

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOELEKTRİK MODÜLÜN İKİ YÖNLÜ KULLANILDIĞI
FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Uğur YILMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOELEKTRİK MODÜLÜN İKİ YÖNLÜ KULLANILDIĞI
FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Uğur YILMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Türker Fedai ÇAVUŞ

Ortak Danışman: Prof.Dr.Yaşar İSLAMOĞLU

HAZİRAN 2025

UĞUR YILMAZ tarafından hazırlanan “TERMoeLEKTRİK MODÜLÜN İKİ YÖNLÜ KULLANILDIĞI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ” adlı tez çalışması 26.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof.Dr.Ali Fuat BOZ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr.Öğr.Üyesi Türker Fedai ÇAVUŞ Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof.Dr.Hüseyin PEHLİVAN Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr.Uğur ARİFOĞLU Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr.Öğr.Üyesi Murat Erhan ÇİMEN Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “TERMOELEKTRİK MODÜLÜN İKİ YÖNLÜ KULLANILDIĞI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Uğur YILMAZ





Eşime ve kızıma



TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen, beni yönlendiren ve teşvik eden değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Türker Fedai ÇAVUŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Termoelektrik konusunda bilgimi artırmamı ve laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan, makale ve tez süreçlerinde bana destek olan değerli ortak danışman hocam Prof. Dr. Yaşar İSLAMOĞLU'na, tez izleme süreçlerinde öneri ve yorumlarıyla beni yönlendiren değerli hocalarımız Prof. Dr. Ali Fuat BOZ ve Prof. Dr. Hüseyin PEHLİVAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Simülasyonlardaki sorunları çözmeme destek olan değerli hocam Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU'na teşekkür ederim.

Uğur YILMAZ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	3
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	11
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	13
2.1. Güneş Işınımı	14
2.2. PV Hücre yapısı	16
2.3. PV Sistemlerin Modellenmesi	18
2.3.1. İdeal PV hücresi	18
2.3.2. PV dizisinin modellenmesi	19
2.3.3. PV hücrelerinin karakteristikleri	26
2.4. PV Sistemlerin MATLAB/Simulink Modeli	30
3. TERMOELEKTRİK SİSTEMLER	33
3.1. Termoelektrik Modüllerin Yapısı	36
3.1.1. TEG modeli denklemleri	38
3.1.1.1. TEG performans parametreleri	39
3.1.1.2. TEG maksimum parametreleri	41
3.1.1.3. TEG malzeme özelliklerinin belirlenmesi	43
3.1.2. TEC modeli denklemleri	44
3.1.2.1. TEC performans parametreleri	44
3.1.2.2. TEC maksimum parametreleri	45
3.1.2.3. TEC malzeme özelliklerinin belirlenmesi	46
3.1.3. Sıcaklığa bağımlı malzeme özelliklerinin hesaplanması	47
3.2. TEM'in İki Yönlü Modellenmesi	49
3.2.1. Akım yönü ve gerilim polaritesinin etkisi	49
3.2.1.1. Pozitif (+) akım yönü ve pozitif (+) gerilim polaritesi koşullarındaki TEG çalışması	50
3.2.1.2. Pozitif (+) akım yönü ve negatif (-) gerilim polaritesi koşullarındaki TEC çalışması	51
3.2.1.3. Negatif (-) akım yönü ve negatif (-) gerilim polaritesi koşullarındaki TEG çalışması	52
3.2.1.4. Negatif (-) akım yönü ve pozitif (+) gerilim polaritesi koşullarındaki TEC çalışması	53

3.3. MATLAB/Simulink Modelinin Oluşturulması	54
3.4. Simölasyonlar	60
4. PV-TE SİSTEMDE ISI GEÇİŞİ.....	71
4.1. PV Panelde Isı Geçişİ	71
4.2. PV-TEG Sistemde Isı Geçişİ	74
4.3. PV-TEC Sistemde Isı Geçişİ	76
4.4. PV-TE Sistemde Isı Geçişİnin MATLAB/Simulink İle Modellenmesi	77
5. DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	81
6. UYGULAMA.....	85
7. SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	115



KISALTMALAR

AC	: Alternatif akım
AM	: Air Mass (hava kütlesi)
CCM	: Sürekli akım modu
CIGS	: CuInGaSe_2 (Bakır İndiyum Galyum Selenit)
COP	: Etkinlik veya soğutma performans katsayısı
CPVT	: Yoğunlaştırılmış fotovoltaiik-ısı
DC	: Doğru akım
DCM	: Sürekli olmayan akım modu
EMK	: Elektro motor kuvvet
FC	: Fuel Cell (yakıt hücresi)
FoM	: Termoelektrik malzemenin performansı
IR	: Kızıl ötesi
KGK	: Kirchoff Gerilim Kanunu
MPP	: Maksimum güç noktası
MPPT	: Maksimum güç noktası takibi
NOCT	: Nominal çalışma koşullarında PV hücre sıcaklığı
P&O	: Perturbe & Observe (değiştir ve gözle)
PV	: Fotovoltaiik
PWM	: Pulse Width Modulation (darbe genişlik modülasyonu)
RTC	: Gerçek zaman saati
STC	: Standart test koşulları
TE	: Termoelektrik
TEC	: Termoelektrik soğutucu modül veya termoelektrik soğutma modülü
TEG	: Termoelektrik güç üretici modül veya termoelektrik jeneratör modülü
TEM	: Termoelektrik modül



SİMGELER

a	: Diyot idealite sabiti
A	: Alan [m^2]
D	: Çalışma oranı
E_g	: Yarı iletkenin bant aralığı enerjisi
G	: Güneş ışıınımı (W/m^2)
I	: Elektrik akımı[A]
h	: Isı taşınım katsayısı [W/m^2K]
J	: Elektrik akım yoğunluğu [A/m^2]
k	: Boltzmann sabiti ($1,3806503 \times 10^{-23}$) [J/K]
K	: Isıl iletkenlik [W/K]
K_i	: PV hücrenin akım-sıcaklık katsayısı [A/K]
K_v	: PV hücrenin gerilim-sıcaklık katsayısı [V/K]
L	: Uzunluk [m]
m	: Yük direncinin iç dirence oranı
P	: Güç [W]
R	: Elektrik direnci [Ω],[1/S]
q	: Elektron yükü ($1,60217646 \times 10^{-19}$) [C]
Q	: Birim zamanda geçen ısı [W]
S	: Termoelektrik malzemenin Seebeck katsayısı [V/K]
T	: Sıcaklık [$^{\circ}C$],[$^{\circ}K$]
V	: Elektriksel gerilim (Voltaj) [V]
Z	: Termoelektrik malzemenin performansı [1/K]
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti ($5,67 \times 10^{-8}$) [$W/m^2 K^4$]
τ	: PV hücresi üzerine kaplanan camın ışık geçirgenliği
τ	: Thomson katsayısı [V/K]
α	: Işınım yutma katsayısı
ϵ	: Işınım yayma oranı
ρ	: Termoelektrik malzemenin elektrik öz direnci [$\Omega.m$]
η	: Verim



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Farklı tip PV hücreleri için diyot idealite sabiti değerleri [88].	23
Tablo 3.1. Simülasyonlarda kullanılan TEM'lere ait parametreler.	64
Tablo 3.2. 9500/071/060B TEC için sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri katsayıları.	64
Tablo 5.1. DC-DC dönüştürücülerde topolojiye göre empedans ilişkileri [143].	82
Tablo 7.1. TEM modellerinin karşılaştırılması.	94
Tablo 7.2. Farklı şartlar altında PV-TE sistemde simülasyon ve deney sonuçları....	99



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Bir silikon güneş hücresi için minimum kayıpların spektral analizi (bant aralığı = 1,1 eV) [9].....	2
Şekil 1.2. PV-TE hibrit sistem [24].	4
Şekil 1.3. PV-TEG hibrit sistem: (a) spektrum ayırıştırıcılı (b) spektrum ayırıştırıcısız 1: PV modülü; 2: TEG; 3: ısı alıcı 4: yansıtıcı [37].	5
Şekil 1.4. CPV-TE hibrit toplayıcı sistem kesit şeması [62].	8
Şekil 1.5. Isı alıcılı CPV-TEG sistemi [64].	9
Şekil 1.6. Spektrum ayırıştırıcılı CPV-TEG sistemi [64].	10
Şekil 2.1. PV hücre, PV modül, PV dizi [71].	13
Şekil 2.2. Dünya dışı uzayda (AM0) ve Dünya yüzeyinde (AM1.5) siyah cisim ışınımının ve Güneş ışınımının spektral dağılımı [77].	14
Şekil 2.3. AM1.5 yolunun ve Güneş'e bakan bir yüzey üzerinde 37° eğimde doğrudan-normal ve küresel gelen ışınımın gösterimi [73].	15
Şekil 2.4. Bir PV hücrenin fiziksel yapısı [73].	16
Şekil 2.5. PV hücresinin teorik tek diyot modeli ile seri ve paralel dirençleri içeren pratik bir PV cihazının eşdeğer devresi [73].	18
Şekil 2.6. PV hücresinin karakteristik $I-V$ eğrisi. Net hücre akımı I , ışıkla üretilen akım I_{pv} ve diyot akımı I_d 'den oluşur [73].	19
Şekil 2.7. Çok hücreli PV dizisi eşdeğer devresi a) Genel eşdeğer devre b) Yaklaşık eşdeğer devre c) Basitleştirilmiş eşdeğer devre [88].	19
Şekil 2.8. Pratik bir PV cihazının karakteristik $I-V$ eğrisi ve dikkat çekici üç nokta: kısa devre ($0, I_{sc}$), MPP (V_{mp}, I_{mp}) ve açık devre ($V_{oc}, 0$) [73].	21
Şekil 2.9. R_p ve R_s 'nin iterasyonla hesaplanması için akış diyagramı [72, 73].	25
Şekil 2.10. Tipik bir PV dizisinin güneş ışınımı ve sıcaklığının değişimi sırasındaki özellikleri. (a) Değişken güneş ışınımı altında PV dizisinin (I-V) ve (P-V) özellikleri. (b) Değişken sıcaklık altında PV dizisinin (I-V) ve (P-V) özellikleri [127].	27
Şekil 2.11. Gölgeleşmiş veya hasar görmüş hücrenin $I-V$ karakteristiğine etkisi [128].	27
Şekil 2.12. Seri direncin $I-V$ karakteristiğine etkisi [128].	28
Şekil 2.13. Modül yaşlanması veya tozlanmanın $I-V$ karakteristiğine etkisi [128]. ..	28
Şekil 2.14. Tozlu ve temizlenmiş PV sistemin $P-V$ eğrileri [129].	29
Şekil 2.15. Tozlu ve temizlenmiş PV sistemin $I-V$ eğrileri [129].	29
Şekil 2.16. Homojen olmayan koşullarda elektriksel model sonuçları [130].	29
Şekil 2.17. Doyma akımı I_0 'ı hesaplayan model.	30
Şekil 2.18. PV etkinin oluşturduğu akım I_{pv} 'yi hesaplayan model.	30
Şekil 2.19. $I_m = I_{pv} - I_d$ 'yi hesaplayan model.	31
Şekil 2.20. PV dizisinin temel eşdeğer modeli (Eşdeğer dirençlerin devreye eklendiği model).	31
Şekil 2.21. PV dizisinin temel eşdeğer modeli (Eşdeğer dirençlerin bloklarla hesaplanarak sisteme dahil edildiği model).	31

Şekil 3.1. Bir çift termoelektrik jeneratör ayak veya eklem (a) Bir çift termoelektrik soğutucu ayak veya eklem (b) ($N=1$) [131].	37
Şekil 3.2. Termoelektrik jeneratör (TEG) modülü (a) ve termoelektrik soğutma (TEC) modülü (b) ($N>1$) [131].	37
Şekil 3.3. $+I$ ve $+V$ koşullarında R_L yükünü besleyen bir TEG modülün eşdeğer devresi [133].	51
Şekil 3.4. $+I$ ve $-V$ koşullarındaki bir TEC modülün eşdeğer devresi [133].	52
Şekil 3.5. $-I$ ve $-V$ koşullarında R_L yükünü besleyen bir TEG modülün eşdeğer devresi [133].	52
Şekil 3.6. $-I$ ve $+V$ koşullarındaki bir TEC modülün eşdeğer devresi [133].	53
Şekil 3.7. Kontrollü gerilim kaynağı ile TEM'in modeli [133].	54
Şekil 3.8. Önerilen TE cihaz modelinin iç yapısını özetleyen blok çizim [133].	56
Şekil 3.9. TEM malzeme özelliklerinin belirlenmesi için akış diyagramı [133].	57
Şekil 3.10. TEG/TEC çalışması ile performans ve maksimum parametrelerin hesaplanmasının akış diyagramı [133].	58
Şekil 3.11. TE sisteminin sabit malzeme özelliklerini hesaplayan blok [133].	60
Şekil 3.12. TE sisteminin sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini hesaplayan blok [133].	61
Şekil 3.13. TE sisteminin malzeme özelliklerini seçen blok [133].	62
Şekil 3.14. N_s, N_p adet TEM'den oluşan TE sisteminin eşdeğer devresi [133].	62
Şekil 3.15. Tek blok halinde birleştirilmiş TE sisteminin Simulink modeli [133].	62
Şekil 3.16. Hesaplanan tüm parametrelerin çıktılarının ölçüm portuna bağlandığı, TE sisteminin termodinamik hesaplamalarını yapan blok [133].	65
Şekil 3.17. HZ-20 HV TEG için güç ve verimin akıma göre değişim grafikleri [133].	66
Şekil 3.18. HZ-20 HV TEG için gerilim ve gücün akıma göre değişim grafikleri [133].	66
Şekil 3.19. 9500/071/060B TEC için farklı ΔT değerlerindeki COP-akım karakteristikleri [133].	67
Şekil 3.20. 9500/071/060B TEC modülün farklı ΔT değerlerinde soğutma gücü-akım karakteristikleri [133].	67
Şekil 3.21. TB-127-1.4-2.0 TEC modülün farklı akım değerlerinde soğutma gücü- ΔT karakteristikleri [133].	68
Şekil 3.22. Kullanılan HZ-20 HV TEG'in hem ısı hem de elektrik portları için zamanla değişen polarite [133].	69
Şekil 4.1. PV panelde ısı geçişi [181].	73
Şekil 4.2. PV-TEG hibrit sistemin çizimi [26].	75
Şekil 4.3. PV-TEC hibrit sistemin çizimi [26].	76
Şekil 4.4. PV hücre çıkış gücünün modellenmesi.	77
Şekil 4.5. Taşınım ile ısı geçişinin modellenmesi.	78
Şekil 4.6. Işınım ile ısı geçişinin modellenmesi.	78
Şekil 4.7. Enerji denge denklemini sağlayan PV hücre sıcaklığının bulunması.	79
Şekil 4.8. T_E sıcaklığının hesaplanması.	80
Şekil 5.1. PV panel veya TEG'in DC-DC dönüştürücü ile bağlantısı [186].	81
Şekil 5.2. Başlıca DC-DC dönüştürücü topolojileri ve giriş direnci (a) buck dönüştürücü; (b) boost dönüştürücü; (c) buck–boost dönüştürücü; (d) buck dönüştürücü için CCM'de D 'ye bağlı olarak giriş direnci değişimi (e) boost dönüştürücü için CCM'de D 'ye bağlı olarak giriş direnci değişimi (f) buck–boost dönüştürücü için CCM'de D 'ye bağlı olarak giriş direnci değişimi [186].	83

Şekil 5.3. PV sistemin MPPT ile çalıştırılması.....	84
Şekil 6.1. PV-TE hibrit sistem deney seti.	85
Şekil 6.2. Piranometre.....	86
Şekil 6.3. Lüksmetre sensörü kullanılarak tasarlanan Arduino mikrodnetleyici tabanlı piranometre ve temassız sıcaklık ölçer.	86
Şekil 6.4. Arduino UNO mikrodnetleyici, veri kaydedicisi eklentisi ve azaltan (buck) tip DC-DC dönüştürücü.	87
Şekil 6.5. PV sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-I eğrileri.....	88
Şekil 6.6. PV sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-P eğrileri.....	89
Şekil 6.7. TEG sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-I eğrileri.	90
Şekil 6.8. TEG sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-P eğrileri.....	90
Şekil 6.9. PV-TEG sistemde PV gücünün MPPT kontrol ile simülasyon değerleri..	91
Şekil 6.10. PV-TEG sistemde PV gücünün MPPT kontrol ile deney sonuçları.....	91
Şekil 6.11. PV-TEC sistemde PV hücre sıcaklığının TEC akımıyla değişimi simülasyonu.	92



TERMoelektrİK MODÜLÜN İKİ YÖNLÜ KULLANILDIĞI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ

ÖZET

Fotovoltaik (PV) dönüşüm sırasında, güneş ışınımının yalnızca belirli bir yüzdesi (teorik olarak maksimum %33) elektrik üretimine katkıda bulunurken, kalan enerji ısı olarak dağılır ve bu da PV hücrelerinin sıcaklığının artmasına neden olur. PV hücrelerin ısınmasına sebep olan ısıyı ortadan kaldırmaya veya kullanmaya yönelik pek çok araştırma yapılmıştır. PV sistemlerin veriminin artırılması kapsamında yapılan çalışmalardan bazıları ise PV sistemlerin termoelektrik (TE) sistemlerle birlikte kullanılmasıdır. TE sistemler ısı enerjisiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen ya da ters yönde yani elektrik enerjisi kullanarak soğutma makinası ve ısı pompası olarak iki yönlü çalışabilen sistemlerdir. PV-TE hibrit sistemlerle ilgili çalışmalarda, PV sistemlerde oluşan ısının, termoelektrik jeneratör (TEG) modüllerle elektrik enerjisine dönüştürülerek geri kazanılması ile toplam verimin artırılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, termoelektrik soğutucu (TEC) modüllerle PV hücrelerin soğutulması yoluyla verim artışı sağlamayı, ya da PV hücrelerin aşırı sıcaktan korunmasını amaçlayan çalışmalar da bulunmaktadır.

Bu tez, MATLAB/Simulink yazılımında devre simülasyonlarında kullanılmak üzere termoelektrik modüller (TEM'ler) için iki yönlü bir model sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, hem termoelektrik jeneratör (TEG) hem de termoelektrik soğutucu (TEC) modül parametrelerini ve bunların işlemlerini birleştirerek Simulink kütüphanesindeki diğer devre elemanları gibi tek bir blok geliştirmektir. TEG ve TEC, çoğunlukla ana malzemesi Bi_2Te_3 gibi benzer sıcaklık aralıkları için aynı olan termoelektrik cihazlar olduğundan, bir TEG, TEC olarak çalıştırılabilir ve bunun tersi bir TEC, TEG olarak çalıştırılabilir. PV-TE, yakıt hücresi-TE ve elektrikli araçların batarya sıcaklık yönetimi gibi bazı sistemlerde, modüller her iki modda da kullanılabilir. Ayrıca, bu sistemlerin bazılarında, bazen TEM'in jeneratör olarak, bazen de soğutucu olarak çalıştırılması gerekebilir. TEM'in iki yönlü çalışması, iki tip TEM'in birlikte kullanılması gerektiği için maliyet tasarrufu sağlayan bir yaklaşımdır. Literatürdeki simülasyon modelleri incelendiğinde mevcut modellerin TEM'lerin iki yönlü kullanımıyla tam olarak uyumlu olmadıkları görülmüş ve bu tezde iki yönlü çalışmaya uygun yeni bir model önerilmiştir. Bu model, çalışma moduna, yani TEG veya TEC'e karar vermek için TEM'in hem ısı hem de elektriksel portlarının polariteleriyle ilgilenmektedir. Hem TEG hem de TEC işlemleri için maksimum parametreler ve performans parametreleri, cihazın istenen çalışma koşulları için gözlemlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla modül bloğuna dahil edilmiştir. Sıcaklığa bağlı parametrelerle yapılan simülasyonların veri sayfasındaki grafiklere çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak Thomson ısısının göz ardı edilmediği simülasyonlar, veri sayfasına kıyasla daha fazla sapmaya sahiptir. Dahası, sabit malzeme özelliklerine sahip simülasyonlar, daha yüksek ΔT seviyelerinde Thomson ısısı içerenlerden daha iyi sonuçlar vermiştir. ΔT 10 °K iken, Thomson ısısı olmadan COP_{max} , veri sayfasındaki ile aynı olan 3,399 olarak bulunmuştur. Bu arada, Thomson

ısısıyla COP_{max} 3,7147 olarak, sabit özelliklerle COP_{max} ise 3,8057 olarak bulunmuştur. Ancak; ΔT 50 °K iken, Thomson ısısı olmadan COP_{max} 0,247'dir ki bu da veri sayfasındaki ile aynıdır, ancak Thomson ısısıyla COP_{max} 0,341'dir ve sabit malzeme özellikleriyle COP_{max} 0,268'dir. Ayrıca, ısı ve elektriksel portların değişken polariteleri altında, TEM'in iki yönlü çalışmasının başarıyla sağlandığı ve TEM'in aynı simülasyonda hem TEG hem de TEC olarak çalıştırıldığı gösterilmiştir.

Tezde önerilen TEM modelinin PV-TE hibrit sistemlerde iki yönlü kullanılabilmesine yönelik MATLAB/Simulink ortamında ısı geçişi modeli kurulmuştur. Simülasyonlarda aynı TEM modeli hem PV-TEG sistemde elektrik üretimi için kullanılmış, hem de PV-TEC sistemde PV hücrelerin soğutulmasında kullanılmıştır.

Ayrıca simülasyon modeli ile gerçek sistemin çalışmasının kıyaslanması amacıyla örnek bir PV-TE hibrit deney sistemi gerçekleştirilmiştir. 39x39 mm² boyutlarında özel kesim PV hücreleri arada ısı transfer malzemesi olmak üzere doğrudan 40x40 mm² boyutlarındaki TEM'lerin üzerine irtibatlandırılmıştır. TEM'lerin diğer yüzeylerine ısı alıcı takılmıştır. Sette kullanılan PV ve TE sistemlerin elektriksel karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek için Arduino UNO mikrodenetleyici tabanlı bir ölçüm ve veri kayıt sistemi oluşturulmuştur. Arduino ile kontrol edilen buck tipi DC-DC dönüştürücü tasarlanmış, PWM çalışma oranı değiştirilerek sistemin değişken yük altındaki gerilim, akım ve güç değerleri elde edilmiştir. Güneş ışınımı ölçümü için Arduino tabanlı ışınım ölçer tasarlanmış ve doğruluğu piranometre ile kalibre edilmiştir.

Simülasyonlarda TE modüllere bağlanmış olan ısı alıcıların soğutma kapasitelerinin PV hücrelerin ısınmasında önemli olduğu görülmüştür. Deney koşullarının simülasyonu yapıldığında h.A soğutma kapasitesi 0,8 W/K alındığında PV hücre yüzey sıcaklıkları 303 °K (30 °C) ve ΔT TEG modül yüzey sıcaklıkları farkı 1,79 °K iken, h.A 0,03 W/K alındığında PV hücre yüzey sıcaklıkları 321,9 °K (48,9 °C) ve ΔT TEG modül yüzey sıcaklıkları farkı 1,172 °K bulunmuştur. PV hücre sıcaklıkları 49 °C civarında ölçüldüğünden bu sonuca göre h.A 0,03 W/K değerinin simülasyonlarda kullanılmasının daha gerçekçi çıktılar vereceği düşünülmektedir.

Deney düzeneğinde kullanılan ısı alıcıların soğutma kapasitesi sınırlı olduğundan, simülasyonda TEC soğutma ile PV hücre sıcaklığının 48,34 °C'ye kadar düşürülebileceği ve akımın daha fazla artırılması ile daha fazla soğutma gücü harcanmasına rağmen mevcut ısı alıcı sistemle PV hücre sıcaklığının daha fazla düşürülemeyeceği bulunmuştur.

MPPT ile kontrol edilen sistemlerde, PV sistem gücü ortalama değerleri için simülasyon ve deney sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmış olup, simülasyon sonucu 1,375 W ve deney sonucu 1,382 W bulunmuştur. Aralarındaki fark %0,29'dur. TEG sistemde üretilen gücün ortalama değeri simülasyonda 1,517 mW, deneyde ise 1,590 mW olup, sonuçlar arasındaki fark %4,59'dir. Simülasyonda PV hücre sıcaklığı 49,14 °C bulunmuş, deneyde ise 49 °C olup, sonuçlar arasındaki fark %2,8'dir.

Deney düzeneğindeki şartlar düşünülerek, TEG'li ve TEG'siz sistemlerin kıyaslamasının yapıldığı simülasyonların sonuçlarına göre, TEG'li sistemde üretilen PV+TEG toplam güç, sadece PV hücreler bulunan sistemde üretilen güçten daha düşük olmuştur yani PV hücreler ile birlikte TEM ve ısı alıcı kullanıldığı sisteme kıyasla, aradan TEM'in çıkarılarak ısı alıcının doğrudan PV hücrelere bağlı olduğu sistemdeki verim daha yüksek çıkmıştır. Örneğin; PV-TEG sistemde PV hücre sıcaklığı 48,88 °C, PV sistem gücü 1,49 W ve TEG sistem gücü 1,536 mW iken, yalnız

PV hücreler (ısı alıcılı, TEG'siz) bulunan sistemde PV hücre sıcaklığı 48,17 °C ve PV sistem gücü 1,497 W olmuştur.

Simülasyon ve deney sonuçları genel olarak benzerlik göstermekte olup, aralarındaki farklar çeşitli etkenlerden kaynaklanmaktadır. Rüzgar etkisinin simülasyonlara dahil edilmesi amacıyla, rüzgar hızı 1 m/s olarak alınmıştır. Deneyler ise yarı açık bir balkon ortamında, güneşli ve bulutsuz bir havada gerçekleştirilmiş; rüzgar hızı ile ışıının deney süresince sabit kaldığı varsayılmıştır. Simülasyonlarda ısı geçişi modeli için sürekli rejim (kararlı hal) denklemleri kullanılmıştır. Deneyler ise değişken çevre koşullarında yapılmış ve sonuçlar, sürekli rejim sağlandıktan sonra alınmıştır. Ayrıca, deneylerde kullanılan PV hücreler ve TEM'ler, veri sayfalarındaki karakteristiklerinden farklı davranışlar sergilemiştir. Aynı tip hücre ve modüller dahi birbirinden farklı çalışma sonuçları göstermiştir. Bu nedenle, deneylerde ölçülen PV hücre sıcaklıkları farklılık göstermiş ve ortalama değerler alınarak değerlendirme yapılmıştır. Sıcaklık, ışıının, akım ve gerilim ölçüm sensörlerinden kaynaklı hatalar da deney ve simülasyon sonuçları arasındaki farklara katkıda bulunmuştur.

DC-DC dönüştürücü tarafında ise malzeme iç dirençleri gibi elektronik bileşenlere ait karakteristik değerler veri sayfalarından edinilerek simülasyon modeline dahil edilmiştir. Bununla birlikte, bu bileşenlerin çevre ve çalışma koşullarından etkilenmediği varsayılmıştır. Deneyde DC-DC dönüştürücünün PWM anahtarlama, 8 bit çözünürlüklü Arduino UNO mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmiştir. MPPT işlemi, P&O algoritmasıyla sağlanmış; çalışma oranı değişimleri, iterasyon basamaklarında %1,916'ya (5/255) karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır. Algoritmada yön değiştirme hatalarını önlemek amacıyla bu değer daha da düşürülmemiştir. Simülasyonda kullanılan MPPT algoritmasında da aynı %1,916'lık değişim uygulanmış, ancak bu durumda PV sistem gücündeki dalgalanmalar, deneyde gözlemlenenlere göre daha yüksek olmuştur.

Simülasyon sonuçlarına göre PV-TE sisteminde TEG'den daha fazla güç çıkışı elde edebilmek için ışıının seviyesinin ve TEM ısı alıcısının soğutma kapasitesinin yüksek olması gerekmektedir. Buna benzer şekilde, farklı şartlarda PV-TEG enerji üretim sisteminin veya PV-TEC enerji üretim-soğutma sisteminin nasıl çalışacağı üzerine farklı senaryoların simülasyonları yapılabilir. Sonuç olarak, bu tezde oluşturulan simülasyon modelinin, fiziki uygulama aşamasına geçilmeden önce sistem tasarımı ve sistemin boyutlandırılması gibi konularda yardımcı bir araç olacağı görülmektedir.



MODELING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH BIDIRECTIONAL USE OF THERMOELECTRIC MODULE

SUMMARY

During photovoltaic (PV) conversion, most of the solar energy captured by the PV cells is dissipated as heat, resulting in a large amount of energy waste. While PV cells contribute only a certain percentage of incoming solar radiation to electricity generation, the remaining energy is dissipated as heat, causing the temperature of the PV cells to increase. Many studies have been conducted to eliminate or use the residual heat that causes PV cells to heat up. Some of the studies conducted within the scope of increasing the efficiency of PV systems by eliminating residual heat are the use of PV systems together with thermoelectric (TE) systems. TE systems are systems that can convert heat energy into electrical energy or, in the opposite way, operate as a heat pump (cooler-heater) using electrical energy. Studies on PV-TE hybrid systems aim to convert the residual heat generated in PV systems into electrical energy with thermoelectric generator (TEG) modules and to increase the total efficiency. However, there are also studies aiming to increase efficiency by cooling PV modules with thermoelectric cooler (TEC) modules or to protect PV cells from excessive heat.

This thesis presents a bidirectional model for thermoelectric modules (TEMs) to be used in circuit simulations in MATLAB/Simulink software. The aim of this study is to develop a single block like other circuit elements in the Simulink library by combining both thermoelectric generator (TEG) and thermoelectric cooler (TEC) module parameters and their operations. Since TEG and TEC are mostly thermoelectric devices with the same main material such as Bi_2Te_3 for similar temperature ranges, a TEG can be operated as a TEC and vice versa. In some systems such as PV-TE, fuel cell-TE and battery temperature management of electric vehicles, the modules can be used in both modes. In addition, in some of these systems, sometimes the TEM may need to be operated as a generator and sometimes as a cooler. The bidirectional operation of TEM is a cost-saving approach since it is not necessary to use two types of TEM together. When the simulation models in the literature are examined, it is seen that the existing models are not fully compatible with the bidirectional use of TEMs and a new model suitable for bidirectional operation is proposed in this thesis. This model deals with the polarities of both thermal and electrical ports of TEM to decide the operating mode, i.e. TEG or TEC. Maximum parameters and performance parameters for both TEG and TEC operations are included in the module block in order to observe and control the device for the desired operating conditions. It is seen that the simulations made with temperature-dependent parameters give results very close to the graphs in the data sheet. However, the simulations where Thomson heat is not ignored have more deviations compared to the data sheet. Moreover, the simulations with constant material properties give better results than those with Thomson heat at higher ΔT levels. When ΔT is 10 °K, COP_{max} without Thomson heat is found to be 3.399, which is the same as in the data sheet. Meanwhile, COP_{max} with Thomson heat is found as 3.7147, and COP_{max} with fixed properties is found as 3.8057. However;

when ΔT is 50 °K, COP_{max} without Thomson heat is 0.247, which is the same as in the data sheet, but COP_{max} with Thomson heat is 0.341 and COP_{max} with fixed material properties is 0.268. Furthermore, it is shown that bidirectional operation of TEM is successfully achieved under the variable polarities of thermal and electrical ports, and TEM is operated as both TEG and TEC in the same simulation.

In the thesis, a heat transfer model was established in the MATLAB/Simulink environment for the TEM model proposed to be used in two ways in PV-TE hybrid systems. In the simulations, the same TEM model was used for electricity generation in the PV-TEG system and for cooling PV cells in the PV-TEC system.

In addition, a sample PV-TE hybrid experimental system was implemented in order to compare the operation of the simulation model and the real system. Specially cut PV cells with dimensions of 39x39 mm² were directly connected to TEMs with dimensions of 40x40 mm², with heat transfer material in between. Heat sinks (aluminum radiators) were attached to the other surfaces of the TEMs. An Arduino UNO microcontroller-based measurement and data recording system was created to experimentally obtain the electrical characteristics of the PV and TE systems used in the set. A buck type DC-DC converter controlled by Arduino was designed, and the voltage, current and power values of the system under variable load were obtained by changing the PWM duty cycle. An Arduino-based pyranometer was designed for solar irradiation measurement and its accuracy was calibrated with a pyranometer.

In order to record the measurement values and compare them with the simulations, an Arduino UNO compatible data logger add-on was used. With this add-on, which includes a real-time clock integration, real-time date, hour, minute and second information of the recorded data was obtained. The necessary programming was done to record the values measured with the sensors in the CSV file format. A solar radiation measurement set was designed instead of a laboratory type Pyranometer and data logger. With this set, the size was reduced and the measurements were made more practical. Another advantage of the set is that it was installed under the Arduino platform. In this way, the measured values can be recorded. Arduino nano, 128x32 OLED screen and TSL2561 luxmeter sensor were used in the measurement set. The diffuser model prepared with Thinkercad software was printed with a 3D printer. In order to regulate and filter the light distribution coming to the sensor, the sensor was placed inside the diffuser and PTFE tape was wrapped on the diffuser. Since the maximum detection threshold of the TSL2561 luxmeter sensor was exceeded at approximately 400 W/m² irradiance levels, it was not suitable to be used directly for pyranometer purposes. Therefore, in order to increase the maximum irradiance level that can be measured by reducing the light coming to the sensor, filtering was done with PTFE tape and approximately 25% irradiance was provided to the sensor. For the calibration of the new measurement system, measurements were made simultaneously with a laboratory type pyranometer at different day and light levels. The luxmeter sensor was calibrated by adjusting the measurement values to the reference laboratory pyranometer values with the necessary multiplier adjustments in the Arduino software.

In the simulations, it was observed that the cooling capacities of the heat sinks connected to the TE modules were important in heating the PV cells. When the experimental conditions were simulated, when the h.A cooling capacity was taken as 0.8 W/K, the PV cell surface temperatures were found to be 303 °K (30 °C) and the ΔT TEG module surface temperature difference was 1.79 °K, while when h.A was taken as 0.03, the PV cell surface temperatures were found to be 321.9 °K (48.9 °C)

and the ΔT TEG module surface temperature difference was 1.172 °K. Since the PV cell temperatures were measured around 49 °C, it is thought that using the h.A 0.03 W/K value in the simulations will yield more realistic outputs.

In the experiment, the ambient temperature is 27 °C and the solar radiation is 950 W/m²; these values were used in the simulation of the experimental conditions. Since the temperature difference between the TEG surfaces is very small at these levels of solar radiation, the power produced by the TEG is low. If the CPV-TEG system in which the light is concentrated is considered and the radiation is 2000 W/m² with the assumption of 2 times concentration, the PV cell temperature was found to be 349.3 °K (76.3 °C) and the ΔT TEG module surface temperature difference was found to be 2.62 °K. If the cooling capacity of the TEM heat exchanger is increased by 10 times in these conditions, the PV cell temperature was found to be 311 °K (38 °C) and the ΔT TEG module surface temperature difference was found to be 3.98 °K. If the CPV-TEC system simulation is performed, if the TECs are supplied with a voltage of 2% of their maximum voltage values, the PV cell temperature is found to be 348.5 °K (75.5 °C), that is, the PV cell temperature is reduced from 76.3 °C to 75.5 °C with TE cooling.

Since the cooling capacity of the heat sinks used in the experimental set is limited, it is found that the PV cell temperature can be reduced up to 48.34 °C with TEC cooling in the simulation, and the PV cell temperature cannot be further reduced with the existing heat sink system, although more cooling power is consumed by increasing the current further.

In the systems controlled by MPPT, the simulation and experimental results for the average PV system power values were very close to each other, with the simulation result being 1.375 W and the experimental result being 1.382 W. The difference between them is 0.29%. The average power output in the TEG system was 1.517 mW in the simulation and 1.590 mW in the experiment, with a difference of 4.59% between the results. The PV cell temperature was 49.14°C in the simulation and 49°C in the experiment, with a difference of 2.8% between the results.

According to the results of the simulations comparing the systems with and without TEG, the total PV+TEG power produced in the system with TEG is lower than the power produced in the system with only PV cells, i.e. the efficiency is higher in the system where the TEM is removed and the heat sink is directly connected to the PV cells compared to the system where TEM and heat sink are used together with PV cells. For example, in the PV-TEG system, the PV cell temperature was 48.88 °C, the PV system power was 1.49 W and the TEG system power was 1.536 mW, while the PV cell temperature was 48.17 °C and the PV system power was 1.497 W in the system with only PV cells (with heat sink, without TEG).

The simulation and experimental results are generally similar, with differences arising from various factors. To include the effect of wind in the simulations, wind speed was set at 1 m/s. The experiments were conducted in a semi-open balcony environment under sunny and cloudless conditions, assuming that wind speed and radiation remained constant throughout the experiment. Steady-state equations were used for the heat transfer model in the simulations. The experiments, however, were conducted under variable environmental conditions, and the results were obtained after steady-state conditions were established. Additionally, the PV cells and TEMs used in the experiments exhibited behavior different from their characteristics listed in the data sheets. Even cells and modules of the same type showed different operating results.

Therefore, the PV cell temperatures measured in the experiments varied, and evaluations were made using average values. Errors from temperature, radiation, current, and voltage measurement sensors also contributed to the differences between the experimental and simulation results.

On the DC-DC converter side, the characteristic values of the electronic components such as material internal resistances are obtained from data sheets and included in the simulation model. However, it is assumed that the material characteristics in the electronic circuit are not affected by environmental and operating conditions. In the experiment, the PWM switching of the DC-DC converter was performed with an Arduino UNO microcontroller with an 8-bit resolution operating ratio. The MPPT was controlled with the P&O algorithm and the iteration steps of the run rate changes were set to correspond to 1.916% (5/255). After processing the data received from the measurement system, the step value was not lowered in order not to cause incorrect direction changes in the algorithm. In the MPPT algorithm in the simulations, if 1.916% change in D is applied, the fluctuations in the PV system power were higher than the fluctuations in the experiment.

According to the simulation results, in order to obtain more power output from the TEG in the PV-TE system, the radiation level and the cooling capacity of the TEM's heatsink must be high. As a result, it is seen that the established simulation model will be a helpful tool in issues such as system design and system sizing before moving on to the physical application phase.

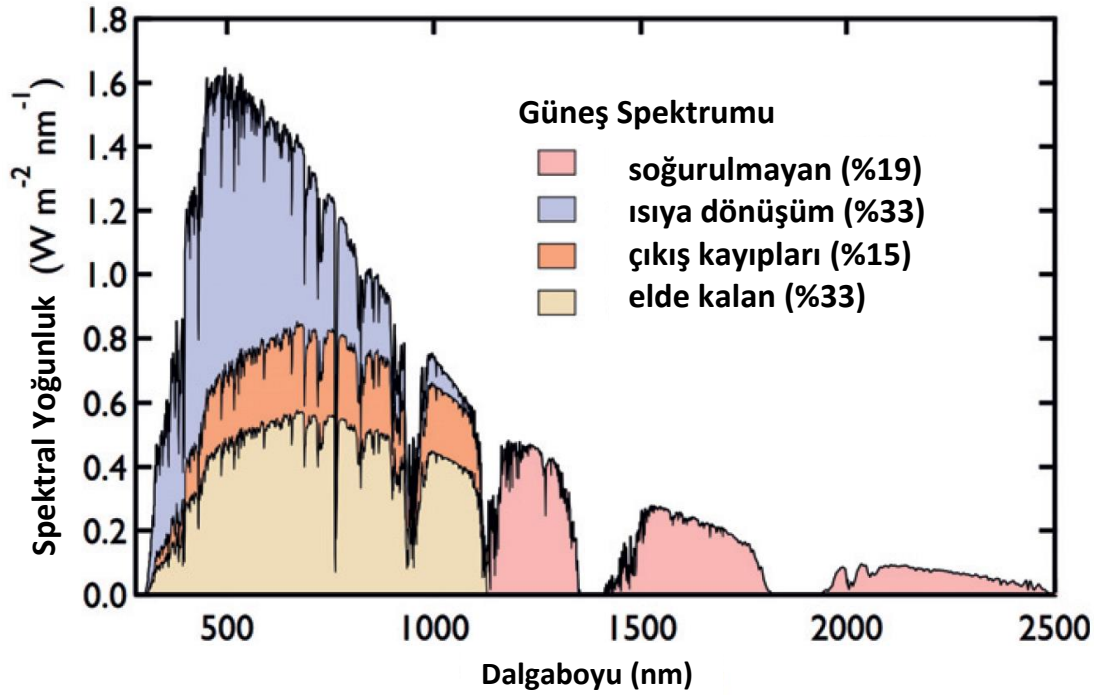
1. GİRİŞ

Günümüzde artan enerji ihtiyacı, çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi etkenlerle birlikte kısıtlı olan fosil yakıt kaynaklı enerji kullanımı yerine; yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim gittikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi bol miktarda bulunur ve en ucuz enerji kaynağı olarak kabul edilir [1]. Güneş, Dünya'ya ortalama 162.000 TW güneş radyasyonu sağlar [2]. Güneş enerjisini elektrik için kullanmanın iki yaygın yöntemi, güneş fotovoltaik (PV) ve güneş ısı sistemleridir. Güneş PV sistemlerde, hücrelerin p-n jonksiyonuna gelen fotonlar, elektrik enerjisi sağlayan bir potansiyel farkı oluşturur [3, 4]. Güneş ısı sistemleri ise önce optik yoğunlaştırıcılar kullanarak foton enerjisini ısıya dönüştürür ve ardından elektrik üretmek için mekanik ısı motorlarını kullanır [5].

PV hücreler, fotovoltaik etki yoluyla yarı iletkendeki elektron-delik çiftlerini uyarak güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürebilen optoelektronik cihazlardır. Ancak güneş pillerinin verimliliği sınırlıdır. Bunun temel nedeni, fotovoltaik hücrenin, yarı iletkenin bant aralığı tarafından belirlenen güneş spektrumundaki enerjinin yalnızca bir kısmını kullanabilmesidir. Enerjisi bant aralığı değerinden büyük olan fotonlar ısıya dönüşüm kaybı nedeniyle ısı olarak dağılabilirken, enerji düzeyi bant aralığı enerjisinden düşük olan fotonlar da iletim kaybıyla ısıya dönüşebilmektedir [6]. Başka bir deyişle ısıya dönüşüm etkisi ve güneş pillerinin bant aralığı enerjisinden daha düşük enerjiye sahip soğurulmayan fotonlar, güneş pillerinin dönüşüm performansını sınırlayan baskın kayıp süreçleridir. 1,31 eV'deki bant aralığı değerine bakıldığında ısıya dönüşüm kaybı %29,8'i oluştururken, tam güneş spektrumu enerjisinde bant aralığı altı enerji kaybı %25'e karşılık gelir [7]. Bu nedenle PV pillerin çalışmasında güneş spektrumunun enerjisinden tam olarak yararlanılamamaktadır [8].

Bir silikon güneş hücresi için minimum kayıpların spektral analizi (bant aralığı = 1,1 eV) Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Bunlar Shockley-Queisser sınırında hesaba katılan kayıplardır ve tek bağlantılı yarı iletkenlerden yapılan güneş hücreleri için bir üst sınırı temsil eder. Isıya dönüşüm bu analizdeki en büyük kaybı temsil eder ve güneş spektrumunun daha yüksek enerjili kısımları için artar [9]. Şekil 1.1.'de gösterildiği

gibi, ideal bir tek jonksiyonlu PV hücresi düşünöldüğünde, güneş radyasyonu enerjisinin yalnızca yaklaşık %33'ü güç üretimi için kullanılabilirken, yaklaşık %33'ü ısıya dönüşüm etkisiyle kaybolacaktır. Geriye kalan üçte biri, emilmeyen fotonlar (Enerjinin bu kısmı güneş hücresi tarafından emilmemesine rağmen, pratik uygulamalarda bir PV panelinin diğer kısımları tarafından emilmektedir.) ve kaçınılmaz termodinamik kayıplar gibi olaylarla kaybolacaktır [9, 10].



Şekil 1.1. Bir silikon güneş hücresi için minimum kayıpların spektral analizi (bant aralığı = 1,1 eV) [9].

