

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**FOTOVOLTAİK/TERMAL HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN
EKONOMİK ANALİZİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METİN GÜL

BALIKESİR, MART - 2019

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



FOTOVOLTAİK/TERMAL HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN
EKONOMİK ANALİZİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METİN GÜL

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Ersin AKYÜZ (Tez Danışmanı)

Doç. Dr. Murat Erhan BALCI

Dr. Öğr. Üyesi Dilşad ENGİN

BALIKESİR, 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Metin GÜL tarafından hazırlanan **FOTOVOLTAİK/TERMAL HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN EKONOMİK ANALİZİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ** adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.03.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

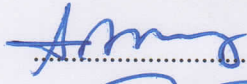
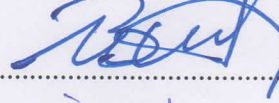
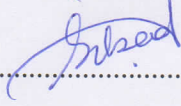
Jüri Üyeler

İmza

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ersin AKYÜZ

Üye
Doç. Dr. Murat Erhan BALCI

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Dilşad ENGİN


.....

.....

.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2017/056 ve 2017/163 nolu projeler ile desteklenmiştir.

ÖZET

**FOTOVOLTAİK/TERMAL HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN EKONOMİK
ANALİZİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METİN GÜL
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ERSİN AKYÜZ)
BALIKESİR, MART - 2019**

Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Çağış kampüsünde kurulan bir hibrit fotovoltaik termal (PV/T) sistemin elektriksel ve termal çalışma performansları incelenerek tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. 0,38 kW_p gücündeki PV/T panellerin şebeke bağımsız çalışma koşullarında belirli yük profilini beslediği Eylül ayı içerisinde 40,774 kWh elektrik enerjisi ürettiği belirlenmiştir. Hibrit sistemde soğutma için kullanılan akışkanın fotovoltaik hücrenin çalışma sıcaklığını düşürdüğü ve elektriksel veriminde artış sağladığı tespit edilmiştir. Aynı koşullar altında soğutma yapılan ve yapılmayan iki PV/T panelin maksimum güç noktasındaki elektrik çıkış güçleri karşılaştırıldığında soğutma yapılan panelin çıkış gücünün %12.9 daha fazla olduğu belirlenmiştir. 0,015 kg/s, 0,044 kg/s ve 0,069 kg/s kütleli akış hızlarında yapılan araştırmalarda kullanılan akışkanın hızının elektriksel verim ve optik termal verim ve sıcaklığa bağlı termal kayıplar ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Sistemden elde edilen maksimum optik termal verim % 52.11 olarak bulunmuştur. Sistemden elde edilen termal verilerin doğrulaması TRNSYS ve Matlab-Simulinkte oluşturulan simülasyonlar ile yapılmıştır. 2018 yılı Haziran ayı içerisinde deneysel sistemden elde edilen toplam termal enerji miktarı 104,1 kWh iken TRNSYS simülasyonu ile elde edilen 108,15 kWh ve Simulinkten 115 kWh elde edildiği görülmüştür. Üretilen enerji miktarları, yatırım ve işletme maliyetleri dikkate alınarak kurulan sistemin ekonomik analizi gerçekleştirilmiş olup geri ödeme süresi ve birim enerji başına maliyetleri hesaplanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Yenilenebilir enerji, güneş enerjisi, fotovoltaik/termal hibrit sistemler.

ABSTRACT

ECONOMIC ANALYSIS AND THE INVESTIGATION OF PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC / THERMAL HYBRID POWER SYSTEM

MSc THESIS

METİN GÜL

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ERSİN AKYÜZ)

BALIKESİR, MARCH 2019

In this study, the techno-economic analysis of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) system build in the Balıkesir University Çağış campus area was performed by investigating the electrical and thermal performance. It was determined that PV/T panels with a power of 0,38 kWp produced 40,774 kWh of electrical energy in September by supplying a specific load profile in off-grid conditions. It is found that the fluid used for cooling in the hybrid system reduces the working temperature of the photovoltaic cell and increases the electrical efficiency. When it compared to the electrical output of the PV/T panels with cooling and non-cooling, it is shown that the output of panel with cooling is 12,9% higher. In the studies which are carried out at the mass flow rates of 0,015 kg/s, 0,044 kg/s and 0,069 kg/s, it is found that the mass flow rate is directly proportional with the electrical yield, thermal yield and temperature-dependent thermal losses. Maximum optical thermal yield obtained from the system was found as 52.11%. The validation of the thermal data obtained from the system was done by the simulations created in TRNSYS and Matlab-Simulink. While the total amount of thermal energy obtained from the experimental system was 104.1 kWh in June 2018, and 108,15 kWh and 115 kWh energy obtained from TRNSYS and Simulink simulations, respectively. Economic analysis of the system was carried out by taking into consideration the amount of energy produced, investment and operating costs, and the cost of repayment period and unit cost per unit energy were calculated.

KEYWORDS: Renewable energy, solar energy, photovoltaic/thermal hybrid systems.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLOLİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yenilenebilir Enerji ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Tanımı	1
1.2 Dünyada Yenilenebilir Enerji.....	2
1.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji	2
1.4 Yenilenebilir Enerji Türleri	3
1.4.1 Hidrolik Enerjisi	4
1.4.2 Rüzgâr Enerjisi	4
1.4.3 Jeotermal Enerji	5
1.4.4 Hidrojen Enerjisi.....	5
1.4.5 Biyokütle Enerjisi	5
1.4.6 Dalga ve Gel-Git Enerjisi	6
1.4.7 Güneş Enerjisi.....	6
1.4.7.1 Dünyada Güneş Enerjisi.....	7
1.4.7.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi	8
1.4.7.3 Güneş Enerjisi Uygulamaları	11
1.5 Literatür Özeti	12
1.6 Tezin Amacı ve Önemi.....	16
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
2.1 Fotovoltaik/Termal Sistemler	18
2.1.1 Fotovoltaik (PV) Malzemelerin Çalışma Prensibi.....	19
2.1.2 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri.....	20
2.1.3 PV/T kolektörlerin Akışkanlara Göre Sınıflandırılması.....	22
2.1.3.1 PV/T Hava Kolektörler	23
2.1.3.2 PV/T Sıvı Kolektörler	23
2.2 PV/T Sistemlerin Uygulamaları	25
2.2.1 Şebekeye Bağlı (On-Grid) Sistemler	25
2.2.2 Şebekeden Bağımsız (Off-Grid) Sistemler	27
2.3 PV/T Sistemlerin Matematiksel Modeli.....	27
2.4 PV/T Sıvı Sistemlerin Ekonomik Analizi	32
2.5 PV/T Sistemin TRNSYS ile Simülasyonu	34
2.1 PV/T Sistemin Matlab Simulink ile Simülasyonu	35
2.2 Deneysel Sistem Tasarımı	37
3. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	51
3.1 12 Aylık Işınım, Sıcaklık ve Rüzgâr Verileri.....	51
3.2 Elektriksel Performans Bulguları	53

3.3	Termal Performans Bulguları	59
3.4	PV/T sistemin TRNSYS Adlı Yazılımla Simülasyonu	66
3.5	PV/T sistemin Matlab-Simulink ile Modellenmesi	68
3.6	Ekonomik Analiz	70
3.6.1	Geri Ödeme Hızı Yöntemiyle Sistemin Maliyet Analizi	72
3.6.2	Kullanım Ömrü Maliyeti Hesabı Yöntemiyle Sistemin Ekonomik Analizi	73
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER	76
5.	KAYNAKLAR	80
EKLER	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü (2018-Haziran) [6].....	3
Şekil 1.2: PV fiyatlarının tarihsel değişimi [21].....	8
Şekil 1.3: Türkiye güneş enerjisi potansiyel haritası (GEPA).....	9
Şekil 1.4: Türkiye’nin global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (GEPA).....	9
Şekil 1.5: Balıkesir ili güneş enerjisi potansiyeli haritası(GEPA).....	10
Şekil 1.6: Balıkesir ili global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (GEPA).....	10
Şekil 2.1: Fotovoltaik hücrenin çalışmasının bağ teorisiyle açıklanması [48].	20
Şekil 2.2: Fotovoltaik hücrenin iç yapısı.	20
Şekil 2.3: Monokristal hücreler.	21
Şekil 2.4: Kaplamalı ve kaplamasız çok kristal hücreler.....	21
Şekil 2.5: a) Levha ve boru tipi PV/T b) kanal tipi PV/T c) serbest akış tipi PV/T d) çift soğurucu tip PV/T.....	24
Şekil 2.6: Fotovoltaik- termal kollektör [62].....	25
Şekil 2.7: Şebeke bağlantılı sistem modeli.	26
Şekil 2.8: AC ve DC yükler için stand-alone sistem modeli.	27
Şekil 2.9: Fotovoltaik hücrenin tek diyot modeli.	28
Şekil 2.10: TRNSYS ile oluşturulmuş örnek sıcak su sistemi akış şeması.	35
Şekil 2.11: PV/T Matlab-Simulink modeli.....	36
Şekil 2.12: Enerji analizi simülasyon modelinde kullanılan değişkenler.	37
Şekil 2.13: Maliyet analizi simülasyon modelinde kullanılan değişkenler.	37
Şekil 2.14: Deney sistemi görünümü 1.....	38
Şekil 2.15: Deney sistemi görünümü 2.....	38
Şekil 2.16: Deney sistemi görünümü 3.....	39
Şekil 2.17: Hazırlanan PV/T sisteme ait prensip şema.....	41
Şekil 2.18: PV/T bileşenleri.....	42
Şekil 2.19: PV/T resmi.	42
Şekil 2.20: Deneysel sistemde kullanılan diğer bileşenler.	42
Şekil 2.21: CR 1000 datalogger görünüşü.....	45
Şekil 2.22: Short cut programında sensör tanımlanması.	47
Şekil 2.23: ACS 712 akım sensörünün dataloggera tanımlanması.....	48
Şekil 2.24: LM 35 sıcaklık sensörünün dataloggera kaydı.....	48
Şekil 2.25: Sirkülasyon pompasının CR 1000 ile kontrolü.	49
Şekil 2.26: Selenoid vanaın CR 1000 ile kontrolü.	49
Şekil 2.27: CR 1000 ile yük profili oluşturma.....	49
Şekil 2.28: Selenoid vana, sirkülasyon pompası ve yüklerin elektronik kontrol şeması.	50
Şekil 3.1: 12 aylık ışınım miktarı verileri.....	52
Şekil 3.2: 12 aylık hava sıcaklık verileri.	52
Şekil 3.3: 12 aylık rüzgâr hızı verileri.	53
Şekil 3.4: 23.06.2018 tarihinde PV/T hücre sıcaklığı-güneş ışınımı değişimi grafiği.	54
Şekil 3.5: Soğutmalı ve soğutmasız durumlardaki panelin karakteristik çıkış akım, gerilim grafiklerinin karşılaştırılması.	54

Şekil 3.6: Soğutmalı ve soğutmasız durumlardaki panelin maksimum güç noktasındaki değerlerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 3.7: a) 31.05.2018 tarihinde 0,069 kg/s debide sisteme giren ve çıkan enerji miktarları b) Sistemden elde edilen enerjinin giren enerjiye oranları.	56
Şekil 3.8: a) 30.05.2018 tarihinde 0,015 kg/s debide sisteme giren ve çıkan enerji miktarları b) Sistemden elde edilen enerjinin giren enerjiye oranları.	57
Şekil 3.9: 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında günlük ortalama ışınım değerleri.....	57
Şekil 3.10: PV/T panellerin 1-30 Eylül tarihleri arasında ürettiği ve yükün çektiği akım miktarları.	58
Şekil 3.11: 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında akü şarj yüzdesi grafiği.....	58
Şekil 3.12: 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında PV/T panel elektriksel verim değerleri.	59
Şekil 3.13: 1-4 Haziran 2018 tarihlerinde arasında su giriş-çıkış ve hava sıcaklıkları ile ışınımın zamana göre değişen grafiği.	60
Şekil 3.14: 12.06.2018 tarihinde 0,015 kg/s debi değerindeki sıvı giriş-çıkış sıcaklığının ışınımına göre değişim grafiği.	61
Şekil 3.15: 08.05.2018 tarihinde 0,044 kg/s debi değerindeki sıvı giriş-çıkış sıcaklığının ışınımına göre değişim grafiği.	61
Şekil 3.16: 31.05.2018 tarihinde 0,069 kg/s debi değerindeki sıvı giriş-çıkış sıcaklığının ışınımına göre değişim grafiği.	62
Şekil 3.17: 12.06.2018 tarihinde 0,015 kg/s'lik debi değerinde su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışınımına bağlı grafiği.....	62
Şekil 3.18: 08.05.2018 tarihinde 0,044 kg/s'lik debi değerinde su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışınımına bağlı grafiği.....	63
Şekil 3.19: 31.05.2018 tarihinde 0,069 kg/s'lik debi değerinde su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışınımına bağlı grafiği.....	63
Şekil 3.20: 0,069 kg/s kütleli debide, ışınımın giriş ve çıkış su sıcaklık farkları $(T_g - T_a) / I_T$ üzerine etkisi	64
Şekil 3.21: 0,044 kg/s kütleli debide, ışınımın giriş ve çıkış su sıcaklık farkları $(T_g - T_a) / I_T$ üzerine etkisi.	64
Şekil 3.22: 0,015 kg/s kütleli debide, ışınımın giriş ve çıkış su sıcaklık farkları $(T_g - T_a) / I_T$ üzerine etkisi.	65
Şekil 3.23: 0.069 kg/s ile 0.015 kg/s'lik debi değerlerinde günlük toplam termal verim değerlerinin karşılaştırılması.	66
Şekil 3.24: PVT mod-termal mod termal verim karşılaştırılması.....	66
Şekil 3.25: TRNSYS'de kurulan sistemin akış şeması.....	67
Şekil 3.26: 2018 yılı Haziran ayı 19 günlük deneysel sistem ve TRNSYS simülasyon sistemi elde edilen termal enerji miktarlarının karşılaştırılması.	68
Şekil 3.27: Deney sisteminden elde edilen ve simülasyondan elde edilen $(T_g - T_a) / I_T$ termal verimlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 3.28: 2018 yılı Haziran ayı için deneysel sistem ve simülasyon sistemi giriş-çıkış su sıcaklıklarının karşılaştırılması.	69
Şekil 3.29: 2018 yılı Haziran ayı 19 günlük deneysel sistem ve Simulink simülasyon sistemi elde edilen termal enerji miktarlarının karşılaştırılması.	70
Şekil 3.30: PV/T kolektörlerden bir yıl boyunca üretilen enerji değerleri.	72

Şekil 3.31: 30 sene kullanım ömrü için faiz oranlarının birim termal enerji maliyetine etkisi.	74
Şekil 3.32: 25 sene kullanım ömrü için faiz oranlarının birim elektrik enerjisi maliyetine etkisi.	75
Şekil 3.33: 30 sene kullanım ömrü için faiz oranlarının birim toplam enerji maliyetine etkisi.	75
Şekil Ek-1.1: Q_u değişkeninin simulink modeli.	86
Şekil Ek-1.2: F_r değişkeninin simulink modeli.	86
Şekil Ek-1.3: F' değişkeninin simulink modeli.	86
Şekil Ek-1.4: F değişkeninin simulink modeli.	87
Şekil Ek-1.5: U_t değişkeninin simulink modeli.	87
Şekil Ek-1.6: U_e değişkeninin simulink modeli.	87
Şekil Ek-1.7: U_b değişkeninin simulink modeli.	88
Şekil Ek-1.8: U_L değişkeninin simulink modeli.	88
Şekil Ek-1.9: T_{pm} değişkeninin simulink modeli.	88
Şekil Ek-1.10: Elektrik verimi simulink modeli.	88
Şekil Ek-1.11: Elektrik enerjisi toplamı hesabının simulink modeli.	89
Şekil Ek-1.12: Depolu sistem Matlab simulink modeli.	89
Şekil Ek-1.13: Tamir ve değiştirme maliyetlerinin simülasyon modeli.	89
Şekil Ek-1.14: Hurda bedeli ve işletim ve bakım masrafları modeli.	90
Şekil Ek-1.15: Birim enerji bedeli hesaplama modeli.	90

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Deney düzeneğinde kullanılan malzemeler.	39
Tablo 2.2: Ölçüm sisteminde kullanılan elemanlar.....	40
Tablo 2.3: PV/T panelin özellikleri.....	41
Tablo 2.4: CMP11 piranometre özellikleri.	43
Tablo 2.5: CR1000 datalogger özellikleri.....	46
Tablo 3.1: Değişik debi değerlerine göre sıcaklık farkının ışıınım değerine bağlı değerini veren doğru denklemleri.	63
Tablo 3.2: Farklı debi değerleri için termal verim denklemleri.	65
Tablo 3.3: Balıkesir ili için 30° eğimle gelen ışıınım şiddeti (Wh/m ²).	71
Tablo 3.4: 2 adet 190 W'lık PV/T kollektörden simülasyon sonuçlarına göre elde edilen senelik elektriksel ve termal enerji miktarları.	71
Tablo 3.5: Sistemde kullanılan malzemeler.	73

SEMBOL LİSTESİ

Λ	: Dalga boyu (m)
h	: Plank sabiti
c	: Işık hızı (m/s)
E_f	: Foton enerjisi (Joule)
I_L	: Foton akımı (A)
I_D	: Diyot akımı (A)
I_{sh}	: Paralel kol akımı (A)
I_{PV}	: PV hücre akımı (A)
I_S	: Kısa devre akımı (A)
I_T	: Işınım miktarı (W/m^2)
θ	: Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı
T_h	: PV hücre sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_a	: Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
I_0	: Diyot doyma akımı (A)
I_D	: Sıcaklığa bağlı diyot doyma akımı (A)
q	: Elektron şarj değeri
E_q	: Bant aralığı
T_r	: Referans sıcaklık ($^{\circ}C$)
A_i	: İdeallik faktörü
k	: Boltzman sabiti
V_{PV}	: PV hücre gerilimi (V)
R_s	: Paralel kol direnci (ohm)
V_{oc}	: PV hücre açık devre gerilimi (V)
K_v	: Açık devre geriliminin sıcaklığa bağımlı sabitesi
η_e	: Elektriksel verim
V_m	: PV hücre maksimum çalışma noktası gerilimi (V)
I_m	: PV hücre maksimum çalışma noktası akımı (A)
A_c	: Panel alanı (m^2)
B_0	: PV sıcaklık katsayısı ($^{\circ}C^{-1}$)
η_0	: Standart test koşullarındaki PV hücre verimi
η_{th}	: Termal (termal) verim
Q_u	: Faydalı termal enerji miktarı (kW)
\dot{m}	: Kütleli akış hızı (kg/s)
C_p	: Suyun özgül ısısı (kcal/kg $^{\circ}C$)
$T_{\check{c}}$: Akışkan çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_g	: Akışkan giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
F_R	: Isı kazanç faktörü
U_L	: Kollektörün toplam ısı kayıp katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
U_T	: Üst yüzey toplam ısı transfer katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
U_B	: Alt yüzey toplam ısı transfer katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
U_E	: Yan yüzey toplam ısı transfer katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
F'	: Kollektör verim faktörü
C_b	: Soğurucu plaka ile akışkan boruyu birleştiren malzemenin ısı geçiş katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
h_{fi}	: Boru iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı ($W/m^2^{\circ}C$)
W	: Boru alanı (m)

k_i : Arka yüzey yalıtım malzemesi ısı geçiş katsayısı
 L_i : Yalıtım malzemesi kalınlığı
 k_{edge} : Yalıtım malzemesi ısı geçiş katsayısı
 L_{edge} : Yalıtım malzemesi kalınlığı
 p : Kollektör çevresi
 t : Soğurucu levha kalınlığı
 D_i : Boru çapı (m)
 δ : Plaka kalınlığı (m)
 α : Camın absorbanası
 τ : Camın geçirgenliği
TLCC : Toplam kullanım ömrü maliyeti
CC : Anapara maliyeti
OMC : İşletim ve bakım masrafları
RRC : Tamir ve değiştirme maliyetleri
Salv : Hurda değeri
 i : Faiz oranı
Repbat: Batarya yenileme maliyeti
ALCC: Toplam kullanım ömrü maliyeti
Coe : Birim enerji maliyeti

KISALTMA LİSTESİ

- NREL** : Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
IEA : Uluslararası Enerji Ajansı
PV : Fotovoltaik
GEPA : Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli atlası
PV/T : Fotovoltaik/termal
NASA : Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında bilgi, öneri ve tecrübelerini benimle paylaşarak, çalışmalarımın yön veren çok kıymetli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ersin AKYÜZ'e ve deneyimlerinden destek aldığım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Mustafa ERTÜRK'e,

Deney sistemi kurulumu aşamasında yardımlarını esirgemeyen babam Aziz ÇELİK'e, mesai arkadaşım Şener ŞEPBOY'a ve sevgili Balıkesir Meslek Yüksekokulu çalışanlarına,

Çalışmalarımın maddi destek sağlayan Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine,

Yüksek lisans ders ve tez aşamalarında hep yanımda olan ve bana yön verip destekleyen çok sevgili eşim Öğr. Gör. Dr. Gülşah ÇELİK GÜL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tezi canım kızım Gülin'e ithaf ediyorum.

Balıkesir, 2019

1. GİRİŞ

Enerji, toplumların refah düzeyinin ve zenginliğinin belirlenmesinde rol oynayan önemli bir parametredir. Günümüzde, kişi başına tüketilen enerji miktarı ulusların gelişmişlik düzeyi hakkında bilgi vermektedir. Artan tüketime bağlı olarak enerjiye duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil enerji kaynaklarından sağlanmaktadır.

18. yüzyılın ikinci yarısında, başlayan sanayi devrimi ile fosil yakıtlara olan ihtiyaç artmış ve bu kaynakların hızla azalmasına neden olmuştur. Devletlerarasındaki toprak ve ganimet için yapılan savaşların yerini enerji savaşları almaya başlamış ve pek çok dünya savaşı yaşanmıştır. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi petrol fiyatlarının artmasına sebep olmuştur. Ayrıca fosil yakıtlara ulaşmadaki zorluklar ve çevreye olan zararlı etkileri insanları farklı enerji türlerinin kullanımına yöneltmiştir [1].

Sürdürülebilir oluşu ve çevreye olan zararlı etkilerinin fosil kaynaklara göre çok daha az olması sebebiyle güneş, rüzgâr, biyokütle, hidrojen, jeotermal, hidrolik ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ülkelerin enerji kullanımında dışa bağımlılığı azaltmak istemesi ile birlikte son yıllarda enerji üretiminde yenilenebilir enerjinin payını arttırmaya yönelik olarak ciddi yatırımlar yapılmıştır [2].

1.1 Yenilenebilir Enerji ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Tanımı

Yenilenebilir enerji; kendini tekrar eden, güneş ve dünya var oldukça devam edecek enerji kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları; yeryüzünde ve doğada çoğunlukla herhangi bir üretim sürecine ihtiyaç duymadan temin edilebilen, fosil kaynaklı (kömür, petrol ve karbon türevi) olmayan, elektrik enerjisi üretilirken CO₂ emisyonu az bir seviyede gerçekleşen, çevreye zararı ve etkisi konvansiyonel enerji kaynaklarına göre çok daha düşük olan, sürekli bir devinimle yenilenen ve kullanılmaya hazır olarak doğada var olan, hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal,

biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı, gel-git, hidrojen gibi enerji kaynaklarını ifade eder [3].

ABD Ulusal Enerji Laboratuvarı (NREL) 2001 yılında, yenilenebilir enerjiyi ‘Doğada sürekli yeri doldurulan güneş, jeotermal, su ve rüzgâr gibi enerji kaynaklarının kullanılması ile elde edilen enerji’ olarak tanımlamıştır. Benzer bir tanımlı yapan Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2013 yılında yenilenebilir enerji için; ‘Tüketildiğinden daha hızlı biçimde yerine yenisi gelen güneş, rüzgâr gibi doğal yollar ile elde edilen enerjidir’ ifadesini kullanmıştır [4].

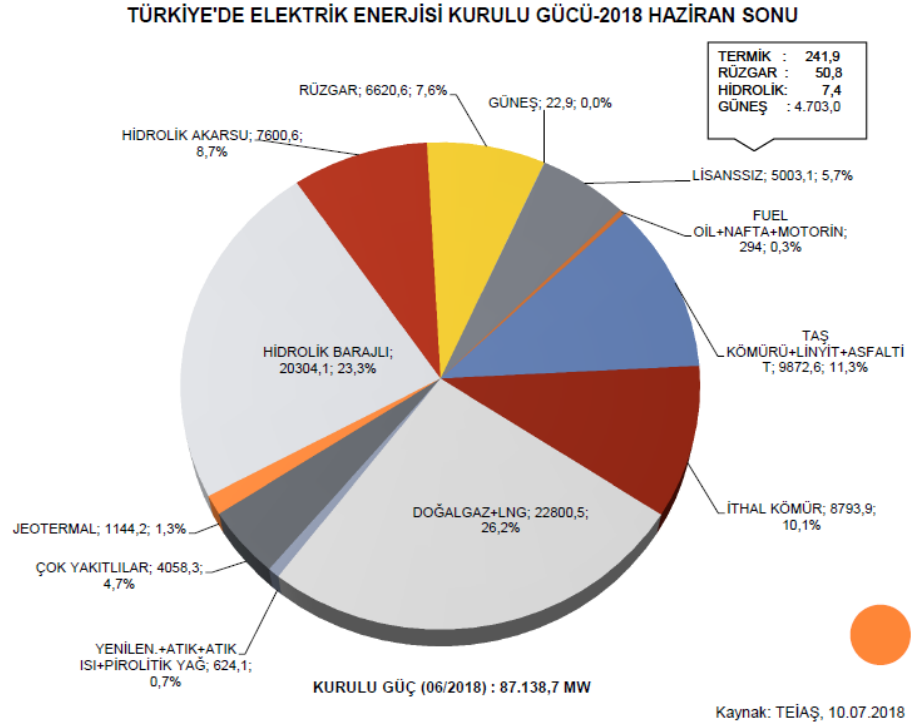
1.2 Dünyada Yenilenebilir Enerji

Dünya enerji sektöründe, fosil yakıtların insana ve doğaya verdiği zararlar ve gündün güne azalması sebebiyle, yıllardır süregelen bir yenilenebilir enerji kaynak arayışı mevcuttur. IEA’nın verilerine göre; 2014 yılı içerisinde dünya enerji tüketiminin yaklaşık % 20’si yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktayken, bu oran 2016 yılında % 22 civarlarında seyretmiştir ve tahminlere göre 2020 yılında en az % 26 olması beklenmektedir. Tükettiği enerjiyi ithal eden ABD, Hindistan, Çin ve Japonya gibi ülkeler yenilenebilir enerji alanında yaptıkları yatırımlarla bu alanda öncü ülkeler arasındadırlar [5].

1.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji

Türkiye, hem coğrafi konumu hem de jeopolitik yapısı sayesinde bütün yenilenebilir enerji çeşitlerinden faydalanabilmektedir. Özellikle Türkiye’nin güneş, rüzgâr, jeotermal ve hidrolik enerji potansiyelleri Avrupa Birliği ülkelerine kıyasla oldukça yüksektir. Ancak, bu kaynaklardan yararlanma oranları daha düşük seviyelerdedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında yaşanan bazı hukuki ve ekonomik kısıtlamalara rağmen, son yıllarda birçok gelişme yaşanmaktadır. 2009 yılından sonra elektrik üretim kaynaklarında, yenilenebilir enerji kaynaklarının rolünün gittikçe arttığı gözlemlenmektedir. 2017 yılı itibarıyla, elektrik enerjisi üretimimizin yaklaşık % 29,67’si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır [5].

2018 yılı haziran ayı itibariyle Türkiye’de elektrik enerjisi üretiminde doğalgaz ve kömür gibi fosil kaynakların üstünlüğü göze çarpmaktadır. Bu kaynakları, barajlar ve hidroelektrik enerji santrallerinde kullanılan hidrolik kaynakları takip etmektedir. Güneş, rüzgâr ve jeotermal kaynakların kurulu güçteki payı % 15’i geçmemektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü (2018-Haziran) [6].

Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların üstünlüğü göze çarpsa da her geçen yıl yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizde kullanım miktarı artmaktadır. 2002 yılında yenilenebilir enerji kaynaklı kurulu güç değeri 12,277 GW olan Türkiye, 2018 yılı itibariyle 37,147 GW kurulu güce sahiptir [6].

1.4 Yenilenebilir Enerji Türleri

Doğada hep var olan ve tüketim miktarına göre üretimi daha fazla oranda bulunan yenilenebilir enerji türleri; hidrolik, rüzgâr, jeotermal, hidrojen, biokütle, dalga ve gel-git enerjisi ile güneş enerjisidir.

1.4.1 Hidrolik Enerjisi

Hidrolik enerji, suda var olan potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilmektedir ve teknolojik gelişimi bakımından yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde üst düzeyde olan bir enerji türüdür [7].

Akan suyun sahip olduğu mekanik enerji, bir sistem içerisinde jeneratörün türbinlerini harekete geçirerek elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Akan sudan üretilen enerji miktarını suyun akış veya düşüş hızı belirler [8].

Birçok ülke, teknik, ekonomik ve çevresel etmenleri göz önünde bulundurarak hidrolik enerji kullanımını geliştirme çabası içindedir. Ancak dünyanın yüzde yetmiş beşinin suyla çevrili olduğu düşünülünce elde edilen enerji miktarı potansiyeline göre düşüktür. Su miktarının bu kadar çok olduğu yeryüzünde sudan üretilen enerji miktarı artırılmalı, üretim sırasında çevreye verilecek zararın derecesi aşağılara çekilmelidir [9].

1.4.2 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, yeryüzündeki ısı farkları sonucu ortaya çıkan etkenler ile oluşan hava hareketleridir. Rüzgârın hareket etmesiyle kazandığı enerji de rüzgâr enerjisidir [10]. Doğaya zarar vermemesi, küresel ısınmaya ve asit yağmurlarına sebep olmaması, radyoaktif etkisinin çok az olması, doğal olması ve kısa sürede tükenmemesi kullanımını arttırmaktadır. Bu bağlamda yüzyıllardır insanlığın kullandığı bir enerji türü olarak karşımıza çıkmaktadır [11].

Çok eski çağlardan beridir rüzgâr enerjisi kullanılmaktadır. Daha önceleri sulama yapmak, tahıl ürünü üretmek gibi amaçlarla kullanılan rüzgâr enerjisi 19. yüzyıl sonlarına, doğru rüzgâr türbinlerinin kullanılmaya başlaması ile elektrik üretiminde etkin rol almaya başlamıştır. Bugün Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu pek çok ülke rüzgâr enerjisinden etkin bir biçimde yararlanmaktadır [10].

1.4.3 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji; yerkabuğunun farklı kısımlarında oluşmuş ısının meydana getirdiği, atmosferdeki sıcaklıktan daha yüksek sıcaklığa sahip erimiş tuz, mineral ve gazlar içeren sıcak su ve buhar şeklindedir [12].

Yüzyıllarca sadece sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılan jeotermal enerji, bugün doğrudan endüstride ve ısıtmada, dolaylı olarak ise elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek entalpiye sahip kaynaklar elektrik üretiminde kullanılırken; düşük entalpili kaynaklar ise doğrudan kullanılmaktadır. Doğrudan kullanımı; kimya endüstrisinden tutun da kâğıt, tekstil ve rafinaj gibi proseslerinde düşük ısı ihtiyacı olan pek çok alanda yer bulmaktadır. Ayrıca içerisinde barındırdığı minerallerin üretiminde de kullanılmaktadır [13].

