amperlik akım bir saniye boyunca (yani bir Coulomb) aktığında emilen veya yayılan ısı miktarı Thomson katsayısı olarak bilinir. Bir termoelektrik bağlantıdan üretilen veya çıkarılan Thomson ısısının miktarı Eş. 5.3’te ile verilmiştir. Isı miktarı, Thomson katsayısına (τ), TEM üzerinden geçen akım miktarına ve yarı iletkenleri arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır[74].

$$Q_{thomson} = -\tau I \Delta T \quad (5.3)$$

Şekil 5.3’te Thomson etkisinin görülmektedir. Burada A noktasından B noktasına kadar bir bakır çubuk görülmektedir ve bu çubuğun merkez C noktasından ısıtılmaktadır. Çubuktan akım geçmediğinde, M ve N noktaları, C’ye eşit uzaklıktadır ve aynı sıcaklıktadır. Ancak, A noktasından B noktasına akım aktığında, N noktası M noktasından daha yüksek bir

sıcaklığı gösterir. Benzer şekilde, B noktasının sıcaklığı A noktasından daha yüksek olacaktır. Bu durumda, mevcut akışla, ısı A noktasından C noktasına emilir ve C noktasından da B noktasına yayılır. Bu olaya pozitif Thomson etkisi denir [9].



Şekil 5.3. Thomson etkisi [9]

5.1.4. Joule etkisi

Isıtma etkisi ilk olarak 1840 yılında James Prescott Joule tarafından incelenmiştir. Joule etkisi, omik ısıtma olarak da bilinir ve bir elektrik akımının enerjisinin bir dirençten geçerken ısıya dönüştürüldüğü süreci tanımlamaktadır.

Elektrik akımı sonlu iletkenliğe sahip bir katı veya sıvıdan geçtiğinde, elektrik enerjisi malzemedeki direnç kayıpları yoluyla ısıya dönüştürülür. İletim elektronları çarpışmalar yoluyla iletkenin atomlarına enerji aktarırken, ısı mikro ölçekte üretilir. Joule etkisine bağlı olarak elektrik akımı geçişiyle oluşan ısı miktarı Eş 5.4'te verilmiştir. Isı miktarı, iletkenin geçen akım miktarına (I) ve elektrik direncine (R) bağlıdır [9].

$$Q_{Joule} = I^2 R \quad (5.4)$$

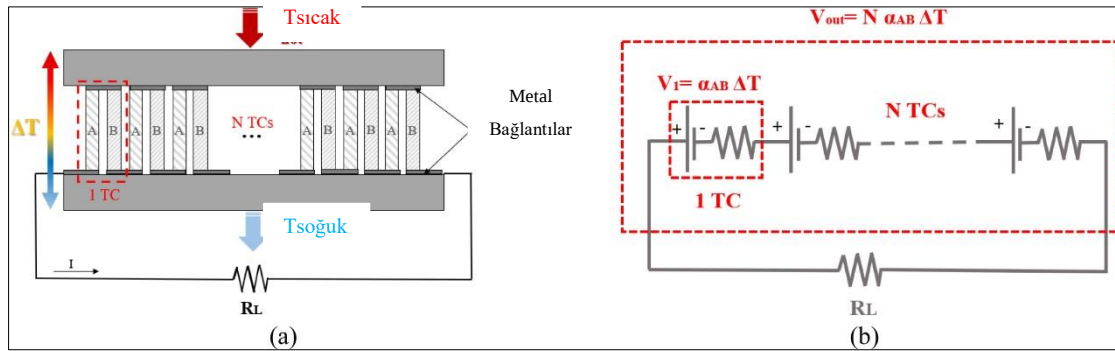
5.2. Termoelektrik Jeneratörler (TEJ)

TEJ'ler TEM'lerden yapılır ve Seebeck etkisi ile termal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilmektedirler. TEM'in yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı olursa, TEM'in terminalleri arasında üretilen gerilim, bir yük üzerinden güç olarak alınır. Böylece, şekil 5.4'te görüldüğü gibi TEJ modunda çalışır. TEJ uçları arasında üretilen gerilim Eş. 5.5 kullanılarak hesaplanabilir. Burada, N , yarıiletken çift sayısını, a , seebeck katsayısını ve ΔT , sıcak taraf ile soğuk taraf arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir [75].

$$V_{\text{çıkış}} = Na\Delta T \quad (5.5)$$

Şekil 5.4'teki gibi p-n yarı iletken çiftlerinin seri bağlanması ile üretilen gerilim miktarıyla birlikte toplam iç dirençte doğru orantılı artar. Bu nedenle, TEJ'lerin toplam iç direnci Eş. 5.6 kullanılarak hesaplanabilir. Burada ρ_n , ρ_p ve ρ_c sırasıyla n-tipi yarı iletkenin, p- tipi yarı iletkenin ve bağlantı malzemelerinin elektriksel öz dirençleridir. L_n , L_p , ve L_c sırasıyla n- tipi yarı iletkenin, p- tipi yarı iletkenin ve bağlantı malzemelerinin uzunluklarıdır. S_n , S_p ve S_c sırasıyla n-tipi yarı iletkenin, p- tipi yarı iletkenin ve bağlantı malzemelerinin kesit alanlarıdır [75].

$$R_{TEJ} = \frac{\rho_n L_n}{S_n} + \frac{\rho_p L_p}{S_p} + 2 \frac{\rho_c L_c}{S_c} \quad (5.6)$$



Şekil 5.4. Tipik TEJ ve eşdeğer elektrik devresi [75]

TEJ'den sağlanan güç, sıcaklık farkına (ΔT), yarı iletken malzemenin özelliklerine, dış yük direnci değerlerine bağlıdır ve Eş. 5.7 ile hesaplanabilir. Burada R_L ve R_{TEJ} sırası ile bağlı yükü ve iç direnci ifade etmektedir.

$$P = V_{çıkış}^2 \frac{R_L}{(R_{TEJ} + R_L)^2} \quad (5.7)$$

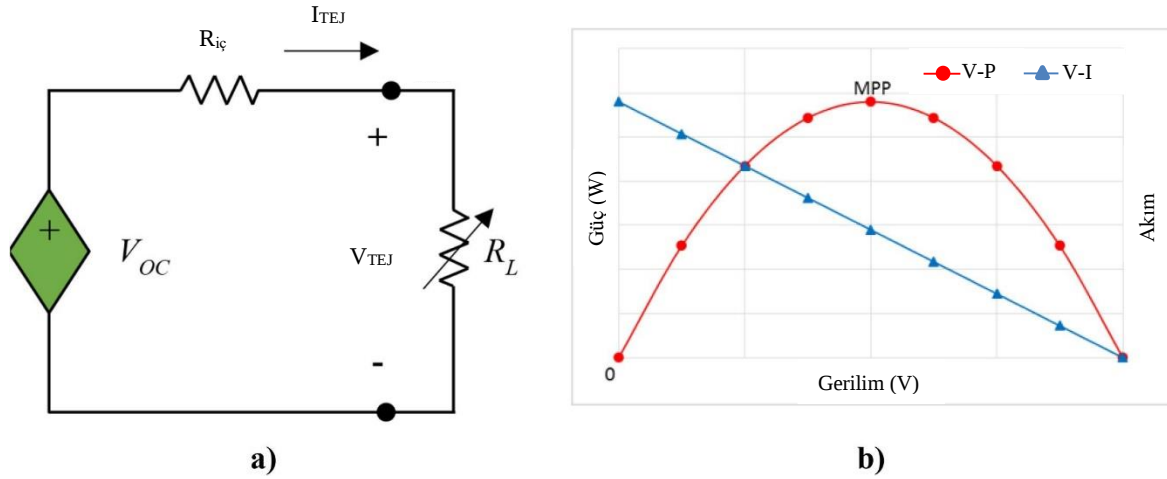
TEJ'in performansının iyileştirilmesi ve tam kapasitesine yakın çalışması için maksimum gücün çıkarılması gerekir. Bu nedenle TEJ sistemlerinden maksimum güç elde etmek için güç koşullandırma yöntemleri kullanılmaktadır. Güç koşullandırma yöntemleri, empedans eşleştirme ve DC-DC dönüştürücü uygulamalarını içerir. Empedans eşleştirmesi, toplam iç direnç RTEJ ve yük direnci RL'nin dengelenmesini içerir. Maksimum gücü yüke aktarmak için uygun empedans eşleşmesi önemlidir. Yüke maksimum gücü aktarmak için optimum elektrik yükü TEJ'in iç direnci ($R_{TEJ} = R_L$) ile aynı olmalıdır. TEJ'ler genellikle değişen sıcaklık farklılıklarına sahip dinamik ortamlarda kullanılır. TEJ'in (R_{TEJ}) iç direnci, yüzeyler arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Bu durumda TEJ'den maksimum gücü sağlamak zordur ve özel elektronik cihazlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, TEJ'den sabit bir gerilim ve maksimum güç çıkışı elde etmek için maksimum güç noktası izlemeli (MPPT) bir DC-DC dönüştürücü kullanılır. DC-DC dönüştürücülerin tasarımında verimlilik ve düzenleme konuları yer alır. DC-DC dönüştürücüler esas olarak elektrik enerjisini kondansatör ve bobin gibi devre elemanlarında depolar ve bu enerjiyi yüklere deşarj eder [76].

TEJ'ler kolay tasarlanabilmeleri, sessiz olmaları, hareketli parçalarının olmaması, uzun ömürlü olmaları ve çevre dostu olmaları gibi birçok avantaja sahiptirler. Bu avantajlarından dolayı tıp, endüstriyel tekstil, otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Gelecekte, TEJ'in doğru kullanımıyla, potansiyel sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelebilir. Kirlilik içermeyen bir gelecek nesil için, bu enerji kaynaklarının elektrik üretim genişletme planlamasında kullanılabilir [77].

TEJ sistemleri, Fotovoltaik (FV) sistemlerinde kullanılan MPPT yöntemlerinden uyarlanmıştır. FV modülü ve TEJ'in pek çok ortak noktası vardır: her ikisi de bakım gerektirmeyen, hareketli parçası olmayan uzun ömürlü yarı iletken p-n malzemeleridir. Öte yandan, farklı radyasyonlarda performans açısından temel bir fark vardır. FV sisteminin verimliliği, güneş radyasyonunun yoğunluğundan bağımsızdır, bu nedenle enerji üretimi radyasyonun doğrusal bir fonksiyonudur. TEJ'in verimliliği doğrudan sıcaklık farkına bağlı olduğundan, ikinci dereceden bir fonksiyonla ifade edilir ve doğrusal değildir. Bu nedenle

MPPT yöntemleri üzerinde çalışırken, TEJ veriminin sıcaklıkla doğrusal olmayan değişimini dikkate almak gerekir [78].

MPPT yöntemlerinde kullanılacak MPPT yöntemine göre bazı parametreler belirlenir ve sürekli izlenir. Yük direnci değeri değiştikçe iletilen güç değeri de değişir. Yük direnci sonsuz olduğunda, açık devre gerilimi (V_{OC}) TEJ terminallerinden ölçülür. Benzer şekilde, yük direnci sıfır olduğunda, TEJ terminalleri kısa devre yapar ve kısa devre akımı (I_{SC}) TEJ üzerinden akar. MPPT yöntemlerini uygulamak için, TEJ'in akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) özelliklerini yük direncinin bir fonksiyonu olarak yorumlamak gerekir. Şekil 5.5'te TEJ'in eşdeğer devre şeması ve yük direncinin bir fonksiyonu olarak tipik bir I-V ve P-V eğrileri gösterilmektedir [76].



Şekil 5.5. TEJ elektrik eşdeğer devresi ve yük direncinin bir fonksiyonu olarak tipik akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri [76]

Bir TEJ, birçok termoelektrik yarıiletken çift içerir ve her termoelektrik çift pozitif (p) tipi ve negatif (n) tipi yarı iletkenlerden oluşur. TEJ modüller seri veya paralel bağlanarak çıkış güçleri arttırılabilir. TEJ'ler güç üretim miktarına göre iki farklı kullanım alanına ayrılmaktadır. 5 μ W ile 1 W arasındaki güç üretimi için kullanılanlar düşük güç üretimi 1 W'ın üzerindeki güç üretimi için kullanılanlar ise yüksek güç üretim uygulamaları olarak ifade edilmektedir. Tek bir TEJ'in 1 ile 125 W arasında güç üretebilmektedir ve modüler bir bağlantı içerisinde daha fazla TEJ kullanarak 5 kW'a kadar çıkabilmektedir [79].

Geleneksel ısı motorları ve termodinamik fotovoltaik sistemlerin aksine TEJ'in enerji dönüşüm verimi yaklaşık olarak %5-15 ile sınırlıdır. Bu enerji dönüşüm verimliliğinde,

boyutsuz bir parametre olan performans katsayısı (ZT) ve TEJ'in yüzeyleri arasında oluşan sıcaklık farkı büyük bir etkiye sahiptir [80].

5.2.1. TEJ performansını etkileyen faktörler

Klasik TEJ'ler, nispeten düşük dönüşüm verimlilikleri nedeniyle gelecek için sınırlı bir uygulamaya sahip olacaktır. Bunun nedeni, termoelektrik elemanları yapmak için kullanılan malzemelerin içsel özellikleri, iki yüzey arasında uygulanan sıcaklık gradyanı, TEJ'in geometrik konfigürasyonu ve atık ısı kaynağına ısı emicisinin yanı sıra konveksiyonun ısı akışına etkileridir.

Sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı, geometri konfigürasyonlar (uzunluk, kesit alanı, kaplama alanı), yük direnci, temas direnci, ısı kaynağının dalgalanması vb. faktörler TEJ'lerin performansını doğrudan etkilemektedirler. Özellikle, n-tipi termoelektrik yarıiletken malzemelerin düşük elektrik direnci ve yüksek termal iletkenlik özelliğine sahip olmaları TEJ'lerin maksimum güce çıkmasını kolaylaştırmaktadır [81].

5.2.2. Performans katsayısı (ZT) ve TEJ malzemeleri

Bir TEM'in soğutma performansı, performans katsayısı (ZT) ile hesaplanır. İyi bir termoelektrik malzeme, düşük Joule etki katsayısına, yüksek Seebeck etki katsayısına ve düşük termal iletkenliğe sahip olmalıdır. Ticari olarak temin edilebilen Bizmut Telluride (Bi_2Te_3) malzemeden yapılmış TEJ'lerin enerji dönüşüm verimleri (η) %5'ten azdır. Bu TEJ'lerin performans katsayıları p-tipi ve n-tipi malzemeler için sırası ile 1,35 ve 0,9 dur. N-tipinin daha düşük performans katsayısına sahip olmasından dolayı η , %5 ile sınırlanmaktadır.

$$ZT = \frac{a^2}{\rho K} T \quad (5.8)$$

Eş. 5.8 kullanılarak performans katsayısı hesaplanabilir. Burada a , seebeck katsayısını ($\mu\text{V}/\text{K}$), ρ , elektrik özdirenci ($\Omega.cm$), K , termal iletkenliği ve T , mutlak sıcaklığı ifade etmektedir.

Literatürde çeşitli termoelektrik malzemeler için performans katsayısını iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca çalışma sıcaklığı aralığını artırmaya ve daha ucuz malzemeler geliştirmeye yönelik de çalışmalar yapılmaktadır.

Çeşitli termoelektrik malzemeler için bazı özel değerleri ve çalışma sıcaklıkları Çiz. 5.1'de listelenmiştir [82], [83].

Çizelge 5.1. Bazı malzemelerin termoelektrik özellikleri [84],[85]

Yarı İletken	Sıcaklık (K)	α ($\mu\text{V/K}$)	σ (Ωm) ⁻¹	K (W/mK)	ZT
Bi ₂ Te ₃ - p tipi	300	230	500	2	0,5
BiSbTe- p tipi	400	220	700	1	1,4
Bi ₂ Te _{2,7} Se _{0,3} - n- tipi	400	210	700	1,2	1
PbTe-SrTe -p tipi	900	270	300	1,1	2,2
Si ₇₀ Ge- n- ype	1000	350	320	4	0,8
Si ₈₀ Ge ₂₀ - n- tipi	1200	250	400	2,8	1,3
CpSb ₃ - n- tipi	800	240	800	4	0,6
Yb-CoSb ₃ - n- ype	800	200	1600	3,2	1,3
Yb ₁₄ MnSb ₁₁ - p- ype	1200	190	200	0,2	1,1
La ₃ Te ₄ - n- tipi	1200	280	80	0,7	1,1

5.2.3. TEJ enerji dönüşüm denklemleri

TEJ'lerin soğuk yüzey sıcaklığı T_c , sıcak yüzey sıcaklığı T_h , maksimum gücü $P_{\max}$, iç direnci $R_{iç}$, yük direnci R_L , seebeck sabiti α , termal direnç k_{th} , verimi η , şeklinde gösterilmektedir.

Kullanılacak bir TEJ modül için verimliliğin yüksek olmasında; büyük Seebeck sabiti α , düşük elektriksel direnç $R_{iç}$ ve düşük termal iletkenlik k_{th} değerleri etkilidir.

TEJ'in verimi Eş. 5.9 ile ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{\text{Yüke sağlanan elektrik gücü}}{\text{Sıcak kenardan absorbe edilen ısı}} \quad (5.9)$$

TEJ'in $R_{iç}$ direnci, sırasıyla Eş 5.10 ile hesaplanır. Burada ρ , yarı iletken malzemenin öz direncini, L malzemenin uzunluğunu ve A malzemenin kesit alanını ifade etmektedir.

$$R_{iç} = \frac{\rho L}{A} \quad (5.10)$$

$$\alpha = \frac{2V_{max}}{\Delta T} \quad (5.11)$$

TEJ'in termal iletkenliği k_{th} , iç direnç ve performans katsayısına göre değişmekte olup Eş. 5.12 kullanılarak hesaplanır.

$$k_{th} = \frac{\alpha^2}{R_{iç} Z} \quad (5.12)$$

TEJ tarafından üretilen gerilimin en yüksek değeri, TEJ bağlantı uçlarının açık olduğu zamandır. V_{OC} , bağlanan yarıiletken çifti sayısı, malzemenin seebeck katsayısı ve iki taraf arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılı olup Eş. 5.13 ile ifade edilir:

$$V_{OC} = \alpha(T_h - T_c) = \alpha \Delta T \quad (5.13)$$

TEJ uçları arasında üretilen gerilim miktarı açık devre gerilimi ile iç direncin sebep olduğu gerilim düşümünün farkına eşittir ve Eş. 5.14 kullanılarak hesaplanabilir.

$$V_{TEJ} = V_{OC} - IR_{iç} \quad (5.14)$$

Eş. 5.15 ve Eş. 5.16 sırasıyla, TEJ'in sıcak tarafından emilen ısı miktarı Q_h ile ve soğuk taraftan atılan ısı miktarını Q_c hesaplamak için kullanılır.

$$Q_h = \alpha IT_h - k_{th} \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_{iç} \quad (5.15)$$

$$Q_c = \alpha IT_c - k_{th} \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R_{iç} \quad (5.16)$$

TEJ'nin çıkış gücü, yukarıdaki ilişkilere dayanarak Eş. 5.17 veya Eş. 5.18 ile ifade edilebilir.

$$P_{TEJ} = Q_h - Q_c = \alpha(T_h - T_c)I - I^2 R_{iç} = (\alpha \Delta T - I R_{iç})I \quad (5.17)$$

$$P_{TEJ} = V_{TEJ}I = I^2 R_L \quad (5.18)$$

Maksimum güç teoremine göre, maksimum kullanılabilir güce yük direnci R_L 'nin, TEJ iç direncine $R_{iç}$ 'e eşit olduğunda ulaşılabilir ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

$$R_{iç} = R_L = \frac{V_{maks}^2}{P_{maks}} \quad (5.19)$$

$$I_{maks} = \frac{\alpha \Delta T}{2 R_{iç}} \quad (5.20)$$

$$P_{maks} = \frac{\alpha \Delta T^2}{4 R_{iç}} = I_{maks}^2 R_L \quad (5.21)$$

Termoelektrik modülün verimi ise elde edilen elektriksel gücün harcanan ısı güce oranıdır ve Eş. 5.22 kullanılarak hesaplanabilir.

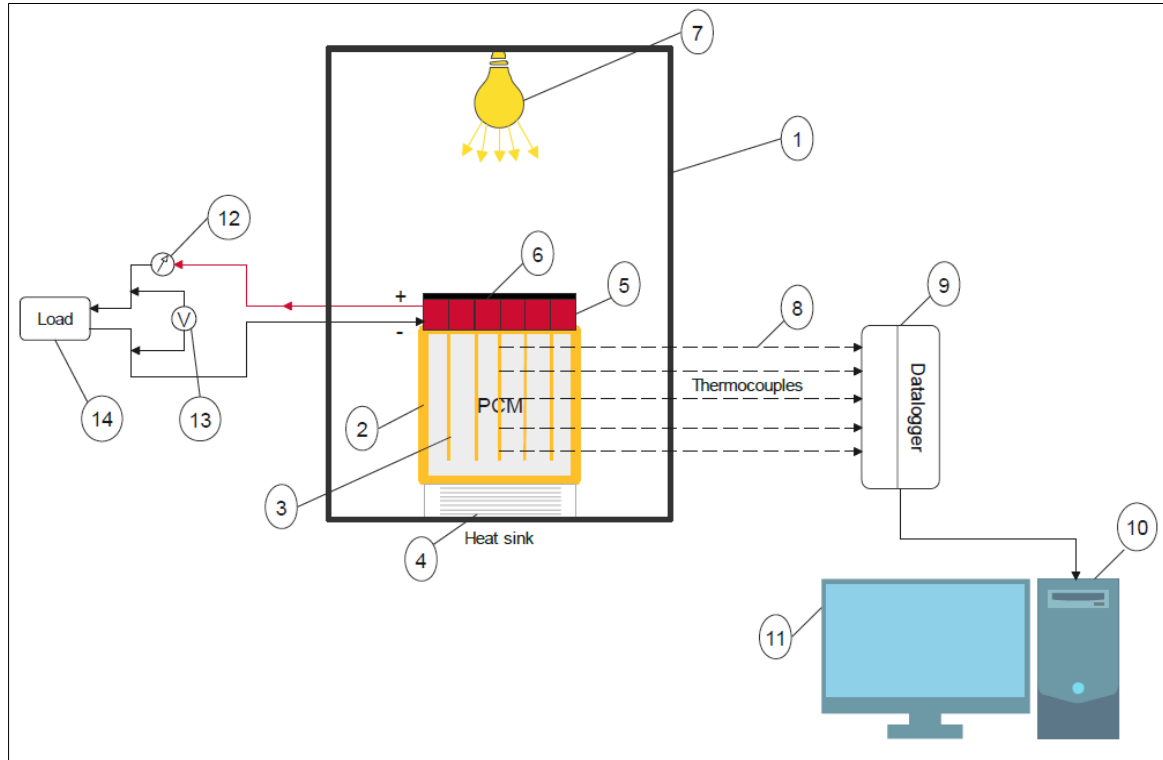
$$\eta = \frac{P_{TEJ}}{Q_h} \quad (5.22)$$

6. MATERYAL - METOT

6.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında termoelektrik jeneratör ile bütünleştirilmiş bir faz değıştiren malzeme tabanlı termal enerji depolama ünitesinin güneş ışıınımlı altında deneysel incelenmesi yapılmıştır. Tasarlanan deney düzeneği şeması şekil 6.1’de verilmiştir. Deney düzeneği aşağıdaki üç ana başlıkta kategori edilebilir.