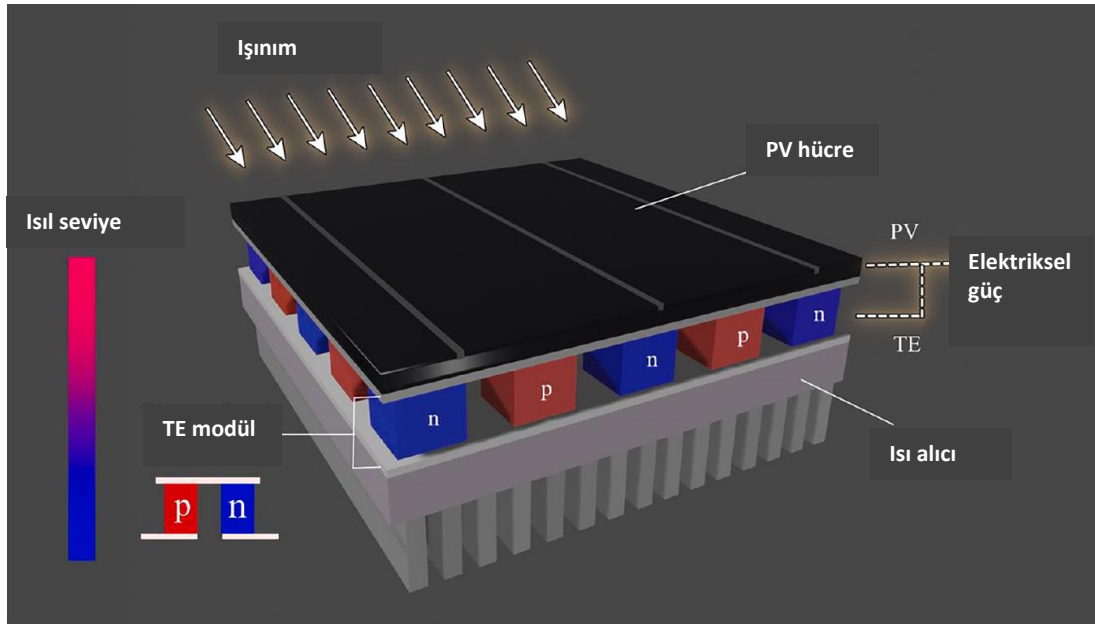
Foto-elektriksel dönüşüm sırasında, PV hücreleri tarafından yakalanan güneş enerjisinin çoğu ısı biçiminde dağılır ve bu da büyük miktarda enerji israfına neden olur [11]. PV hücreleri gelen güneş ışınımının %80'ine kadarını emebilse de, yalnızca belirli bir yüzdesi elektrik üretimine katkıda bulunurken, kalan enerji ısı olarak dağılır [12] ve bu da PV hücrelerinin sıcaklığının artmasına neden olur. Dahası, bu sıcaklık artışı PV hücrelerinin elektriksel performansını önemli ölçüde etkiler, örneğin, kristal silikon PV hücrelerinin sıcaklığında referans 25 °C'nin üzerindeki her 1 °C artış için, PV dönüşüm verimliliği %0,4-%0,65 düşmektedir [13]. Bununla birlikte, tek jonksiyonlu güneş hücrelerinin fotoelektrik dönüşüm verimliliğinin sınırı ideal laboratuvar koşullarında teorik olarak yaklaşık %33'e ulaşabilse de [14], ticari olarak temin edilebilen hücreler için gerçek dönüşüm verimliliği yalnızca %6 ile %25 arasında değişmektedir [15].

Dahası, yüksek sıcaklıklarda çalışma nedeniyle PV hücrelerinin arızalandığını ve ömürlerinin kısaldığını gösteren raporlar bulunmaktadır [16]. Bu nedenle, son on yıllarda araştırmacılar, PV hücresinin kendisini iyileştirmek ve ısı enerjisi PV hücrelerinden almak ve bir alt sistemde kullanmak için ısı sistemlerle hibritleştirmek de dahil olmak üzere farklı çözümler ortaya koymuşlardır [10].

PV hücrelerin ısınmasına sebep olan ısıyı ortadan kaldırmaya veya kullanmaya yönelik pek çok araştırma yapılmıştır. Bu amaçla PV sistemlerin veriminin artırılması kapsamında yapılan çalışmalardan bazıları ise PV sistemlerin termoelektrik (TE) sistemlerle birlikte kullanılmasıdır. TE sistemler ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürebilen ya da ters yönde yani elektrik enerjisi kullanarak soğutma makinası ve ısı pompası olarak iki yönlü çalışabilen sistemlerdir. PV-TE hibrit sistemlerle ilgili çalışmalarda, PV sistemlerde oluşan ısının termoelektrik jeneratör (TEG) modüllerle elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve toplam verimin artırılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, termoelektrik soğutucu (TEC) modüllerle PV modüllerin soğutulması verim artışı sağlamayı ya da PV hücrelerin aşırı sıcaktan korunmasını amaçlayan çalışmalar da bulunmaktadır.

1.1. Literatür Araştırması

TEG'ler Seebeck etkisi yoluyla ısı enerjisi doğrudan elektriğe dönüştürebilir ve güneş radyasyonunu ve atıl ısıyı kullanmanın verimli ve alternatif bir yolunu sağlayabilir [8, 17-19]. PV hücresi sadece belirli bir güneş radyasyon bölgesinden faydalanabilir [20]. TEG'in PV sistemine eklenmesi, güneş enerjisini tam spektrumda kullanmayı mümkün kılar [21-23]. Bu nedenle, güneş spektrumu enerjisinden tam olarak yararlanmak amacıyla, PV-TE (fotovoltaik termoelektrik) hibrit sistem olarak adlandırılan sistem önerilmiştir. Bu hibrit sistemde, PV hücreleri ile TEG'ler entegre bir cihaz olarak birleştirilir ve aynı anda fotovoltaik hücre ve atıl ısı elektrik üretmek için kullanılır. Bu sayede beklendiği gibi daha fazla elektrik enerjisi üretilmektedir. PV-TE hibrit sistem örneği Şekil 1.2'de gösterilmektedir [24].



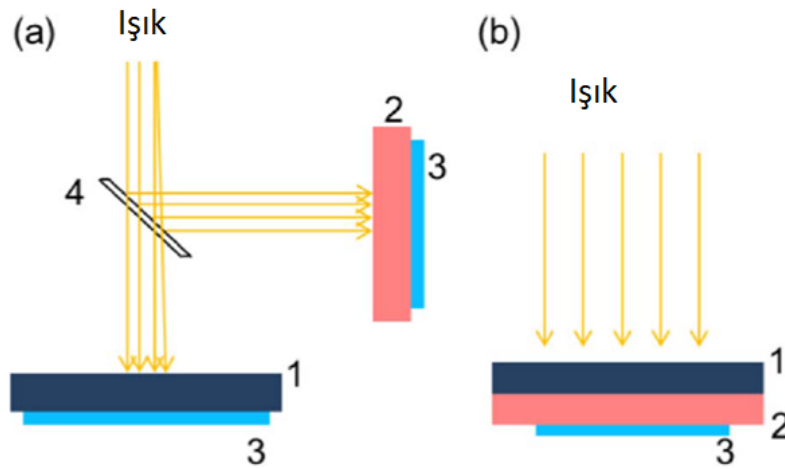
Şekil 1.2. PV-TE hibrit sistem [24].

He ve ark. [25], sıcaklık farkının elektrik akımına dönüşümü ile ilgili ilişkinin 1823'ün başlarında Thomas Seebeck tarafından gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Bir elektriksel güç jeneratörü veya soğutucu olabilen iki yönlü bir cihaz olarak termoelektrik modül (TEM) önerilmiştir. Bir tür katı hal cihazı olarak, elektronları çalışma akışkanı olarak kullanan TEM, katı hal işleminde, gürültüsüz çalışma, son derece güvenilir, bakımsız ve herhangi bir hareketli parça veya karmaşık parça içermemesi gibi cazip avantajlar gösterir [26]. TEM, Seebeck etkisi ve Peltier etkisine bağlı olarak termoelektrik jeneratör (TEG) modülü ve termoelektrik soğutma (TEC) modülü olarak ikiye ayrılmaktadır [27, 28]. TEM doğrudan PV hücresinin arka tarafına bağlanabilir. Son zamanlarda TEM'in arka tarafa eklenmesiyle güneş fotovoltaik-termoelektrik üretim hibrit sistemi (PV-TEG) ve güneş fotovoltaik-termoelektrik soğutma hibrit sistemi (PV-TEC) tartışılmaya başlanmıştır.

PV-TEG'de, PV hücresinin ve TEG'in çıkış gücü karşılaştırıldığında, güneş ışınımı arttıkça PV hücresinin çıkış gücü artar ancak artış hızı azalır [26]. Ancak [29]'da TEG'in çıkış gücünün artan bir hızla arttığı belirtilmektedir. Bu nedenle TEG'ler, PV-TEG'de PV hücresinin arka tarafındaki atık ısıdan yararlanmak için kullanışlıdır [26]. Dönüşüm süreci sırasında atıl ısı, TEG tarafından doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir [30-32]. Ayrıca TEG, ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek PV hücresinin soğutabilmektedir [26]. TEG'in PV paneliyle entegrasyonunun, PV hücresinin genel dönüşüm verimliliğini potansiyel olarak

artırabileceği [33] tarafından önerilmiştir. Ancak TEG'in düşük verimliliği nedeniyle [34], PV performansındaki sıcaklıkla bozulmanın, TEM'in güç çıkışındaki artıştan çok daha hızlı olduğunu göstermiştir ve malzeme olarak yalnızca a-Si (amorfsilisyum) hücreli, PV-TEG'de tek başına PV hücresinden daha fazla elektrik gücü üretebileceği sonucuna varmıştır. Güneş ışığı yoğunlaştırma oranının ve soğutma kapasitesinin etkileri Zhang, Xuan ve Yang [35] tarafından dikkate alınmıştır. Yoğunlaştırma oranının artmasıyla toplam verim önce artmakta, sonra azalmaktadır ancak PV-TEG'in verimi her zaman müstakil PV sistemine göre daha yüksektir. Taşınım ile ısı transferi katsayısının bir fonksiyonu olarak PV-TEG'in gücü, bu katsayısının artmasıyla artar. PV panelinin arka tarafına bir TEG eklenmesinin %8-23 oranında verimlilik artışı sağlayabileceği sonucu Van Sark tarafından gösterilmiştir [36]. Ancak bu sonuca varılırken hibrit sistemin arka tarafının ortam sıcaklığına kadar soğutulduğu varsayılmış ve sadece a-Si dikkate alınmıştır. Işık yoğunluğu, soğutma kapasitesi ve ortam sıcaklığının yanı sıra ortam rüzgâr hızı da hibrit sistemin performansı üzerinde önemli bir etki göstermektedir.

PV-TEG hibrit sisteminin iki yaygın türü vardır: (1) spektrum-ayırıştırıcı kullanmak ve (2) TEG'i doğrudan PV hücresinin tabanına yapıştırmak [37]. Bir spektrum ayırıştırıcılı hibrit sistemde, PV tarafından kullanılamayan güneş fotonları TEG'e yansıtılır ve geriye kalan fotonlar PV tarafından emilir [38, 39]. Spektrum-ayırıştırıcısız PV-TEG hibrit sisteminde ise TEG, PV'nin arka tarafına yerleştirilir [40]. Basit yapısından dolayı çoğu araştırmacı genellikle spektrum-ayırıştırıcısız sisteme yoğunlaşmıştır.



Şekil 1.3. PV-TEG hibrit sistem: (a) spektrum ayırıştırıcılı (b) spektrum ayırıştırıcısız
1: PV modülü; 2: TEG; 3: ısı alıcı 4: yansıtıcı [37].

PV modüllerin veya panellerin açık hava performansı, yüksek ışıınım koşullarında ulaşılan yüksek sıcaklıklar ile negatif sıcaklık katsayısı kombinasyonundan etkilenmektedir. Kurulum tipine bağlı olarak, panellerin sıcaklıkları 60-80 ° C'ye kadar çıkabilir, bu da verimliliğinde yaklaşık %20'lik bir düşüşe neden olur. Bu yüzden PV panellerin soğutulması performans artışı sağlamak için önemlidir [36].

PV modül sıcaklığı ve ortam sıcaklığı ile arasındaki sıcaklık farkı ile TE efekti kullanarak ilave güç üretmek için PV-TEG hibrit sistemi [41-45] kullanılabilir.

Yoğunlaştırılmış PV-TE (CPV-TE) hibrit sistemde yoğunlaştırma oranı fazla olduğu zaman çıkış gücünün Thomson etkisi sebebiyle azalması kanıtlanmıştır [46]. CPV-TE hibrit sistemini yoğunlaştırılmış PV (CPV) sistemi ile karşılaştırmak için daha ayrıntılı bir teorik model geliştirilmiştir [47]. Işıınım ve taşınım etkisini göz önüne alarak model tarafından hesaplanan sonuçlar da PV-TE hibrit sisteminin fizibilitesini doğrulamıştır [48]. Daha fazla detay göz önüne alınarak yapılan diğer çalışmayla daha fazla doğrulama sağlanmıştır [49]. Attivissimo ve ark. ortam sıcaklığının PV-TE hibrit sisteminin çok önemli bir faktörü olduğuna dikkat çekmiştir [50]. Kwan ve Wu tarafından hesaplanan sonuçlar, PV-TE hibrit sisteminin, uzayda kullanılan güç kaynakları için de iyi bir seçim olduğunu göstermiştir [51].

PV-TE hibrit sisteminin fizibilitesi kanıtlanmış olduğundan, bazı bilim insanları bu sistemin yapısal tasarımını iyileştirmeye çalışmıştır. [52]'de yansıtılan güneş enerjisini, TE tarafından kullanılabilen ısınmaya dönüştürmek için bir ısı toplayıcı kullanılmıştır. PV tabanına yerleştirilen düzlemsel balık ağı yapısı, güneş enerjisinin emilimini arttırmak için iyi bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır [53]. CuInGaSe₂ (CIGS) PV hücreler üzerinde kullanılan ZnO nanotelleri PV-TE hibrit sisteminin çıkış gücünü artırabildiğini göstermiştir [54]. Da ve ark. tarafından tasarlanan yeni nanoyapılı yüzeyle, tam spektrumlu güneş enerjisi emilimi artırılarak çıkış gücü yükseltilmiştir [55]. Vakumda çalışan PV-TE hibrit sistemi, doğal taşınımın ortadan kaldırılmasından dolayı normal atmosferde çalışana göre daha fazla güç üretebilir [56]. PEDOT: PSS filmi, organik güneş pilinde üretilen ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek için TEG olarak imal edilmiştir [57]. Kossyvakis ve ark. verimliliği arttırmak için TE geometrisinin optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir [58]. Yüksek ısıl iletkenliği nedeniyle PV-TE hibrit sisteminde ısı borusu kullanılmıştır [59]. Zhu ve ark. PV ve TE arasına bir bakır levha ile yapılan ısıl yoğunlaştırıcı ekleyerek TEG'de büyük bir sıcaklık farkına neden olmuştur [60].

[20]'de 1 adet PV hücre ve 4 adet TEG ile oluşturulan yeni hibrit sistem önerilmiş. Eski geleneksel sistem ile yeni PV-TEG hibrit sistem arasındaki farklılık su soğutma ayarlaması yapılarak kontrol edilen TEG modül sayısıdır. Deney sonuçlarına göre PV-TE hibrit yeni sistemdeki sıcaklık dalgalanması geleneksel hibrit sistemden daha düşüktür. Ayrıca, deney sonuçları PV sisteme TEG eklenmesinin çıkış gücünü artırdığını açıkça göstermiştir.

[36]'da 2 farklı şehir için ortalama güneş ışınımı ve sıcaklık verileri kullanılarak farklı tip modül yerleşimleri için PV-TEG hibrit sistem veriminin analizi yapılmıştır. Sistem maliyetlerine de değinilmiştir.

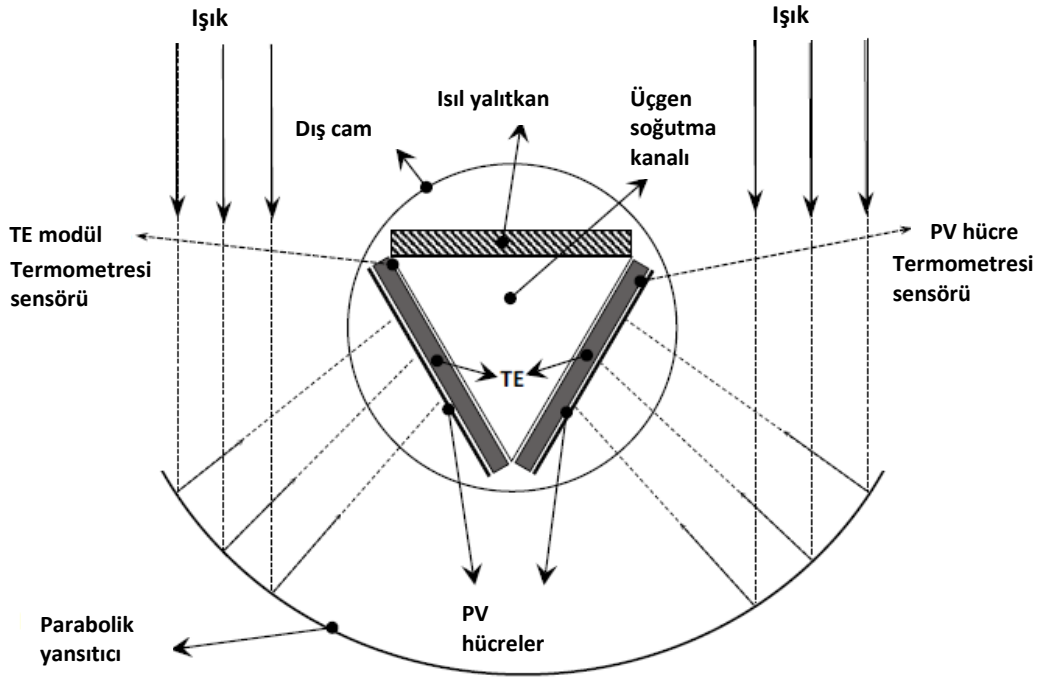
Genel olarak, PV-TEG hibrit panellerin modellenmesi çoğunlukla basitleştirilmiş ve gerçek ortam koşullarından ve panelden kaynaklanan ısı kayıplardan ayrılmıştır. [33]'te PV-TEG hibrit sistemin farklı hava koşullarındaki performansını kesin olarak tahmin etmek için ısı olarak bağlanmış bir PV-TEG paneli modeli kurulmuştur. Modelde; güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve ortam sıcaklığının yanı sıra panelin ön ve arka yüzeylerinden taşınım ve iletim yoluyla ısı transferi de hesaba katılmıştır. Model, Avrupa'da farklı hava koşullarına sahip üç örnek şehir için geliştirilmiştir. Sonuçlar, ön yüzeyden yayılan ısı kaybının ve rüzgâr hızına bağlı taşınım ile ısı transferinin, hibrit panel performansı üzerinde en kritik parametreler olduğunu göstermektedir.

[46]'da ise Thomson etkisinin sistem performansı üzerine etkileri de göz önünde bulundurularak CPV-TE hibrit sistem modellemeleri ve analizler yapılmıştır. Birleşik sistemin genel performansını incelemek için, iki alt sistem tek tek analiz edilmiştir [46]. TEG sisteminin verimliliği, TEG modülüne sağlanan daha yüksek ısıdan dolayı yoğunlaştırma oranının artması ile artmaktadır [46].

[61]'deki çalışmada yoğunlaştırılmış fotovoltaik-ısı (CPVT) ve yoğunlaştırılmış fotovoltaik-ısı-termoelektrik (CPVT-TE) hibrit güneş sistemleri incelenmiştir. Hibrit CPVT ve termoelektrik jeneratör ünitesi prototipleri tasarlanmış, üretilmiş ve deneysel testler gerçekleştirilmiştir. CPVT ve CPVT-TE güneş sistemlerinin elektriksel ve ısı performanslarını analiz etmek için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Sonuçlar, CPVT-TE'nin elektrik gücü çıkışının CPVT'den daha yüksek olduğunu ve TEG entegrasyonu yoluyla elektrik verimliliğinde iyileştirmeler sağlanabileceğini göstermiştir. Güneşli bir günde, 935 W/m^2 'ye ulaşan güneş radyasyonu seviyesi ve 33

°C civarındaki ortam sıcaklığı ile karakterize edilen bir günde, CPVT-TE sisteminin günlük elektrik verimliliği, CPVT sistemine kıyasla %7,46 oranında iyileştirilmiştir.

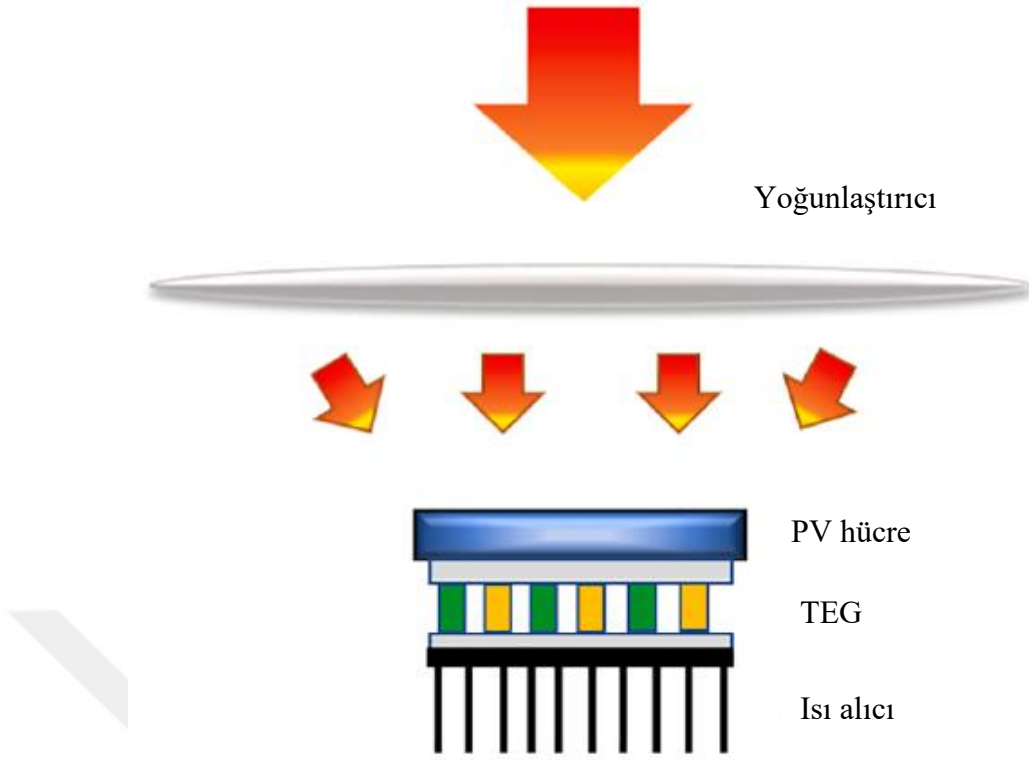
[62]'de Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, alıcının dış yüzeyi monokristal silikon PV hücreleri ve bunların altında termoelektrik modüllerle kaplı üçgen bir soğutma kanalı içeren yeni bir yapı önerilmiştir.



Şekil 1.4. CPV-TE hibrit toplayıcı sistem kesit şeması [62].

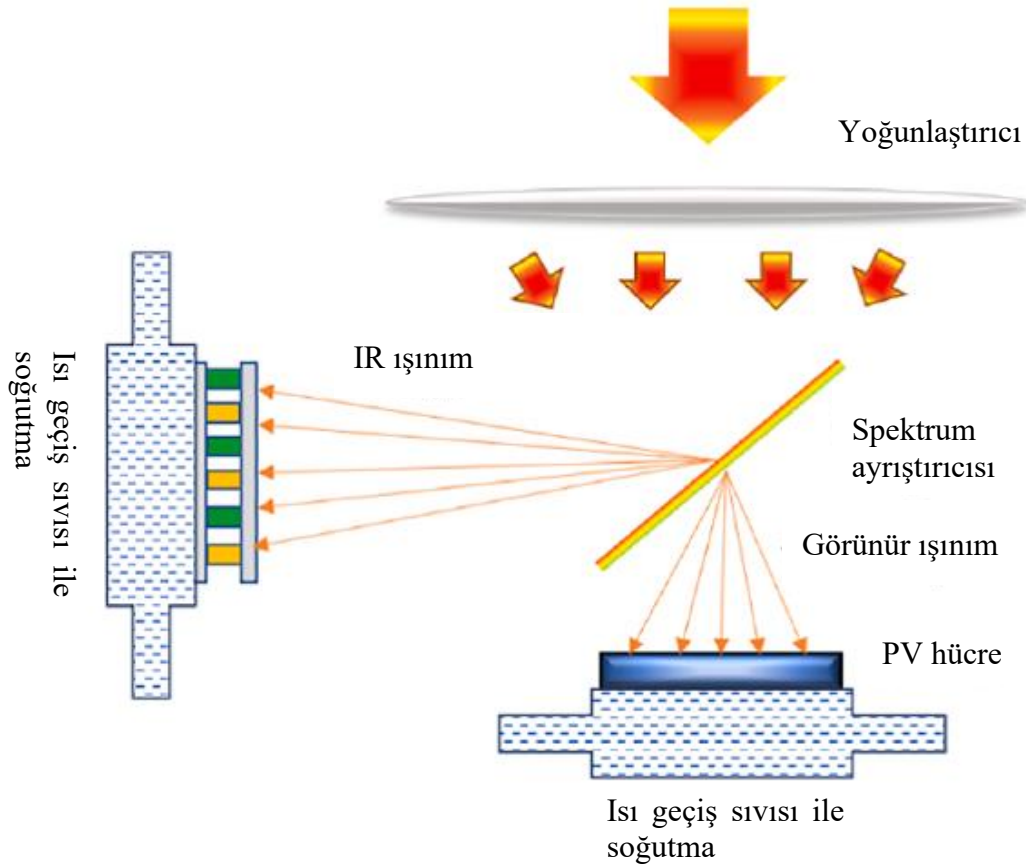
[63]'de ise PV panellerin soğutulması için kullanılan TEC soğutucu modüllerin enerjisi ayrı bir PV panel tarafından karşılanmaktadır. PV panellerin farklı sıcaklıklardaki karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir.

Işık yoğunlaştırıcısı kullanılan farklı tasarım yapısına sahip CPV-TE sistemler ile ilgili çalışmalar [64]'te özetlenmiştir. Şekil 1.5'deki sistemde ışık yoğunlaştırıcısı olarak fresnel lens veya parabolik yansıtıcı kullanılmıştır. Isının dağıtılması için PV hücre, TEG sıcak yüzeyine ve TEG soğuk yüzeyi ise ısı alıcısına irtibatlıdır. Yalnız PV ve PV-TEG sistemine kıyasla CPV-TE sistemde elektriksel çıkış miktarı artırılmıştır.



Şekil 1.5. Isı alıcılı CPV-TEG sistemi [64].

Şekil 1.6'daki sistemde ışık yoğunlaştırıcısı olarak fresnel lens veya parabolik yansıtıcı kullanılmıştır. Işın dalga boyu ayrıştırıcısı ile kısa ve uzun dalga boylu ışınlar ayrıştırılmıştır. Böylece kızıl ötesi ışınım TEG'e, görünür dalga boyundaki ışınım PV hücreye yönlendirilmiştir. Isı dağıtımı için ısı alıcı veya ısı geçiş malzemesi (su, erimiş tuz veya nano-sıvı) kullanılmıştır.



Şekil 1.6. Spektrum ayırıcılı CPV-TEG sistemi [64].

TEG'in atıl ısıyı faydalı elektrik enerjisine dönüştürebilmesinin aksine, PV hücrelerini doğrudan soğutabilen Peltier etkisine dayalı TEC, Bell [65] tarafından sunulmuştur [26]. TEC, PV hücresinin arka tarafına takılarak PV hücresinin ürettiği elektriği doğrudan PV hücresinin soğutmak için kullanabilir, bu da PV-TEC'deki PV hücresinin çalışma sıcaklığını tek başına PV'dekinden daha düşük hale getirir. Ancak bu süreçte TEC tarafından tüketilen elektrik enerjisi miktarı önemli bir rol oynamakta ve elektrik verimliliğini büyük ölçüde etkilemektedir [66, 67]. Bir yandan, TEC kayda değer miktarda soğutma sağladığında, PV hücresinin ürettiği güçten daha fazla miktarda güç tüketecektir. Öte yandan, TEC'in kullanılması, makul miktarda elektrik tüketerek PV hücre sıcaklığını başarılı bir şekilde düşük bir seviyede tutabilir [26].

Liao ve ark. [68], termoelektrik soğutma sistemiyle birleştirilmiş PV paneller üzerinde geliştirdikleri çalışmada termoelektrik soğutucu sayısının ve yapı parametrelerinin optimize edilmesiyle sistemin enerji verimliliğinin yaklaşık %13,9 olduğu sonucuna varmışlardır.

TEC soğuk tarafının kullanılmasının güneş panelinin elektrik gücü üretimi üzerindeki etkisi Najafi ve Woodbury [69] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. TEC modülü için sağlanan elektrik akımının optimum değerini bulmak için genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon kullanılmıştır. Termoelektrik soğutmanın kullanılmasının, makul bir elektrik gücü değeri kullanılarak PV hücre sıcaklığının düşük bir seviyede tutulmasını başarıyla sağlayabileceği sonucu elde edilmiştir.

[70]'de PV-TEC sistemde PV hücrelerinin ısınması deneysel olarak incelenmiş ve sıcaklık değerleri diğer PV hücre sıcaklık hesaplama modelleri kullanılarak bulunan değerler ile kıyaslanmıştır.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada MATLAB/Simulink ortamında PV-TE hibrit sistemlerin benzetiminde iki yönlü kullanım kabiliyeti olan ve yüzey sıcaklıklarının da tespit edilebildiği bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır. PV-TE hibrit sistemlerle ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, mevcut çalışmaların çoğunluğunda hibrit sistemdeki TE modülün sadece tek amaçla jeneratör veya soğutucu olarak kullanıldığı yani TE modülün iki yönlü çalışabilmesi özelliğinin değerlendirilmediği görülmüştür. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu tezde aynı TE modülün iki yönlü olarak gerektiği zaman TEG ya da TEC görevinde çalıştırılabilmesini sağlayan benzetim modeli MATLAB/Simulink'te oluşturulmuştur. Ayrıca, iki yönlü çalışmaya uygun olarak PV-TE arasındaki ısı geçişi de modellenmiş ve PV-TE sistemin sıcaklığa bağlı dinamik çalışmasının benzetimi yapılmıştır. Oluşturulan model ile PV-TE hibrit sistemlerin simülasyon ve tasarım süreçlerinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır.

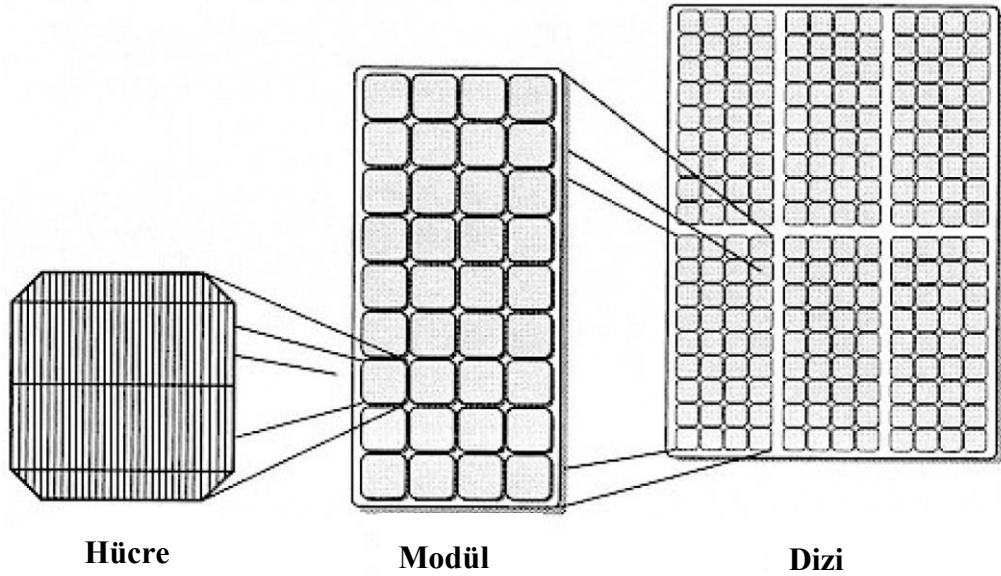
Tezin 2. bölümünde, PV sistemlerin MATLAB/Simulink modelinin oluşturulması anlatılmıştır. 3. Bölümde bu çalışmanın ana düşüncesi olan TE sistemlerin MATLAB/Simulink ortamında iki yönlü modellenmesi konusu detaylı olarak anlatılmış ve diğer çalışmalardaki modellere göre üstünlüğü özetlenmiştir. 4. bölümde PV-TE sistemlerde yüzey sıcaklıklarının hesaplanmasının MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi ile simülasyon içerisinde kullanılması anlatılmıştır. 5. bölümde PV-TE sistemlerde DC-DC dönüştürücülerin kullanılması ve modellenmesi anlatılmıştır. 6. bölümde, örnek bir PV-TE deney seti ile yapılan testlerin sonuçları ve bu sistemin MATLAB/Simulink modelinin simülasyonları ile kıyaslaması yapılmıştır. 7. bölümde çalışma sonuçları özetlenmiştir.



2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Bir PV sisteminin temel birimi PV hücresidir. Hücreler, paneller veya diziler oluşturacak şekilde gruplandırılabilir. Bir PV cihazının terminallerinde mevcut olan gerilim ve akım, aydınlatma sistemleri ve DC motorlar gibi küçük yükleri doğrudan besleyebilir. Daha karmaşık uygulamalar, PV cihazından gelen elektriği işlemek için elektronik dönüştürücülere ihtiyaç duyar. Bu dönüştürücüler yükteki voltajı ve akımı düzenlemek, üretilen enerjiyi pillerde depolamak, şebekeye bağlı sistemlerde güç akışını kontrol etmek ve esas olarak cihazın maksimum güç noktasını (MPP) izlemek için kullanılabilir.

PV sistemleri için elektronik dönüştürücüleri incelemek için öncelikle dönüştürücüye bağlı PV cihazının nasıl modelleneceğinin bilinmesi gerekir. PV cihazları, pratik cihazların deneysel verilerinden ayarlanması gereken çeşitli parametrelerle birlikte doğrusal olmayan bir $I-V$ karakteristiği sunar. PV cihazının matematiksel modeli, dönüştürücülerin dinamik analizinin incelenmesinde, MPP izleme (MPPT) algoritmalarının incelenmesinde ve esas olarak devre simülatörleri kullanılarak PV sistemi ve bileşenlerinin simüle edilmesinde faydalı olabilir.

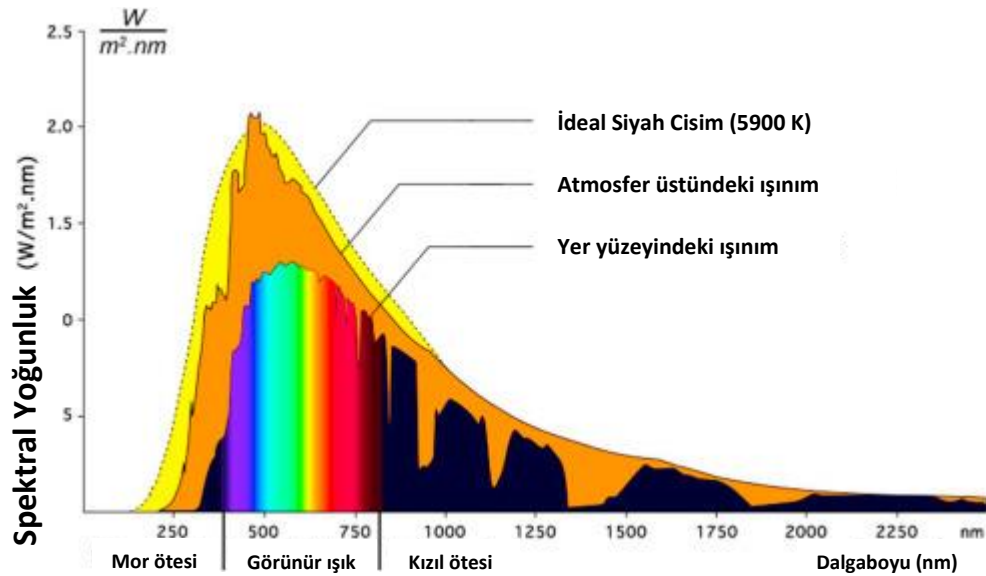


Şekil 2.1. PV hücre, PV modül, PV dizi [71].

PV paneller genellikle büyük çıkış gerilimleri elde edebilmek için seri hücrelerden oluşur. Büyük çıkış akımlarına sahip paneller, hücrelerin yüzey alanının artırılması veya hücrelerin paralel bağlanmasıyla elde edilir. Bir PV dizisi, büyük PV sistemleri oluşturmak üzere seri veya paralel bağlanmış bir panel veya bir dizi panel olabilir. Çoklu PV hücre ve modüllerinden oluşan PV dizisi örnek çizimi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir [71]. Temel PV hücrelerinin veya birden fazla panelden oluşan dizilerin modellenmesi aynı prosedürle yapılabilir. Bu çalışmadaki PV modeli [72] ve [73]'teki metodoloji kullanılarak oluşturulmuştur.

2.1. Güneş Işınımı

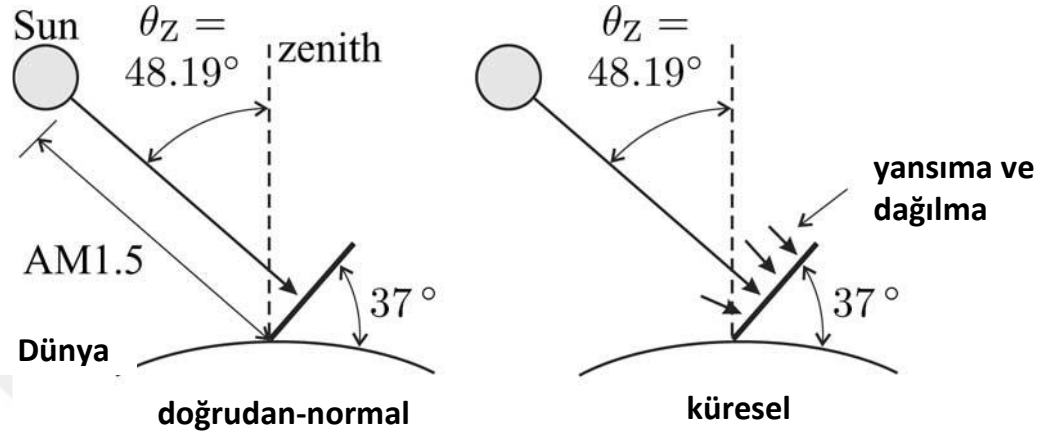
Bir PV cihazının verimliliği güneş ışınımının spektral dağılımına bağlıdır. Güneş, radyasyon spektrumu 6000 °K'ye yakın siyah bir cismin spektrumuyla karşılaştırılabilecek bir ışık kaynağıdır. Siyah bir cisim, tüm dalga boylarında elektromanyetik radyasyonu emer ve yayar. Siyah cisim ışınımının dalga boylarının teorik dağılımı, siyah cismin dalga boyu (veya frekansı), sıcaklığı ve spektral dağılımı arasındaki ilişkileri ve karşılıklı bağımlılıkları belirleyen Planck yasasıyla matematiksel olarak tanımlanır [74-76]. Şekil 2.2, siyah cisim ışınımının dünya dışı ve karasal güneş ışınimlarıyla karşılaştırıldığında spektral dağılımını göstermektedir [77].



Şekil 2.2. Dünya dışı uzayda (AM0) ve Dünya yüzeyinde (AM1.5) siyah cisim ışınımının ve Güneş ışınımının spektral dağılımı [77].

Dünya yüzeyindeki güneş ışığının spektrumunun, Güneş diski üzerindeki sıcaklığın değişimi ve atmosferin etkisi gibi faktörlerden etkilenmesi, güneş ışınımının PV

cihazlar üzerindeki etkisinin incelenmesini zorlaştırır [78]. Dünya dışı uzayda, Güneş ile Dünya arasındaki ortalama mesafede ışınlanan güneş enerjisi yaklaşık 1,353 kW/m²'dir. Dünya yüzeyinde ışınlım yaklaşık 1 kW/m²'dir (Dünya yüzeyindeki net ışınlım birçok faktöre bağlı olduğundan bu yalnızca referans değeridir).



Şekil 2.3. AM1.5 yolunun ve Güneş'e bakan bir yüzey üzerinde 37° eğimde doğrudan-normal ve küresel gelen ışınlımların gösterimi [73].

PV cihazları genellikle standart bir spektral dağılıma göre değerlendirilir. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) iki standart karasal spektral dağılım tanımlar [79], [80]: doğrudan-normal ve küresel AM1.5. Doğrudan-normal standart, Güneş'ten doğrudan Güneş'e bakan bir yüzeye dik olarak ulaşan gelen radyasyona karşılık gelir. Küresel veya toplam standart, doğrudan ve dağınık radyasyonların spektrumuna karşılık gelir. Yaygın radyasyon, atmosferik buhardan ve Dünya yüzeyindeki yansımadan etkilenen radyasyondur. AM1.5 standartları, yüzeyi 37° eğimli ve Güneş ışınlımlarına bakan bir PV cihazı için tanımlanmıştır.

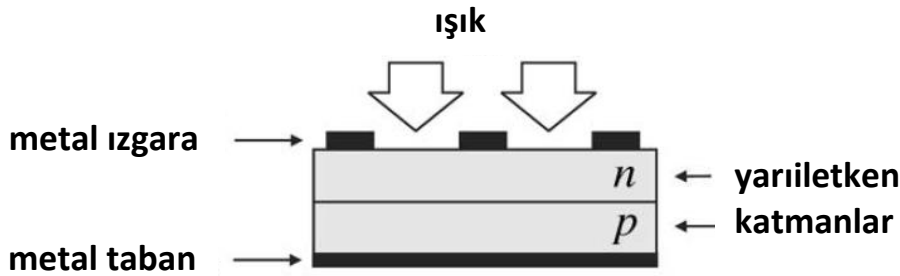
AM baş harfleri hava kütlesi anlamına gelir; bu, bir yüzey ile Güneş arasındaki, güneş ışığının spektral dağılımını ve yoğunluğunu etkileyen *hava kütlesi* anlamına gelir [81]. AMx numarası güneş ışınlımının atmosferdeki yolunun uzunluğunu gösterir. Yollar uzadıkça daha fazla ışık sapması ve emilimi meydana gelir. Bu olaylar PV cihazı tarafından alınan ışığın spektral dağılımını değiştirir. Güneş ışınlımlarının yolunun uzunluğu (atmosfer sayısı olarak verilmiştir), AMx'in x katsayısı ile şu şekilde tanımlanır:

$$x = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.1)$$

burada θ_z , Şekil 2.3, gösterildiği gibi Güneş'in zirve noktasına göre yaptığı açıdır. Daha büyük bir x , Güneş ile karasal PV cihazının yüzeyi arasındaki daha uzun bir yola ve daha büyük bir hava kütesine karşılık gelir. Standart AM1.5 dağılımları, $\theta_z = 48,19^\circ$ güneş açısına sahip güneş ışınımının spektrumuna karşılık gelir. Şekil 2.3, AM1.5 yolunun tanımlarını ve doğrudan normal ve küresel radyasyonları göstermektedir.

Güneş ışınımının yoğunluğu ve spektral dağılımı coğrafi konuma, zamana, yılın gününe, iklim koşullarına, atmosferin bileşimine, rakıma ve diğer birçok faktöre bağlıdır. Güneş ışınımını etkileyen faktörler nedeniyle AM1.5 spektral dağılımları, PV cihazlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için referans görevi gören yalnızca ortalama tahminlerdir. AM1.5 dağılımları PV endüstrisinde standart olarak kullanılmaktadır. Veri sayfaları genellikle PV cihazlarının özellikleri ve performansı hakkında, standart test koşulu (STC) adı verilen, 25°C 'de AM1.5 spektrumuyla 1000 W/m^2 ışınım anlamına gelen duruma göre bilgi sağlar [82].

2.2. PV Hücre Yapısı



Şekil 2.4. Bir PV hücrenin fiziksel yapısı [73].

Bir PV hücre temel olarak p - n jonksiyonu ışığa maruz kalan yarı iletken bir diyottur [83, 84]. PV hücreler, farklı üretim süreçleri kullanılarak çeşitli türde yarı iletkenlerden yapılır. Monokristal ve polikristal silikon hücreler şu anda ticari ölçekte bulunan tek hücrelerdir. Silikon PV hücreleri, elektrik terminallerine bağlanan ince bir toplu Si tabakasından veya ince bir Si filminden oluşur. Si katmanının kenarlarından biri p - n bağlantısını oluşturmak için katkıdır. Yarı iletkenin güneşe bakan yüzeyine ince bir metalik ızgara yerleştirilir. Şekil 2.4 bir PV hücresinin fiziksel yapısını kabaca göstermektedir.