1.4.4 Hidrojen Enerjisi

Hidrojen doğada en çok bulunan, en temel, rengi ve kokusu olmayan, havadan 14,4 kez hafif ve zehirsiz bir gazdır. Doğada doğal olarak bulunmamakla birlikte, birincil enerji kaynaklarının reaksiyonlarından yararlanılarak farklı hammaddelerden elde edilebilmektedir [14].

Hidrojen gazının çevre dostu olmasının yanında birim kütle başına yüksek enerjiye sahip olması onu, en önemli temiz enerji kaynağı haline getirmiştir. Yanıcı olması, doğalgazın kullanıldığı her alanda kendine kullanım alanı açmakta ve elektrik enerjisi üretiminde de kullanılabilir. Güneş, rüzgâr ve diğer temiz enerji kaynakları ile hidrojen arasında oluşturulacak hibrit (karma) sistemler yakın gelecekte fosil yakıtlara olan ihtiyacın azalmasına, dolayısıyla daha yaşanır ve sürdürülebilir bir dünyanın varlığına olanak sağlayacaktır [15].

1.4.5 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, bir tür veya çeşitli türlerden oluşan bir topluluğa ait organizmaların sahip olduğu toplam küttir. Biyokütle aynı zamanda, bir organik karbondur. Ancak, enerji üretimi sırasında salınımı yapılan CO₂ miktarı, bu maddelerin oluşumu esnasında atmosferden alındığı için korunmuş olur [7].

Doğada bulunan başlıca biyokütle kaynakları; yağlı tohumlu bitkiler, şeker ve nişasta bitkileri, elyaf bitkileri, protein bitkileri, bitkisel ve tarımsal artıklar, odun ve orman atıkları, sığır, at, koyun, tavuk gibi hayvanların dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar, kanalizasyon ve dip çamurları, kâğıt ve gıda sanayi atıkları, endüstriyel ve evsel atık sular, belediye ve büyük sanayi tesisleri atıkları olmaz üzere tarımsal, bitkisel, hayvansal ve endüstriyel kökenlidir. Sağlanan bu biyokütlelerden biyogaz, biyodizel, biyoetanol ve gazlaştırma ile enerji üretilmektedir [16].

1.4.6 Dalga ve Gel-Git Enerjisi

Dalga enerjisi atmosferdeki basınç farklılıkları sonucu meydana gelen bir enerji türüdür. Dolaylı olarak rüzgâr ve güneşe bağlıdır. Dalgalar bu enerjiyi az bir kayıpla binlerce kilometre taşıyabilmektedir. Dünya üzerinde tüm kıyı şeritleri boyunca dalgaların üreteceği enerji potansiyeli 2-3 milyon MW olarak tahmin edilmektedir. Bu miktar binlerce elektrik enerji santralının ürettiği enerjiye eşdeğerdir [17].

1.4.7 Güneş Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük ve en önemli olanı güneş enerjisidir. Güneş, yaklaşık % 90'u hidrojen ve % 10'u helyum gazlarından ve çok küçük bir miktarı ağır metallere oluşmuş bir yıldızdır. Çapı 1400000 km olan bu yıldızın büyüklüğü dünyaya oranla 109 kat fazladır. Yoğunluğu dünyanın dörtte biri kadardır. Güneşin, doksan gün süren bir kendi etrafında dönüş süresi bulunmaktadır [18].

Güneşin sıcaklığı, merkezine doğru artar ve yaklaşık 20.000.000 °C'yi bulur. Güneş, ortalama 6000 K sıcaklıkta ışınım yapan bir cisimdir. Böylesine yüksek sıcaklık nedeniyle güneş içerisinde bulunan elektronlar atom çekirdeklerinden ayrılırlar ve böylece güneşte molekül ve atomlar değil serbest elektronlar ve atom çekirdekleri bulunur. Bu karışımın adı plazmadır. Bu sıcaklıkta hafif elementlerin atom çekirdekleri bir araya gelerek daha ağır elementlerin atom çekirdeklerini

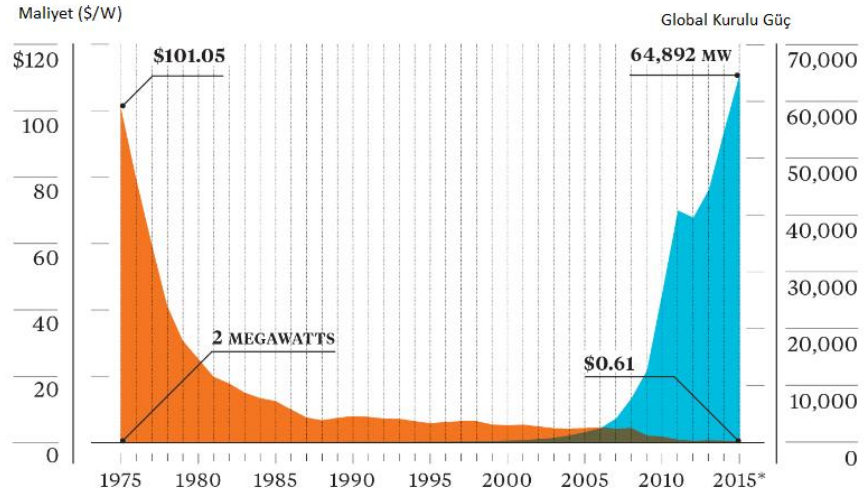
meydana getirirler. Bir helyum çekirdeğinin oluşması için 4 hidrojen çekirdeği birleşir. Bu olaya füzyon adı verilmektedir. Güneşin içi hidrojen yakıtlı ve helyum ürünü olan bir fırın gibi düşünülebilir. Güneşte oluşan bu enerji farklı dalga boylarındaki ışınlar halinde dünyaya ulaşmaktadır. Dünyaya güneşten yaklaşık 170 MW ışınım enerjisi gelmektedir. Güneşte üretilen toplam enerji miktarına göre oldukça küçük olan bu enerji miktarı, bugün için insanlığın tükettiği enerji miktarının yaklaşık 15-16 bin katıdır [18].

Güneş enerjisinden faydalanma konusundaki uygulamalar 1970'li yıllardan sonra hızla artmıştır. Güneş enerji sistemlerinin teknolojik olarak gelişmeye başlamasıyla maliyetleri düşerek kullanım alanları artmıştır [19].

1.4.7.1 Dünyada Güneş Enerjisi

Elektrik ve ısı enerjisi elde etmede kullanılabilen güneş enerjisi doğada en yaygın bulunan enerji çeşidi olmasına karşın, geçmişte fotovoltaik hücrelerin üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı elektrik enerjisi üretiminde daha düşük kullanım oranına sahipti. Zamanla düşen maliyetlerle birlikte PV hücrelerin elektrik enerjisi üretimindeki payı artmıştır. [20].

Son dönemlerde, fosil yakıt rezervlerinde meydana gelen azalma ile birlikte güneş enerjisi üretim ve depolama tekniklerindeki ilerleme ve maliyetlerin düşmesiyle, güneş enerjisinden faydalanma oranları hızla artmaktadır. Şekil 1.2'de 1975 yılından günümüze fotovoltaik (PV) hücre fiyatlarındaki hızlı düşüş ve buna bağlı global kurulu güçteki artış trendi verilmiştir. PV hücre fiyatlarındaki bu düşüşle birlikte, güneş enerjisinden faydalanma konusundaki uygulamalar özellikle 2000'li yıllardan sonra hızla artarak 2015 yılında küresel olarak 64,892 MW güç değerine ulaşmıştır.

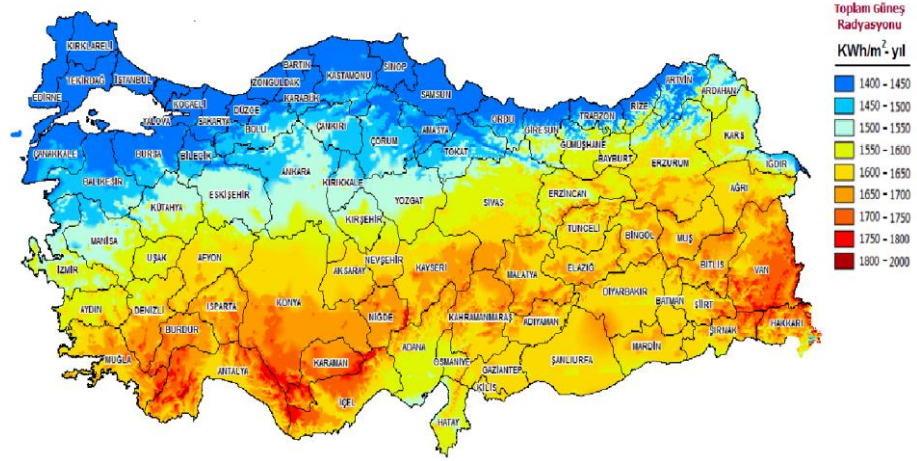


Şekil 1.2: PV fiyatlarının tarihsel değişimi [21].

2014 yılından sonra yaşanan gelişmeler ile güneş enerjisi uygulamalarında % 25'lik bir büyüme kaydedilmiştir. Güneş enerjisinde 50 GW'lık bir kapasite artışıyla 2015 yılında küresel ölçekte 217 GW'lık bir kapasiteye ulaşılmıştır. Kurulu güç miktarlarında bölgesel karşılaştırma yapıldığında en yüksek kurulu güç miktarı Avrupa'da bulunmaktadır. Onu sırasıyla Asya, Kuzey Amerika ve Afrika takip etmektedir [22]. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde eden ülkeler sıralamasında Çin en büyük kurulu güce sahip ülke olarak ilk sırada yer almaktadır. Onu sırasıyla Almanya, Japonya, ABD ve İtalya takip etmektedir. Kişi başına düşen fotovoltaik sistem kapasitesi bakımından Almanya dünyada ilk sırayı almıştır. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde eden ülkeler sıralamasında yine Çin birinci sırada yer alırken onu ABD, Almanya ve Türkiye takip etmektedir [23].

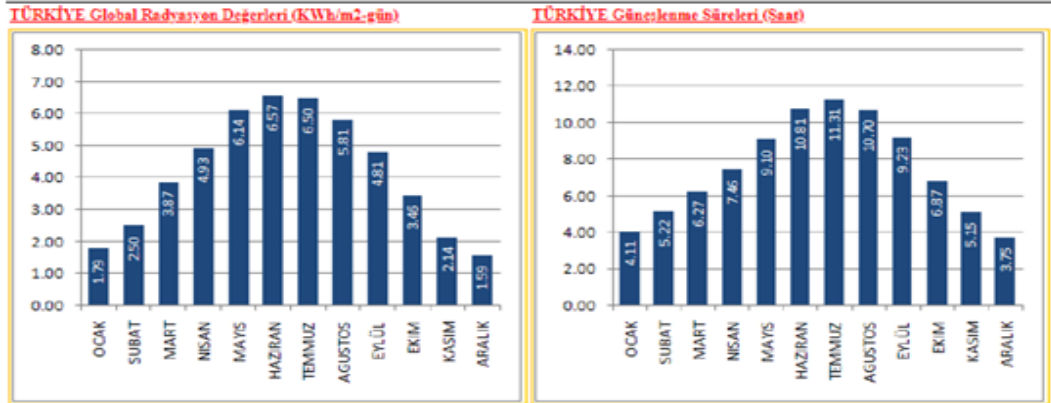
1.4.7.2 Türkiye'de Güneş Enerjisi

Türkiye dünya üzerinde bulunduğu coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneş enerji potansiyeline sahip bir ülkedir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğünün hazırlamış olduğu Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli atlasında (GEPA) (Şekil 1.3) yer alan verilere göre yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat ve günlük toplam 7,5 saat olup, yıllık toplam güneşlenme miktarı 1527 kWh/m²-yıl ve günlük toplam 4,2 kW/m²-gün olarak tespit edilmiştir.



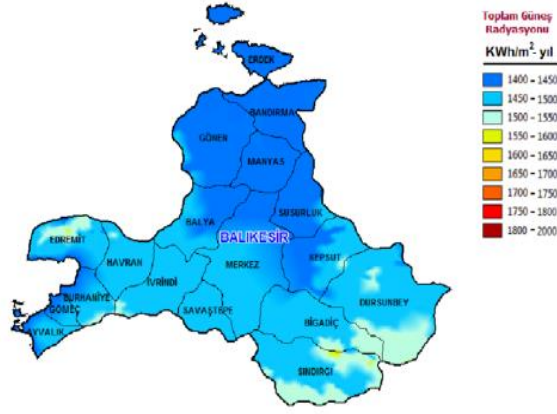
Şekil 1.3: Türkiye güneş enerjisi potansiyel haritası (GEPA).

Şekil 1.3'deki grafikte görüldüğü üzere yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1400 ile 2000 kWh/m²-yıl arasında değişmektedir. Şekil 1.4'te yer alan grafiklerde, aylara göre günlük ortalama güneşlenme miktarları ve güneşlenme süreleri verilmiştir.



Şekil 1.4: Türkiye'nin global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (GEPA).

Şekil 1.5'te Balıkesir ili güneş enerjisi potansiyeli haritası (GEPA) verilmiştir. Buna göre, Balıkesir ilinde yıllık toplam güneşlenme miktarı 1400 ile 1600 kWh/m²-yıl arasında değişmektedir.



Şekil 1.5: Balıkesir ili güneş enerjisi potansiyeli haritası(GEPA).

Şekil 1.6’da Balıkesir ili global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (GEPA) verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere, Balıkesir ilinde günlük ortalama güneş radyasyonu verilerine bakıldığında en yüksek değerlerin 6,29 kWh/m² ile Haziran ayında; en düşük değerlerin ise 1,39 kWh/m² ile Aralık ayında olduğu görülmektedir. Günlük güneşlenme süreleri incelendiğinde 11,44 saat/gün ortalama değeri ile Temmuz ayı en yüksek güneşlenme sürelerine sahip iken Aralık ayında 3,64 saat/gün ile en düşük değerleri görmektedir.



Şekil 1.6: Balıkesir ili global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (GEPA).

Grafiklerde verilen bilgiler ışığında ülkemiz güneş potansiyeli açısından verimli sayılabilecek bir konumdadır. Termal güneş kolektörler ve fotovoltaik güneş hücreleri ile oluşturulan güneş enerji sistemlerinin sayısı her geçen sene artmaktadır. 2017 yılı sonu itibari ile ülkemizde toplam kurulu güneş kolektör alanı 20 milyon m²,ye ulaşmıştır.

2017 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının verilerine göre 3616 adet güneş enerji santralının 3421 MW'lık kurulu gücü toplam kurulu gücün % 4'ünü oluşturmaktadır. 2017 yılında güneş enerjisinden üretilen elektrik enerjisi miktarı 2684 GWh olarak gerçekleşmiştir ve bu üretim miktarı toplam üretim miktarının % 0,91'ine denk gelmektedir [24]. Ülkemiz, güneş enerjisi kurulu gücü açısından 2016 yılında 844 MW ile 25. sıradayken 2017 yılında 3422 MW'lık kapasite ile 13. sıraya yükselmiş bulunmaktadır [3]. Güneş enerjisi kurulu güç miktarımız 2018 yılı haziran ayı verilerine göre 4725,9 MW'a ulaşarak çok hızlı bir yükseliş göstermiştir [4].

1.4.7.3 Güneş Enerjisi Uygulamaları

Günümüzde birçok alanda güneş enerjisi uygulamalarına rastlanmaktadır. Bu uygulamalarda, güneş ışınımından doğrudan veya dolaylı olarak elektrik enerjisi üretilmekte ya da termal enerji olarak yararlanılmaktadır. Uygulama alanları genel olarak birkaç grupta toplanabilir [25].

1- Düşük sıcaklık uygulamaları (20-100°C),

- Kullanım sıcak suyu elde etme,
- Konut ısıtma-soğutulma,
- Kurutma,
- Sera ısıtma,
- Yüzme havuzu ısıtma,
- Deniz suyundan tatlı su elde etme,
- Güneş ocak ve fırını,
- Tuz üretme,

2 -Orta sıcaklık uygulamaları (100-300 °C),

- Endüstriyel kullanım için buhar üretme,
- Büyük ısıtma-soğutma sistemleri,
- Elektrik üretme,

3- Yüksek sıcaklık uygulamaları (>300 °C)

- Güç santralleri
- Güneş fırınları

4- Direkt elektrik üreten fotovoltaik sistemler

5- Fotokimyasal ya da termokimyasal işlevler

6- Fotosentetik işlevler

1.5 Literatür Özeti

Güneş enerji sistemlerinde, PV hücrelerdeki ısınmadan kaynaklı düşen elektriksel verimi arttırmak ve sistemde oluşan termal enerjiden yararlanmak amacıyla geliştirilen PV/T sistemlerin enerji verimliliğini pek çok bilim insanı araştırmıştır. Bu alanda ilk çalışmayı, 1976 yılında Martin Wolf yapmıştır. Düz yüzeyli termal kollektör üzerine PV monte ederek böyle bir sistemin uygulanabilirliğini ve düşük maliyetli olduğunu göstermiş, diğer araştırmacıların teorik ve deneysel çalışmaları için öncü olmuştur [26]. PV/T sistemlerin termal verimlerinin araştırıldığı teorik çalışmaların birisinde Bergene ve Lovvik, bir fotovoltaiik/termal (PV/T) kollektörden elde edilebilecek toplam verimin % 60-80 arasında olduğunu hesaplamışlardır [27]. Ayrıca, Fujisawa ve Tani de, deneysel olarak yaptıkları çalışmalarında, bir PV/T kollektörden % 60 termal verim elde etmişlerdir. Ayrıca, PV/T kollektörleri yüzey kaplamalı ve kaplamasız olarak karşılaştırmışlar ve kaplamasız kollektörde elektriksel verimin daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [28]. Başka bir teorik çalışmada ise Huang ve ark., bir PV/T sistemin günlük termal veriminin henüz çok açık olmadığını, termal verim için alınan sonuçların sabit ve düşük giriş sıcaklığındaki akış koşullarında hesaplanan ya da ölçülen anlık verim olduğunu vurgulamışlardır. Eğer bir su tankı eklenerek PV/T sistem su ısıtmak için kapalı bir sistemde kullanılırsa, gün boyunca giriş sıcaklığı değişeceğinden termal verimin günlük test sonuçlarına göre belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [29].

PV/T sistemlerin verim analizleri sırasında ışınım, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve akışkanın kütleli akış hızı gibi değişkenlerin etkili olduğu görülmektedir. Fudholi ve arkadaşları bir PV/T panelin elektriksel ve termal performanslarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, 800 w/m^2 'lik ışınım ve $0,041 \text{ kg/s}$ su debisinde yaptıkları analizler sonucunda; % 13,8 elektriksel verim, % 54,6 termal verim ve % 68,4 olarak toplam PV/T verimi elde etmişlerdir. Farklı debilerde yaptıkları analizlerde, akış hızının elektriksel ve termal verimi etkilediğini belirlemişlerdir [30].

Garg ve Agarwall, farklı hücre büyüklüklerine sahip PV/T paneller ile yaptıkları testlerde farklı debi değerlerindeki PV/T sistem enerji verimliliğini araştırmak için sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Pompa, depolama tankı ve otomatik kontrol ile desteklenen bu sistem ile farklı debi değerlerinde yaptıkları deneylerde maksimum verimin sağlandığı debi değerini 0,03 kg/s olarak bulmuşlardır. Ayrıca, yalıtım miktarının artırılmasıyla elektriksel verim değerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir [31].

Evsel kullanımda PV/T sistemlerin performanslarını inceleyen Kanchan ve ark., binaya entegre bir PV/T kollektörün enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Farklı PV hücreleri kullanarak yapılan deneylerde maksimum elektriksel gücü 810 kWh olarak HIT olarak adlandırılan bir kristal silisyum hücrenin (c-si) üzerine amorf silisyum hücrenin (a-si) yerleştirilmesi ile oluşan yapıdan elde edilmiştir. Maksimum termal enerji ise 464 kWh ile amorf silisyum hücre yapısından elde edilmiştir. HIT yapının elektriksel üretime ve a-si hücrenin ise binanın sıcak su üretiminde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varmışlardır [32].

Ülkemizde de farklı iklim koşullarında PV/T modüllerin üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Kubilay Erkaya doktora tezinde, sıvı akışkan olarak suyun kullanıldığı termal toplayıcıyla PV arasındaki mesafenin değiştirilmesiyle hava dolaşımı da sağlanarak PV hücre sıcaklığının düşürülmesi sonucunda elektriksel verimde artış gözlemlemiştir. Analizler sonucunda PV/T sistemin toplam veriminin % 20,98 olduğu belirtilmiştir [33]. Soğutma sisteminin PV/T verimi üzerinde etkisini inceleyen Dilşad Engin doktora tezinde, güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrit sistemin elektriksel ve termal performansını İzmir iklim şartlarında deneysel olarak incelemiştir. Sistem doğal dolaşimli ve pompa ile dolaşım sağlanarak düzenlenmiştir. Doğal dolaşimli sistemde verim % 41 olarak hesaplanırken, pompa ile dolaşım sağlandığında verimin % 59 a kadar yükseldiği ve ayrıca debi arttıkça termal verimin arttığı belirtilmiştir [34]. Ayrıca Fatih Duran yüksek lisans tezinde, PV panelin arka yüzeyine yerleştirilen borular içerisinden su geçirilmiş ve bir depoya aktarılmıştır. Bu şekilde panelin soğutmasıyla hem PV/T sistemin verimi artırılmış hem de sıcak su temin edilmiştir. Deneysel çalışmalar 33° ve 37° gibi farklı panel açılarında ve 0,16 kg/s ve 0,33 kg/s gibi farklı soğutma suyu debilerinde yapılmıştır. Yapılan enerji ve ekserji analizleri sonucunda, soğutmalı ve soğutmasız paneller kıyaslandığında Isparta iklim şartlarında elektrik üretiminde % 7 verim artışı

saptanmıştır [35]. PV/T sistemlerin optimizasyon ve performans iyileştirmesi amacıyla Halil İbrahim Dağ doktora tezinde, özdeş PV modüllerin yer aldığı, farklı çaplara sahip soğutucu boruları olan, farklı dizilimlerinde ve farklı tabaka tiplerindeki termal kısım yapıları bulunan 5 adet PV/T modül üretmiştir. Ayrıca, bir PV modül ile PV/T modüllerin elektriksel performanslarının karşılaştırılması amacı ile PV/T modül üretiminde kullanılan PV hücrelerle özdeş özelliklere sahip hücreler kullanılarak 1 adet PV modül üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda PV/T sistemlerin en yüksek verim değerleri % 60,68 ile % 67,14 arasında bulunarak verimi en yüksek olan sistem belirlenmiştir [36].

PV/T sistemlerin hem elektrik hem de sıcak su ihtiyacını karşılayabilmesi, farklı enerji kaynaklarından enerji üretiminde kullanılabilmelerine imkân sağlamıştır. Elham Maghsoodi Shaghaghi yüksek lisans tezinde, hem elektrik enerjisi termal enerji üreten PV/T kollektör desteği ile çalışan bir biyogaz sistemiyle hayvansal atıklardan gaz üretimi gerçekleştirmiştir. PV/T sisteminden alınan enerjinin hayvansal atıklardan gaz üretebilen bir biyogaz sisteminde kullanımını sağlanmıştır. Oluşturulan sistemde, ihtiyaç duyulan elektrik gücü 4,83 kWh olarak ölçülmüş, 0,8 kWp PV/T ile % 62 tasarruf sağlanabileceği saptanmıştır [37].

PV ve PV/T sistemlerin elektriksel ve termal performanslarının belirlenmesinde kullanılan teorik ve deneysel çalışmaları destekleyici yönde simülasyon programları da mevcuttur. Bu programların amacı, oluşturulabilecek sistemlerin modellemesini, boyutlandırılmasını ve analizlerini yapmak olup, ayrıca kurulum ve işletme maliyetlerini hesaplayarak maliyet analizlerini gerçekleştirmektir. Rüştü Eke yüksek lisans tez çalışmasında, PVsyst yazılımı ile Muğla iklim koşullarında, Muğla Üniversitesi merkez kütüphanesi çatısında kurulması planlanan 54 kWp gücündeki şebekeye bağlı bir PV sistemin tasarımını ve optimum verimlilik çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Sistemin yıllık ve aylara göre üreteceği elektrik enerjisi miktarı, çalışma süresi, beklenen örgü sıcaklığı ve güç kayıpları incelenmiştir [38].

Kalogirou ve Tripanagnostopoulos 3 farklı şehrin iklim koşullarında (Lefkoşa, Atina ve Madison) PV/T sistemlerinin termal ve elektriksel analizlerini gerçekleştirebilen Transient System Simulation (TRNSYS) isimli simülasyon programında sıcak su ve elektrik üretimi potansiyellerini incelemişlerdir [39]. Aynı

ayrı pc-Si ve a-Si PV hücrelerin kullanıldığı PV/T sistemlerde polikristal hücreler kullanılan sistemin yıllık elektriksel enerji üretiminin amorf silikon kullanılan sisteme göre çok daha fazla olduğu ancak termal enerji üretiminin biraz az olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca Aste ve ark., TRNSYS adlı simülasyon programıyla gerçekleştirdikleri çalışmalarında, Milano kenti iklim koşullarında camlı ve camsız PV/T panellerin tüm yıl boyunca elektriksel ve termal performanslarını karşılaştırmışlardır. Simülasyon sonucuna göre her iki sistemin toplam enerji üretim miktarlarında çok farklar olmamasına karşın cam kapaksız sistemin elektriksel üretiminin daha fazla olduğunu belirlemişlerdir [40].

Hüseyin Özgür Doğanay yüksek lisans tez çalışmasında, Kırklareli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü Hizmet Binasının elektrik ihtiyacının PV/T sisteminden karşılaması için TRNSYS adlı programda tasarlanan sistemin simülasyonu üzerinden değerlendirmeler yapmıştır. Hizmet binasının 1 aylık elektrik tüketim verileri ve Kırklareli İli için 2012 yılına ait hava verileri kullanılarak şebekeye bağlı bir sistem tasarlanmıştır. Mevsimlere göre farklı kollektör açısı değerlerinde yaptığı simülasyon çalışmalarında optimal açığı belirlemiş ve bu binanın enerji ihtiyacının yaklaşık % 90'ının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanabileceği sonucuna varmıştır [41].

Mustafa Kaya yüksek lisans tezinde, Rak UAE iklim şartlarında PV/T sistemin elektriksel ve termal performansları deneysel olarak incelenmiş ve Polysun adlı bilgisayar programında sistemin güç çıkışı ve gereksinimleri, finansal analizi ile birlikte sunmuştur. Ayrıca, sürdürülebilir enerji sistemlerine yönelik teşviklerin Birleşik Arap Emirlikleri'nde konut kullanımı için PV/T sistemlerinin ekonomik fizibilitesi üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için bir çalışma yapılmıştır [42].

Kandilli ve arkadaşları, Uşak iklim şartlarında ısı transfer akışkanı olarak suyun kullanıldığı ve monokristal silisyum fotovoltaik modülden oluşan bir PVT sistemin 2D ısı transfer analizi ve termodinamik modellemesini COMSOL Multiphysics yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. 620 W/m^2 güneş ışınımı, $13 \text{ }^\circ\text{C}$ dış ortam sıcaklığı ve $20 \text{ }^\circ\text{C}$ giriş suyu sıcaklığı koşullarındaki ölçüm sonuçlarına göre ortalama termal verim 0,27 olarak hesaplanırken, simülasyon sonuçlarına göre ortalama termal verim 0,22 olarak bulunmuştur. PVT modülün toplam enerji verimi ise deneysel olarak 0,38 bulunurken; simülasyon sonuçlarına göre 0.33 olarak ortaya konmuştur [43].

Sistemin güvenilirliğini arttırmak amacıyla farklı bilgisayar programları kullanıp karşılaştırmak gerekmektedir. Babatunde A. ve Abbasoğlu S.; Pvspanner, PVsyst ve Homer adlı PV sistemlerin simülasyon çalışmalarının yapılabildiği farklı simülasyon programları ile aynı iklim şartlarında bir sistem ile üretilebilecek elektrik enerjisi miktarını hesaplamışlardır. Daha sonra sonuçları deneysel üretim miktarı ile karşılaştırmışlardır. Sırasıyla 11,573 kWh, 11,083 kWh, 11,304 kWh gibi yakın değerler hesaplamışlardır ve deneysel üretim miktarını 12,216 kWh olarak ölçülmüştür [44].

PV/T ve PV sistemlerin maliyet analizlerine yer veren çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde Agrawal ve Tiwari, Yeni Delhi iklim koşullarında gerçekleştirdikleri çalışmalarında, farklı hücre yapılarına sahip PV/T sistemlerin yaşam döngüsü maliyet analizini yapmışlardır. Monokristal hücreye sahip PV/T sistem için gerçekleştirdikleri yaşam döngüsü maliyet analizi çalışmalarında üretilen enerjinin maliyetin 0,119 \$/kWh olarak hesaplamışlardır [45]. Başka bir çalışmada Chow ve ark., oluşturdukları sistemin geri ödeme süresini 13,8 yıl olarak hesaplamışlardır [46].

1.6 Tezin Amacı ve Önemi

Bu tez kapsamında, Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde kurulan bir PV/T sistemin çalışması ölçüm sonuçlarına göre incelenmiş, simülasyon programları ile karşılaştırılmış ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin amaçlarından biri, Balıkesir koşullarında bir PV/T sistemin performansını belirlemektir. Belirli tarih aralığında şebeke bağımsız çalışma koşullarında bir PV/T sistemden elde edilen elektriksel ve termal enerji miktarları hesaplanmıştır. Alınan deneysel veriler simulink ortamında PV/T matematiksel denklemleri kullanılarak hazırlanan simülasyon ile doğrulanmıştır.

Tezin diğer bir amacı PV/T kollektörlerin elektriksel ve termal performanslarının incelenip elde edilen elektriksel ve termal verim değerlerini hesaplamaktır.

Son olarak tezin bir diğer amacı da kurulan bu sistemin simülasyon programları ile üretebileceği yıllık toplam enerji değerlerini hesaplamak ve bu

verileri sistemin ekonomik analizinin gerçekleştirilmesinde kullanmaktır. Sistemin üreteceği birim enerji bedelleri hesaplanmış ayrıca, sistemden elde edilen toplam enerji miktarının geleneksel yollarla elde edilmesi durumunda oluşan maliyetlerle karşılaştırılmıştır.

Literatür incelendiğinde Balıkesir ili özelinde PV/T sistemlerin çalışma performansı hakkında çalışmalar bulunmamaktadır. Bu anlamda çalışmamız nc bir çalışma olmuştur. Deneysel alışmalar boyunca elde edilen 1 yıllık Balıkesir meteorolojik verilerinden oluşan veri seti başka çalışmalarda da kullanılabilir düzeydedir. Ayrıca, Matlab-Simulink ile oluşturulan simülasyon sistemi ile meteorolojik verileri girilen bir PV/T sistem için elde edilen yıllık termal ve elektriksel enerji miktarları hesaplanabilmektedir. Sistemin kullanım ömrü maliyet analizi de matlab-simulink ile gerçekleştirilmiştir.

2. M A T E R Y A L V E Y Ö N T E M

Bu bölümde PV/T sistemlerin yapısı, çalışma prensibi ve kullanıldığı alanlar, ekonomik analizi, tezde kullanılan simülasyonlar ve kurulan sistemin tanıtımı verilmiştir.