1. TEDÜ
2. Yapay güneş ışıınımlı kaynağı ve kontrollü
3. TEJ ve yük
4. Veri kayıt sistemi



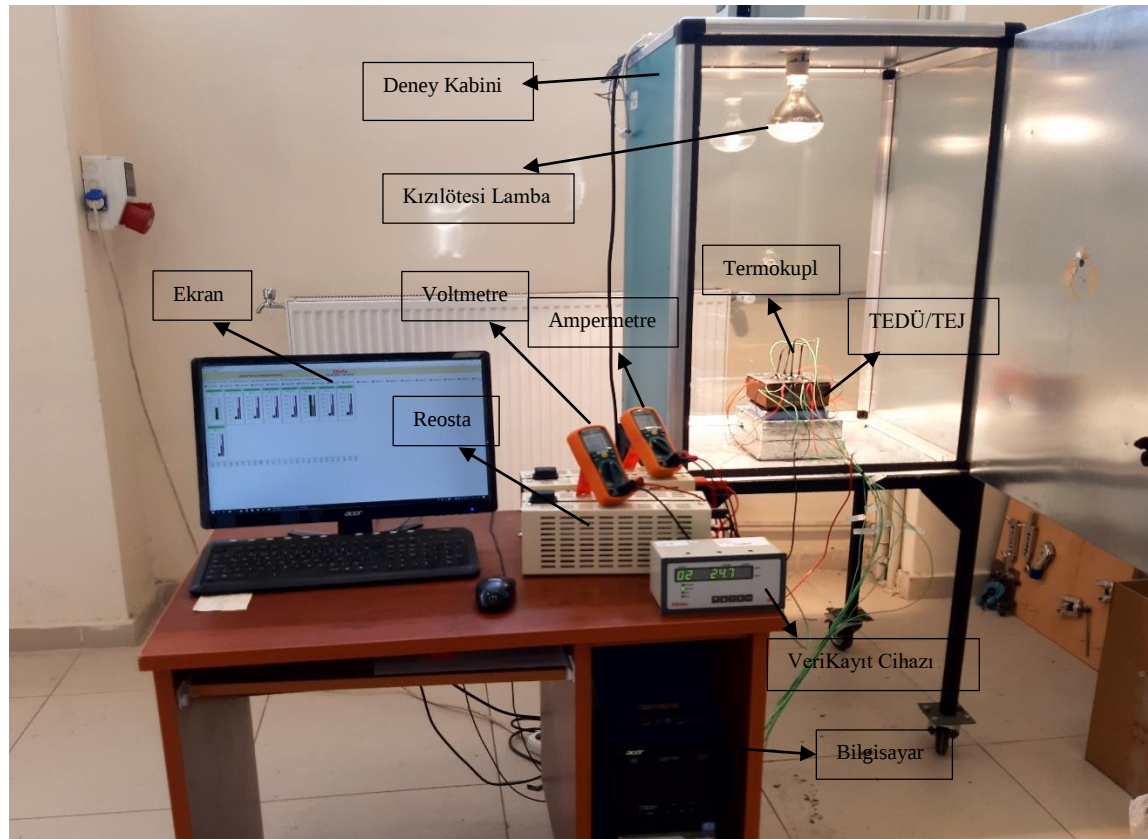
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Şekil 6.1’de gösterilen deney düzeneğindeki numaralar Çiz. 6.1’de açıklanmıştır.

Çizelge 6.1. Deney düzeneğinde kullanılan materyallerin açıklamaları

Deney kabini	8. Termokupllar
Bakır ısı depolama ünitesi	9. Veri kayıt cihazı
Kanatçık	10. Bilgisayar
Soğutucu plaka	11. Ekran
Termoelektrik Jeneratör	12. Ampermetre
Emici plaka	13. Voltmetre
Kızıl ötesi lamba	14. Yük

Deney düzeneğinin gerçek görüntüsü Resim 6.1’de verilmiştir. Deneyler kabin içerisinde yapay güneş ışınlamı altında ve farklı ışınlam değerlerinde yapılmıştır. Yapay güneş ışınlam kaynağı olarak Goldenfer marka 500W-240 V-E27 model kızılötesi lamba kullanılmıştır. Işınlam değerleri Kimo marka SL-100 model solarimetre kullanılarak ölçülmüştür. Üç farklı ışınlam değeri altında deneyler tekrarlanmıştır.



Resim 6.1. Deney düzeneğinin gerçek görüntüsü

Gelen ışınlamı depolayabilmek amacıyla farklı parametrelerde dört adet bütünleşik TEJ/TEDÜ tasarımı yapılmıştır. TEDÜ içerisindeki parafin eriyene kadar ışınlam vermeye devam edilmiştir. Bu süreçte parafin termal formda şarj olurken aynı zamanda TEJ

tarafından elektrik üretimi gerçekleştirmiştir. Işınım kesildikten sonra termal formda depolanan enerji deşarj edilerek TEJ'lerde yeniden elektrik üretimi sağlanmıştır. Şarj ve deşarj sürecinde termokupllar ile TEDÜ içerisindeki belirli noktalardan bir dakika aralıklarla sıcaklık ölçümü yapılarak veri kaydedici ile kaydedilmiştir. Sıcaklığın yanı sıra deney süresince TEJ tarafından üretilen elektik akım ve gerilim değerleri de belirli bir periyot ile kaydedilmiştir. Bu veriler ile deney tasarımlarının her biri için termal enerji depolama analizi ve elektrik üretim analizleri yapılmıştır.

6.1.1. TEDÜ

TEDÜ, bakır malzemeden yapılmış ve içerisine doldurulan FDM ile ısı enerjisi tutabilmek amacıyla tasarlanmıştır. Tasarlanan TEDÜ 15x15x5 cm boyutlarındadır. Resim 6.2'de tasarlanan TEDÜ'nün gerçek görüntüsü verilmiştir. Deney süresince TEDÜ içerisindeki FDM'in gözlemlenebilmesi için bir kenarı cam ile kapatılmıştır. Ayrıca termokuplların montajı için kapak kısmından 4 adet delik açılmıştır.



Resim 6.2. TEDÜ

Gelen ışıınının daha iyi absorbe edilebilmesi için Resim 6.3'teki gibi TEDÜ'nün üst kısmına 0,15x0,15 cm boyutlarında mat siyaha boyanmış emici plaka montaj edilmiştir. TEDÜ'ile aynı hizaya gelecek şekilde termokuplların montajı için emici yüzey üzerinde de dört adet delik açılmıştır.



Resim 6.3. Mat siyaha boyanmış emici yüzey

TEDÜ tasarımında kullanılan bakır malzemenin termo fiziksel özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir [81].

Çizelge 6.2. TEDÜ tasarımında kullanılan bakır malzemenin termo fiziksel özellikleri [83]

Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	Özgül Isı, C_p (kJ/kgK)	Isı İletim Katsayısı, k (W/mK)	Isıl Yayılım 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

TEJ’lerin verimi iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Bu sebeple sıcak taraf için emici plaka kullanılmasının yanı sıra TEDÜ’nün alt kısmına soğutucu plaka montaj edilerek iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı arttırmak amaçlanmıştır. Resim 6.4.’te TEDÜ’nün alt yüzeyine montaj edilmiş soğutucu plakalar verilmiştir. Kullanılan soğutucu plakalar alüminyum malzemeden yapılmıştır ve 40x40x10 mm boyutlarındadırlar.



Resim 6.4. Alüminyum soğutucu plakaların montajı yapılmış TEDÜ

Deneylerde ısı formda enerji depolama özelliklerine sahip FDM malzemeleri olarak iki farklı parafin wax kullanılmıştır. Parafin-1 (P1), *AGS Parafin* firmasından, Parafin-2 (P2) ise *Petropol* firmasından temin edilmiştir. Resim 6.5'te çalışmada kullanılan parafinler görülmektedir.



Resim 6.5. a) Parafin-1 (P1), b) Parafin-2 (P2)

Oda sıcaklığında katı halde olan parafin wax ayrı bir kapta ısıtılarak eritilmiştir ve sıvı haldeki parafin wax TEDÜ hacmi kadar doldurulmuştur. Deneylerde kullanılan P1 wax ve P2 wax için bazı termo fiziksel özellikler Çiz. 6.3'te verilmiştir.

Çizelge. 6.3. P1 ve P2'nin bazı termofiziksel özellikleri

Özellik	P1	P2
Erime başlama sıcaklığı (°C)	44,2*	32,2*
Erime gizli ısı (kJ/kg)	142*	33,7*
Özgül ısı (kJ/kg.K)	2***	1,61*
Yoğunluk (sıvı) (kg/m ³)	750***	895**
Yoğunluk (katı) (kg/m ³)	850***	957**
Isıl iletkenliği (W/m.K)	0,2***	0,2***
Renk	Beyaz	Sarı

*DSC cihazından elde edilmiştir. **Hesaplanmıştır. ***Literatürden alınmıştır [17].

Çalışmada kullanılan parafinler için bazı termo fiziksel özellikler üretici firmadan temin edilmiştir. Ancak enerji depolama analizinde kritik olan erime sıcaklığı ve erime gizli ısı kapasitesi diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile elde edilmiştir. DSC, polimerik malzemelerin çeşitli fiziksel özelliklerinin ve termal geçişlerinin tanımlanması için güçlü bir analitik araçtır. İzotermal veya adyabatik koşullar altında sıcaklık ve enerjideki nispi değişikliklerin veya başka bir deyişle sabit bir basınçta numunenin ısı kapasitesinin ölçülmesini içerir. Hem numune hem de referans aynı ortamda (kontrollü bir oranda

ısıtılmış veya soğutulmuş) aynı sıcaklık rejimlerine tabi tutulduğundan, analizi yapılacak madde ile bir inert referans materyali arasında neredeyse sifıra yakın bir sıcaklık farkı oluşturmak için gerekli enerjiyi ölçen bir tekniktir [84].

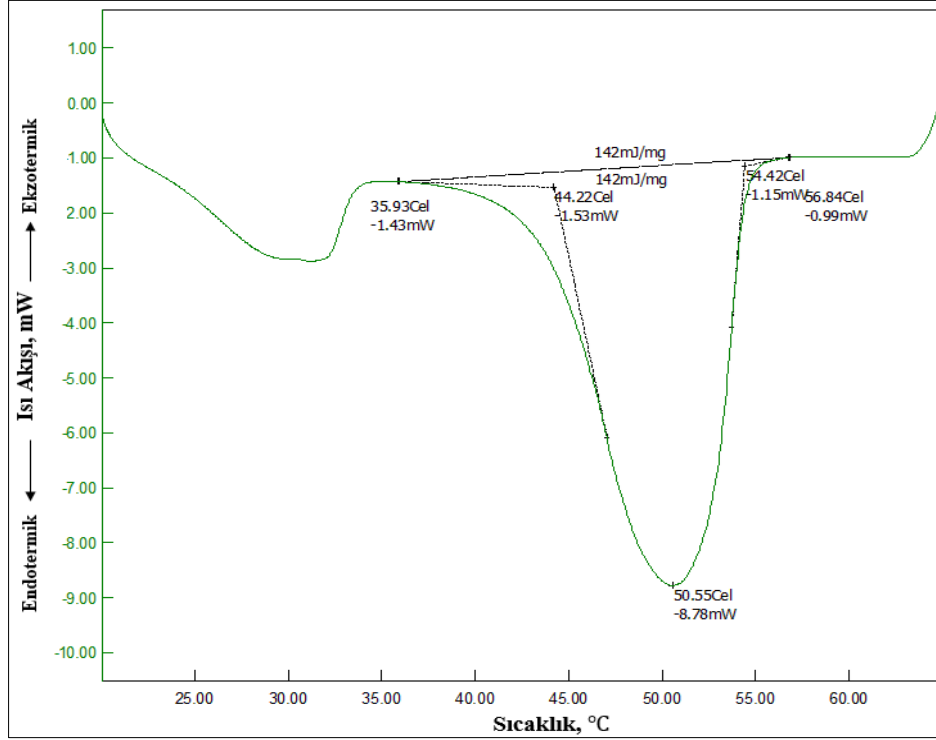
Bu tekniğin altında yatan temel ilke, numune, faz geçişleri gibi fiziksel bir dönüşüme uğradığında , her ikisini de aynı sıcaklıkta tutmak için referanstan daha fazla veya daha az ısının ona akması gerekeceğidir. Numuneye daha az veya daha fazla ısının akması gerekip gerekmediği, işlemin ekzotermik mi yoksa endotermik mi olduğuna bağlıdır . Örneğin, katı bir numune eriyerek bir sıvıya dönüşürken, sıcaklığını referansla aynı oranda artırmak için numuneye daha fazla ısı akışı gerekecektir. Bunun nedeni , katıdan sıvıya endotermik faz geçişinden geçerken numune tarafından ısının emilmesidir. Benzer şekilde, numune ekzotermik işlemlerden geçtiği için (örn.kristalizasyon) numune sıcaklığını yükseltmek için daha az ısı gereklidir. Diferansiyel taramalı kalorimetreler , numune ve referans arasındaki ısı akışındaki farkı gözlemleyerek, bu tür geçişler sırasında emilen veya salınan ısı miktarını ölçebilir. DSC, faz geçişleri gibi daha ince fiziksel değişiklikleri gözlemlemek için de kullanılabilir [85].

Bir DSC deneyinin sonucu, sıcaklığa veya zamana karşı ısı akışının bir eğrisidir. İki farklı konvansiyon vardır: deneyde kullanılan teknolojinin türüne bağlı olarak pozitif veya negatif bir tepe ile gösterilen numunedeki ekzotermik reaksiyonlar. Bu eğri geçişlerin entalpilerini hesaplamak için kullanılabilir . Bu, belirli bir geçişe karşılık gelen tepe noktasının entegre edilmesiyle yapılır. Faz değişim entalpisinin Eş. 6.1 kullanılarak ifade edilebilmektedir.

$$\Delta H = KA \quad (6.1)$$

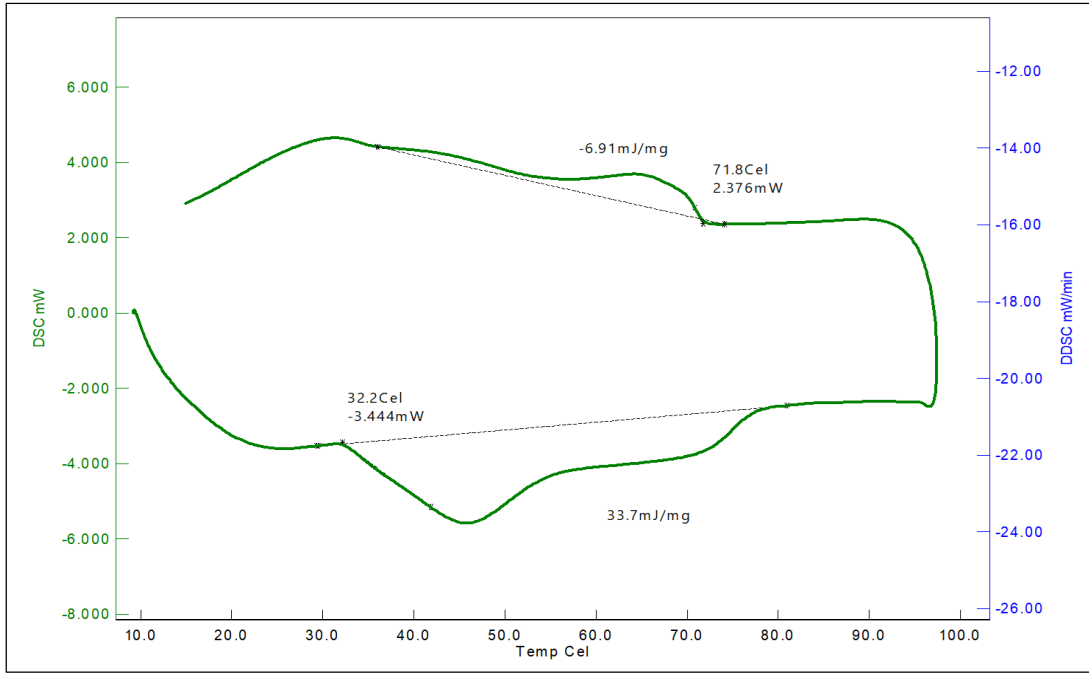
Burada, ΔH , faz değişim entalpisini, K, kalorimetrik sabitini ve A, eğrinin altında kalan alanı ifade etmektedir. Kalorimetrik sabit, cihazdan cihaza değişiklik göstermektedir ve bilinen geçiş entalpileri ile iyi karakterize edilmiş bir numunenin analiz edilmesiyle belirlenebilir [85].

Deneylerde kullanılan iki farklı parafin için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan DSC cihazı kullanılmıştır. Şekil 6.2’de P1 için Şekil 6.3’te ise P2 için DSC eğrileri çıkartılmıştır.



Şekil 6.2. P1 DSC eğrisi [17]

P1 DSC eğrisi 5 °C/dk değerinde maksimum 60 °C’ye kadar ısıtılarak test edilmiştir. Test sonucunda erimeye başlama sıcaklığı 42,22 °C, tamamen erime sıcaklığı 54,42 °C ve erime gizli ısı kapasitesi 142 mJ/mg çıkmıştır.



Şekil 6.3. P2 DSC eğrisi

P2 DSC eğrisi 10 °C/dk değerinde maksimum 100 °C'ye kadar ısıtılarak test edilmiştir. Test sonucunda erimeye başlama sıcaklığı 32,2 °C, tamamen erime sıcaklığı 80 °C ve erime gizli ısı kapasitesi 33,7 mJ/mg çıkmıştır.

6.1.2. Yapay güneş ışıınım kaynağı ve kontrollü

Deneylerde ısı depolama amacıyla TEDÜ içerisine doldurulan parafin waxın eritmek için yapay güneş ışıınım kaynağı olarak Resim 6.6'te görüldüğü gibi Goldenfer marka 500W-240 V-E27 model kızılötesi lamba kullanılmıştır. Lamba, deney kabininin tavanında bulunan E27 seramik duya takılmıştır. Kızılötesi lamba çalışma esnasında yüksek sıcaklıklara çıktığı için plastik duya yerine ısıya dayanıklı seramik duya kullanımı tercih edilmiştir. Tavana duya ile sabitlenen lamba ile emici yüzey arasındaki mesafe 38 cm olarak ayarlanmıştır. Bu mesafeden emici yüzeyin farklı noktalarından solarimetre ile ışıınım değerleri ölçülerek ortalaması alınmıştır. Dimmer yardımı ile ışıınım değeri kontrol edilerek üç farklı ışıınım değerinde deneyler tekrarlanmıştır.



Resim 6.6. Goldenfer marka 500W-240 V-E27 model kızılötesi lamba

Deneyleerde farklı ışıınım miktarlarının ölçümlelerini yapabilmek için Resim 6.7’de görülen Kimo marka SL-100 model solarimetre kullanılmıştır. 1 W/m² ile 1300 W/m² ışıınım aralığında ölçüm yapabilmektedir. Cihaz bir dakika frekans aralığı ile ölçüm yapabilmektedir ve ölçüm hassasiyeti %5 olarak firma tarafından sağlanan teknik dokumanda belirtilmektedir. Deneyleerde solarimetre ile emici yüzeyin 25 farklı noktasından değeer alınıp bu değeerlerin ortalaması alınarak ışıınım değeerleri tespit edilmiştir.



Resim 6.7. Kimo marka SL-100 model solarimetre

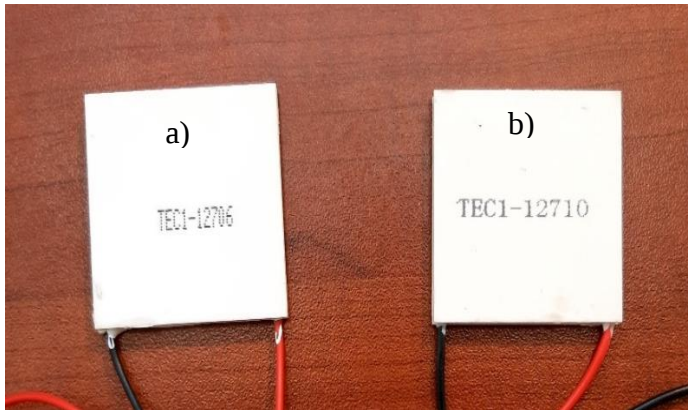
Tez çalışmasında deneyleer 800-100-1200 W/m² olmak üzere üç farklı ışıınım şiddeti altında yapılmıştır. Işıınım şiddetini değıştirmek amacıyla Resim 6.8’de görülen dimmer kullanılmıştır.



Resim 6.8. Dimmer

6.1.3. TEJ ve yük

TEJ'ler, iki yüzey arasında sıcaklık farkı oluştuğunda seebeck etkisi ile bağlantı uçlarında doğru akım (DA) üretilir. Sıcak taraf ışıınıma maruz kalan emici yüzey bulunurken soğuk tarafta ise TEDÜ bulunmaktadır. Bu sayede sıcak ve soğuk yüzeyler arasında bir sıcaklık farkı oluşabilmektedir. Resim 6.9'da görüldüğü gibi TEC1-12706 ve TEC1-12710 olmak üzere iki farklı model TEJ deneylerde kullanılmıştır.