Hücre üzerine düşen ışık, hücrenin kısa devre edilmesi durumunda elektrik akımı oluşturan yük taşıyıcıları üretir [84]. Gelen fotonun enerjisi yarı iletkenin kovalent

elektronlarını ayırmaya yeterli olduğunda yükler üretilir; bu olay yarı iletken malzemeye ve gelen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Temel olarak PV olgusu, güneş ışınımının emilmesi, $p-n$ eklemünde serbest taşıyıcıların üretilmesi ve taşınması ve bu elektrik yüklerinin PV cihazının terminallerinde toplanması olarak tanımlanabilir [85, 86].

Elektrik taşıyıcılarının üretim hızı, gelen ışığın akışına ve yarı iletkenin yutma kapasitesine bağlıdır. Yutma kapasitesi temel olarak yarı iletken bant aralığına, hücre yüzeyinin yansımaya (yüzeyin şekline ve işlenmesine bağlıdır), yarı iletkenin taşıyıcılarının içsel konsantrasyonuna, elektronik hareketliliğe, rekombinasyon hızına, sıcaklığa ve diğer bazı faktörlere bağlıdır [73].

Güneş radyasyonu farklı enerjilerdeki fotonlardan oluşur. PV hücresinin bant aralığından daha düşük enerjiye sahip fotonlar işe yaramaz ve herhangi bir voltaj veya elektrik akımı üretmezler. Bant aralığının üzerinde enerjiye sahip fotonlar elektrik üretir, ancak yalnızca bant aralığına karşılık gelen enerji kullanılır; enerjinin geri kalanı PV hücresinin gövdesinde ısı olarak dağıtılır. Daha düşük bant aralığına sahip yarı iletkenler avantaj sağlayabilir veya daha geniş bir radyasyon spektrumundan yararlanabilir, ancak üretilen gerilimler daha düşüktür [74]. Si, PV hücreleri için tek ve muhtemelen en iyi yarı iletken malzeme değildir, ancak üretim süreci büyük ölçekte ekonomik olarak mümkün olan tek malzemedir. Diğer malzemelerle, daha yüksek ve ticari açıdan mümkün olmayan maliyetlerle daha iyi dönüşüm verimliliği elde edilebilir [73].

PV hücrelerinin fiziğinin incelenmesi oldukça karmaşıktır ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır. PV sistemleri için elektronik dönüştürücülerin incelenmesi amacıyla, PV cihazının (hücre, panel ve dizi) elektriksel özelliklerini bilmek yeterlidir. PV cihaz üreticileri her zaman cihazın $I-V$ eğrisinin matematiksel denklemini elde etmek için kullanılabilecek bir dizi deneysel veri sağlar. Bazı üreticiler farklı çalışma koşulları için deneysel olarak elde edilen $I-V$ eğrilerini de sağlar. Matematiksel model bu deneysel eğrilerle ayarlanabilir ve doğrulanabilir.

2.3. PV Sistemlerin Modellenmesi

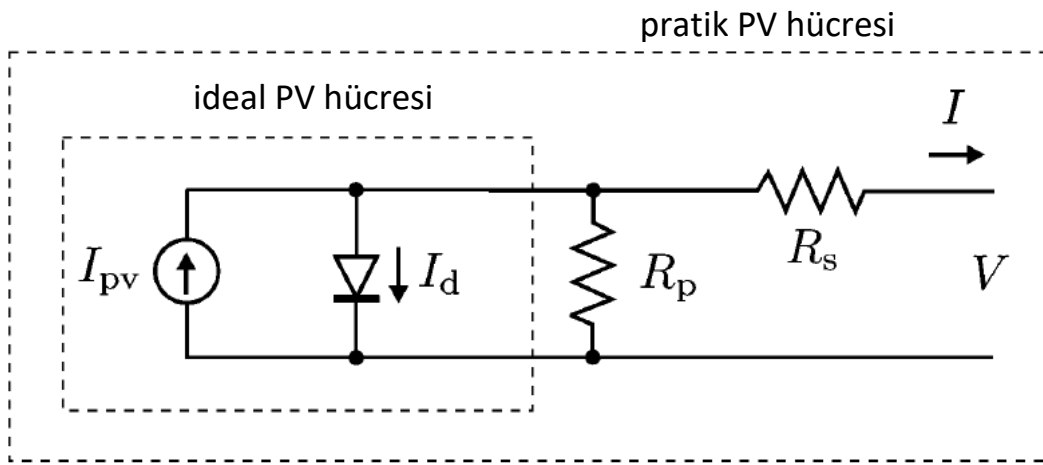
2.3.1. İdeal PV hücresi

Şekil 2.5 PV hücresinin eşdeğer devresini göstermektedir. İdeal PV hücresinin $I-V$ karakteristiğini matematiksel olarak tanımlayan yarı iletkenler teorisinden alınan temel denklemler şu şekildedir [87]:

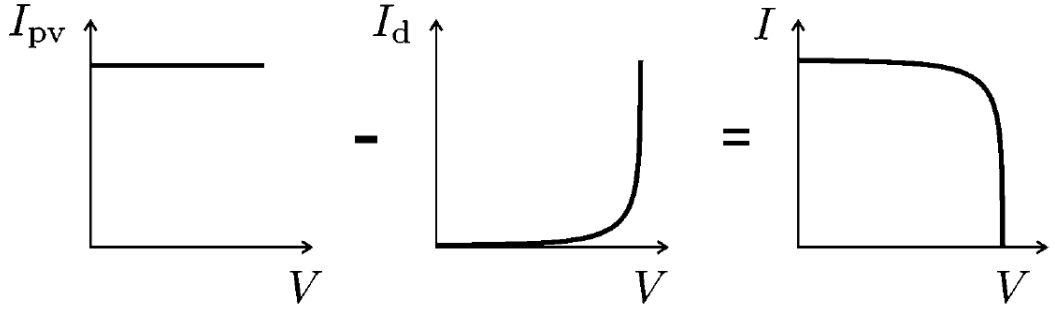
$$I = I_{pv,cell} - I_{0,cell} \left[\exp \left(\frac{qV}{akT} \right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I_d = I_{0,cell} \left[\exp \left(\frac{qV}{akT} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

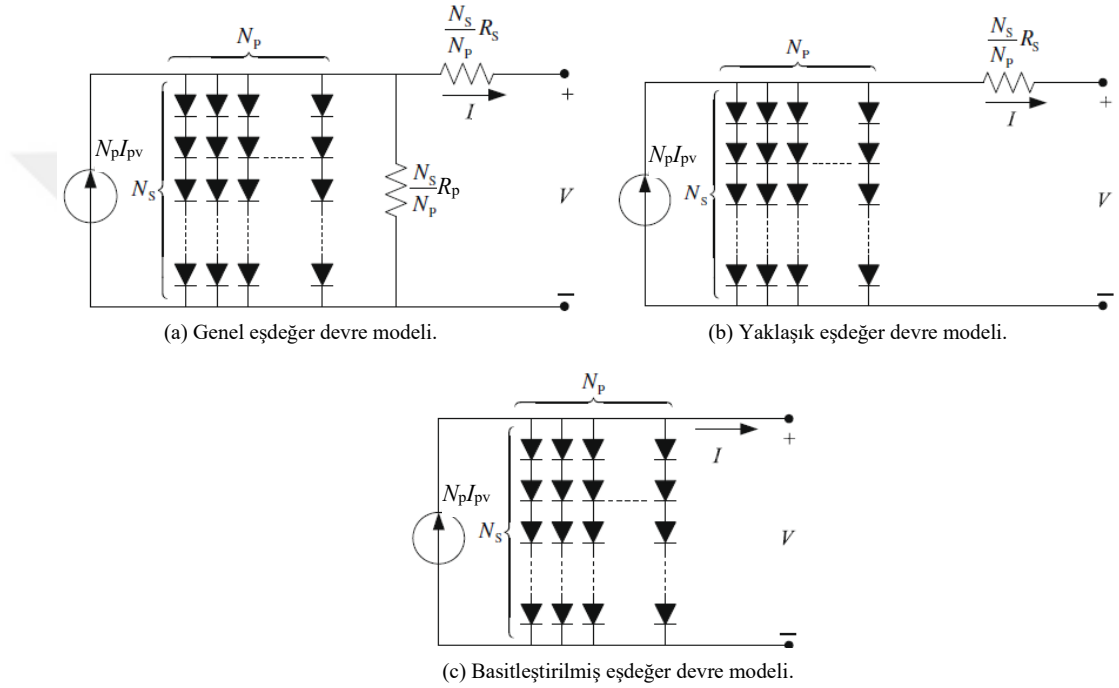
Burada $I_{pv,cell}$ gelen ışık tarafından üretilen akımdır (Güneş ışınımıyla doğru orantılıdır), I_d Shockley diyot denklemdir, I_0 hücre diyotun ters doygunluğu veya kaçak akımıdır, q elektron yüküdür ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C), k Boltzmann sabitidir ($1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T (°K) $p-n$ jonksiyonunun sıcaklığıdır ve ‘ a ’ diyot idealite sabitidir. Şekil 2.6, (2.2)’den kaynaklanan $I-V$ eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.5. PV hücresinin teorik tek diyot modeli ile seri ve paralel dirençleri içeren pratik bir PV cihazının eşdeğer devresi [73].



Şekil 2.6. PV hücresinin karakteristik I - V eğrisi. Net hücre akımı I , ışıkla üretilen akım I_{pv} ve diyot akımı I_d 'den oluşur [73].



Şekil 2.7. Çok hücreli PV dizisi eşdeğer devresi a) Genel eşdeğer devre b) Yaklaşık eşdeğer devre c) Basitleştirilmiş eşdeğer devre [88].

2.3.2. PV dizisinin modellenmesi

Temel PV hücresinin temel denklemi (2.2), pratik bir PV dizisinin I - V karakteristiğini tam olarak temsil etmez. Pratik diziler birbirine bağlı birkaç PV hücresinden oluşur ve PV dizisinin terminallerindeki özelliklerin gözlemlenmesi, temel denkleme ek parametrelerin dahil edilmesini gerektirir [87]:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{a V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.4)$$

(2.4)'te I_{pv} ve I_0 sırasıyla dizinin PV ve doyma akımlarıdır ve $V_t = N_s k T / q$ seri bağlı N_s hücreli dizinin ısıl gerilimidir. Paralel bağlanan hücreler akımı artırır ve seri bağlanan hücreler daha yüksek çıkış gerilimi sağlar. Dizi, hücrelerin N_p adet paralel

bağlantılarından oluşuyorsa, PV ve doyma akımları $I_{pv} = I_{pv,cell} N_p$, $I_0 = I_{0,cell} N_p$ olarak ifade edilebilir. (2.4)'te R_s dizinin eşdeğer seri direncidir ve R_p eşdeğer paralel dirençtir. Bu denklem, Şekil 2.8'deki $I-V$ eğrisinden kaynaklanır ve burada üç önemli nokta vurgulanır: kısa devre ($0, I_{sc}$), MPP (V_{mp}, I_{mp}) ve açık devre ($V_{oc}, 0$).

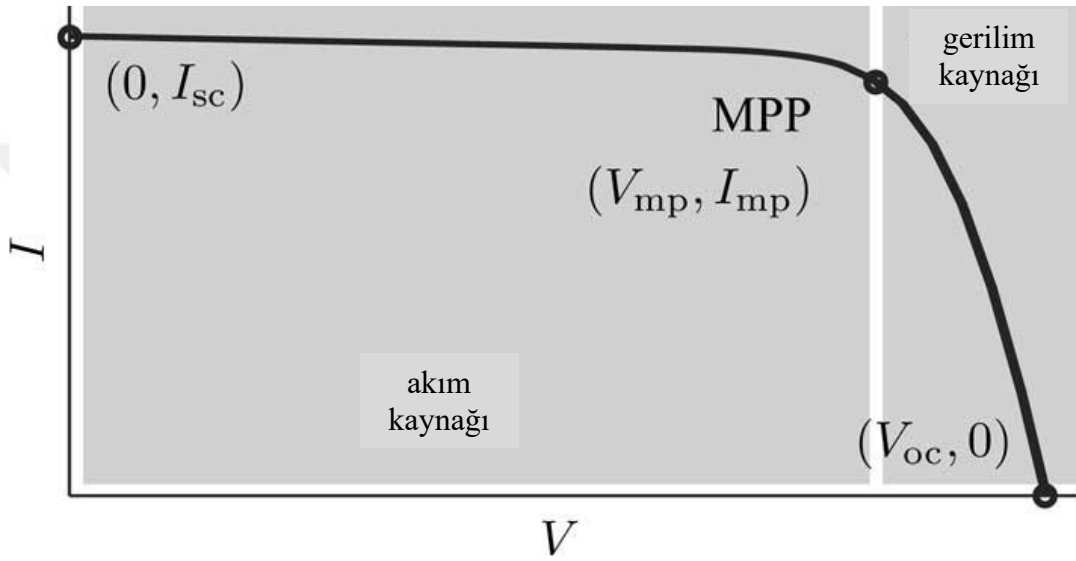
Şekil 2.7'da paralel ve seri bağlantılarla PV dizi eşdeğer devreleri gösterilmektedir [88].

(2.4), Şekil 2.5'te sunulan tek diyot modelini açıklamaktadır. Bazı yazarlar, daha iyi doğruluk sunan ve farklı amaçlarda kullanılmak üzere daha karmaşık modeller önermişlerdir. Örneğin, [89-93]'te taşıyıcıların rekombinasyonunun etkisini temsil etmek için fazladan bir diyot kullanılır. Önceki modellerde dikkate alınmayan etkilerin etkisini dahil etmek için [94]'te üç diyotlu bir model önerilmiştir. Basitlik açısından, bu çalışmada Şekil 2.5'teki tek diyot modeli kullanılmıştır. Bu model, basitlik ve doğruluk arasında iyi bir denge sağlar [95] ve birkaç yazar tarafından önceki çalışmalarda, bazen basitleştirmelerle, ancak her zaman bir akım kaynağı ve paralel diyottan oluşan temel yapıyla kullanılmıştır [82, 96-109].

PV modül üreticileri, $I-V$ denklemi yerine elektriksel ve ısı özellikleri hakkında yalnızca birkaç deneysel veri sağlar. Halbuki, PV dizi modellerini ayarlamak için gereken; ışıktan üretilen akım veya PV akımı, seri ve şönt dirençleri, diyot idealite sabiti, diyot ters doyma akımı ve yarı iletkenin bant aralığı enerjisi gibi bazı parametreler üreticinin veri sayfalarında bulunamamaktadır. PV modül veri sayfaları temel olarak aşağıdaki bilgileri içerir: nominal açık devre gerilimi ($V_{oc,n}$), nominal kısa devre akımı ($I_{sc,n}$), MPP'deki gerilim (V_{mp}), MPP'deki akım (I_{mp}), açık devre gerilimi/sıcaklık katsayısı (K_V), kısa devre akımı/sıcaklık katsayısı (K_I) ve maksimum deneysel tepe çıkış gücü ($P_{max,e}$). Bu bilgi sıcaklık ve güneş ışınımının nominal durumuna veya standart test koşullarına (STC) referansla sağlanır. Bazı üreticiler çeşitli ışınım ve sıcaklık koşulları için $I-V$ eğrileri sağlar. Bu eğriler istenen matematiksel $I-V$ denkleminin ayarlanmasını ve doğrulanmasını kolaylaştırır.

Elektrik jeneratörleri genel olarak akım veya gerilim kaynakları olarak sınıflandırılır. Pratik PV cihazı, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, çalışma noktasına bağlı olarak akım veya voltaj kaynağı olabilen hibrit bir davranış sunar. Pratik PV cihazı, cihaz gerilim kaynağı bölgesinde çalıştığında etkisi daha güçlü olan bir seri direnç R_s 'ye ve çalışmanın akım kaynağı bölgesinde daha güçlü etkiye sahip bir paralel direnç R_p 'ye

sahiptir. R_s direnci, cihazın çeşitli yapısal dirençlerinin toplamıdır. Şekil 2.4, bir PV hücresinin yapısını göstermektedir. R_s temel olarak metal tabanın p yarı iletken katmanla temas direncine, p ve n gövdelerinin dirençlerine, n katmanının üst metal ızgarayla temas direncine ve ızgaranın direncine bağlıdır [86]. R_p direnci esas olarak p - n bağlantısındaki kaçak akım nedeniyle mevcuttur ve PV hücresinin üretim yöntemine bağlıdır. R_p değeri genellikle yüksektir ve bazı yazarlar [82, 98-101, 104, 110-113] modeli basitleştirmek için bu direnci ihmal etmektedir. R_s değeri çok düşük olup bazen bu parametre de ihmal edilmektedir [111, 114-116].



Şekil 2.8. Pratik bir PV cihazının karakteristik I - V eğrisi ve dikkat çekici üç nokta: kısa devre $(0, I_{sc})$, MPP (V_{mp}, I_{mp}) ve açık devre $(V_{oc}, 0)$ [73].

Şekil 2.8’de gösterilen PV cihazının I - V karakteristiği, cihazın iç özelliklerine (R_s , R_p) ve ışıınım seviyesi ve sıcaklık gibi dış etkenlere bağlıdır. Gelen ışığın miktarı, yük taşıyıcılarının üretimini ve dolayısıyla cihazın ürettiği akımı doğrudan etkiler. PV hücrelerin ışıkla üretilen akımını (I_{pv}), seri ve paralel dirençlerin etkisi olmadan belirlemek zordur. Veri sayfaları yalnızca pratik cihazın terminallerinde mevcut olan maksimum akım olan nominal kısa devre akımını ($I_{sc,n}$) bildirir. Pratik cihazlarda seri direncin düşük ve paralel direncin yüksek olması nedeniyle PV cihazların modellenmesinde genellikle $I_{sc} \approx I_{pv}$ varsayımı kullanılır. PV hücresinin ışıkla üretilen akımı güneş ışıınımına doğrusal olarak bağlıdır ve aynı zamanda aşağıdaki denkleme göre sıcaklıktan da etkilenir [105, 117-119]:

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2.5)$$

Burada $I_{pv,n}$ (A) nominal durumda (genellikle 25 °C ve 1000 W/m²) ışıktan üretilen akımdır, $\Delta T = T - T_n$ (T ve T_n , gerçek ve nominal sıcaklıklardır [°K]), G (W/m²) cihaz yüzeyindeki ışıdır ve G_n nominal (STC'deki) ışıdır.

Diyot doyma akımı I_0 ve sıcaklığa bağımlılığı, gösterildiği gibi ifade edilebilir [117, 118,120-123]:

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{qE_g}{ak} \right) \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.6)$$

burada E_g yarı iletkenin bant aralığı enerjisidir ($E_g = 25$ °C'de çok kristalli Si için 1,12 eV [98, 117]) ve $I_{0,n}$ nominal doyma (ters doyma) akımıdır:

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp \left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{t,n}} \right) - 1} \quad (2.7)$$

$V_{t,n}$, N_s seri bağı hücrelerin T_n nominal sıcaklığındaki ısıl gerilimidir.

Cihazı oluşturan PV hücrelerinin doyma akımı I_0 , yarı iletkenin doyma akım yoğunluğuna (J_0 , genel olarak [A/cm²] cinsinden verilir) ve hücrelerin etkin alanına bağlıdır. Akım yoğunluğu J_0 , yarı iletkenindeki elektronların difüzyon katsayısı, azınlık taşıyıcıların ömrü, içsel taşıyıcı yoğunluğu vb. gibi çeşitli fiziksel parametrelere bağı olan PV hücresinin kendine özgü özelliklerine bağıdır [94]. Bu tür bilgiler genellikle ticari PV modülleri için mevcut değildir. Bu çalışmada, (2.4)'ün nominal açık devre koşulunda $V=V_{oc,n}$, $I=0$ ve $I_{pv} \approx I_{sc,n}$ ile değerlendirilmesiyle elde edilen (2.7) aracılığıyla deneysel verilerden dolayı olarak nominal doyma akımı $I_{0,n}$ elde edilmektedir.

Diyot sabitinin değeri 'a' keyfi olarak seçilebilir. Birçok yazar bu sabitin doğru değerini tahmin etmenin yollarını tartışmaktadır [95], [98]. Genellikle $1 \leq a \leq 1,5$ olur ve seçim $I-V$ modelinin diğer parametrelerine bağıdır. a'nın bazı değerleri deneysel analizlere dayalı olarak [117]'de bulunmuştur. [95]'de verildiği gibi, en iyi yolun nasıl seçileceği konusunda farklı görüşler vardır. a, diyotun idealite derecesini ifade ettiğinden ve tamamen deneysel olduğundan, modeli ayarlamak için a'nın herhangi bir başlangıç değeri seçilebilir. Gerekirse model uyumunu iyileştirmek için a'nın değeri daha sonra değiştirilebilir. Bu sabit $I-V$ eğrisinin eğriliğini etkiler ve a'yı değiştirmek

model doğruluğunu biraz artırılabilir [73]. Tablo 2.1’de farklı tip PV teknolojisine sahip hücreler için diyot idealite sabiti değerleri gösterilmiştir [88].

Tablo 2.1 Farklı tip PV hücreleri için diyot idealite sabiti değerleri [88].

PV teknolojisi	a
Si-mono	1,3
Si-poli	1,8
a-Si:H	3,3
a-Si:H tandem	5
a-Si:H üçlü	1,5
CdTe	1,5
CIS	1,3

PV modelinde, I_0 ’ın bulunması için (2.6) yerine (2.7)’nin sıcaklığa bağlı ifadesi kullanılabilir:

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{aV_t}\right) - 1} \quad (2.8)$$

Bu değişiklik, modelin açık devre gerilimlerini çok geniş bir sıcaklık aralığı için deneysel verilerle eşleştirmeyi amaçlamaktadır. (2.8), akım ve gerilim katsayıları K_I ve K_V ’nin denkleme dahil edilmesiyle (2.7)’den elde edilir. Doyma akımı I_0 sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlıdır ve (2.8) I_0 ’un sıcaklığa bağımlılığını ifade etmek için farklı bir yaklaşım önerir; böylece sıcaklığın net etkisi, pratik gerilim/sıcaklık katsayısına göre açık devre geriliminin doğrusal değişimi olur. Bu denklem modeli basitleştirir ve açık devre gerilimlerinin civarındaki ve dolayısıyla I - V eğrisinin diğer bölgelerindeki model hatasını önler [73].

(2.8)’i kullanmanın avantajı üreticinin veri sayfasındaki K_V katsayısının denklemde görünmesidir. Gerilim/sıcaklık katsayısı K_V , nominal değerden farklı sıcaklıklar için mümkün olan en iyi I - V eğrisi uyumunu elde etmek için gerekli önemli bilgileri sağlar.

(2.4)’te R_s ve R_p olmak üzere iki parametre bilinmemektedir. Bazı çalışmalarda bu dirençleri matematiksel olarak belirlemenin yolları önerilmiştir. Bu bilinmeyen parametreleri belirlemek için matematiksel bir formüle sahip olmak faydalı olsa da, R_s ve R_p için herhangi bir ifade her zaman deneysel verilere dayanacaktır.

[72] ve [73]'te $I-V$ 'nin (V_{mp}, I_{mp}) noktasında $P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp}I_{mp}$ olmasını sağlayan tek bir $\{R_s, R_p\}$ çifti olduğu gerçeğine dayanarak R_s ve R_p 'yi ayarlamak için bir yöntem önermektedir. Yani (2.4)'ün $I-V$ modeliyle hesaplanan maksimum güç ($P_{max,m}$), MPP'deki veri sayfasındaki maksimum deneysel güce ($P_{max,e}$) eşittir. Literatürde bulunan geleneksel modelleme yöntemlerinin bazılarında $I-V$ eğrisi dikkate alınır ancak $P-V$ (güç-gerilim) eğrisinin de deneysel verilerle eşleşmesi gerektiği ihmal edilir. [111] ve [124] gibi çalışmalar güç eğrisinin farklı veya basitleştirilmiş modellerle eşleştirilmesinin gerekliliğine dikkat çekmiştir. Örneğin [111]'de dizi modelinin seri direnci ihmal edilmiştir.

(2.4)'ün tek bilinmeyen olan R_s ve R_p arasındaki ilişki, $P_{max,m} = P_{max,e}$ yapılarak ve R_s için elde edilen denklemin gösterildiği gibi çözülmesiyle bulunabilir.

$$P_{max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right\} \quad (2.9)$$

$$R_p = \frac{V_{mp}(V_{mp} + R_s I_{mp})}{\left\{ V_{mp} I_{mp} - V_{mp} I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{aV_t} \right) - 1 \right] - P_{max,e} \right\}} \quad (2.10)$$

(2.10), herhangi bir R_s değeri için, matematiksel $I-V$ eğrisinin deneysel (V_{mp}, I_{mp}) noktasından geçmesini sağlayan bir R_p değerinin olacağı anlamına gelir.

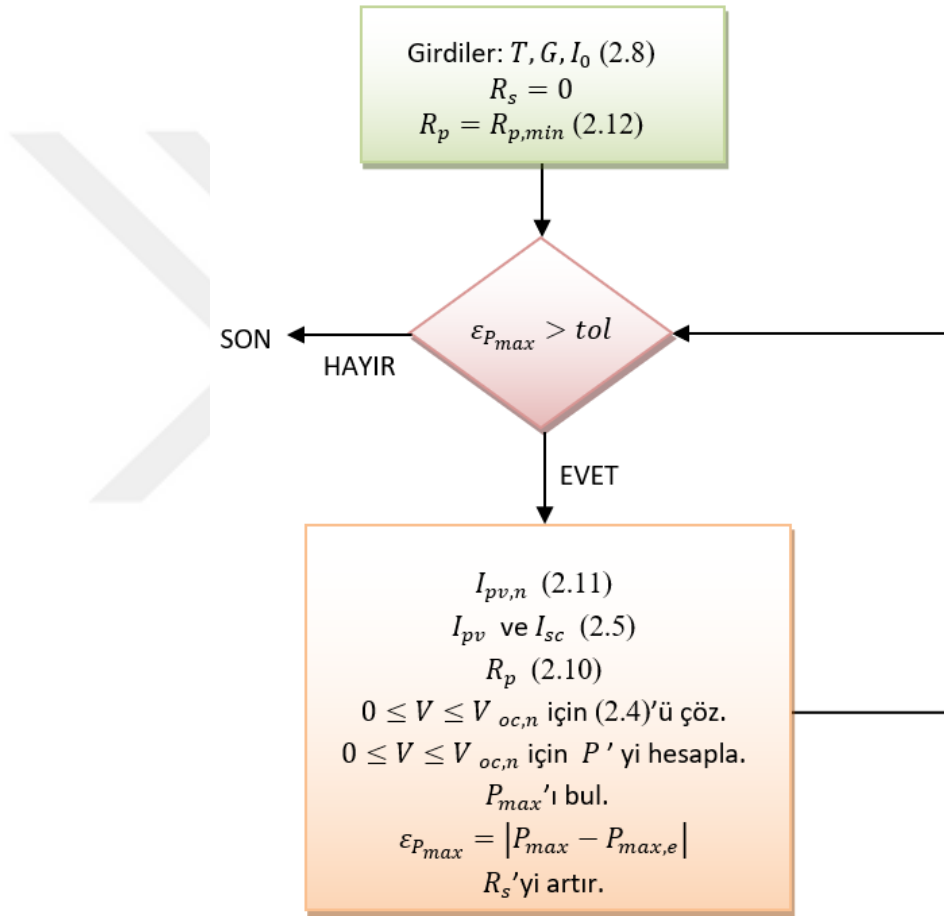
Model, R_s ve R_p 'nin iterasyonlu çözümünden yararlanılarak daha da geliştirilebilir. Her iterasyon, R_s ve R_p 'yi en iyi model çözümüne doğru günceller. Böylece (2.11) modele dâhil edilebilir.

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n} \quad (2.11)$$

(2.11), $I_{pv} \neq I_{sc}$ 'yi belirlemek için R_s ve R_p dirençlerini kullanır. R_s ve R_p 'nin değerleri başlangıçta bilinmemektedir, ancak algoritmanın çözümü ardışık iterasyonlar boyunca geliştirildikçe, R_s ve R_p 'nin değerleri en iyi çözüme yönelir ve (2.11) geçerli hale gelir ve dizinin seri ve paralel dirençlerinin etkisi hesaba katılarak ışıkla üretilen PV akımı I_{pv} 'yi etkili bir şekilde belirler. İterasyon süreci başlamadan önce R_s ve R_p için ilk tahminler gereklidir. R_s 'nin başlangıç değeri sıfır olabilir. R_p 'nin başlangıç değeri şu şekilde verilebilir:

$$R_{p,min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc,n} - I_{mp}} - \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.12)$$

(2.12), kısa devre ile maksimum güçteki dikkat çekici noktalar arasındaki çizgi bölümünün eğimi olan R_p 'nin minimum değerini belirler. R_p hala bilinmese de $R_{p,min}$ 'den kesinlikle daha büyüktür ve bu iterasyonlar için iyi bir başlangıç tahminidir. Şekil 2.9.'da R_p ve R_s 'nin iterasyonla hesaplanması metodolojisini anlatan akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.9. R_p ve R_s 'nin iterasyonla hesaplanması için akış diyagramı [72, 73].

Bazı çalışmalarda ise R_p ve R_s 'nin bulunması yerine yaklaşık tahmini değerler kullanılmıştır. Bir hücrenin paralel direnci nedeniyle %1'den daha az kayıp yaşaması için R_p 'nin yaklaşık olarak

$$R_p > \frac{100V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.13)$$

kadar büyük olması gerekir [125]. Burada V_{OC} ve I_{SC} sırasıyla açık devre voltajı ve kısa devre akımıdır. Desoto ve ark. [126], çalışma koşullarındaki ışınlam altındaki paralel direnç ve STC ile ilgili aşağıdaki ilişkiyi kullanmıştır,

$$\frac{R_P}{R_{P,ref}} < \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.14)$$

Son olarak, bir hücrenin seri direnç nedeniyle %1'den az kayba sahip olması için R_S 'nin yaklaşık olarak

$$R_S < \frac{0,01V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.15)$$

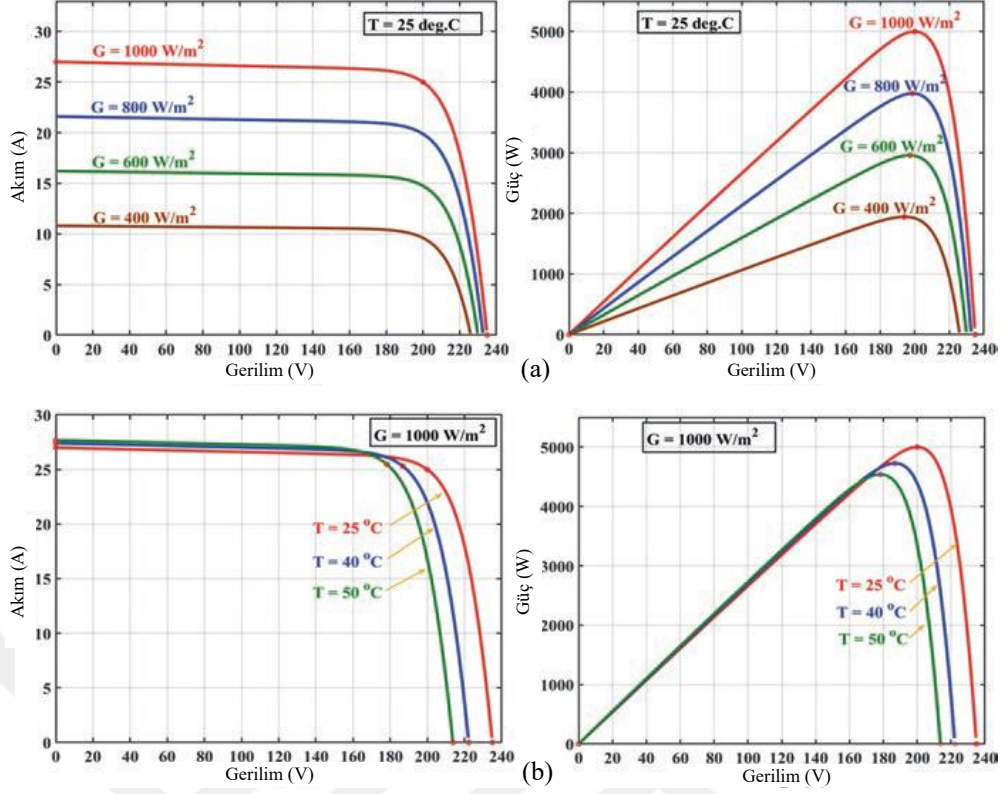
kadar küçük olması gerekir [125]. Desoto ve ark. [126] tarafından özetlenen beş parametrelili yöntemde seri direncin hem çalışma koşullarında hem de STC'de sıcaklık ve ışınlamdan bağımsız olduğu varsayılmaktadır.

$$R_S = R_{S,ref} \quad (2.16)$$

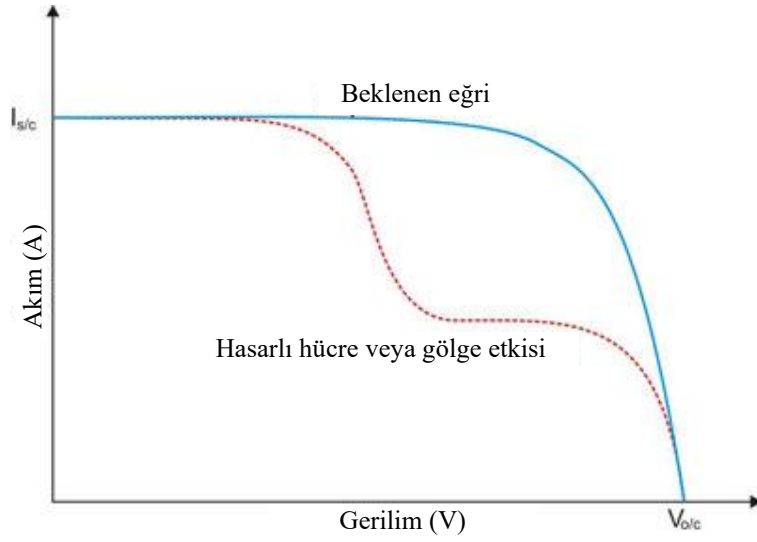
2.3.3. PV hücrelerinin karakteristikleri

Tipik bir PV dizisinin güneş ışınlamı ve sıcaklığının değişimine bağlı karakteristik grafikleri Şekil 2.10'da gösterilmektedir [127].

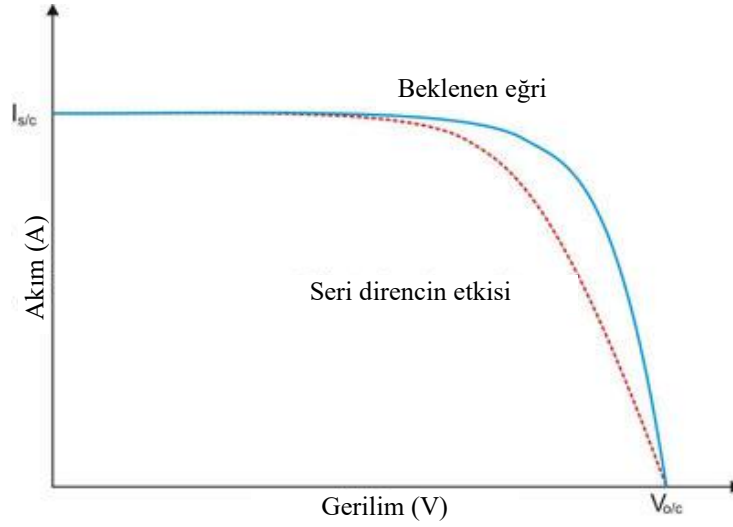
Belirli bir modül veya diziyle ilişkili eğri şekli ve doldurma Faktörlerindeki farklılıklar, PV sisteminin kalitesinde, güç performansında veya kurulumunda bir sorun olduğunu gösterebilir. Beklenen $I-V$ eğrisini etkileyecek bir kurulumda karşılaşılan tipik sorunlar arasında kirlenme, modüllerin gölgelenmesi, yüksek dirençli kablolama veya modüller arasındaki bağlantı sorunları, üretim veya spesifikasyon farklılıklarından kaynaklanan modül uyumsuzluğu veya PV hücrelerinin hasar görmesi yer alabilir [128]. İdeal çalışma karakteristiğini bozacak bu tür etkiler sebebiyle $I-V$ eğrileri farklı gözükebilir. Şekil 2.11'de gölgelenmiş veya hasar görmüş hücrenin, Şekil 2.12'de seri direncin ve Şekil 2.13'de modül yaşlanmasının veya tozlanmanın $I-V$ karakteristiğini nasıl değiştirdiği gösterilmiştir.



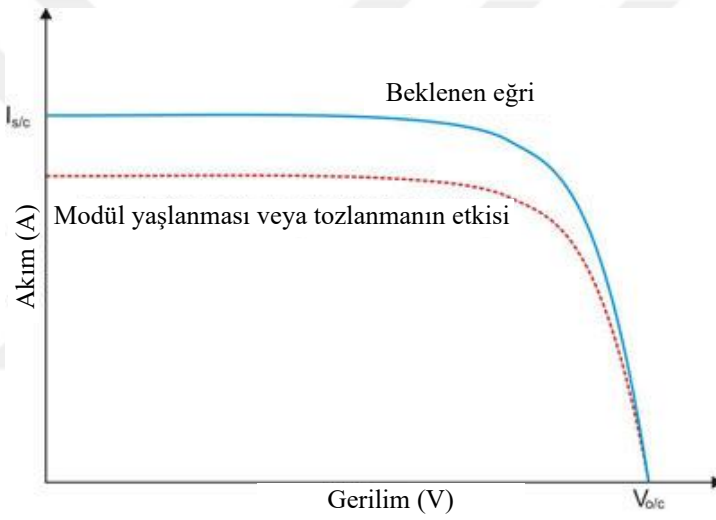
Şekil 2.10. Tipik bir PV dizisinin güneş ışınlımı ve sıcaklığının değişimi sırasındaki özellikleri. (a) Değişken güneş ışınlımı altında PV dizisinin (I-V) ve (P-V) özellikleri. (b) Değişken sıcaklık altında PV dizisinin (I-V) ve (P-V) özellikleri [127].



Şekil 2.11. Gölgelemiş veya hasar görmüş hücrenin I - V karakteristiğine etkisi [128].



Şekil 2.12. Seri direncin I - V karakteristiğine etkisi [128].

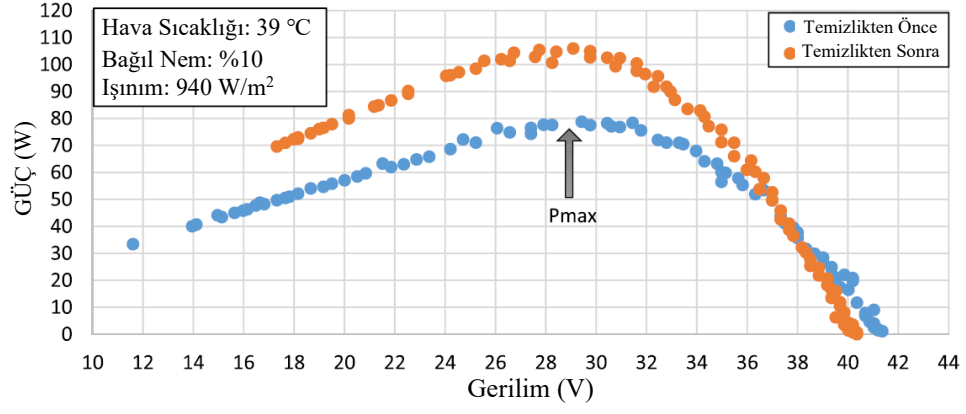


Şekil 2.13. Modül yaşlanması veya tozlanmanın I - V karakteristiğine etkisi [128].

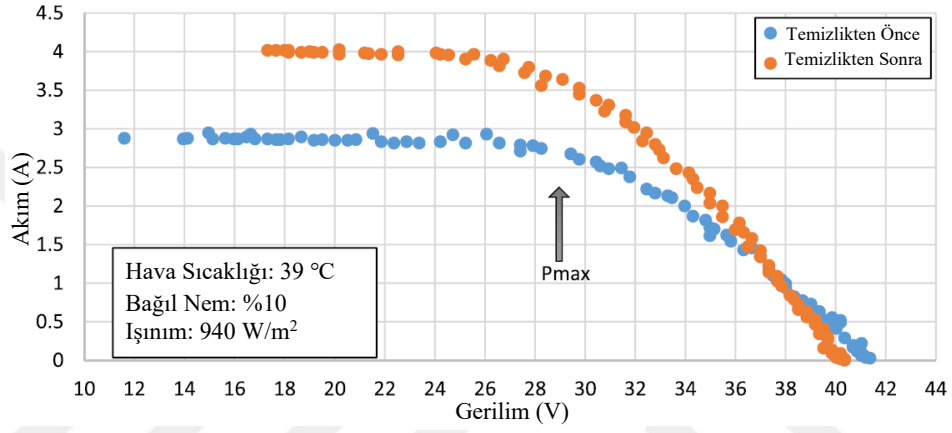
[129]'da tozlanmanın PV sistem üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Şekil 2.14'de tozlu ve temizlenmiş PV sistemin P - V eğrileri kıyaslanmıştır. Şekil 2.15'de ise tozlu ve temizlenmiş PV sistemin I - V eğrileri kıyaslanmıştır.

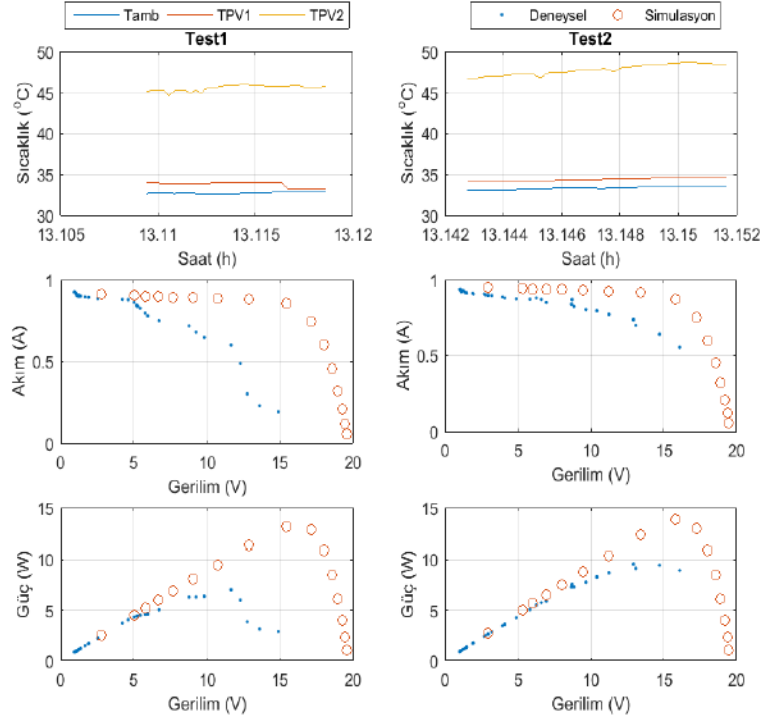
[130]'da ise PV sisteminin deneysel ölçüm verileri ile simülasyon verileri kıyaslanmıştır. Şekil 2.16'da gösterilen I - V ve P - V eğrilerindeki farklılıkların; simülasyonda PV'nin idealite faktörünün 1 olmasından, paralel bağlantıdan dolayı kayıpların olmasından ve üretim kaynaklı hatalardan kaynaklandığı belirtilmiştir.



Şekil 2.14. Tozlu ve temizlenmiş PV sistemin P - V eğrileri [129].



Şekil 2.15. Tozlu ve temizlenmiş PV sistemin I - V eğrileri [129].

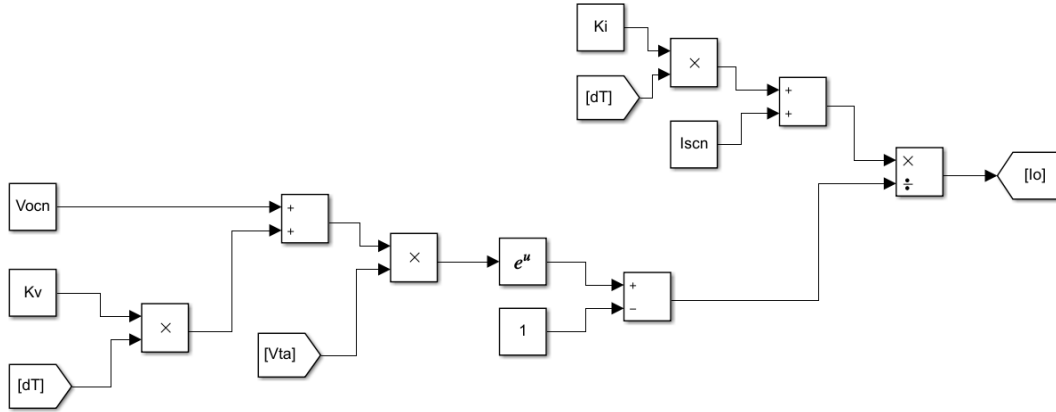


Şekil 2.16. Homojen olmayan koşullarda elektriksel model sonuçları [130].