2.1 Fotovoltaik/Termal Sistemler

Fotovoltaik hücreler tarafından kullanılan foton enerjisinin büyük kısmı elektrik enerjisine dönüştürülemez ve ısı enerjisi olarak sistemde bulunur. Bu ısı enerjisi fotovoltaik hücrelerinin ısınmasına, dolayısıyla elektrik veriminde azalmaya sebep olur. Hücredeki bu sıcaklığın bir akışkan yardımı ile çekilmesi suretiyle, elektrik verimi daha yüksek seviyelerde tutulabilir. Bunu sağlamak için PV/T hibrit sistemler oluşturulmuştur. Bu sistemler, düzlemsel PV modül ve ona bağlı ısı soğuran elemanlardan oluşmaktadır. Böylece eş zamanlı olarak ısı ve termal enerji üretilmektedir. Sistemden alınan toplam enerji miktarı; güneş radyasyonuna, ortam sıcaklığına, rüzgâr hızına, sistemde bulunan elemanların çalışma sıcaklığına ve ısı çekme yöntemine göre değişiklik gösterir [47].

PV/T sistemlerin PV sistemlere göre aşağıda belirtilen avantajları bulunmaktadır;

- Ayrı ayrı PV kollektör ve termal kollektör kullanımı için gerekli alan miktarının yarı yarıya inmesiyle kısıtlı alanlarda daha fazla enerji üretimine olanak sağlar.
- Ayrı ayrı kullanılacak PV ve termal kollektör kurulumuyla ortaya çıkacak mimari ve estetik düzensizlik ortadan kalkar.

PV kollektör sıcaklığının azalmasıyla elektrik verimi artar [48]. Fotovoltaik malzemeler, güneşten soğurulan foton (ışık) enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedirler. Bu enerji dönüşümü için yarı iletken malzemelerle oluşturulmuş yüzeyler kullanılır. Fotovoltaik olay, ilk olarak 1839 yılında Edmond Becquerel tarafından, elektrolit içindeki elektrotlardan birinin üzerine ışık

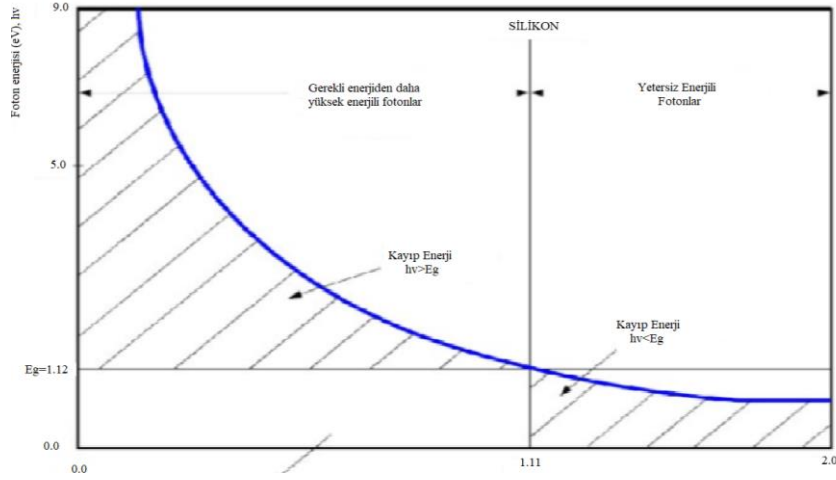
düşürüldüğünde elektrotun uçları arasında bir potansiyel fark oluştuğunda keşfedilmiştir. Ticari kullanım amacıyla ilk güneş pilini Schottky, Lange ve Grondah üretmiştir. Bu güneş pili, bakır oksit (Cu_2O) ve selenyumdan (Se) üretilmiştir. Modern anlamda kurulan ilk fotovoltaik sistem Bell Telephone laboratuvarında 1954 yılında G.L. Pearson, C.S. Fuller ve D.M. Chapin tarafından p-n katkılı silisyum güneş pili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu güneş pilinin yaklaşık veriminin % 6 civarında olduğu bildirilmiştir [49,50].

PV/T sistemler; PV modül ve kollektör olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadırlar.

2.1.1 Fotovoltaik (PV) Malzemelerin Çalışma Prensibi

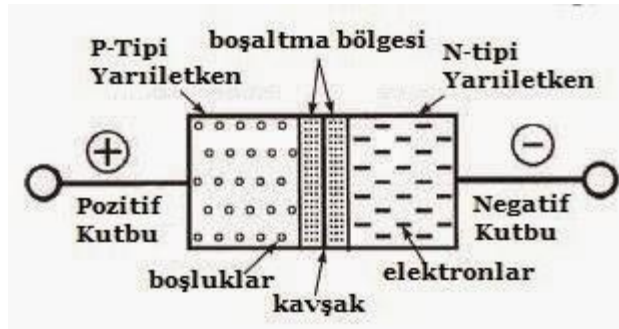
Ortak temas noktası bulunan iki yarı iletken (p-n) maddenin temas noktalarına ışın radyasyonu temas ettiğinde, bu iki malzeme arasında bir potansiyel fark oluşur. Yeterli miktarda enerjisi bulunan fotonlar, malzemelerde oyuk-elektron çifti oluşturur. Pozitif (+) yüklü oyuklar ile negatif (-) yüklü elektronlar hareket halindedirler, böylece dış devrede akım akıtılmaktadır. Bu olayın oluşması için elektronların değerlik bandından iletim bandına taşınması gerekmektedir. Kendi kendine oluşmayacak bu durum için gerekli enerjiyi fotonlar sağlamaktadır. Fotonları karakterize etmek için enerji, frekans ve dalga boyu gibi değişkenler kullanılmaktadır [51].

Fotonların % 24'lük kısmı, silikonda bulunan elektronların değerlik bandından iletim bandına taşınmasını sağlayacak enerjiye sahip değildir. % 20'lik kısmı sızıntı akımı ve dirençlerde kaybolmaktadır. % 32'lik kısmı ise gerekli miktardan daha fazla enerjiye sahiptir. Elektronları iletim bandına geçirmek için yetersiz olan ve gereğinden fazla olan enerji fotovoltaik panel tarafından absorbe edilerek sistemde ısı enerjisi olarak kalmaktadır [52]. Dalga boyu uzunluğu 1 μm 'den küçük olan fotonların enerjisinin bir elektronu uyarmak için gerekli olan enerjiden fazla olduğu Şekil 2.1' de görülmektedir. Oluşan bu enerji fazlalığı fotovoltaik hücre üzerinden ısı açığa çıkartmaktadır [48].



Şekil 2.1: Fotovoltaik hücrenin çalışmasının bağ teorisiyle açıklanması [48].

Fotovoltaik hücre yapımında en çok silisyum ve silisyum alaşımli malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de fotovoltaik hücrelerin içyapısı gösterilmektedir [53].



Şekil 2.2: Fotovoltaik hücrenin iç yapısı.

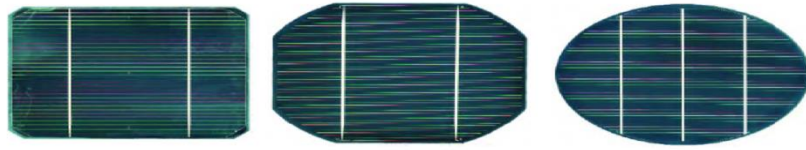
2.1.2 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Çağımızda kullanılan fotovoltaik hücreler üretim metoduna göre dört çeşide ayrılır. Bu metotlar; kristal yapı teknolojisi, ince film teknolojisi, birleşik teknoloji ve nanoteknolojidir. Bu metotlara göre hücre çeşitleri;

Tek kristal silisyum; üretilen fotovoltaik hücre çeşitleri içerisinde en eski teknolojiye sahip ve en pahalı olmasına rağmen halen en yüksek verime sahip hücre

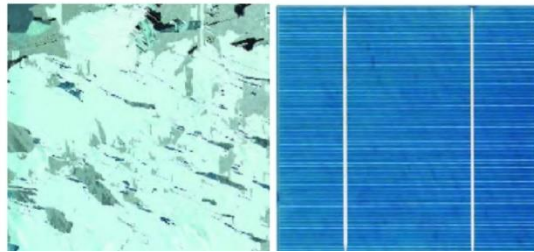
çeşidi olarak monokristal hücreler gösterilmektedir. Ortalama verimleri % 15 ile % 18 arasında değişiklik göstermektedir. Son yıllarda üretilen bazı ticari monokristal hücreler % 20 ile % 22 arasında verimlilik değerlerine sahiptirler [2].

Monokristal hücreler homojen yapıya sahiptir ve koyu maviden siyaha doğru değişen bir rengi vardır. Genellikle kare, yarı köşeli ya da dairesel boyutları vardır (Şekil 2.3) [2].



Şekil 2.3: Monokristal hücreler.

Çok kristal silisyum; çok kristal hücre üretiminde en fazla kullanılan yöntem “dökme” yöntemidir. Erimiş silisyum, kalıplara dökülür ve soğutulur. Ardından bu bloklar kare şeklinde kesilerek polikristal hücreler elde edilir. Tek kristal hücre üretimine göre daha kolay elde edilmesine karşın verimleri % 14 ile % 17 arasındaki değerlerde kalmaktadır. Maliyeti de tek kristal hücrelere göre daha düşüktür. Çok kristalli yapıları gereği ışığın yansımaları ile kırılmalar görülebileceğinden hücre yüzeyi yansıma engelleyici kaplama ile kaplanmaktadır. Normalde gümüş olan rengi, mavi olmaktadır. Şekil 2.4’de kaplamalı ve kaplamasız çok kristal hücreler gösterilmektedir [2].



Şekil 2.4: Kaplamalı ve kaplamasız çok kristal hücreler.

Amorf silisyum; kristal yapıda olmayan bu hücrelerin laboratuvar verimleri yaklaşık % 10 civarlarındadır. Ticari amaçlı üretilenlerde ise % 5 ile % 7 arasındadır.

Çoğunlukla, küçük güçte elektronik cihazlara güç kaynağı olarak kullanılmaktadırlar [54].

Galyum arsenik (GaAs); laboratuvar şartlarında % 25 verim elde edilebilen bu hücreler silikona benzer yapıdadırlar. Yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalıştığı bilinmektedir. Başka yarı iletken malzemeler ile katkılanarak verimleri % 30 civarlarına çıkabilmektedir [54].

Kadmiyum tellürid (CdTe); çok kristalli yapıya sahip olan CdTe ile fotovoltaik hücre üretiminin geniş ölçekli üretime uygunluğu ve depolama kolaylığı sayesinde maliyeti çok aşağılara çekeceği ön görülmektedir. Laboratuvar şartlarında % 16, ticari modüllerde ise % 7 civarında verime sahiptirler [54].

İnce film fotovoltaik hücreler; yapımında çok çeşitli malzemelerden yararlanılabilen ince film hücreler aşırı ince yarı iletken katmanların üst üste yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Ticari kullanım amaçlı üretilenlerde, amorf silikon kullanılmaktadır. Ayrıca, çok kristalli bakır indiyum diselenid ve kadmiyum tellür de kullanılır. Üretim maliyeti oldukça düşük olan bu hücrelerin verimleri % 8 ile % 12 arasında değişmektedir [55].

Bakır indiyum diselenid fotovoltaik hücreler; indiyum, selenyum ve bakır elementleri ile yapılan birleşik yarı iletken malzemedan üretilen hücrelerdir. Optik absorpsiyon katsayısının yüksekliği, iletkenliğinin ve öz direncinin değiştirilebilir olması ve yüksek verimi diğer hücre tiplerine göre olan üstünlükleridir [55].

Nanofotovoltaik fotovoltaik hücreler; geleceğin güneş pili teknolojisi olarak görülmektedir. Yapılarındaki nano kristal α -Si:H (hidrojen amorf silikon) ve geçirgen iletken teknolojisi ile diğer fotovoltaik hücrelere % 8 ile % 10 arasında daha verimlidir [55].

2.1.3 PV/T kolektörlerin Akışkanlara Göre Sınıflandırılması

PV/T kolektörler soğutmada kullanılan akışkanın cinsine göre; PV/T hava ve su olarak iki kısımda incelenmiştir.

2.1.3.1 PV/T Hava Kollektörler

PV/T hava kolektörleri eş zamanlı olarak hava ısıtılması ve elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Güneş ışınlarından elektrik üretimi sırasında ısınan PV hücrelerin düşük sıcaklıklı hava ile soğutulması elektrik verimlerinin artırılması ve hücrelerden elde edilen sıcak havanın kullanımına dayanan bir çalışma sistemine sahiptir. Sistemdeki sıcak hava mekân ısıtma ve bazı kurutma işlemlerinde kullanılmaktadır [56].

2.1.3.2 PV/T Sıvı Kollektörler

PV/T sıvı kolektörlerde PV paneli soğutmak için sıvı akışkanlar kullanılmaktadır. Akışkan olarak genellikle su kullanılır. Suyun soğutma performansı havaya göre daha yüksektir [47]. İlk PV/T sıvı kolektör çalışması 1976 yılında, Martin Wolf tarafından gerçekleştirilmiştir. Bir termal kolektör içine solar silikon monte ettiği, düz yüzeyli PV/T su kolektörü diğer araştırmacılar için öncü olmuştur [26]. Yüksek sıcaklığa sahip iklimlerde hava ile soğutma tek başına PV sıcaklığını soğutmada yetersiz kalmaktadır. Havanın düşük öz ısısı ve yoğunluğu hem termal verimliliği hem de elektriksel verimliliği olumsuz şekilde etkilediğinden PV/T toplayıcılarda su kullanımı daha iyi bir seçenektir [57].

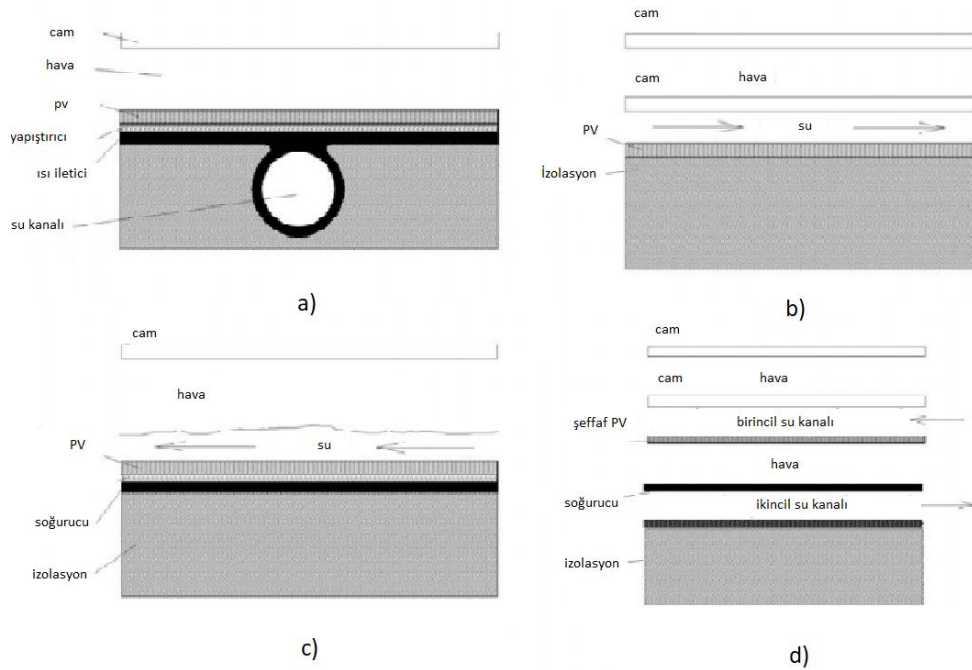
PV/T sıvı kolektörün tipik tasarımı, fotovoltaik modül ve arkasına sabit bir şekilde yerleştirilmiş metal levha ve sıvı emici plakadan oluşmaktadır. PV yüzeyin arkasında sıvı tabii dolaşım ya da zorlamalı (pompalı) biçimde dolaştırılarak hem PV hücre sıcaklığını düşürür hem de çevreye yayılacak bu ısıyı yararlı ve kullanılabilir hale getirir [58].

PV/T su kolektörler, bileşenlerine ve sıvının akışına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. En geniş sınıflandırmayı Zondag ve arkadaşları yapmıştır. Su akış modeli ve ısı değişim yöntemine göre Şekil 3.5 a'da verilen levha ve boru tipi model; metal ya da nadiren polimerik malzemeden üretilmiş, daha iyi bir elektriksel verim elde etmek için PV panel tarafından kaplanmış kanallı plakadan oluşmaktadır. Isı değiştirici dairesel kesitli kanallara paralel şekilde lehimlenmiş düz bir tabakadan oluşmaktadır [59].

Şekil 2.5 b’de verilen kanal tipi model, 1 numaralı modelden sıvı kanalının PV modülün üzerine montajının yapılmış olması özelliği ile ayrılır. Fotovoltaik hücreler üzerine cam yerleştirilir. Bu durumda solar radyasyon iletimi hesabı yapılırken dikkatli olunmalıdır, çünkü bu tabaka bileşenin performansını azaltabilir. Ayrıca, sıvı akışkanın varlığı elektriksel bileşenlere zarar vermemesi açısından dikkat edilecek önemli bir husustur.

Şekil 2.5 c’de verilen serbest akış tip kolektörlerde, sıvı PV modül üzerinde kontrolsüz şekilde akmaktadır. Bu model sıvının yoğunlaşması sebebiyle teorik olarak kalmıştır.

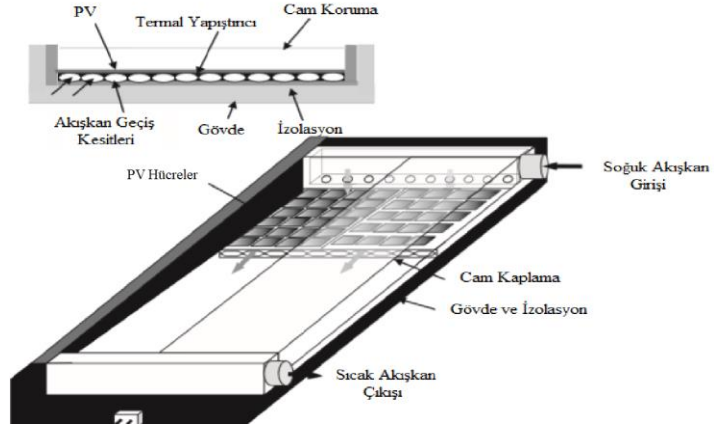
Şekil 2.5 d’de verilen iki kanallı çift soğuruculu modelde, birincil soğurucu olarak yarı saydam fotovoltaik modül kullanır. Isı transfer sıvısı bir hava tabakası ile aralıklı olarak PV modülün üzerinde akar. İkincil soğurucu olarak da siyah bir metal tabaka bulunmaktadır.



Şekil 2.5: a) Levha ve boru tipi PV/T b) kanal tipi PV/T c) serbest akış tipi PV/T d) çift soğuruculu tip PV/T.

Cristofari ve arkadaşlarının incelediği PV/T toplayıcı model, güneş ışınımını ısıya dönüştüren bir soğurucu-değiştirici eşanjöre yapıştırılmış polikristal PV modülden oluşmaktadır. Bu soğurucu-değiştirici, kollektör gövdesine yapıştırılan ve kollektör yapısına iyi mekaniksel özellikler kazandıran poliüretan malzeme ile izole edilmiştir. Şekil 2.6’da gösterilen bu soğurucu-değiştirici UV korumalı olmalı,

yüksek termal iletkenliğe ve iyi termal kullanım aralığına ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+1501\text{ }^{\circ}\text{C}$) sahip olmalıdır [60].



Şekil 2.6: Fotovoltaik- termal kollektör [62].

PV/T su kollektörleri kullanılarak elde edilecek hibrit sistemler ile diğer tek tek oluşturulacak PV ve termal sistemlere göre aşağıda verilen bazı avantajlar elde edilmektedir [48];

- Aynı alanda kurulacak bir PV ve termal kollektöre göre kurulduğu yerde mimari bütünlüğü sağlamaktadırlar.
- Aynı alanda kurulan PV/T panellerin ürettiği elektriksel ve termal enerji, bu alanın yarısına kurulan PV paneller ve diğer yarısına kurulan termal kollektörlere göre üreteceği enerji miktarı fazladır.
- Aynı alanda kurulacak PV paneller ve termal kollektörlere göre çok daha ekonomiktirler.

PV panellere göre düşük olan çalışma sıcaklıkları elektrik verimlerinin daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

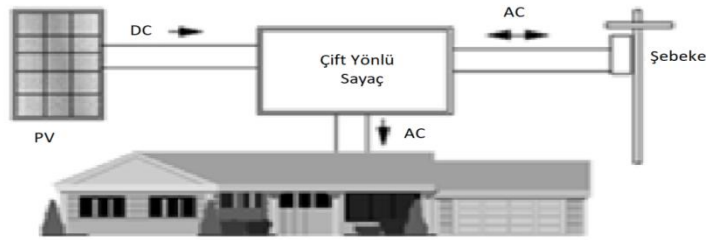
2.2 PV/T Sistemlerin Uygulamaları

2.2.1 Şebekeye Bağlı (On-Grid) Sistemler

Elektrik şebekesine bağlı olarak çalışan sistemlerdir. Dünyadaki yaygın kullanımına rağmen ülkemizde ancak son yıllarda uygulamaya konulan kanuni

düzenlemelerle kendine yer bulmuştur. Çift sayaç veya çift yönlü sayaç kullanılarak akü kullanımına ihtiyaç duyulmadan şebekeye güç aktarımı yapar ve şebekeden güç çekebilir sistemlerdir [61].

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi üretilen elektrik enerjisinin fazlasını şebekeye satılabildiği gibi, üretim yapılamadığı ya da ihtiyacı karşılamadığı durumlarda şebekeden elektrik enerjisi karşılayabilen sistemlerdir. Akü ve şarj kontrol masraflarını ortadan kaldırdığı gibi üretim fazlası enerjinin değerlendirilmesiyle yüksek oranda tasarruf sağlamaktadır.



Şekil 2.7: Şebeke bağlantılı sistem modeli.

Şebekeye bağlı sistemler üç şekilde çalışabilirler;

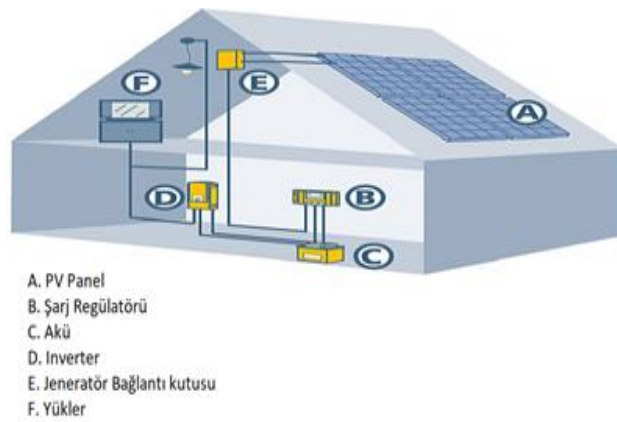
1- Şebeke içi kullanım sistemleri; PV/T paneller ile elde edilen enerji şebeke ile aynı özelliklerdeki AC enerjiye dönüştürülerek kullanıma hazır hale gelir. Enerji depolanmadan kullanılır, üretim durduğunda ya da enerjinin yetmediği durumlarda şebeke enerjisinden yararlanır. Bu sistem herhangi bir yasal düzenlemeye ihtiyaç duymadan kullanılabilir [61].

2- Şebeke içi satırlı sistemler; PV/T panellerde üretilen enerji inverter ile AC enerjiye dönüştürülerek sayaçtan geçirilir ve şebekeye aktarılır. Üretici kendi ihtiyacını şebekeden karşılar. Yasal düzenlemelere ihtiyaç duyan bu sistemlerde, üretici ürettiği enerji miktarına göre kazanç sağlamaktadır [61].

3- Şebeke içi satırlı-akülü sistemler; PV/T paneller ile üretilen enerji şarj regülatörü kullanılarak aküleri şarj eder. Akülerde doldurulan enerji inverter yardımıyla AC enerjiye çevrilerek şebekeye aktarılır. Enerji üretilmediği durumlarda şebekeden enerji aktararak aküler doldurulabilir. Bu sayede, şebekeye enerji aktararak kazanç elde eden sistem sahibi, şebeke elektriği olmadığı durumlarda akülerde depoladığı enerjiyle ihtiyaçları için kullanılabilir [61].

2.2.2 Şebekeden Bağımsız (Off-Grid) Sistemler

Bu tip sistemlerde üretilen enerji şarj regülatörü yardımıyla akülerde depolanarak kullanıma hazır hale gelir. Şekil 2.8’de gösterilen bu sistem sadece DC yük ihtiyacı olan yerlerde akülerden kullanır. AC yük ihtiyacı bulunan yerlerde akülerden alınan enerji inverter yardımıyla şebeke gerilimine çevrilerek kullanılır. [62]. Üretim yeterli olmadığı durumlarda jeneratör yardımıyla sistem beslenebilir. Şebeke elektrik sisteminin olmadığı dağ evleri, tekne, çadır gibi yerlerde sıklıkla kullanılmaktadır.



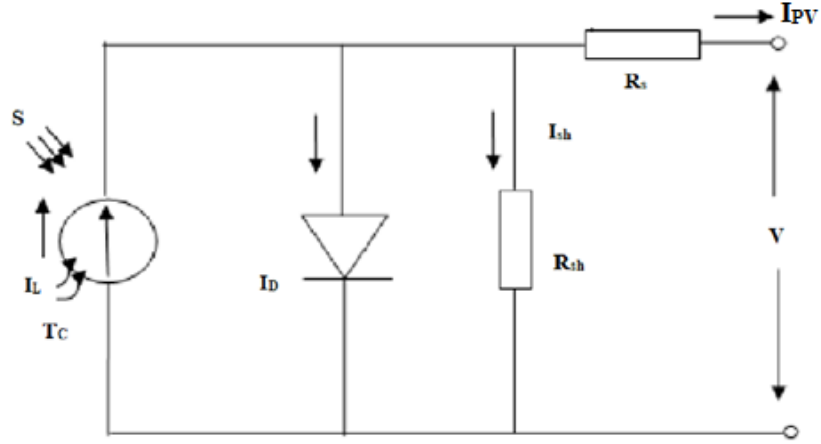
Şekil 2.8: AC ve DC yükler için stand-alone sistem modeli.

Güneş enerjisi, sürekli bir enerji olmadığı için depolanması gereken bir enerji türüdür. İhtiyaç duyulan depolanan enerji miktarı ise çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Şebekeden bağımsız sistemlerde genellikle 12 V'luk kurşun-asit aküler kullanılır. Nikel-Kadmiyum aküler ise daha pahalı oldukları için daha az yaygınlıkta kullanılırlar. Kurşun asit aküler, fazla boşaldıklarında tekrar doldurulmaları kolaydır ve ömür kaybına fazla uğramazlar [18].

2.3 PV/T Sistemlerin Matematiksel Modeli

PV/T sistemlerin matematiksel olarak modellenmesi için sistemin hem elektriksel hem de termal kısımları ayrı ayrı düşünülmelidir. Sistemin elektriksel kısmı modellenirken PV hücrenin matematiksel ifadeleri verilmiştir.

Fotovoltaik piller, üzerine aldığı ışıklardan foton gerilimi ve akımı oluşturan geniş alanlı düz beslemeli diyotlardan oluşur. Fotovoltaik bir malzemenin çalışmasını anlamak için akım ve gerilim karakteristiğini tek diyotlu eşdeğer devresi üzerinden analiz etmek gerekir (Şekil 2.9) [63].



Şekil 2.9: Fotovoltaik hücrenin tek diyot modeli.

Şekil 2.9’da verilen modelde; I_L foton akımını, I_D diyot akımını ve I_{sh} paralel koldan akan akımı göstermek üzere, toplam fotovoltaik hücre çıkış akımı denklem 2.1’de verilmektedir [63].

$$I_{PV} = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

Işık akımı; güneş radyasyonuna ve kısa devre akımına bağlı değişirken aynı zamanda hücre sıcaklığı ve referans sıcaklık farkından elde edilen değer ile kısa devre akımının sıcaklık katsayısıyla çarpımıyla değişmektedir ve denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$I_L = I_S \cdot S_N + I_T \cdot (T_h - T_r) \quad (2.2)$$

Diyot doyma akımı I_0 için, sıcaklığa bağlı diyot akımı denklem 2.3’te verilmiştir [63].

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{q \cdot \frac{(V + I \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Çalışma noktasındaki diyot doyma akım değerini bulmak için denklem 2.4 kullanılır [63].

$$I_0 = \left(\frac{T_R}{T_h}\right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_g}{A_i \cdot k}\right] \cdot \left[\left(\frac{1}{T_R}\right) - \left(\frac{1}{T_h}\right)\right]} \quad (2.4)$$

Paralel direnç akım değeri denklem 2.5 ile bulunmaktadır.

$$I_{SH} = \frac{(V_{PV} + I_{PV} \cdot R_S)}{R_{SH}} \quad (2.5)$$

Panele bağlı bir yük bulunmadığı durumlardaki açık devre gerilimi V_{oc} , a idealite faktörü, k Boltzman sabiti, T mutlak kesişme sıcaklığı olmak üzere, açık devre gerilimi denklem 2.6 ile hesaplanmaktadır [52].

$$V_{oc} = \frac{a \cdot k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_L + I_0}{I_0} \right) \quad (2.6)$$

PV panellerin elektrik enerji verimlerini bulurken, denklem 2.7'deki gibi panel çıkış maksimum noktası akım ve gerilim değerlerinin çarpımının toplam yüzeye gelen güneş radyasyonuna oranı hesaplanır.

$$\eta_e = \frac{V_m \cdot I_m}{I_T \cdot A_c} \quad (2.7)$$

Elektriksel verimin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin gösterildiği Radziemska tarafından verilen eşitlik denklem 2.8'de gösterilmektedir [65];

$$\eta_{el} = \eta_0 [1 - \beta_0 (T_h - T_r)] \quad (2.8)$$

Kollektörlerde termal performans hesaplanırken, ısı kayıpları hesaba katılır. Bu kayıplar çok sayıda değişkene bağlıdır. Güneş ışınım şiddeti, rüzgârın hızı, ortam sıcaklığı, kolektörün yapısı, saydam örtü özellikleri, yutucu yüzeyin ışınım yayma ve yutma değeri, termal iletim katsayısı, kalınlığı, yalıtım malzemesinin türü ve kalınlığı bu değişkenlerden bazılarıdır [66].

PV/T kollektörlerin kararlı hal termal verimi (η_{th}) denklem 2.9'da verilmiştir.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{I_T} \quad (2.9)$$

Burada, denklem 2.10 ile hesaplanan Q_u yararlı ısı ve I_T solar ışınım miktarıdır [67].

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{\zeta} - T_g) \quad (2.10)$$

Hottel ve Willier yararlı ısı denklemini denklem 2.11’de görüldüğü gibi tanımlamışlardır [68].

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_g - T_a)] \quad (2.11)$$

Burada A_c kollektör alanını, S kollektörün soğurduğu güneş ışınımını, U_L kollektörün toplam ısı kayıp katsayısı, T_g ve T_a sırasıyla giriş sıcaklığını ve hava sıcaklığını göstermektedir.

Kollektörde alt, yan ve üst yüzeylerden ısı kaybı oluşmaktadır. Denklem 2.12’de verilen toplam ısı kayıp katsayısı bu kayıpların toplamıdır [68].

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.12)$$

F_R kollektör ısı kazanç faktörü kollektördeki toplam faydalı enerjinin, soğurucu yüzeyin tüm kısımlarının akışkan giriş sıcaklığında olması durumunda toplayacağı enerjiye olan oranıdır (denklem 2.13).