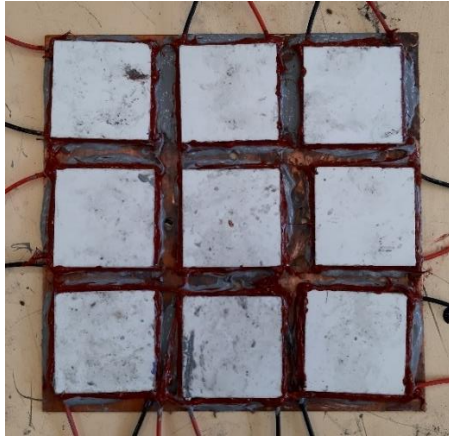
Resim 6.9. a) TEC1-12706 ve b) TEC1-12710

Tez çalışmasında kullanılan TEJ'lerin 25 °C sıcaklıkta bazı elektriksel ve mekanik özellikleri Çiz 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. TEC1-12706 ve TEC1-12710 TEJ'lerin bazı elektriksel - mekanik özellikleri

Özellik (25 °C)	TEC1-12706	TEC1-12710
Q _{max} (watt)	50	85
ΔT_{max} (°C)	66	66
I _{max} (amper)	6,4	10,5
V _{max} (volt)	14,4	15,2
Direnç (ohm)	1,98	1,08
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	138	138
Çalışma Ömrü (saat)	200.000	200.000
Boyutlar (mm)	40x40x3,8	40x40x3,2

TEJ'ler daha yüksek güçte modüller oluşturmak amacıyla seri bağlanabilirler. Bu çalışmada 9 adet TEJ seri bağlanarak bir modül oluşturulmuştur. Farklı iki tip TEJ kullanılarak iki farklı modül oluşturulmuştur. TEJ'lerin seri bağlanmasında Solder marka lehim kullanılmıştır. Oluşturulan TEJ modülü TEDÜ'ye montaj edilerek bütünleşik TEJ/TEDÜ tasarlanmıştır. Bağlantıları ve montajı yapılmış TEJ/TEDÜ, Resim 6.10'da gösterilmiştir. TEJ'lerin yüzeylerindeki temas yüzey alanını ve termal iletkenliği arttırmak amacıyla Hadron marka Hd254 tip termal macun kullanılmıştır. Kullanılan termal macunun ısı iletkenlik katsayısı katalog bilgilerine göre 8,5 W/mK'dir.



Resim 6.10. TEJ montajı tamamlanmış TEDÜ

Oluşturulan TEJ modüllerinin I-V ve P-V karakteristik eğrilerini çıkartabilmek amacıyla yüke bağlanmıştır. Yük olarak iki adet Yıldırım Elektronik marka Y-0036-066 model 100 Ω /500W'lık reosta kullanılmıştır. I-V ve P-V eğrileri TEJ modülünün yük değişimine bağlı olarak ölçülen akım, gerilim ve güç değerleriyle çıkartılmaktadır. Yük değişimi ne kadar hassas olursa çıkartılan eğriler o kadar doğru olur. Bu sebeple iki reosta birbirine seri

bağlanarak toplam 200 Ω /1000W'lık değişken yük oluşturulmuştur ve reostalar üzerinde her 5 Ω 'luk kademe işaretlenmiştir. Resim 6.11'de deneyde kullanılan seri bağlı reosta verilmiştir.



Resim 6.11. Seri bağlanmış reostalar

Deney sũresinde reosta kademesini 0-200 Ω arasında 5 Ω 'luk artışlarla değiştirerek ölçũmler yapılmıştır ve grafikleri çizilmiştir. Yũkũn 0 Ω olması durumunda kısa devre akımı (I_{sc}), TEJ modũlũ yũkten çıkartılarak da açık devre gerilimi (V_{oc}) ölçũlmũřtũr. Daha sonra 5 Ω 'luk kademelerde yũk arttırılarak toplam kırk adet ölçũm yapılmıştır. Ölçũmlerde voltmetre ve ampermetre olarak Extech marka EX330 model multimetreler kullanılmıştır. Kullanılan multimetre 0,1 μA – 10 A aralığında akım, 0,1 V – 600 V aralığında ise gerilim ölçũmũ yapabilmektedir. Firmanın paylaşmış olduğu teknik dokũmana gũre %0,50 hata payı oranı bulunmaktadır. Resim 6.12'de deneylerde kullanılan multimetre verilmiştir.



Resim 6.12. Multimetre

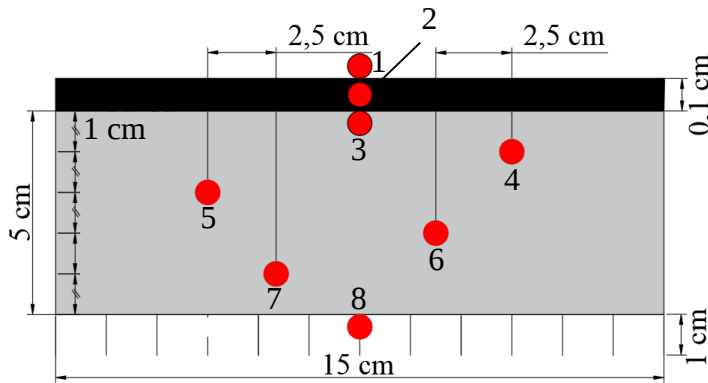
6.1.4. Veri kayıt sistemi

Yapay güneş ışınımı olarak kullanılan kızılötesi lambadan gelen ışınımın ısı etkisini incelemek amacıyla TEJ/TEDÜ'nün belirli noktalarına Resim 6.13'te görülen Elimko marka E-TC15-B-1KP04-12-K20-TT-T model k-tipi termokupllar bağlanmıştır. Termokupl NiCr-Ni malzeme türünden yapılmış olup prop ucu koruyucu paslanmaz kılıf ile sarılmıştır. Deneylerde kullanılan termokupllar dalma boyu 12 cm ve kablo boyu 2 cm olarak tercih edilmiştir. Farklı uygulamalar için kılıf malzemeler, kablo ve prop boyutları değişiklik gösterebilmektedir. Firmanın paylaşmış olduğu teknik dokümana göre 0,1 °C hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir.



Resim 6.13. Elimko marka k-tipi termokupl

Termokupllar TEDÜ içerisinde belirli noktalara Akfix marka E350 tip epoksi reçine kullanılarak sabitlenmiştir ve deney süresince termokupllarla sekiz farklı noktadan ölçülen sıcaklık değerleri veri kayıt cihazı ile kaydedilmiştir. Termokupl yerleşimleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



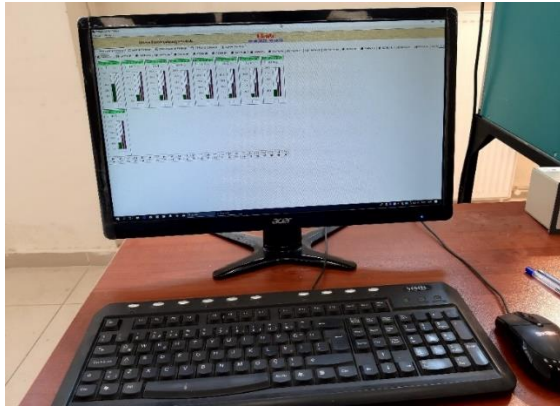
Şekil 6.4. Termokuplların yerleşimi

Sıcaklık değerlerini kaydetmek amacıyla Elimko marka E-680-16-2 model 16 kanallı veri kayıt cihazı kullanılmıştır ve sıcaklık değerleri 1 dk'lık periyot ile kaydedilmiştir. Firmanın paylaşmış olduğu teknik dokümana göre %0,50 hata payı oranı bulunmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan veri kayıt cihazı Resim 6.14'te verilmiştir.



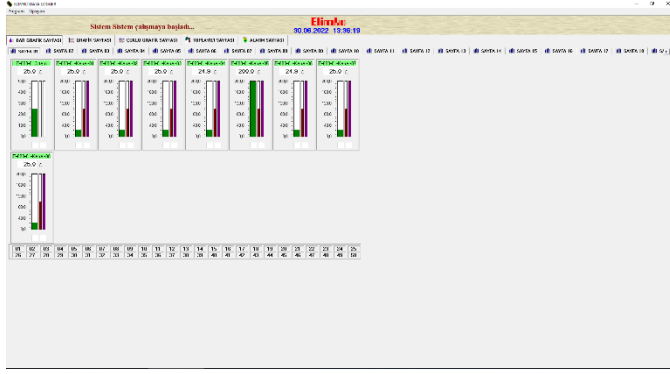
Resim 6.14. 16 Kanallı veri kayıt cihazı

Termokupllardan ölçülen sıcaklık değerleri veri kayıt cihazının LED ekranından okunabilmektedir. Ayrıca Elimko tarafından üretilen E-IB-10 iletişim birimi ile bilgisayardan okunabilir ve kaydedilebilir. Yapılan deneylerde Resim 6.15'te görülen Acer marka masaüstü bilgisayar kullanılarak sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.



Resim 6.15. Acer marka masaüstü bilgisayar

Bilgisayarda veri kayıt cihazının okunabilmesi için Resim 6.15'te görülen ve yine Elimko tarafından üretilen Emanager programının kullanılması gerekmektedir. Program kurulduktan sonra ölçülen sıcaklık verilerinin doğru şekilde kaydedilebilmesi için kanal ve kayıt konfigürasyonlarının yapılması gerekmektedir. Deney sonuçları ise bilgisayardan excel formatında alınabilmektedir.



Resim 6.16. Elimko Emanager program ara yüzü

Resim 6.16’da görülen Elimko Emanager program ara yüzünden termokuplların anlık sıcaklıkları takip edilebilir. Kanal numarasının yeşil renkte yanması veri cihazı ile bilgisayarın iletişiminin sağlandığını göstermektedir. Ancak kanal numarasının rengi kırmızı renkte yanması durumunda veri cihazı ile bilgisayar arasında iletişimin koptuğu anlamına gelir. Bu durumda iletişim kopukluğuna sebep olan arızanın giderilmesi gerekmektedir. Ayrıca istenildiği durumda kanal konfigürasyonu yapılarak belirli sıcaklıklara alarm set edilebilmektedir.

6.2. Metot

Literatür detaylı incelendiğinde FDM ile TED çalışmaları son zamanlarda ilgi konusu olmuştur. Çalışmalar güneş enerjisini ısıl formda FDM ile depolama metodu üzerinde yoğunlaşmıştır. Benzer şekilde literatürde TEJ ile atık ısıdan faydalanarak elektrik üretimi son zamanlarda popüler konulardan biri olmuştur. Bu tez çalışması iki konuyu bütünleşik olarak ele almıştır.

Bu amaçla yapılan tez çalışmasında TEJ ile bütünleştirilmiş dört farklı TEDÜ (TEJ/TEDÜ) tasarlanmıştır. TEJ/TEDÜ’lerde iki farklı güçte TEJ ve TEDÜ içerisinde FDM olarak farklı termo kimyasal özelliklere sahip iki parafin kullanılmıştır. Tasarlanan dört farklı TEJ/TEDÜ, 800, 1000 ve 1200 W/m² olmak üzere üç farklı ışıınım şiddeti altında deneysel olarak incelenmiştir. Tez çalışma kapsamında yapılan deneyler Çiz. 6.5’te verilmiştir. Deney sonuçlarına göre; zamana bağlı sıcaklık dağılımı, deney parametrelerinin erime süresine etkisi, deney parametrelerinin enerji depolama miktarına ve enerji depolama

verimine etkisi, zamana bağılı V_{OC} ve I_{SC} değişimi, TEJ/TEDÜ tasarımlarının I-V ve P-V eğrileri ve TEJ/TEDÜ tasarımlarının enerji dönüşüm verimleri incelenmiştir.

Çizelge 6.5. Tez çalışma kapsamında yapılan deneyler

TEJ/TEDÜ	Işınım Miktarı (W/m ²)
TEC1-12706-P1	800
	1000
	1200
TEC1-12706-P2	800
	1000
	1200
TEC1-12710-P2	800
	1000
	1200
TEC1-12710-P1	800
	1000
	1200

TEJ/TEDÜ üst katmandan aşağıya doğru sırasıyla emici yüzey, TEJ, TEDÜ ve soğutucu plaka olmak üzere dört katmandan oluşturulmuştur. Enerji kaynağı olarak yapay bir güneş ışınımı yayan kızılötesi lamba kullanılmıştır. Lambadan gelen ışınım ilk olarak mat siyaha boyanmış emici yüzeye düşerek ısı formunda absorbe edilmiştir. Emici yüzey ve TEDÜ arasında kalan TEJ'lerin bir yüzeyi sıcak bir yüzeyi soğuk tutularak iki yüzey arasında bir sıcaklık farkı oluşturulmuştur. Bu sıcaklık farkı sayesinde TEJ bağlantı uçlarında bir gerilim üretilmiştir.

Deneyler şarj ve deşarj olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Şarj aşamasında yani gündüz güneşin olduğu durumda, lambadan gelen ışınım emici plakada absorbe edilir ve enerji ısı formunda TEDÜ içerisinde depolanır. Bu aşamada emici plaka tarafı sıcak yüzey TEDÜ tarafı ise soğuk yüzey olmaktadır ve bu sıcaklık farkından seebeck etkisi ile elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Deşarj aşamasında, akşam güneşin battığı durumda yani lambadaki ışınım kapatıldığında emici plaka tarafı hızlı bir şekilde soğuyarak soğuk yüzey, TEDÜ tarafı ise depoladığı ısı enerjisi ile sıcak yüzeyi olmaktadır. Bu sıcaklık farkı ile TEJ'ler akşam güneşin olmadığı durumda da elektrik üretmeye devam edecektir.

Deney düzeneğinin hazırlanması, deneylerin yapılması ve sonuçlandırılması aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

- 15x15x5 cm boyutlarında bakır malzemeden TEDÜ imal edilmiştir. Erime formunun gözetlemek amacıyla bir yüzeyi camla kaplanmıştır.
- 40x40x3,8 mm boyutlarında dokuz adet TEJ, bağlantı uçlarından lehimleyerek seri bağlantı yapılmıştır.
- Oluşturulan seri bağlanmış TEJ'ler TEDÜ üzerine termal macun ile montaj edilmiştir.
- 4x4x1 cm boyutlarındaki soğutucu plakalar TEDÜ'nün alt kısmına termal macun ile montaj edilmiştir.
- TEDÜ'nün belirli noktalarına termokupllar epoksi reçine ile sabitlenmiştir.
- Parafin eritilerek huniyle TEDÜ içerisine doldurulmuştur.
- Emici plaka termal macunla TEJ'lerin üzerine montaj edilmiştir.
- Termokupllar veri kayıt cihazına bağlanarak sıcaklık değerlerinin kaydedilmesi sağlanmıştır.
- Veri kayıt cihazının yazılım paketi bilgisayara kurularak cihaz ve kanal konfigürasyonları yapılmıştır.
- Veri kayıt cihazı ile bilgisayar arasındaki bağlantılar yapılarak iletişim kurulmuştur.
- TEJ'e ampermetre, voltmeter ve yük bağlantıları yapılmıştır.
- Kızılötesi lamba deney kabinin tavanına seramik duyu ile sabitlenmiştir ve ışınlam şiddeti dimmer ile kontrol edilerek istenilen ışınlam şiddeti ayarlanmıştır.
- Işınlam açılarak deneyin şarj süreci başlatılmıştır. Parafin eridikten sonra da ışınlam kapatılarak deşarj süreci başlatılmıştır.
- Deney sonunda deney süresince kaydedilen sıcaklık değerlerini, bilgisayardan excel formatında alınmıştır.
- Deney süresince akım ve gerilim değerleri belli periyotlarla kaydedilmiştir.

Deney sonuçları kullanılarak zamana bağlı sıcaklık dağılımı, deney parametrelerinin erime süresine etkisi, deney parametrelerinin enerji depolama miktarına ve enerji depolama verimine etkisi, zamana bağlı V_{OC} ve I_{SC} değişimi, TEJ/TEDÜ tasarımlarının I-V ve P-V eğrileri ve TEJ/TEDÜ tasarımlarının enerji dönüşüm verimleri grafiğe dönüştürülerek incelenmiştir ve yorumlanmıştır. TEJ/TEDÜ'deki parametre değişiminin enerji depolama ve enerji dönüştürme verimlerine etkisi incelenerek en verimli tasarım tespit edilmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Bulgular

Yapılan tez çalışmasında Çizelge 6.5'teki gibi dört farklı TEJ/TEDÜ tasarımları yapılmıştır ve bu tasarımlar 800, 1000 ve 1200 W/m² ısıtım şiddetleri altında deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde TEJ modeli, parafin cinsi ve ısıtım şiddeti değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre aşağıdaki analizler yapılmıştır.

- Zamana bağlı sıcaklık dağılımı
- Deney parametrelerinin erime süresine etkisi
- Deney parametrelerinin enerji depolama miktarına ve enerji depolama verimine etkisi
- Termal kamera ile zamana bağlı sıcaklık değişiminin gözlemlenmesi
- Zamana bağlı VOC ve ISC değişimi
- TEJ/TEDÜ tasarımlarının I-V ve P-V eğrileri
- Deney parametrelerinin TEJ güç üretim miktarına ve enerji dönüşüm verimine (EDV) etkisi

Deney bulgularına göre sırasıyla grafikler çizilerek analizler yapılmıştır ve analiz sonuçları yorumlanmıştır. Ayrıca termal kamera ile şarj sürecine 15 dakikalık ve deşarj sürecinde 30 dakikalık periyotlarla görüntüler alınmıştır.

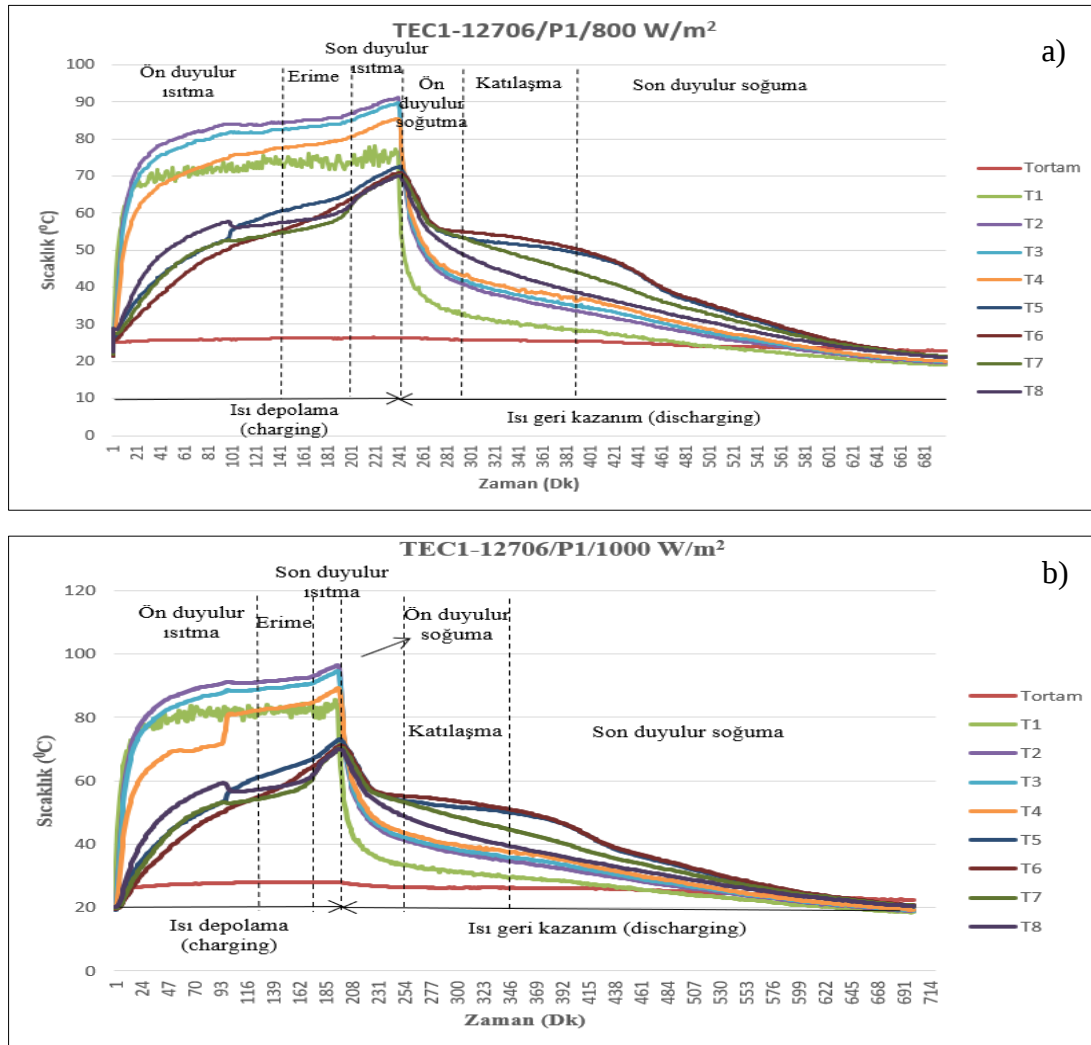
7.1.1. Zamana bağlı sıcaklık dağılımı

Dört farklı deney tasarımı için farklı ısıtım değerleri altındaki zamana bağlı sıcaklık değişimleri grafik çizilerek incelenmiştir.