2.4. PV Sistemlerin MATLAB/Simulink Modeli

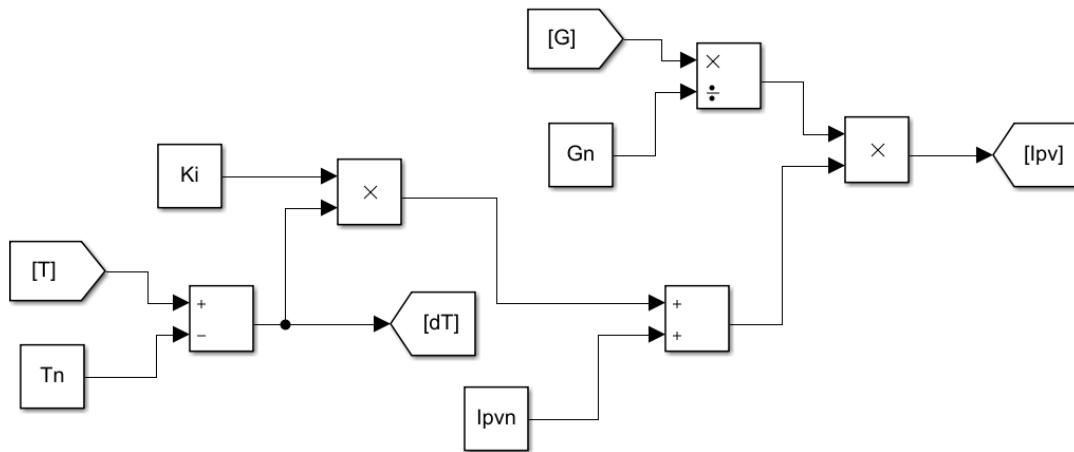
PV sistemler, ilgili denklemler Simulink'deki fonksiyon blokları içinde kullanılarak modellenebileceği gibi bu denklemler ayrı ayrı blokların matematiksel olarak birbirine bağlanmasıyla da modellenebilir.

PV doyma akımı I_0 , (2.8) kullanılarak oluşturulan model Şekil 2.17'de gösterildiği gibi olur.



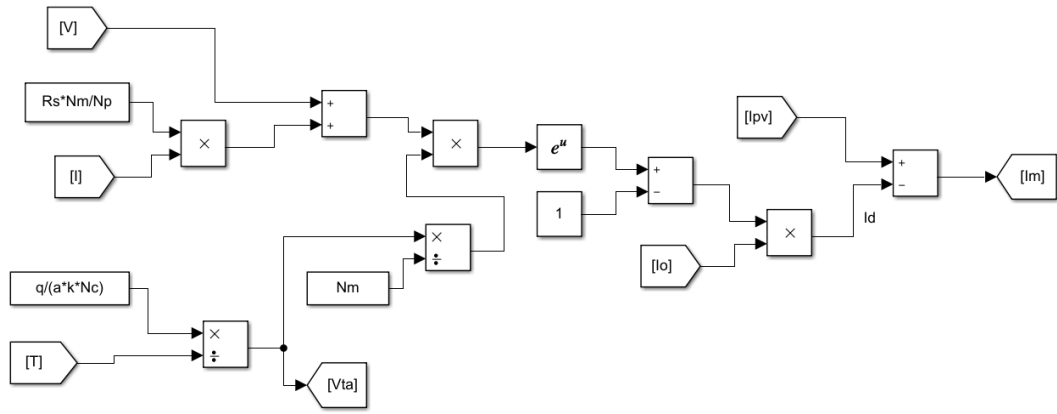
Şekil 2.17. Doyma akımı I_0 'ı hesaplayan model.

PV etkinin oluşturduğu akım I_{pv} , (2.5) ve (2.11) kullanılarak Şekil 2.18'de gösterildiği gibi modellenebilir.



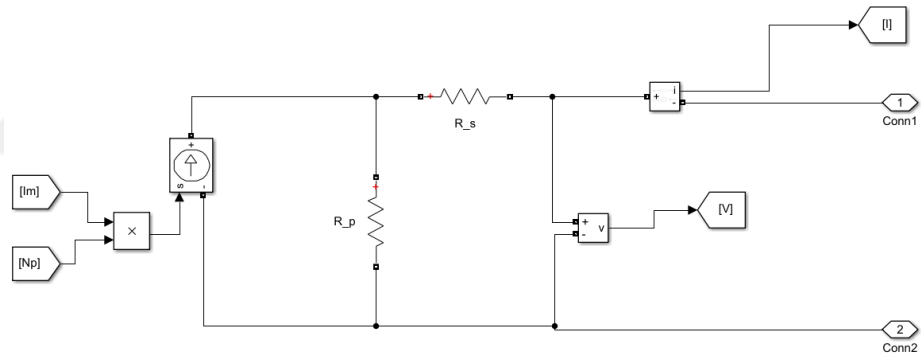
Şekil 2.18. PV etkinin oluşturduğu akım I_{pv} 'yi hesaplayan model.

Şekil 2.19'daki modelde $I_m = I_{pv} - I_d$ hesaplanmaktadır. Burada I_m tek modül veya tek paralel kola ait akımdır. R_s tek modüle ait seri dirençtir. N_c tek modül içindeki seri bağlı hücre sayısı olup, PV dizisinin bir paralel kolundaki seri bağlı modül sayısı N_m 'dir. PV dizisinin paralel kol sayısı N_p 'dir.

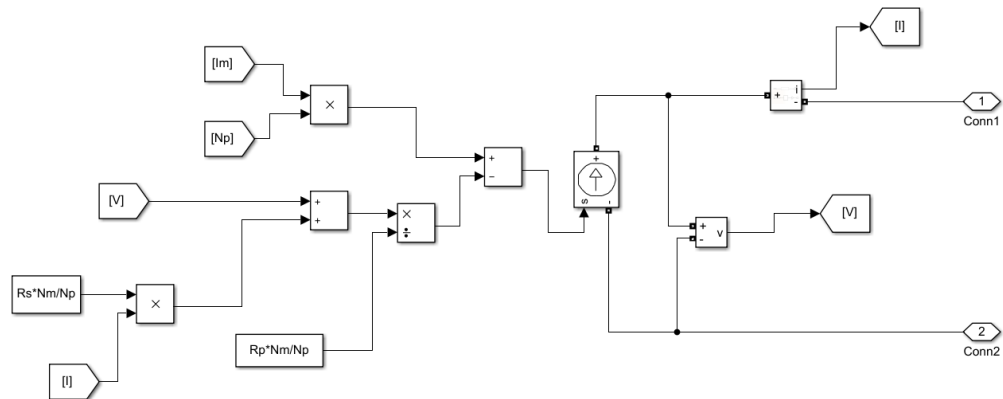


Şekil 2.19. $I_m = I_{pv} - I_d$ 'yi hesaplayan model.

Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de PV dizisinin eşdeğer modelleri gösterilmektedir. Şekil 2.20'deki modelde PV dizisinin paralel ve seri direnç değerlerinin seri ve paralel bağlı modül sayılarına göre hesaplanarak eşdeğer değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Şekil 2.21'deki modelde ise modül direnç değerleri ile seri-paralel modül sayıları kullanılarak eşdeğer PV dizi modeli kurulmuş olur.



Şekil 2.20. PV dizisinin temel eşdeğer modeli (Eşdeğer dirençlerin devreye eklendiği model).



Şekil 2.21. PV dizisinin temel eşdeğer modeli (Eşdeğer dirençlerin bloklarla hesaplanarak sisteme dahil edildiği model).



3. TERMOELEKTRİK SİSTEMLER

TE cihazlar, hareket etmeyen parçalar, küçük boyut, uzun ömür ve gürültüsüz çalışma gibi avantajlarla elektriği ve ısıyı iki yönlü olarak dönüştüren katı hal cihazlardır [131, 132].

Seebeck etkisi yoluyla ısıdan elektrik enerjisi üretmek için kullanılan ticari termoelektrik modüllere (TEM'ler), termoelektrik jeneratör (TEG) modülleri denir. Tersine, termoelektrik soğutucu (TEC) modülleri, Peltier etkisi ile elektrik enerjisinden ısı (ısı pompalama, soğutma veya ısıtma) üretmek için kullanılır. TEG ve TEC'in her ikisi de benzer sıcaklık aralıkları için çoğunlukla ana malzemesi Bi_2Te_3 gibi aynı olan termoelektrik cihazlar olduğundan; bir TEG, TEC olarak çalıştırılabilir ve bunun tersi bir TEC, TEG olarak çalıştırılabilir. PV-TE, yakıt hücresi-TE ve elektrikli araçların batarya sıcaklık yönetimi gibi bazı sistemlerde modüller her iki modda da kullanılabilir. Ayrıca bu sistemlerin bazı hallerinde TEM'in jeneratör, bazen de soğutucu olarak çalıştırılması gerekebilmektedir. Bir TEM'in iki yönlü çalışması, maliyet tasarrufu sağlayan bir yaklaşımdır çünkü iki tip TEM'in birlikte kullanılmasına gerek kalmamaktadır [133]. Bu çalışma yeni bir model önermektedir, ancak literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalar, modüllerin iki yönlü kullanımı ile tam olarak uyumlu değildir. Elektrik enerjisi üretimi ve ısı pompası uygulamaları için termoelektrik üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Ancak bu bölümde daha çok TEM'in MATLAB/Simulink modellenmesine ve modülün jeneratör ve soğutucu modları arasında iki yönlü kullanımına dayalı çalışmalara odaklanılmıştır.

[134]'te, ticari veri sayfalarından TEM parametrelerinin çıkarılması açıklanmış ve termoelektrik malzemelerin kararlı durum ifadeleri kullanılarak MATLAB/Simulink'te ayrı ayrı TEG ve TEC modelleri geliştirilmiştir. Modelleri temel olarak modül parametrelerini bulmaya ve ısı işlemleriyle uğraşmadan I - V eğrileri gibi TEG ve TEC'in elektriksel özelliklerini elde etmeye odaklanılmıştır. Kane ve ark. [135], TEG'ler için sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerine sahip, Thomson etkisinin ihmal edildiği bir sabit durum modeli üzerinde çalıştı. Daha sonra bu modeli, PV, TEG ve PV-TEG elektrik enerjisi üretim sistemlerinin MPPT kontrolörleri ile simüle edildiği bir PV-TEG hibrit

sisteminde [136] kullandılar. [137]'de yazarlar, genel sistem verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için bir PI kontrolörü kullanarak PV modülünü TEC ile soğutmak için bir PV-TEC hibrit sistemi içinde aynı modeli kullandılar. [138]'de TEG'in çeşitli parametrelerini analiz etmek için ANSYS ve MATLAB/Simulink kullanılarak bir TEG modeli geliştirildi ve analiz edildi. [139]'da Kobbekaduwa ve ark. ısı iletkenlik için deneysel bir değer belirlemek için karşılaştırmalı bir kesme çubuğu yöntemi sunmuş ve verileri [134]'teki modele benzer bir MATLAB modelinde kullanmıştır. Mamur ve ark. [140] değişken yük koşulları altında MPPT gerçekleştirmek için bir buck-boost dönüştürücü devresinde bir TEG modeliyle değişken bir yük tasarladı ve simüle etti. [134]'teki çalışmanın geliştirilmiş bir versiyonunu, Khamil ve ark. [141]'de sunmuş ve modellerinde TEG ve TEC blokları için performans parametrelerini dahil etmişlerdir. TEG karakteristiklerini belirlemek için TEG ve değişken yük koşullarında DC-DC dönüştürücülerin kullanımına ilişkin diğer çalışmalar [142-148]'de yapılmıştır. Bazı MPPT tekniklerinin bir karşılaştırması [149]'da sunulmuştur. TEG çıkış gücünü maksimize etmek için [150]'de Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi ve [151]'de bulanık mantık tabanlı MPPT tekniği kullanılmıştır. Senkron relüktans motoru besleyen bir PV-TEG sistemi, [152]'de bir DC-DC/MPPT dönüştürücü kullanmak yerine DC-AC/MPPT ile simüle edilmiştir. Kademeli TEC ve TEG, atık ısı TEC ile pompalanan ve TEG ile elektrik enerjisine dönüştürülen PV hücrelerinin güç çıkışını soğutmak ve iyileştirmek için modellenmiştir [153]. Bir egzoz sisteminin atık ısı TEG tarafından geri kazanılmış ve bu enerji, hibrit arabalar için yardımcı elektrik enerjisi elde etmek üzere PV panel soğutması amacıyla TEC'i beslemek için kullanılmıştır [154].

Literatürdeki çalışmaların çoğu TEM'in sadece TEG veya TEC gibi tek bir amaç için kullanılması üzerine kuruluyken, aynı cihazın hem jeneratör hem de soğutucu çalışmasında kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. [155]'te yazarlar, oda sıcaklığı kontrolü için TEC ve sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyulmadığında elektrik enerjisi üretimi için TEG olarak kabul edilen TEM modellerini sunmuşlardır. Soğutma, ısıtma ve güç üretimi için [155]'teki modeller MATLAB'da üç farklı blok olarak ayrı ayrı geliştirilmiştir. Yazarlar, TE cihazının iki yönlü çalışmasının ve hem TEG hem de TEC performans özelliklerinin optimizasyonunun [156]'da analiz edildiğini belirtmişlerdir. Daha sonra [157]'de Kwan ve. Ark., [155]'teki çalışmanın TEG veya TEC çalışma modunu seçmek için bir kontrol yöntemi sağlamadığını belirtmişlerdir ve aynı TEM'in bir yakıt hücresinde (FC) FC-TE kombine sistemin enerji üretmek veya yakıt

hücrelerinin aktif sıcaklık kontrolünü sağlamak için seçici olarak çalıştırıldığı bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Ayrıca yazarlar, TE cihazının iki yönlü kullanılması ile ilgili çalışmalarını Simscape tabanlı simülasyon modellemesi ile [158]'de devam ettirmişlerdir. [158]'de aynı cihazın TEG modunda çalışmasıyla üretilen ve pilde depolanan enerjiyle çalıştırılan, TE cihazının TEC olarak kullanıldığı bir sıcaklık kontrol ve enerji toplama sistemi ile deneyler yapmışlardır. Faheem M. ve Ark. [159]'da PV panel altına yerleştirdikleri TEM'leri pasif soğutma olarak adlandırdıkları jeneratör modunda ve aktif soğutma olarak adlandırdıkları soğutucu modunda kullanarak deneysel sonuçlar elde etmişlerdir. PV-TEG ve PV-TEC sistemlerinin Simulink simülasyonlarında TEG ve TEC için ayrı modeller kullanmışlardır.

Ancak aynı TEM'in hem TEG hem de TEC olarak her iki amaçla kullanıldığı tüm bu çalışmalarda iki yönlü kullanıma uygunluk tanımlanmamıştır. TEM modelleme konusu dikkate alınmadan TEG ve TEC arasındaki fiziksel farklılıkları ele alan [160]'da ayrıntılı bir karşılaştırma sunulmuştur. Çalışmada ana konu, pahalı TEG'ler yerine ucuz TEC'lerin kullanılması fikri üzerine kurulmuş olup, hangi sıcaklık aralığında ve hangi koşullarda iki yönlü kullanımın uyumlu olduğu sorgulanmıştır.

Bir TEG'i doğrudan TEC olarak kullanmak veya tersine bir TEC'i TEG olarak kullanmak, kullanılan cihazın özel çalışma şartları ve aralıkları nedeniyle gerçek çalışma koşullarında TEM'e zarar vermemek için ek bilgi gerekir. Ancak bu tezde ağırlıklı olarak TEM'in MATLAB/Simulink'te modellenmesine odaklanılmış olup, modelde gerçek hayattaki kullanıma uyumluluk konusu dikkate alınmamıştır.

Bu tezde önerilen modelin önceki çalışmalara göre avantajlarından birisi ise literatürdeki çoğu çalışmanın aksine TEM'in elektriksel bağlantı noktalarının ve ısıl bağlantı noktalarının polaritelerinin dikkate alınmasıdır. Literatürdeki çalışmalardan bazıları, üretici veri sayfalarından TEG veya TEC parametrelerinin bulunmasına dayanmaktadır. Bu tezdeki TEM modeli ise, TEM'i yalnızca TEG veya TEC olarak ya da her iki amaç için iki yönlü olarak kullanabilen, aynı zamanda TEG ve TEC veri sayfası parametrelerini her iki türü de simüle etmek için tek bir blokta birleştirebilen, MATLAB/Simulink'te TEM'in eksiksiz bir modeli olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca önerilen model, cihazın davranışını ve kontrolünü gözlemlemek için simülasyon çıktıları olarak hem TEG hem de TEC'in maksimum ve performans parametrelerini içermektedir. Elektrik terminalleri için elektrik portlarının ve yüzey sıcaklıkları için ısıl portlarının polaritelerini de hesaba katarak, kapsamlı bir parametre seti ile Simulink

kütüphanesindeki diğer herhangi bir öğeye benzer tarzda bir model oluşturmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, TEM malzeme özellik parametreleri, ticari TEM'lerin veri sayfası değerlerinden çıkarılmıştır. Bu değerler, elektrik enerjisi üretme veya soğutma (PV modülü, elektronik cihaz, ortam vb.) ihtiyacına göre TEG veya TEC olarak çalışan TEM için iki yönlü simülasyon modeli oluşturmak için kullanılmıştır.

Önerilen simülasyon modeli, TEG ve TEC'i yalnızca kendi doğal modlarında değil, aynı zamanda karşıt modlarda da (TEG'den TEC'e ve TEC'den TEG işlemine) kullanmak için uygundur. Bu çalışma koşullarını simüle etmek için TEM, MATLAB/Simulink ortamında iki farklı çalışma modunda iki tip modül olan dört farklı senaryo için modellenmiştir. Önerilen model, modüllerin hem termodinamik hem de elektriksel ilişkileri dikkate alınarak bir devre simülatöründe kullanılmak üzere oluşturulmuştur.

Sonraki bölümünde, birleşik tek blok halindeki Simulink modelini geliştirmek için gerekli olan TEG ve TEC denklemleri kısaca açıklanmış ve Simulink modelini oluşturan bloklar ve işlevleri hakkında bilgi verilmiştir. Önerilen model kullanılarak yapılan simülasyonlar ile elde edilen TEM'lerin karakteristik grafikleri sunulmuştur.

3.1. Termoelektrik Modüllerin Yapısı

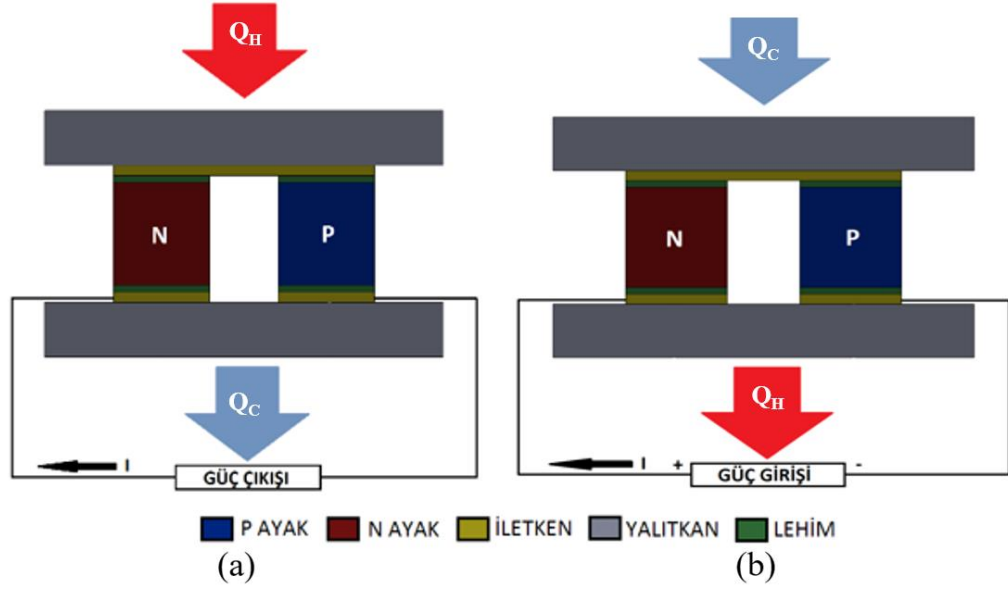
Şekil 3.1'de TEG ve TEC işlemleri için TEM'in temel birimi olan bir $p-n$ TE ayak çifti gösterilmektedir. $p-n$ ayakları lehimler aracılığıyla elektrik iletkenleri ile birbirine bağlanır ve diğer ayak çiftleriyle paralel bağlantılar oluşturmak için ısı iletkenleri olan iki elektrik yalıtkanı arasına sıkıştırılır. TEM, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi elektriksel olarak seri ve ısıl olarak paralel bağlanan N adet $p-n$ ayak çiftlerinden oluşur [131].

Her $p-n$ termoelektrik ayak çifti için *elektriksel direnç* (R), *ısıl iletkenlik* (K) ve *Seebeck katsayısı* (S) şu şekilde tanımlanmaktadır:

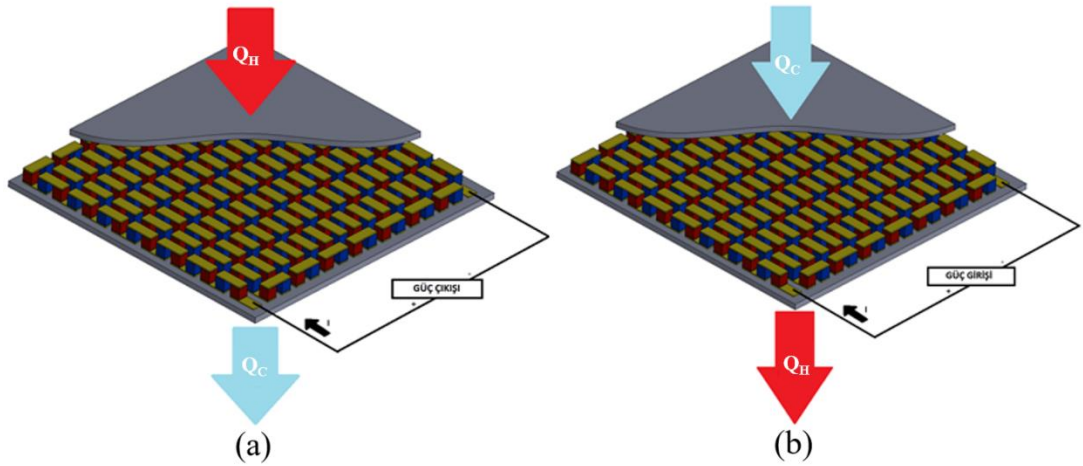
$$R = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \quad (3.1)$$

$$K = k_p \frac{A_p}{L_p} + k_n \frac{A_n}{L_n} \quad (3.2)$$

$$S = S_p - S_n \quad (3.3)$$



Şekil 3.1. Bir çift termoelektrik jeneratör ayak veya eklem (a) Bir çift termoelektrik soğutucu ayak veya eklem (b) (N=1) [131].



Şekil 3.2. Termoelektrik jeneratör (TEG) modülü (a) ve termoelektrik soğutma (TEC) modülü (b) (N>1) [131].

p ve n ayakların aynı boyutta olduğu varsayılırsa, elektriksel direnç ve ısı iletkenlik, $\rho = \rho_p + \rho_n$ ve $k = k_p + k_n$ olmak üzere $R = \rho L/A$ ve $K = kA/L$ olarak ifade edilebilir. Ayağın enine kesit alanı-uzunluk oranı $G = A/L$ olarak ifade edilir.

N sayıda seri bağlı p - n ayak çifti için, modül düzeyinde parametreleri bulmak amacıyla; seri bağlı dirençler, paralel bağlı ısı iletkenlikler ve seri bağlı Seebeck katsayıları şu şekilde kullanılır:

$$R_m = N \cdot R \quad (3.4)$$

$$K_m = N \cdot K \quad (3.5)$$

$$S_m = N \cdot S \quad (3.6)$$

Termoelektrik modüllerin kalitesini sınıflandırmak için termoelektrik malzemenin performansı, Figure of Merit (*FoM*), veya kısaca *Z* olarak adlandırılan bir katsayı tanımlanır. (3.7)'de verilen *Z* tanımına göre, daha yüksek bir Seebeck katsayısı, daha düşük elektrik direnci ve daha düşük ısı iletkenlik, daha yüksek bir *Z* değeri ve sonuç olarak daha yüksek termoelektrik performans ile sonuçlanır [132].

$$Z = Z_m = \frac{S^2}{R \cdot K} = \frac{S_m^2}{R_m \cdot K_m} \quad (3.7)$$

Ek olarak, elektriksel yönden seri, ısı yönden paralel bağlı N_s sayıda özdeş modül grubu için de yukarıdaki dönüşüme benzer işlem uygulanır. Seri grup parametrelerini bulmak için R_m , K_m ve S_m , N_s ile çarpılırken, modülün *FoM*'si *p-n* ayak çifti seviyesine eşit olan *Z* ile aynı kalır. Aynı modüllerin N_p elektriksel olarak paralel ve ısı olarak paralel bağlı grupları varsa, eşdeğer değerler aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$S_{te} = N_s \cdot S_m \quad (3.8)$$

$$R_{te} = (N_s / N_p) \cdot R_m \quad (3.9)$$

$$K_{te} = N_s \cdot N_p \cdot K_m \quad (3.10)$$

$$Z_{te} = Z_m = Z \quad (3.11)$$

Burada '*te*' alt simgesi, ilgili parametrenin $N_s \cdot N_p$ adet TEM'lerden oluşan tüm sistem hakkında olduğunu belirtmektedir.

3.1.1. TEG modeli denklemleri

Her iki yüzey için ısı dengesi denklemleri; *Peltier ısısı*, *iletim kayıpları* ve *Joule kayıplarını* içeren, fakat *taşıyım* ve *ışınım*la ısı geçişinin ihmal edildiği kararlı durum koşulları için yazılmıştır. Ayrıca ısıl veya elektriksel temas direncinin olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca malzeme özelliklerinin sabit olduğu varsayılmış ve *Thomson*

etkisi ihmal edilmiştir. Denklemler [134, 161, 162]'de bahsedilen ideal denklemlere göre türetilmiştir.

Modülün ısı kaynağına temaslı olan, T_H sıcaklığındaki sıcak yüzeyinden veya ekleminden alınan ısı;

$$Q_A = Q_H = S_m I T_H + K_m (T_H - T_C) - I^2 R_m / 2 \quad (3.12)$$

Modülün ısı alıcısına temaslı olan ve T_C sıcaklığındaki soğuk ekleminden ortama verilen ısı:

$$Q_E = Q_C = S_m I T_C + K_m (T_H - T_C) + I^2 R_m / 2 \quad (3.13)$$

TEG modülünün elektriksel güç üretimi veya güç çıkışı:

$$P_{TEG} = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) - I^2 R_m \quad (3.14)$$

veya yük direnci R_L olmak üzere yük cinsinden ifade

$$P_{TEG} = V_{TEG} I = I^2 R_L \quad (3.15)$$

biçiminde yazılabilir. TEG modülün çıkış geriliminin yük cinsinden ifadesi

$$V_{TEG} = I R_L \quad (3.16)$$

olur. Ayrıca, çıkış geriliminin *Kirchoff Gerilim Kanunu* (KGK) kullanılarak *Seebeck gerilimi* ve modül iç direnci cinsinden ifadesi

$$V_{TEG} = N[S(T_H - T_C) - IR] = S_m (T_H - T_C) - I R_m \quad (3.17)$$

olur. Burada $S_m(T_H - T_C)$ üretilen *Seebeck gerilimi* elektro motor kuvvet (EMK) olup modülün *açık devre gerilimi* (V_{OC}) şeklinde de ifade edilebilir.

3.1.1.1. TEG performans parametreleri

Modül akımı, elektriksel devreden şu şekilde hesaplanır [134, 161, 162]:

$$I = \frac{S_m(T_H - T_C)}{R_L + R_m} = \frac{S_m(T_H - T_C)}{(1 + m)R_m} \quad (3.18)$$

burada jeneratör modülün çıkış geriliminin yüke bağlı ifadesi

$$V_{TEG} = \frac{S_m(T_H - T_C)R_L}{R_L + R_m} = \frac{S_m(T_H - T_C)}{m + 1} \cdot m \quad (3.19)$$

ve çıkış gücü

$$P_{TEG} = V_{TEG} \cdot I = \frac{S_m^2 \Delta T^2}{R_m} \cdot \frac{m}{(m + 1)^2} \quad (3.20)$$

olup; sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı

$$\Delta T = T_H - T_C \quad (3.21)$$

ve yük oranı (m)

$$m = R_L/R_m \quad (3.22)$$

biçiminde yazılır. Termoelektrik jeneratörün verimliliği, üretilen elektrik gücünün giriş ısı gücüne oranıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\eta = P_{TEG}/Q_H \quad (3.23)$$

(3.20),(3.22) ve (3.23) kullanılarak yük oranına bağlı verim ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\eta = \frac{(1 - T_C/T_H)m}{(1 + m) - \frac{1}{2}(1 - T_C/T_H) + \frac{1}{2ZT_{avr}}(1 + m)^2(1 + T_C/T_H)} \quad (3.24)$$

Burada yüzeylerin sıcaklık ortalaması

$$T_{avr} = (T_H + T_C)/2 \quad (3.25)$$

olup; $\eta_C = (1 - T_C/T_H)$ Carnot verimidir.

3.1.1.2. TEG maksimum parametreleri

Bir TEG modülünün maksimum parametreleri aşağıdaki denklemlerle bulunabilir:

Bilinen bir ΔT için TEG modülünün maksimum voltajı olan EMK, şu şekilde ifade edilen açık devre testi kullanılarak belirlenir [134, 161, 162]:

$$V_{max,TEG} = V_{OC} = S_m \Delta T \quad (3.26)$$

Bilinen bir ΔT için TEG modülünün maksimum akımı, kısa devre testi kullanılarak açık devre geriliminin modül iç direncine oranı ile aşağıdaki gibi belirlenir:

$$I_{max,TEG} = I_{SC} = S_m \Delta T / R_m \quad (3.27)$$

TEG çalışması durumunda, maksimum gerilim ve akım yerine maksimum güç üretim durumunun parametreleri olan *eşleşen yük voltajı* (V_m) ve *eşleşen yük akımı* (I_m) verilir. Bu çalışmada kullanılan TEM modeli hem TEG hem de TEC veri sayfası değerlerini kullanır. Bu nedenle, karışıklığı önlemek için simülasyon modelinde TEC için V_{max} ve I_{max} terimleri kullanılmıştır. P_{max} , TEG veri sayfalarında *eşleşen güç* (P_m) olarak da adlandırılabilen, bilinen bir ΔT için yüke sağlanan jeneratörün maksimum çıkış gücüdür. Bilindiği üzere yük direnci modülün iç direncine eşit ise yüke güç aktarımı maksimum olur. Bu durum (3.20)'deki TEG güç denkleminin *yük oranına* (m) göre türevi alınarak ve sonucun sıfıra ayarlanmasıyla belirlenebilir. Maksimum güç veya eşleşen güç için yük oranı 1 olarak bulunabilir. Yük oranı (3.20)'de $m=1$ olarak kullanılırsa, TEG'in eşleşen gücü şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_m = \frac{S_m^2 \Delta T^2}{4R_m} \quad (3.28)$$

Maksimum güç için $R_L=R_m$ olup; açık devre gerilimi (V_{OC}) şu şekilde hesaplanır:

$$V_{OC} = 2V_m \quad (3.29)$$

Eşleşen yük gücü şu şekilde ifade edilir:

$$P_m = V_m^2 / R_L = V_m^2 / R_m \quad (3.30)$$

veya V_{OC} ve I_{SC} cinsinden

$$P_m = V_{OC}I_{SC}/4 \quad (3.31)$$

yazılabilir. Eşleşen yük voltajı ise şu şekilde hesaplanır:

$$V_m = S_m\Delta T/2 \quad (3.32)$$

Optimum yük oranı koşulu, verimi maksimum yapan yük oranıdır ve (3.24)'teki verim formülünün m 'ye göre türevi sıfıra eşitlenerek belirlenir ve şu şekilde hesaplanır:

$$m_{opt} = \sqrt{1 + ZT_{avr}} \quad (3.33)$$

Jeneratörün maksimum verimi, (3.24)'te m_{opt} kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\eta_{max} = (1 - T_C/T_H) \frac{\sqrt{1 + ZT_{avr}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{avr}} + T_C/T_H} \quad (3.34)$$

m_{opt} (3.32) ve (3.34)'ten şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$m_{opt} = \frac{\Delta T + \eta_{max}T_C}{\Delta T - \eta_{max}T_H} \quad (3.35)$$

FoM,

$$Z = (m_{opt}^2 - 1)/T_{avr} \quad (3.36)$$

olur. P_{opt} olarak adlandırılan, η_{max} koşulu altındaki TEG'in güç çıkışı, (3.37)–(3.39) kullanılarak şu şekilde hesaplanır:

$$I_{opt} = S_m\Delta T/(R_m + R_{opt}) \quad (3.37)$$

$$R_{opt} = m_{opt}R_m \quad (3.38)$$

$$P_{opt} = I_{opt}^2 R_{opt} = \frac{S_m^2 \Delta T^2 m_{opt}}{R_m (m_{opt} + 1)^2} \quad (3.39)$$

Maksimum güç noktası için yük oranı $R_L=R_m$ 'dir. Böylece, (3.24)'te $m=1$ için, eşleşen güç verimliliği veya maksimum güç optimal verimliliği olarak adlandırılabilen maksimum güç noktasındaki verimlilik şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{mp} = \frac{(1 - T_C/T_H)}{2 - \frac{1}{2}(1 - T_C/T_H) + \frac{2}{ZT_{avr}}(1 + T_C/T_H)} \quad (3.40)$$

FoM, η_{mp} formülü (3.40) düzenlenerek şu şekilde hesaplanır:

$$Z = \frac{4\eta_{mp}}{\Delta T - \eta_{mp}(T_H + T_{avr})} \quad (3.41)$$

Son olarak, FoM belirlendikten sonra, (3.7) dönüştürülerek modülün ısı iletkenliği aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$K_m = \frac{S_m^2}{R_m Z} \quad (3.42)$$

3.1.1.3. TEG malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Veri sayfasından TEG modülünün verilen parametreleri T_H , T_C , V_m , P_m ve η_{max} veya η_{mp} için; *modülün direnci*, *Seebeck katsayısı* ve *ısı iletkenliği* sırasıyla aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir [134, 161, 162]:

$$R_m = R_L = V_m^2 / P_m \quad (3.43)$$

$$S_m = 2V_m / \Delta T \quad (3.44)$$

Modülün ısı iletkenliği η_{max} cinsinden şu şekilde türetilebilir:

$$K_m = S_m^2 (\Delta T - \eta_{max} \cdot T_H)^2 / [2(2 - \eta_{max})\Delta T \cdot \eta_{max} \cdot R_m] \quad (3.45)$$

veya η_{mp} cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$K_m = S_m^2 [\Delta T - \eta_{mp}(T_H + T_{avr})] / (4\eta_{mp}R_m) \quad (3.46)$$

3.1.2. TEC modeli denklemleri

Her iki tarafın ısı dengesi denklemleri, *Peltier ısısı*, *iletim kayıpları* ve *Joule kayıpları* içeren [134, 161, 162]'de belirtilen ideal denklemler kullanılarak önceki varsayımlarla kararlı durum için yazılmıştır.

Soğutulan cisime temaslı olan T_C sıcaklığındaki soğuk eklemnin aldığı ısı:

$$Q_A = Q_C = S_m I T_C - K_m (T_H - T_C) - I^2 R_m / 2 \quad (3.47)$$

Isı alıcısına temaslı olan T_H sıcaklığındaki sıcak eklemden çıkan ısı:

$$Q_E = Q_H = S_m I T_H - K_m (T_H - T_C) + I^2 R_m / 2 \quad (3.48)$$

TEC modülün elektriksel giriş gücü,

$$P_{TEC} = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) + I^2 R_m \quad (3.49)$$

veya genel ifadeyle

$$P = V \cdot I \quad (3.50)$$

yazılabilir. TEC modülün besleme gerilimi ise,

$$V = S_m (T_H - T_C) + I R_m \quad (3.51)$$

3.1.2.1. TEC performans parametreleri

TEC çalışmasında, TEG için kullanılan verimlilik terimi yerine kısaca *COP* olarak adlandırılan *etkinlik* veya *soğutma performans katsayısı* kullanılır. Bu katsayı, soğutma gücünün TEC'in elektriksel giriş gücüne oranıdır ve 1'den büyük olabilir. Soğutma için *COP* şu şekilde yazılabilir [134, 161, 162]:

$$COP = \frac{Q_C}{P_{TEC}} = \frac{S_m I T_C - 0.5 I^2 R_m - K_m (T_H - T_C)}{S_m I (T_H - T_C) + I^2 R_m} \quad (3.52)$$

Maksimum soğutma gücü ($Q_{C,max}$) için akım I_{mp} , (3.47)'nin I 'ye göre türevinin sıfıra eşitlenmesi ile belirlenebilir.

$$I_{mp} = \frac{S_m T_C}{R_m} \quad (3.53)$$

Soğutma için etkinlik katsayısının maksimum değeri, (3.52)'nin I 'ya göre türevi sıfıra eşitlenerek bulunabilir. Maksimum COP koşulunu sağlayan akım ise şu şekilde bulunabilir:

$$I_{COPm} = \frac{S_m(T_H - T_C)}{R_m(\sqrt{(1 + ZT_{avr})} - 1)} \quad (3.54)$$

Maksimum COP için gerekli akımı sağlayan gerilim, KGK'ya göre şu şekilde belirlenir:

$$V_{COPm} = S_m(T_H - T_C) + I_{COPm}R_m \quad (3.55)$$

(3.52)'deki COP denkleminde I_{COPm} ve V_{COPm} yerlerine yazılarak maksimum COP denklemi yazılabilir:

$$COP_{max} = \frac{S_m T_C I_{COPm} - 0.5 I_{COPm}^2 R_m - K_m(T_H - T_C)}{V_{COPm} I_{COPm}} \quad (3.56)$$

3.1.2.2. TEC maksimum parametreleri

Bir TEC modülünün maksimum parametreleri aşağıdaki denklemlerle bulunabilir:

Akım maksimum olduğunda, maksimum sıcaklık farkı için Q_C sıfır olacaktır veya sıfır sıcaklık farkı için Q_C maksimum olacaktır. (3.47)'de, $Q_C = 0$ için, T_C yerine $(T_H - \Delta T)$ yazılmasıyla, ΔT şu şekilde elde edilir [134, 161, 162]:

$$\Delta T = \frac{S_m I T_H - 0.5 I^2 R_m}{(S_m I + K_m)} \quad (3.57)$$

I_{max} , ΔT 'nin I 'ye göre türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilebilir.

$$I_{max} = \frac{K_m(\sqrt{1 + 2ZT_H} - 1)}{S_m} \quad (3.58)$$

(3.57) ΔT formülünde I_{max} kullanılarak, sıcaklık farkının maksimum değeri şu şekilde bulunabilir:

$$\Delta T_{max} = T_H + \frac{1 - \sqrt{1 + 2ZT_H}}{Z} \quad (3.59)$$

(3.58) ve (3.59) denklemlerinin birlikte kullanılmasıyla I_{max} aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_{max} = \frac{S_m(T_H - \Delta T_{max})}{R_m} \quad (3.60)$$

TEC modülü için maksimum gerilim, akım ve sıcaklık farkı maksimum kabul edilerek hesaplanır. Böylece (3.51)'de I_{max} ve $T_C = T_H - \Delta T_{max}$ kullanılır. Sonrasında, V_{max} şu şekilde elde edilir:

$$V_{max} = S_m T_H \quad (3.61)$$

Soğutma gücünün maksimum değeri, $\Delta T=0$ iken akım I_{max} için (3.47) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Q_{C,max} = \frac{S_m^2 (T_H^2 - \Delta T_{max}^2)}{2R_m} \quad (3.62)$$

3.1.2.3. TEC malzeme özelliklerinin belirlenmesi

TEC modülünün veri sayfasında sunulan parametreleri V_{max} , I_{max} , ΔT_{max} , ve $Q_{C,max}$ için; modülün, *Seebeck katsayısı*, *elektriksel direnci* ve *ısıl iletkenliği* sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir [134, 161, 162]:

Seebeck katsayısı S_m (3.61) denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$S_m = V_{max}/T_H \quad (3.63)$$

Elektriksel direnç R_m (3.63) denklemi (3.60) içinde kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$R_m = V_{max}(1 - \Delta T_{max}/T_H)/I_{max} \quad (3.64)$$

Isıl iletkenlik K_m (3.63) ve (3.64) denklemleri (3.59)'da kullanılarak bulunabilir:

$$K_m = V_{max} I_{max} (T_H - \Delta T_{max}) / (2T_H \Delta T_{max}) \quad (3.65)$$

Alternatif olarak, eğer $Q_{C,max}$ verilmişse, S_m , R_m ve K_m denklemleri V_{max} kullanılmadan da bulunabilir:

$$S_m = \frac{2Q_{C,max}}{I_{max}(T_H + \Delta T_{max})} \quad (3.66)$$

$$R_m = S_m(T_H - \Delta T_{max})/I_{max} \quad (3.67)$$

$$K_m = \frac{Q_{C,max}}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{(T_H - \Delta T_{max})}{(T_H + \Delta T_{max})} \quad (3.68)$$

3.1.3. Sıcaklığa bağımlı malzeme özelliklerinin hesaplanması

Bazı veri sayfalarında, malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağılılığı, ikinci veya üçüncü dereceden polinom olarak tanımlanır [154, 164, 165]. Veri sayfasında ilgili polinom katsayıları verilmişse S_m , R_m ve K_m aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir:

S_m 'nin sıcaklık bağımlılığı, üçüncü dereceden bir polinom olarak tanımlanabilir:

$\Delta T = T_H - T_C = 0$ için

$$S_m(T) = S_1 + S_2T + S_3T^2 + S_4T^3 \quad (3.69)$$

$S_m(T)$ fonksiyonunun ortalama değeri, T_H üst limit ve T_C alt limit olmak üzere fonksiyonun integralinin $(T_H - T_C)$ 'ye bölünmesi ile bulunabilir [164, 166, 167].

$$S_{m,avr} = \frac{\int_{T_C}^{T_H} S_m(T) dT}{T_H - T_C} = \frac{(S_1T + S_2T^2/2 + S_3T^3/3 + S_4T^4/4)|_{T_C}^{T_H}}{T_H - T_C} \quad (3.70)$$

R_m 'nin sıcaklığa bağlı ifadesi:

Benzer olarak, $\Delta T = 0$ için

$$R_m(T) = R_1 + R_2T + R_3T^2 + R_4T^3 \quad (3.71)$$

$\Delta T \neq 0$ için ise, R_m 'nin ortalama değeri şu şekilde bulunur:

$$R_{m,avr} = \frac{\int_{T_C}^{T_H} R_m(T) dT}{T_H - T_C} = \frac{(R_1T + R_2T^2/2 + R_3T^3/3 + R_4T^4/4)|_{T_C}^{T_H}}{T_H - T_C} \quad (3.72)$$

K_m 'nin sıcaklığa bağlı ifadesi:

Benzer olarak, $\Delta T=0$ için;

$$K_m(T) = K_1 + K_2T + K_3T^2 + K_4T^3 \quad (3.73)$$

$\Delta T \neq 0$ için ise, K_m 'nin ortalama değeri şu şekilde bulunur:

$$K_{m,avr} = \frac{\int_{T_C}^{T_H} K_m(T) dT}{T_H - T_C} = \frac{(K_1T + K_2T^2/2 + K_3T^3/3 + K_4T^4/4)|_{T_C}^{T_H}}{T_H - T_C} \quad (3.74)$$

Sonrasında Thomson katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir [168]:

$$\tau_m = T \frac{dS_m(T)}{dT} = T(S_2 + 2S_3T + 3S_4T^2) = S_2T + 2S_3T^2 + 3S_4T^3 \quad (3.75)$$

Yüzey sıcaklıkları eşit değilse, modülün Thomson katsayısının ortalaması şu şekilde hesaplanabilir:

$$\tau_{m,avr} = \frac{\int_{T_C}^{T_H} T \cdot S_m'(T) dT}{T_H - T_C} = \frac{(S_2T^2/2 + 2S_3T^3/3 + 3S_4T^4/4)|_{T_C}^{T_H}}{T_H - T_C} \quad (3.76)$$

Sonrasında Thomson ısısı hesaplanır:

$$Q_{Thoms} = \tau_{m,avr} I (T_H - T_C) \quad (3.77)$$

Joule ısısına benzer şekilde Thomson etkisi de iki yüzeye eşit bölüştürülürse Thomson etkisi de dahil edilen ısı ve güç denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [168, 170, 171, 172].