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - e^{-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p}} \right] \quad (2.13)$$

F' , kollektör verim faktörü denklem 2.14’teki gibi hesaplanabilir [68];

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D) F]} + \frac{1}{W \cdot h_{pVA}} + \frac{1}{\pi D h_{fi}} \right]} \quad (2.14)$$

h_{pVA} , PV laminanttan soğurucu levhaya ısı geçiş katsayısı, h_{fi} boru iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı olarak verilmiştir.

F , fin faktörüdür ve denklem 2.15’de verilmiş olup [68],

$$F = \frac{\tanh\left(M \frac{W - D_0}{2}\right)}{\left(M \frac{W - D_0}{2}\right)} \quad (2.15)$$

Buradaki M değeri denklem 2.16 ile hesaplanmaktadır.

$$M = \sqrt{\frac{U_L}{k_{abs} l_{abs} + k_{pv} l_{pv}}} \quad (2.16)$$

D_i boru çapı, W boru alanı, k_{abs} soğurucu plaka ısı iletim katsayısı, l_{abs} soğurucu plaka kalınlığı, k_{pv} pv ısı iletim katsayısı ve l_{pv} de kalınlığıdır.

Üst yüzey kayıp katsayısı denklem 2.17 ile hesaplanmaktadır. Burada k_i , arka yüzey yalıtım malzemesinin ısı geçiş katsayısı ve L_i yalıtım malzemesi kalınlığıdır.

$$U_t = \frac{k_i}{L_i} \quad (2.17)$$

Yan yüzey ısı kaybını veren denklem 2.18'deki formülde k_{edge} , yalıtım malzemesi ısı geçiş katsayısı, L_{edge} yalıtım malzemesi kalınlığı, p kollektör çevresi; t ise soğurucu levha kalınlığıdır [68].

$$U_e = \frac{k_{edge} \cdot p \cdot t}{L_{edge} \cdot A_c} \quad (2.18)$$

Üst yüzey kayıp katsayısı denklem 2.19'da verilmiştir.

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{c}{T_{mp}} \left(\frac{T_{mp} - T_a}{N+f} \right)^e + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \frac{k(T_{mp} + T_a)(T_{mp}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591N h_w)^{-1} + \frac{2N+f-1+0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (2.19)$$

ε_p ve ε_g , PV laminantın ve camın yayma oranı, h_w , rüzgâr ile ısı transferi katsayısı, k , Stefan-Boltzmann sabitidir. N , cam katman sayısıdır. c , f ve e ise ampirik formüllerdir. Bu formüller aşağıdaki şekilde verilir;

$$c = 520(1 - 0.000051(\beta)^2) \quad (2.20)$$

$$e = 0,43 \left(1 - \frac{100}{T_{mp}} \right) \quad (2.21)$$

$$f = (1 + 0,089h_w - 0,1166h_w\varepsilon_p) \cdot (1 + 0,07866N) \quad (2.22)$$

Tüm bu denklemler kullanılarak termal verim ifadesi denklem 2.23'de verilen eşitlikten bulunabilir [63];

$$\eta_t = F_R(\alpha\tau) - F_R U_L \frac{T_a - T_g}{I_T} \quad (2.23)$$

η_0 standart test koşullarındaki hücre verimi ve T_{mp} levha ortalama sıcaklığı olmak üzere levha ortalama sıcaklığını veren eşitlik denklem 2.24'te verilmiştir [68].

$$T_{pm} = T_g + \left(\frac{Q_u/A_c}{U_L F_R}\right)(1 - F_R) \quad (2.24)$$

2.4 PV/T Sıvı Sistemlerin Ekonomik Analizi

Yenilenebilir enerji sistemlerinin üretebileceği enerjinin maliyetinin hesaplanabilmesi için, bu sistemlerin performanslarının ve maliyetlerinin hesaplanması gerekmektedir. Daha sonra, üretilen enerjinin diğer yenilenebilir enerji kaynakları ve konvansiyonel teknolojiler ile karşılaştırarak en verimli seçenek belirlenmelidir. Enerji maliyetleri hesaplamak için birçok yöntem vardır. En çok kullanılan iki tanesi geri ödeme hızı ve kullanım ömrü maliyeti yöntemidir.

- **Geri ödeme hızı yöntemi**, yatırılan anaparanın geri kazanılması için geçen sürenin hesaplandığı yöntemdir. Geri ödeme süresinin yıl cinsinden hesaplandığı matematiksel ifade denklem 2.25'te verilmiştir.

$$\text{Geri ödeme periyodu} = \text{Anapara maliyeti} / \text{Ortalama yıllık getiri} \quad (2.25)$$

Geri ödeme metodunda sistemin ömrü ve ileride oluşabilecek maliyetler hesaba katılmamaktadır. Kullanışlı ve basit bir ekonomik analiz yöntemi olmasına rağmen karmaşık para akışlarının olduğu durumlar için yeterli değildir [52].

- **Kullanım ömrü maliyeti hesabı yöntemi**, sistemin kullanım ömrü boyunca oluşacak tüm maliyetlerinin hesabının yapıldığı bu yöntemde paranın zaman değeri temel alınır.

Bir güneş enerji sisteminin maliyetini hesaplariken tüm ömrü boyunca yapılan maliyetler ve ödemeler hesaplanır. Bu maliyetler; anapara maliyeti, işletim ve bakım maliyetleri, tamir ve değiştirme maliyetleri ile hurda değerini kapsamaktadır. Özellikle, uzun zamana yayılmış ekonomik yatırımlarda maliyetler bulunurken faiz oranları hesaba katılmalıdır. Üretilen enerjinin maliyetini hesaplariken de sistemin kurulum aşamasındaki ve çalışma ömrü boyunca yapılan tüm

masraflar referans bir tarihe getirilerek yıllık sermaye masrafı bulunur, daha sonra üretilen enerji toplamına bölünür. Sistemin kullanım ömründeki tüm maliyetleri hesaplamaya yarayan eşitlik denklem 2.26'da verilmiştir [52].

$$TLCC=CC+OMC+RRC-Salv \quad (2.26)$$

Burada; TLCC toplam kullanım ömrü maliyeti, CC anapara maliyeti, OMC işletim ve bakım masrafları, RRC tamir ve değiştirme maliyetleri, Salv hurda değeridir.

Güncel değeri P olan bir yatırımın N yıl sayısı ve i faiz oranı olmak üzere bugünkü değeri denklem 2.27'de verilmiştir.

$$C_a = P \frac{1 - (1 + i)^{-N}}{i} \quad (2.27)$$

Sistemin tüm ömrü boyunca oluşacak işletim ve bakım masraflarının bugünkü değerini hesaplamaya yarayan formül denklem 2.28'de verilmiştir. OM değeri yıllık işletim ve bakım masrafını ifade eder ve toplam anapara maliyetinin %1'i olarak alınmıştır.

$$OMC = OM \frac{1 - (1 + i)^{-N}}{i} \quad (2.28)$$

Tamir ve değiştirme maliyetleri için kullanım ömrü sistem ömründen kısa olan her bileşen için her değiştirme tarihine göre ayrı ayrı yapılmaktadır. Denklem 2.29'da örnek olarak akü için değiştirme bedeli bugünkü değerine indirgenmiştir.

$$Repbat = Capbat \left(\frac{1}{1 + i} \right)^N \quad (2.29)$$

Toplam hurda bedelinin bugünkü değerini hesaplarken kullanılacak formül denklem 2.30'da verilmiştir. Burada Sa değeri hurda değeri olup anapara maliyetinin onda biri olarak alınmıştır.

$$Salv = Sa \left(\frac{1}{1+i} \right)^N \quad (2.30)$$

Toplam kullanım ömrü maliyeti hesaplandıktan sonra yıllık kullanım maliyeti denklem 2.31 ile bulunmaktadır.

$$ALCC = \frac{(TLCC).i}{1 - (1+i)^{-N}} \quad (2.31)$$

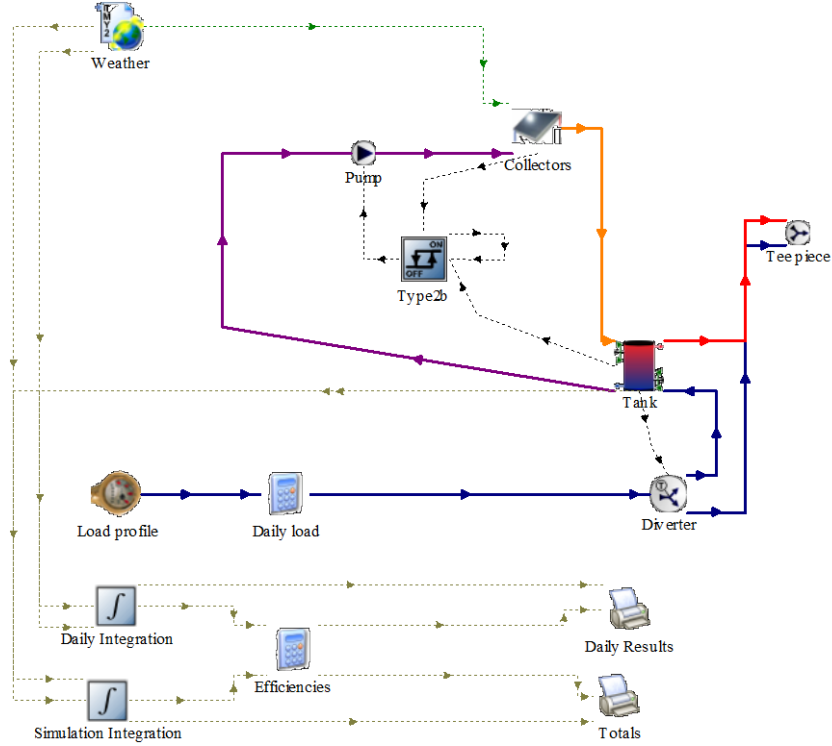
ALCC değerinin yıllık üretilen toplam enerji miktarına bölümüyle de enerji birim maliyeti hesaplanmaktadır (Denklem 2.32).

$$COE = \frac{ALCC}{E} \quad (2.32)$$

2.5 PV/T Sistemin TRNSYS ile Simülasyonu

TRNSYS Colorado ve Wisconsin Üniversitelerinin güneş enerjisi laboratuvarlarında geliştirilmiştir. 1975 yılında kullanılmaya başlanan bu araç, termal sistemlerin dinamik performansını hesaplama yeteneğine sahiptir. Modüler bir altyapıya sahip olan bu programda yer alan her bileşen bir FORTRAN alt programı olarak ifade edilmiştir. Bu sayede, esnek bir şekilde farklı enerji sistemlerini farklı detaylar ile tanımlamaya imkân sağlar. Sistemleri ifade eden Fortran alt programlarının bir araya getirildiği ve birbirleriyle ilişkilendirildiği grafiksel bir ara yüze sahiptir. Zengin bir kütüphanesi bulunmaktadır. Farklı yenilenebilir enerji teknolojileri, HVAC ekipmanları, çeşitli bina modelleri ve malzemeleri gibi örnekler kütüphanesinde yer almaktadır. Programı etkin bir şekilde kullanabilmek, bu alanda uzmanlık gerektirmektedir [69].

Şekil 2.10'da TRNSYS adlı yazılım ile oluşturulabilecek birçok sistemden birisi olan örnek bir sıcak su sisteminin analizinde kullanılan akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.10: TRNSYS ile oluşturulmuş örnek sıcak su sistemi akış şeması.

2.1 PV/T Sistemin Matlab Simulink ile Simülasyonu

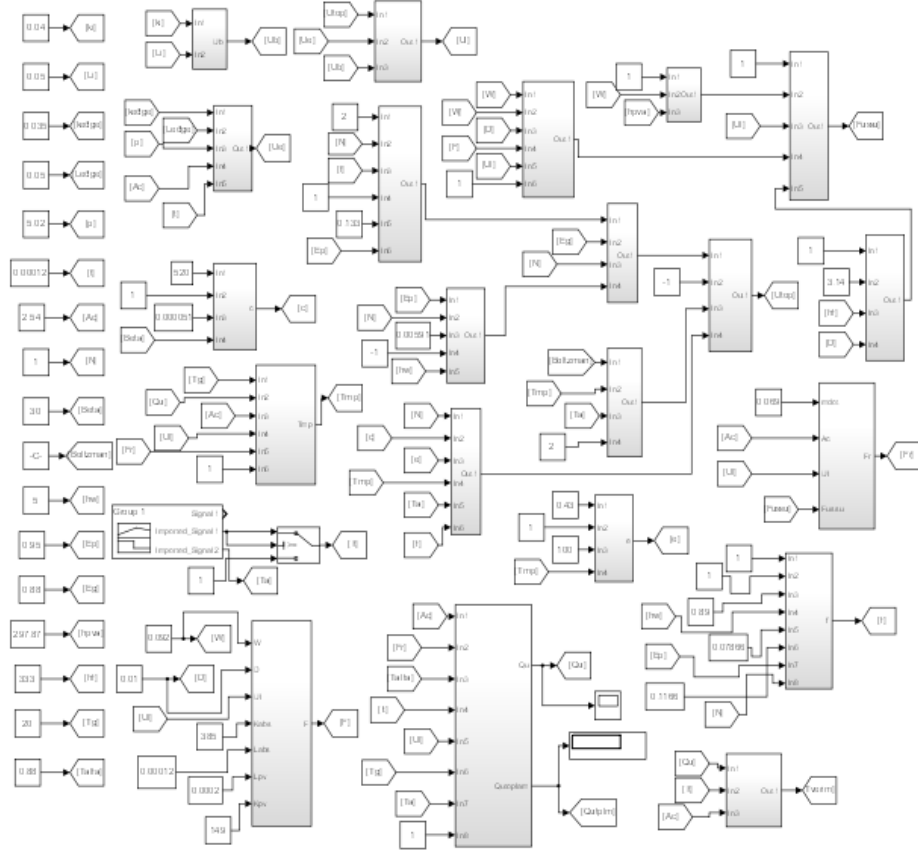
Simulink; dinamik sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve analizlerinin yapılabilmesi için kullanılan bir yazılım paketi olup haberleşme, ısı, soğutma, iş akışı kontrolü, transfer fonksiyonları, diferansiyel denklem çözümü, robotik çalışmalar, uzaktan ve web tabanlı kontrol gibi daha birçok alanda kullanıma sahiptir. Matlab'ta kullanılan kodlar yerine simge sürük-le-bırak mantığı ile çalışan bloklar kullanılır ve bu simgeler sistem girişlerini, parçalarını ve çıkışları ifade eder. Ayrıca, alınan simülasyon sonuçları matlaba gönderilebilir ya da matlabtan veri alınabilir.

Dinamik bir sistemin simülasyonu yapılırken; sistemin girişi, durumu ve çıkışları arasındaki bağlantıları sağlayan zamana bağlı matematiksel ilişkileri gösteren blok diyagramı oluşturulur. Ardından belirlenen zaman aralığında modellenen sistem çalıştırılır.

PV/T sıvı sistemlerin modellenmesi esnasında Başlık 3.3'de verilen enerji denklemleri kullanılarak simülasyonlar oluşturulmuştur. Ayrıca, sistemin maliyet

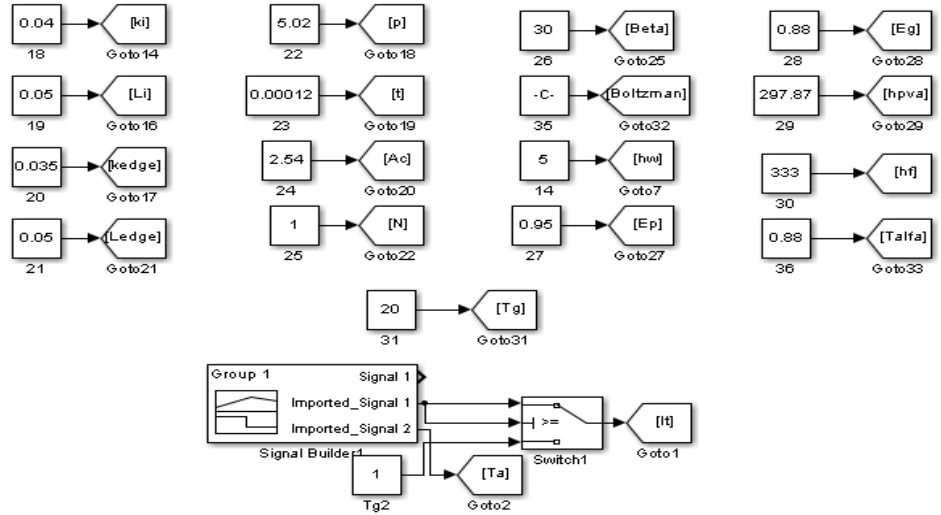
hesaplamalarının yapıldığı ve Başlık 3.4'te verilen enerji maliyet denklemleri kullanılarak simülasyon yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır.

Şekil 2.11'de Matlab Simulink ortamında oluşturulan PV/T sıvı sistemlerin matematiksel modellemesi verilmiştir.



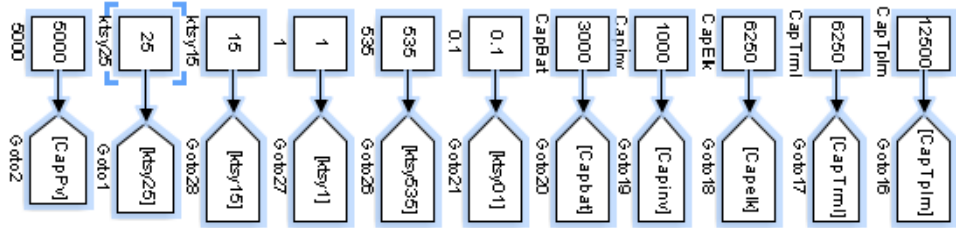
Şekil 2.11: PV/T Matlab-Simulink modeli.

Oluşturulan model ile 1 saatlik çalışma aralıkları ile 1 yıl boyunca elektriksel ve termal performans hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar kapsamında iki ayrı Simulink modeli kullanılmıştır. Birinci modelde, sabit giriş sıcaklığı kullanılmaktadır. İkinci modelde, birinci modele ek olarak sistem depolu olarak tasarlanmıştır. Şekil 2.12'de modelde kullanılan değişkenler verilmiştir.



Şekil 2.12: Enerji analizi simülasyonu modelinde kullanılan değişkenler.

PV/T su sisteminin Matlab-Simulink ortamında ekonomik analizi yapılırken Başlık 3.6'da verilen birim enerji başına maliyet hesaplamaları kullanılmıştır. Analiz için oluşturulan matematiksel modelde Şekil 2.13'deki değişkenler kullanılmıştır.



Şekil 2.13: Maliyet analizi simülasyonu modelinde kullanılan değişkenler.

PV/T sistemin matematiksel hesaplamalarının ve ekonomik analizinin yapıldığı simulink ara yüzü Ek-1'de verilmiştir.

2.2 Deneysel Sistem Tasarımı

Balıkesir iklim koşullarında PV/T hibrit sistemlerin elektriksel ve termodinamik performansının incelenmesi ve kurulan bu hibrit sistemin performans testlerinin uygulanması için Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü Meslek Yüksekokulu binasının ön terasında şekildeki sistem kurulmuştur. Bu sistemin ayrıca Balıkesir iklim şartlarında bir konutta kullanılabilecek şebeke bağımsız bir PV/T

sistemin elektriksel çalışma performansı incelenmiştir. Şekil 2.14, 2.15 ve 2.16’da sisteme ait resimler bulunmaktadır.



Şekil 2.14: Deney sistemi görünümü 1.



Şekil 2.15: Deney sistemi görünümü 2.



Şekil 2.16: Deney sistemi görünümü 3.

Kurulan deney sisteminde Tablo 2.1’de özellikleri verilen iki adet PV/T panel, 100 litrelik bir depo, sirkülasyon pompası, MPPT şarj regülatörü, 4 adet 98 Ah-12 V jel akü, 1 adet basınç tankı ve 1 inverter bulunmaktadır.

Tablo 2.1: Deney düzeneğinde kullanılan malzemeler.

Malzeme Adı	Özelliği
PV/T Panel	190 W
Su Deposu	(100 Litre)
Şarj Regülatörü	PWM Juta CMP45, 12-24 V, 45 A
İnvertör	1500 W
Akü	Jel Akü Banner 12 V-98 Ah (4 Adet)
Sirkülasyon Pompası	Welko 220 V-0,4 A MaxQ/H=30(L/dak.)/8,5 m
Elektrik yükü	Adet (3) 50 W-220 V

Ayrıca sistemin performans ölçümlerinin yapılmasında ve meteorolojik verilerin ölçümünde kullanılmak üzere gerekli verileri almamızı sağlayacak Tablo 2.2’de özellikleri verilen 1 debimetre, 3 termokupl, 2 lm35 sıcaklık sensörü, 2 akım sensörü, 2 direnç, 1 reosta, 1 piranometre, 1 anemometre ve alınan verilerin kaydedilmesi için bir adet datalogger kullanılmıştır.

Tablo 2.2: Ölçüm sisteminde kullanılan elemanlar.

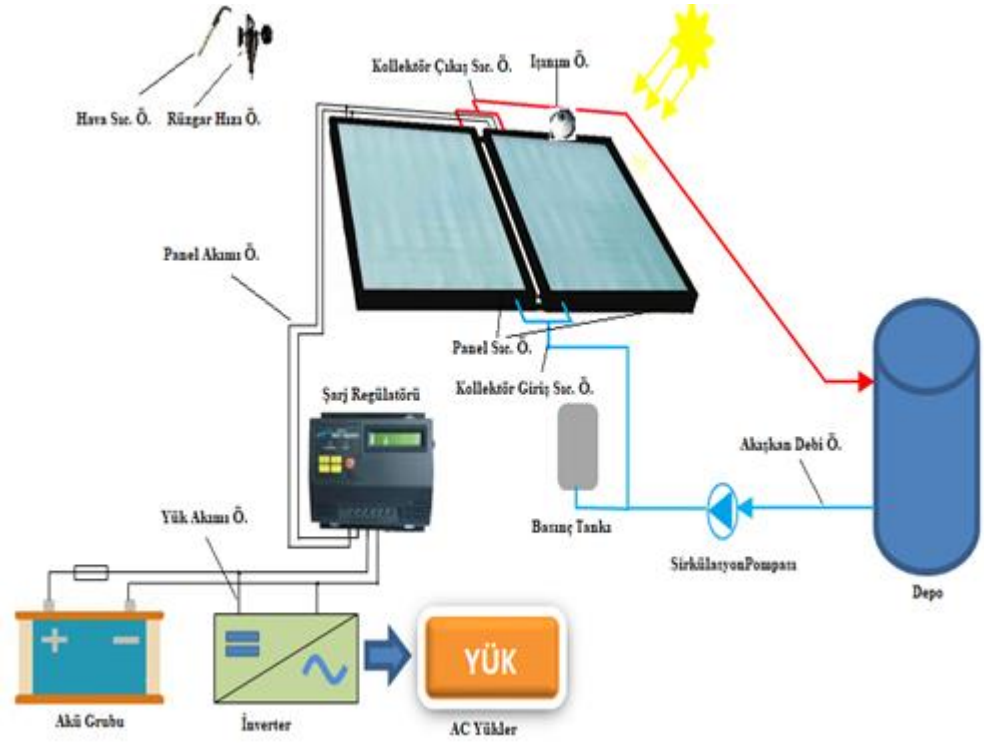
Malzeme	Modeli	Ölçtüğü nicelik
Piranometre	Kipp&Zonen CMP11,	Işınım
Anemometre	NRG 40	Rüzgâr hızı
Termokupl	J Tipi	Kollektör giriş çıkış sıcaklık
Sıcaklık Sensörü	LM35	Panel sıcaklığı
Sıcaklık Sensörü	PT100	Hava sıcaklığı
Akım Sensörü	ASC712	Panel ve yük akımı (0-30A)
Debimetre	LZB-15 SL	Akışkan hızı (25-250 L/s)

Sistemde iki adet PV/T'nin su bağlantıları birbirine bağlanarak bir sirkülasyon pompası yardımıyla depodaki su devridaim edilmiştir. Böylece hem PV/T panel hücre sıcaklıkları düşürülerek elektriksel verimde artış sağlanmış hem de panellerde oluşan ısı enerjisinin sıvı akışkana aktarılmasıyla sistemden sağlanan sıcak su depoya aktarılmıştır. Kapalı döngü dolaşım hattında bulunan debimetre ile istenilen kütlelesel akış hızında sıvı dolaşımı sağlanmaktadır. Panellerin girişindeki ve çıkışındaki su sıcaklıkları anlık olarak 2 adet termokupl ile ölçülmektedir.

PV/T panellerin elektriksel bağlantıları, MPPT şarj regülatörü üzerinden 24 Volt 196 Ah' lik akü barasını beslemektedir. Akü barasına bağlı olan inverter yardımıyla sistemde kullanılacak enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. İnvörtör; sistemde bulunan sirkülasyon pompasını, datalogger ve belirlenen yük profiline sahip 3,6 kW/gün' lük yükleri beslemektedir. Panel sıcaklıklarının ölçümünde LM35 sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Ayrıca, akım ölçümlerinde kullanılan iki adet ACS712 hall effect akım sensörü PV/T panel çıkışlarına ve akü barası çıkışlarına bağlanmıştır.

Paneller üzerine gelen güneş ışınım miktarı da paneller ile aynı açıda yerleştirilen piranometre yardımıyla ölçülmektedir. Sistemde ayrıca, anlık rüzgâr hızını ölçmekte kullanılan anemometre ve hava sıcaklığını ölçmekte kullanılan sıcaklık sensörü bulunmaktadır.

Tüm bu ölçümlerin alındığı noktaları ve sistemde bulunan malzemelerin gösterildiği sistemin prensip şeması Şekil 2.17'de verilmiştir.



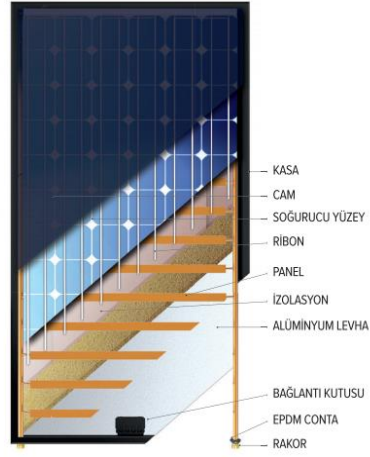
Şekil 2.17: Hazırlanan PV/T sisteme ait prensip şema.

Alınan tüm bu veriler Campbell Scientific CR1000 marka datalogger ile hafızada saklanarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

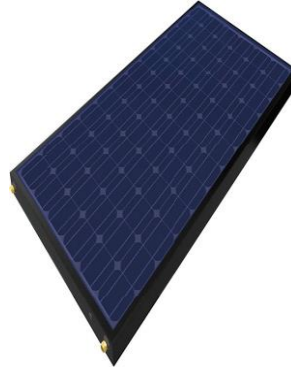
PV/T solar kolektör; deney sisteminde kullanılan Solimpeks Powertherm marka PV/T panellerin özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir. Şekil 2.18 ve 2.19'da verilen resimlerde panelin içyapısı ve dış görünümü gösterilmektedir.

Tablo 2.3: PV/T panelin özellikleri.

Ebatlar	1640x870x105 mm
Nominal Akım (A)	5,43
Kısa Devre Akımı (A)	5,67
Nominal Gerilim (V)	36,8
Açık Devre Gerilimi (V)	45.43
Dış Cam	Extra Solar Glass
Hücre Sayısı	72
Soğurucu Yüzey	Monokristal
Termal Güç (W)	680



Şekil 2.18: PV/T bileşenleri.



Şekil 2.19: PV/T resmi.



Şekil 2.20: Deneysel sistemde kullanılan diğer bileşenler.

Reosta; farklı büyüklüklerdeki direnç değerlerini ayarlayarak, güneş panellerinin akım ve gerilim değerlerini belirlemek suretiyle maksimum çalışma noktasının belirlenmesinde 0-100 ohm 500 W'lık Şekil 2.20'de verilen reosta kullanılmıştır.

Piranometre; güneş ışınım değerlerini anlık olarak ölçmek için Şekil 2.20'deki Kippzonen marka CMP11 model piranometre kullanılmıştır. Güneş kollektörleri ile paralel yerleştirilen piranometre besleme gerilimine ihtiyaç duymaksızın güneş ışınım değerlerine göre 0 ile 20 mV arasında düşük bir gerilim sağlar. Piranometrenin özellikleri Tablo 2.4'de görülmektedir [52].

Tablo 2.4: CMP11 piranometre özellikleri.

Özellikler			
Spektral aralık	285-2800 nm	Yönlü tepki (1000W/m ² ışın ile 80 'ye kadar)	< 10 W/m ²
Hassasiyet	7-14 μ V/W/m ²	Sıcaklığa bağlı hassasiyet (-10 °C'den 40 °C ye)	<1 %
Tepki süresi	< 5 s	Çalışma sıcaklık aralığı	-40 °C - +80 °C
Zero offset A	< 7 W/m ²	Maksimum güneş ışınımı	4000 W/m ²
Zero offset B	< 2 W/m ²	Görünüm alanı	180 °

Sıcaklık sensörleri; sistemin termal performansının belirlenmesinde kullanılacak olan kollektörlerin giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için Şekil 2.20'deki J tipi termokupllar kullanılmıştır.

Hava sıcaklığının ölçümünde Şekil 2.20'de gösterilen Tc107 sıcaklık sensörü kullanılmıştır.

Sistemin elektriksel performansının belirlenmesinde kullanılmak üzere güneş panellerinin hücre sıcaklıklarının ölçülmesinde Şekil 2.20'deki LM35 sıcaklık sensörleri kullanılmıştır.

Sirkülasyon pompası; kollektör çıkışlarına bağlanan Şekil 2.20'de verilen 220 V 0,4 A'lik Welko marka sirkülasyon pompası ile depo içerisindeki akışkan kollektörler üzerinden geçirilerek soğutma işlemi sağlanmaktadır. Pompanın enerjisi inverter üzerinden sağlanmaktadır.

Debimetre; sistemin termal performansının incelenmesinde kullanılacak kütleli akış hızının belirlenmesi amacıyla Şekil 2.20'deki debimetre, sirkülasyon pompası çıkışına bağlanmıştır. Debimetre 25/250 l/s aralıklarında ölçüm yapabilmektedir.

Genleşme tankı; fazla ısınan su ile artacak hacmin oluşturabileceği basıncın aktarılacak sistem ve yardımcı elemanların zarar görmemesini sağlama amacıyla sirkülasyon pompası girişine Şekil 2.20'deki genleşme tankı monte edilmiştir.

Otomatik hava ventili; sistemde oluşabilecek havayı otomatik olarak atarak sistemin zarar görmesini engellemek için Şekil 2.20'deki otomatik hava ventili kullanılmıştır.

Aküler; sistemde üretilen elektrik enerjisinin depolanması için Şekil 2.20'de gösterilen 4 adet Banner marka 98 Ah 12 V kurşun-asit (Jel) akü kullanılmıştır. Aküler seri-paralel bağlanmış olup, 24 V 196 Ah'lik bir akü barası elde edilmiştir. Mppt şarj regülatörü çıkışından şarj edilerek yaklaşık % 20 ile % 80 doluluk oranlarında muhafaza edilmeye çalışılmıştır.

Tek bir jel akü pilinin nominal voltajı 2V'tur. 6 adet pil birleştirilerek 12 voltluk bir akü oluşturulmaktadır. Tam dolu bir pilin açık devre voltajı yaklaşık 2.1-2,2 V arasındadır. Tam dolu bir akü için açık devre voltajı 12,6 ile 13,2 volt arasında değişmektedir [52].