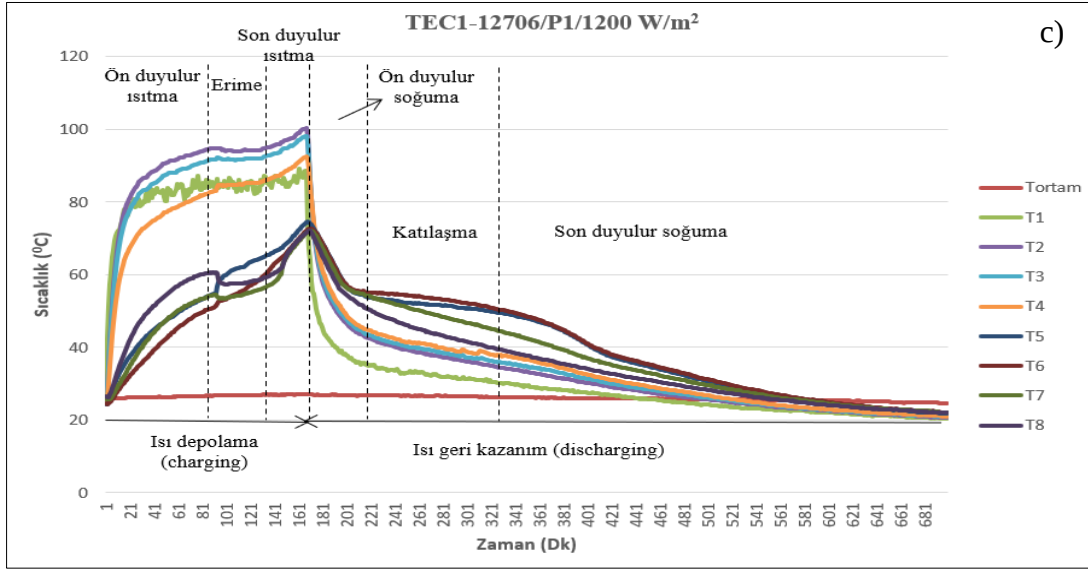
Şekil 7.1'de TEC1-12706-P1 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ısıtım şiddetleri altında zamana bağlı sıcaklık dağılımları verilmiştir. Bu tasarımda parafin ısıtımına bağlı olarak sırasıyla 240, 197 ve 168 dakikada tamamen erimiştir.

Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ısıtım FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ısıtım kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı

enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj süreci; ön duyulur ısıtma, erime ve son duyulur ısıtma kısımlarından oluşmaktadır. Işınım ilk açıldığı esnada emici plaka ve parafinin sıcaklığı artarak ilk duyulur ısıtma gerçekleşmiştir. Daha sonra parafin erime sıcaklığına geldiğinde gizli ısınma gerçekleşmiştir. Parafin eridikten sonra bir süre daha ısıtım altında parafin sıcaklığı artarak son duyulur ısıtma gerçekleştirilmiştir. Işınım kesildikten sonra sırasıyla ön duyulur soğutma, katılaşma ve son duyulur soğutma gerçekleşerek ısı enerjisi geri kazanılmıştır. Isının depolanması sürecinde yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı iletim söz konusudur. Benzer şekilde ısı geri kazanım sürecinde de tüm sıcaklık değerleri bir uyum içerisindedirler. Ayrıca ısıtım şiddetinin artması ile emici plaka sıcaklığının yükseldiği ve erime süresinin kısaldığı görülmektedir.



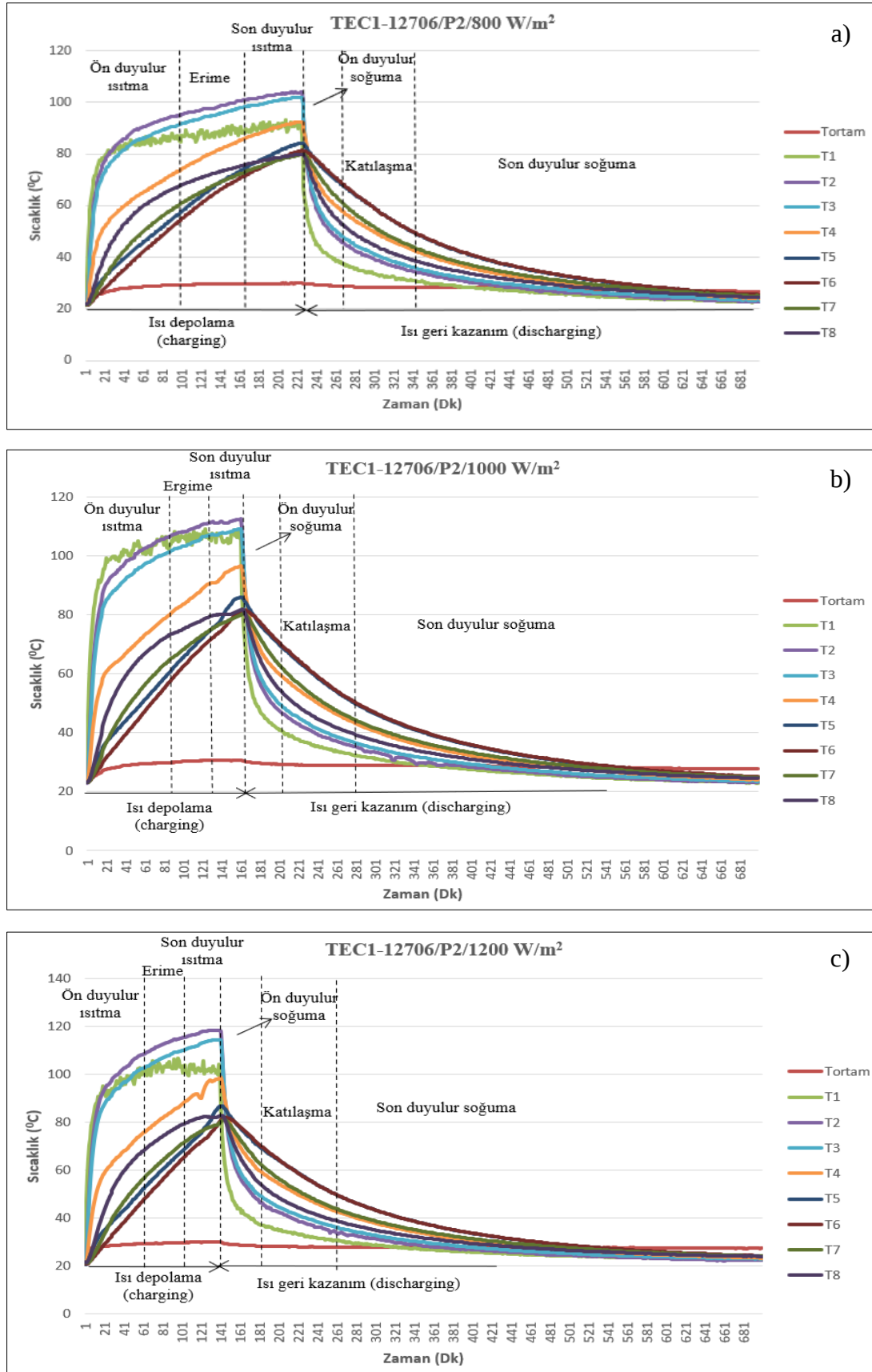
Şekil 7.1. TEC1-12706/P1 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m², b)1000 W/m², c)1200 W/m²



Şekil 7.1. (devam) TEC1-12706/P1 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m², b)1000 W/m², c)1200 W/m²

Şekil 7.2’de TEC1-12706-P2 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ısıtım şiddetleri altında zamana bağlı sıcaklık dağılımları verilmiştir. Bu tasarımda parafin ısıtımına bağlı olarak sırasıyla 224, 167 ve 142 dakikada tamamen erimiştir.

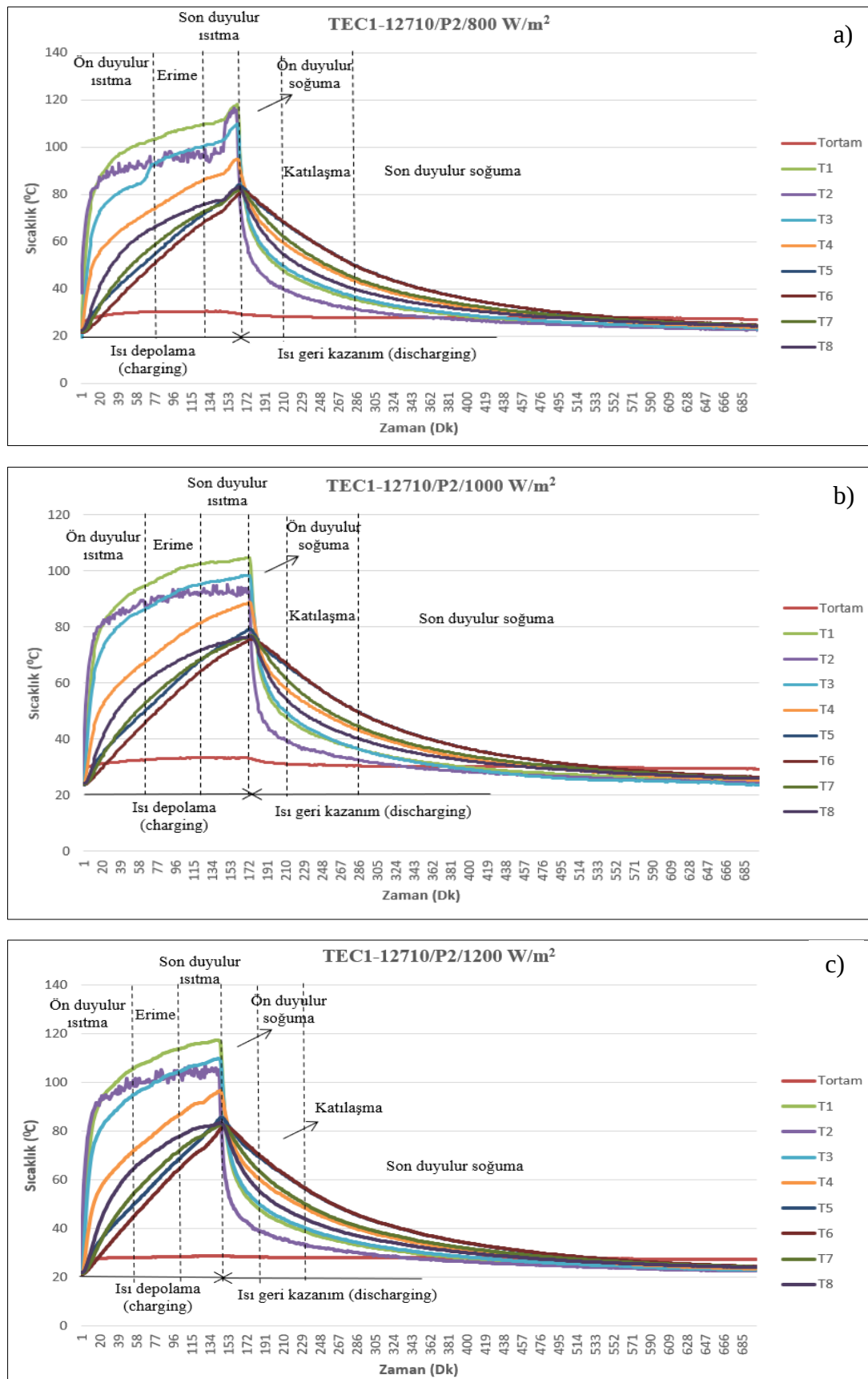
Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ısıtım FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ısıtım kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj süreci; ön duyulur ısıtma, erime ve son duyulur ısıtma kısımlarından oluşmaktadır. ısıtım ilk açıldığı esnada emici plaka ve parafinin sıcaklığı artarak ilk duyulur ısıtma gerçekleşmiştir. Daha sonra parafin erime sıcaklığına geldiğinde gizli ısınma gerçekleşmiştir. Parafin eridikten sonra bir süre daha ısıtım altında parafin sıcaklığı artarak son duyulur ısıtma gerçekleştirilmiştir. ısıtım kesildikten sonra sırasıyla ön duyulur soğutma, katılaşma ve son duyulur soğutma gerçekleşerek ısı enerjisi geri kazanılmıştır. Isının depolanması sürecinde yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı iletim söz konusudur. Benzer şekilde ısı geri kazanım sürecinde de tüm sıcaklık değerleri bir uyum içerisindeyler. Ayrıca ısıtım şiddetinin artması ile emici plaka sıcaklığının yükseldiği ve erime süresinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 7.2. TEC1-12706/P2 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m², b) 1000 W/m², c) 1200 W/m²

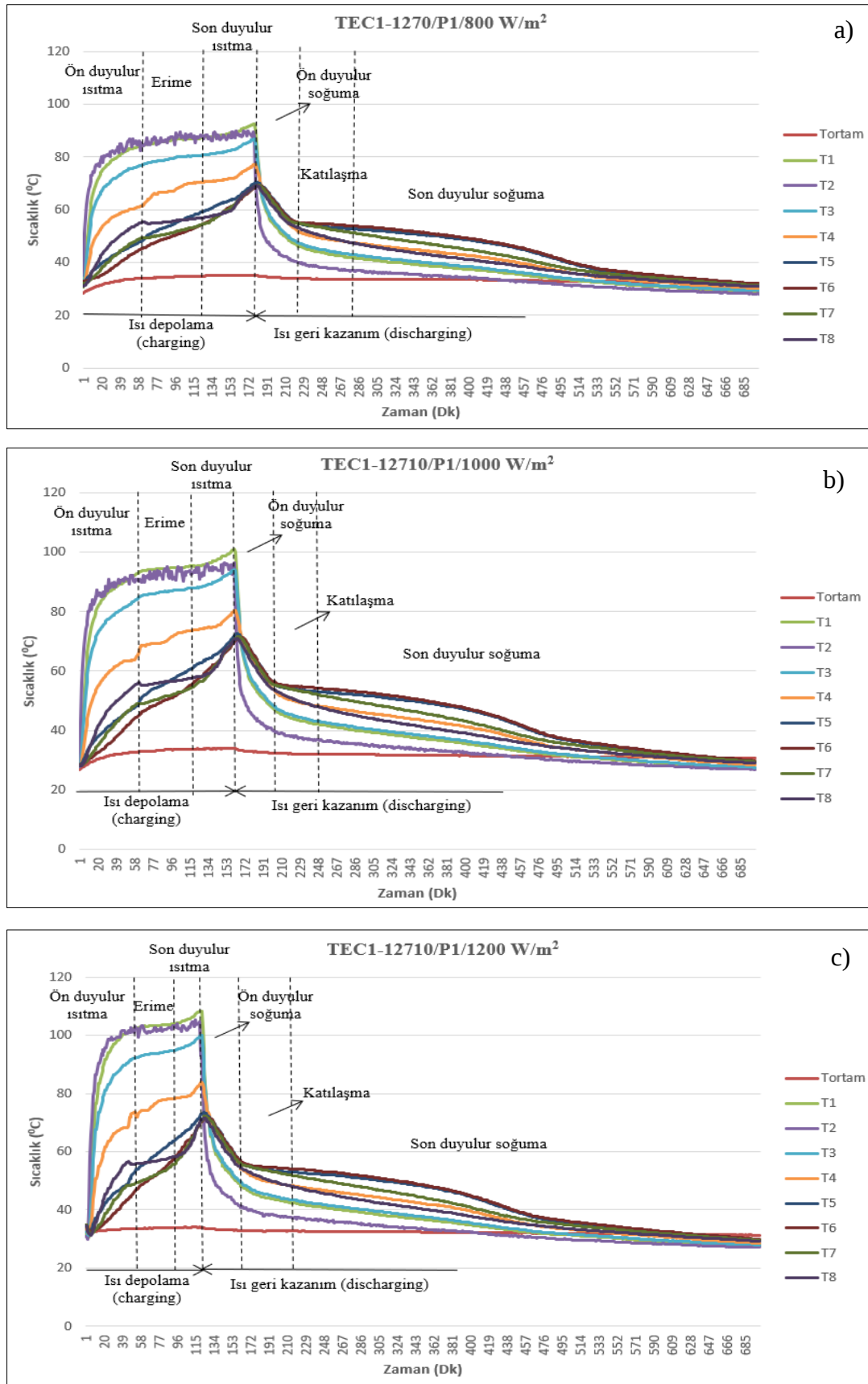
Şekil 7.3'te TEC1-12710-P2 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ışıının şiddetleri altında zamana bağlı sıcaklık dağılımları verilmiştir. Bu tasarımda parafin ışıınma bağlı olarak sırasıyla 162, 146 ve 135 dakikada tamamen erimiştir.

Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ışıının FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ışıının kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj süreci; ön duyulur ısıtma, erime ve son duyulur ısıtma kısımlarından oluşmaktadır. Işıının ilk açıldığı esnada emici plaka ve parafinin sıcaklığı artarak ilk duyulur ısıtma gerçekleşmiştir. Daha sonra parafin erime sıcaklığına geldiğinde gizli ısınma gerçekleşmiştir. Parafin eridikten sonra bir süre daha ışıının altında parafin sıcaklığı artarak son duyulur ısıtma gerçekleştirilmiştir. Işıının kesildikten sonra sırasıyla ön duyulur soğutma, katılaşma ve son duyulur soğutma gerçekleşerek ısı enerjisi geri kazanılmıştır. Isının depolanması sürecinde yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı iletim söz konusudur. Benzer şekilde ısı geri kazanım sürecinde de tüm sıcaklık değerleri bir uyum içerisinde dirler. Ayrıca ışıının şiddetinin artması ile emici plaka sıcaklığının yükseldiği ve erime süresinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 7.4'te TEC2-12710-P1 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ışıının şiddetleri altında zamana bağlı sıcaklık dağılımları verilmiştir. Bu tasarımda parafin ışıınma bağılı olarak sırasıyla 179, 159 ve 145 dakikada tamamen erimiştir.

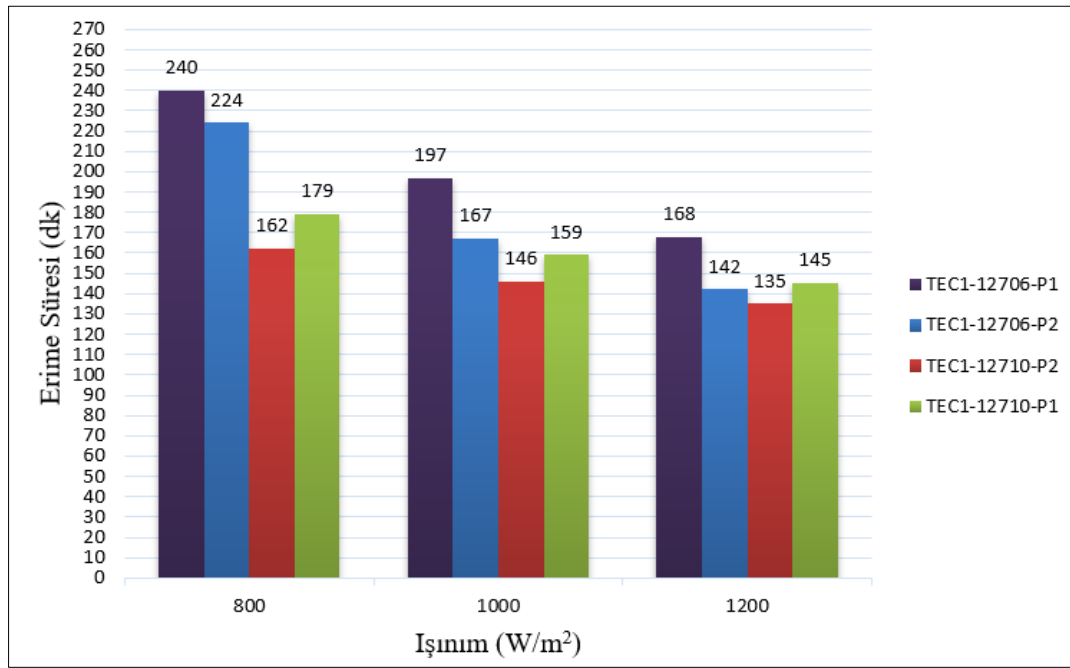
Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ışıının FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ışıının kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj süreci; ön duyulur ısıtma, erime ve son duyulur ısıtma kısımlarından oluşmaktadır. Işıının ilk açıldığı esnada emici plaka ve parafinin sıcaklığı artarak ilk duyulur ısıtma gerçekleşmiştir. Daha sonra parafin erime sıcaklığına geldiğinde gizli ısınma gerçekleşmiştir. Parafin eridikten sonra bir süre daha ışıının altında parafin sıcaklığı artarak son duyulur ısıtma gerçekleştirilmiştir. Işıının kesildikten sonra sırasıyla ön duyulur soğutma, katılaşma ve son duyulur soğutma gerçekleşerek ısı enerjisi geri kazanılmıştır. Isının depolanması sürecinde yukarıdan aşağıya doğru bir kararlı iletim söz konusudur. Benzer şekilde ısı geri kazanım sürecinde de tüm sıcaklık değerleri bir uyum içerisinde dirler. Ayrıca ışıının şiddetinin artması ile emici plaka sıcaklığının yükseldiği ve erime süresinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 7.4. TEC1-12710/P1 tasarımı için zamana bağlı sıcaklık dağılımı a) 800 W/m², b) 1000 W/m², c) 1200 W/m²

7.1.2. Deney parametrelerinin erime süresine etkisi

Deney sonuçlarına göre tasarlanan dört farklı TEJ/TEDÜ'lerde erime süreleri değişkenlik göstermektedir. Erime süresini ısıtım şiddeti, TEJ modeli ve parafin tipi etkilemektedir. Üç farklı güneş ısıtım şiddeti altındaki parafin erime süresinin TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1'e göre karşılaştırılması Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ısıtım şiddetiyle Parafin erime süresinin değişimim karşılaştırılması

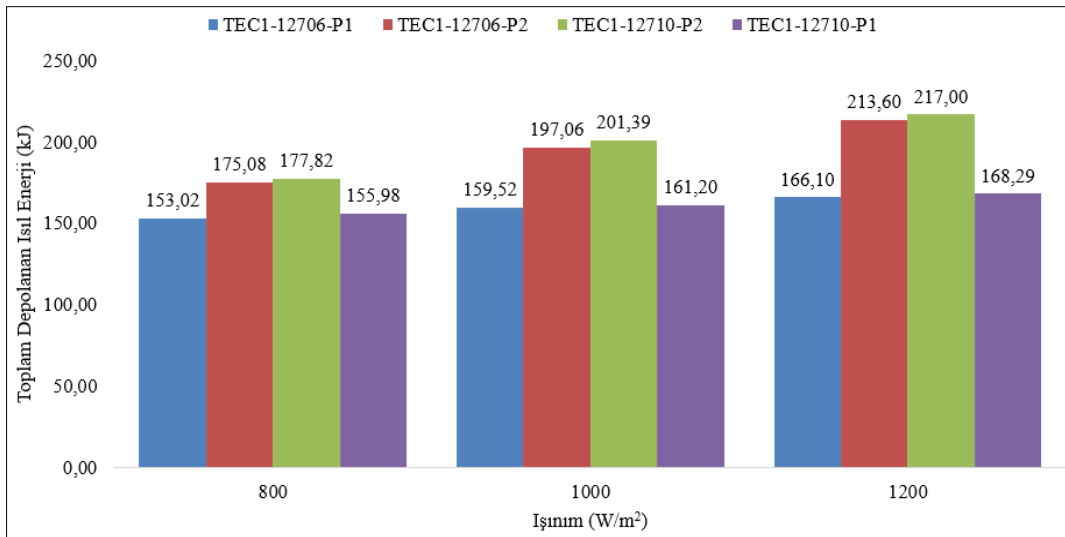
Grafik incelendiğinde en kısa erime süresinin $1200 W/m^2$ ısıtım altındaki TEC-12710-P2 tasarımına ait olduğu, en uzun erime süresinin ise $800 W/m^2$ ısıtım altındaki TEC1-12706-P1 tasarımına ait olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi grafikte ısıtım şiddetinin artması ile erime süresinin azaldığı açıkça görülmektedir.