TEG için,

$$Q_H = S_m I T_H + K_m (T_H - T_C) - I^2 R_m / 2 - Q_{Thoms} / 2 \quad (3.78)$$

$$Q_C = S_m I T_C + K_m (T_H - T_C) + I^2 R_m / 2 + Q_{Thoms} / 2 \quad (3.79)$$

$$P_{TEG} = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) - I^2 R_m - \tau_{m,avr} (T_H - T_C) \quad (3.80)$$

ve TEC için,

$$Q_C = S_m I T_C - K_m (T_H - T_C) - I^2 R_m / 2 + Q_{Thoms} / 2 \quad (3.81)$$

$$Q_H = S_m I T_H - K_m (T_H - T_C) + I^2 R_m / 2 - Q_{Thoms} / 2 \quad (3.82)$$

$$P_{TEC} = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) + I^2 R_m - \tau_{m,avr} (T_H - T_C) \quad (3.83)$$

olur.

3.2. TEM'in İki Yönlü Modellenmesi

Temel olarak, TEM terminal iletkenlerinin gerilim polaritesi ve akım yönü davranışı, yüzeylerin hangisinin sıcak yüzey ve hangisinin soğuk yüzey olduğuna bağlıdır. TEG ve TEC çalışmasını karşılaştırmak amacıyla, TEG modu için seçilen bir yüzey sıcak yüzey iken, terminallere TEG modu ile aynı polariteye sahip bir gerilim uygulanırsa, aynı yüzey TEC modu için de sıcak yüzeydir. Ancak bu durumda TEC için akım yönü, TEG modundakinin tersidir. TEC modu için sıcak yüzeyi, soğuk yüzeye dönüştürmek için gerilim polaritesi tersine çevrilmelidir ve bu durumda akım yönü TEG modundaki akım yönü ile aynı olacaktır.

3.2.1. Akım yönü ve gerilim polaritesinin etkisi

Bu bölümde, TEM'in elektrik ve ısıl terminallerinin polaritelerine göre TEG ve TEC modu özellikleri açıklanmaktadır. TEM'in yüzeylerinin adlandırılması sırasıyla *alan taraf* ve *veren taraf* olarak yapılmış olup, burada TEG modu için *alan tarafa* bir ısı kaynağının bağlı olduğu ve *veren tarafa* bir ısı alıcı bağlı olduğu düşünülmüştür. TEC modunda ise, aynı taraflara aynı adlar uygulanmış, ancak bu sefer alan tarafa soğutulacak nesne ve veren tarafa ısı alıcı bağlanmıştır. Yüksek/düşük veya sıcak/soğuk ifadeleri kullanmak yerine, TEM'in yüzeyleri fiziksel bir bakış açısıyla, sabit şekilde etiketlenerek adlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen model ile, farklı çalışma koşulları altında, değişken polaritelerde simülasyon yapılabilmesi için yüzeyler kısaca A ve E şeklinde adlandırılmıştır. A, E, H, ve C alt simgeleri *alan*, *veren*, *sıcak* ve *soğuk* yüzey için sırasıyla kullanılmıştır. A ve E yüzeyleri H veya C olabilir. Çünkü, TEM'lerin elektriksel polariteleri değiştirilirse ısı polariteleri de değişmektedir. Yani, bir yüzey sıcak yüzey veya soğuk yüzey olabilir.

TEM'in iki yönlü ve çok amaçlı çalışmasını modellemek için ısı ve elektriksel kutuplara bağlı olarak dört farklı senaryo tanımlanmıştır. İki yönlü modelleme için bir algoritma geliştirmek amacıyla her iki yüzey için ısı dengesi denklemleri ve her iki mod için güç denklemleri elde edilmiştir. Güç denklemi, bu çalışmada pozitif işaretin TEG işlemi olarak ve negatif işaretin TEC işlemi olarak referans alındığı çıkış gücü olarak ayarlanmıştır. Aşağıdaki bölümler, elektriksel ve ısı polariteler ile çalışma modları, devreler ve denklemler arasındaki ilişkiyi kısaca özetlemektedir.

3.2.1.1. Pozitif (+) akım yönü ve pozitif (+) gerilim polaritesi koşullarındaki TEG çalışması

Elektriksel yükü besleyen bir TEG modülünün eşdeğer devresi Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Burada yüzey sıcaklıkları $T_A > T_E$ olmak üzere modül devresi, modülün Seebeck gerilimi ve iç direncinden oluşur. Modül terminallerindeki akım ve gerilim, şekilde gösterildiği gibi sırasıyla amper-metre ve volt-metre ile ölçülmektedir. Bu durumda, ölçülen akım ve gerilim işaretleri şekilde gösterildiği gibi sırasıyla '+' ve '-' şeklindedir.

Bu koşullar için ısı ve güç denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

Isı kaynağına temaslı olan sıcak yüzeyden alınan ısı,

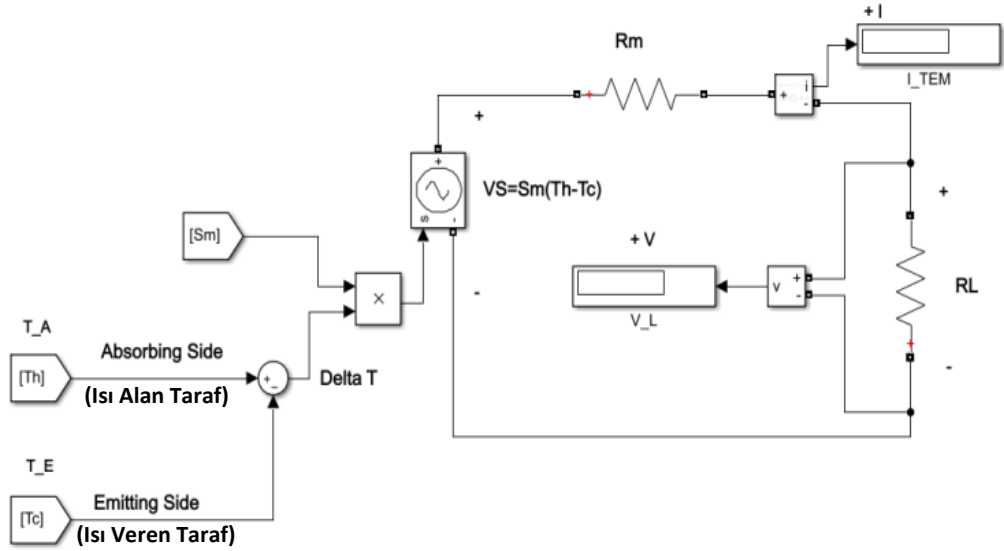
$$Q_A = Q_H = S_m I T_H + K_m (T_H - T_C) - I^2 R_m / 2 \quad (3.84)$$

Soğuk yüzeyden ısı alıcı vasıtasıyla çevreye verilen ısı,

$$Q_E = Q_C = S_m I T_C + K_m (T_H - T_C) + I^2 R_m / 2 \quad (3.85)$$

TEG tarafından üretilen güç,

$$P = Q_A - Q_E = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) - I^2 R_m \quad (3.86)$$



Şekil 3.3. $+I$ ve $+V$ koşullarında R_L yükünü besleyen bir TEG modülün eşdeğer devresi [133].

3.2.1.2. Pozitif (+) akım yönü ve negatif (-) gerilim polaritesi koşullarındaki TEC çalışması

Bir DC gerilim kaynağı tarafından beslenen TEC modülünün eşdeğer devresi, yüzey sıcaklıkları $T_A < T_E$ olmak üzere Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu durumda, ölçülen akım ve gerilim işaretleri şekilde gösterildiği gibi sırasıyla '+' ve '-' şeklindedir.

Bu koşullar için ısı ve güç denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

Soğutulan ortama veya cisime temaslı olan soğuk yüzeyden alınan ısı,

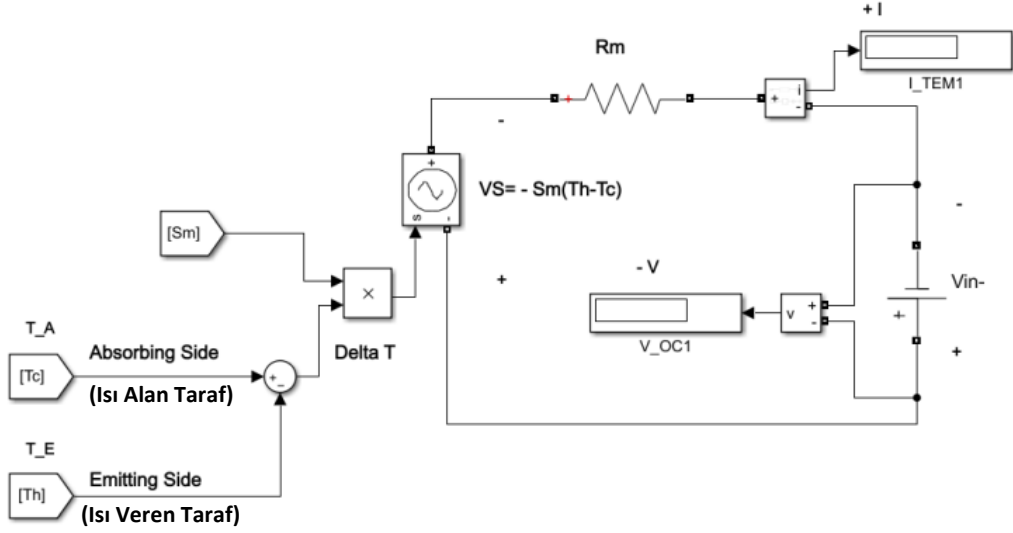
$$Q_A = Q_C = S_m I T_C + K_m (T_C - T_H) - I^2 R_m / 2 \quad (3.87)$$

Sıcak yüzeyden ısı alıcı vasıtasıyla çevreye verilen ısı,

$$Q_E = Q_H = S_m I T_H + K_m (T_C - T_H) + I^2 R_m / 2 \quad (3.88)$$

TEC tarafından tüketilen güç,

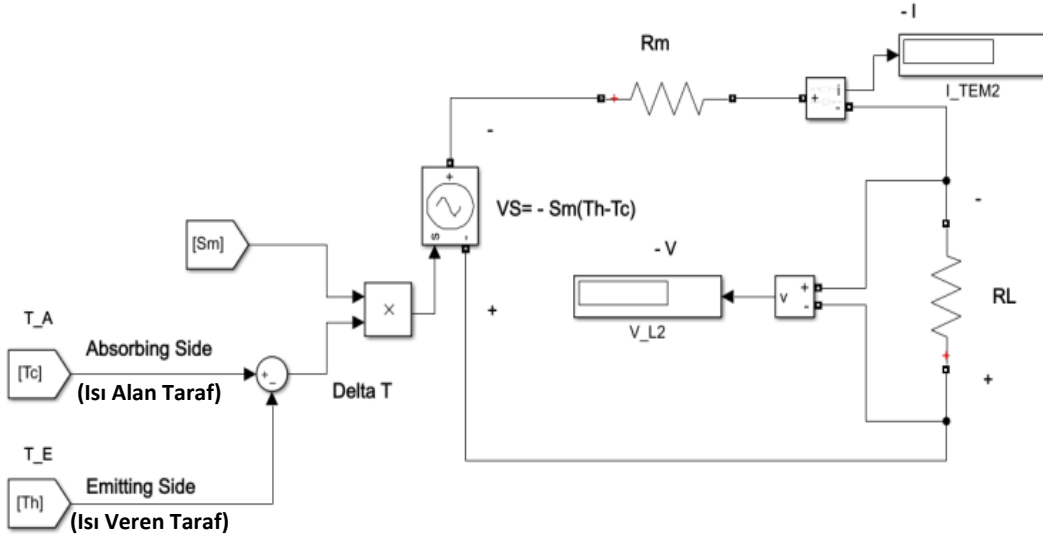
$$P = Q_A - Q_E = Q_C - Q_H = -[S_m I (T_H - T_C) + I^2 R_m] \quad (3.89)$$



Şekil 3.4. $+I$ ve $-V$ koşullarındaki bir TEC modülün eşdeğer devresi [133].

3.2.1.3. Negatif (-) akım yönü ve negatif (-) gerilim polaritesi koşullarındaki TEG çalışması

Elektriksel yükü besleyen bir TEG modülünün eşdeğer devresi, yüzey sıcaklıkları $T_A < T_E$ olmak üzere Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Bu durumda, ölçülen akım ve gerilim işaretleri şekilde gösterildiği gibi sırasıyla ‘-’ ve ‘-’ şeklindedir.



Şekil 3.5. $-I$ ve $-V$ koşullarında R_L yükünü besleyen bir TEG modülün eşdeğer devresi [133].

Bu koşullar için ısı ve güç denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

‘A’ yüzeyinden geçen ısı,

$$Q_A = -Q_C = -[S_m I T_C + K_m (T_H - T_C) + I^2 R_m / 2] \quad (3.90)$$

'E' yüzeyinden geçen ısı,

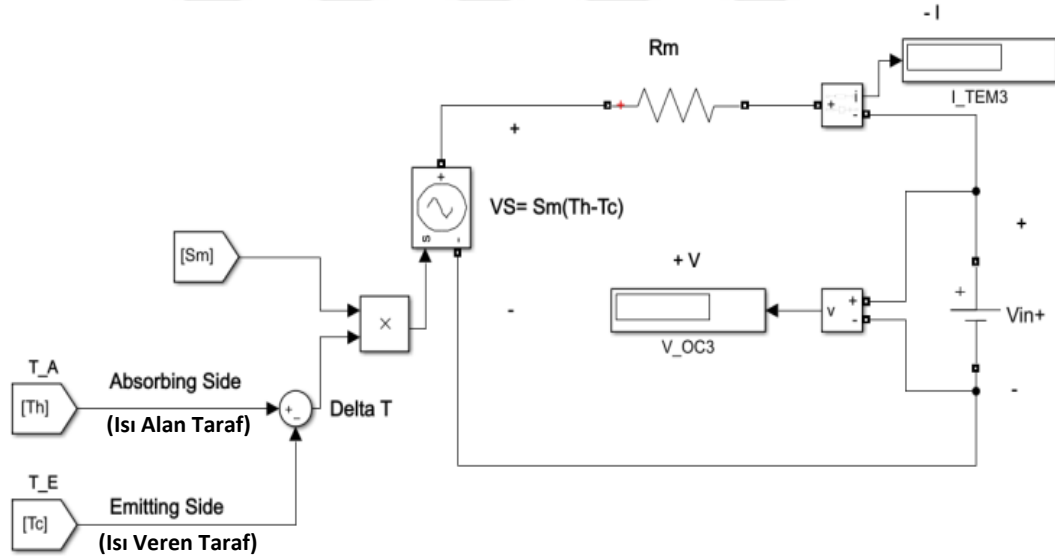
$$Q_E = -Q_H = -[S_m I T_H + K_m (T_H - T_C) - I^2 R_m / 2] \quad (3.91)$$

TEG tarafından üretilen güç,

$$P = Q_A - Q_E = -Q_C - (-Q_H) = Q_H - Q_C = S_m I (T_H - T_C) - I^2 R_m \quad (3.92)$$

3.2.1.4. Negatif (-) akım yönü ve pozitif (+) gerilim polaritesi koşullarındaki TEC çalışması

Bir DC gerilim kaynağı tarafından beslenen TEC modülünün eşdeğer devresi, yüzey sıcaklıkları $T_A > T_E$ olmak üzere Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Bu durumda, ölçülen akım ve gerilim işaretleri şekilde gösterildiği gibi sırasıyla '-' ve '+' şeklindedir.



Şekil 3.6. -I ve +V koşullarındaki bir TEC modülün eşdeğer devresi [133].

Bu koşullar için ısı ve güç denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

'A' yüzeyinden geçen ısı,

$$Q_A = -Q_H = -[S_m I T_H + K_m (T_C - T_H) + I^2 R_m / 2] \quad (3.93)$$

'E' yüzeyinden geçen ısı,

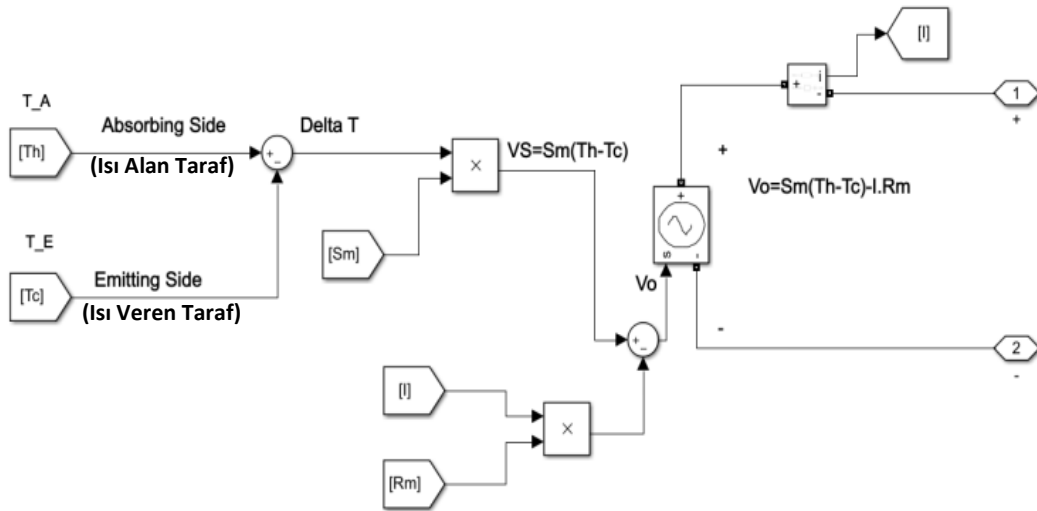
$$Q_E = -Q_C = -[S_m I T_C + K_m (T_C - T_H) - I^2 R_m / 2] \quad (3.94)$$

TEC tarafından tüketilen güç,

$$P = Q_A - Q_E = Q_C - Q_H = -[S_m I (T_H - T_C) + I^2 R_m] \quad (3.95)$$

3.3. MATLAB/Simulink Modelinin Oluşturulması

Bir TEM'in elektrik modeli, Seebeck gerilimi için kontrollü bir gerilim kaynağı bloğu ve modülün iç direnci için bir direnç bloğu ile MATLAB/Simulink kullanılarak basitçe oluşturulabilir. Bu yöntem kullanılarak, önce modül direncinin hesaplanması veya bilinmesi gerekir ve ardından direnç değeri elektriksel simülasyonlarda kullanılır. Direnç değerini manuel olarak yazmadan, doğrudan simüle etmek için ise Simscape kütüphanesinden bir değişken direnç bloğu kullanılabilir ve hesaplanan direnç değeri, değişken direnç bloğu için bir kontrol değeri olarak kullanılabilir [163]. Basitleştirmek için TEM'in gerilim çıkış terminaleri Şekil 3.7'de gösterildiği gibi modellenmiştir. Bu yöntem kullanılarak yapı bloğundan hesaplanan modül parametreleri [146]'daki gibi herhangi bir düzenleme olmaksızın simülasyonlarda doğrudan kullanılabilir.



Şekil 3.7. Kontrollü gerilim kaynağı ile TEM'in modeli [133].

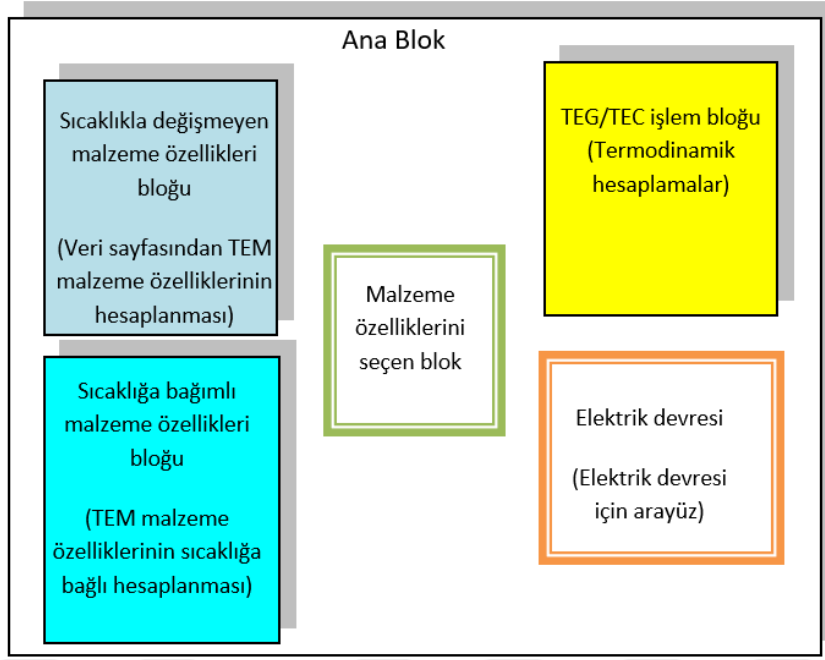
Cihaz modeli, elektriksel olarak seri ve paralel bağlı TEM'leri tek bir blokta kullanmak üzere geliştirilmiştir. *Ana blok*, istenen TE sistem modelini oluşturan bloklar arasındaki arayüzdür. Modelin parçaları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

TEM malzeme özellikleri, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi, malzeme özelliklerinin yüzey sıcaklıklarından bağımsız olduğu varsayımıyla, sabit malzeme özellikleri bloğuna sahip veri sayfası parametreleri kullanılarak çıkarılır. Simulink’teki *Sabit blok* tipi, alt sistem için maskenin iletişim kutusu ile yazılan *Sabit malzeme özellikleri* bloğunun giriş parametreleri için kullanılır. Maskeye girilen değerler, onları bağlamak için Sabit bloklarla aynı adlarla kullanılır. Ayrıca R_m ve K_m değerlerinin veri sayfasında verilmesi halinde modelde doğrudan kullanılabilmesi seçeneği modele dahil edilmiştir. TEM malzeme özellikleri, Şekil 3.9’da gösterilen akış şeması kullanılarak veri sayfası parametreleriyle hesaplanır. Ayrıca, toplam TEM grubu sayısı için, bu özellikler (3.8), (3.9) ve (3.10) denklemleri kullanılarak tek cihaz eşdeğer değerlerine dönüştürülür. MATLAB fonksiyon bloğu içerisinde yapılan hesaplamalarla ve bloğun çıkışları $S_{const,te}$, $R_{const,te}$, $K_{const,te}$ ve $Z_{const,te}$ şeklindedir.

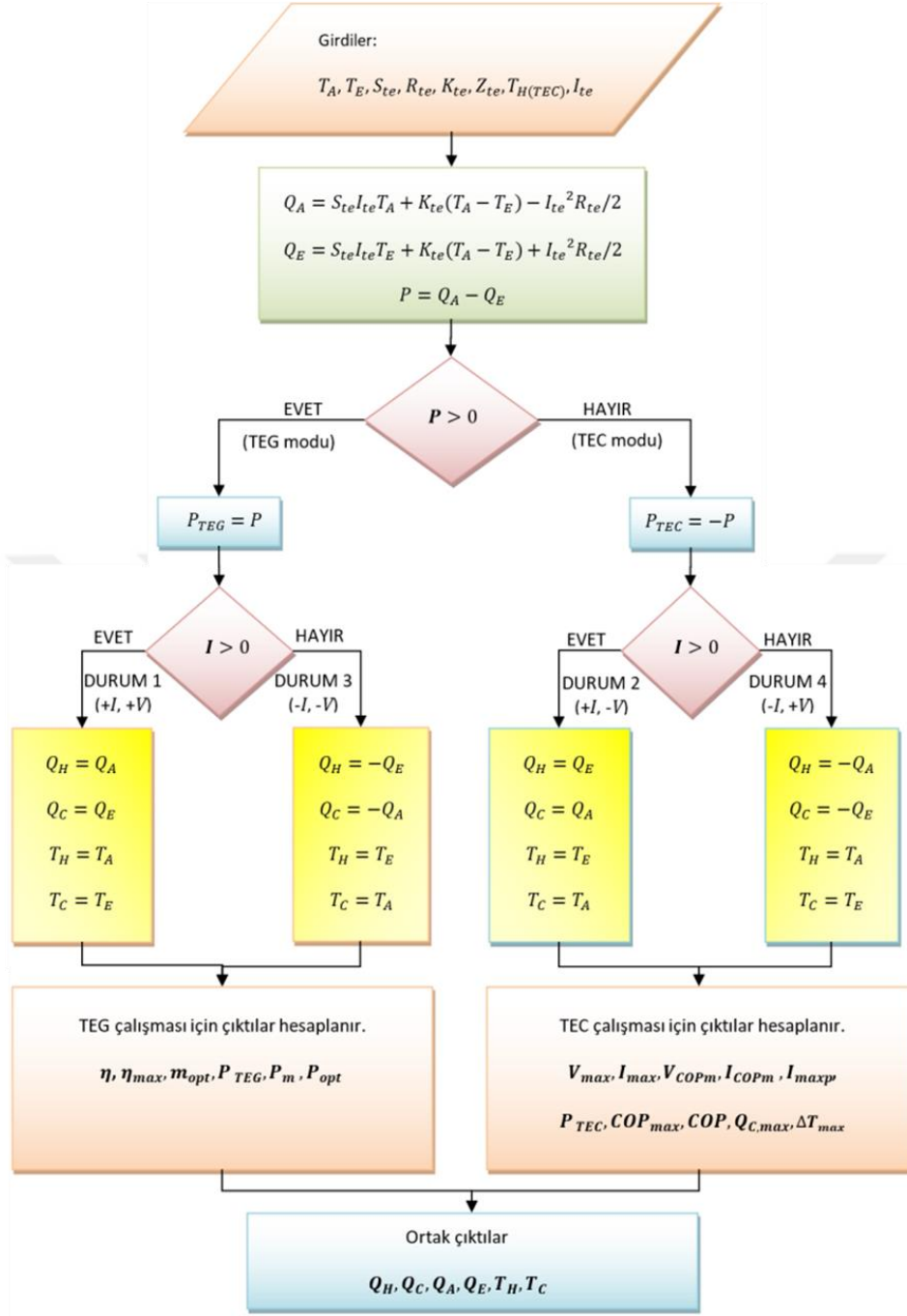
TE cihazının sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini hesaplayan blok Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu bloğun girdileri, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin katsayıları, yüzeylerin gerçek sıcaklık değerleri, seri bağlı modül sayısı ve paralel bağlı modül sayısıdır. Bloğun hesaplanan çıktıları ise, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri ve Thomson katsayısıdır.

Girilen verilere göre TE cihazının malzeme özelliklerini seçen bloklar Şekil 3.13’te gösterilmiştir. S_2 , R_2 ve K_2 katsayıları sıfır ise (bu durumda üst mertebe katsayılar sıfır kabul edilir), sıcaklık bağımlılık dikkate alınamaz ve malzeme özellikleri, özelliklerin kenarların sıcaklığı ile değişmediği varsayıldığı *sabit malzeme özellikleri* bloğundan kullanılır. *Seçici* blokların çıkışları *işlem* bloğunda kullanılır.

Termodinamik denklemler, Şekil 3.16’da gösterilen *TEG/TEC işlem bloğu* kullanılarak hesaplanır. Her iki yüzeyin ısısı, güç, verimlilik, *COP*, diğer performans parametreleri ve maksimum parametreler, Şekil 3.10’da gösterilen akış şeması ve Bölüm 3.2.1.’de belirtilen denklemler kullanılarak elde edilir. Akış şemasında, önce TEG işlemi için ısı dengesi denklemleri kullanılarak her iki tarafın ısı değerleri hesaplanır. Ardından, ısı dengesi koşullarına göre doğru hesaplamaları yapmak için polariteye ve çalışma moduna göre algoritma kullanılarak denklemler düzenlenir. Örneğin Bölüm 3.2.1.’deki 3. ve 4. durumlarda negatif akım, ısı denklemlerinin negatif olmasına neden olur. Çıkış parametrelerini hesaplamak için negatif ısı değerleri pozitif değerlere çevrilir ve tarafların hangisinin sıcak taraf ve hangisinin soğuk taraf olduğu belirlenir.



Şekil 3.8. Önerilen TE cihaz modelinin iç yapısını özetleyen blok çizim [133].



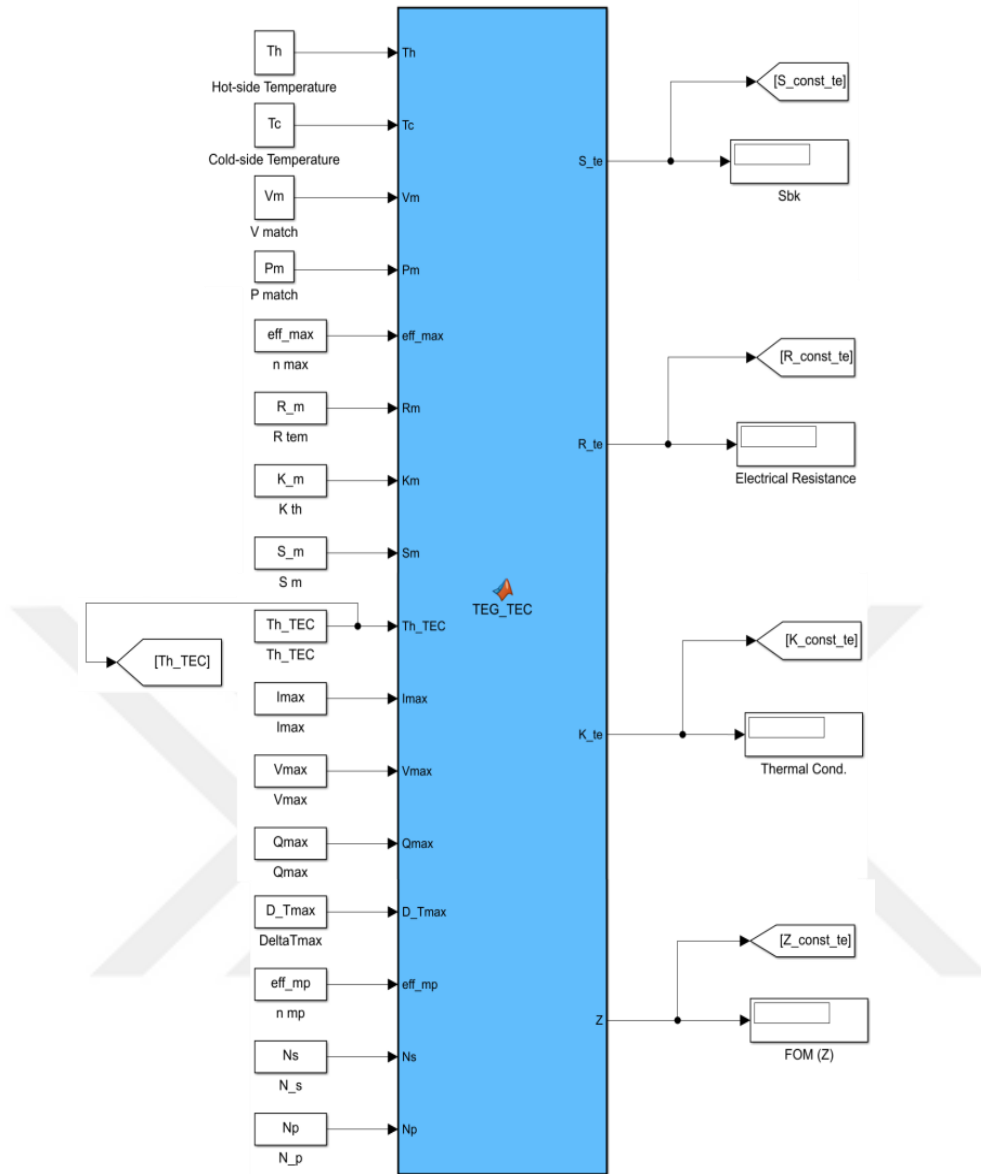
Şekil 3.10. TEG/TEC çalışması ile performans ve maksimum parametrelerin hesaplanmasının akış diyagramı [133].

$T_A, T_E, S_{te}, R_{te}, K_{te}, Z_{te}, T_{H(TEC)}, \tau_{te}$ ve I_{te} , modellenen cihazın akımının $I_{te} = N_p I$ olduğu bu bloğun giriş parametreleri olarak kullanılır. Hesaplanan çıkış değerleri, TEG çalışması için $\eta, \eta_{max}, m_{opt}, P_{TEG}, P_m$ ve P_{opt} ve TEC çalışması için $V_{max}, I_{max}, V_{COPm}, I_{COPm}, I_{maxp}, P_{TEC}, COP_{max}, COP, Q_{C,max}, \Delta T_{max}$ 'tır. $T_{H(TEC)}$ TEC'in sıcak tarafını temsil eder ve TEC veri sayfasından elde edilir. Bu nedenle, bir TEG'i TEC olarak

kullanmak için, veri sayfasında bu bilgi verilmemişse bile, parametre girişi iletişim kutusunda bu parametrenin boş olmaması gerekir. Örneğin, TEC veri sayfalarında modülün sıcak tarafı için verilen en yaygın değerler 25°C veya 27°C'dir.

TEG olarak çalışırken TEC modunun çıkış değerleri anlamsız olur. Benzer şekilde TEM, TEC modunda çalışırken, hesaplanan TEG'e özgü çıkış değerleri işe yaramaz. Bu sebeple, karışıklığı önlemek amacıyla zıt çalışma modu için çıkış değerleri modelde sıfır olarak ayarlanmıştır.

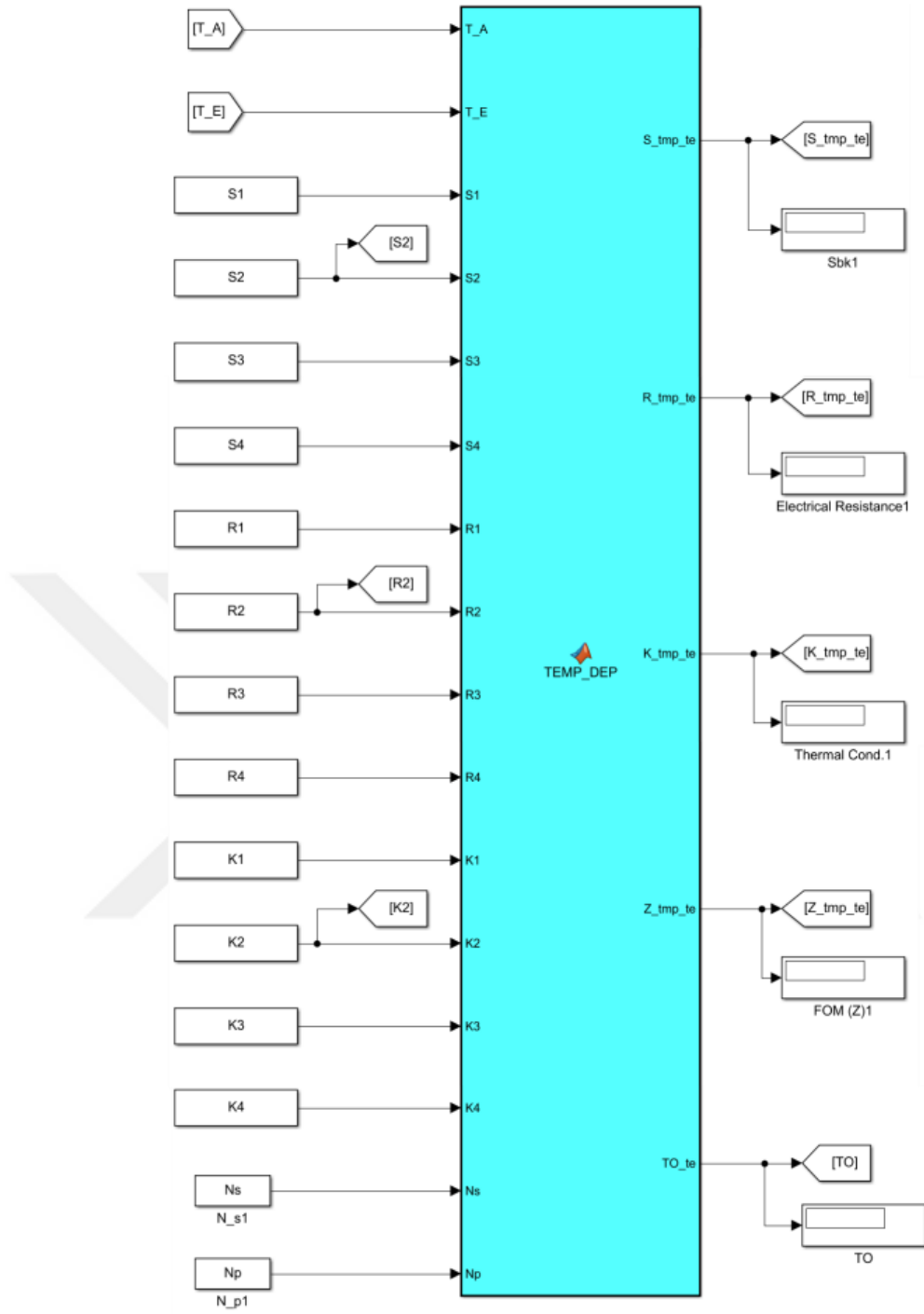
N_s, N_p adet TEM'den oluşan eşdeğer TE sistemini oluşturan elektrik devresi Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Bu devrede gösterilen portlar, modelin ısı ve elektriksel bağlantı uçlarını oluşturur. Tek blok halinde birleştirilmiş TE sisteminin nihai Simulink modeli ise Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Daha iyi bir görünüm için [173]'teki ticari bir modüle ait resim simge görüntüsü olarak kullanılmıştır. Elektriksel bağlantı noktaları sağ tarafta ve ısı bağlantı noktaları sol taraftadır. Ayrıca, hesaplanan parametrelerin blok dışından okunabilmesi için ölçüm portu oluşturulmuştur.



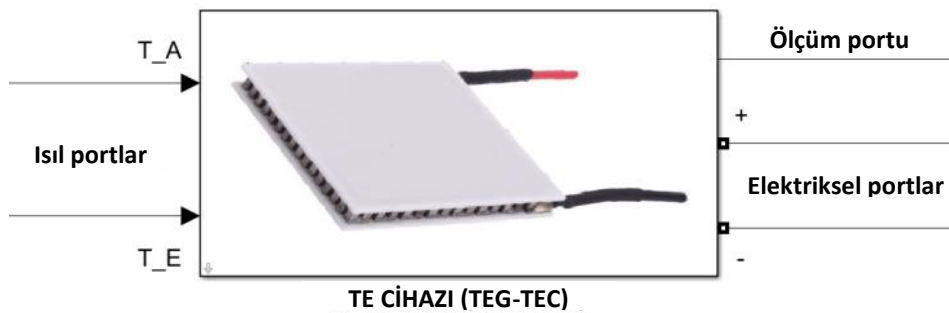
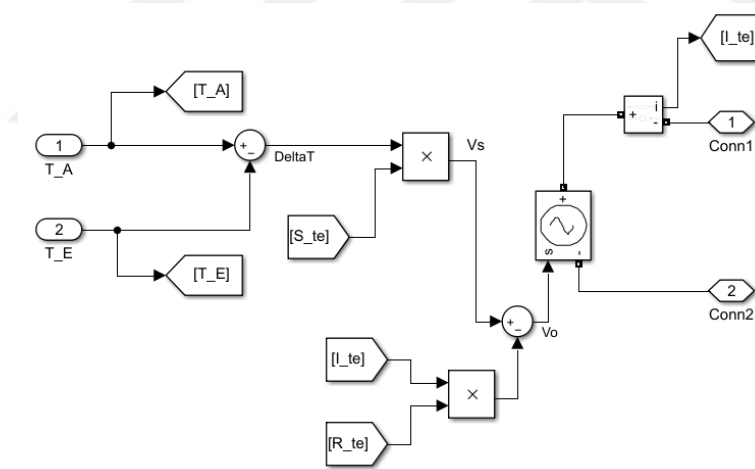
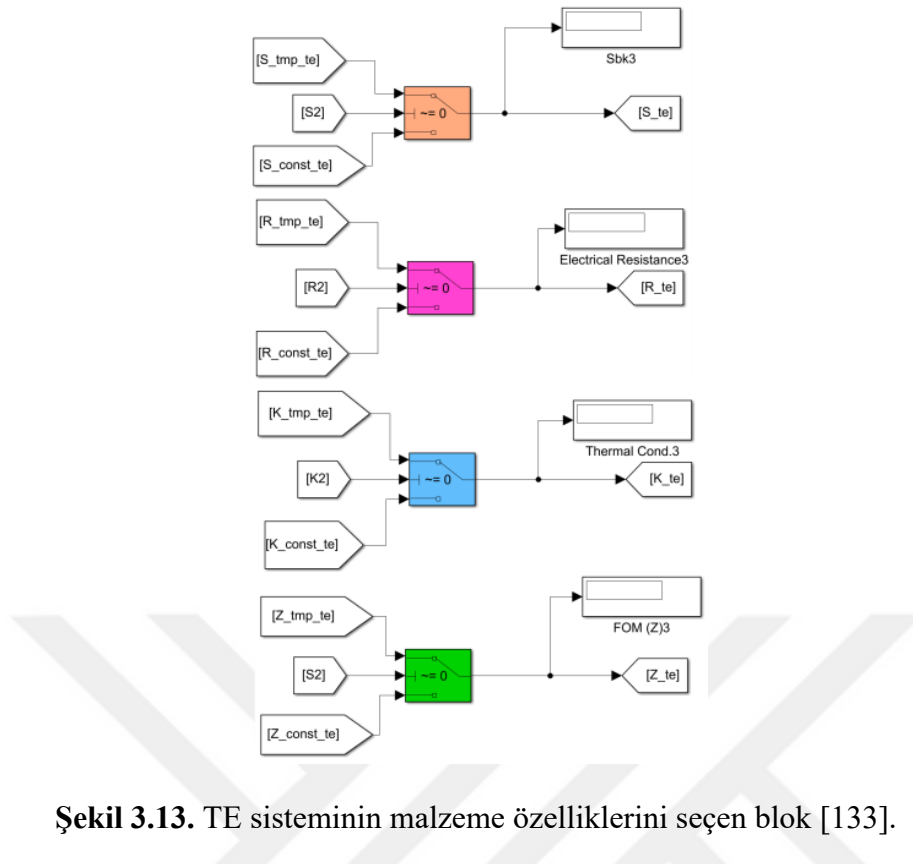
Şekil 3.11. TE sisteminin sabit malzeme özelliklerini hesaplayan blok [133].

3.4. Simülasyonlar

Örneğin, karakteristik grafikleri çıkarmak için bir HZ-20 HV TEG, 9500/071/060B TEC ve TB-127-1.4-2.0 TEC simüle edilir. Simülasyonlar için modüllerin veri seti parametreleri [173-176]'dan elde edilmiştir. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de modellenen TE cihazının parametre giriş iletişim kutusunda kullanılan veriler sunulmuştur. Sabit malzeme özellikleri Tablo 3.1 kullanılarak ve sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri Tablo 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Veri sayfasında belirtilmişse sıcaklığa bağımlılık dikkate alınır, aksi halde dikkate alınmaz ve malzeme özelliklerinin sabit olduğu varsayılır.



Şekil 3.12. TE sisteminin sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini hesaplayan blok [133].



TEG HZ-20 HV için, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18, elektrik terminallerine bir akım kaynağı bağlayarak ve akımı (0'dan I_{sc} 'ye) zamanla artırarak çizilirken, $T_A=T_H=523^\circ\text{K}$ ve $T_E=T_C=323^\circ\text{K}$, burada sıcaklık bağımlılığı göz ardı edilir. Şekillerden V_{OC} , V_m , P_m ve η_{max} parametrelerinin sırasıyla %10,8 V, 5,4 V, 24,3 W ve %2,749 olarak başarıyla elde edildiği görülmektedir.

TEC 9500/071/060B için, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20, elektrik terminallerine bir akım kaynağı bağlanarak ve $T_A=T_C$ ve $T_E=T_H=300^\circ\text{K}$ iken akım (0 ila I_{max}) zamanla artırılarak çizilmiştir. Ancak 7 farklı sabit ΔT (0 ila 70°K) değerine ulaşmak için $T_A = T_H - \Delta T$, 323°K ila 253°K olarak kullanılır. Bu modül için sıcaklığa bağlılığı ilişkin katsayılar verilmiş olduğundan, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri hesaplanmış ve aynı ΔT için aynı renklerle eğriler çizilerek simülasyonlar, sabit malzeme özellikleri simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Thomson ısısı'nın etkisini içeren eğriler de şekillere eklenmiştir.