Aküler için sıcaklık negatif yönde etkilidir. Her bir pilin voltajı, her 10 °C' de 40mV azalmaktadır. 12 voltluk bir akü için bu değer 300 mV gibidir.

Solar elektrik enerjisi uygulamaları için kullanılması gereken akülerde aşağıdaki özellikler gerekmektedir:

- Derin devirler için uzun devir ömrü,
- Yüksek kapasite,
- Düşük kendine boşalma yüzdesi,
- Düşük maliyet,
- Düşük bakım gereksinimleri

MPPT şarj kontrol cihazı; akülerin aşırı gerilimden korunması ve tamamen deşarj olmasını engellemesi amacıyla Şekil 2.20'de verilen Mexsun marka 20 A MPPT şarj kontrol cihazı bağlanmıştır.

Şarj kontrol cihazlarının genel fonksiyonları aşağıdaki gibidir [67]:

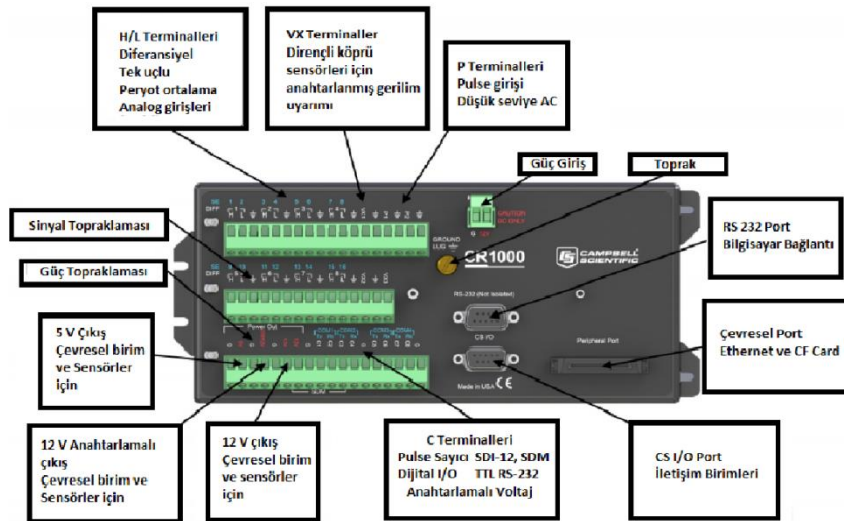
- Aküleri, deşarj ve aşırı şarjdan korur.
- Akülerin, istenilen şarj aralıklarında şarj edilmesine olanak sağlar.
- Geceleri akülerden PV grubuna akım geçişini engeller.
- Akülerin, farklı sıcaklıklarda hızlı bir şekilde tam dolmasını sağlar.

Belirli bir güneş radyasyonu altındaki PV hücrenin çıkışında elde edilecek güç miktarı, beslediği yüke göre değişmektedir. Maksimum güç aktarılması için, şarj çizgisinin PV hücrenin maksimum güç transfer noktası ile kesişmesi gerekir. Maksimum gücü aktarmak için maksimum güç noktası takipçisi (MPPT) kullanılır [52].

MPPT'lerin yapısında; diyot, kondansatör, bobin, mosfet gibi temel devre elemanları ile birlikte sensörler ve bir veri sayacı bulunmaktadır. Ayrıca, içerisindeki mikroşlemci ile panelden gelen akımı, batarya ve yükü kontrol ederek en verimli enerji akışını elde edebilmemize olanak sağlar. Öncelikle hücrelerden alınan DC gerilimi AC gerilime çevirirler. Daha sonra, o anki güç ihtiyacına göre farklı gerilim ve akım değerleri tekrar DC'ye dönüştürülür ve hücrelerden yüke maksimum gücün iletilmesi amacını taşırlar [70].

İnvertör; sistemde üretilip akülerde depolanan elektrik enerjisinin 24 V DC gerilimden 220 V AC gerilime çevrilip kullanılmasına olanak sağlayan Şekil 2.20'de gösterilen resmi bulunan 1500 W gücündeki invertör kullanılmıştır.

Datalogger; ölçümü yapılan güneş radyasyon miktarı, hava, PV/T hücre ve kollektör su giriş-çıkış sıcaklıkları, PV/T panel çıkış ve yük akımları, akülerin gerilimi ve rüzgâr hızı gibi nicelik verilerinin saklanması için Şekil 2.21'de görülen Campbell Scientific CR1000 datalogger kullanılmıştır.



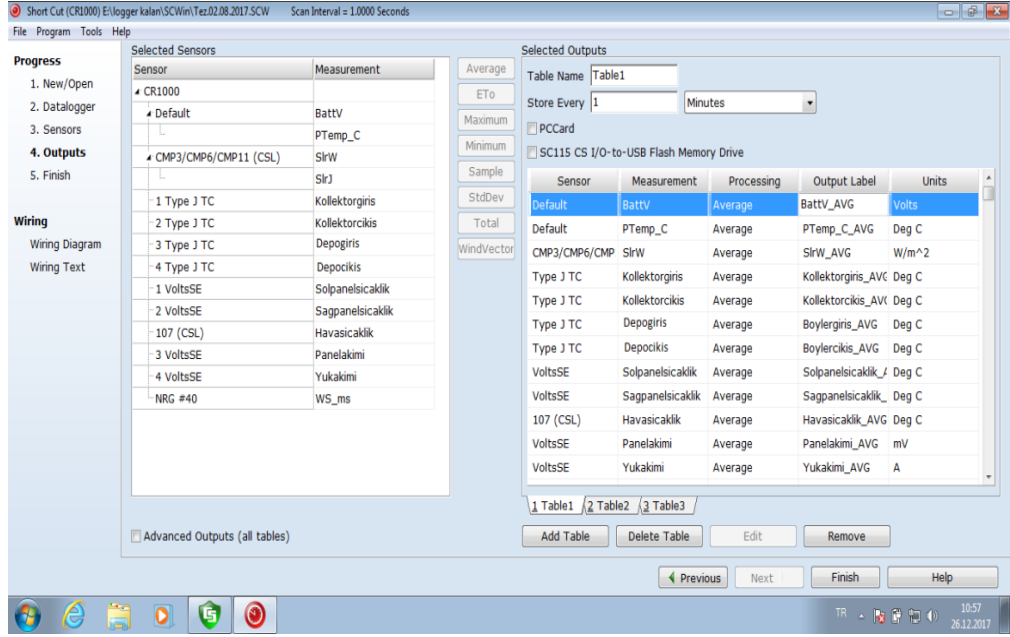
Şekil 2.21: CR 1000 datalogger görünüşü.

Kullanılan dataloggerın özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5: CR1000 datalogger özellikleri.

Maksimum Tarama Hızı	100 Hz
Analog Girişler	16
Haberleşme	1 RS232
Portlar	1CS I/O
Besleme	12 V DC
Dijital Port	8
Analog Çözünürlük	0,33 μ V
Analog Bit	13
Depolama	2 Mb
Analog Doğruluk	$\pm 0,06$ %
Haberleşme Protokolü	Modbus, http
Gerçek Zaman Saati	4 adet ± 3 dk. Doğruluk

Datalogger üzerinde bulunan 16 adet analog girişe, sistemde bulunan sensörlerin bağlantıları yapılmıştır. Sonrasında, dataloggera ait yazılımlar ile bu sensörler, bilgisayar üzerinden veri kaydedicinin hafızasına kaydedilmiştir. İlk olarak, PC200 W adlı yazılımın alt sekmesinde bulunan Shortcut adlı programdan, 1 dakika, 10 dakika ve 60 dakika aralıklarla veri kaydı yapabilmesi için datalogger programlanmıştır. Ardından, sensörlerin datalogger üzerinde fiziksel bağlantılarının yapıldığı girişler ve bu sensörlerin ölçüm aralıkları tanımlanmıştır. Şekil 2.22'de bu kayıt işleminin yapıldığı program sekmesi görülmektedir. Program üzerinde yapılan bu işlemler RS232 bağlantı üzerinden datalogger hafızasına gönderilmiştir.



Şekil 2.22: Short cut programında sensör tanımlanması.

CR 1000 Datalogger, veri kaydı yapabilmesinin yanı sıra; programlama ve otomasyon işlemleri de yapabilmektedir. CR Basic adlı programlama yazılımı ile programlama yapılarak çıkış portlarının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece, sensörlerden alınan gerçek zamanlı verilere göre kontrol uygulamaları gerçekleştirilebilmekte ve sistemde kullanılacak alıcıların kontrolleri sağlanabilmektedir. CR Basic programı, Logger Net adlı uygulamanın alt uygulamasıdır. Bu program ile ayrıca, Short Cut adlı programda oluşturulan program üzerinde değişiklikler de meydana getirilebilmektedir.

Sistemde kullanılan NRG 40 rüzgâr sensörü, CMP 11 piranometre, termokupllar ve T 107 hava sıcaklık sensörü datalogger hafızasında bulunan sensör tipleri olduğu için tak-çalıştır modunda çalışmaktadırlar. Akım ölçümünde kullanılan ACS 712 hall effect akım sensörü ve panel sıcaklıklarının ölçümünde kullanılan LM 35 sıcaklık sensörü için bazı kodlar yazılarak ölçüm aralıklarının dataloggera tanıtılması gerekmektedir.

Şekil 2.23'te verilen kodlar ile panelden çekilen ve yükün çektiği akımları ölçmek için kullanılan 2 adet ACS 712 hall effect akım sensörünün dataloggera kaydı gerçekleştirilmiştir. Hall effect akım sensörleri, üzerinden geçen akım miktarına göre çıkış uçları üzerinde bir gerilim değeri vermektedir. Datalogger üzerinde bulunan analog girişler, üzerinde okunan gerilim değerini kaydetmektedir.

```

VoltSe (Panelakimi,mV5000,14,True,0,_50Hz,1,0)
Panelakimi=(Panelakimi-2500)/66
If Panelakimi<=0 Then
  Panelakimi=0
Endif
'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Yukakimi'
VoltSe (Yukakimi,1,mV5000,15,True,0,_50Hz,1,0)
Yukakimi=(Yukakimi-2500)/66
If Yukakimi<=0 Then
  Yukakimi=0
Endif

```

Şekil 2.23: ACS 712 akım sensörünün dataloggera tanımlanması.

Panel yüzey sıcaklıkları ölçümünde kullanılan 2 adet LM35 sıcaklık sensörü bulunduğu ortamın sıcaklığını 10mV/°C cinsinden çıkış uçlarında verir. Şekil 2.24'te kullanılan kodlar ile ölçülen sıcaklık değerleri °C cinsinden elde edilir.

```

VoltSe (Sagpanelsicaklik,1,mV5000,11,True,0,_50Hz,0.1,0)
'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Sagpanelsicaklik'
VoltSe (Solpanelsicaklik,1,mV5000,12,True,0,_50Hz,0.1,0)

```

Şekil 2.24: LM 35 sıcaklık sensörünün dataloggera kaydı.

Cr 1000 dataloggerın programlanabilir C1-C8 arası çıkış portları mevcuttur. Kurulan sistemde set değerlerine bağlı olarak bu portlar üzerinden otomasyon işlemi sağlanmıştır.

Bu portlar üzerinden gelen akımların düşük olmasından dolayı direkt kontrol sağlanmamaktadır. Ancak sistemde, ULN2003 entegresi ve röleler yardımıyla alıcıların kontrolü kolaylıkla sağlanmıştır. Şekil 2.25'de gösterilen kodlarla sirkülasyon pompasının CMP11 piranometresinin aldığı değerlere göre kontrolü sağlanmıştır. Buna göre; güneş ışınım değeri 150 w/m²'nin üzerinde olduğu durumlarda sirkülasyon pompası çalışmaktadır. Burada, Port 1 üzerinden beslenen ULN2003 entegresinin 1 numaralı girişi aktif konuma gelmiştir. ULN2003 entegresini besleyen akü barasından gelen 24 V'luk enerji ile 1 numaralı röle aktif duruma geçerek sirkülasyon pompasını çalıştırmaktadır. Aksi durumda, Port 1 ve dolayısıyla 1 numaralı entegre girişi ve röle 1 enerjisiz kalarak sirkülasyon pompası durmaktadır.


```

‘CMP3/CMP6/CMP11 Pyranometer measurements ‘Slrj’ and SlrW’
VoltDiff(SlrW,mV25,1,True,0,_50Hz,1,0)
If SlrW<0 Then SlrW=0
If SlrW>=150 Then
  PortSet(1,0)
Endif

```

Şekil 2.25: Sirkülasyon pompasının CR 1000 ile kontrolü.

Boyelerin belirli çalışma sıcaklık aralıklarında boşaltılabilmesi için çıkışındaki bir selenoid vana ile kontrolü sağlanmıştır. Şekil 2.26’da verilen kodlarla bu selenoid vananın çalışma sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Buna göre, boyler deposundaki suyun sıcaklığını ölçen termokupl 30 °C’yi gösterdiğinde vana açılacak ve 26 °C’ye düşene kadar açık kalacaktır. Böylece hem boyler haznesindeki suyun aşırı ısınmaması hem de termal performans testleri yapılabilmesi gerekli akış sağlanacaktır. Selenoid vana 2 numaralı port üzerinden ULN2003 entegresinin 2 numaralı giriş ucu ve 2 numaralı rölenin kullanımı ile kontrol edilmiştir.

```

TCDiff(Boylercikis,1,mV2_5C,5,TypeJ,PTemp_C,True,0,_50Hz,1,0)
If Boylercikis>=30 Then
  PortSet(2,1)
Endif
If Boylercikis<=26 Then
  PortSet(2,0)
Endif

```

Şekil 2.26: Selenoid vananın CR 1000 ile kontrolü.

CR 1000 ile çıkış portlarının kontrolü zaman ayarlı olarak da yapılabilmektedir. Şekil 2.27’de verilen kodlarla sistemde kullanılacak 3 adet 12 V 50W’lık ampul için bir yük profili oluşturulmuştur. Burada, ULN2003 entegresi ve 2 adet röle kullanılmıştır.

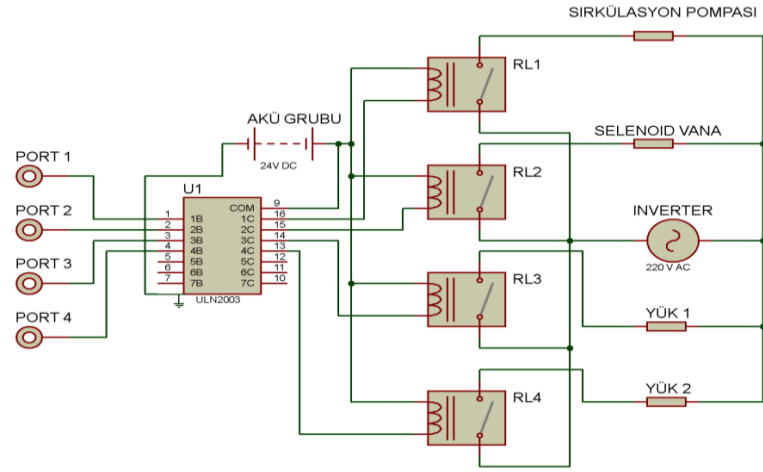
```

If TimeIsBetween(20,6,24,Hr) Then
  PortSet(3,1)
Else
  PortSet(3,0)
Endif

```

Şekil 2.27: CR 1000 ile yük profili oluşturma.

Dataloggerın çıkış portları, akü grubu, ULN 2003 entegresi ve röleler yardımıyla inverter üzerinden alınan enerji kullanılarak selenoid vana, sirkülasyon pompası ve yüklerin kontrolünün sağlandığı devre şeması Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28: Selenoid vana, sirkülasyon pompası ve yüklerin elektronik kontrol şeması.

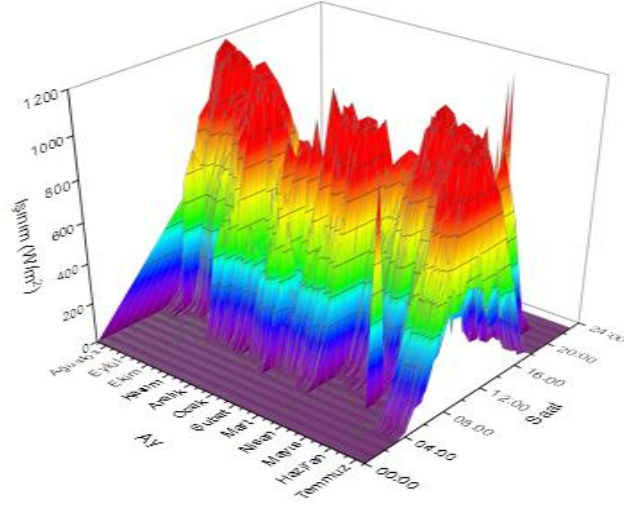
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde 1 yıllık meteorolojik ölçüm verileri, sistemin şebeke bağımsız çalışma performansı, PV/T kolektörlerin elektriksel ve termal performansları, PV/T sistemlerin simülasyonları ve ekonomik analiz çalışmaları verilmiştir.

3.1 12 Aylık Işınım, Sıcaklık ve Rüzgâr Verileri

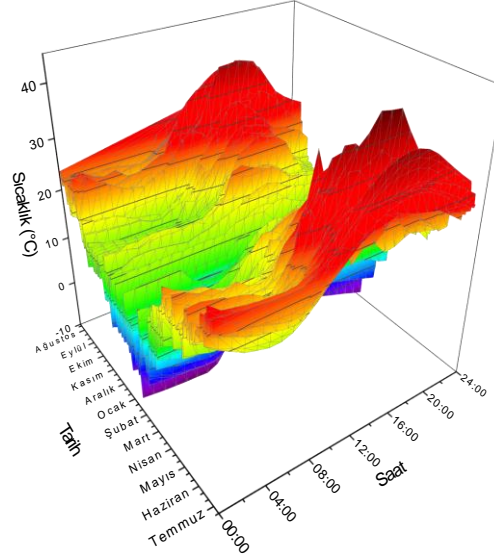
Bu tez çalışması kapsamında, Balıkesir ili Çağış Kampüsünde kurulan PV/T sistemin performans testleri sırasında, 12 ay boyunca ışıınım miktarı, hava sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi meteorolojik ölçümler gerçekleştirilerek 1, 10 ve 60'ar dakikalık aralar ile kayıt altına alınmıştır. 2017 yılı Ağustos ayında başlayan kayıt alma işlemi 2018 yılı Temmuz ayında sonlandırılmıştır. Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilen grafiklerde 12'şer aylık süre içerisinde 1'er saatlik aralıklarla alınan ışıınım miktarı, sıcaklık ve rüzgâr verileri gösterilmiştir.

Yaklaşık 8760 saatlik güneş radyasyon verileri incelendiğinde; ölçüm yapılan tarih aralığında 0 ile 1206 W/m²'lik değer aralığında verilerin alındığı görülmüştür. Işınım miktarının maksimum olduğu değer, 1206 W/m² ile 2017 yılı Ağustos ayında ölçülmüştür. Kış ayları için ortalama günlük ışıınım miktarı yaz aylarına göre oldukça düşük seyretmiştir. En düşük günlük ortalama ışıınım miktarı, 2227 W/m²/gün ile 2017 yılı Aralık ayında gerçekleşirken en yüksek günlük ortalama ışıınım miktarı 7700 W/m²/gün ile 2017 yılı Ağustos ayında ölçülmüştür.



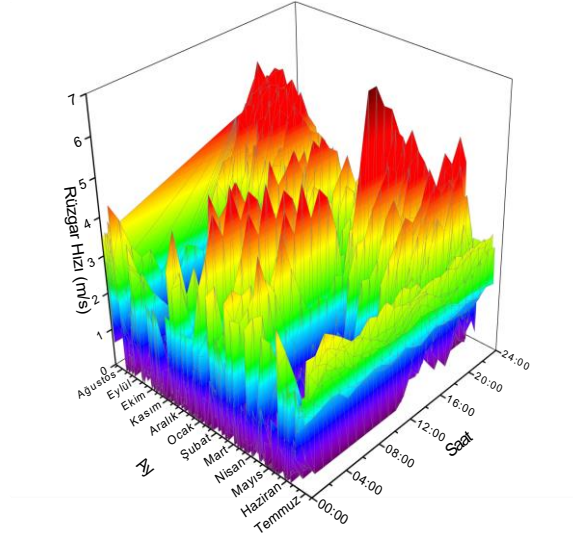
Şekil 3.1: 12 aylık ışınım miktarı verileri.

Ölçülen sıcaklık verilerine göre en düşük ortam sıcaklığı $-8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 2018 yılı Şubat ayında görülürken, en yüksek sıcaklık değeri $42,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 2018 yılı Haziran ayında gerçekleşmiştir. Ortalama sıcaklığın en düşük olduğu ay $5,19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 2018 yılı Şubat ayı ve en yüksek olduğu ay $25,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 2018 yılı Temmuz ayı olmuştur.



Şekil 3.2: 12 aylık hava sıcaklık verileri.

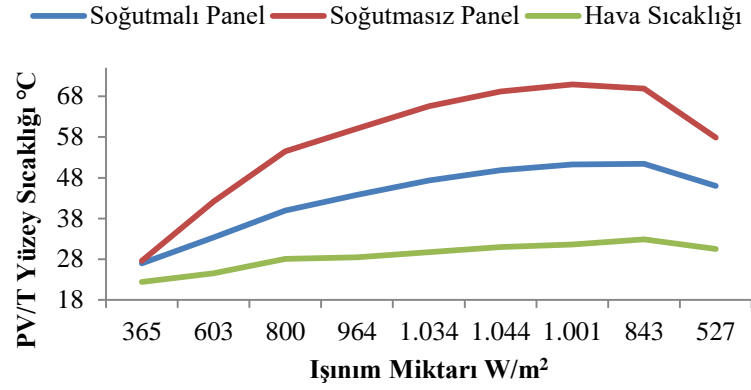
Alınan rüzgâr ölçüm verilerine göre; rüzgâr hızı 0 m/s ile $6,83\text{ m/s}$ değerleri arasında ölçülmüştür. Alınan veriler, Balıkesir'in karakteristik rüzgâr verileri olmamakla birlikte sistemin kurulduğu alandaki rüzgâr hızı değerleri hakkında bize bilgi vermektedir.



Şekil 3.3: 12 aylık rüzgâr hızı verileri.

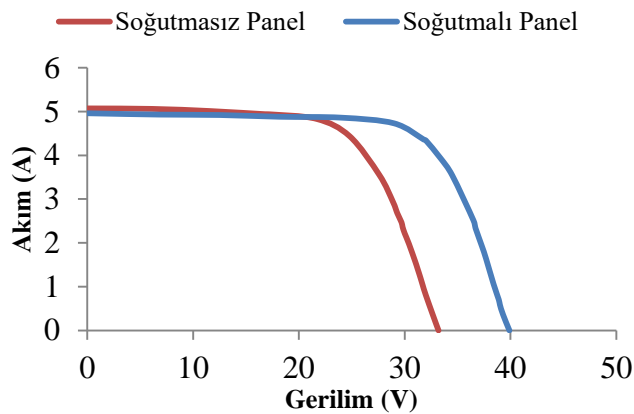
3.2 Elektriksel Performans Bulguları

Sistemin elektriksel veriminde etkili olan panel yüzey sıcaklığını, ışınım ve hava sıcaklığı doğrudan etkilemektedir. Yapılan incelemelerde, bu etkinin orantısal olduğu görülmüştür. Şekil 3.4’de soğutmalı ve soğutmasız durumlar için panel yüzey sıcaklıkları verilmiştir. Soğutma yapıldığı durumda ışınım miktarındaki her 100 W/m²’lik artışın PV hücre sıcaklığını yaklaşık olarak 2,34 °C derece arttırdığı görülmüştür. Soğutma yapılmadığı durumda ise ışınım miktarındaki her 100 W/m²’lik artış PV hücre sıcaklığında 4,77 °C’lik bir artışa sebep olmuştur. Daha büyük hacimde bir depo ile ya da giriş sıcaklığını daha düşük derecelerde sabit tutarak bu hücre sıcaklığındaki artış miktarını düşürebilmek mümkündür.



Şekil 3.4: 23.06.2018 tarihinde PV/T hücre sıcaklığı-güneş ışınımı değişimi grafiği.

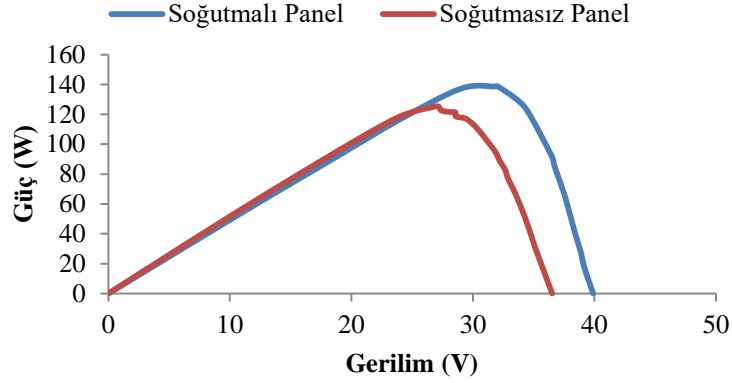
PV/T panellerde akışkanın PV hücre yüzeyinde oluşturduğu soğuma etkisinin hücre verimine etkisinin araştırılması için PV/T panelin soğutmalı ve soğutmasız durumlardaki anlık gerilim, akım ve güç değerleri ölçülmüştür. Ölçümler 23.07.2018 tarihinde 950 W/m²'lik bir ışınım ile 33 °C'lik hava sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Panellerin karakteristik çıkış akım, gerilim ve elektriksel güç değerlerinin bulunması amacıyla reosta kullanılmıştır. Şekil 3.5'de soğutmalı ve soğutmasız durumlardaki akım ve gerilim değerleri karşılaştırılmıştır. Panelin çıkış gerilimindeki düşüş, soğutmasız panelde yüzey sıcaklığının yüksek olmasından dolayı daha fazladır. Açık devre gerilimleri soğutmalı panelde 39,9 V iken; soğutmasız panelde 33,2 V değerinde kalmıştır.



Şekil 3.5: Soğutmalı ve soğutmasız durumlardaki panelin karakteristik çıkış akım, gerilim grafiklerinin karşılaştırılması.

Soğutmalı ve soğutmasız durumlar için anlık elektriksel güç çıkışındaki değişimler Şekil 3.6' da verilmiştir. Soğutmalı durumda, maksimum çalışma

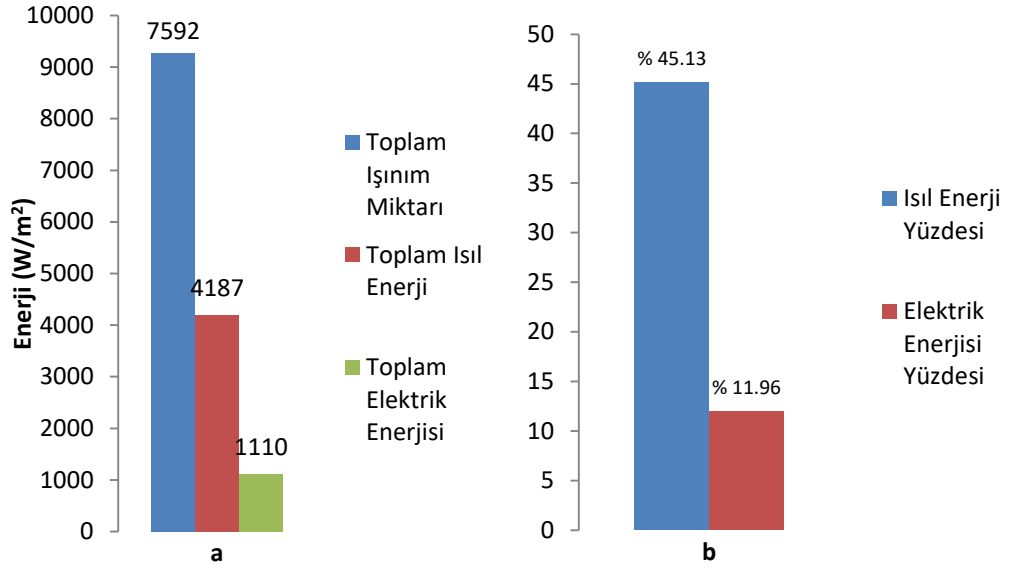
noktasındaki güç çıkışı 140 W civarında olurken soğutmasız durumda bu değer 110 W civarındadır. Soğutma yapıldığı durumda sistemin maksimum güç noktasındaki elektriksel güç değerinde yaklaşık % 12,9'luk bir artış meydana gelmektedir.



Şekil 3.6: Soğutmalı ve soğutmasız durumlardaki panelin maksimum güç noktasındaki değerlerinin karşılaştırılması.

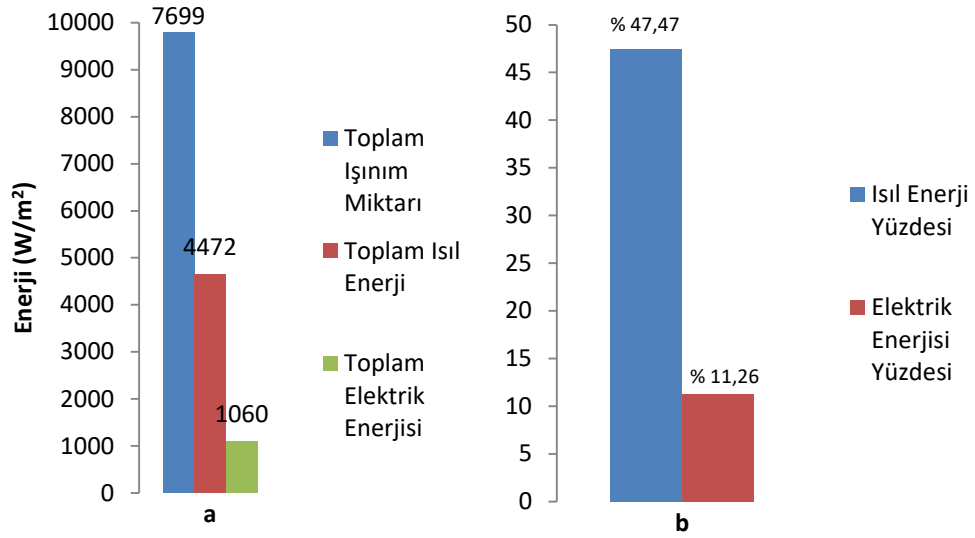
Akış hızının sistemden elde edilen termal ve elektriksel enerji miktarlarına etkisinin araştırılması amacıyla 0,069 kg/s ve 0,015 kg/s hızlarında elde edilen enerji miktarları hesaplanmıştır. Şekil 3.7 ve 3.8'de sırasıyla 31.05.2018 ve 30.05.2018 tarihlerinde PV/T panelde üretilen günlük toplam termal enerji, elektrik enerjisi ve panel üzerine düşen toplam ışınım miktarları ve toplam ışınım miktarının termal ve elektriksel enerjiye dönüşüm oranları verilmiştir.

0,069 kg/s akış hızında alınan ölçümlerde panel üzerine düşen toplam ışınım miktarının % 45,1'i termal enerji olarak; % 11,96'sı elektrik enerjisi olarak panelden elde edilmiştir.