Aynı ısıtım altında ve aynı model TEJ'lerin kullanıldığı deney sonuçlar karşılaştırıldığında P2'nin P1'e göre daha hızlı eridiği görülmektedir. Benzer şekilde aynı ısıtım altında ve aynı tip parafinlerin kullanıldığı deney sonuçları karşılaştırıldığında TEC1-12710 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımındaki erime süresi TEC1-12706 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımına göre daha düşüktür.

7.1.3. Deney parametrelerinin termal enerji depolama miktarına ve termal enerji depolama verimine (TEDV) etkisi

Deney sonuçlarına göre tasarlanan dört farklı TEJ/TEDÜ'lerde enerji depolama miktarı ve enerji depolama verimi değişkenlik göstermektedir. Toplam depolanan enerji miktarını ısınım şiddeti, TEJ modeli ve parafin tipi etkilemektedir. Her TEJ/TEDÜ tasarımı için toplam depolanan enerji miktarı 800, 1000 ve 1200 W/m² ısınım altında ön duyulur ısı miktarı, gizli ısı miktarı ve son duyulur ısı miktarları toplanarak hesaplanmıştır. Enerji depolama verimi ise erime süresince geçen süre ile ısınım gücü çarpılarak kaynaktan gelen enerji miktarı bulunmuştur daha sonra toplam depolanan enerji miktarı kaynaktan gelen enerji miktarına oranlayarak TEDV'leri hesaplanmıştır.

Üç farklı güneş ısınım şiddeti altındaki toplam depolanan enerji miktarının TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1'e göre karşılaştırılması Şekil 7.6'da verilmiştir.

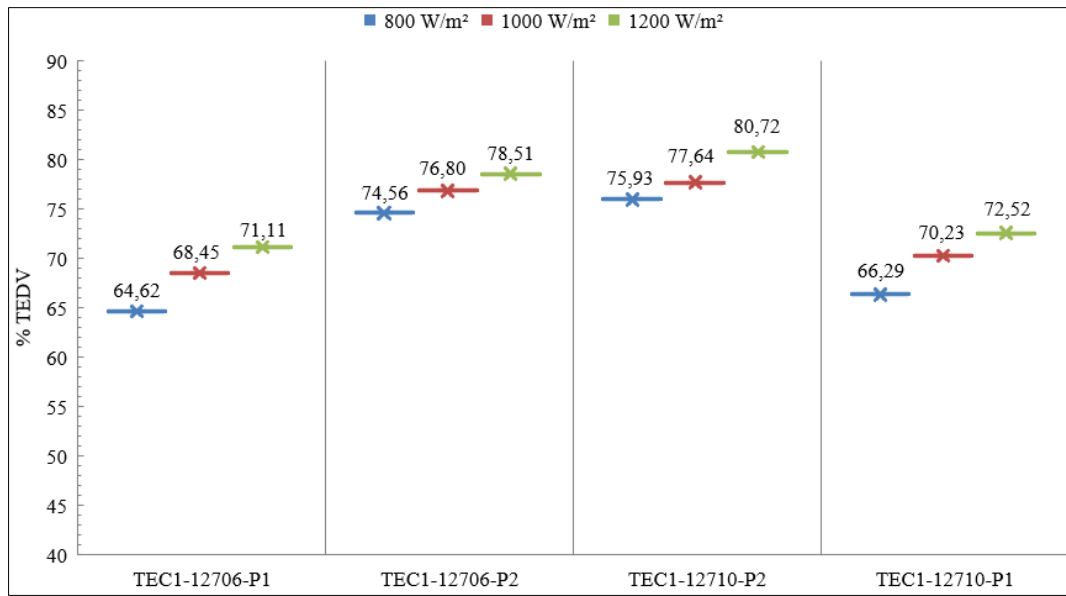


Şekil 7.6. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ısınım şiddetiyle toplam depolanan enerji miktarının karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde en yüksek enerji depolamanın 1200 W/m² ısınım altındaki TEC-12710-P2 tasarımına ait olduğu, en düşük enerji depolama miktarı ise 800 W/m² ısınım altındaki TEC1-12706-P1 tasarımına ait olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi grafikte ısınım şiddetinin artması ile toplam depolanan enerji miktarının da arttığı açıkça görülmektedir.

Aynı ışınlam altında ve aynı model TEJ'lerin kullanıldığı deney sonuçlar karşılaştırıldığında P2, P1'e göre daha yüksek enerji depolama yeteneğine sahiptir. Benzer şekilde aynı ışınlam altında ve aynı tip parafinlerin kullanıldığı deney sonuçları karşılaştırıldığında TEC1-12710 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımındaki toplam depolanan enerji miktarı TEC1-12706 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımına göre daha yüksektir.

Üç farklı güneş ışınlam şiddeti altındaki TEDV'nin TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1'e göre karşılaştırılması Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışınlam şiddetiyle TEDV'lerinin karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde en yüksek TEDV'nin 1200 W/m² ışınlam altındaki TEC-12710-P2 tasarımına ait olduğu, en düşük TEDV ise 800 W/m² ışınlam altındaki TEC1-12706-P1 tasarımına ait olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi grafikte ışınlam şiddetinin artması ile TEDV'nin de artması açıkça görülmektedir.

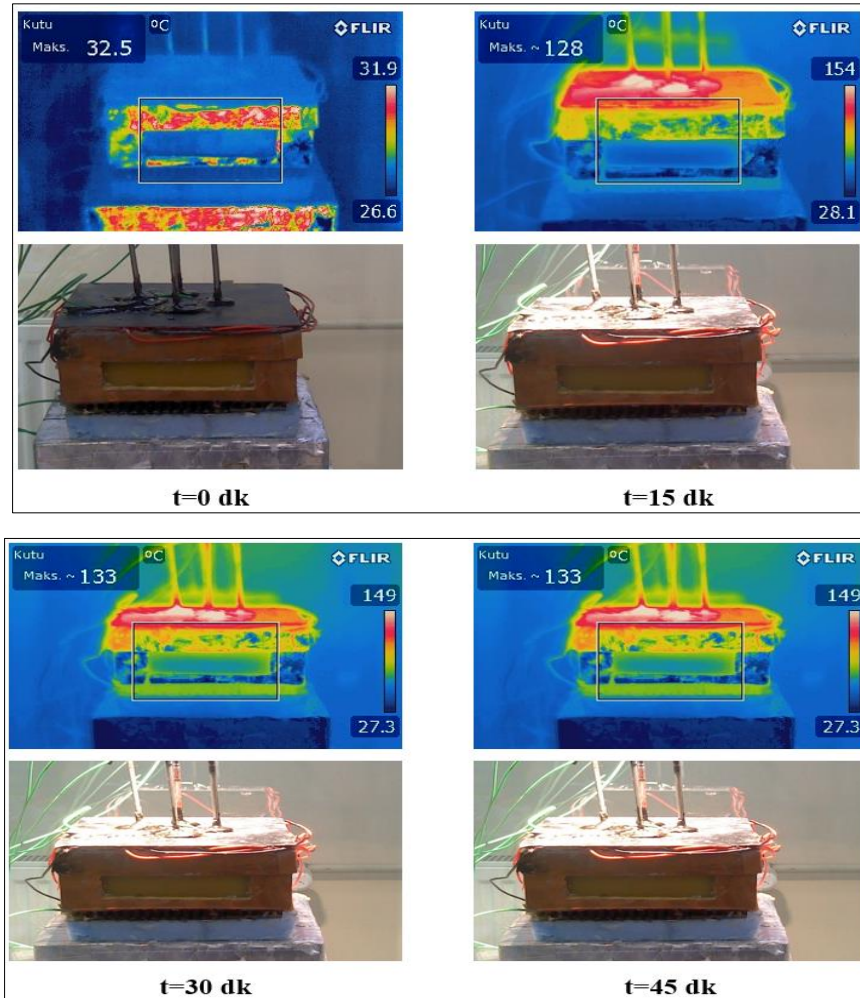
Aynı ışınlam altında ve aynı model TEJ'lerin kullanıldığı deney sonuçlar karşılaştırıldığında P2, P1'e göre TEDV'si daha yüksektir. Benzer şekilde aynı ışınlam altında ve aynı tip parafinlerin kullanıldığı deney sonuçları karşılaştırıldığında TEC1-12710 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımındaki TEDV'si TEC1-12706 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımına göre daha yüksektir.

7.1.4. Termal kamera ile zamana bağı sıcaklık değişimini gözlemleme

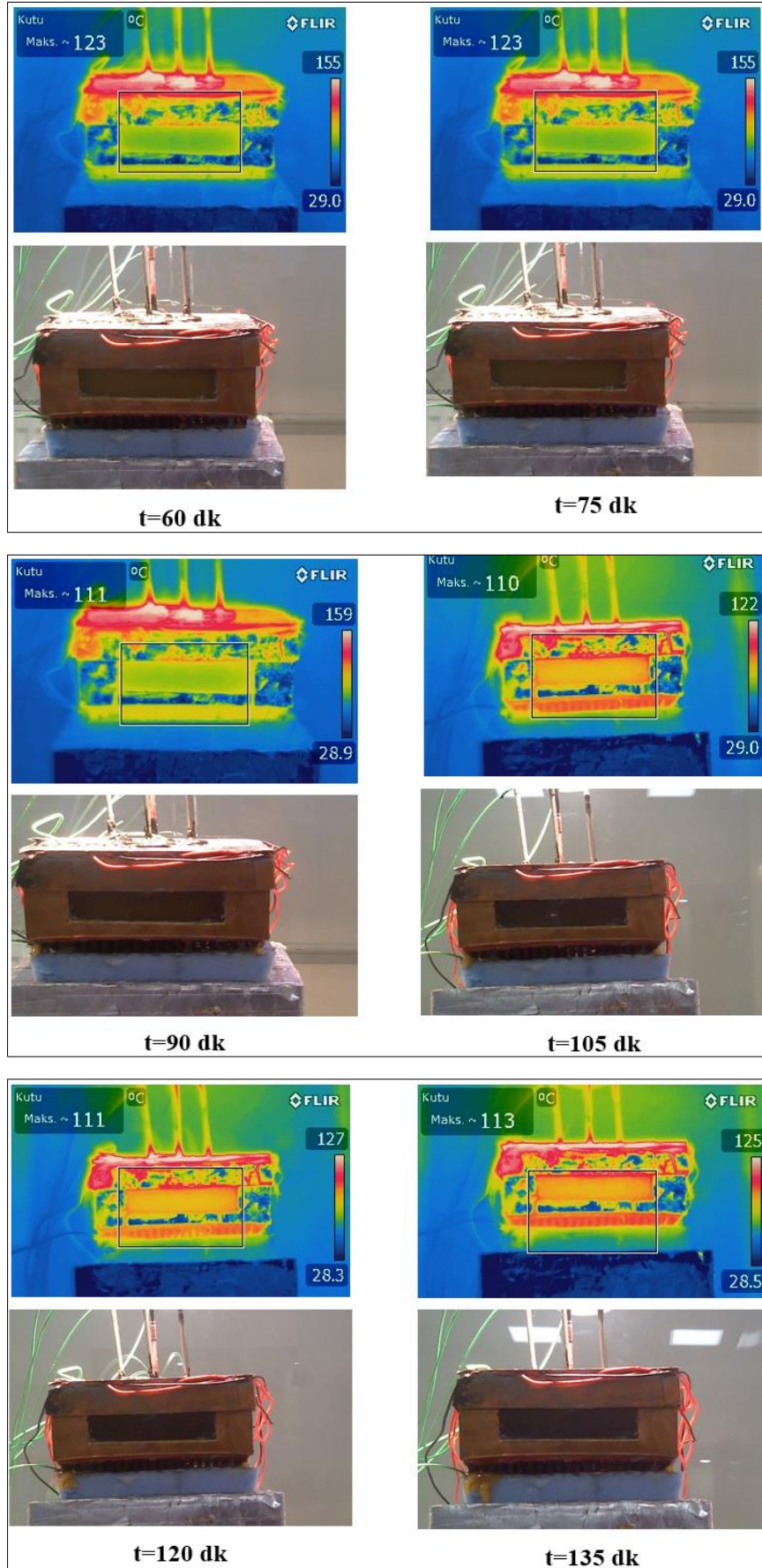
Deney analizleri sonucunda en yüksek performans TEC1-12710/P2 TEDÜ/TEJ tasarımından 1200 W/m^2 ışınlım altında elde edilmiştir. Bu tasarımın şarj süresince 15 dakikalık, deşarj süresince 30 dakikalık periyotlarla termal kamera görüntüleri ve eş zamanlı gerçek görüntüleri alınmıştır.

Termal kamera görüntüleri alabilmek amacıyla TEDÜ'nün bir yüzeyi cam ile kaplanmıştır. Bu camdan parafinin erime süreci ve katılaşma süreci gözlemlenmiştir. Termal kamera görüntüleri FLIR marka T440 model termal kamera kullanılmıştır.

Işık kaynağının açılmasıyla şarj süreci başlayarak $t=0$ dk'dan $t=135$ dk'ya kadar 15 dakikalık periyotlarla alınan görüntüler Resim 7.1 ve Resim 7.2'de verilmiştir.

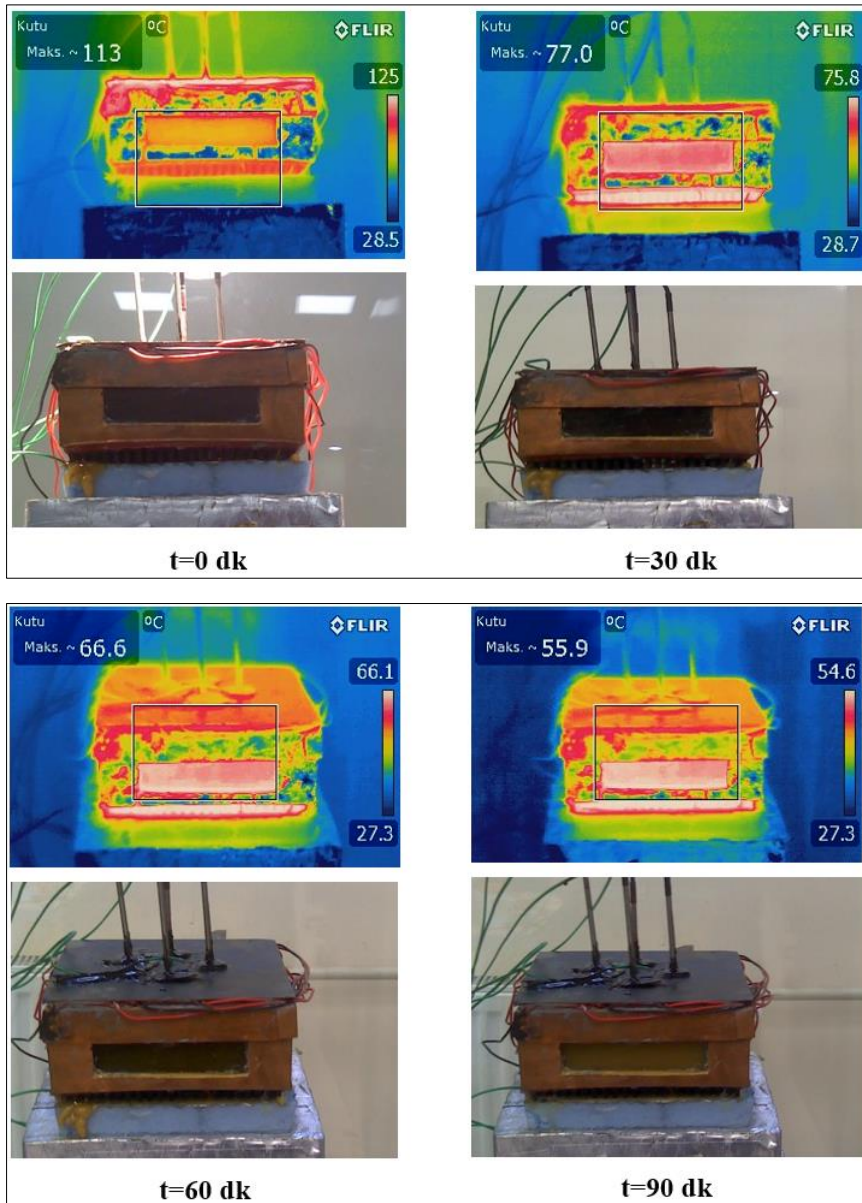


Resim 7.1. Şarj süreci termal kamera görüntüleri (0-45 dk)

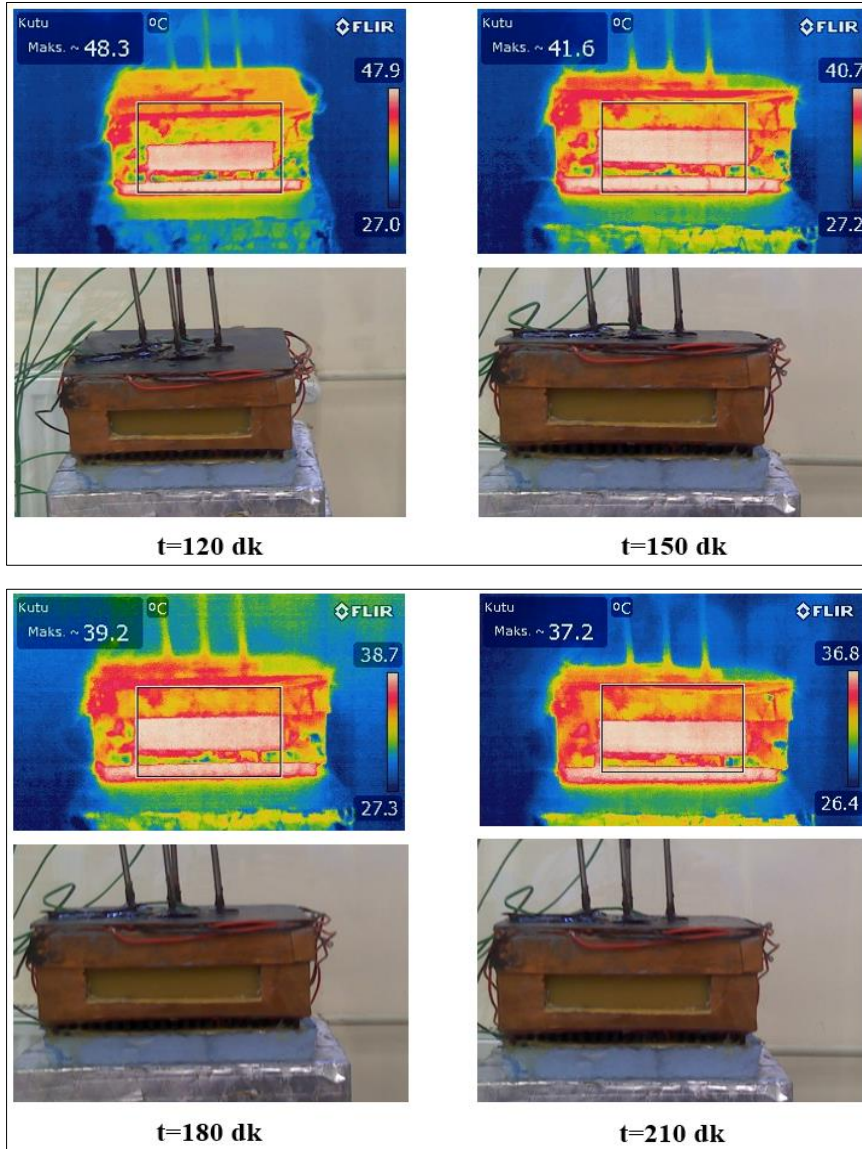


Resim 7.2. Şarj süreci termal kamera görüntüleri (60-135 dk)

Resim 7.1 ve Resim 7.2’de görüleceği gibi ısıtım TEDÜ’ye temas ettikten sonra emici plaka hızlı bir şekilde ısınmıştır. Şarj süresince emici plakadan aşağıya doğru ve bakır yüzeylerden TEDÜ içerisine doğru parafin erime profili oluşmuştur. Parafin tamamen eridikten sonra ($t=135$ dk) kızılötesi lamba kapatılmıştır ve deşarj süreci başlamıştır. Işık kaynağının kapanmasıyla deşarj süreci başlayarak $t=0$ dk’dan $t=210$ dk’ya kadar 30 dakikalık periyotlarla alınan görüntüler Resim 7.3 ve Resim 7.4’te verilmiştir. Deşarj sürecinde bakır plaka hızlı bir şekilde soğumuştur ve TEDÜ içerisindeki parafin sıcaklığı bakır plaka sıcaklığından daha yüksek olmuştur.



Resim 7.3. Deşarj süreci termal kamera görüntüleri (0-90 dk)



Resim 7.4. Deşarj süreci termal kamera görüntüleri (90-210 dk.)