Farklı ΔT seviyeleri için akım ve COP eğrileri Şekil 3.19'da çizilmiştir. Şekilde sunulan küçük resim, veri sayfasından eğrileri içerir ve çeşitli ΔT 'ler için veri sayfasından elde edilen maksimum COP değerleri mavi noktalar ile gösterilmiştir. Örneğin, $\Delta T=10^\circ\text{K}$ olduğunda, Thomson ısısı dahil edilmeden COP_{max} 3,399 olarak bulunmuştur ve bu değer veri sayfasındaki değer ile aynıdır. Bu arada, Thomson ısısı ile COP_{max} 3,7147 ve sabit özelliklerle COP_{max} 3,8057 olarak bulunmuştur. Ancak, $\Delta T=50^\circ\text{K}$ olduğunda, Thomson ısısı dahil edilmeden COP_{max} 0,247 olup veri sayfasıyla aynıdır. Ancak, Thomson ısısı ile COP_{max} 0,341 ve sabit malzeme özellikleriyle COP_{max} 0,268'dir.

Farklı ΔT değerleri için soğutma gücüne karşı akım eğrileri Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Şekilde sunulan küçük resim, TEC'in veri sayfasından alınmış bir grafik. Veri sayfasından alınmış olan, maksimum akımdaki soğutma gücünün maksimum değerleri mavi noktalarla ve minimum soğutma gücündeki akım değerleri kırmızı noktalarla gösterilmektedir.

TEC TB-127-1.4-2.0 için, Şekil 3.21'de gösterilen farklı akım seviyeleri için soğutma gücüne karşı ΔT eğrilerini çizmek için aynı konfigürasyon kullanılır; ancak bu durumda T_A sıcaklığı zamanla $T_H - \Delta T_{max}$ 'a düşürülürken, sıcaklık bağımlılığının göz ardı edildiği akım kaynağı için sürekli olarak dört farklı I_{max} yüzdesi uygulanır. Sonuçlar, modülün veri sayfasından [176] alınan şekil içindeki küçük resimdeki ile aynıdır. $I=I_{max}$

olduğunda soğutma gücünün maksimum değerinin 45 W ve ΔT_{max} 'ın 70°K olduğu görülmektedir.

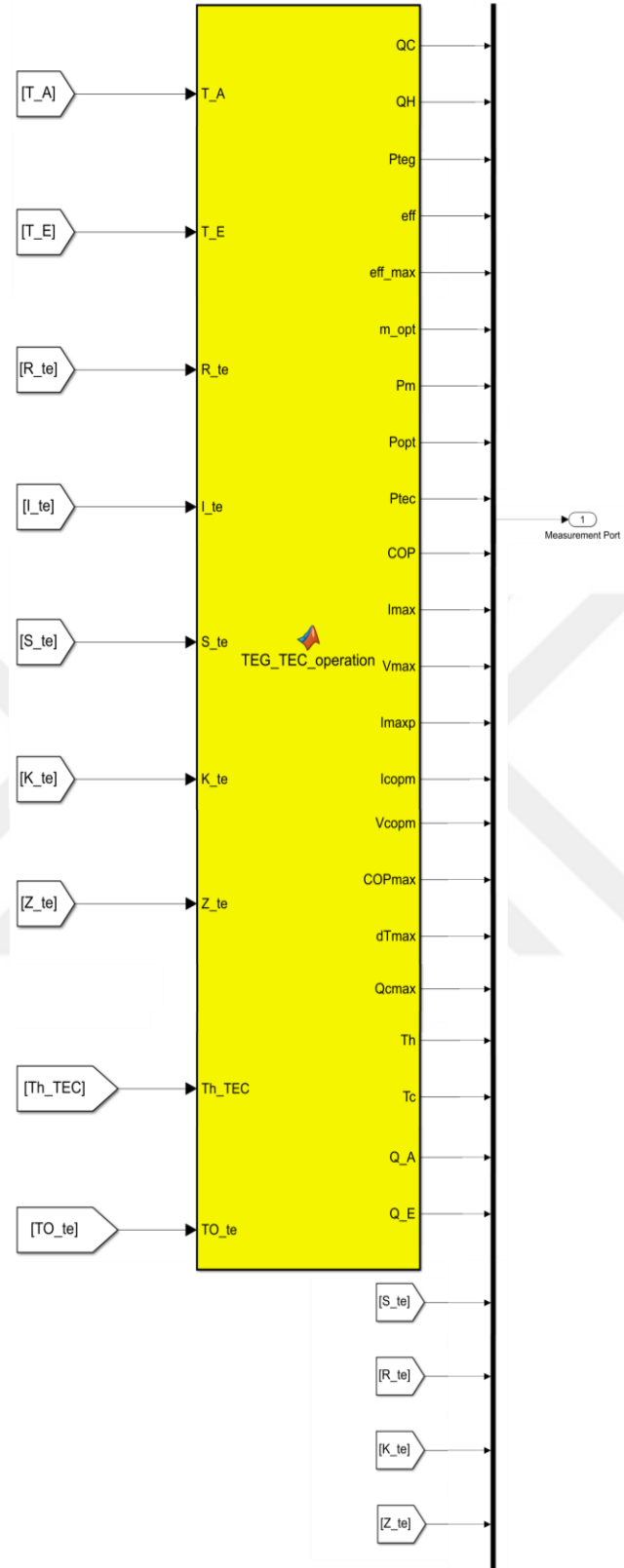
9500/071/060B TEC için sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin katsayıları Tablo 3.2'de listelenmiştir [164, 175].

Tablo 3.1. Simülasyonlarda kullanılan TEM'lere ait parametreler.

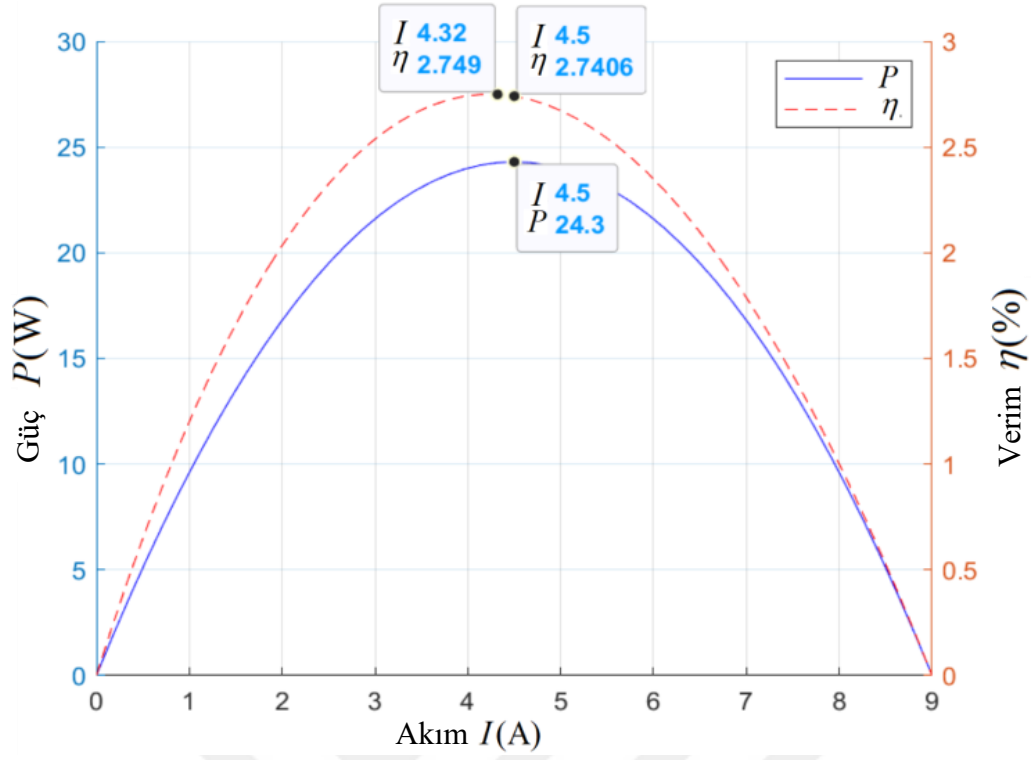
PARAMETRE	HZ-20 HV (TEG)	9500/071/060B (TEC)	TB-127-1.4-2.0 (TEC)
T_H	250°C (523°K)	-	-
T_C	50°C (323°K)	-	-
V_m	5.4 V	-	-
P_m	24.3 W	-	-
η_{mp}	-	-	-
η_{max}	2.75%	-	-
$T_{H(TEC)}$	27°C (300°K)	50°C (323°K)	27°C (300°K)
ΔT_{max}	-	72°K	70°K
I_{max}	-	6 A	4.6 A
V_{max}	-	9.8 V	15.9 V
Q_{max}	-	32	45
N_s	1	1	1
N_p	1	1	1

Tablo 3.2. 9500/071/060B TEC için sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri katsayıları.

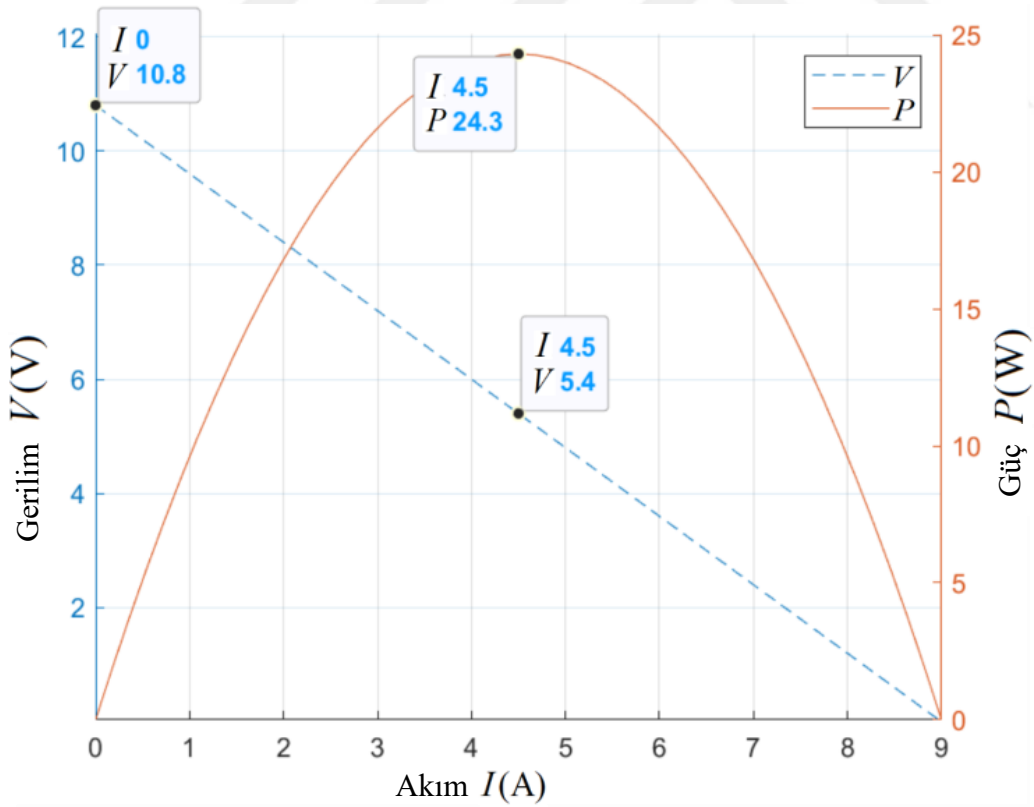
S	R	K
$S_1 = 1.33450 \times 10^{-2}$	$R_1 = 2.08317$	$K_1 = 4.76218 \times 10^{-1}$
$S_2 = -5.37574 \times 10^{-5}$	$R_2 = -1.98763 \times 10^{-2}$	$K_2 = -3.89821 \times 10^{-6}$
$S_3 = 7.42731 \times 10^{-7}$	$R_3 = 8.53832 \times 10^{-5}$	$K_3 = -8.64864 \times 10^{-6}$
$S_4 = -1.27141 \times 10^{-9}$	$R_4 = -9.03143 \times 10^{-8}$	$K_4 = 2.20869 \times 10^{-8}$



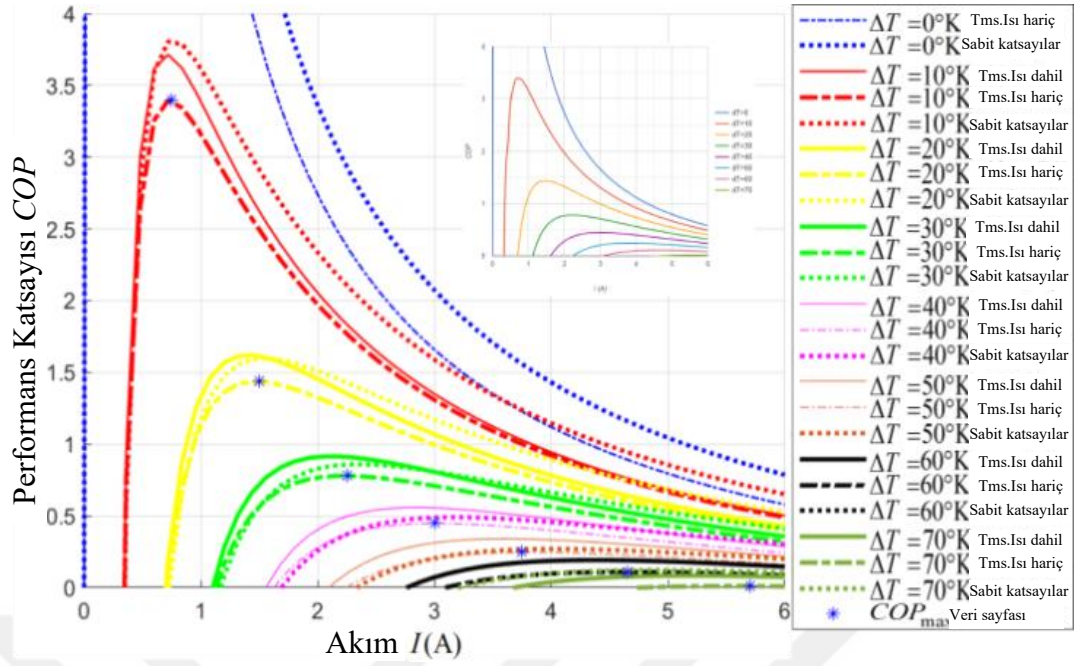
Şekil 3.16. Hesaplanan tüm parametrelerin çıktılarının ölçüm portuna bağlandığı, TE sisteminin termodinamik hesaplamalarını yapan blok [133].



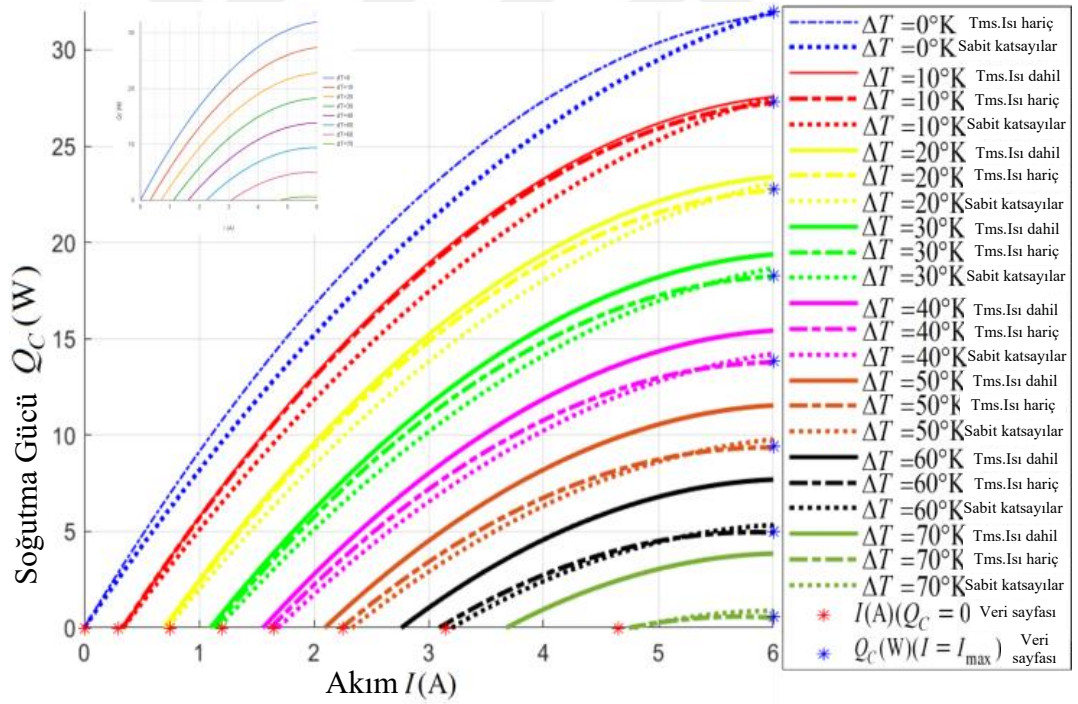
Şekil 3.17. HZ-20 HV TEG için güç ve verimin akıma göre değişim grafikleri [133].



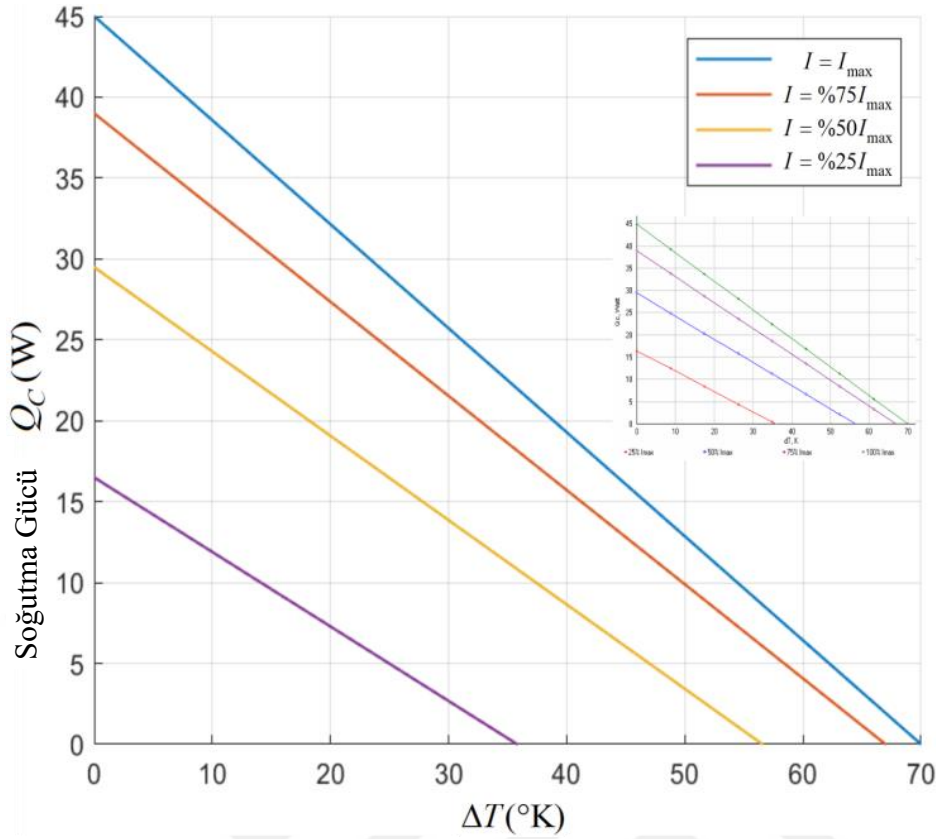
Şekil 3.18. HZ-20 HV TEG için gerilim ve gücün akıma göre değişim grafikleri [133].



Şekil 3.19. 9500/071/060B TEC için farklı ΔT değerlerindeki COP -akım karakteristikleri [133].



Şekil 3.20. 9500/071/060B TEC modülün farklı ΔT değerlerinde soğutma gücü-akım karakteristikleri [133].



Şekil 3.21. TB-127-1.4-2.0 TEC modülün farklı akım değerlerinde soğutma gücü- ΔT karakteristikleri [133].

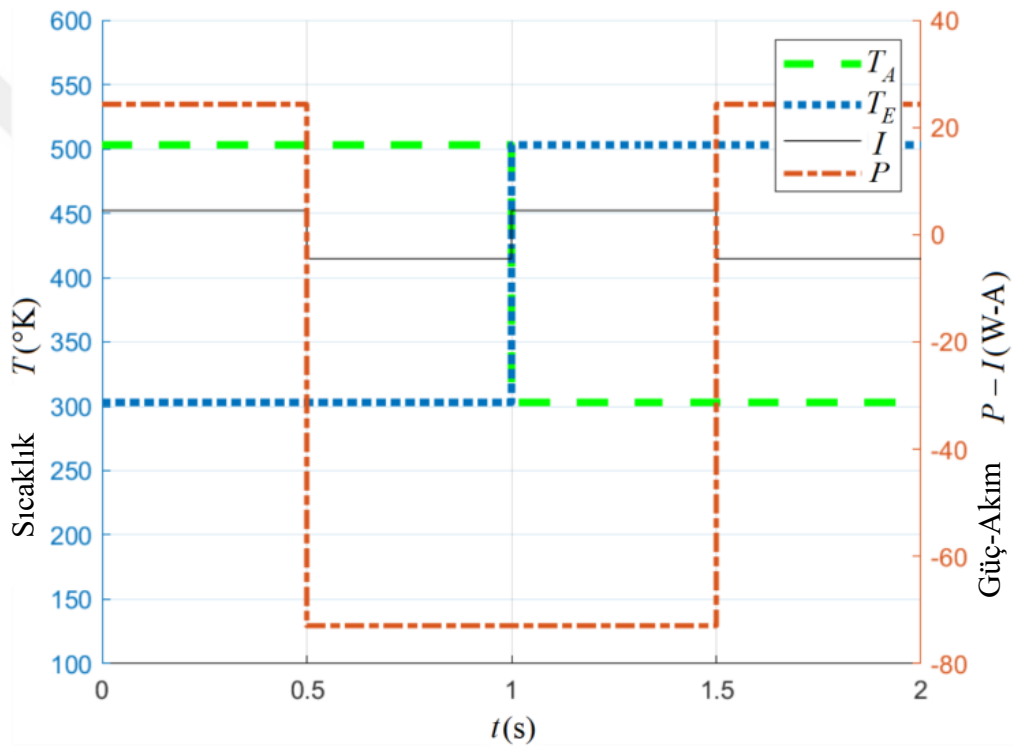
Şekil 3.17 ve Şekil 3.21 arasında gösterilen grafikler, TEG ve TEC modüllerinin ayrı ayrı simüle edildiği sabit polarite koşullarıyla çizilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 3.10'daki akış şemasıyla açıklanan TEG-TEC modları arasında geçiş yapmak için kullanılan algoritmayı doğrulamak için, Bölüm 3.2.1.'de bahsedilen dört koşulun tümü için bir HZ-20 HV TEG simüle edilmiştir. Isıl bağlantı noktalarına değişken sıcaklıklar uygulanır ve kutup terslerini elde etmek için elektrik bağlantı noktalarına değişken bir akım kaynağı bağlanır. Şekil 3.20'de gösterildiği gibi; 2 saniye periyodu için, 0–1 s'de $T_A > T_E$ ve 1–2 s'de $T_A < T_E$, TEM'in Seebeck voltajının polaritesinin tersini temsil eder.

Değişken akım yönü için, kontrollü akım kaynağı ile 1 saniye periyoduna sahip bir sinyal kullanılır. Burada akım değeri TEG'in uyumlu yük akımı olarak seçilir. TEM akımı 0-0,5 ve 1-1,5'de pozitifken, 0,5-1 ve 1,5-2 saniye aralıklarında negatif olur.

Model, kararlı durum için ısı dengesi denklemleriyle oluşturulduğundan, model davranışı zaman gecikmelerini içermemektedir.

Şekil 3.22'deki zaman ekseninin 1. çeyreğinde, TEM pozitif akım ve Seebeck voltajı ile bir TEG olarak çalıştığında hesaplanan güç pozitifdir.

2. çeyrekte, hesaplanan güç negatiftir; burada TEM, negatif akım ve pozitif Seebeck gerilimi ile TEC olarak çalışır; bu, sıcak ve soğuk tarafların 1. çeyrek taraflarla aynı olduğu anlamına gelir.
3. çeyrekte, hesaplanan güç negatiftir, burada TEM pozitif akım ve negatif Seebeck gerilimi ile TEC olarak çalışır, bu da sıcak ve soğuk tarafların 1. çeyrekteki taraflara zıt olduğu anlamına gelir.
4. çeyrekte hesaplanan güç pozitiftir, burada TEM negatif akım ve negatif Seebeck gerilimi ile bir TEG olarak çalışır, yani sıcak ve soğuk taraflar 1. çeyreğin taraflarına zıttır.



Şekil 3.22. Kullanılan HZ-20 HV TEG'in hem ısı hem de elektrik portları için zamanla değişen polarite [133].



4. PV-TE SİSTEMDE ISI GEÇİŞİ

PV sistemlerde sıcaklık üretilen güç miktarını doğrudan etkileyen bir faktördür. PV hücredeki atıl ısı enerjisi ile TEG kullanılarak elektrik üretiminde de TEG yüzey sıcaklıkları farkı ile TEG çıkış gücü hesaplanır. TEC ile PV hücrenin soğutulmasında ise elektrik enerjisi kullanılarak TEC yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturularak PV hücreye temas eden TEC yüzey sıcaklığı azaltılır. Bu sebeple PV-TE sisteminin simülasyonlarından tutarlı bir sonuç elde etmek için PV hücre ve TEM yüzey sıcaklık değerlerinin hesaplanması önemlidir.

4.1. PV Panelde Isı Geçişi

Farklı ışıınım ve çevre koşullarında PV panellerdeki hücre sıcaklıklarının hesaplanması için literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

PV hücre sıcaklığındaki değişiklik, ortam sıcaklığındaki değişikliklerin yanı sıra güneş ışıınımındaki değişikliklere bağlı olarak ortaya çıkar [177]. [125, 178]'de PV hücre sıcaklığı (T) şu şekilde tanımlanır:

$$T = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}}{800} \right) G \quad (4.1)$$

Burada T_{amb} ortam sıcaklığıdır ve $NOCT$ üretici tarafından sağlanan nominal çalışmadaki hücre sıcaklığını temsil eder.

G (W/m^2), ortam sıcaklığındaki güneş ışıınımını temsil eder. [179]'da, ısı kaybı katsayıları şeklinde ısı geçişi etkilerini dahil ederek hücre sıcaklığı için farklı bir formülasyon önerilmiştir. Hücre sıcaklığı T şu şekilde verilir:

$$\frac{T - T_a}{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}} = \frac{G_T}{G_{NOCT}} \frac{U_{L,NOCT}}{U_L} \left[1 - \frac{\eta_c}{(\tau\alpha)} \right] \quad (4.2)$$

Burada T_a ortam sıcaklığı, T_{NOCT} nominal çalışan hücrenin sıcaklığı, $T_{a,NOCT} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, G_T ortam sıcaklığındaki güneş ışıınımı, $G_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$, $U_{L,NOCT}$ ve U_L kayıp katsayılarıdır. $NOCT$ ve çalışma sıcaklığı koşulları sırasıyla, η_c hücrenin T

sıcaklığındaki verimliliğidir ve $(\tau\alpha)$ geçirgenlik-soğurma çarpımıdır. [180]'de, hücre sıcaklığı T için [179]'dakine benzer bir analizden türetilen bir denklem önerilmiştir ve şu şekilde verilmiştir:

$$T = \frac{G}{G_{NOCT}} (NOCT - T_{ambient,NOCT}) \left(1 - \frac{\eta_c}{(\tau\alpha)}\right) + T_{ambient} \quad (4.3)$$

Burada G , G_T ile aynıdır, $NOCT$, T_{NOCT} ile aynıdır ve $T_{ambient,NOCT}$, $T_{a,NOCT}$ ile aynıdır. Diğer değişkenler (4.2)'de verilenlerle aynıdır.

Her üç denklem de tahmin edilen hücre sıcaklığı için benzer sonuçlar verir. (4.2) veya (4.3) kullanılarak hücre sıcaklığının hesaplanması sorunludur çünkü $(\tau\alpha)$, η_c , $U_{L,NOCT}$ ve U_L nadiren bilinmektedir [177].

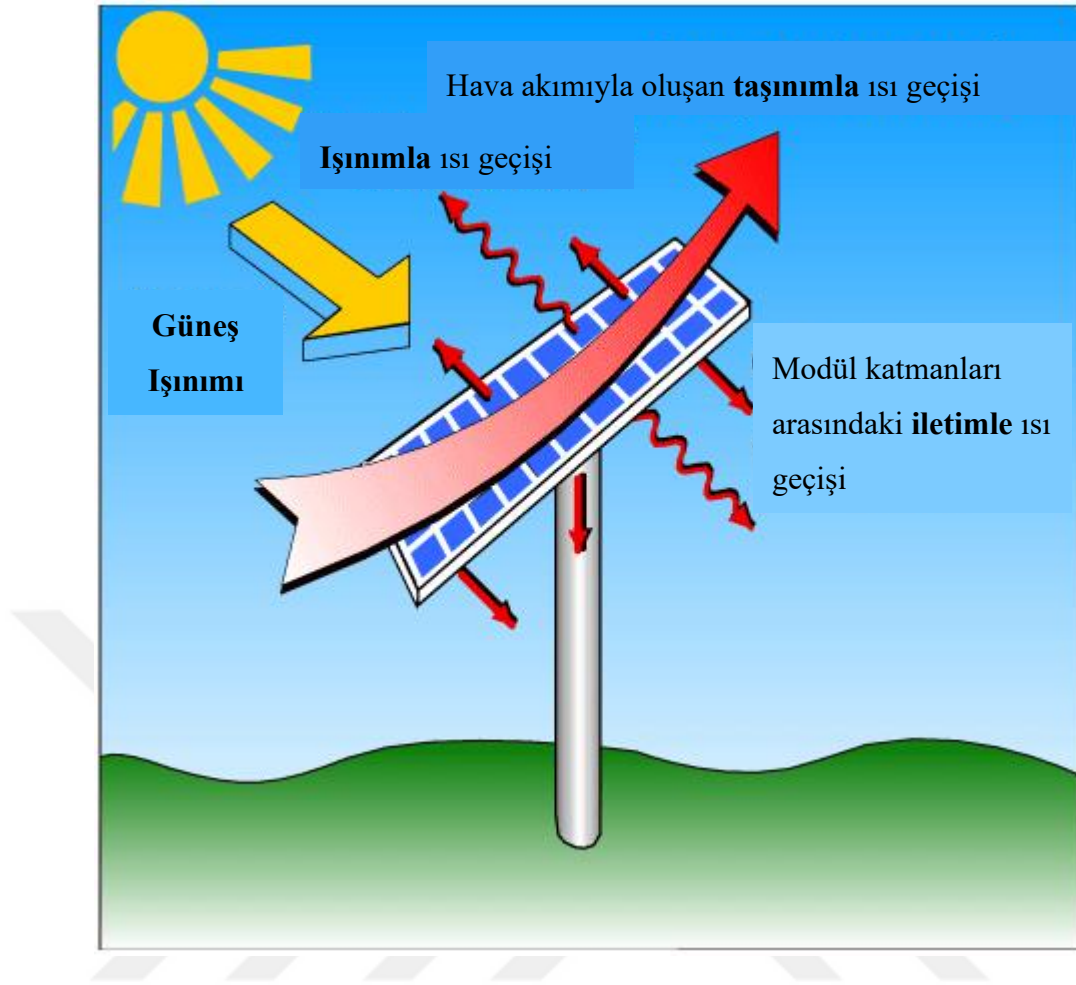
Ticari PV panellerde hücre sıcaklığını hesaplamak için kullanılan bu formüller PV-TE sistemlerdeki yüzey sıcaklıklarının bulunması için doğrudan kullanılamamaktadır. Çünkü, PV-TEG sistemde PV hücredeki atıl ısıdan ne kadarının TEG ile elektrik enerjisine dönüşeceğini ve PV-TEC sistemde TEC'e elektrik enerjisi verilerek PV hücrenin sıcaklığının ne kadar azaltılabileceğinin hesaplanabilmesi için sistemdeki ısı geçişinin modellenmesi gerekmektedir.

PV sistemde açığa çıkan ısının geçişi; ışınlama, taşınım ve iletimle olmaktadır. PV panelde ısı transferi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

PV paneldeki ısı geçişinin analizini basitleştirmek için bazı varsayımlar yapılmıştır:

Yan taraf yüzey alanı küçük olduğundan yan taraf ile ortam arasındaki ısı transferi ihmal edilmiştir. PV malzemelerinin fiziksel özellikleri sabittir; Mükemmel ısı iletimi için PV panelinin katmanları arasındaki ısı dirençler dikkate alınmamıştır, yani PV hücrenin sıcaklığı ortalama bir sıcaklıktır. PV hücrenin çıkış gücü şu şekilde ifade edilebilir [26]:

$$P_{PV,cell} = \alpha \cdot \tau \cdot \eta_{cell} \cdot A_{cell} \cdot G_0 \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. PV panelde ısı geçişi [181].

Burada τ , PV hücresi üzerinde kaplanan camın geçirgenliğidir. α , ısıtım yutma katsayısı olup; PV hücresinin soğuruculuğunu temsil eder. G_0 gelen güneş ışınlımına (W/m^2) karşılık gelir, PV hücresi tarafından emilen ışınlım $G = \alpha \cdot \tau \cdot G_0$ ile ifade edilebilir. A_{cell} PV hücresinin alanıdır. η_{cell} dönüşüm verimliliğidir ve PV hücresinin geleneksel doğrusal ilişkisi [182] tarafından verilmiştir.

$$\eta_{\text{cell}} = \eta_{\text{Tref}}[1 - \beta_{\text{ref}}(T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}})] \quad (4.5)$$

T_{cell} PV hücresinin sıcaklığını, T_{ref} referans sıcaklığını (tipik olarak $298,15 \text{ }^\circ\text{K}$), β_{ref} sıcaklık katsayısını, η_{Tref} ise referans sıcaklıkta ve $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ güneş ışınlımı altında PV hücresinin dönüşüm verimliliğini gösterir. Hem η_{Tref} hem de β_{ref} genellikle PV hücre üreticisi tarafından verilir.

PV panelin ön ve arka yüzeylerinden ortama olan taşınım ve ışınlımla ısı geçişlerinin aynı kabul edildiği ve her bir yüzeye karşılık gelen ısı geçişinin şu şekilde hesaplanabileceği varsayılmaktadır:

Taşınım ile gerçekleşen ısı geçişi $Q_{conv}(W)$ (4.6) ile bulunur.

$$Q_{conv} = h_{cell} A_{cell} (T_{cell} - T_a) \quad (4.6)$$

İşinım ile gerçekleşen ısı geçişi $Q_r(W)$ (4.7) ile bulunur.

$$Q_r = \varepsilon_{cell} \sigma A_{cell} (T_{cell}^4 - T_{sky}^4) \quad (4.7)$$

Burada T_a ortam sıcaklığını temsil eder, σ Stefan-Boltzmann sabitidir ve $5,67 \times 10^{-8}$ ($W/m^2 K^4$)'e eşittir, ε_{cell} PV hücresinin ışınlım yayma oranı [183]'de 0,95 olarak belirlenmiş olup, h_{cell} ($W/m^2 K$) PV hücresi ile ortam arasındaki ortalama ısı taşınım katsayısıdır ve [184] tarafından önerilmiştir. (4.8)'de u_w (m/s) rüzgâr hızıdır.

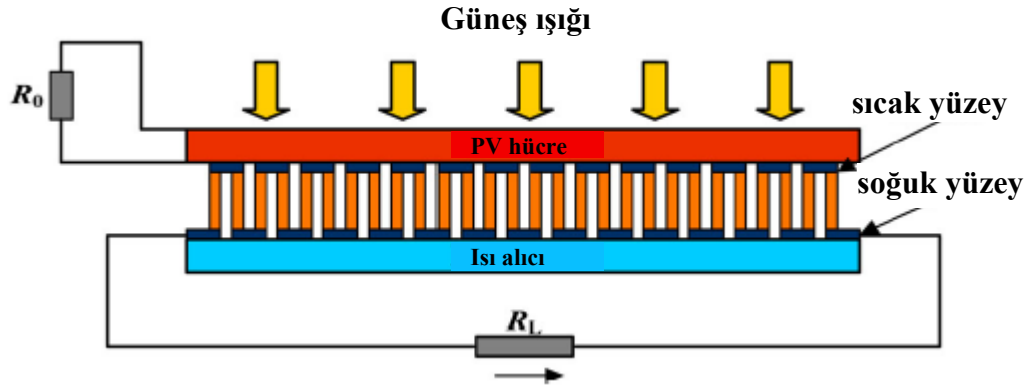
$$h_{cell} = 2,8 + 3u_w \quad (4.8)$$

T_{sky} gökyüzünün efektif sıcaklığıdır ve (4.9)'da verilmektedir [185].

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (4.9)$$

4.2. PV-TEG Sistemde Isı Geçişi

PV-TEG hibrit sistemin prensip şeması Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi hibrit sistem PV hücresi ve tabanındaki TEG'den oluşmaktadır. TEG'in soğuk tarafı ile sıcak tarafı arasında daha yüksek bir sıcaklık farkı oluşturmak için ısı alıcı soğuk tarafa takılmıştır.



Şekil 4.2. PV-TEG hibrit sistemin çizimi [26].

PV-TEG’de güneş enerjisinin bir kısmı elektrik enerjisine, büyük bir kısmı ise ısı enerjisine dönüştürülür. Termodinamiğin birinci yasasına göre TEG’in sıcak tarafındaki enerji dengesi şu şekilde gösterilebilir:

$$Q_{h,TEG} = GA_{PV,cell} - Q_{conv} - Q_r - P_{PV,cell} \quad (4.10)$$

Burada $Q_{h,TEG}$, TEG’in sıcak tarafında kaynaktan alınan ısıyı veya jeneratörün aldığı ısı ifade eder ve 3.Bölüm’de belirtilen TEG modelindeki (3.12) ile eşit olur. $P_{PV,cell}$, Q_{conv} ve Q_r (4.4),(4.6) ve (4.7) denklemleri ile verilmiştir.

Hibrit sistemin ısı alıcı bağlı tarafındaki ışınlama ısı geçişi ihmal edilerek, TEG’den ısı alıcısı yoluyla ortama verilen ısı şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$Q_{c,TEG} = h_{TEG}A_{TEG}(T_{c,TEG} - T_a) \quad (4.11)$$

Burada $Q_{c,TEG}$, TEG’in soğuk tarafındaki geçişini ifade eder ve 3.Bölüm’de belirtilen TEG modelindeki (3.13) ile eşit olur. $h_{TEG}A_{TEG}$, TEG’in ısı alıcısının soğutma kapasitesini temsil eder.

PV-TEG’in çıkış gücü TEG ve PV’nin toplamı olarak kabul edilebilir:

$$P_{PV-TEG} = P_{PV,cell} + P_{TEG} \quad (4.12)$$

PV-TEG’in toplam verimliliği şu şekilde hesaplanabilir:

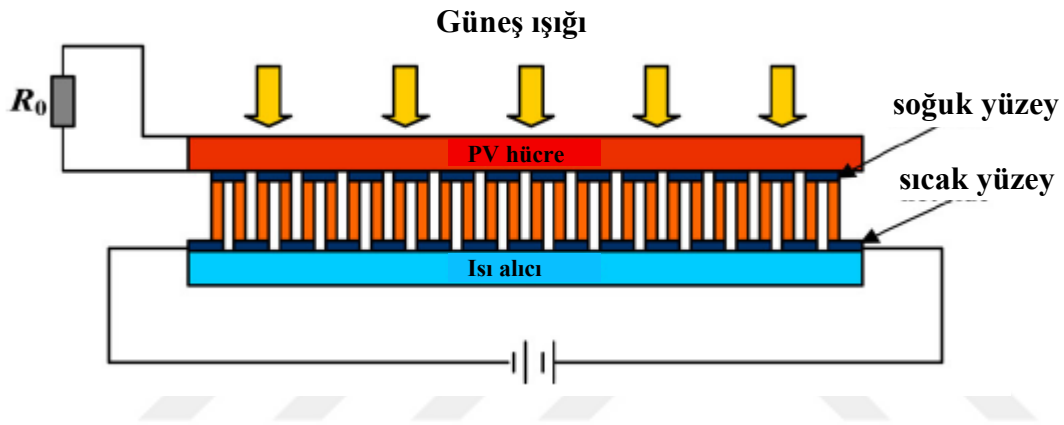
$$\eta_{PV-TEG} = \frac{P_{PV-TEG}}{GA_{PV,cell}} \quad (4.13)$$

PV hücresinin sıcaklığının sıcak tarafın sıcaklığına eşit olduğu varsayılmaktadır.

$$T_{PV,cell} = T_{h,TEG} \quad (4.14)$$

4.3. PV-TEC Sistemde Isı Geçişi

Tipik bir PV-TEC sistemi Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Görülebileceği gibi, TEC'in üst tarafı bir PV hücresine, TEC'in alt tarafı ise bir ısı alıcıya bağlanmıştır. Elektrik akımı TEC'den aktığında ısı, ısı alıcısı tarafından uzaklaştırılır ve PV hücresi soğutulur.



Şekil 4.3. PV-TEC hibrit sistemin çizimi [26].

TEC'in soğuk tarafındaki enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$Q_{c,TEC} = GA_{PV,cell} - Q_{conv} - Q_r - P_{PV,cell} \quad (4.15)$$

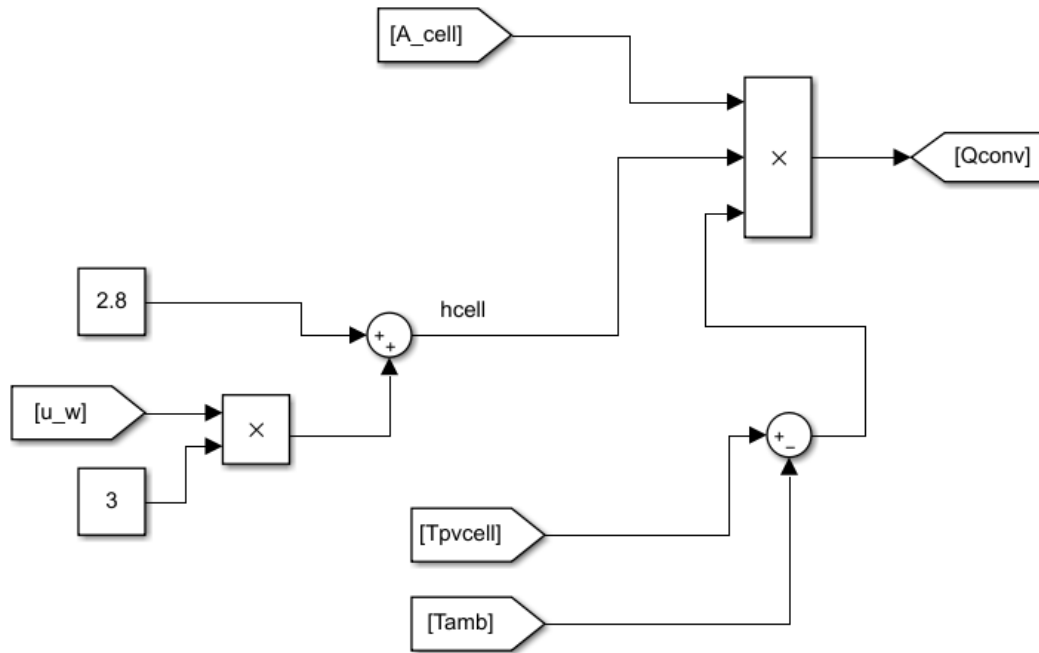
burada $Q_{c,TEC}$, 3.Bölüm'de belirtilen TEC modelindeki (3.47) ile eşit olur. $P_{PV,cell}$, Q_{conv} ve Q_r (4.4),(4.6) ve (4.7) denklemleri ile verilmiştir.