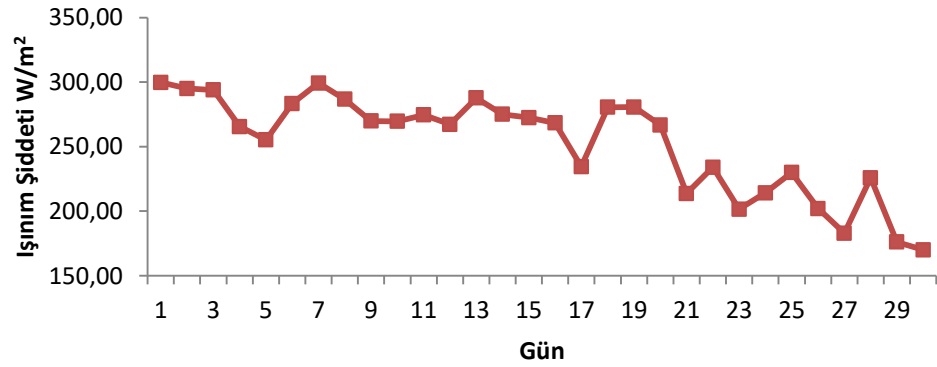
Şekil 3.7: a) 31.05.2018 tarihinde 0,069 kg/s debide sisteme giren ve çıkan enerji miktarları b) Sistemden elde edilen enerjinin giren enerjiye oranları.

0,015 kg/s akış hızında sisteme giren enerjinin % 47,47'si termal enerji ve % 11,26'sı elektrik enerjisi olarak sistem çıktısı olarak elde edilmiştir. Elektriksel verimi etkileyen parametreler, hücre sıcaklığı ve ışınım iken; termal verimi, rüzgâr hızı, sıcaklık, ışınım, kütleli akış hızı ve sistemde izolasyondan kaynaklanan ısı kayıpları da etkilemektedir. Akış hızının artması sonucunda panel yüzey sıcaklığında oluşan azalma ile elektriksel verimde artış gözlenmiş, ancak sıcaklığa bağlı kayıpların artmasıyla sistemden elde edilen toplam termal enerji miktarında azalma görülmüştür. Böylece, farklı akış hızlarına göre sistemden elde edilen toplam enerji miktarının oranları 0,015 kg/s ve 0,069 kg/s akış hızları için sırasıyla % 58,73 ve % 57,09 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.8: a) 30.05.2018 tarihinde 0,015 kg/s debide sisteme giren ve çıkan enerji miktarları b) Sistemden elde edilen enerjinin giren enerjiye oranları.

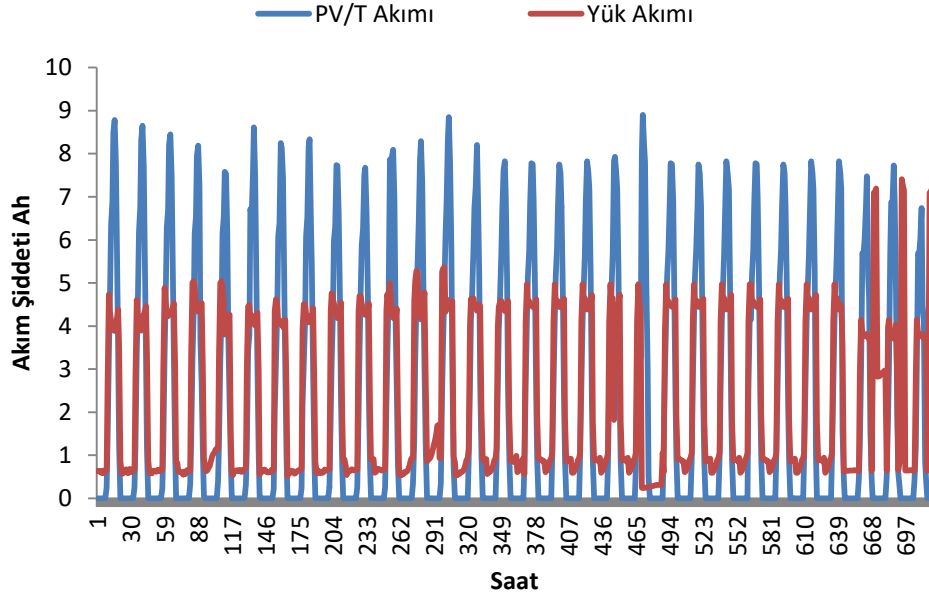
Şebeke bağımsız mikro güç sistemlerinin Balıkesir iklim şartlarında çalışma performansı incelenmiştir. Şekil 3.9’ da 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı W/m² cinsinden verilmiştir. Ortalama ışınım miktarları hesaplanırken günlük toplam ışınım miktarının 24 saate oranı alınmıştır. Işınım miktarının en düşük olduğu gün 170 W/m²’lik değeriyle 30 Eylül, ışınım miktarının en yüksek olduğu gün 299,74 W/m²’lik değeriyle 1 Eylül olup 30 günlük toplam ışınım miktarı 179862 W/m² olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.9: 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında günlük ortalama ışınım değerleri.

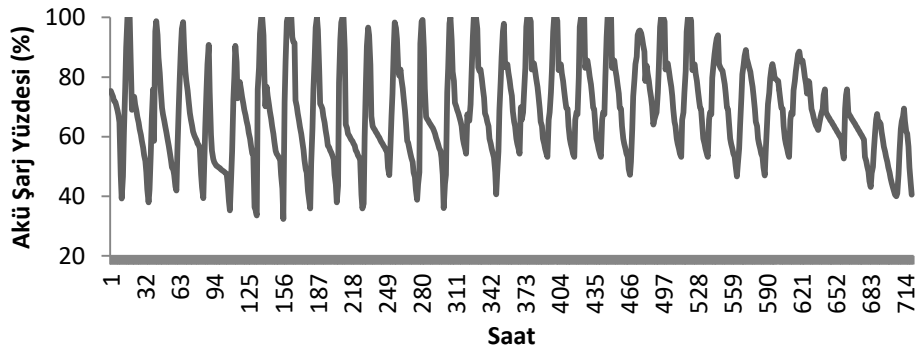
Şekil 3.10’ da verilen grafikte, 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında saatlik ışınım miktarına göre PV/T paneller tarafından üretilen akım değerleri ile sistem tarafından beslenen yükün çektiği akım ölçüm değerleri verilmiştir. Panellerin

sisteme aktardığı toplam akım miktarı 1627,323 Ah olarak, yükün sistemden çektiği toplam akım miktarı ise 1704,986 Ah olarak hesaplanmıştır.



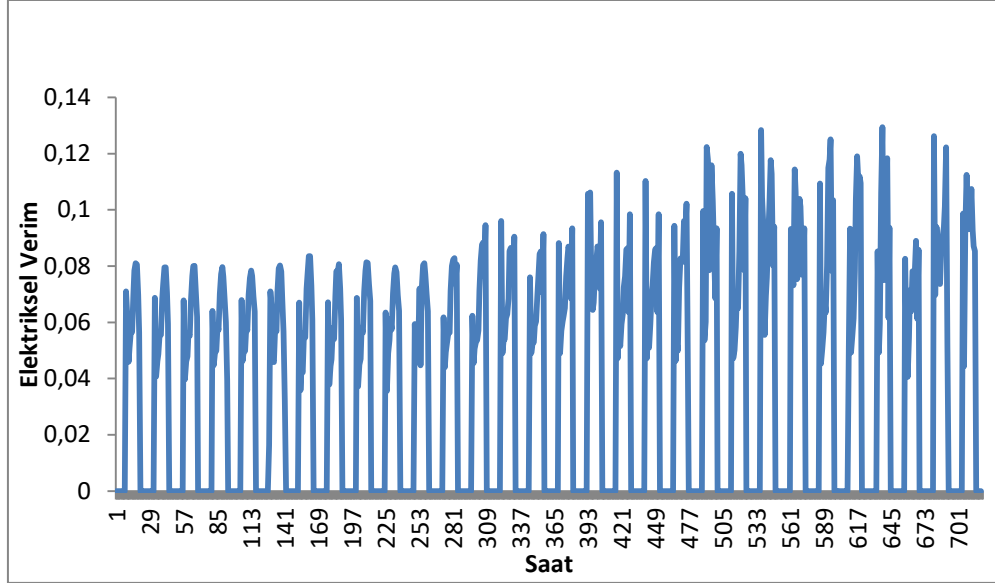
Şekil 3.10: PV/T panellerin 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında ürettiği ve yükün çektiği akım miktarları.

Şekil 3.11’de verilen grafikte ise, sistemin beslediği akü barasının şarj yüzdesi anlık olarak gösterilmektedir. Sistemden çekilen enerji miktarının üretilen enerji miktarından fazla olması sebebiyle 1 Eylül itibariyle yaklaşık %76’sı dolu olan batarya grubunun ay sonunda % 38 seviyelerinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.11: 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında akü şarj yüzdesi grafiği.

Şekil 3.12’de verilen grafikte, PV/T panellerin anlık elektriksel verim değerleri saatlik olarak gösterilmektedir. Panel verim değerleri % 3,44 ile % 13 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 3.12: 1-30 Eylül 2017 tarihleri arasında PV/T panel elektriksel verim değerleri.

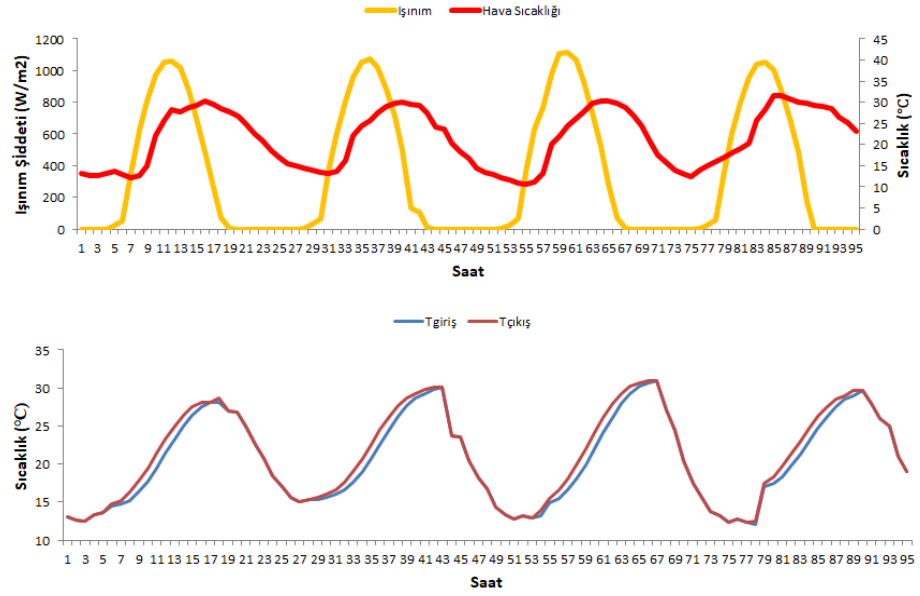
Sonuç olarak bu sistem ile 2017 yılı Eylül ayı içerisinde 40,774 kWh’lık elektrik enerjisi üretimine karşın, 42,250 kWh’lık bir elektrik enerjisi tüketimi gerçekleştirilmiştir.

3.3 Termal Performans Bulguları

Oluşturulan sistemin termal çalışma performansının belirlenmesi amacıyla; ışıyım miktarının kollektör giriş-çıkış sıcaklıklarına etkisi araştırılarak ışıyımına bağlı kollektör giriş-çıkış sıcaklık farkı denklemi oluşturulmuştur. Akış hızının; kollektör giriş-çıkış sıcaklıklarına, termal verime ve ısı kayıplarına etkisinin araştırılması için 0,015, 0,044 ve 0,069 kg/s’lik debi değerlerinde farklı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlere göre; indirgenmiş sıcaklık farkına ($T_g - T_a$) ve ışıyım miktarına göre oluşturulan termal verim denklemleri oluşturulmuştur. Ayrıca, sistemin elektriksel yüklü ve yüksüz çalışma durumlarındaki termal verimleri incelenmiştir.

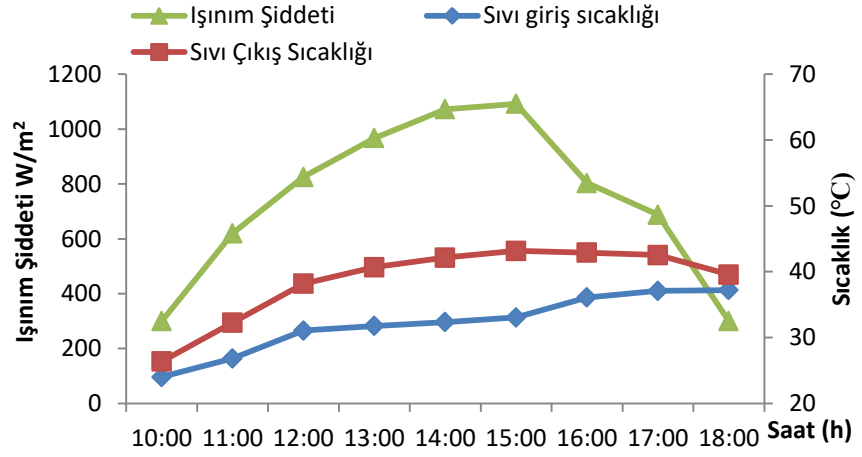
Şekil 3.13’de, 1-4 Haziran 2018 tarihleri arasında alınan ışıyım, hava, sıcaklık, kollektör giriş-çıkış sıcaklıkların saatlik değerlerini gösteren grafik

verilmiştir. Işınım ve hava sıcaklığının artmasının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkı arttırdığı görülmektedir. Bu tarih aralığında 0,069 kg/s akış hızında alınan ölçümlerde, giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki maksimum farkın 2,14 °C, maksimum ışınımın 1172 W/m² ve maksimum hava sıcaklık değerinin 31,5 °C olduğu gözlenmiştir.



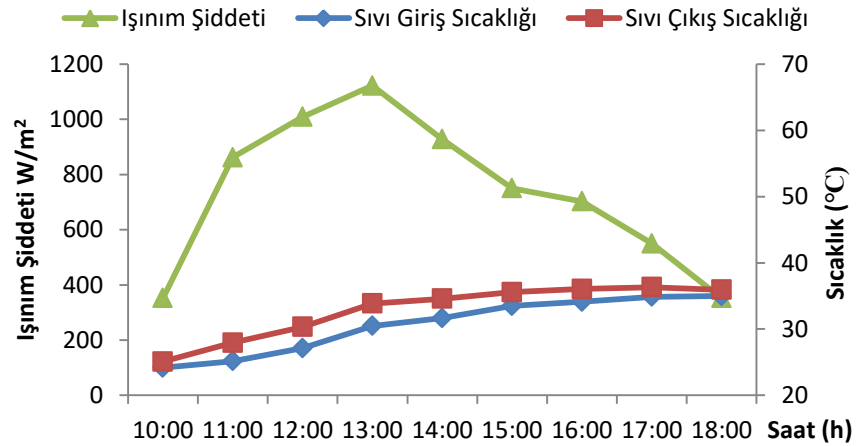
Şekil 3.13: 1-4 Haziran 2018 tarihlerinde arasında su giriş-çıkış ve hava sıcaklıkları ile ışınımın zamana göre değişen grafiği.

Farklı kütleli akış hızlarında alınan PV/T giriş-çıkış sıcaklık değerleri kullanılarak, sıcaklık profilleri oluşturulmuştur. Şekil 3.14’de, 0,015 kg/s’lik kütleli akış hızında gün içerisinde ışınım miktarlarına göre su giriş ve çıkış sıcaklıklarını gösteren grafik verilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı süre içerisinde en düşük sıcaklık farkı 2,37 °C, en yüksek sıcaklık farkı 10,12 °C olarak ölçülmüştür.



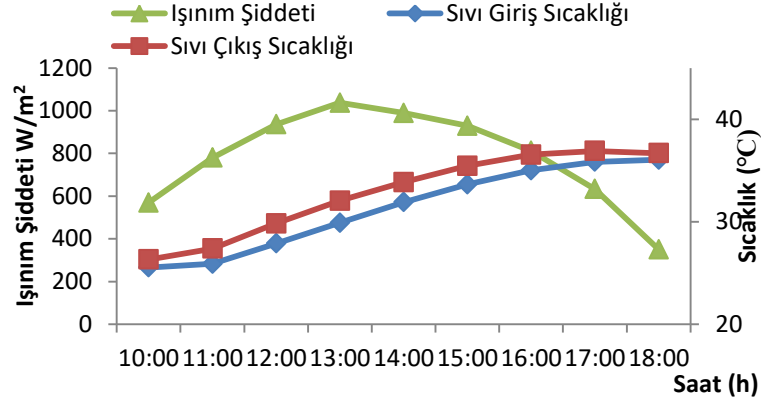
Şekil 3.14: 12.06.2018 tarihinde 0,015 kg/s debi değerindeki sıvı giriş-çıkış sıcaklığının ışınımına göre değişim grafiği.

Şekil 3.15’te, 0,044 kg/s’lik kütleli akış hızı için su giriş-çıkış sıcaklık profili verilmiştir. Gün içinde en düşük sıcaklık farkı 0,93 °C, en yüksek sıcaklık farkı 3,39 °C olarak ölçülmüştür.



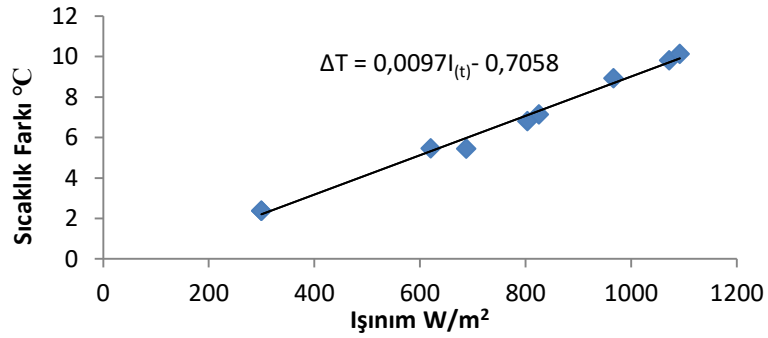
Şekil 3.15: 08.05.2018 tarihinde 0,044 kg/s debi değerindeki sıvı giriş-çıkış sıcaklığının ışınımına göre değişim grafiği.

Şekil 3.16’da ise, 0,069 kg/s kütleli akış hızında gün içerisinde ölçülen su giriş-çıkış sıcaklık profili verilmiş olup, elde edilen en düşük sıcaklık farkı 0,51 °C ve en yüksek sıcaklık farkı 2,15 °C’dir.



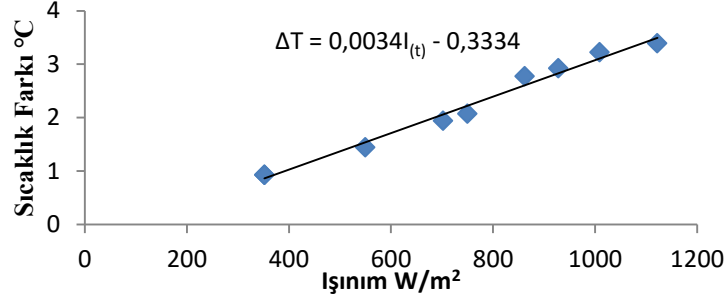
Şekil 3.16: 31.05.2018 tarihinde 0,069 kg/s debi değerindeki sıvı giriş-çıkış sıcaklığının ışıma göre değişim grafiği.

Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19’da farklı kütleli akış hızlarında ışıma miktarına göre su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkı gösteren grafikler verilmiştir. Buna göre, 0,015 kg/s akış hızında ışıma değerindeki her 100 W/m²’lik artışı ile su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkta 0,97 °C’lik artış meydana gelmektedir.



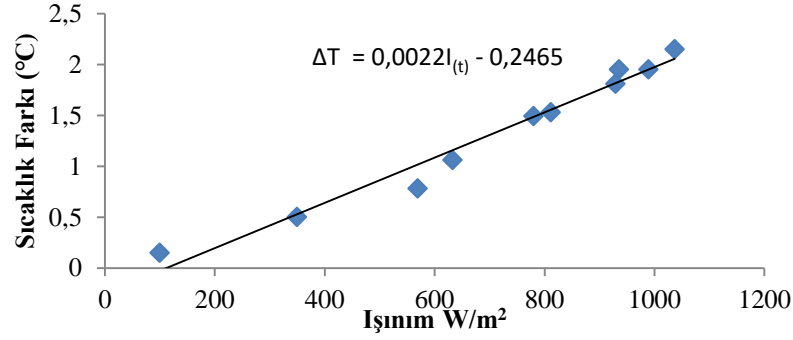
Şekil 3.17: 12.06.2018 tarihinde 0,015 kg/s’lik debi değerinde su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışıma bağlı grafiği.

0,044 kg/s akış hızında ışıma değerindeki her 100 W/m²’lik artış ile su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkta 0,34 °C’lik artış meydana gelmektedir.



Şekil 3.18: 08.05.2018 tarihinde 0,044 kg/s'lik debi değerinde su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışınlıma bağlı grafiği.

0,069 kg/s kütleli akış hızında ışınlıma değerindeki her 100 W/m²'lik artış ile su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkta 0,22 °C'lik artış meydana gelmektedir.



Şekil 3.19: 31.05.2018 tarihinde 0,069 kg/s'lik debi değerinde su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışınlıma bağlı grafiği.

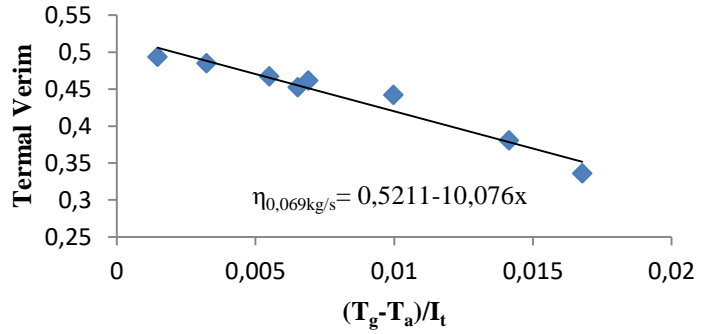
Sistemin farklı debi değerlerinde çalışmasında su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ışınlıma bağlı değerini veren doğru denklemleri Tablo 3.1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 3.1: Değişik debi değerlerine göre sıcaklık farkının ışınlıma değerine bağlı değerini veren doğru denklemleri.

Debi Değeri (kg/s)	Denklem
0,015	$\Delta T = 0,0097I_{(t)} - 0,7058$
0,044	$\Delta T = 0,0034I_{(t)} - 0,3334$
0,069	$\Delta T = 0,0022I_{(t)} - 0,2465$

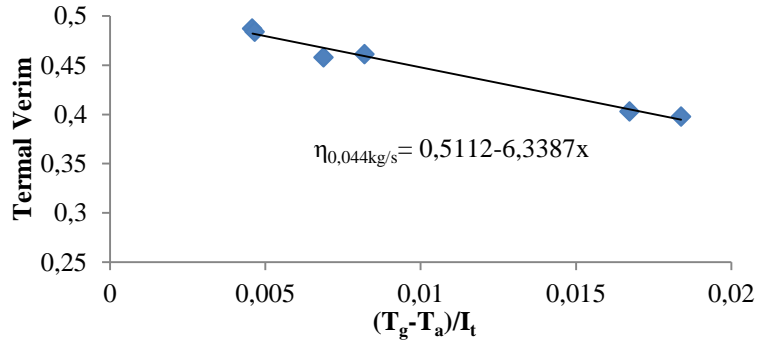
Şekil 3.20, 3.21 ve 3.22'de sırasıyla 0,069 kg/s, 0,044 kg/s ve 0,015 kg/s debi değerlerindeki ölçümler için indirgenmiş sıcaklık farkına ((T_g-T_a)/I_t) göre termal verim eğrileri verilmiştir. 0,069 kg/s'lik debi değerinde optik kayıplar çıktıktan sonra

kalan ve sıvı giriş-çıkış sıcaklığı arasındaki maksimum sıcaklık farkında elde edilen maksimum verim denklemdeki birinci katsayı olan 0,5211'dir.



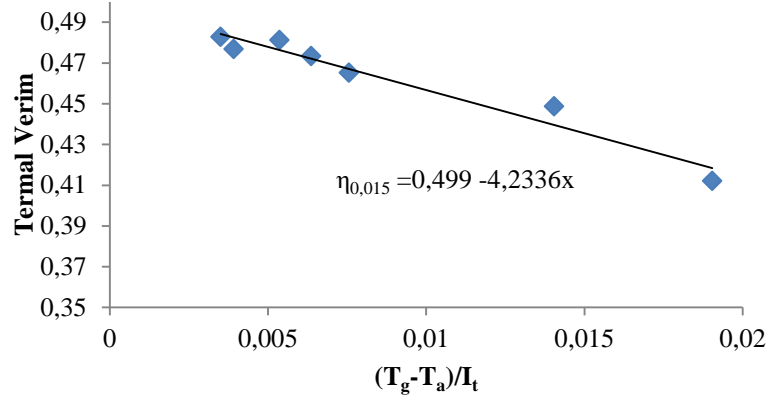
Şekil 3.20: 0,069 kg/s kütleli debide, ısıtımın giriş ve çıkış su sıcaklık farkları $(T_g - T_a)/I_t$ üzerine etkisi

0,044 kg/s akış hızında elde edilen maksimum verim % 51,12 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.21: 0,044 kg/s kütleli debide, ısıtımın giriş ve çıkış su sıcaklık farkları $(T_g - T_a)/I_t$ üzerine etkisi.

0,015 kg/s akış hızında elde edilen maksimum verim % 49,9 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.22: 0,015 kg/s kütleli debide, ışımının giriş ve çıkış su sıcaklık farkları $(T_g - T_a)/I_t$ üzerine etkisi.

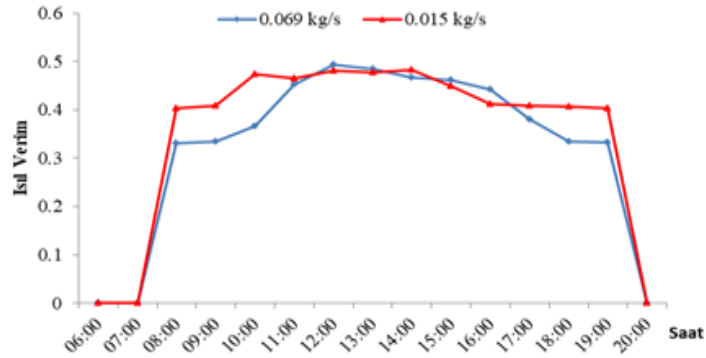
Tablo 3.2’de verilen indirgenmiş sıcaklık farkına $(T_g - T_a)$ ve ışınım miktarına göre oluşturulan termal verim denklemleri karşılaştırıldığında, PV/T su sistemi için akış yapan suyun kütleli debisinin artmasının termal verimi arttırdığını gözlemlenmiştir. Denklemlerdeki sıcaklığa bağlı kayıpları bulmamıza olanak sağlayan ikinci katsayılar incelendiğinde, debi değeri yüksek olan ölçümlerde bu katsayının da yüksek olduğu görülmektedir. Kütleli debinin artmasının sıcaklığa bağlı kayıpları arttırdığı da gözlemlenmiştir. Böylece, yüksek debili sistemlerde, toplam termal verimde düşüşler meydana gelmektedir.

Tablo 3.2: Farklı debi değerleri için termal verim denklemleri.

Kütleli Akış Hızı	Denklem
0,069 kg/s	$\eta_{0,069\text{kg/s}} = 0,5211 - 10,076(T_g - T_a)/I_t$
0,044 kg/s	$\eta_{0,044\text{kg/s}} = 0,5112 - 6,3387(T_g - T_a)/I_t$
0,015 kg/s	$\eta_{0,015\text{kg/s}} = 0,4990 - 4,2336(T_g - T_a)/I_t$

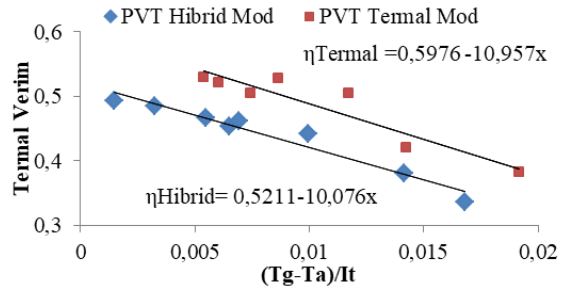
Şekil 3.23’te, 0.069 kg/s ve 0.015 kg/s’ lik debi değerleri için günlük toplam termal verim değerleri saatlik olarak karşılaştırılmıştır. Sıcaklığa bağlı kayıplar dikkate alındığında, gün içerisinde verim değerindeki düşüş miktarlarının 0.069 kg/s debi değerinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 0.069 kg/s’ lik debi değerinde sıcaklığa bağlı olmayan optik verim % 52.11 seviyelerindedir. Gün içerisinde sıcaklığa bağlı verim düşüşünün en büyük değeri % 36 olarak bulunmuştur. 0.044 kg/s’ lik debi değerindeki optik verim % 51.12 seviyelerindedir. Sıcaklığa bağlı maksimum verim düşüşü % 23 seviyesindedir. Optik verimi % 49.9 olan 0.015 kg/s’

lik debide alınan ölçümlerde maksimum verim düşüşü % 19 olarak hesaplanmıştır. Debinin artmasının sıcaklığa bağlı kayıplarda artışa neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.23: 0.069 kg/s ile 0.015 kg/s'lik debi değerlerinde günlük toplam termal verim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 3.24'te, 0,069 kg/s debi ile çalışan PV/T kollektörün, maksimum güç noktasında çalıştığı durumda ve elektriksel yük olmadan çalıştığı durumdaki termal verim değerleri karşılaştırılmıştır. Yüksüz durumdaki optik verim ve sıcaklığa bağlı kayıplar yüklü duruma göre daha yüksektir. Yüksüz çalışma durumunda optik verim % 59,7 hesaplanırken; yüklü durumdaki optik verim değeri % 52,1'dir.

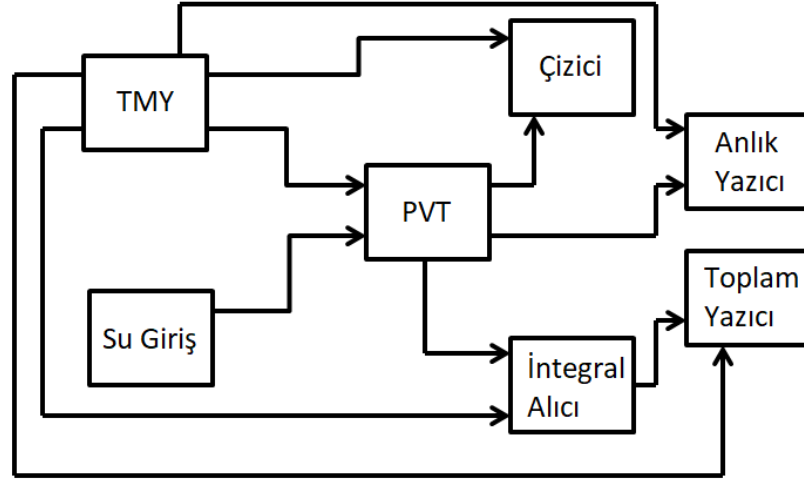


Şekil 3.24: PVT mod-termal mod termal verim karşılaştırılması.