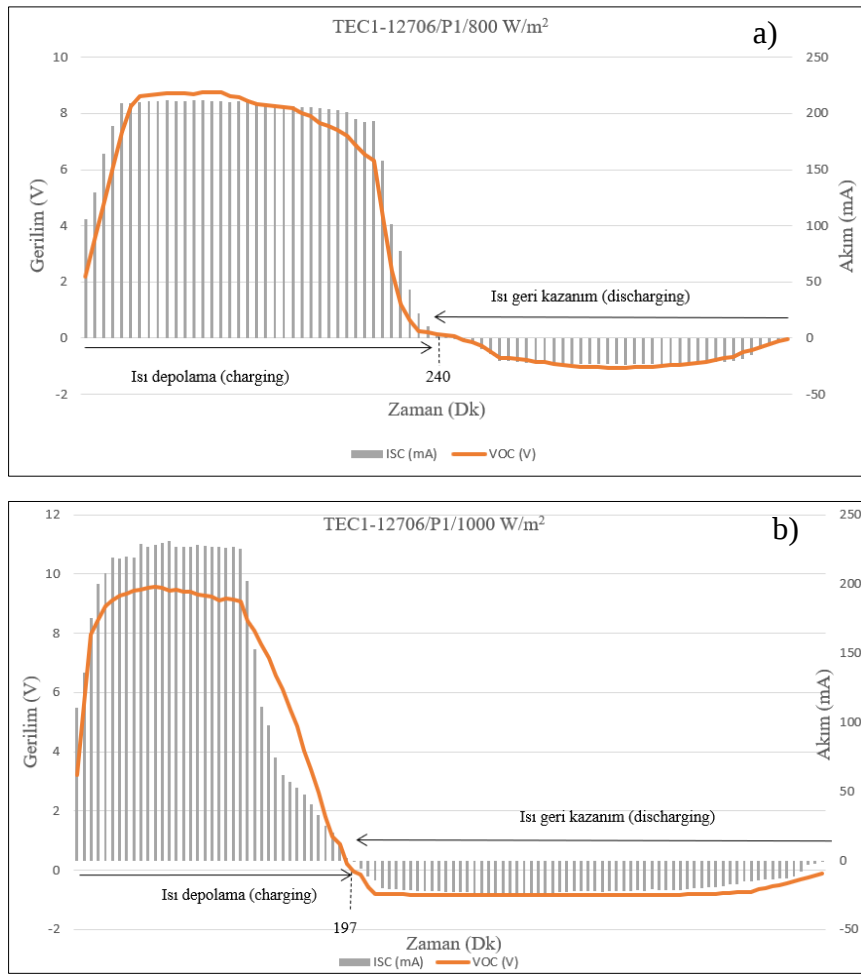
7.1.5. Zamana bağlı V_{OC} ve I_{SC} değişimi

Dört farklı deney tasarımı için farklı ışınlam değerleri altındaki zamana bağlı açık devre gerilim (V_{OC}) ve kısa devre akım (I_{SC}) değişimleri grafik çizilerek incelenmiştir.

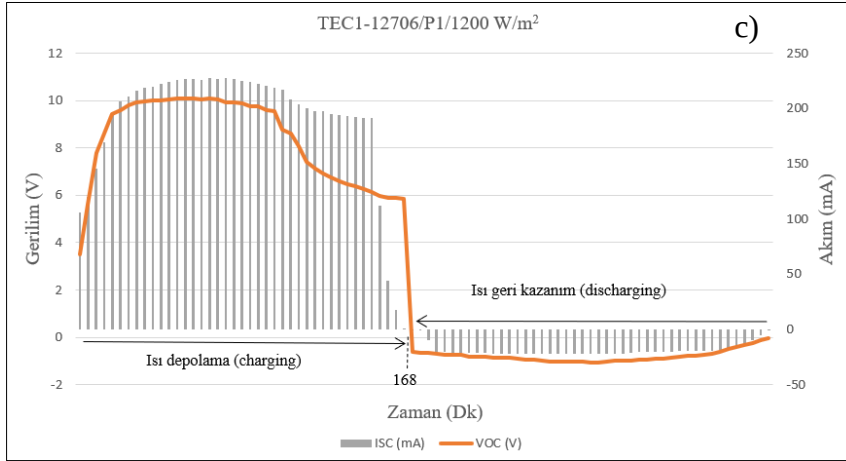
Şekil 7.8’de TEC1-12706-P1 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ışınlam şiddetleri altında zamana bağlı V_{OC} - I_{SC} dağılımları verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ışınlam FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ışınlam kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı

yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj aşamasından deşarj aşamasına geçerken sıcak taraf ile soğuk taraf yer değiştiğinden dolayı iki aşamadaki akım yönleri terstir. Bu tasarımda parafin ısıtımına bağlı olarak sırasıyla 240., 197. ve 168. dakikadan sonra deşarj sürecine geçerek elektrik üretimi için depolanan ısı enerjisi kullanılmaya başlamıştır.

Şarj aşamasında TEJ'in sıcak tarafı ile soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkı daha çok olduğu için bu aşamada ölçülen gerilim ve akım değerleri daha yüksektir. Ayrıca ısıtım şiddetinin artması ile de ölçülen açık devre ve kısa devre akımının da arttığı görülmektedir.



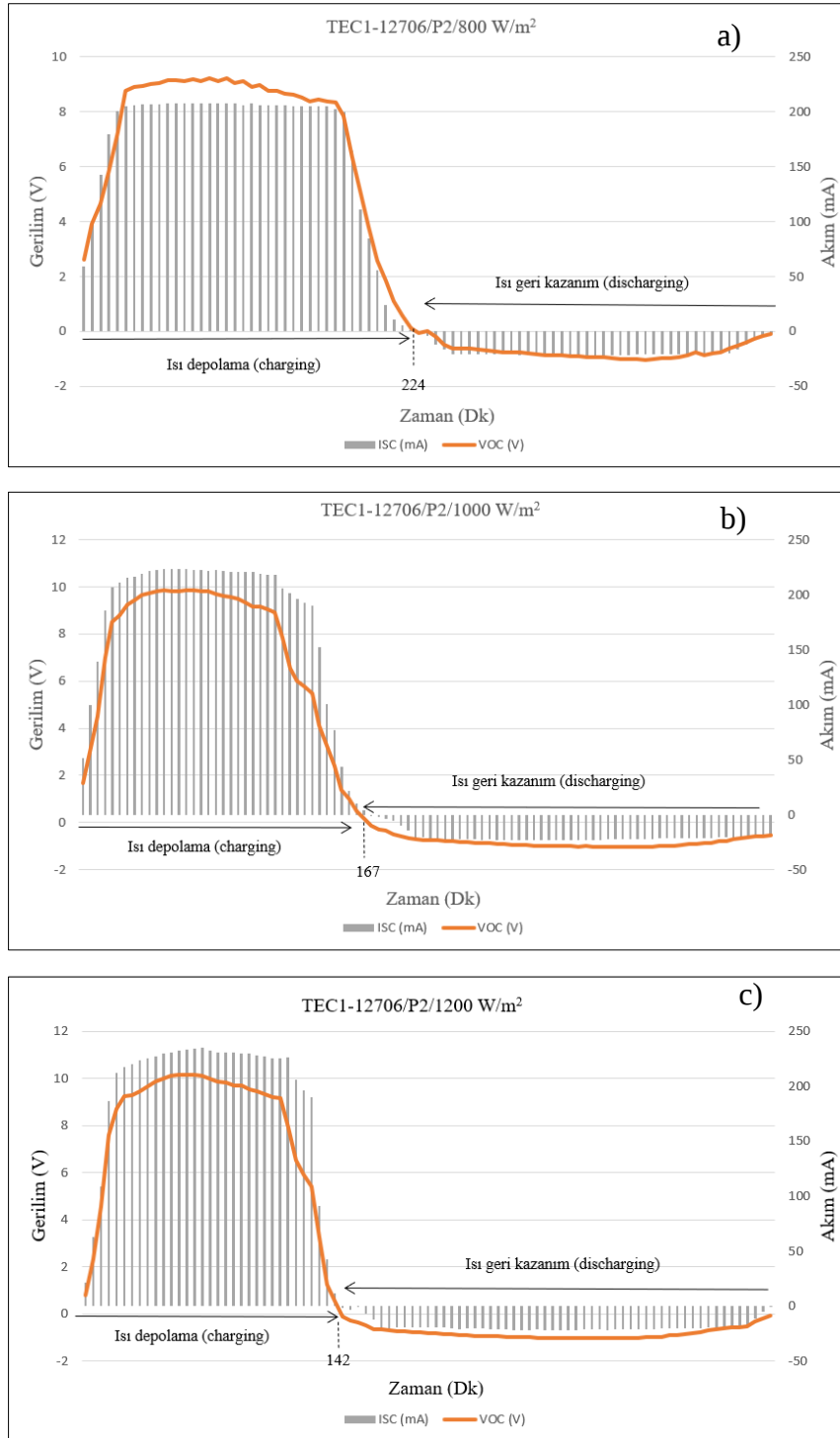
Şekil 7.8. TEC1-12706/P1 tasarımı için zamana bağlı VOC ve Isc a) 800 W/m², b) 1000 W/m², c) 1200 W/m²



Şekil 7.8. (devam) TEC1-12706/P1 tasarımı için zamana bağlı V_{OC} ve I_{sc} a) 800 W/m^2 , b) 1000 W/m^2 , c) 1200 W/m^2

Şekil 7.9’da TEC1-12706-P2 TEJ/TEDÜ tasarımının 800 , 100 ve 1200 W/m^2 ışınlam şiddetleri altında zamana bağlı V_{oc} - I_{sc} dağılımları verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ışınlam FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ışınlam kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj aşamasından deşarj aşamasına geçerken sıcak taraf ile soğuk taraf yer değiştiğinden dolayı iki aşamadaki akım yönleri terstir. Bu tasarımda parafin ışınlamaya bağlı olarak sırasıyla 224., 167. ve 142. dakikadan sonra deşarj sürecine geçerek elektrik üretimi için depolanan ısı enerjisi kullanılmaya başlamıştır.

Şarj aşamasında TEJ’in sıcak tarafı ile soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkı daha çok olduğu için bu aşamada ölçülen gerilim ve akım değerleri daha yüksektir. Ayrıca ışınlam şiddetinin artması ile de ölçülen açık devre ve kısa devre akımının da arttığı görülmektedir.

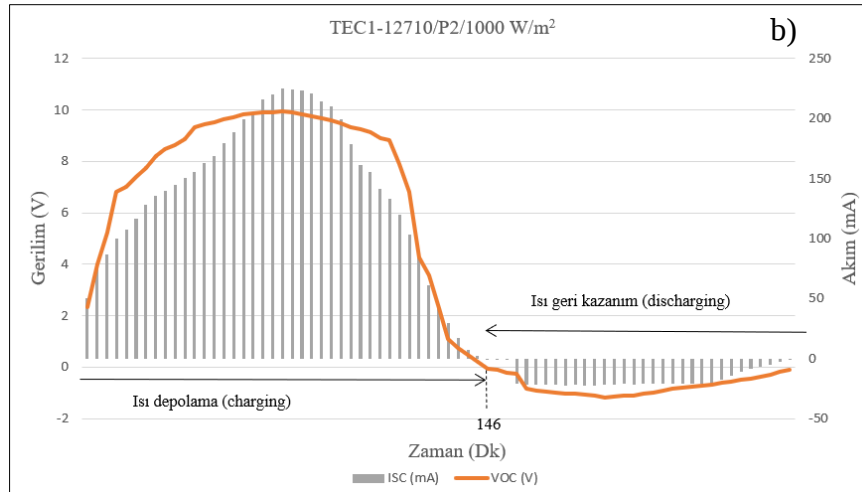
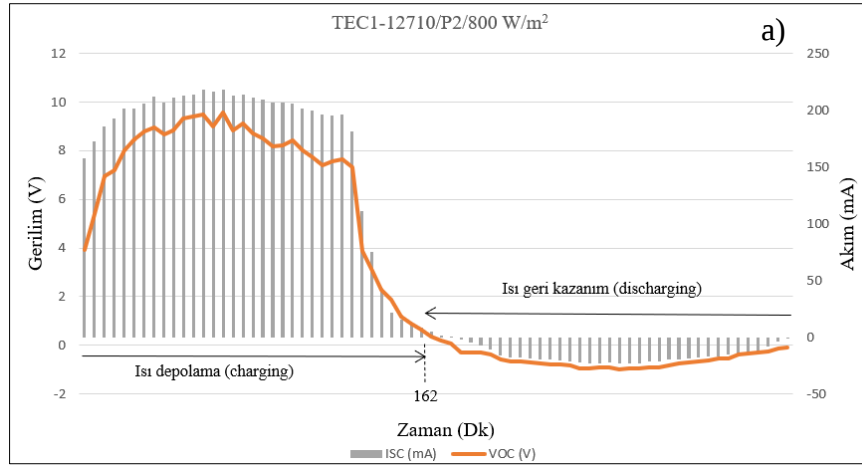


Şekil 7.9. TEC1-12706/P2 tasarımı için zamana bağlı Voc ve Isc a) 800 W/m², b)1000 W/m², c)1200 W/m²

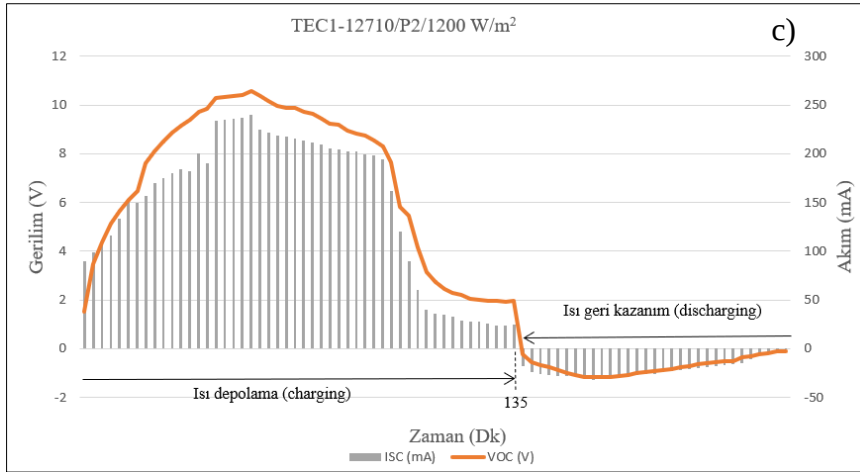
Şekil 7.10'da TEC1-12710-P2 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ışınlam şiddetleri altında zamana bağlı Voc-Isc dağılımları verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ışınlam FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada

ise ışınlm kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarak deşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj aşamasından deşarj aşamasına geçerken sıcak taraf ile soğuk taraf yer değıştığından dolayı iki aşamadaki akım yönleri terstir. Bu tasarımda parafin ışınlma bağılı olarak sırasıyla 162., 146. ve 135. dakikadan sonra deşarj sürecine geçerek elektrik üretimi için depolanan ısı enerjisi kullanılmaya başlamıştır.

Şarj aşamasında TEJ'in sıcak tarafı ile soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkı daha çok olduğu için bu aşamada ölçülen gerilim ve akım değerleri daha yüksektir. Ayrıca ışınlm şiddetinin artması ile de ölçülen açık devre ve kısa devre akımının da arttığı görülmektedir.



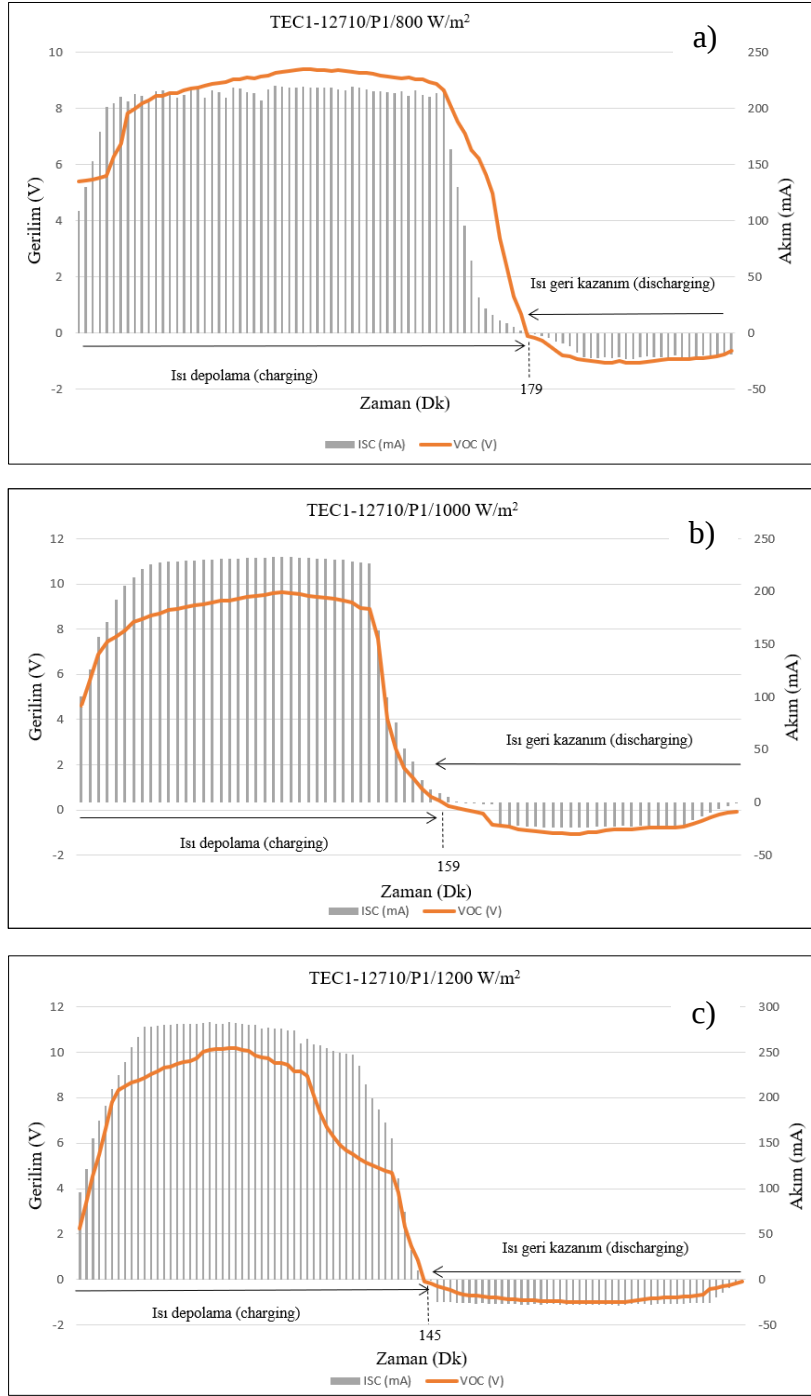
Şekil 7.10. TEC1-12706/P2 tasarımı için zamana bağılı Voc ve Isc a) 800 W/m², b)1000 W/m², c)1200 W/m²



Şekil 7.10. (devam) TEC1-12710/P2 tasarımı için zamana bağlı Voc ve Isc a) 800 W/m², b)1000 W/m², c)1200 W/m²

Şekil 7.11’de TEC1-12710-P1 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 100 ve 1200 W/m² ışıınım şiddetleri altında zamana bağlı Voc-Isc dağılımları verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yapay güneş kaynağından gelen ışıınım FDM olarak kullanılan parafini eriterek şarj işlemi gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ise ışıınım kapandıktan sonra parafinde depolanan ısı enerji zamanla ısı geri kazanımı yapılarakdeşarj süreci gerçekleşmiştir. Şarj aşamasındandeşarj aşamasına geçerken sıcak taraf ile soğuk taraf yer değiştiğinden dolayı iki aşamadaki akım yönleri terstir. Bu tasarımda parafin ışıınıma bağlı olarak sırasıyla 179., 159. ve 145. dakikadan sonradeşarj sürecine geçerek elektrik üretimi için depolanan ısı enerjisi kullanılmaya başlamıştır.

Şarj aşamasında TEJ’in sıcak tarafı ile soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkı daha çok olduğu için bu aşamada ölçülen gerilim ve akım değerleri daha yüksektir. Ayrıca ışıınım şiddetinin artması ile de ölçülen açık devre ve kısa devre akımının da arttığı görülmektedir.