Hibrit sistemin arka tarafındaki ışınlama ısı geçişi ihmal edilerek, TEC'den ısı alıcısı yoluyla ortama verilen ısı şu şekilde verilir:

$$Q_{h,TEC} = h_{TEC}A_{TEC}(T_{h,TEC} - T_a) \quad (4.16)$$

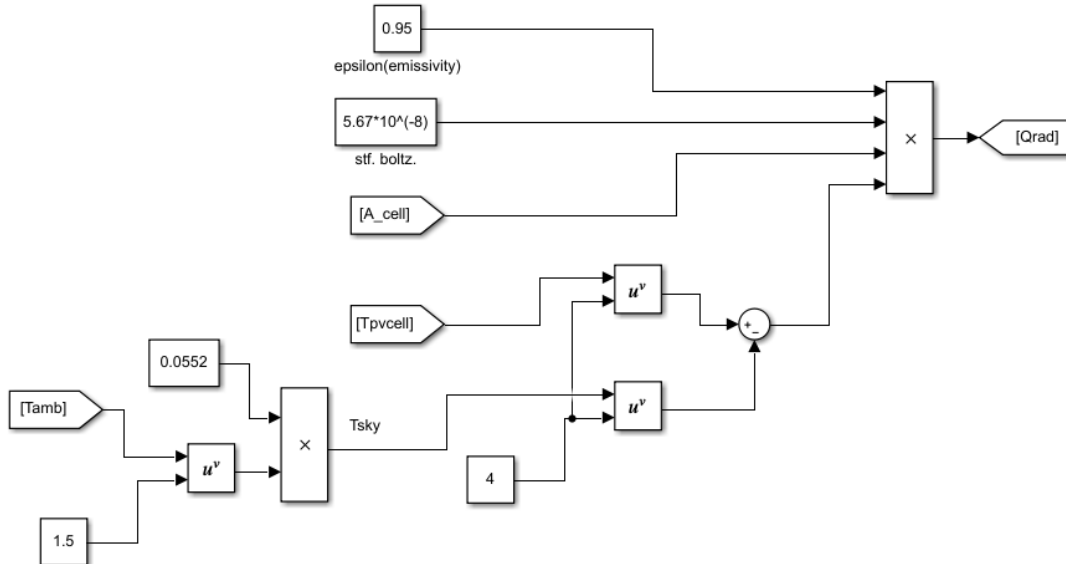
burada $Q_{h,TEC}$, 3.Bölüm'de belirtilen TEC modelindeki (3.48) ile eşit olur. $h_{TEC}A_{TEC}$, TEC ısı alıcısının soğutma kapasitesini temsil eder.

Taşımla ısı geçişinin (4.6) ve (4.8) kullanılarak modellenmesi Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Taşımla ısı geçişinin modellenmesi.

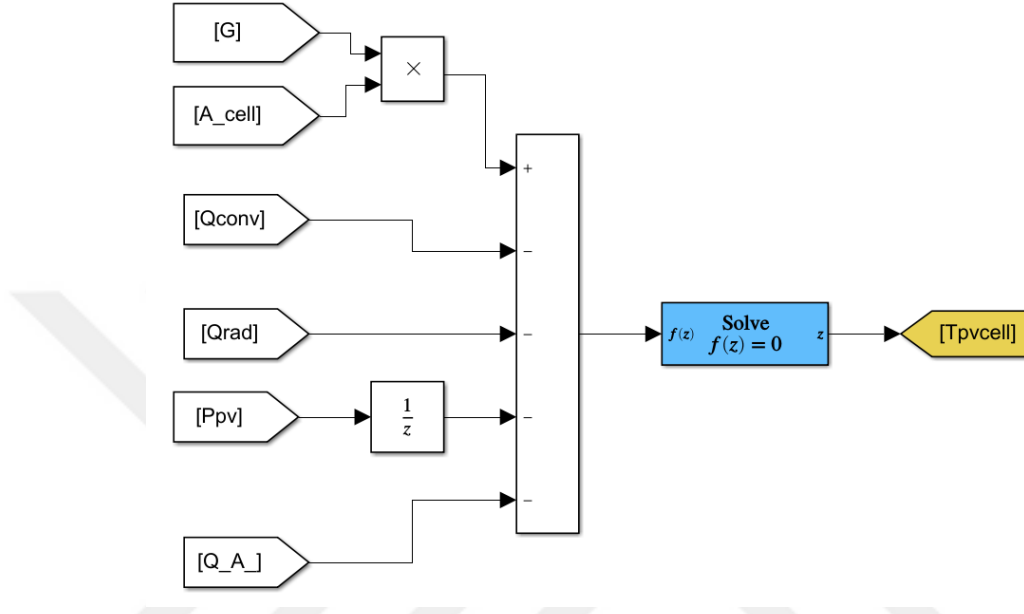
Işınla ısı geçişinin (4.7) ve (4.9) kullanılarak modellenmesi Şekil 4.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Işınla ısı geçişinin modellenmesi.

(4.10)'da $Q_{h,TEG}$ ve (4.15)'te $Q_{c,TEC}$ hesaplanmaktadır. İki yönlü modelde ise bunların yerine PV'ye temaslı olan aynı yüzeyin ısısı için Q_A adlandırması yapılmıştır. Q_A ısısı,

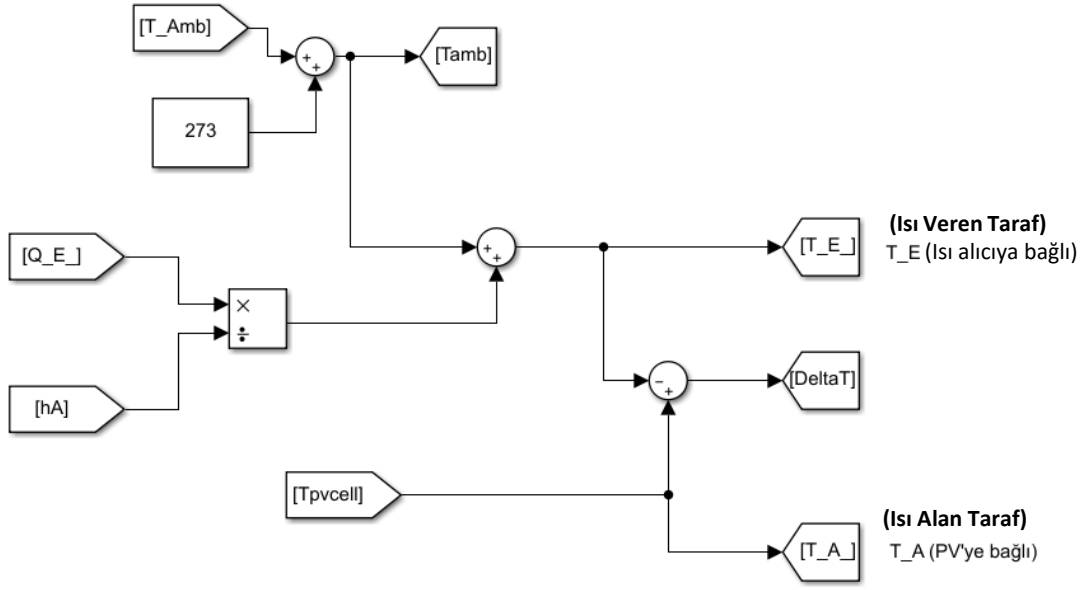
A yüzeyi için tanımlanmış olup; A yüzeyi, TEG çalışmasında sıcak yüzey, TEC çalışmasında ise soğuk yüzey olmaktadır. (4.10) ve (4.15) ortak hale getirilerek tek model kullanılmıştır. Denklemin çözümünü sağlayan hücre sıcaklığının bulunması Şekil 4.7’de gösterilmiştir. [26]’dakinden farklı olarak burada simülasyon ile elde edilen PV hücre gücü kullanılarak modelin daha gerçekçi olması sağlanmıştır.



Şekil 4.7. Enerji denge denklemini sağlayan PV hücre sıcaklığının bulunması

Denklem 4.11’de $Q_{c,TEG}$ ve denklem 4.16’da $Q_{h,TEC}$ hesaplanmaktadır. İki yönlü modelde ise bunların yerine TEM’e temaslı olan aynı yüzeyin ısısı için Q_E adlandırması yapılmıştır. Q_E ısısı, ısıyı ısı alıcı ile ortama veren E yüzeyi için tanımlanmış olup; E yüzeyi, TEG çalışmasında soğuk yüzey, TEC çalışmasında ise sıcak yüzey olmaktadır. Denklem 4.11 ve 4.16 ortak hale getirilerek T_E sıcaklığını hesaplayan denklem 4.20 yazılmıştır. h_{TEM} ve A_{TEM} parametreleri de iki yönlü çalışma için hem TEG ve TEC için kullanılmıştır. Bu denklem ile oluşturulan model, Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

$$T_E = T_a + \frac{Q_E}{h_{TEM}A_{TEM}} \quad (4.20)$$

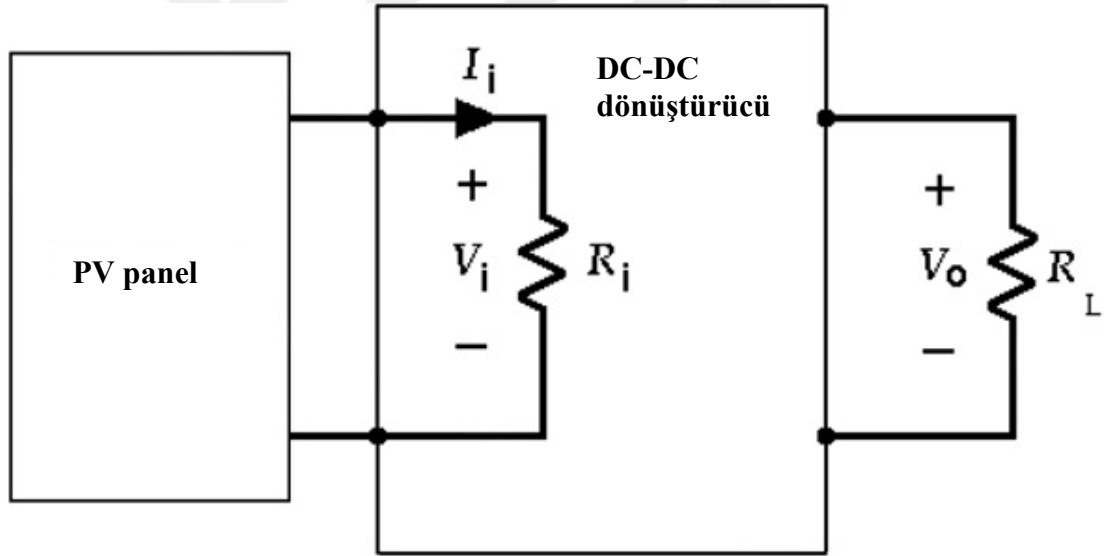


Şekil 4.8. T_E sıcaklığının hesaplanması.

Yüzey sıcaklık değerlerinin, ilgili bloklarla yönlendirilmesi ile değişken sıcaklık koşulları altında simülasyonlarda kullanılması sağlanır.

5. DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

DC/DC dönüştürücüler, giriş voltajından daha yüksek veya daha düşük olabilen ortalama bir çıkış voltajının gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Bu, dönüştürücünün ana anahtarının genellikle sabit bir frekansta ilettiği veya iletmediği (PWM tekniği) zamanları yöneterek elde edilir. Anahtarın açık (iletken) olduğu zaman aralığının (T_{ON}) komütasyon periyoduna (T_C) oranına dönüştürücünün çalışma oranı (D) denir. Hem sürekli iletim operasyonel modunda (CCM) hem de süreksiz iletim modunda (DCM), 3 üç temel dönüştürücü topolojisi, sürekli bir akım transformatörüyle karşılaştırılabilir. Dönüşüm oranı, dönüştürücünün çalışma oranı D 'yi $[0, 1]$ aralığında değiştirerek elektronik olarak kontrol edilebilir [186].



Şekil 5.1. PV panel veya TEG'in DC-DC dönüştürücü ile bağlantısı [186].

DC-DC dönüştürücülerde görev döngüsüne bağlı olarak çıkış tarafındaki yük direncinin değeri kaynak tarafından bakıldığında farklı değer almaktadır. Tablo 5.1'de DC-DC dönüştürücülerde topolojiye göre empedans ilişkilerine ait denklemler verilmiştir [143]. Şekil 5.2'de başlıca DC-DC dönüştürücü topolojileri gösterilmektedir. Örneğin, buck (azaltan) tipi dönüştürücü için çalışma oranı 0 iken devre açık devre gibi davranacak ve kaynak tarafından bakıldığında devrede çok büyük bir direnç gözükcektir. Çalışma oranı artırıldığında ise kaynak tarafından

görülen direnç, yük direncine yaklaşacaktır. Buck tipi dönüştürücünün bu özelliği kullanılarak tez kapsamında gerçekleştirilen PV-TE hibrit deney sisteminin karakteristik eğrileri analiz edilmiştir.

Tablo 5.1. DC-DC dönüştürücülerde topolojiye göre empedans ilişkileri [143].

No:	DC/DC Dönüştürücü	Empedans ilişkisi
1	Buck dönüştürücü	$R_i = R_L / D^2$
2	Boost dönüştürücü	$R_i = R_L (1-D)^2$
3	Buck-boost dönüştürücü	$R_i = R_L (1-D)^2 / D^2$

DC-DC buck dönüştürücü tasarımı için devre elemanlarının seçimi bazı kriterlere göre yapılmaktadır. Endüktans L değerinin büyük olması akım dalgalılığını azaltmakta ve kapasitans C değerinin büyük olması gerilim dalgalılığını azaltmaktadır. Sürekli akım modu (CCM)'yi sağlayan L değerini veren ifade (5.1) ile verilmektedir [187].

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (5.1)$$

Akımın dalgalılığı genliğinin istenen şartlarda olması için gereken L değerini veren ifade (5.2) ile verilmektedir.

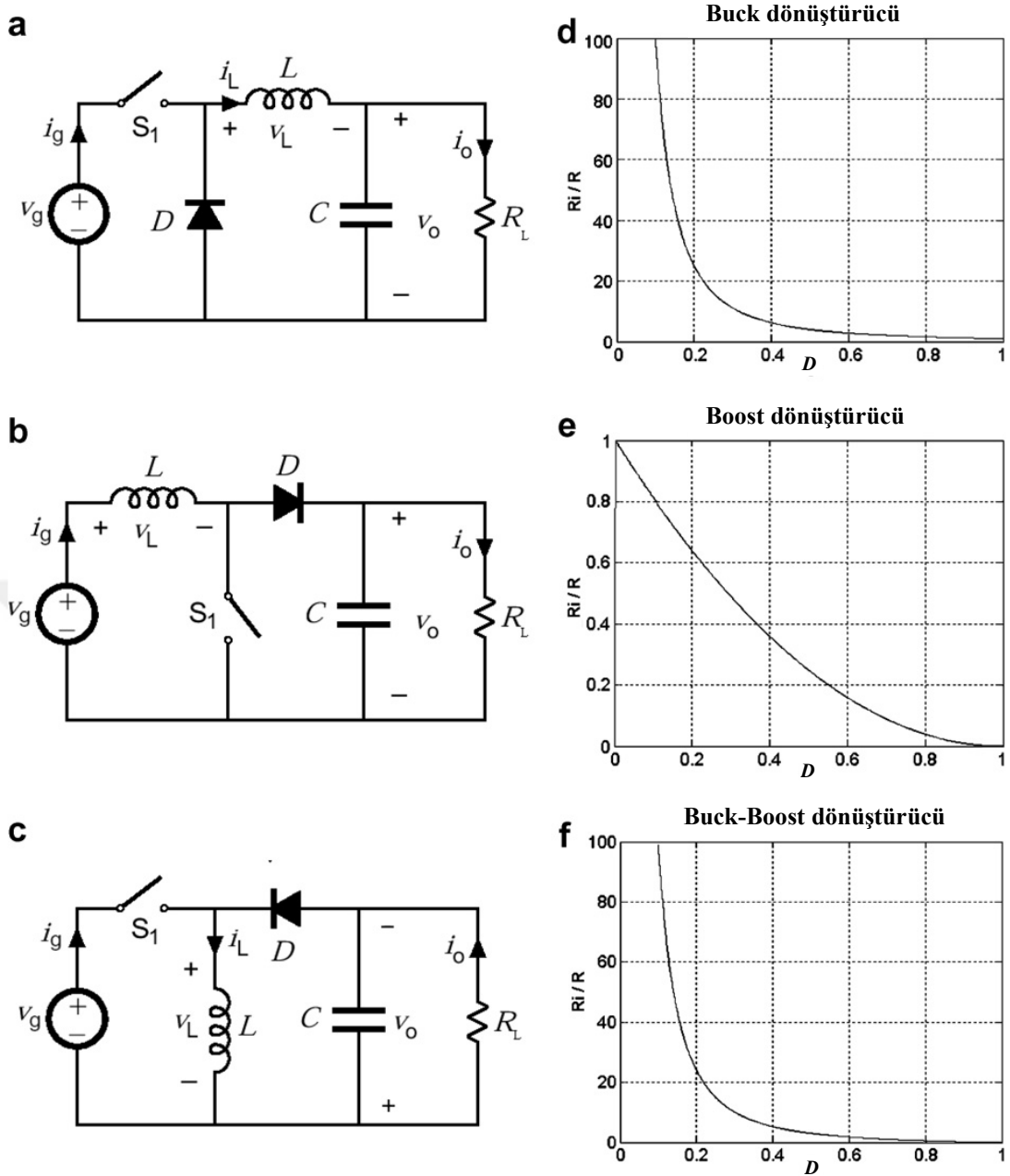
$$L = \left(\frac{V_S - V_O}{\Delta i_L f} \right) D = \frac{V_O (1-D)}{\Delta i_L f} \quad (5.2)$$

Gerilim dalgalılığı için (5.3) verilmektedir.

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (5.3)$$

Gerilim dalgalılığı genliğinin istenen şartlarda olması için gereken C değerini veren ifade (5.4) ile verilmektedir.

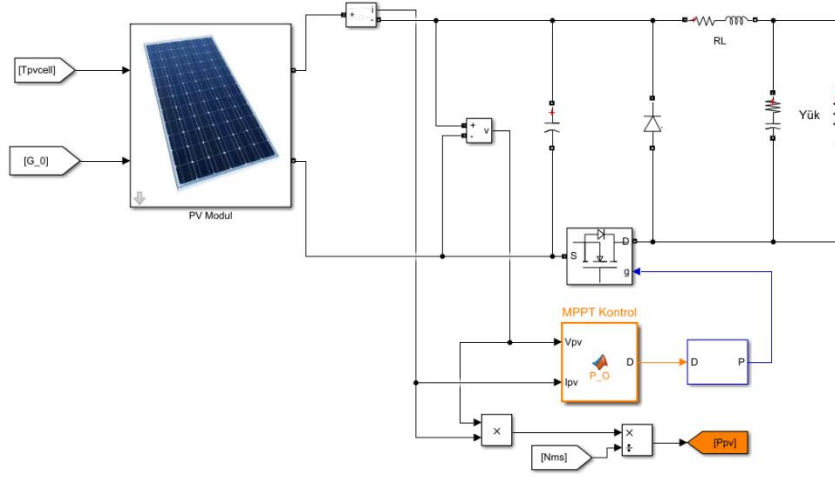
$$C = \frac{1-D}{8L(\Delta V_O/V_O)f^2} \quad (5.4)$$



Şekil 5.2. Başlıca DC-DC dönüştürücü topolojileri ve giriş direnci (a) buck dönüştürücü; (b) boost dönüştürücü; (c) buck–boost dönüştürücü; (d) buck dönüştürücü için CCM’de D ’ye bağlı olarak giriş direnci değişimi (e) boost dönüştürücü için CCM’de D ’ye bağlı olarak giriş direnci değişimi (f) buck–boost dönüştürücü için CCM’de D ’ye bağlı olarak giriş direnci değişimi [186].

Şekil 5.3’te PV ve DC-DC buck dönüştürücü sistemin Simulink modeli gösterilmiştir. Burada ölçüm sisteminin ve bağlantı kablolarının iç direnci yük olarak temsil edilmiştir. Buck dönüştürücünün Şekil 5.2’deki geleneksel gösteriminden farklı olarak fiziki uygulamadaki MOSFET bağlantısı aşağı taraftan anahtarlama olarak yapıldığı için simülasyondaki devre Şekil 5.3’te gösterildiği biçimde kurulmuştur. Ayrıca, devrede *değiştir ve gözle* (P&O) algoritması [188] çalıştırılan MPPT kontrolcüsü de

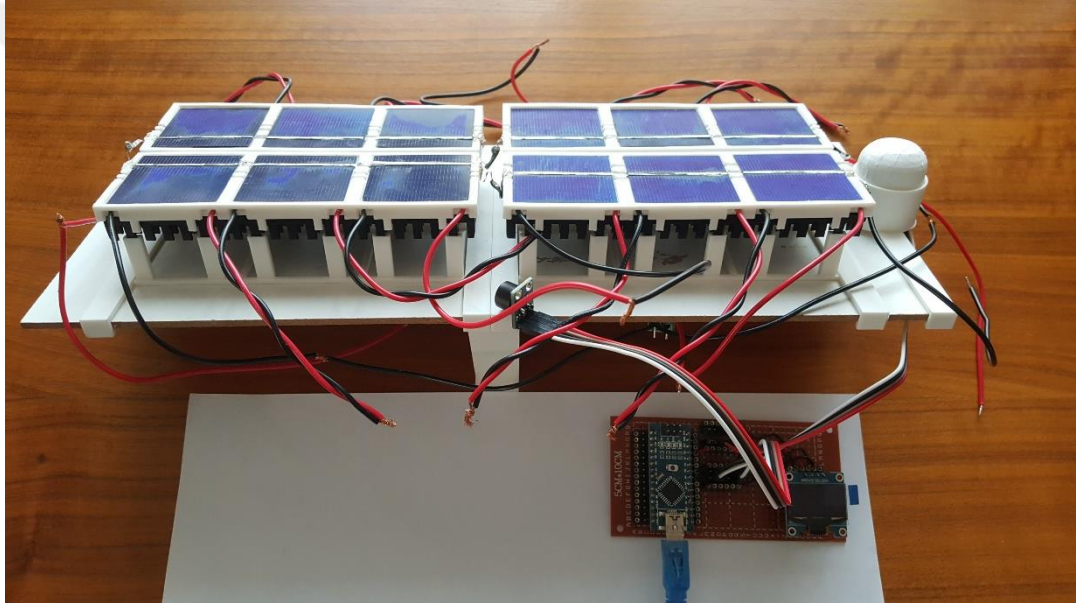
gösterilmiştir. PV sistemin toplam gücü PV hücre sayısına bölünerek, ısı geçişi hesaplamalarında kullanılmak üzere PV hücre başına PV gücü bulunmuştur.



Şekil 5.3. PV sistemin MPPT ile çalıştırılması.

6. UYGULAMA

Benzetim yapılan sistemin gerçek hayattaki çalışması ile kıyaslanabilmesi amacıyla deney düzeneği tasarlanmıştır. $39 \times 39 \text{ mm}^2$ boyutlarında özel kesim polikristal PV hücreleri, arada ısı geçiş malzemesi olmak üzere doğrudan $40 \times 40 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki TEM'lerin (TEC1-12706 peltier soğutucu) üzerine irtibatlandırılmıştır. TEM'lerin diğer yüzeylerine ısı alıcı takılmıştır. 12 adet PV hücre ve 12 adet TEM'den oluşan PV-TE hibrit sistem deney düzeneği Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



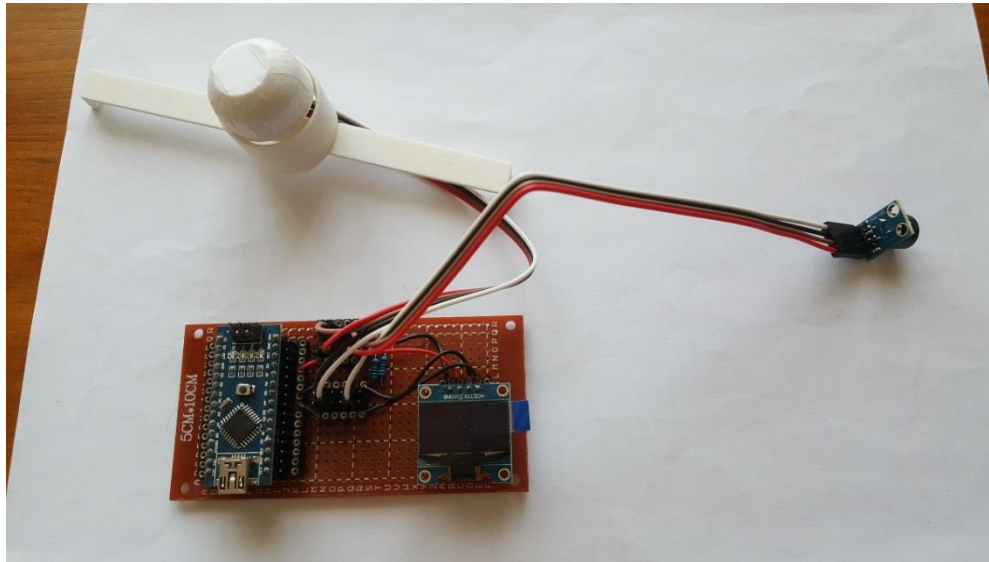
Şekil 6.1. PV-TE hibrit sistem deney düzeneği.

Ölçüm değerlerinin kayıt altına alınarak simülasyonlarla kıyaslama yapabilmek için Arduino UNO uyumlu veri kaydedicisi eklentisi kullanılmıştır. Bu eklenti kartta ayrıca gerçek zaman saati (RTC) entegresi de bulunmaktadır. RTC sayesinde kayıt edilen verilerin gerçek zamanlı tarih, saat, dakika ve saniye bilgileri eklenebilmektedir. Sensörlerle ölçülen değerlerin CSV uzantılı dosya formatında kayıt altına alınması için gerekli programlama yapılmıştır.

Şekil 6.2'de gösterilen piranometre yerine Şekil 6.3'de gösterilen güneş ışınımı ölçüm seti tasarlanmıştır. Bu set ile boyut küçültülerek ölçümlerin daha pratik şekilde yapılması sağlanmıştır. Ölçüm setinde arduino nano, 128x32 OLED ekran ve TSL2561 lüksmetre sensörü kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Piranometre.

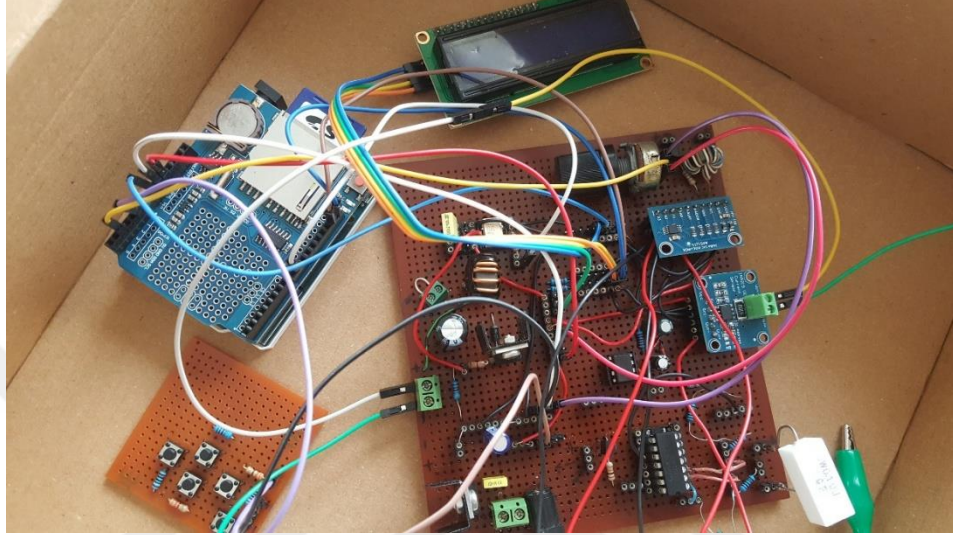


Şekil 6.3. Lüksmetre sensörü kullanılarak tasarlanan Arduino mikrodenetleyici tabanlı piranometre ve temassız sıcaklık ölçer.

Difüzör modeli Thinkercad yazılımı ile hazırlanmış ve 3d baskısı alınmıştır. Sensöre gelen ışık dağılımını düzenlemesi ve filtrelemesi amacıyla sensör, difüzör içine yerleştirilmiş ve difüzör üzerine PTFE (teflon) bant sarılmıştır. Yaklaşık 400 W/m^2 ışınlam seviyelerinde TSL2561 lüksmetre sensörünün maksimum algılama eşiği aşıldığı için doğrudan piranometre amacıyla kullanılması uygun olmamıştır. Bu yüzden, sensör üzerine gelen ışığın azaltılması suretiyle ölçülebilecek maksimum ışınlam seviyesini artırmak için PTFE bant ile filtreleme yapılarak sensör üzerine yaklaşık %25 oranında ışınlam gelmesi sağlanmıştır. Yeni ölçüm sisteminin kalibrasyonu için farklı ışık seviyelerinde Şekil 6.2'deki laboratuvar tipi piranometre ile birlikte aynı anda ölçümler yapılmıştır. Arduino yazılımı içinde gerekli çarpan

düzenlemeleri ile ölçüm değerleri, referans alınan laboratuvar piranometresi değerleri seviyesine getirilerek lüksmetre sensörü kalibre edilmiştir.

Yüzey sıcaklıklarının temassız olarak ölçülebilmesi amacıyla ışıyım ölçüm sistemine MLX90614 kızılötesi sıcaklık ölçer sensörü eklenmiştir. Bu sensörle yüzey sıcaklıklarına ek olarak ortam sıcaklığı da ölçülebilmektedir.



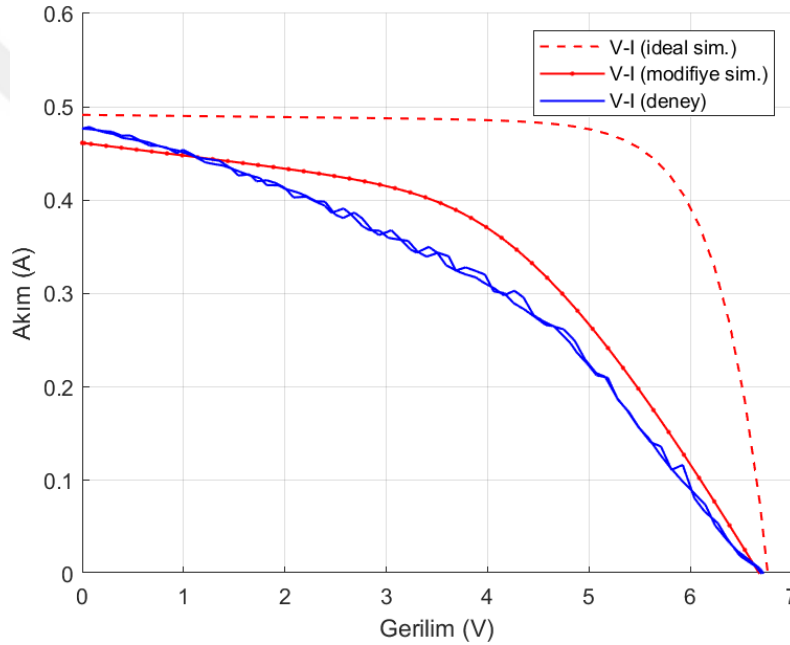
Şekil 6.4. Arduino UNO mikrodnetleyici, veri kaydedicisi eklentisi ve azaltan (buck) tip DC-DC dönüştürücü.

PV-TE hibrit deney seti ile deneyler yapılmış olup; DC-DC azaltan dönüştürücü kullanılarak yük empedansının otomatik şekilde değiştirilmesi sağlanmış, PV ve TE üreteçlerin elektriksel karakteristiklerinin ayrı ayrı elde edilmesi amaçlanmıştır. Arduino tabanlı veri kaydedicisi sistem kurularak elektriksel değerler SD kart ortamında kayıt edilmiş ve sonrasında bu veriler MATLAB ortamında işlenmek üzere bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Arduino UNO mikrodnetleyici, veri kaydedicisi eklentisi ve azaltan (buck) tip DC-DC dönüştürücüyü içeren deney seti Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

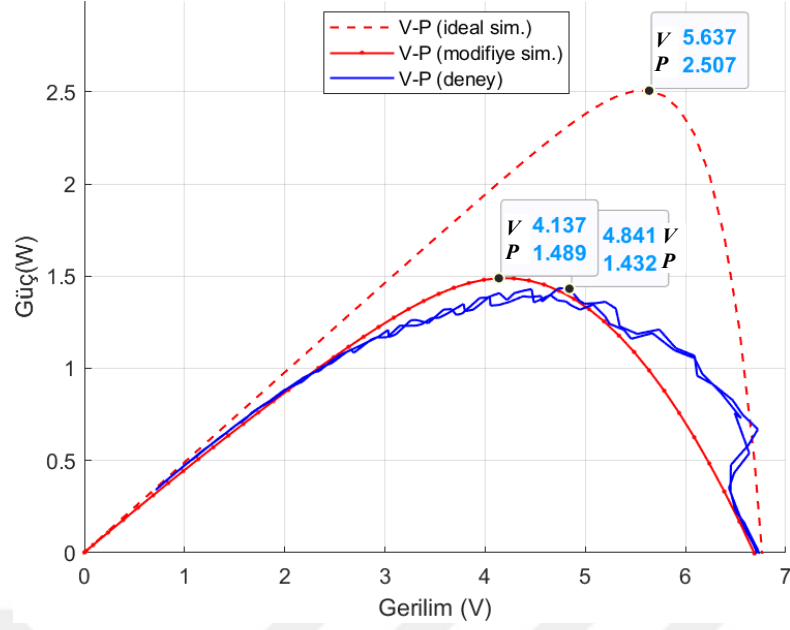
Deney sırasında piranometre ile ölçülen ışıyım seviyesinin 950 W/m² civarında olduğu görülmüştür. PV hücrelerin kızıl ötesi termometre sensörü ile ölçülen yüzey sıcaklıklarının 49 °C civarında olduğu görülmüştür. Simülasyonlarda ise PV yüzey sıcaklıkları bütün hücreler için sabit kabul edilmiş ve 49 °C hücre sıcaklık değeri kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 27 °C ölçülmüş ve deney koşulları simülasyonlarında kullanılmıştır.

Setteki butonlar ile PWM ayarı deney moduna getirilerek deney başlatılmıştır. Arduino içine yazılan program ile DC-DC dönüştürücünün çalışma oranının %0 ile maksimum %100 aralığında zamanla otomatik artırılması ve azaltılması sağlanmıştır.

12 adet seri bağlı PV hücreden oluşan modülün deney şartlarındaki gerilim-akım ve gerilim-güç grafikleri çizdirilerek Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'de gösterilmiştir. Şekillerde deney sonuçları ve simülasyon sonuçları, değerlerin kıyaslanabilmesi amacıyla aynı şekiller içinde çizdirilmiştir. Deneyde kullanılan PV hücrelerinin veri sayfasından elde edilen karakteristiklerinin pratik ile örtüşmediği görüldüğünden, simülasyonlarda kullanılan PV hücre seri ve paralel direnç değerleri değiştirilerek simülasyon değerlerinin deney sonuçlarına yaklaştırıldığı modifiye edilmiş eğriler çizdirilmiştir.

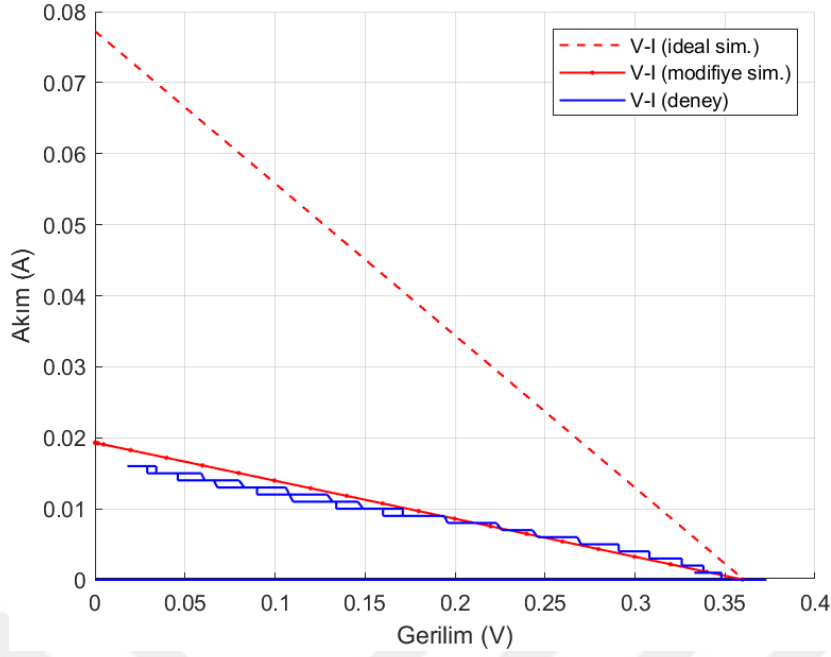


Şekil 6.5. PV sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-I eğrileri.

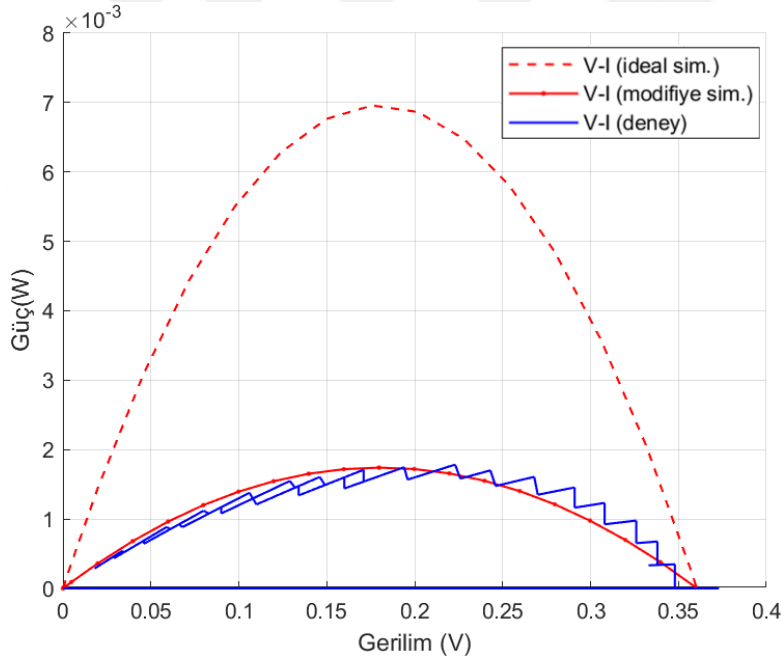


Şekil 6.6. PV sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-P eğrileri.

TE sistemde ise akım ölçümünü kolaylaştırmak amacıyla akım değerlerinin artırılması için 12 adet TE modülün elektriksel bağlantıları 6 adet seri ve 2 adet paralel koldan oluşacak şekilde irtibatlandırılmıştır. TEG sistemin deney şartlarındaki gerilim-akım ve gerilim-güç grafikleri çizdirilerek Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Şekil 6.7’deki grafiklerin eğimlerinden görüleceği üzere, partikte kullanılan TEG’lerin elektriksel iç dirençleri, veri sayfasından elde edilen değerlerden çok farklı çıkmış olduğundan ve modül karakteristiklerinin birbirleriyle tam aynı olmamasından deney sonuçları ile simülasyon sonuçları farklı bulunmuştur. Simülasyonlarda kullanılan TE modüllerin iç direnç değerleri değiştirilerek simülasyon değerlerinin deney sonuçlarına yaklaştırıldığı modifiye edilmiş eğriler çizdirilmiştir.



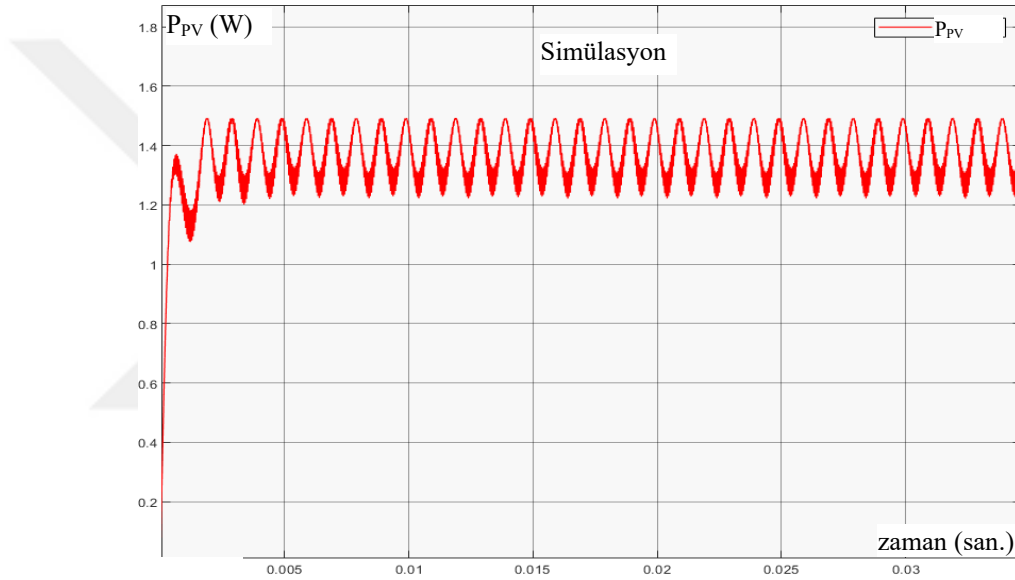
Şekil 6.7. TEG sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-I eğrileri.



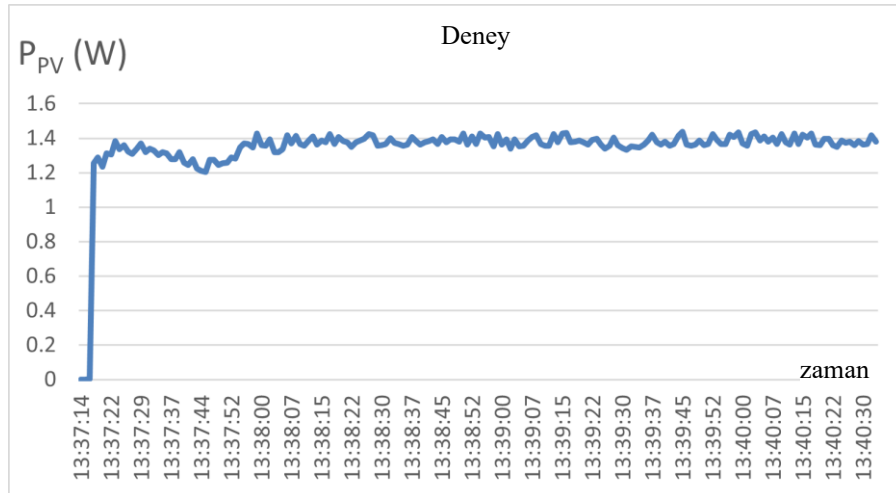
Şekil 6.8. TEG sistemin ölçüm değerleri ile simülasyon değerlerinin birlikte gösterildiği V-P eğrileri.

Deney setinde PV sistemin, P&O algoritması kullanılarak MPPT kontrol ile çalışması sağlanmıştır. Arduino mikrodenetleyicide PWM çalışma oranı çözünürlüğü 8 bit olup, 0-255 arası değerler ile çalışma oranı belirlenmektedir. P&O algoritması Arduino kodlarındaki iterasyonlarda çalışma oranı değişim değeri (ΔD) için 5 seçilmiştir. Bu değer ΔD %1,961'e (5/255) karşılık gelmektedir. Devrede kullanılan IRLZ44N

MOSFET, 20 kHz frekanslı PWM işaretiyle anahtarlanmıştır. 12 adet TE modül ise elektriksel olarak birbirleriyle seri bağlı olarak ikinci bir DC-DC dönüştürücü ile TEG modunda %50 sabit görev döngüsünde maksimum güç verecek şekilde çalıştırılmıştır. Simülasyona göre Şekil 6.9’da ΔD %1,961 olmak üzere kararlı durumda PV sistem gücünün 1,229-1,492 W arasında değiştiği görülmektedir ve ortalaması 1,375 W olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.10’da ise deney sonuçları gösterilmiş olup; PV gücü MPPT kontrol ile 1,36-1,42 W arasında değişmektedir ve ortalaması 1,382 W olarak hesaplanmıştır. Dalgalılığı azaltmak amacıyla ΔD için simülasyonlarda %0,1 kullanılırsa, PV sistem gücü 1,481-1,492 W arasında değişmektedir ve ortalaması 1,491 W olarak hesaplanmıştır.



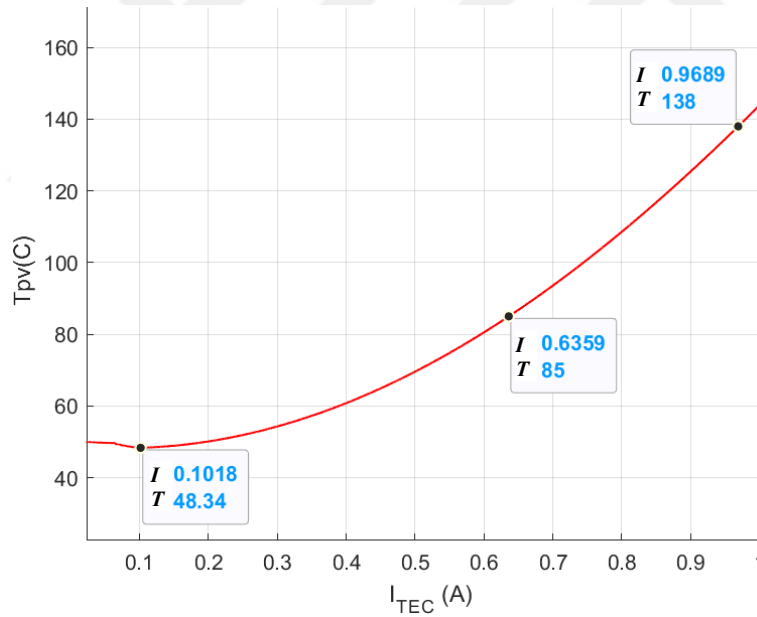
Şekil 6.9. PV-TEG sistemde PV gücünün MPPT kontrol ile simülasyon değerleri.