3.4 PV/T sistemin TRNSYS Adlı Yazılımla Simülasyonu

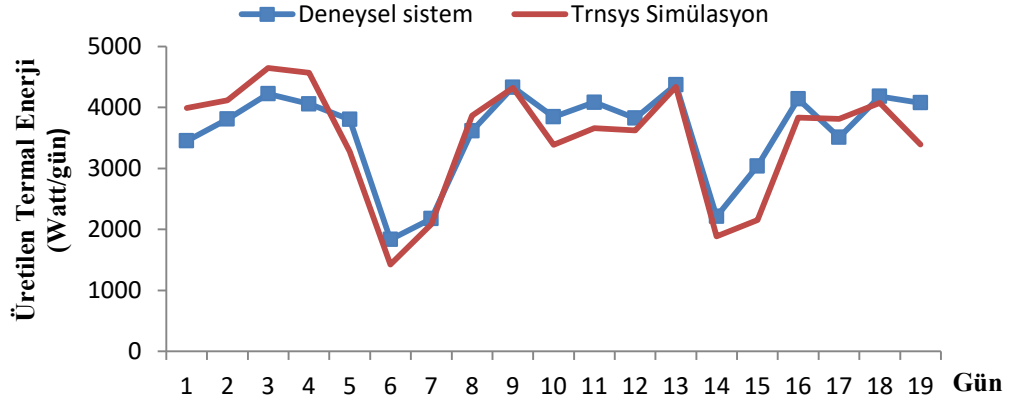
Deney sisteminde alınan termal veriler ile, belirli zaman aralıklarındaki Q_u yararlı ısı miktarları hesaplanmıştır. Kullanılan PV/T su sisteminde yer alan bileşenlerle aynı özelliklerde bileşenlere sahip bir sistem TRNSYS adlı simülasyon yazılımı ile oluşturulmuş ve termal veriler alınmıştır. Deneysel veriler ve yazılım ile alınan veriler karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.25'te, TRNSYS programında oluşturulmuş, Balıkesir hava verileri ve deneysel sistemde kullanılan PV/T ile hazırlanmış simülasyon sisteminin akış şeması verilmiştir. Şemada PV/T sistemin giriş ve çıkış verilerini ve meteorolojik verileri anlık gösteren bir çizici, saatlik verileri tek tek kaydeden anlık yazıcı ve saatlik verileri kullanılan integral alıcı bileşen ile toplayarak kaydeden bir toplam yazıcının bağlantıları görülmektedir.



Şekil 3.25: TRNSYS'de kurulan sistemin akış şeması.

2018 yılı Haziran ayında alınan 19 günlük termal veriler ve simülasyon programı ile elde edilen veriler Şekil 3.26'daki grafikte karşılaştırılmıştır. 0,069 kg/s akışkan hız değerinde yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçlarına bakıldığında yakın değerler olduğu görülmektedir. 19 günlük toplam yararlı ısı miktarı deneysel sistem için 68,6 kW iken; simülasyon sisteminde 65,98 kW olarak hesaplanmıştır. Günlük ortalama üretilen yararlı ısı miktarı ise sırasıyla 3,61 kW ve 3,47 kW olarak hesaplanmıştır.

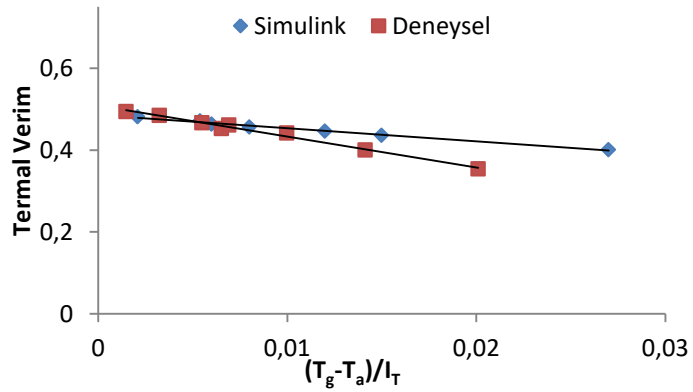


Şekil 3.26: 2018 yılı Haziran ayı 19 günlük deneysel sistem ve TRNSYS simülasyon sistemi elde edilen termal enerji miktarlarının karşılaştırılması.

3.5 PV/T sistemin Matlab-Simulink ile Modellenmesi

Matlab-Simulink adlı yazılım ile Başlık 3.3 ve Başlık 3.6 altında verilen PV/T sistem enerji denklemleri ve PV/T sistem maliyet analizi denklemleri kullanılarak PV/T sistemin çalışma performansı ve maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

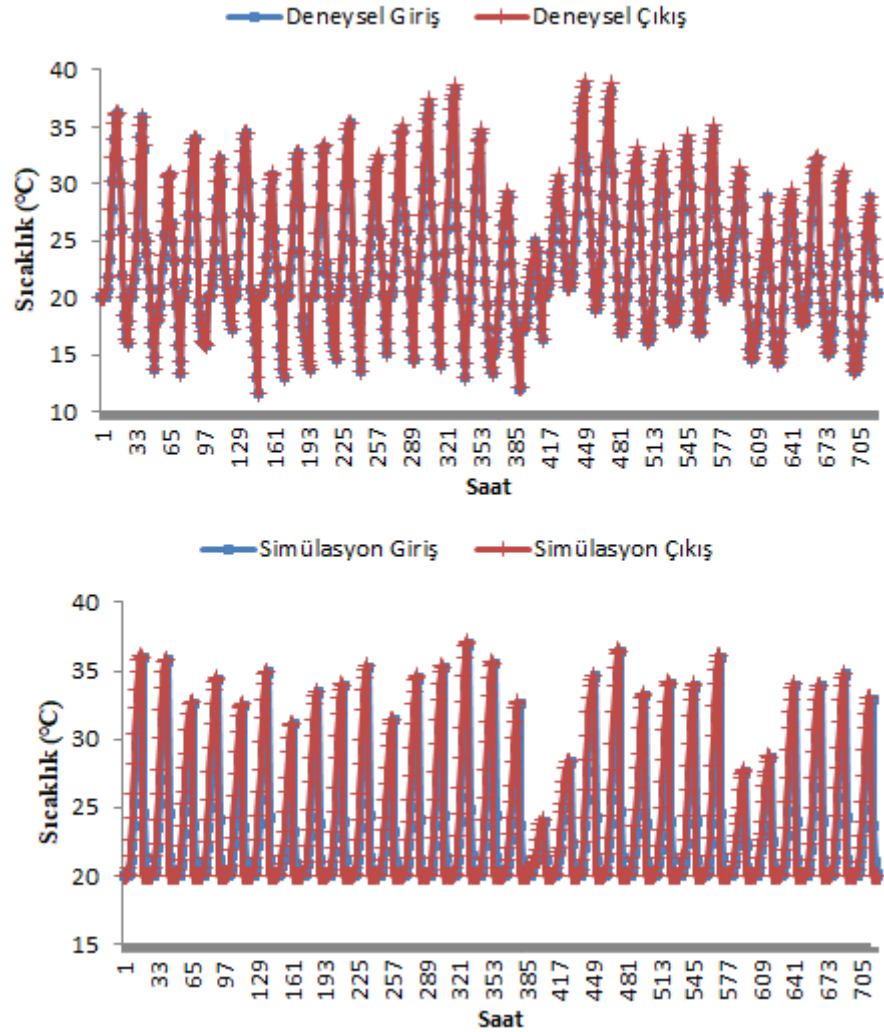
Oluşturulan performans analizi simulink modelinde PV/T panelin karakteristik verim değerleri hesaplanmıştır. 0,069 kg/s'lik debi değerinde indirgenmiş sıcaklık farkına göre $((T_g - T_a)/I_T)$ oluşan verim değerleri simulink ile hesaplatılmış ve deneysel sistemden alınan değerler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.27).



Şekil 3.27: Deneysel sistemden elde edilen ve simülasyondan elde edilen $(T_g - T_a)/I_T$ termal verimlerinin karşılaştırılması.

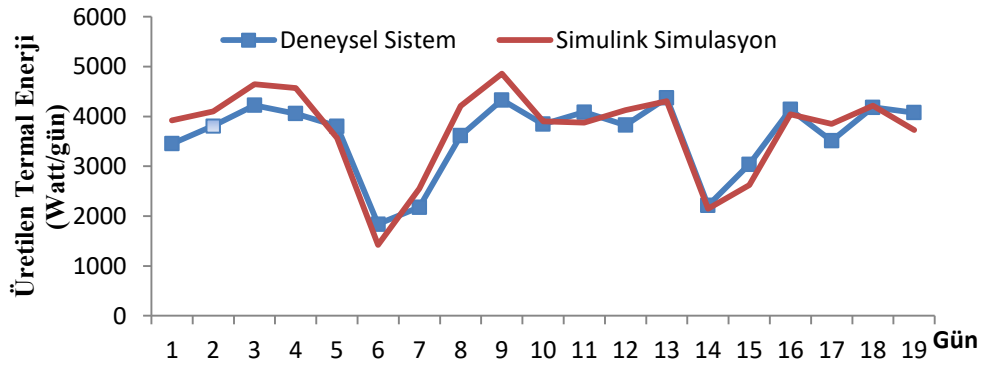
Oluşan verim değerleri karşılaştırıldığında; deneysel sistemde giriş sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki fark daha büyük değerlere ulaştığında verim değerlerindeki düşüş matematiksel modele göre daha fazla olduğu görülmektedir. Sistemin sıcaklığa bağlı verim kayıpları matematiksel modele göre fazladır. Buna sebep olan faktörün izolasyona bağlı kayıplardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sistemde tek panel için 2018 yılı Haziran ayı içerisinde kaydedilen kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları ile Simulink modelinde gerçekleşen kollektör giriş-çıkış sıcaklıkları Şekil 3.28’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır. Haziran ayı içerisinde deneysel sistemin çıkışında ölçülen en yüksek sıcaklık 39,03 °C iken matematiksel modelde 37,1 °C’dir.



Şekil 3.28: 2018 yılı Haziran ayı için deneysel sistem ve simülasyon sistemi giriş-çıkış su sıcaklıklarının karşılaştırılması.

2018 yılının Haziran ayında 19 günlük süre içerisinde sistemde 1 adet panelden elde edilen günlük ortalama termal enerji değerleri Simulink yazılımıyla oluşturulan modelden elde edilen termal enerji değerleri ile Şekil 3.29’da verilen grafikte karşılaştırılmıştır. Deneysel sistemde üretilen toplam termal enerji değeri 68,6 kW iken; simülasyon modelinde 71,1 kW olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sisteminde yalnızca kollektörün konstrüksiyonuna bağlı ısı kayıpları hesaba katılmıştır. Deneysel sistemde kollektör dışında bulunan izolasyon kayıpları da bulunmaktadır. Aradaki farkın sebebinin bu olduğu ön görülmüştür.



Şekil 3.29: 2018 yılı Haziran ayı 19 günlük deneysel sistem ve Simulink simülasyon sistemi elde edilen termal enerji miktarlarının karşılaştırılması.

3.6 Ekonomik Analiz

Kullanılan sistemin ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi için elde edilen yıllık toplam enerji miktarı hesaplanmıştır. Kurulan sistem ile belirli aralıklarla ölçümler yapıldığı için sistemin üretebileceği yıllık toplam enerji miktarları simülasyon programı ile hesaplanmıştır. Matlab-Simulink ortamında Balıkesir meteorolojik hava verilerinin kullanıldığı simülasyon çalışmaları gerçekleştirilerek saatlik elektriksel ve termal enerji üretim miktarları elde edilmiştir. NASA üzerinden alınan Balıkesir meteorolojik verilerine göre; 190 W’lık 2 adet PV/T kollektör üzerine 30°’lik açıyla gelen ışınım değerleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3: Balıkesir ili için 30° eğimle gelen ışınım şiddeti (Wh/m²).

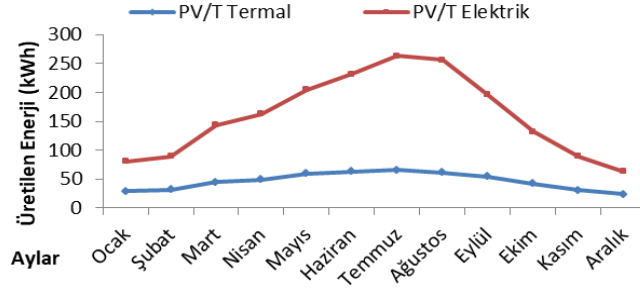
AYLAR	IŞINIM (Wh/m ²)
OCAK	2.415
ŞUBAT	2.615
MART	3.737
NİSAN	5.259
MAYIS	5.563
HAZİRAN	6.272
TEMMUZ	6.611
AĞUSTOS	6.15
EYLÜL	5.435
EKİM	3.933
KASIM	3.228
ARALIK	2.656

Tez kapsamında kurulan sistemin ekonomik analizinin yapılması için kullanılan bir senelik elektriksel ve termal enerji üretim miktarları aylık olarak Tablo 3.4'te verilmiştir. Simülasyon sonuçları alınırken kütleli akış miktarı olarak 0,069 kg/s kullanılmıştır.

Tablo 3.4: 2 adet 190 W'lık PV/T kolektörden simülasyon sonuçlarına göre elde edilen senelik elektriksel ve termal enerji miktarları.

AYLAR	PV/T(kWh _e)	PV/T(kWh _t)
OCAK	28.76	80.65
ŞUBAT	31.58	89.45
MART	45.06	143.4
NİSAN	49.6	162.9
MAYIS	59.3	204.6
HAZİRAN	62.8	231.6
TEMMUZ	65.7	263.4
AĞUSTOS	61.7	256
EYLÜL	54.9	196
EKİM	42	132
KASIM	31.1	89
ARALIK	24.3	63
TOPLAM (kWh)	556.8	1912

Tabloda görüldüğü üzere 2 adet PV/T kolektörden bir sene içerisinde elde edilecek toplam elektrik enerjisi yaklaşık 556,8 kWh ve termal enerji 1912 kWh'tir. % 100'lük dönüşüm verimi kullanılacak olursa, bu miktarda bir termal enerji elde edebilmek için gereken elektrik enerjisi miktarı da 1912 kWh olacaktır. Aylara göre elde edilecek elektrik ve termal enerji miktarları Şekil 3.30'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.30: PV/T kolektörlerden bir yıl boyunca üretilen enerji değerleri.

Deney sisteminde kullanılan malzemelerin maliyet fiyatları üzerinden ekonomik analiz yapılmıştır. Sistemde kullanılan malzemeler şunlardır;

- 2 adet PV/T kolektör,
- 4 adet 12 V 100 Ah akü,
- 1 adet invertör,
- 1 adet şarj kontrol cihazı,
- Pompa,
- Su deposu,
- Kablolama,
- Tesisat malzemeleri,
- Kasa yapımında kullanılan profil malzemeler.

Sistemin maliyet analizi yapılırken iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar; geri ödeme hızı yöntemi ve kullanım ömrü maliyeti hesabı yöntemidir.

3.6.1 Geri Ödeme Hızı Yöntemiyle Sistemin Maliyet Analizi

Sistemin maliyeti hesaplanırken geri ödeme yöntemiyle sistemin amortisman süresi hesaplanmıştır. Sistemin ilk yatırım maliyeti 12500 TL'dir. PV/T sistemden bir yıl boyunca üretilen elektrik enerjisi miktarı 556,8 kW'tır. Evsel kullanımda elektriğin güncel kWh birim fiyatının 0,597 TL'dir. Buna göre, yıllık toplam kazanç 332,4 TL olacaktır. Elde edilen termal enerjinin de elektrik ile üretildiği düşünülürse, termal enerji üretimi yıllık 1912 kWh olan bu sistemin elektriksel ve termal enerji üretiminden yıllık toplam kazancı 1473 TL olacaktır. Bu durumda, sistemin amortisman süresi 8,48 yıl olarak hesaplanmıştır. Sağlanan termal enerji fuel-oilden sağlanmış olsaydı, fuel-oilin güncel kg fiyatının 3.89 TL olduğu bilgisiyle toplam

kazanç 1028 TL olacaktır. Bu durumda ise, sistemin amortisman süresi 12,15 yıl olacaktır. Sağlanan termal enerjinin doğalgazdan üretildiği durumda, doğalgaz m³ fiyatının 1,4 TL olduğu kabul edilirse, sistemden sağlanan toplam kazanç 531,77 TL olacaktır ve sistemin amortisman süresi ise 23,5 yıl değerini alacaktır.

Amortisman sürelerinin yüksek çıkmasının sebebi sistem için fazla kapasitede bulunan akülerin maliyetidir.

3.6.2 Kullanım Ömrü Maliyeti Hesabı Yöntemiyle Sistemin Ekonomik Analizi

Sistemin kullanım ömrü maliyeti analizi kapsamında bileşenlerin ilk yatırım maliyetleri, işletim ve bakım maliyetleri, tamir ve değiştirme maliyetleri ile hurda değeri hesaplanarak bugünkü değerlerine indirgenmiştir. Ardından sistemden 1 sene içerisinde üretilecek enerji miktarına oranı alınarak birim enerji başına maliyet Türk Lirası cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplamanın yapıldığı tarihte dolar kuru 5,3 TL'dir. Tablo 3.5'te sistemde kullanılan bileşenlerin ilk yatırım maliyetleri ve ömürleri verilmiştir.

Tablo 3.5: Sistemde kullanılan malzemeler.

Malzemeler	İlk yatırım maliyeti (TL)	Ömür (Yıl)
PV/T Panel (0.38 kW)	5000	25
İnverter (1 kW)	1000	15
Batarya (4 x12V 98Ah)	3000	9
Şarj Reg. (12-24 V 45A)	750	25
Depo (100 lt.)	500	25
Sirkülasyon pompası	750	25
Tesisat ve diğer malz.	1500	25

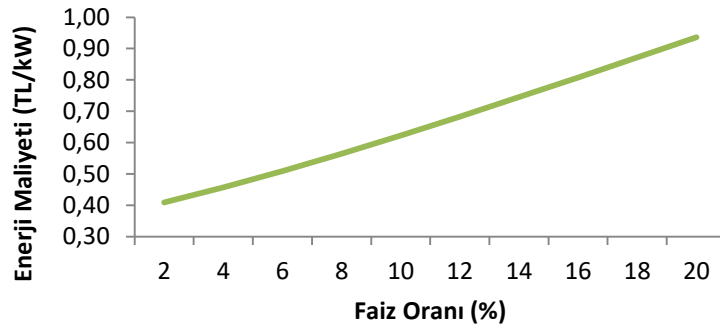
PV/T sistemlerin birim enerji maliyetlerinin hesaplanmasında tüm sistem bileşenlerinin ve üretilen toplam enerjinin birlikte değerlendirildiği çalışmalar bulunmaktadır. PV/T sistemler, karma sistemler olup hem termal enerji hem de termal enerji ürettiğinden dolayı hem sistem bileşenlerinin hem de üretilen enerjinin termal ve elektriksel olarak ayrı ayrı değerlendirildiği çalışmalar da bulunmaktadır.

Guarracino ve arkadaşlarının [71] araştırmalarına benzer olarak, sistemde bulunan bileşenler termal ve elektriksel üretimde kullanımına göre ayrı ayrı değerlendirilerek enerji maliyetleri hesaplanmıştır ve birim enerji maliyetleri bulunmuştur.

Termal ve elektriksel üretim bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilerek elektriksel üretim için ilk yatırım bedeli 6250 TL ve termal enerji üretim bileşenleri için ilk yatırım bedeli 6250 TL olarak hesaplanmıştır.

Kullanım ömrü maliyeti analizi hesaplamalarında faiz değerinin ve ömür değişiminin birim enerji maliyetine etkisini anlamak için Matlab-Simulink adlı yazılım ile oluşturulan simülasyonlar kullanılmıştır. Faiz değerleri olarak % 2 ile % 20 arasında değerler ve ömür süresi olarak da 20, 25 ve 30 sene değerleri alınmıştır.

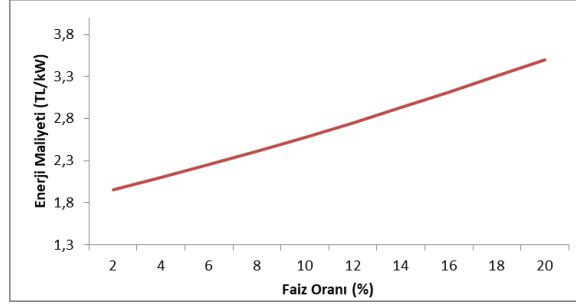
20 yıl ömürlü sistem için yapılan hesaplamalarda birim termal enerji bedeli 0,453 TL ile 0,948 TL arasında değerler almaktadır. 25 sene kullanım ömürlü sistemde bu değerler 0,427 TL ile 0,939 TL arasında ve 30 sene kullanım ömürlü hesaplamalarda 0,410 TL ile 0,936 TL arasında değişmektedir. Birim termal enerji maliyetlerinde en düşük bedelin 30 sene kullanım ömürlü bedelde olduğu görülmektedir. şekil 3.31’de verilen grafikte 30 sene kullanım ömrü için artan faiz oranının enerji maliyetine etkisi verilmiştir. Faiz puanındaki birim artış, enerji birim maliyetinde % 2,95’lik bir artışa sebep olmaktadır. Bu değer, 25 sene kullanım ömrü için % 2,86 ve 20 sene kullanım ömrü için % 2,76’dır.



şekil 3.31: 30 sene kullanım ömrü için faiz oranlarının birim termal enerji maliyetine etkisi.

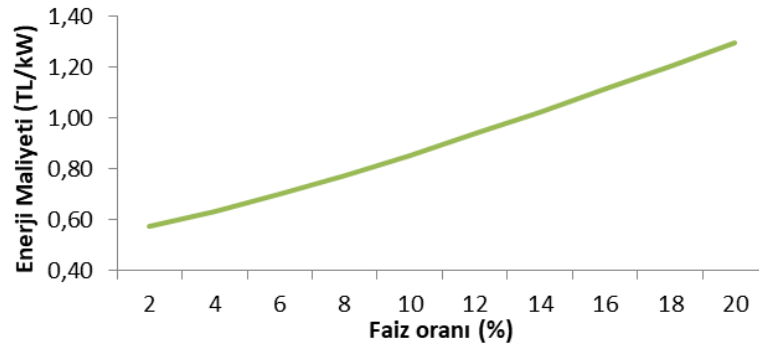
Birim elektrik enerjisi maliyeti hesaplamalarında 20 yıl ömürlü sistem için yapılan hesaplamalarda; birim elektrik enerjisi maliyeti 2,143 TL ile 3,534 TL arasında değerler almaktadır. 25 sene kullanım ömürlü sistemde bu değerler 1.958 TL ile 3,5 TL arasında ve 30 sene kullanım ömürlü hesaplamalarda 2,221 TL ile

3,514 TL arasında değişmektedir. Birim elektrik enerjisi maliyetlerinde en düşük bedelin 25 sene kullanım ömürlü bedelde olduğu görülmektedir. Şekil 3.32’de verilen grafikte, 25 sene kullanım ömrü için artan faiz oranının enerji maliyetine etkisi verilmiştir. Faiz puanındaki birim artış, enerji birim maliyetinde % 8,6’lık bir artışa sebep olmaktadır. Bu değer, 20 sene kullanım ömrü için % 7,8 ve 30 sene kullanım ömrü için % 7,3’tür.



Şekil 3.32: 25 sene kullanım ömrü için faiz oranlarının birim elektrik enerjisi maliyetine etkisi.

Birim toplam enerji maliyeti hesaplamalarında 20 yıl ömürlü sistem için, birim toplam enerji bedeli 0,618 TL ile 1,316 TL arasında değerler almaktadır. 25 sene kullanım ömürlü sistemde bu değerler 0,571 TL ile 1,301 TL arasında ve 30 sene kullanım ömürlü hesaplamalarda 0,575 TL ile 1,298 TL arasında değişmektedir. Birim elektrik enerjisi maliyetlerinde en düşük bedelin 30 sene kullanım ömürlü bedelde olduğu görülmektedir. Şekil 3.33’de verilen grafikte, 30 sene kullanım ömrü için artan faiz oranının enerji maliyetine etkisi gösterilmiştir. Faiz puanındaki birim artışa göre enerji birim maliyetinde % 4,05’lik bir artış meydana gelmiştir. Bu değer, 20 sene kullanım ömrü için % 3,8 ve 25 sene kullanım ömrü için % 4,08’dir.



Şekil 3.33: 30 sene kullanım ömrü için faiz oranlarının birim toplam enerji maliyetine etkisi.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsünde kurulan 0,38 kWp gücündeki bir PV/T sistemin performansı incelenerek şebeke bağımsız çalışma durumunda ürettiği enerji miktarı hesaplanmıştır. PV/T hücre sıcaklıkları, giriş ve çıkış akımları, akü gerilimi, akışkanın kollektörlere giriş ve çıkış sıcaklıkları, kütleli akış hızları ve meteorolojik verilerin ölçümü anlık olarak alınıp kaydedilmiştir. Sistemin deneysel termal çalışma performansı sonucu alınan verilerin doğrulaması, TRNSYS ve Matlab-Simulink ile yapılmıştır. Ayrıca, sistemin enerji maliyetleri ve amortisman süresi de incelenmiştir.

PV hücre sıcaklığının, ışıınım ya da hava sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak artması fotovoltaik sistemlerde güç kaybına neden olan bir sorundur. PV/T sistemlerde yapılan soğutma ile PV hücre sıcaklığı düşürülmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde, soğutma yapılmayan panelde ışıınımın her 100 W/m² artışı hücre sıcaklığında 4,77 °C'lik bir artışa sebep olurken; soğutma yapılan panelde bu artış değeri 2,34 °C'dir. Soğutma için kullanılan akışkanın sıcaklığı da bu artışı etkilemektedir. Ayrıca, soğutma yapılmayan panelin 33 °C hava sıcaklığı ve 950 W/m²'lik ışıınım değerindeki maksimum güç noktasındaki değeri 110 W iken soğutmalı panelde % 12,9'luk bir artışla 140 W olarak ölçülmüştür.

Balıkesir iklim koşullarında, PV/T sistemin şebeke bağımsız çalışma performansı incelenmiştir. PV/T panellerden 2018 yılı Eylül ayı boyunca akülere 1627,3 Ah'lik akım aktarılmıştır. Oluşturulan yük profiline akülerden çektiği akım miktarı ise 1704 Ah olarak ölçülmüş ve akülerin şarj seviyesinin ay sonunda oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; ilgili ay boyunca PV/T panellerden üretilen toplam elektrik enerjisi 40,7 kW olarak ölçülmüştür. Böyle bir sistemin 3,6kWh/gün'lük enerji harcayan bu yük için yaz aylarında yeterli olacağı ancak kış aylarında yetersiz kalacağı tespit edilmiştir.

Sistemin termal performansını incelemek amacıyla 0,015 kg/s, 0,044 kg/s ve 0,069 kg/s'lik debi değerleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Hava ve su giriş

sıcaklığı ile ışıınıma göre indirgenmiş termal verim eğrilerinden alınan verilere göre; sırasıyla, % 49,9, % 51,12 ve % 52,11'lik termal verim değerleri elde edilmiştir. Buna göre, akışkanın kütleli hızının artmasının, termal verimi de arttırdığı gözlemlenmiştir. Ancak, alınan bu veriler sıcaklık etkisinin olmadığı optik verim değerleridir. Yüksek verimlerdeki sıcaklığa bağlı kayıpların daha fazla olduğu dolayısıyla, sistemin tüm gün çalışma performansı incelendiğinde yüksek debi değerlerindeki çalışma durumlarında toplam termal enerji üretiminin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Chow ve ark. [72], Tripanagnostopoulos ve ark. [73], yapmış oldukları çalışmalarda PVT kolektörün ısı verimlerini %38-%48 arasında bulmuşlardır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ise optik verim, debi değerine bağlı olarak %49,9-52,11 arasında bulunmuştur.

PV/T sistemin elektrik tüketimi olmadığı durumdaki termal verimleri incelenmiştir. Yüklü durumda % 52,1 olan termal verim değeri yüksüz durumda % 59,7'ye yükselmiştir.

PV/T sistemden deneysel olarak alınan termal enerji üretim miktarları, TRNSYS adlı simülasyon yazılımından alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. 2018 Haziran ayı içerisinde deneysel sistemden alınan toplam termal enerji miktarı 104,1 kW iken simülasyon programı ile elde edilen termal enerji miktarı 108,15 kW olarak bulunmuştur.

Matlab-Simulink ile oluşturulan matematiksel model ile sistemin tüm sene boyunca saatlik çalışma performansları incelenmiştir. Haziran ayı içerisinde deneysel sistemden elde edilen toplam termal enerji 104,1 kW iken; matematiksel model ile elde edilen termal enerji 115 kW'tır. Bununla birlikte, matematiksel modele göre sistemden bir sene içerisinde elde edilebilecek toplam termal enerji 1912 kW ve elektrik enerjisi 556,8 kW olarak hesaplanmıştır.

Sistemin, Balıkesir ilindeki çalışma şartlarına göre ekonomik analizi yapılmıştır. Bu sistemin hesaplanan amortisman süreleri; elde edilen termal enerjinin elektrikten üretildiği düşünülürse 8,48 yıl, fuel-oilden elde edileceği düşünülürse 12,15 yıl ve doğalgazdan elde edileceği düşünülürse 23,5 yıldır. Guarracino ve arkadaşları oluşturdukları sistemin geri ödeme süresini Londra için 18 sene ve Larnaca için 14 sene olarak hesaplamışlardır [71]. Geri ödeme süresini güneşlenme

miktarı etkilemektedir. Ayrıca şebeke bağımsız PV/T sistemlerin amortisman süreleri eğer küçük güçte kurulduysa PV/T modül haricindeki ekipmanların ve termal düzeneklerin kurulum maliyetlerini arttırmışından dolayı yüksek çıkmaktadır. Ayrıca tez kapsamında oluşturulan sistemde bulunan akü maliyeti, ihtiyaçtan fazla kullanılan akü kapasitesinden dolayı yüksektir. Bu da sistemin amortisman süresini arttırmaktadır. Bununla birlikte, sistemin ömür boyu maliyet analizi ile birim enerji maliyetleri elde edilmiştir. Farklı faiz oranları ve farklı çalışma sürelerine göre birim enerji başına maliyetler hesaplanmıştır. Matlab-Simulink ortamında yapılan hesaplamalarda % 2 ile % 20 arasında faiz oranları ve 20, 25 ve 30 sene kullanım ömürlerine göre analizler gerçekleştirilmiştir. Birim enerji maliyetleri termal enerji üretim maliyetlerine göre, elektrik enerjisi üretim maliyetlerine göre ve toplam enerji üretim maliyetlerine göre ayrı ayrı hesaplanarak elde edilmiştir. Buna göre; birim termal enerji maliyeti için en uygun seçenek % 2 faiz oranı ve 30 senelik kullanım ömrü için 0,41 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Faiz puanındaki birim artış, termal enerji birim maliyetinde % 2,95'lik bir artışa sebep olmaktadır. Bu değer, 25 sene kullanım ömrü için % 2,86 ve 20 sene kullanım ömrü için % 2,76'dir. Birim elektrik enerjisi maliyeti için en uygun seçenek % 2 faiz ve 25 sene kullanım ömründe 1,958 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Faiz puanındaki birim artışa göre enerji birim maliyetinde % 8,6'lık bir artış meydana gelmiştir. Bu değer, 20 sene kullanım ömrü için % 7,8 ve 30 sene kullanım ömrü için % 7,3'tür. Birim toplam enerji başına maliyet için en uygun seçenek % 2 faiz oranı ve 25 sene kullanım ömründe 0,618 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Faiz puanındaki birim artış, enerji birim maliyetinde % 4,05'lik bir artışa sebep olmaktadır. Bu değer, 20 sene kullanım ömrü için % 3,8 ve 25 sene kullanım ömrü için % 4,08'dir. Birim enerji başına maliyet hesaplamalarında; batarya, inverter ve PV/T kollektör değişim ödemeleri maliyet üzerinde oldukça etkili olmuştur. Termal enerji üretiminde batarya ve inverter değişim ödemesi bulunmaması sebebiyle kullanım ömrü arttıkça birim enerji başına maliyet düşmektedir. Guarracino ve arkadaşları % 8 faiz oranında yaptıkları analizlerde Larnaca için termal birim enerji bedelini 1,54 TL, elektrik birim enerji bedelini 1,23 TL ve toplam birim enerji bedelini 1,82 TL olarak hesaplamışlardır [71]. Elde edilen maliyet değerlerini karşılaştırsak sistemin kurulduğu yerdeki güneşlenme miktarının birim enerji bedelini etkilediği görülmektedir.