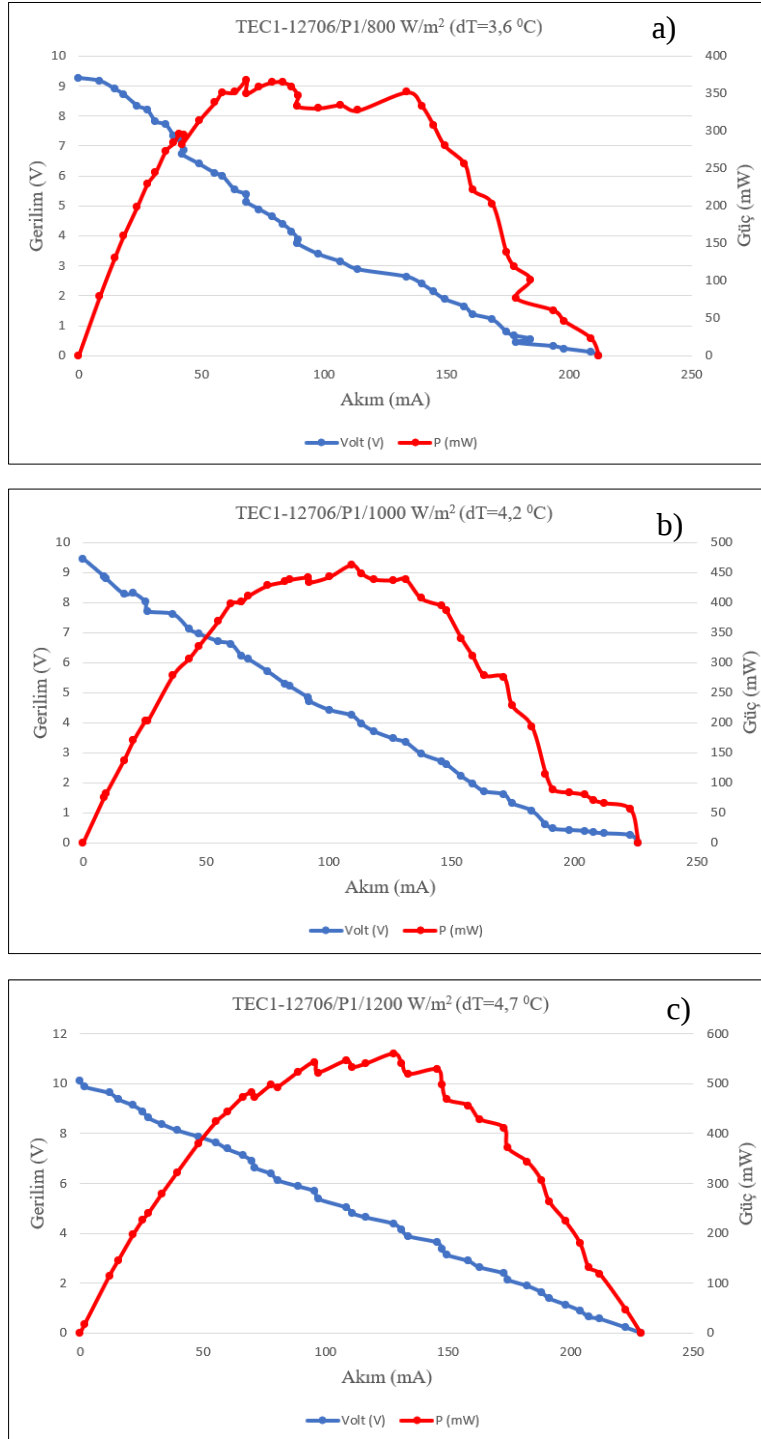
Şekil 7.11. TEC1-12710/P1 tasarımı için zamana bağlı Voc ve Isc a) 800 W/m², b)1000 W/m², c)1200 W/m²

7.1.6. TEJ/TEDÜ tasarımlarının I-V ve P-V eğrileri

Dört farklı TEJ/TEDÜ tasarımında TEJ performansını incelemek amacıyla 0-200 Ω arasında bir değişken yük bağlanarak TEJ'in şarj sürecindeki I-V ve P-V karakteristik eğrileri çıkartılmıştır. Yük değeri 0 Ω 'dan 200 Ω 'a kadar 5 Ω kademesinde değiştirilerek

akım ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Her tasarımın 800, 1000 ve 1200 W/m² ışınlam altındaki ölçümleri yapılarak değerler I-V ve P-V eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler ile TEJ'in açık devre gerilimi (V_{OC}), kısa devre akımı (I_{SC}), maksimum gerilim değeri (V_m), maksimum akım değeri (I_m) ve maksimum güç miktarı (P_m) tespit edilmiştir.

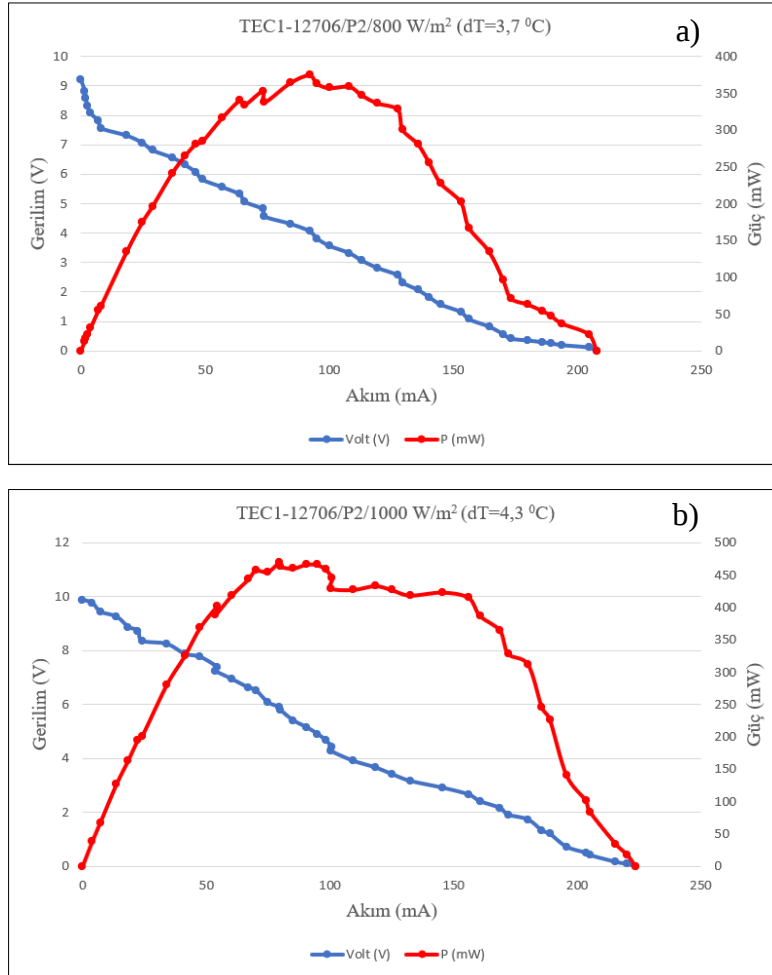
Şekil 7.12 'de TEC1-12706-P1 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 1000 ve 1200 W/m² ışınlam şiddetleri altındaki I-V ve P-V eğrileri verilmiştir. Işınlamaya bağlı olarak TEJ'in soğuk ve sıcak yüzeyi arasındaki sıcaklık farklı değişmektedir. Bu sıcaklık farkları ışınlam şiddetine göre sırasıyla 3,6 °C, 4,2 °C ve 4,7 °C olmuştur. Eğride görüleceği üzere TEC1-12706-P1 tasarımında 800 W/m² ışınlam altında V_{OC} 9,27 V, I_{SC} 212,1 mA, maksimum gerilim V_m 5,38 V ve maksimum akım değeri I_m 68,3 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,367 W olarak hesaplanmıştır. 1000 W/m² ışınlam altında V_{OC} 9,46 V, I_{SC} 226,09 mA, maksimum gerilim V_m 4,24 V ve maksimum akım değeri I_m 109,2 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,463 W olarak hesaplanmıştır. 1200 W/m² ışınlam altında ise V_{OC} 10,1 V, I_{SC} 228,6 mA, maksimum gerilim V_m 4,38 V ve maksimum akım değeri I_m 127,8 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,559 W olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ışınlam şiddetinin artması ile TEJ tarafından üretilen gücün arttığı da açık bir şekilde görülmektedir.



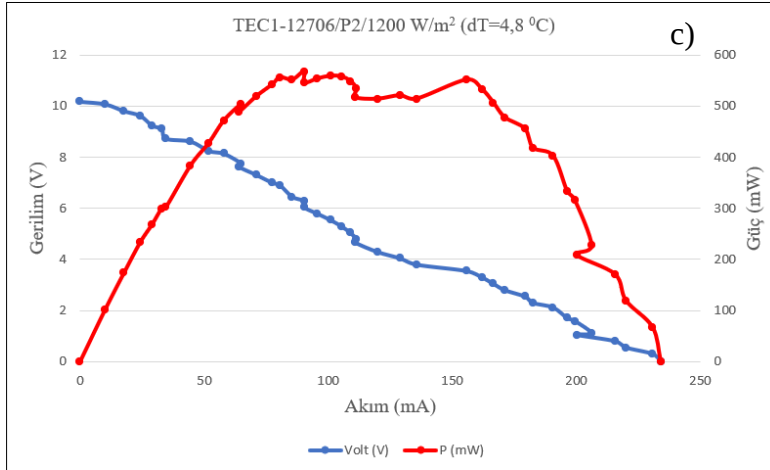
Şekil 7.12. TEC1-12706/P1 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m², b) 1000 W/m², c) 1200 W/m²

Şekil 7.13 'te TEC1-12706-P2 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 1000 ve 1200 W/m² ışıma şiddetleri altındaki I-V ve P-V eğrileri verilmiştir. Işıma bağlı olarak TEJ'in soğuk ve sıcak yüzeyi arasındaki sıcaklık farklı değişmektedir. Bu sıcaklık farkları ışıma şiddetine göre sırasıyla 3,7 °C, 4,3 °C ve 4,8 °C olmuştur. Eğride görüleceği üzere TEC1-12706-P2

tasarımında 800 W/m^2 ışınlım altında V_{OC} 9,21 V, I_{SC} 207,9 mA, maksimum gerilim V_m 4,07 V ve maksimum akım değeri I_m 92,1 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,374 W olarak hesaplanmıştır. 1000 W/m^2 ışınlım altında V_{OC} 9,87 V, I_{SC} 223,6 mA, maksimum gerilim V_m 5,91 V ve maksimum akım değeri I_m 79,5 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,469 W olarak hesaplanmıştır. 1200 W/m^2 ışınlım altında ise V_{OC} 10,18 V, I_{SC} 234,1 mA, maksimum gerilim V_m 6,29 V ve maksimum akım değeri I_m 90,3 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,567 W olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ışınlım şiddetinin artması ile TEJ tarafından üretilen gücün arttığı da açık bir şekilde görülmektedir.

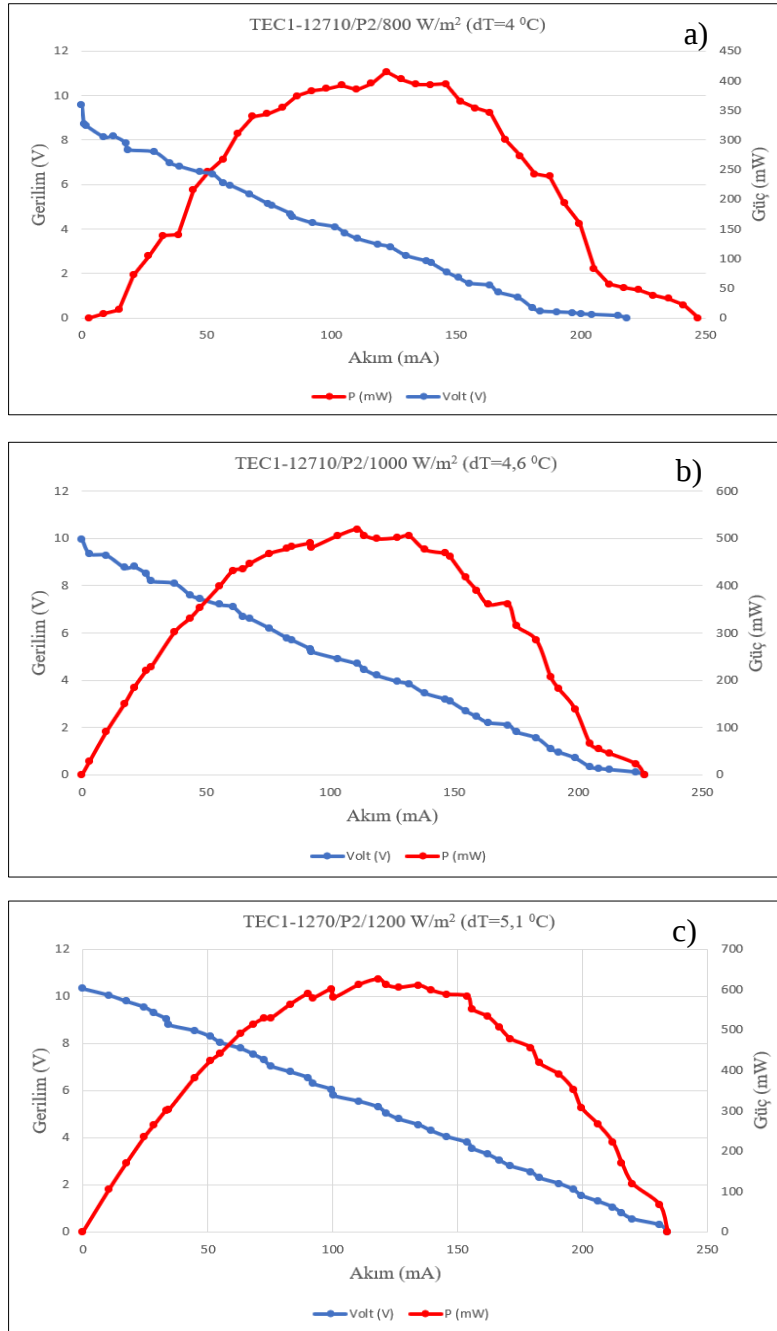


Şekil 7.13. TEC1-12706/P2 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m^2 , b) 1000 W/m^2 , c) 1200 W/m^2



Şekil 7.13. (devam) TEC1-12706/P2 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m², b) 1000 W/m², c) 1200 W/m²

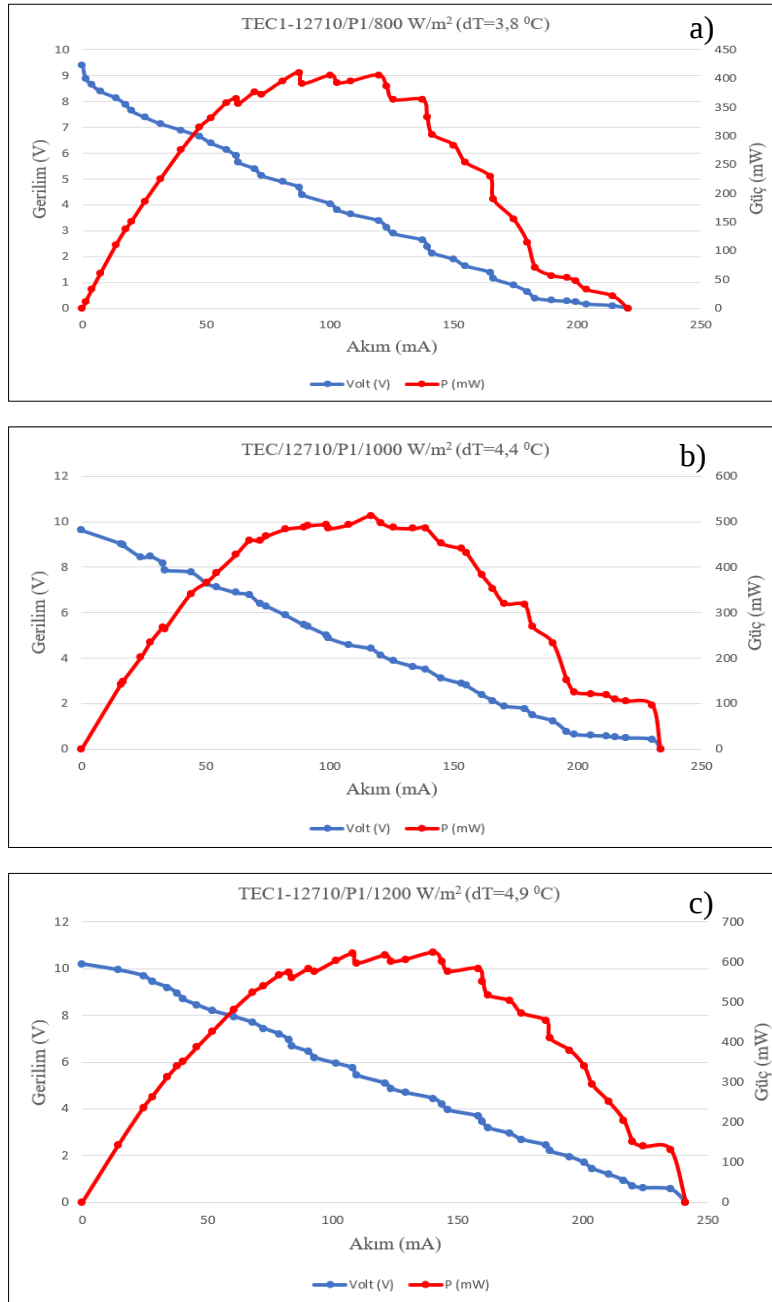
Şekil 7.14 'te TEC1-12710-P2 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 1000 ve 1200 W/m² ısıtım şiddetleri altındaki I-V ve P-V eğrileri verilmiştir. Isınımına bağlı olarak TEJ'in soğuk ve sıcak yüzeyi arasındaki sıcaklık farklı değişmektedir. Bu sıcaklık farkları ısıtım şiddetine göre sırasıyla 4 °C, 4,6 °C ve 5,1 °C olmuştur. Eğride görüleceği üzere TEC1-12710-P2 tasarımında 800 W/m² ısıtım altında V_{OC} 9,59 V, I_{SC} 218,39 mA, maksimum gerilim V_m 4,09 V ve maksimum akım değeri I_m 101,5 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,415 W olarak hesaplanmıştır. 1000 W/m² ısıtım altında V_{OC} 9,95 V, I_{SC} 226,6 mA, maksimum gerilim V_m 4,69 V ve maksimum akım değeri I_m 110,8 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,519 W olarak hesaplanmıştır. 1200 W/m² ısıtım altında ise V_{OC} 10,32 V, I_{SC} 234,1 mA, maksimum gerilim V_m 5,29 V ve maksimum akım değeri I_m 118,3 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,625 W olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ısıtım şiddetinin artması ile TEJ tarafından üretilen gücün arttığı da açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.14. TEC1-12710/P2 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m², b) 1000 W/m², c) 1200 W/m²

Şekil 7.15 'te TEC1-12710-P1 TEJ/TEDÜ tasarımının 800, 1000 ve 1200 W/m² ışıma şiddetleri altındaki I-V ve P-V eğrileri verilmiştir. Işıma bağlı olarak TEJ'in soğuk ve sıcak yüzeyi arasındaki sıcaklık farklı değişmektedir. Bu sıcaklık farkları ışıma şiddetine göre sırasıyla 3,8 °C, 4,4 °C ve 4,9 °C olmuştur. Eğride görüleceği üzere TEC1-12710-P1 tasarımında 800 W/m² ışıma altında V_{OC} 9,39 V, I_{SC} 220,5 mA, maksimum gerilim V_m 4,69 V ve maksimum akım değeri I_m 87,5 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı

olarak P_m 0,410 W olarak hesaplanmıştır. 1000 W/m^2 ışınlam altında V_{OC} 9,63 V, I_{SC} 233,39 mA, maksimum gerilim V_m 5,74 V ve maksimum akım değeri I_m 116,5 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,513 W olarak hesaplanmıştır. 1200 W/m^2 ışınlam altında ise V_{OC} 10,19 V, I_{SC} 241,1 mA, maksimum gerilim V_m 5,74 V ve maksimum akım değeri I_m 108,1 mA olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak P_m 0,620 W olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ışınlam şiddetinin artması ile TEJ tarafından üretilen gücün arttığı da açık bir şekilde görülmektedir.

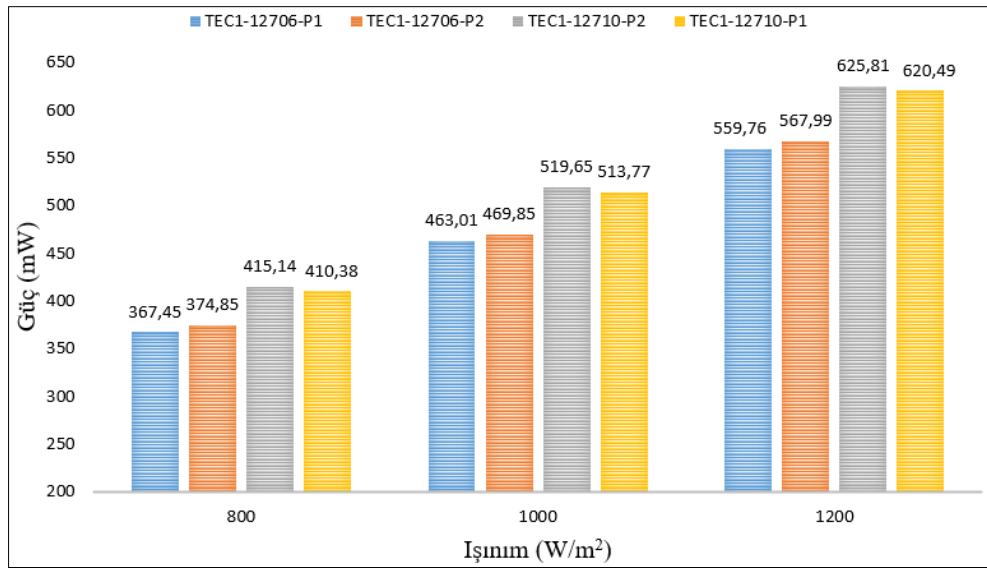


Şekil 7.15. TEC1-12710/P1 tasarımı için I-V ve P-V eğrileri a) 800 W/m^2 , b) 1000 W/m^2 , c) 1200 W/m^2

7.1.7. Deney parametrelerinin TEJ güç üretim miktarına ve enerji dönüşüm verimine (EDV) etkisi

Deney sonuçlarına göre tasarlanan dört farklı TEJ/TEDÜ'lerde TEJ güç üretim miktarı ve enerji dönüşüm verimi değişkenlik göstermektedir. TEJ tarafından üretilen güç üretimini ışıyım şiddeti, TEJ modeli ve parafın tipi etkilemektedir. TEJ tarafından üretilen güç miktarı her TEJ/TEDÜ tasarımı için 800, 1000 ve 1200 W/m² ışıyım altında hesaplanmıştır. Enerji dönüştürme verimi hesaplanma aşamasında ise öncelikle şarj süresince kaynaktan metrekare başına gelen gücü emici alanı ile çarparak TEDÜ/TEJ'e isabet eden güç miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra TEJ'den üretilen güç miktarı kaynaktan gelen güç miktarına oranlayarak EDV'leri hesaplanmıştır.

Üç farklı güneş ışıyım şiddeti altında TEJ'lerin üretmiş oldukları güç miktarının TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1'e göre karşılaştırılması Şekil 7.16'da verilmiştir.