Ülkemiz son yıllarda yaptığı güneş enerjisi yatırımlarıyla güneş enerjisinden elektrik elde etmede 5 GW kurulu güç miktarını aşmış, özellikle güney illerde daha

fazla bulunan termal kollektör kurulu güç miktarı olarak da 15 GW civarında bulunup sahip olduğu yüksek güneş enerji potansiyelinden daha fazla yararlanmak istemektedir. PV/T sistemler hem daha yüksek verimli elektrik enerjisi üretip hem de aynı zamanda termal enerji de üretebilen sistemlerdir. Evsel kullanımda elde ettiği elektrik enerjisini şebekeye satan, elde edilen termal enerjiyi ise konutun ihtiyaçlarında kullanılacak sistemlerin teşviki ile fosil enerji kaynaklarının kullanımının azaltılması ön görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- [1] Erbaykal, E., “Disaggregate energy consumption and economic growth: evidence from Turkey”, *International Research Journal of Finance and Economics*, 20, 172-179, (2008).
- [2] Girgin, M. H., “Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralının Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW’lık Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi Ve Ekonomik Analizi” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*, (2011).
- [3] İrkıçatal, B.O., “Yenilenebilir Enerji Kaynakları”, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), *Biyoenerji Çalıştayı Sunumları*, Kastamonu, (2010).
- [4] Karalı, Ş., “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ve Dünya Ekonomisine Katkısı”, Yüksek Lisans Tezi, *Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, MBA Programı*, İstanbul, (2017).
- [5] Karagol, E. T. ve Kavaz, İ., “Dünyada ve Türkiyede yenilenebilir enerji”, [online], (10.11.2018), <https://setav.org/assets/uploads/2017/04/YenilenebilirEnerji.pdf>, (2017)
- [6] [online], 10.11.2018, http://www.emo.org.tr/ekler/89bb9e665db0b5a_ek.pdf
- [7] Akpınar, A., Kömürcü, M. İ. ve Kankal, M., “Türkiye’de Hidrolik Enerjinin Durumu ve Geleceği” *Türkiye 11. Enerji Kongresi*, 21-23 Ekim, İzmir, s. 1-10,(2009).
- [8] [online], 09.11.2018, <http://www.eie.gov.tr>
- [9] Çıtak, E. ve Kılınç P., P. B., , “Yenilenebilir Enerjinin Enerji Güvenliğine Etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25(3), ss.79-102, (2016).
- [10] Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., “Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri”, *Yekarum e-Dergi*, 2(3): 1-14, (2014).
- [11] Güler, Ö., “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi”, *V. Enerji Sempozyumu*, 21-23 Aralık, Ankara, s.161-167, (2005).
- [12] Basel, E., Korkmaz, D., Serpen, Ü., Ve Satman, A., “Assessment of Turkey Geothermal Resources”, *Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, February 9-11, Stanford, s.187-193, (2009).

- [13]Sergen, Ü. “Jeotermal Enerji Kullanımı”, *Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Editörler: Osman Demircan, Cengiz Yalçın, Oğuz Güren, İbrahim Kasap, Selahattin Baysal, Çanakkale: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, (2000).
- [14]Kükreler, B., “Hidrojen Enerjisinin Potansiyeli Ve Türkiye Ekonomisi Açısından Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir: Anadolu Üniversitesi SBE*, (2007).
- [15]Dabanlı, İ. ve Uyumaz, A., “Hidrojen Enerjisi ve Türkiye’nin Potansiyeli”, *VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, Yenilenebilir Enerji ve Yerel Yönetimler, Bildiriler Kitabı, Editörler: Zekai Şen, M. İhsan Karamangil, Ahmet Duran Şahin, Bursa: Dekupe Tanıtım A.Ş, (2010).
- [16][online], 05.08.2018, www.enerji.gov.tr
- [17]Görgün, T., “*Yenilenebilir Enerjiler ve Teknolojileri*”, İstanbul: İgeme (İhracatı Geliştirme Merkezi) Yayınları, (2011).
- [18]Yiğit, A., Atmaca, İ., *Güneş Enerjisi*, Alfa-Aktüel Yayıncılık, 7-8, 12, 155, (2010).
- [19][online],02.11.2018,https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2017/10/2009_Youth_Energy_Report_Wec_Tnc.pdf.
- [20]Mohtasham, J., “Review Article-Renewable Energies”, *Energy Procedia*, Sayı: 74, s. 1289-1297, (2015).
- [21][online], 11.12.2018, <https://cleahtecnica.com/2016/02/12/is-this-the-best-solar-chart-yet/>.
- [22][online], 10.05.2018, (Dünya Enerji Konseyi) <https://www.worldenergy.org/>
- [23][online],10.02.2018,http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/02/REN21_AnnualReport_2017_web.pdf
- [24][online], 05.08.2018, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>
- [25][online],05.05.2018,http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f50893f80d6830d_ek.pdf?dergi=143
- [26]Wolf, M., “Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences”, *Energy Conversation Management*, (16), pages: 79–90, (1976).
- [27]Bergene, T. and Lovvik, O.M., “Model Calculations On A Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells”, *Solar Energy*, Vol. 55, No. 6, pp. 453-462, (1995).

- [28] Fujisawa, T. and Tani, T., “Annual Exergy Evaluation On Photovoltaic/Thermal Hybrid Collector”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47, 135-148, (1997).
- [29] Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C. and Sun, F.S., “Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems”, *Solar Energy*, Vol.70, No. 5, pp. 443-448, (2001).
- [30] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdı, M., Ruslan, I. and Kazem, H., “Performance Analysis of Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collectors”, *Energy Conversion and Management*, 78, s641-651, (2014).
- [31] Garg, H. P. and Agarwal, R. K., “Some aspects of a PV/T collector / forced circulation flat plate solar water heater with solar cells”, *Energy Conversion and Management*, (36), pages: 87-99, (1995).
- [32] Kanchan, V. and Tiwari, G. N., “Energy and Exergy analysis of a building integrated semi transparent photovoltaic thermal (BISPVT) system”, *Applied Energy*, pages 409-416, (2012).
- [33] Erkaya, K., “Fotovoltaik-Fototermik Dönüştürücülerde Verim Optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (1998).
- [34] Engin, D., “Yapı ile Bütünleştirilebilir Güneş Pili/Termal Toplayıcı (PV/T) Hibrid Sistemin Performans Analizi ve Optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2006).
- [35] Duran, F., “PV/T Hibrit Sistemlerin Termodinamik ve Performans Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2014).
- [36] Dağ, H.İ., “Pv-Termal Kolektörlerin Tasarımı, Üretimi ve Verimini Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2015).
- [37] Maghsoodi Shaghghi, E., “Fotovoltaik- Termal (PV-T) Kolektörler ile Biyogaz Sistem Tasarımı ve Verimlilik Testi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2013).
- [38] Eke, R., “Fotovoltaik (PV) Güç Sistemlerinde Performansın Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla, (2000).
- [39] Kalogirou, S. and Tripanagnostopoulos, Y., “Hybrid PV/T Solar Systems for Domestic Hot Water and Electricity Production”, *Energy Conversion and Management*, 47, p3368-3382, (2006).

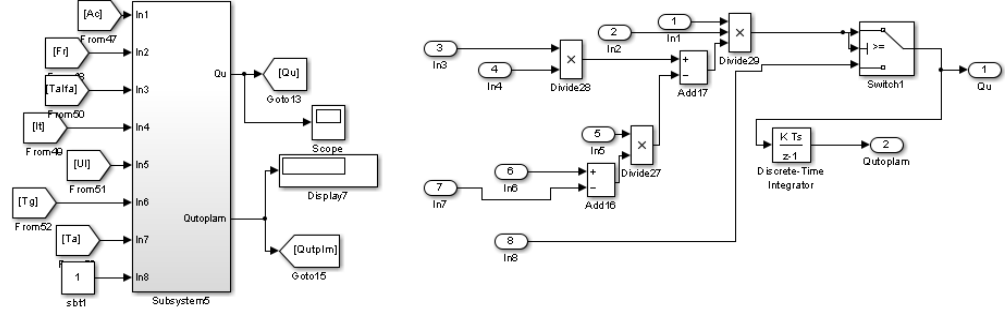
- [40] Aste, N., Del Pero, C. and Leonforte, F., “Water PVT collectors performance comparison”, *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016*, (2017).
- [41] Doğanay, H.Ö., “Kırklareli İklim Şartlarında Hibrit Fotovoltaik/Termal Sistemin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2014).
- [42] Kaya, M., “Thermal and Electrical Performance Evaluation of PV/T Collectors in UAE”, Yüksek lisans Tezi, *KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology*, (2013).
- [43] Kandilli, C., Külahlı, G. ve Savcı, G., “Fotovoltaik Termal (PVT) Sistem 2D Termodinamik Modellemesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması”, *Proceeding, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 1325, (2013).
- [44] Babatunde, A.A. ve Abbasoğlu, S., “Evaluation of field data and simulation results of a photovoltaic system in countries with high solar radiation”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 1-11, (2015).
- [45] Agrawal, B. and Tiwari, G.N., “Life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems” *Energy Build*, 42, pp. 1472-1481, (2010).
- [46] Chow, T.T., Chan, A.L.S., Fong, K.F., Lin, W. He, Z., and Ji, J., “Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application”, *Applied Energy*, 86, pp. 689-696, (2009).
- [47] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M. and Yianoulis, P., “Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems”, *Solar Energy*, 72(3):217-234. (2002).
- [48] Zondag, H.A., De Vries, D.W., Van Helden, W.G.J., Van Zolingen, R.J.C. and Van Steenhoven, A.A., “The Thermal and Electrical Yield of a PV-Thermal Collector”, *Solar Energy*, 72(2):113-128, (2002).
- [49] Fıratoğlu, Z.A. ve Yeşilata, B., “Lineer Elektriksel Yüke Bağlı PV Panellerin Optimizasyonu Ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1, 1, 65., (2003).
- [50] Markvart, T. and Castaner. L., “Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation”, *Elsevier Ltd.*, (2005).
- [51] Akyüz, E., “Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Elektrik ve Hidrojen Üretiminin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2010).

- [52] Doğan, İ., *Güneş Enerjisi Uygulamaları, Bilişim yayınları*, 26-27, 88, 119, (2006).
- [53] [online], 03.02.2018, <https://www.enerjimuhendisleri.com/kose-yazisi/oku/fotovoltaik-hucrelerin-calisma-prensibi-ve-fotovoltaik-paneller>
- [54] Sharma, S., Jain K., and Sharma, A., “Solar Cells: In Research and Applications-A Review.” *Materials Science and Applications*, 6, 1145-1155. doi:10.4236/msa.2015.612113. (2015)
- [55] Öztürk, H. H., *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*, 1. baskı. İstanbul: Birsen Yayınevi, s. 117, 126, 127, (2013).
- [56] Tiwari, G. N. and Dubey, S., “Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications”, *RCS Publishing, Cambridge*, 402 pages, (2010).
- [57] Makki, A., Omer, S. and Sabir, H., “Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 658–684, (2015).
- [58] Du, D., Darkwa, J. and Kokogiannakis, G., “Thermal management systems for photovoltaics (PV) installations: a critical review”, *Solar Energy*, 97(2):38–54, (2013).
- [59] Zondag, H.A., De Vries, D.W., Van Helden, W.G.J., Van Zolingen, R.J.C. and Van Steenhoven, A.A., “The yield of different combined PV– thermal collector designs”, *Solar Energy*, 74, 253–269, (2003).
- [60] Cristofari, C., Notton, G. and Canaletti, J. L., “Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions”, *Solar Energy*, (83), pages:11231138, (2009).
- [61] Kıyanççek, E., “Fotovoltaik Sistemlerin Boyutlandırılması için Pvs2 Paket Programının Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
- [62] [online], 11.01.2018, <https://www.steca.com>
- [63] De Soto, W., Klein S. A. ve Beckman, W. A. “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance” *Solar Energy*, 80, 1, 78, (2006).
- [64] Campbell. R.C., “A circuit-based photovoltaic array model for power system studies”, *Proceedings of 39th North American Power Symposium (NAPS)*, 97, (2007)

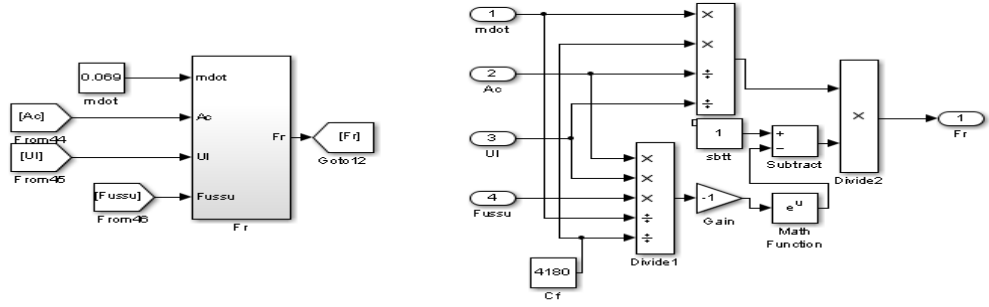
- [65]Radziemska, E., “Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review”, *Progress in Energy Combustion Science*, (29), pages: 407–424, (2003).
- [66]Tırıs M., Tırıs Ç. ve Erdallı Y., *Güneş Enerjili Su Isıtma Sistemleri*, Gebze, Tübitak marmara araştırma merkezi, (1997).
- [67]Vokas, G., Christandonis, N. ve Skittides, F., “Hybrid photovoltaic thermal systems for domestic heating and cooling--A theoretical approach”, *Solar Energy*,(80), pages: 607-615, (2006).
- [68]Duffie, J. A. ve Beckman, W. A., “Solar Engineering of Thermal Processes”, 4.Baskı, Wiley, New Jersey, 237-267, (2013).
- [69]Bakır, C., “Fotovoltaik/Termal Sistemlerde Performans İyileştirmesi ve Termo-Ekonomik Analiz”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2012)
- [70][online], (07.04.2017), <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/mppt-nedir-nasl-calsr-elektrikport-akademi/8064#ad-image-0>
- [71]Guarracino I., Freeman J., Ekins-Daukes N. and Markides C.N., “Performance assessment and comparison of solar orc and hybrid pvt systems for the combined distributed generation of domestic heat and power”, *Conference: 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, (2016).
- [72]Chow, T., He, T. ve Ji, W., “An Experimental study of facade-integrated photovoltaic/water heating system”, *Applied Thermal Engineering*, (27), 37-45, (2007).
- [73]Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R. Ve Corrado, A., “Energy, cost and LCA results of PV and PV/T hibrid solar systems”, *Progress in Photovoltaics: Research And Applications*, (13), 235-250, (2005).

EKLER

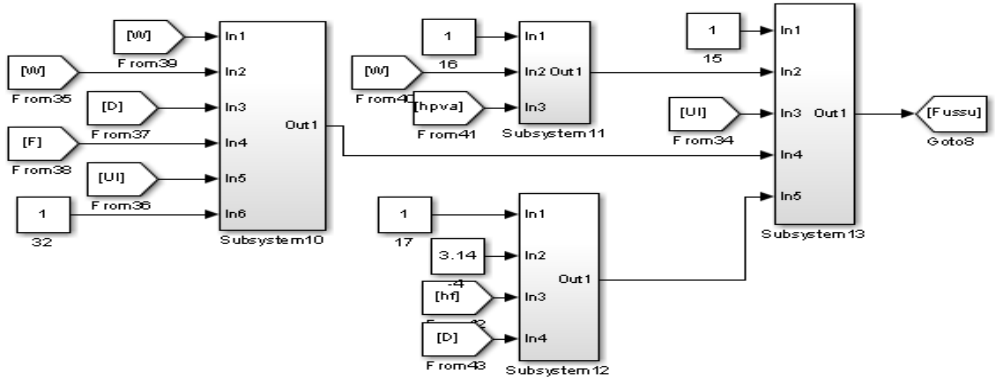
Ek-1 PV/T sistemin simulink modeli



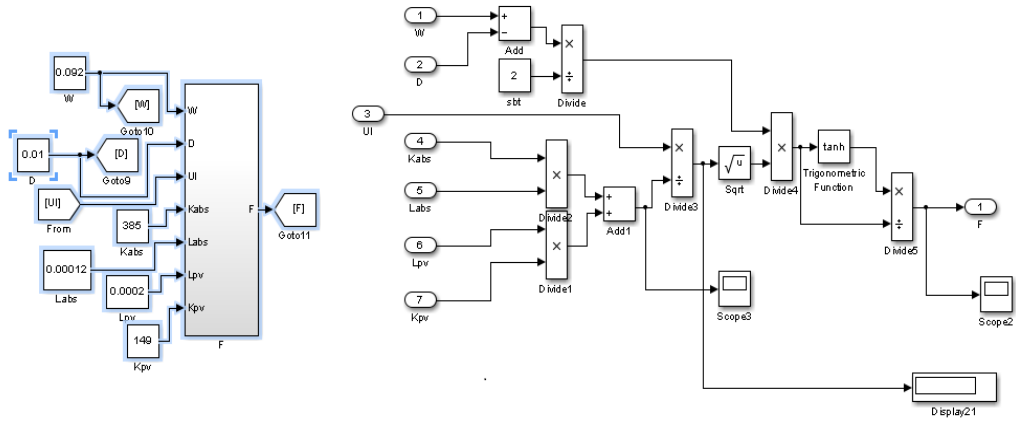
Şekil Ek-1.1: Q_u değişkeninin simulink modeli.



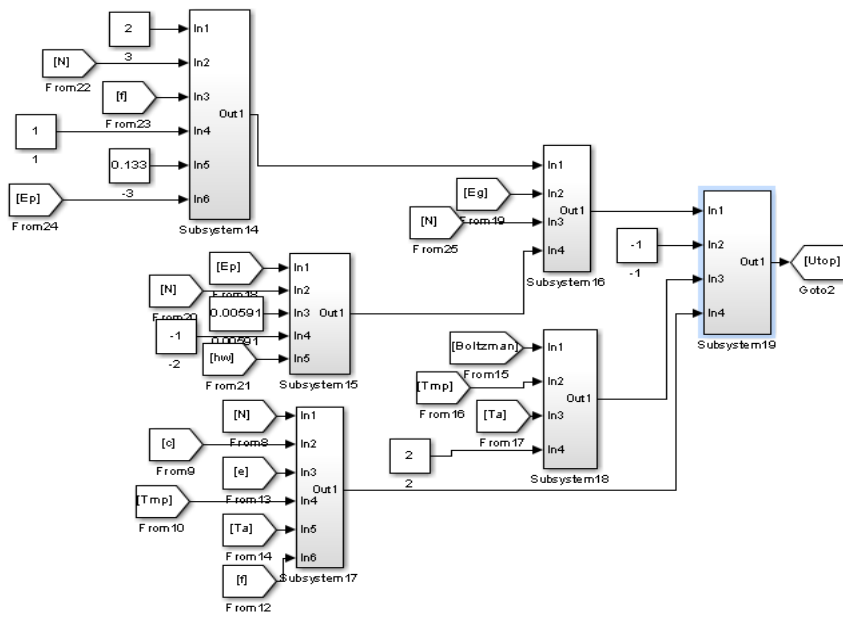
Şekil Ek-1.2: F_r değişkeninin simulink modeli.



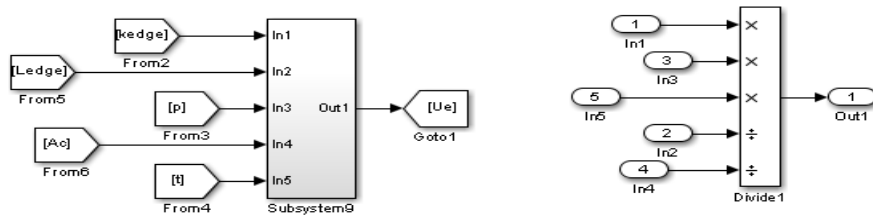
Şekil Ek-1.3: F' değişkeninin simulink modeli.



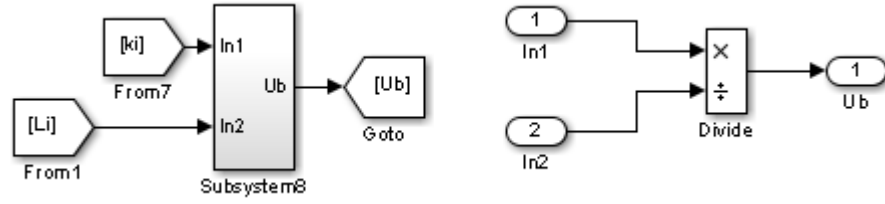
Şekil Ek-1.4: F değişkeninin simulink modeli.



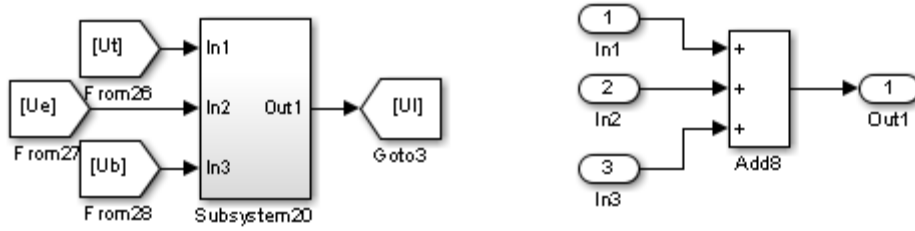
Şekil Ek-1.5: U_t değişkeninin simulink modeli.



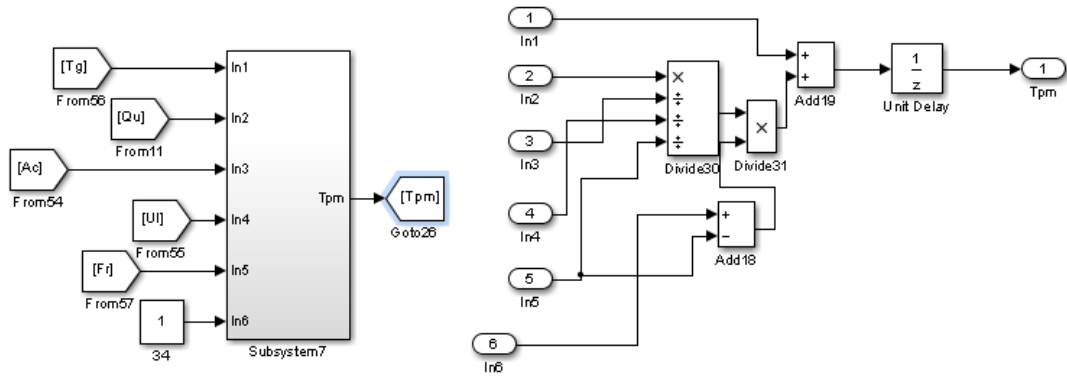
Şekil Ek-1.6: U_c değişkeninin simulink modeli.



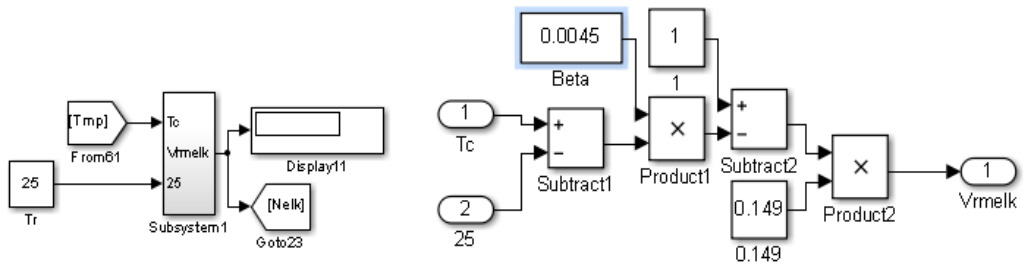
Şekil Ek-1.7: U_b değişkeninin simulink modeli.



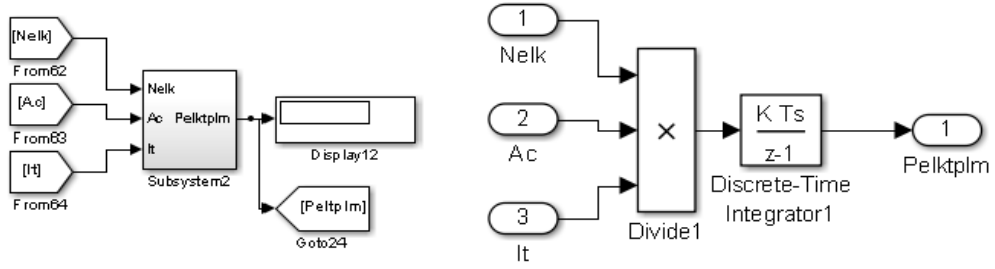
Şekil Ek-1.8: U_L değişkeninin simulink modeli.



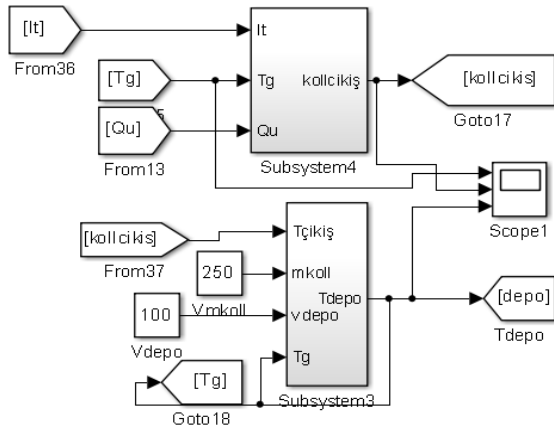
Şekil Ek-1.9: T_{pm} değişkeninin simulink modeli.



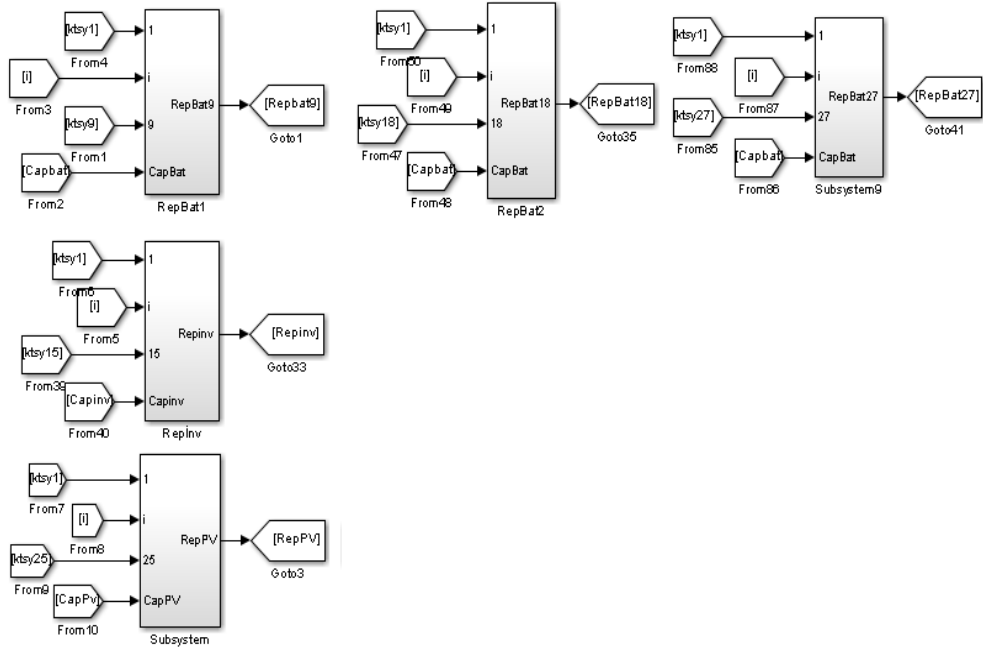
Şekil Ek-1.10: Elektrik verimi simulink modeli.



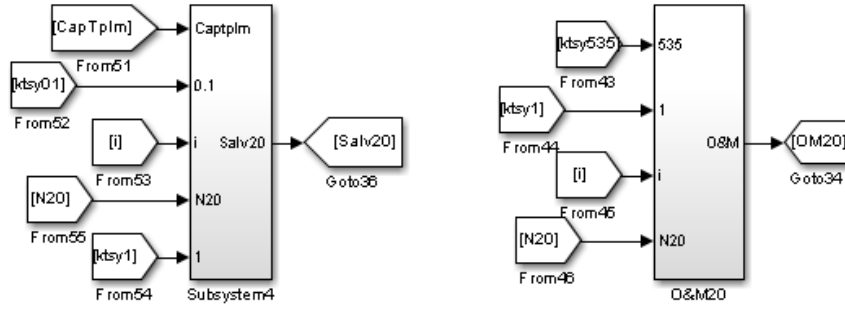
Şekil Ek-1.11: Elektrik enerjisi toplamı hesabının simulink modeli.



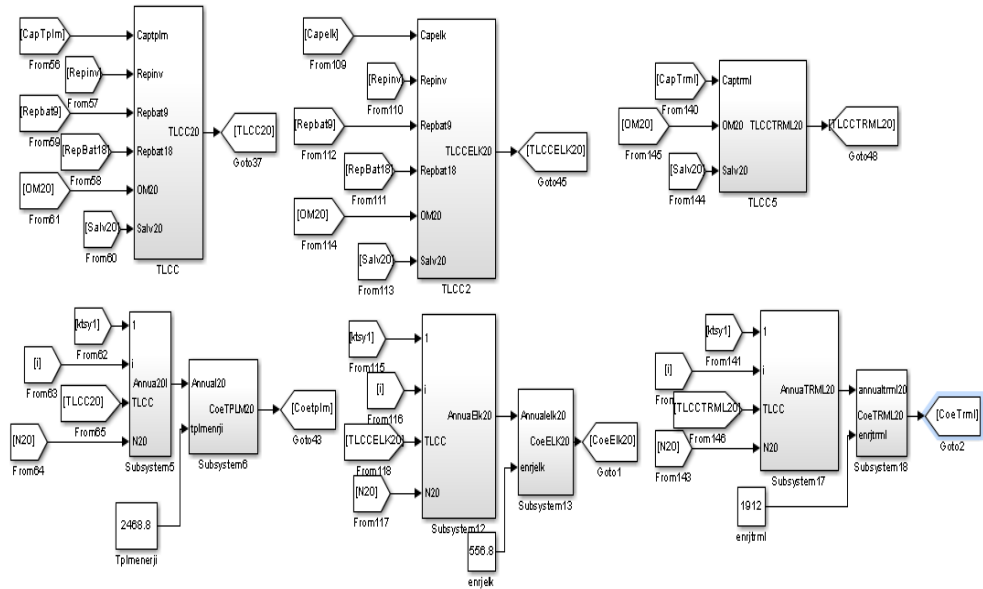
Şekil Ek-1.12: Depolu sistem Matlab simulink modeli.



Şekil Ek-1.13: Tamir ve değiştirme maliyetlerinin simülasyon modeli.



Şekil Ek-1.14: Hurda bedeli ve işletim ve bakım masrafları hesaplama modeli.



Şekil Ek-1.15: Birim enerji bedeli hesaplama modeli.