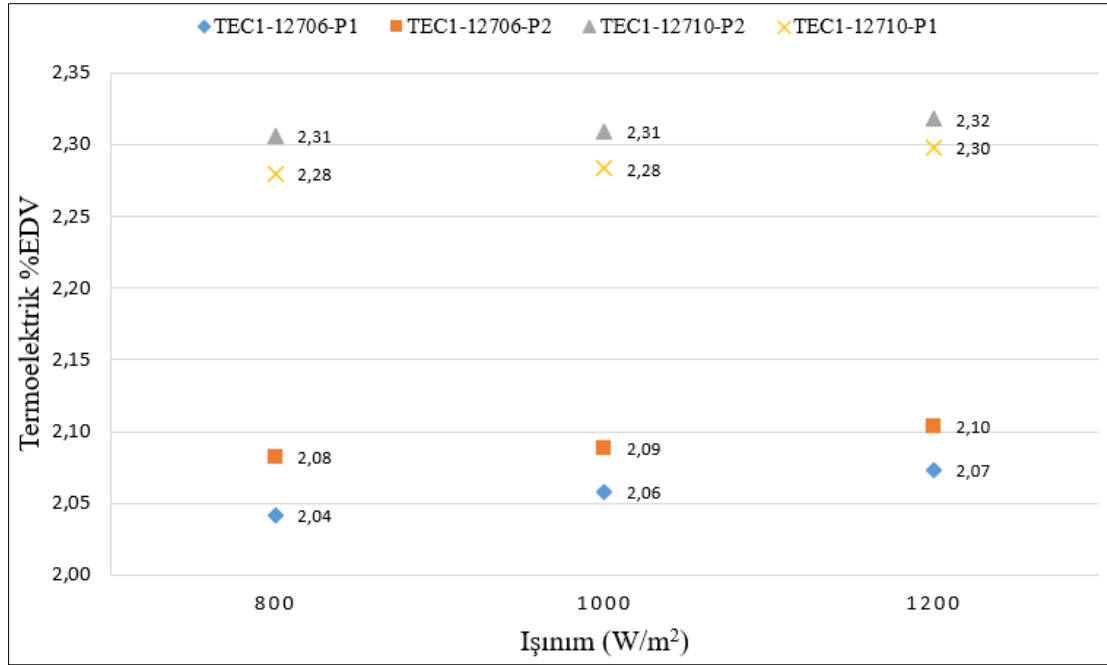


Şekil 7.16. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışıyım şiddetiyle TEJ'ler tarafından üretilen güç miktarının karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde TEJ tarafından üretilen en yüksek elektrik gücü 1200 W/m² ışıyım altındaki TEC-12710-P2 tasarımına ait olduğu, TEJ tarafından üretilen en düşük elektrik gücü ise 800 W/m² ışıyım altındaki TEC1-12706-P1 tasarımına ait olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi grafikte ışıyım şiddetinin artması ile TEJ tarafından üretilen elektrik gücünün de arttığı açıkça görülmektedir.

Aynı ışınlam altında ve aynı model TEJ'lerin kullanıldığı deney sonuçlar karşılaştırıldığında P2'nin kullanıldığı tasarımlar P1'in kullanıldığı tasarımlara göre daha yüksek TEJ elektrik üretim gücüne sahiptir. Benzer şekilde aynı ışınlam altında ve aynı tip parafinlerin kullanıldığı deney sonuçları karşılaştırıldığında TEC1-12710 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımındaki elektrik üretim gücü TEC1-12706 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımına göre daha yüksektir.

Üç farklı güneş ışınlam şiddeti altındaki EDV'nin TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1'e göre karşılaştırılması Şekil 7.17'de verilmiştir.



Şekil 7.17. TEC1-12706-P1, TEC1-12706-P2, TEC1-12710-P2 ve TEC1-12710-P1 için ışınlam şiddetiyle EDV'lerinin karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde en yüksek EDV'nin 1200 W/m² ışınlam altındaki TEC-12710-P2 tasarımına ait olduğu, en düşük EDV'nin ise 800 W/m² ışınlam altındaki TEC1-12706-P1 tasarımına ait olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi grafikte ışınlam şiddetinin artması ile EDV'nin de artması açıkça görülmektedir.

Aynı ışınlam altında ve aynı model TEJ'lerin kullanıldığı deney sonuçlar karşılaştırıldığında P2 in kullanıldığı tasarımlarda, P1'in kullanıldığı tasarımlara göre EDV'si daha yüksektir. Benzer şekilde aynı ışınlam altında ve aynı tip parafinlerin kullanıldığı deney sonuçları

karşılaştırıldığında TEC1-12710 model TEJ'in EDV'si TEC1-12706 model TEJ'e göre daha yüksektir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında termoelektrik jeneratör (TEJ) ile bütünleştirilmiş bir faz değıştiren malzeme (FDM) tabanlı termal enerji depolama ünitesi (TEDÜ) yapay güneş ışıınımlı altında deneysel olarak incelenmiştir. Deney kapsamında bakır malzemeden 15x15x5 cm boyutlarında bir TEDÜ tasarlanmıştır. TEDÜ üzerine birbirine seri bağlanmış dokuz adet TEJ ve TEJ'lerin üzerine de 15x15x1 cm boyutlarında bir emici plaka montajı yapılarak bütünleşik bir TEJ/TEDÜ tasarlanmıştır. Tasarımda TEDÜ içerisinde FDM olarak farklı termofiziksel özelliklere sahip iki tip parafin ve farklı güç değerlerine sahip iki model TEJ kullanılmıştır. Farklı parametrelerle TEC1-12706/P1, TEC1-12706/P2, TEC1-12710/P1 ve TEC1-12710/P2 olmak üzere dört farklı TEJ/TEDÜ tasarımı yapılmıştır. Her tasarım 800, 1000 ve 1200 W/m² ışıınımlı şiddetleri altında şarj-deşarj süreçleri incelenerek değışken parametrelerin; parafinin erime süresi, termal enerji depolama ve TEJ/TEDÜ performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

8.2. Öneriler

1. Güneş ışıınımlı FDM ile ısııl formda depolanabilmektedir. Depolama sürecinde tasarlanan TEJ/TEDÜ ile elektrik üretilmiştir. ışıınımlı kapandıktan sonra da TEJ/TEDÜ depolanan ısııl enerjiyi kullanılarak elektrik üretimine devam etmiştir. Bu alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanımı için umut vadeden bir sonuçtur.
2. Kızılötesi lamba tarafından 800, 1000 ve 1200 W/m² olmak üzere üç farklı ışıınımlı şiddeti ile deneylere gerçekleştirilmiştir. ışıınımlı şiddetinin artmasıyla FDM'in erime süresinin azaldığı, TEDV'in ve EDV'nin arttığı görülmüştür.
3. En düşük FDM erime süresi 135 dakika ile TEC1-12710/P2 tasarımında görülmüştür.
4. En uzun FDM erime süresi 240 dakika ile TEC1-12706/P1 tasarımında görülmüştür.
5. Aynı ışıınımlı altında ve aynı model TEJ'lerin kullanıldığı deney sonuçları karşılaştırıldığında P2'nin P1'e göre daha hızlı eridiğı görülmüştür.
6. Aynı ışıınımlı altında ve aynı tip parafinlerin kullanıldığı deney sonuçları karşılaştırıldığında TEC1-12710 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımındaki erime süresi TEC1-12706 model TEJ'in kullanıldığı deney tasarımına göre daha düşüktür.

7. En yüksek V_{OC} 10,56 V, I_{SC} 240 mA ile 1200 W/m^2 ışınlım altında TEC1-12710/P2 tasarımında görülmüştür.
8. Deşarj süresince elde edilen V_{OC} ve I_{SC} şarj süresince elde edilen gücün %11,08'i kadar olmuştur.
9. En düşük TEDV %64,62 ile TEC1-12706/P1 tasarımında görülürken en yüksek TEDV %80,72 ile TEC1-12710/P2 tasarımında görülmüştür.
10. En düşük EDV %2,04 ile TEC1-12706/P1 tasarımında görülürken en yüksek EDV %2,32 ile TEC1-12710/P2 tasarımında görülmüştür.

Yapılan tez çalışmasında umut vadeden sonuçlar elde edilmiştir. Bütünleştirilmiş TEJ/TEDÜ verimlerinin artırılması amacıyla farklı tasarımlar ile yapılmış daha fazla incelemeye ihtiyaç vardır. TEJ'ler ve TED teknolojileri hala araştırılması gereken bir konudur. Konu ile ilgili farklı çalışmalar için aşağıdaki öneriler verilmiştir.

1. Isıl verimi iyileştirilmiş farklı tip FDM'ler kullanılabilir.
2. TEDÜ farklı geometrilerde ve farklı malzemeler kullanılarak tasarlanabilir.
3. FDM'in ısı iletkenliğini arttırmak için nano parçacıklı FDM veya metal köpüklü FDM karışımları geliştirilebilir.
4. Daha yüksek EDV'ye sahip TEJ'ler kullanılabilir.
5. Farklı boyutlarda ve farklı yarıiletken malzemeler kullanılarak TEJ'ler üretilebilir.
6. Düşük elektrik direnç ve yüksek termal iletkenliğe sahip yeni model TEJ'ler geliştirilebilir.
7. Farklı tasarımlar yapılarak nümerik analizler yapılabilir.
8. Soğutma sistemlerinde bütünleşik TEJ/FDM kullanılabilir.
9. Fotovoltaik (FV) panellere TEJ/TEDÜ entegre edilerek hibrit bir elektrik sistemi geliştirilebilir ve FV panellerin verimleri iyileştirilebilir.
10. Farklı MPPT yöntemleri kullanarak TEJ'in maksimum verimde çalışması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. BP Energy. (2021). Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy. *BP Energy outlook 2021*, 70, 8–20.
2. İnternet: Brent Petrol Vadeli İşlemleri İnteraktif Grafiği. Web: <https://tr.investing.com/commodities/brent-oil-advanced-chart> adresinden 21 Mart 2022’de alınmıştır.
3. IEA (2020), *Global Energy Review 2020*, IEA, Paris, 9–17. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020> adresinden erişildi.
4. Maamoun, N., Kennedy, R., Jin, X. ve Urpelainen, J. (2020). Identifying coal-fired power plants for early retirement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126, 109833.
5. DNV AS. (2021). Energy Transition Outlook 2021 Executive Summary. A global and regional forecast to 2050., 40. <https://eto.dnv.com/2021> adresinden erişildi.
6. Shafiee, S. ve Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished. *Energy Policy*, 37(1), 181–189.
7. Cozzi, L. (International E. A. ve Gould, T. (International E. A. (2021). *World Energy Outlook 2021*, 1–386. www.iea.org/weo adresinden erişildi.
8. Yük tevzi dairesi başkanlığı. (2022). *Kurulu Güç Raporu -Mart 2022*. 1–2. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari> adresinden erişildi.
9. Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Dai, S. (2021). Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9.
10. Ochieng, A. O., Megahed, T. F., Ookawara, S. ve Hassan, H. (2022). Comprehensive review in waste heat recovery in different thermal energy-consuming processes using thermoelectric generators for electrical power generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 134–154.
11. Mamur, H., Dilmaç, Ö. F., Begum, J. ve Bhuiyan, M. R. A. (2021a). Thermoelectric generators act as renewable energy sources. *Cleaner Materials*, 2, 100030.
12. Dinçer, İ. ve Rosen, M. A. (2010). *Thermal Energy Storage* (İkinci Baskı). Ontario: Wiley, 83–129.
13. Nekoonam, S. ve Ghasempour, R. (2022). Modeling and optimization of a thermal energy storage unit with cascaded PCM capsules in connection to a solar collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(PC), 102197.

14. Liu, X., Chen, M., Xu, Q., Gao, K., Dang, C., Li, P., ... Ding, Y. (2022). Bamboo derived SiC ceramics-phase change composites for efficient, rapid, and compact solar thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 240, 111726.
15. Zhang, S., Li, Z., Wang, H., Tian, L., Jin, Y., Alston, M. ve Yan, Y. (2022). Component-dependent thermal properties of molten salt eutectics for solar thermal energy storage: Experiments, molecular simulation and applications. *Applied Thermal Engineering*, 209, 118333.
16. Çinici, O. K., Canlı, M. E., Çakıroğlu, R. ve Acır, A. (2022). Optimization of melting time of solar thermal energy storage unit containing spring type heat transfer enhancer by Taguchi based grey relational analysis. *Journal of Energy Storage*, 47.
17. Acır, A. ve Canlı, M. E. (2018). Investigation of fin application effects on melting time in a latent thermal energy storage system with phase change material (PCM). *Applied Thermal Engineering*, 144, 1071–1080.
18. IRENA. (2020). *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage> adresinden erişildi.
19. Koçak, B., Fernandez, A. I. ve Paksoy, H. (2020). Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects. *Solar Energy*, 209, 135–169.
20. Li, G. (2016). Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 897–923.
21. Hu, N., Li, Z. R., Xu, Z. W. ve Fan, L. W. (2022). Rapid charging for latent heat thermal energy storage: A state-of-the-art review of close-contact melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111918.
22. Tao, Y. B. ve He, Y. L. (2018). A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 245–259.
23. Rostami, S., Afrand, M., Shahsavari, A., Sheikholeslami, M., Kalbasi, R., Aghakhani, S., ... Oztop, H. F. (2020). A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, 211, 118698.
24. Borhani, S. M., Hosseini, M. J., Pakrouh, R., Ranjbar, A. A. ve Nourian, A. (2021a). Performance enhancement of a thermoelectric harvester with a PCM/Metal foam composite. *Renewable Energy*, 168, 1122–1140.
25. Borhani, S. M., Hosseini, M. J., Pakrouh, R., Ranjbar, A. A. ve Nourian, A. (2021b). Performance enhancement of a thermoelectric harvester with a PCM/Metal foam composite. *Renewable Energy*, 168, 1122–1140.

26. Regin, A. F., Solanki, S. C. ve Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438–2458.
27. Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., ... Karri, R. R. (2019). Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 20, 100399.
28. Canlı, M. E. (2017). *Güneş Işınımı Altında Faz Değiştiren Malzemenin Isı Depolama Davranışının Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-20.
29. Ibrahim Dincer, M. A. E. (2018). Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems. *Green Energy and Technology* Springer International Publishing.
30. Dinesh, S. N., Saminathan, R., Patil, M. M., Ramchandra Baviskar, P., Hadidi, H., Vignesh, S. ve Manoj Kumar, P. (2022). Investigating the single pass baffled solar air heater (SAH) with an organic PCM (OPCM). *Materials Today: Proceedings*.
31. Cabeza, L. F., Ibáñez, M., Solé, C., Roca, J. ve Nogués, M. (2006). Experimentation with a water tank including a PCM module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(9), 1273–1282.
32. Mettawee, E. B. S. ve Assassa, G. M. R. (2006). Experimental study of a compact PCM solar collector. *Energy*, 31(14), 2958–2968.
33. Palacio, M., Rincón, A. ve Carmona, M. (2020). Experimental comparative analysis of a flat plate solar collector with and without PCM. *Solar Energy*, 206, 708–721.
34. Acir, A., Canlı, M. E., Ata, I., Uzun, S. ve Tanürün, H. E. (2021). Experimental investigation of thermal energy storage efficiency using fin application with phase change material (pcm) under solar radiation. *Heat Transfer Research*, 52(6), 21–39.
35. Hamed, M., Fallah, A. ve Brahim, A. ben. (2017). Numerical analysis of an integrated storage solar heater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(13), 8721–8732.
36. Nishad, S. ve Krupa, I. (2022). Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(PC), 102241.
37. Afshan, M. E., Selvakumar, A. S., Velraj, R. ve Rajaraman, R. (2020). Effect of aspect ratio and dispersed PCM balls on the charging performance of a latent heat thermal storage unit for solar thermal applications. *Renewable Energy*, 148, 876–888.
38. Liu, A., Zou, J., Wu, Z., Wang, Y., Tian, Y. ve Xie, H. (2020). Enhancing the performance of TEG system coupled with PCMs by regulating the interfacial thermal conduction. *Energy Reports*, 6, 1942–1949.

39. Naderi, M., Ziapour, B. M. ve Gendeshmin, M. Y. (2021). Improvement of photocells by the integration of phase change materials and thermoelectric generators (PV-PCM-TEG) and study on the ability to generate electricity around the clock. *Journal of Energy Storage*, 36, 102384.
40. Tuoi, T. T. K., Toan, N. van ve Ono, T. (2020). Theoretical and experimental investigation of a thermoelectric generator (TEG) integrated with a phase change material (PCM) for harvesting energy from ambient temperature changes. *Energy Reports*, 6, 2022–2029.
41. Darkwa, J., Calautit, J., Du, D. ve Kokogianakis, G. (2019). A numerical and experimental analysis of an integrated TEG-PCM power enhancement system for photovoltaic cells. *Applied Energy*, 248, 688–701.
42. Jaworski, M., Bednarczyk, M. ve Czachor, M. (2016). Experimental investigation of thermoelectric generator (TEG) with PCM module. *Applied Thermal Engineering*, 96, 527–533.
43. Wang, J., Song, X., Ni, Q., Li, X. ve Meng, Q. (2021). Experimental investigation on the influence of phase change material on the output performance of thermoelectric generator. *Renewable Energy*, 177, 884–894.
44. Liao, X., Liu, Y., Ren, J., Guan, L., Sang, X., Wang, B., ... Ma, T. (2020). Investigation of a double-PCM-based thermoelectric energy-harvesting device using temperature fluctuations in an ambient environment. *Energy*, 202, 117724.
45. Aneke, M. ve Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350–377.
46. Yekini Suberu, M., Wazir Mustafa, M. ve Bashir, N. (2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 499–514.
47. Koohi-Fayegh, S. ve Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
48. Lefebvre, D. ve Tezel, F. H. (2017). A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 116–125.
49. Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H. ve Matseelar, H. S. C. (2014). A review of available methods and development on energy storage; Technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 532–545.
50. Kalaiselvam, S. ve Parameshwaran, R. (2014a). Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications. *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications*, 1–430.

51. Sadeghi, G. (2022). Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. *Energy Storage Materials*, 46, 192–222.
52. Roman Domański Marek Rebo w, M. J. (1995). Thermal Energy Storage Problems. *Journal of Power Technologies*, 79(79), 25.
53. Ugur, B. ve Tezel, F. H. (2013). Thermal Energy Storage in Adsorbent Beds. *M.A.Sc. Thesis University of Ottawa, Ottawa, Canada*.
54. Kalaiselvam, S. ve Parameshwaran, R. (2014b). Thermal Energy Storage Technologies. *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, 57–64.
55. Khatod, K. J., Katekar, V. P. ve Deshmukh, S. S. (2022). An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104622.
56. Kalaiselvam, S. ve Parameshwaran, R. (2014c). Sensible Thermal Energy Storage. *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, 65–81.
57. Hailu, G. (2019). Seasonal Solar Thermal Energy Storage. *Thermal Energy Battery with Nano-enhanced PCM içinde* (C. 11, s. 13). IntechOpen.
58. Sharma, A., Tyagi, V. v., Chen, C. R. ve Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
59. Oró, E., Gracia, A. de, Castell, A., Farid, M. M. ve Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, 99, 513–533.
60. Shakeel, M., Sari, A. ve Kothari, R. (2022). Solar Energy Materials and Solar Cells A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications : Development , characterization , thermal and chemical stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 234, 111392.
61. Bruno, F., Belusko, M., Liu, M. ve Tay, N. H. S. (2015). Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Woodhead Publishing Limited.
62. Tyagi, V. v., Chopra, K., Sharma, R. K., Pandey, A. K., Tyagi, S. K., Ahmad, M. S., ... Kothari, R. (2022). A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications: Development, characterization, thermal and chemical stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 234, 111392.
63. Javadi, F. S., Metselaar, H. S. C. ve Ganesan, P. (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*, 206, 330–352.

64. Pielichowska, K. ve Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67–123.
65. Alva, G., Liu, L., Huang, X. ve Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693–706.
66. Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. v., Metselaar, H. S. C. ve 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.
67. Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K. ve Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
68. Sarier, N. ve Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica Acta*, 540, 7–60.
69. Riechman, A. F. ve Birchenall, C. E. (1980). Heat Storage in Eutectic Alloys. *Metallurgical transactions A*, 11, 1415–1420.
70. Wang, X., Li, W., Luo, Z., Wang, K. ve Shah, S. P. (2022). A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. *Energy and Buildings*, 260, 111923.
71. Mamur, H. ve Çoban, Y. (2020). Simulation of maximum power point tracking with buck-boost convertor for thermoelectric generators. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(5), 916–926.
72. Terasaki, I. (2016). Thermal Conductivity and Thermoelectric Power of Semiconductors. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* içinde (ss. 0–2). Elsevier.
73. Lee, H. (2016). *Thermoelectrics: Design and Materials*. (H. Lee, Ed.) *Thermoelectrics: Design and Materials* (C. 13). Western Michigan University, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
74. Manikandan, S. ve Kaushik, S. C. (2016). The influence of Thomson effect in the performance optimization of a two stage thermoelectric generator. *Energy*, 100, 227–237.
75. Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F. ve Ismail, M. (2020). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 6, 264–287.
76. Mamur, H., Üstüner, M. A. ve Bhuiyan, M. R. A. (2022). Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101824.

77. Hamid Elsheikh, M., Shnawah, D. A., Sabri, M. F. M., Said, S. B. M., Haji Hassan, M., Ali Bashir, M. B. ve Mohamad, M. (2014). A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 337–355.
78. Bjørk, R. ve Nielsen, K. K. (2015). The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system. *Solar Energy*, 120, 187–194.
79. Mamur, H., Dilmaç, Ö. F., Begum, J. ve Bhuiyan, M. R. A. (2021b). Thermoelectric generators act as renewable energy sources. *Cleaner Materials*, 2, 100030.
80. Wang, Y., Dai, C. ve Wang, S. (2013). Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source. *Applied Energy*, 112, 1171–1180.
81. Zhang, M., Tian, Y., Xie, H., Wu, Z. ve Wang, Y. (2019). Influence of Thomson effect on the thermoelectric generator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 1183–1190.
82. Zhou, Y., Gong, X., Xu, B. ve Hu, M. (2017). Decouple electronic and phononic transport in nanotwinned structures: A new strategy for enhancing the figure-of-merit of thermoelectrics. *Nanoscale*, 9(28), 9987–9996.
83. Qu, S., Yao, Q., Wang, L., Chen, Z., Xu, K., Zeng, H., ... Chen, L. (2016). Highly anisotropic P3HT films with enhanced thermoelectric performance via organic small molecule epitaxy. *NPG Asia Materials*, 8(7).
84. Ratna, D. (2022). Characterization, performance evaluation and lifetime analysis of thermoset resin. *Recent Advances and Applications of Thermoset Resins*, 503–582.
85. Pungor, E. (2020). A Practical Guide to Instrumental Analysis. *A Practical Guide to Instrumental Analysis*.



GAZİ GELECEKTİR..