Şekil 6.10. PV-TEG sistemde PV gücünün MPPT kontrol ile deney sonuçları.

TEG sistemde üretilen gücün ortalama değeri simülasyonda 1,517 mW, deneyde ise 1,590 mW olup, sonuçlar arasındaki fark %4,59'dır. Simülasyonda, PV hücre sıcaklığı 49,14 °C bulunmuş, deneyde ise 49 °C olup, sonuçlar arasındaki fark %2,8'dir. PV sistem gücü ortalama değerleri için simülasyon ve deney sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmış olup, simülasyon sonucu 1,375 W ve deney sonucu 1,382 W bulunmuştur. Burada aradaki fark %0,29'dur.

Deney koşullarında PV hücrelerin soğutulması için PV-TEC hibrit sisteminin simülasyonlarında TEM'ler, TEG moduna göre ters polaritedeki bir gerilim kaynağıyla beslenmiştir. Besleme gerilimi sıfırdan başlayarak artırılmış ve PV hücre sıcaklığının TEC akımına göre değişim grafiği çizdirilmiştir. Deney setinde kullanılan ısı alıcıların soğutma kapasitesi sınırlı olduğundan, simülasyonda PV hücre sıcaklığının 48,34 °C'ye kadar düşürülebileceği ve akımın daha fazla artırılması ile daha fazla soğutma gücü harcanmasına rağmen mevcut ısı alıcı sistemle PV hücre sıcaklığının daha fazla düşürülemeyeceği Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. PV-TEC sistemde PV hücre sıcaklığının TEC akımıyla değişimi simülasyonu.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, TEG, TEC veya aynı simülasyon içinde her iki amaçta kullanılmak üzere TEM'in ortak bir MATLAB/Simulink modeli geliştirilmiştir. Modelle ilgili tüm bloklar, kullanıcı dostu bir iletişim kutusu kullanılarak TEM'in veri sayfası parametrelerinin girildiği MATLAB/Simulink kitaplığındaki tarzda bir blok oluşturmak için tek bir blokta birleştirilmiştir.

Önerilen modelin çalışması, TEM'lerin veri sayfalarındaki karakteristik eğrilere göre çizilen simülasyonlar kullanılarak doğrulanmıştır. TEG ve TEC modülleri için ayrı ayrı olmak üzere sayfalarındakilere benzer grafiklerin elde edilmesi, modelin kullanılan TEM'lerin davranışıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Sıcaklığa bağlı parametrelerle yapılan simülasyonların veri sayfası grafiğine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak, Thomson ısısının göz ardı edilmediği simülasyonlar, veri sayfasına kıyasla daha fazla sapmaya sahiptir. Ayrıca, sabit malzeme özelliklerine sahip simülasyonlar, daha yüksek ΔT değerlerinin olduğu durumlarda Thomson ısısı dahil edilenlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Simülasyonlar, önerilen modelin değişken koşullara göre hem TEG hem de TEC modlarında başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Modelin yenilik ve avantajları şu şekilde özetlenmiştir:

- Hem TEG hem de TEC modelleri, çeşitli veri sayfaları ile uyumlu tek bir model oluşturmak üzere birleştirilmiştir.
- Performans ve verimlilik değerleri gibi çalışma parametrelerinin çoğu, gözlemlene ve kontrol etme yetenekleri ile cihazı bir elektrik devresi simülasyonu tarzında verimli bir şekilde kullanmak için çıkarılır.
- Model, TEM'i, PV-TEG ve PV-TEC hibrit sistemler gibi çeşitli sistemler için kullanma esnekliği sağlayan, değişen çalışma modları için herhangi bir ayarı yeniden düzenlemeden gerçek zamanlı olarak jeneratör veya soğutucu olarak kullanmaya uygundur.

Tablo 7.1. TEM modellerinin karşılaştırılması.

NO	KAYNAK NO.	Modellenen TEM tipi	İki Yönlü Model	Elektrik devresinde simülasyon	Karşılık gelen portları göstererek ısı ve elektriksel polarite hassasiyeti	Veri sayfasından malzeme özelliklerinin çıkarılması (D: Deneyssel)	Performans ve maks. Parametrelerin hesaplanması	Kullanılan malzeme özellikleri (S: Sabit T:Sıcaklığa bağlı)	Hem seri hem de paralel bağlı modüller için tek model
1	[134]	TEG/TEC	-	-	-	+	+	S	-
2	[135, 136]	TEG	-	+	-	-	-	T	-
3	[137]	TEC	-	+	-	-	-	T	-
4	[138]	TEG	-	-	-	-	-	S	-
5	[139]	TEG	-	-	-	- D	-	T (D)	-
6	[140]	TEG	-	+	?	-	-	S	Sadece Seri bağlı için
7	[141]	TEG/TEC	-	-	-	+	+	S	-
8	[142]	TEG	-	+	-	-	-	S	-
9	[143]	TEG/TEC	-	+	-	-	-	T	-
10	[144]	TEG	-	+	-	- D	-	S	-
11	[145]	TEG	-	+	-	-	-	S	-
12	[146]	TEG	-	+	?	+ Kısmen	+	S	-

Tablo 7.1. (Devamı) TEM modellerinin karşılaştırılması.

NO	KAYNAK NO.	Modellenen TEM tipi	İki Yönlü Model	Elektrik devresinde simülasyon	Karşılık gelen portları göstererek ısı ve elektriksel polarite hassasiyeti	Veri sayfasından malzeme özelliklerinin çıkarılması (D: DeneySEL)	Performans ve maks. Parametrelerin hesaplanması	Kullanılan malzeme özellikleri (S: Sabit T:Sıcaklığa bağlı)	Hem seri hem de paralel bağlı modüller için tek model
13	[147]	TEG	-	+	-	-	-	S	-
14	[148]	TEG	-	+	-	-	-	T	-
15	[149]	TEG	-	+	-	-	-	S	-
16	[150]	TEG	-	+	?	-	-	T	-
17	[151]	TEG	-	+	-	+ Kısmen	-	S	+
18	[152]	TEG	-	+	-	-	-	S	+
19	[153]	TEG/TEC	-	?	-	-	-	S	-
20	[155]	TEG/TEC	-	-	-	-	-	S	-
21	[157]	TEG/TEC	+	+	?	-	-	S	+
22	[159]	TEG/TEC	-	-	-	-	-	S	-
23	[163]	TEG	-	+	-	+	-	S	-
24	[189]	TEG/TEC	+	+	+	-	-	S	-
25	Bu çalışma [133]	TEG/TEC	+	+	+	+	+	S&T	+

Simulink tabanlı TEM modelleri Tablo 7.1’de karşılaştırılmıştır. Simulink içermeyen çoklu fizik simülasyonları ve sayısal çözümlere dayalı modeller tabloya dahil edilmemiştir. Ayrıca, MATLAB/Simulink Simscape kitaplığında [189] mevcut olan dahili model karşılaştırmaya eklenmiştir. İlgili kaynaktan bilgi elde edilemiyorsa veya net bir şekilde tanımlanamıyorsa soru işareti kullanılmıştır. Tablonun sütunları aşağıdaki gibi kısaca özetlenmiştir.

“Modellenen TEM tipi”, TEM’in hangi modda yani TEG veya TEC olarak kullanıldığı hakkında bilgi verir. Ayrıca, bazı çalışmalar ayrı TEG ve TEC modellerini dahil etmiştir.

“İki yönlü model”, modellenen cihazın aynı simülasyonda hem TEG hem de TEC modunda kullanıma uygun olup olmadığı ile ilgilidir.

“Elektrik devresinde simülasyon”, modelin bir elektrik devresi simülasyonunda kullanılıp kullanılmadığı bilgisini verir. Bazı modeller, modülü bir elektrik devresinde kullanmadan yalnızca TEM özelliklerini çıkarmak için hesaplamalar yapar.

“Karşılık gelen portları göstererek ısı ve elektriksel polarite hassasiyeti”, modelin gerçek hayattaki kullanıma benzer ısı ve elektriksel portlara sahip olması ve portların zıt kutuplarında çalışmaya uyumlu olması ile ilgilidir. Uyumluluk sorunu ayrıca, kutuplar tersine dönse bile modelin performans ve maksimum parametrelerini ölçüm bağlantı noktası aracılığıyla verip veremeyeceğini de içerir.

“Veri sayfasından malzeme özelliklerinin çıkarılması”, modelin malzeme özelliklerini veri sayfasından bulma yeteneğine sahip olup olmadığı ile ilgilidir. Bazı modeller, hazır çıkarılmış malzeme özelliklerini kullanmaktadır.

“Performans ve maks. parametreler”, modelin performans ve maksimum parametreleri hesaplama yeteneğine sahip olup olmadığı ile ilgilidir. Bu parametrelerin gerçek zamanlı olarak elde edilmesi, çalışmakta olan cihazın doğru bir şekilde gözlemlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi için çok önemlidir.

“Kullanılan malzeme özellikleri (sabit veya sıcaklığa bağlı)”, modelin malzeme özelliklerini nasıl kullandığı ile ilgilidir.

“Hem seri hem de paralel bağlı modüller için tek model”, modelin elektriksel olarak seri ve/veya paralel bağlı özdeş TEM’leri ek TEM blokları kullanmadan tek bir blok olarak simüle etmeye uyumlu olup olmadığı ile ilgilidir.

Gerçek hayattaki kullanımda ise, TEM'in üretimine göre kendi sınır çalışma koşulları vardır. Bu çalışmada sunulan metodoloji, TE sisteminin özelliklerini tahmin etmek için bir simülasyon yöntemidir. Bu, modelimiz ile simüle edilen bir TEM'in gerçek hayatta iki yönlü kullanıma uygun olduğu anlamına gelmemektedir. Öte yandan, TEM zıt kutupta kullanıldığında, TEM'in performansı orijinal işleminden farklı olabilir. Ayrıca TEM'lerin üretici tanımlı sıcak ve soğuk tarafları ters çevrilirse çalışma aralıkları farklı olabilir. Ayrıca bazı üreticiler, TEG olarak kullanmak üzere soğutucu modüllerinin güç üretim özelliklerine ilişkin bilgileri içerir. Bu nedenle, TEM'in sınır koşullarının veya sıcaklık çevrimi uygulamalarına uygunluğunun TEM veri sayfası ile teyit edilmesi veya üretici tarafından onaylanması gerekir.

Sonuç olarak, modelimiz, veri sayfalarındaki parametreleri kullanarak bir veya daha fazla elektriksel olarak seri ve/veya paralel bağlı özdeş TEG'leri veya TEC'leri tek bir blok olarak pratik olarak simüle etmek için kullanışlı bir araçtır. Ayrıca model, portların polarite hassasiyeti sayesinde çift yönlü kullanım ve TEC sıcaklık çevrimi uygulamaları ile uyumludur.

Tezde önerilen TEM modelinin PV-TE hibrit sistemlerde iki yönlü kullanılabilmesine yönelik MATLAB/Simulink ortamında ısı geçişi modeli kurulmuştur. Simülasyonlarda aynı TEM modeli hem PV-TEG sistemde elektrik üretimi için kullanılmış, hem de PV-TEC sistemde PV hücrelerin soğutulmasında kullanılmıştır.

Ayrıca, simülasyon modeli ile gerçek sistemin çalışmasının kıyaslanması amacıyla örnek bir PV-TE hibrit deney düzeneği gerçekleştirilmiştir. $39 \times 39 \text{ mm}^2$ boyutlarında özel kesim PV hücreleri arada ısı geçiş malzemesi olmak üzere doğrudan $40 \times 40 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki TEM'lerin üzerine irtibatlandırılmıştır. TEM'lerin diğer yüzeylerine ısı alıcı takılmıştır. Sette kullanılan PV ve TE sistemlerin elektriksel karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek için Arduino UNO mikrodenetleyici tabanlı bir ölçüm ve veri kayıt sistemi oluşturulmuştur. Arduino ile kontrol edilen buck tipi DC-DC dönüştürücü tasarlanmış, PWM çalışma oranı değiştirilerek sistemin değişken yük altındaki gerilim, akım ve güç değerleri elde edilmiştir. Güneş ışıınımı ölçümü için Arduino tabanlı ışıınım ölçer tasarlanmış ve doğruluğu piranometre ile kalibre edilmiştir. PV-TE sistemde ısı geçişinin simülasyonundan önce, deneyda kullanılan PV ve TE sistemlerin karakteristiklerinin ayrı ayrı belirlenmesi ile simülasyon ve deney karakteristiklerinin örtüşmesi sağlanmıştır.

Bu tezde önerilen modelin ve modelin doğrulanması için tasarlanan deney düzeneğinin sınırlarının, deneyde kullanılan TE malzemelerin sınırları yönünden belirlenmesi amacıyla, TEG çalışması için veri sayfasında tanımlanan maksimum sıcaklık, TEC çalışması için veri sayfasında tanımlanan maksimum akım ve gerilim bilinmelidir. Deneyde kullanılan TEC1-12706 soğutucu modüllerin veri sayfasında, maksimum çalışma sıcaklığının 138 °C, maksimum akım ve gerilim değerlerinin sırasıyla 6,4 A ve 14,4 V olduğu belirtilmiştir [190]. PV hücrelerinin sağlıklı çalışabilmesi için maksimum sıcaklık değeri ise [191, 192]'de 85°C olarak belirtilmiştir. Deney koşullarında TEG modu için maksimum sıcaklık sınırına, ışıyım yoğunlaştırıcı kullanılarak PV hücre yüzeyine gelen ışıyımın artırılması ile ulaşılabilir. TEC modunda ise soğutucunun besleme gerilim ve akımının artırılmasıyla sınır değerlere ulaşılabilir.

Simülasyonlarda TE modüllere bağlanmış olan ısı alıcıların soğutma kapasitelerinin PV hücrelerin ısınmasında önemli olduğu görülmüştür. Deney koşullarının simülasyonlarında güneş ışıyımı 950 W/m² alınmış olup, h.A soğutma kapasitesi 0,8 W/°K alındığında PV hücre yüzey sıcaklıkları 303 °K (30 °C) ve TEG modül yüzey sıcaklıkları farkı ΔT 1,79 °K iken, h.A 0,03 W/°K alındığında PV hücre yüzey sıcaklıkları 321,9 °K (48,9 °C) ve ΔT TEG modül yüzey sıcaklıkları farkı 1,172 °K bulunmuştur. PV hücre sıcaklıkları 49 °C civarında ölçüldüğünden bu sonuca göre h.A için 0,03 değerinin simülasyonlarda kullanılmasının daha gerçekçi çıktılar vereceği düşünülmektedir.

Güneş ışıyımının bu seviyelerinde TEG yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı çok küçük olduğundan TEG tarafından üretilen güç azdır. TEG yüzey sıcaklık farkının artırılması amacıyla ışıyım yoğunlaştırıldığı CPV-TEG sistem düşünülürse ve STC'ye kıyasla 2 kat yoğunlaştırma varsayımı ile ışıyım 2000 W/m² olursa PV hücre sıcaklığı 349,3 °K (76,3 °C) ve ΔT TEG modül yüzey sıcaklıkları farkı 2,62 °K bulunmuştur. Bu koşullarda TEM ısı alıcısının soğutma kapasitesi 10 katına çıkarılırsa PV hücre sıcaklığı 311 °K (38 °C) ve ΔT TEG modül yüzey sıcaklıkları farkı 3,98 °K olmuştur. CPV-TEC sistemi simülasyonu yapılırsa TEC'lerin maksimum gerilim değerlerinin %2 si mertebesinde gerilimle beslendiği durum için ışıyım 2000 W/m² ve h.A 0,03 W/°K alınırsa PV hücre sıcaklığı 348,5 °K (75,5 °C) bulunmuştur yani PV hücre sıcaklığı TE soğutma ile 76,3 °C'den 75,5 °C'ye düşürülmüştür.

PV-TE sistemin farklı şartlardaki çalışmalarına ait sonuçlar Tablo 7.2’de gösterilmiştir. PV hücre sıcaklığı, PV sistem gücü ve TEG sistem gücünün ortalama değerleri tabloda belirtilmiştir. PV MPPT algoritmasının farklı ΔD koşulunda çalışması ve TEG sistemin kontrol durumu gibi bilgilere yer verilmiştir.

1. satırda deney sonuçları özetlenmiştir. 2. satırda deney şartlarına karşılık gelen simülasyon sonuçları yazılmıştır. 3. Satırda simülasyon, ΔD %0,1 için tekrarlanmıştır. 4. satırda TEG uçları açık devre iken simülasyon değerleri ve 5. satırda TEG uçları kısa devre iken simülasyon değerleri yazılmıştır. 6. satırda ise sistemde arada TEG olmadan ısı alıcının doğrudan PV hücrelere bağlı olduğu durum için simülasyon değerleri bulunmaktadır. 7. satırda ışıının yoğunlaştırılarak önceki koşullara göre 2 kat olması durumundaki, TEG bulunmayan PV sistemine ait simülasyon sonuçları yazılmıştır. 8. satırda ise PV-TEG sistemde 2 kat ışıınım koşulunun simülasyon sonuçları bulunmaktadır. TEG’li ve TEG’siz sistemlerin kıyaslamasının yapıldığı 3. ve 6. ile 7. ve 8. satırlardan görüleceği üzere, TEG’li sistemde üretilen PV+TEG toplam güç, sadece PV hücreler bulunan sistemde üretilen güçten daha düşük olmuştur.

Tablo 7.2. Farklı şartlar altında PV-TE sistemde simülasyon ve deney sonuçları.

No	Deney / Simülasyon	PV MPPT P&O	TEG MPPT	T_{PV} (°C)	P_{PV} (W)	P_{TEG} (mW)
1	Deney	ΔD %1,96	Sabit D%50	49	1,382	1,59
2	Sim.	ΔD %1,96	Sabit D%50	49,14	1,375	1,517
3	Sim.	ΔD %0,1	Sabit D%50	48,88	1,490	1,536
4	Sim.	ΔD %0,1	TEG Açık devre	48,97	1,487	0
5	Sim.	ΔD %0,1	TEG Kısa devre	48,81	1,490	0
6	Sim.	ΔD %0,1	-	48,17	1,497	-
7	(2xG)Sim.	ΔD %0,1	-	72,20	1,966	-
8	(2xG)Sim.	ΔD %0,1	Sabit D%50	73,59	1,951	6,255

Simülasyon ve deney sonuçları genel olarak benzerlik göstermekte olup, aralarındaki farklar çeşitli etkenlerden kaynaklanmaktadır. Rüzgar etkisinin simülasyonlara dahil edilmesi amacıyla, rüzgar hızı 1 m/s olarak alınmıştır. Deneyler ise yarı açık bir balkon

ortamında, güneşli ve bulutsuz bir havada gerçekleştirilmiş; rüzgar hızı ile ışıının deney süresince sabit kaldığı varsayılmıştır. Simülasyonlarda ısı geçişi modeli için sürekli rejim (kararlı hal) denklemleri kullanılmıştır. Deneyler ise değişken çevre koşullarında yapılmış ve sonuçlar, sürekli rejim sağlandıktan sonra alınmıştır. Ayrıca, deneylerde kullanılan PV hücreler ve TEM'ler, veri sayfalarındaki karakteristiklerinden farklı davranışlar sergilemiştir. Aynı tip hücre ve modüller dahi birbirinden farklı çalışma sonuçları göstermiştir. Bu nedenle, deneylerde ölçülen PV hücre sıcaklıkları farklılık göstermiş ve ortalama değerler alınarak değerlendirme yapılmıştır. Sıcaklık, ışıının, akım ve gerilim ölçüm sensörlerinden kaynaklı hatalar da deney ve simülasyon sonuçları arasındaki farklara katkıda bulunmuştur.

DC-DC dönüştürücü tarafında ise malzeme iç dirençleri gibi elektronik bileşenlere ait karakteristik değerler veri sayfalarından edinilerek simülasyon modeline dahil edilmiştir. Bununla birlikte, bu bileşenlerin çevre ve çalışma koşullarından etkilenmediği varsayılmıştır. Deneyde DC-DC dönüştürücünün PWM anahtarlamaşı, 8 bit çözünürlüklü Arduino UNO mikrodeneleyici ile gerçekleştirilmiştir. MPPT işlemleri, P&O algoritmasıyla sağlanmış; çalışma oranı değişimleri, iterasyon basamaklarında %1,916'ya (5/255) karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır. Algoritmada yön değiştirme hatalarını önlemek amacıyla bu değer daha da düşürülmemiştir. Simülasyonda kullanılan MPPT algoritmasında da aynı %1,916'lık değişim uygulanmış, ancak bu durumda PV sistem gücündeki dalgalanmalar, deneyde gözlemlenenlere göre daha yüksek olmuştur.

Simülasyon sonuçlarına göre PV-TE sisteminde TEG'den daha fazla güç çıkışı elde edebilmek için ışıının seviyesinin ve TEM ısı alıcısının soğutma kapasitesinin yüksek olması gerekmektedir. Buna benzer şekilde, farklı şartlarda PV-TEG enerji üretim sisteminin veya PV-TEC enerji üretim-soğutma sisteminin nasıl çalışacağı üzerine farklı senaryoların simülasyonları yapılabilir. Sonuç olarak, bu tezde oluşturulan simülasyon modelinin, fiziki uygulama aşamasına geçilmeden önce sistem tasarımı ve sistemin boyutlandırılması gibi konularda yardımcı bir araç olacağı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Lewis, N.S. (2007). Toward Cost-Effective Solar Energy Use. *Science*, 315, 798–801.
- [2] Huang, S.; Xu, X. (2017). A regenerative concept for thermoelectric power generation. *Appl. Energy*, 185, 119–125.
- [3] Kabir, E.; Kumar, P.; Kumar, S.; Adelodun, A.A.; Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 82, 894–900.
- [4] Sampaio, P.G.V.; González, M.O.A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017, 74, 590–601.
- [5] Tschopp, D.; Tian, Z.; Berberich, M.; Fan, J.; Perers, B.; Furbo, S. (2020). Large-scale solar thermal systems in leading countries: A review and comparative study of Denmark, China, Germany and Austria. *Appl. Energy*, 270, 114997.
- [6] Nelson, J. (2003). The physics of solar cells. London: Imperial College Press
- [7] Hirst, L.C., & Ekins-Daukes, N.J. (2011). Fundamental losses in solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19: 286–293. <https://doi.org/10.1002/pip.1024>
- [8] Da, Y., Xuan, Y., & Li, Q. (2016). From light trapping to solar energy utilization: A novel photovoltaic e thermoelectric hybrid system to fully utilize solar spectrum. *Energy*, 95, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.024>
- [9] Semonin, O. E., Luther, J. M., Beard, M. C. (2012). Quantum dots for next-generation photovoltaics, *Mater. Today*. 15 (11) 508–515. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(12\)70220-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70220-1).
- [10] Tohidi, F., Holagh, S.G., & Chitsaz, A. (2022). Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Applied Thermal Engineering*, 201(PA), 117793. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>
- [11] Fan, S., Wang, Y., Cao S., Sun T., Liu P. (2021). A novel method for analyzing the effect of dust accumulation on energy efficiency loss in photovoltaic (PV) system. *Energy*, 234:121112.
- [12] Makki, A., Omer, S., Su, Y., Sabir, H. (2016). Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic–thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system. *Energy Conversion and Management*, 112:274–87.
- [13] Lu, Y., Li, G. (2013). Potential application of electrical performance enhancement methods in PV/T module. *Energy*, 281:128253.

- [14] Ziar, H. (2022). Effect of thermal radiation entropy on the outdoor efficiency limit of single-junction silicon solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 242:111763.
- [15] Wang, J., Li, Y., Yang, B., & Jiang, L. (2024). Multi-optimized reconfiguration of hybrid photovoltaic-thermoelectric generation (PV-TEG) system for performance enhancement. *Energy Conversion and Management*, 307, 118373. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.118373>
- [16] Schams, B., & TamizhMani, G. (2011). BAPV modules with different air gaps: Effect of temperature on relative energy yield and lifetime. *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 3213–3217. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2011.6186623>
- [17] Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- [18] Dunham, M. T., Barako, M. T., LeBlanc, S., Asheghi, M., Chen, B., & Goodson, K. E. (2015). Power density optimization for micro thermoelectric generators. *Energy*, 93, 2006–2017. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.10.032>
- [19] Pereira, A., Caroff, T., Lorin, G., Baffie, T., Romanjek, K., Vesin, S., Kusiaku, K., Duchemin, H., Salvador, V., Miloud-Ali, N., Aixala, L., & Simon, J. (2015). High temperature solar thermoelectric generator – Indoor characterization method and modeling. *Energy*, 84, 485–492. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.03.053>
- [20] Zhang, J., & Xuan, Y. (2017). Performance improvement of a photovoltaic-Thermoelectric hybrid system subjecting to fluctuant solar radiation. *Renewable Energy*, 113, 1551–1558. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.003>
- [21] Benghanem, M., Al-mashraqi, A. A., & Daffallah, K. O. (2016). Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites. *Renewable Energy*, 89, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.011>
- [22] Dallan, B. S., Schumann, J., & Lesage, F. J. (2015). Performance evaluation of a photoelectric–thermoelectric cogeneration hybrid system. *Solar Energy*, 118, 276–285. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.05.034>
- [23] Zhang, Y., Fang, J., He, C., Yan, H., Wei, Z., & Li, Y. (2013). Integrated Energy-Harvesting System by Combining the Advantages of Polymer Solar Cells and Thermoelectric Devices. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(47), 24685–24691. <https://doi.org/10.1021/jp4044573>
- [24] Chandel, R., Singh Chandel, S., Prasad, D., & Prakash Dwivedi, R. (2022). Review on thermoelectric systems for enhancing photovoltaic power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(PB), 102585. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102585>
- [25] He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., & Zhao, X. (2015). Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 143, 1–25. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.12.075>

- [26] Wu, S. Y., Zhang, Y. C., Xiao, L., & Shen, Z. G. (2018). Performance comparison investigation on solar photovoltaic-thermoelectric generation and solar photovoltaic-thermoelectric cooling hybrid systems under different conditions. *International Journal of Sustainable Energy*, 37(6), 533–548. <https://doi.org/10.1080/14786451.2017.1345906>
- [27] Lineykin, S., & Ben-yaakov, S. (2007). Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43 (2): 505–512.
- [28] Xi, H., L. Luo, and G. Fraisse. (2007). Development and Applications of Solar-based Thermoelectric Technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11 (5): 923–936.
- [29] Najafi, H., and Woodbury, K. A. (2013). Modeling and Analysis of a Combined Photovoltaic-Thermoelectric Power Generation System. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135 (3): 939–945.
- [30] Wang, N., Han, L., He, H., Park, N.-H., & Koumoto, K. (2011). A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3676–3679. <https://doi.org/10.1039/C1EE01646F>
- [31] Yang, D., and Yin, H. (2011). Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26 (2): 662–670.
- [32] Li, Y., S. Witharana, H. Cao, M. Lasfargues, Y. Huang, and Y. Ding. (2014). Wide Spectrum Solar Energy Harvesting Through an Integrated Photovoltaic and Thermoelectric System. *Particuology*, 15 (4): 39–44.
- [33] Rezanian, A., Sera, D. and Rosendahl, L. A. (2016). Coupled Thermal Model of Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid Panel for Sample Cities in Europe. *Renewable Energy*, 99: 127–135.
- [34] Bjork, R., and Nielsen, K. K. (2015). The Performance of a Combined Solar Photovoltaic (PV) and Thermoelectric Generator (TEG) System. *Solar Energy*, 120: 187–194.
- [35] Zhang, J., Xuan, Y. and Yang, L. (2014). Performance Estimation of Photovoltaic–Thermoelectric Hybrid Systems. *Energy*, 78: 895–903.
- [36] van Sark, W. G. J. H. M. (2011). Feasibility of Photovoltaic – Thermoelectric Hybrid Modules. *Applied Energy*, 88 (8): 2785–2790.
- [37] Huen, P., Daoud, W.A. (2016). Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. *Renew. Sust. Energ Rev.*, 72 (2016), pp. 1295-1302
- [38] Elsarrag, E., Pernau, H., Heuer, J., Roshan, N., Alhor, Y., & Bartholomé, K. (2015). Spectrum splitting for efficient utilization of solar radiation: a novel photovoltaic–thermoelectric power generation system. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0016-y>
- [39] X. Ju, Z. Wang, G. Flamant, P. Li, W. Zhao. (2012). Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic-thermoelectric hybrid system. *Sol. Energy*, 86, pp. 1941-1954

- [40] D. Narducci, B. Lorenzi. (2016). Challenges and perspectives in tandem thermoelectric-photovoltaic solar energy conversion. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 15 (2016), pp. 348-355
- [41] Ellion, EM. (1988). Combined photovoltaic-thermoelectric solar cell and solar cell array. Patent WO 88/02556
- [42] Rockendorf G, Sillmann R, Podlowski L, Litzenburger B. (1999). PV-hybrid and thermoelectric collectors. *Solar Energy*, 67:227–37.
- [43] Vorobiev Y, González-Hernández J, Vorobiev P, Bulat L. (2006). Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. *Solar Energy*, 80:170–6.
- [44] Tritt, T. M., Böttner, H., & Chen, L. (2008). Thermoelectrics: Direct Solar Thermal Energy Conversion. *MRS Bulletin*, 33(4), 366–368. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.73>
- [45] Muhtaroglu, A., Yokochi, A., & von Jouanne, A. (2008). Integration of thermoelectrics and photovoltaics as auxiliary power sources in mobile computing applications. *Journal of Power Sources*, 177(1), 239–246. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2007.11.016>
- [46] Lamba, R., & Kaushik, S. C. (2016). Modeling and performance analysis of a concentrated photovoltaic – thermoelectric hybrid power generation system. *Energy Conversion and Management*, 115, 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.061>
- [47] Liao, T., Lin, B., Yang, Z. (2014). Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation device. *Int. J. Therm. Sci.*, 77 (2014), pp. 158-164
- [48] Chávez-Urbiola, E. A., Vorobiev, Y. V., Bulat, L. P. (2012). Solar hybrid systems with thermoelectric generators. *Sol. Energy*, 86, pp. 369-378
- [49] Lin, J., Liao, T., & Lin, B. (2015). Performance analysis and load matching of a photovoltaic-thermoelectric hybrid system. *Energy Conversion and Management*, 105, 891–899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.054>
- [50] Attivissimo, F., Nisio, A. di, Maria, A., Lanzolla, L., & Paul, M. (2015). Feasibility of a Photovoltaic – Thermoelectric Generator: Performance Analysis and Simulation Results. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 64(5), 1158–1169.
- [51] Kwan, T. H., & Wu, X. (2016). Power and mass optimization of the hybrid solar panel and thermoelectric generators. *Applied Energy*, 165, 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.016>
- [52] Deng, Y., Zhu, W., Wang, Y., & Shi, Y. (2013). Enhanced performance of solar-driven photovoltaic – thermoelectric hybrid system in an integrated design. *Solar Energy*, 88, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.002>
- [53] Ramasamy, M., Oh, S., Rai, P., & Varadan, V. K. (2014). Enhancement of hybrid tandem photovoltaic thermoelectric devices by fishnet through metamaterials and nanoporous TE materials. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference*, 275–279. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924907>

- [54] Hsueh, T., Shieh, J., & Yeh, Y. (2015). Hybrid Cd-free CIGS solar cell / TEG device with ZnO nanowires. *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, January 2014, 507–512. <https://doi.org/10.1002/pip>
- [55] Da, Y., Xuan, Y., & Li, Q. (2016). From light trapping to solar energy utilization: A novel photovoltaic e thermoelectric hybrid system to fully utilize solar spectrum. *Energy*, 95, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.024>
- [56] Hashim, H., Bomphrey, J. J., & Min, G. (2016). Model for geometry optimisation of thermoelectric devices in a hybrid PV / TE system. *Renewable Energy*, 87, 458–463. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.029>
- [57] Joon, J., Yoo, D., Park, C., Hee, H., & Hyun, J. (2016). All organic-based solar cell and thermoelectric generator hybrid device system using highly conductive PEDOT: PSS film as organic thermoelectric generator. *Solar Energy*, 134, 479–483. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.006>
- [58] Kossyvakis, D. N., Voutsinas, G. D., Hristoforou, E.V. (2016). Experimental analysis and performance evaluation of a tandem photovoltaic – thermoelectric hybrid system. *Energy Conversion and Management*, 117, 490–500. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.023>
- [59] Makki, A., Omer, S., Su, Y., & Sabir, H. (2016). Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic – thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system. *Energy Conversion and Management*, 112, 274–287. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.069>
- [60] Zhu, W., Deng, Y., Wang, Y., Shen, S., & Gulfam, R. (2016). High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management. *Energy*, 100, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.055>
- [61] Riahi, A., ben Haj Ali, A., Fadhel, A., Guizani, A., & Balghouthi, M. (2020). Performance investigation of a concentrating photovoltaic thermal hybrid solar system combined with thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 205, 112377. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112377>
- [62] Mohsenzadeh, M., Shafii, M. B., & Jafari mosleh, H. (2017). A novel concentrating photovoltaic/thermal solar system combined with thermoelectric module in an integrated design. *Renewable Energy*, 113, 822–834. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.047>
- [63] Benghanem, M., Al-mashraqi, A. A., & Daffallah, K. O. (2016). Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites. *Renewable Energy*, 89, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.011>
- [64] Sripadmanabhan Indira, S., Vaithilingam, C. A., Chong, K. K., Saidur, R., Faizal, M., Abubakar, S., & Paiman, S. (2020). A review on various configurations of hybrid concentrator photovoltaic and thermoelectric generator system. *Solar Energy*, 201, 122–148. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.090>
- [65] Bell, L. E. (2008). Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science*, 321(5895), 1457–1461. <https://doi.org/10.1126/science.1158899>

- [66] Riffat, S. B., and X. Ma. (2004). Improving the Coefficient of Performance of Thermoelectric Cooling Systems: A Review. *International Journal of Energy Research*, 28 (9): 753–768.
- [67] Zhao, D., and G. Tan. (2014). A Review of Thermoelectric Cooling: Materials, Modeling and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 66 (1–2): 15–24.
- [68] Liao T, He Q, Xu Q, Dai Y, Cheng C, Ni M. (2021) Coupling properties and parametric optimization of a photovoltaic panel driven thermoelectric refrigerators system. *Energy*, 220:119798. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119798>.
- [69] Najafi, H., & Woodbury, K. A. (2013). Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells. *Solar Energy*, 91, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.026>
- [70] Chandel, R., Chandel, S. S., & Khosla, A. (2024). Modelling and experimental investigation of cooling of field-operating PV panels using thermoelectric devices for enhanced power generation by industrial solar plants. *Next Energy*, 5(June), 100162. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100162>
- [71] Karimi, Z.M. (2014). Modelling, Implementation and Performance Analysis of a Hybrid Wind Solar Power Generator with Battery Storage, University of Coimbra
- [72] Sumathi, S., Ashok Kumar, L., Surekha, P. (2015). Solar PV and Wind Energy Conversion Systems. *Green Energy and Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14941-7_2
- [73] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
- [74] Photovoltaic systems technology. (2003). Universitat Kassel, Kassel, Germany.
- [75] Castaner, L. and Silvestre, S. (2002). *Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice*. New York: Wiley
- [76] Krane, K. S. (1995). *Modern Physics*. 2nd ed. New York: Wiley
- [77] Wang, L., & Yu, J. (2023). Principles of photocatalysis. *Interface Science and Technology*, 35, 1–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0>
- [78] Guechi, A. & Chegaar, M. (2007). Effects of diffuse spectral illumination on microcrystalline solar cells. *J. Electron Devices*, vol. 5, pp. 116–121.
- [79] Riordan, C. and Hulstron, R. (1990). “What is an air mass 1.5 spectrum? [solar cell performance calculations],” in Proc. Conf. Record 21st IEEE Photovoltaic Spec. Conf., 1990, vol. 2, pp. 1085–1088.
- [80] American Society for Testing and Materials (ASTM). Reference solar spectral irradiance: Air mass 1.5. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> adresinden 10 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.
- [81] IEEE Standard Definitions of Terms for Solar Cells. (1969). in *IEEE Std No.307* , vol., no., pp.1-4, 11 Nov. 1969, doi: 10.1109/IEEESTD.1969.120580.

- [82] W. Xiao, W. G. Dunford, and A. Capel, (2004). A novel modeling method for photovoltaic cells. in *Proc. IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf. (PESC)*, vol. 3, pp. 1950–1956.
- [83] Sedra, A. S. and Smith, K. C. (2006). *Microelectronic Circuits*. London, U.K.: Oxford Univ. Press.
- [84] Möller, H. J. (1993). *Semiconductors for Solar Cells*. Norwood, MA: Artech House.
- [85] Fahrenbruch, A. L. and Bube, R. H. (1983). *Fundamentals of Solar Cells*. San Francisco, CA: Academic.
- [86] Lasnier, F. and Ang, T. G. (1990). *Photovoltaic Engineering Handbook*. New York: Adam Hilger.
- [87] Rauschenbach, H. S. (1980). *Solar Cell Array Design Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [88] Tsai, H. (2010). Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab /Simulink. *Solar Energy*, 84(7), 1318–1326. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.012>
- [89] Gow, J. A., & Manning, C. D. (1999). Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, vol. 146, no. 2, pp. 193–200.
- [90] Gow, J. A., & Manning, C. D. (1996). Development of a model for photovoltaic arrays suitable for use in simulation studies of solar energy conversion systems. *6th Int. Conf. Power Electron. Variable Speed Drives*, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1049/cp:19960890>
- [91] Pongratananukul, N. and Kasparis, T. (2004). Tool for automated simulation of solar arrays using general-purpose simulators. *IEEE Workshop Comput. Power Electron.*, pp. 10–14.
- [92] Chowdhury, S., Taylor, G. A., Chowdhury, S. P., Saha, A. K., and Song, Y. H. (2007). Modelling, simulation and performance analysis of a PV array in an embedded environment. *42nd Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, pp. 781–785.
- [93] Hyvarinen, J. and Karila, J. (2003). New analysis method for crystalline silicon cells. *3rd World Conf. Photovoltaic Energy Convers.*, vol. 2, pp. 1521–1524.
- [94] Nishioka, K., Sakitani, N., Uraoka, Y., and Fuyuki, T. (2007). Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, vol. 91, no. 13, pp. 1222–1227.
- [95] Carrero, C., Amador, J., and Arnaltes, S. (2007). A single procedure for helping PV designers to select silicon PV module and evaluate the loss resistances. *Renewable Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2579–2589, Dec.
- [96] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., & Tzitzilonis, V. (2009). Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules. *Microelectronics Journal*, 40(7), 1094–1102. <https://doi.org/10.1016/J.MEJO.2008.05.014>

- [97] Ahmad, G.E., Hussein, H. M. S., & El-Ghetany, H. H. (2003). Theoretical analysis and experimental verification of PV modules. *Renewable Energy*, 28(8), 1159–1168. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00228-8)
- [98] Walker, G. (2001). Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. *J. Elect. Electron. Eng.*, Australia, vol. 21, no. 1, pp. 45–55.
- [99] Veerachary, M. (2006). PSIM circuit-oriented simulator model for the nonlinear photovoltaic sources. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 42, no. 2, pp. 735–740, Apr. 2006.
- [100] Celik, A. N. And Acikgoz, N. (2007). Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Appl. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 1–15, Jan.
- [101] Kuo, Y. C., Liang, T. J., and Chen, J. F. (2001). Novel maximum-power-pointtracking controller for photovoltaic energy conversion system. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 594–601, Jun.
- [102] Elhagry, M. T., Elkousy, A. A. T., Saleh, M. B., Elshatter, T. F., and Abou-Elzahab, E. M. (1997). Fuzzy modeling of photovoltaic panel equivalent circuit. *40th Midwest Symp. Circuits Syst.*, Aug., vol. 1, pp. 60–63.
- [103] Liu, S., and Dougal, R. A. (2002). Dynamic multiphysics model for solar array. *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, no. 2, pp. 285–294, Jun.
- [104] Yusof, Y., Sayuti, S. H., Abdul Latif, M., and Wanik, M. Z. C. (2004). Modeling and simulation of maximum power point tracker for photovoltaic system. *Nat. Power Energy Conf. (PEC)*, pp. 88–93.
- [105] Sera, D., Teodorescu, R., and Rodriguez, P. (2007). PV panel model based on datasheet values. *IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, pp. 2392–2396.
- [106] Vitorino, M. A., Hartmann, L. V., Lima, A. M. N., and Correa, M. B. R. (2007). Using the model of the solar cell for determining the maximum power point of photovoltaic systems. *Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–10.
- [107] Dondi, D., Brunelli, D., Benini, L., Pavan, P., Bertacchini, A., and Larcher, L. (2007). Photovoltaic cell modeling for solar energy powered sensor networks. *2nd Int. Workshop Adv. Sens. Interface (IWASI)*, pp. 1–6.
- [108] Patel, H., and Agarwal, V. (2008). MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics. *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 1, pp. 302–310, Mar.
- [109] Wang, Y.-B., Wu, C.-S., Liao, H., & Xu, H.-H. (2008). Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system. 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2008.4608553>
- [110] Khouzam, K., Ly, C., Koh, C. K., and Ng, P. Y. (1994). Simulation and realtime modelling of space photovoltaic systems. *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, 2, 2038–2041 vol.2. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.520770>

- [111] Glass, M. C. (1996). Improved solar array power point model with SPICE realization. *31st Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. (IECEC)*, Aug., vol. 1, pp. 286–291.
- [112] Altas, I. H., and Sharaf, A. M. (2007). A photovoltaic array simulation model for matlab–simulink GUI environment. *Int. Conf. Clean Elect. Power (ICCEP)*, pp. 341–345.
- [113] Matagne, E., Chenni, R., and El Bachtiri, R. (2007). A photovoltaic cell model based on nominal data only. *Int. Conf. Power Eng., Energy Elect. Drives, POWERENG*, pp. 562–565.
- [114] Tan, Y. T., Kirschen, D. S., and Jenkins, N. (2004). A model of PV generation suitable for stability analysis. *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 748–755, Dec.
- [115] Kajihara, A., and Harakawa, A. T. (2005). Model of photovoltaic cell circuits under partial shading. *IEEE Int. Conf. Ind. Technol. (ICIT)*, pp. 866–870.
- [116] Benavides, N. D., and Chapman, P. L. (2008). Modeling the effect of voltage ripple on the power output of photovoltaic modules. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2638–2643, Jul.
- [117] De Soto, W., Klein, S.A., and Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Jan.
- [118] Kou, Q., Klein, S. A., and Beckman, W. A. (1998). A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems,” *Solar Energy*, vol. 64, no. 1–3, pp. 33–40, Sep.
- [119] Driesse, A., Harrison, S., and Jain, P. (2007). Evaluating the effectiveness of maximum power point tracking methods in photovoltaic power systems using array performance models. *IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC)*, pp. 145–151.
- [120] Messenger R. A. and Ventre, J. (2004). *Photovoltaic Systems Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.
- [121] Nakanishi, F., Ikegami, T., Ebihara, K., Kuriyama, S., & Shiota, Y. (2000). Modeling and operation of a 10 kW photovoltaic power generator using equivalent electric circuit method. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference- 2000 (Cat. No.00CH37036), 1703–1706. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2000.916231>
- [122] Crispim, J., Carreira, M., and Castro, R. (2007). Validation of photovoltaic electrical models against manufacturers data and experimental results. *Int. Conf. Power Eng., Energy Elect. Drives, POWERENG*, pp. 556–561.
- [123] Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., and Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proc.-Generation, Transmiss. Distrib.*, Jan., vol. 142, pp. 59–64.
- [124] Ortiz-Rivera E. I., and Peng, F. Z., (2005). Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet. *IEEE 36th Power Electron. Spec. Conf. (PESC)*, pp. 2087–2091.

- [125] Masters, G.M., (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [126] De Soto, W., Klein, S. A., Beckman, W. A., (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>
- [127] Elbaset, A. A., Abdelwahab, S. A. M., Ibrahim, H. A., & Eid, M. A. E. (2019). *Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20896-7>
- [128] Seaward GMC Instruments Group. Curve Tracing FAQ's. <https://www.seaward.com/gb/support/solar/faqs/29495-curve-tracing-faq-s/> adresinden 14 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.
- [129] Touati, F., Chowdhury, N. A., Hamad, J. A., San, A. J. R., & Gonzales, P. (2016). Investigation of solar PV performance under Doha weather using a customized measurement and monitoring system. *Renewable Energy*, 89, 564–577. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.046>
- [130] Demircan, C. (2022). Fotovoltaik–termoelektrik (PV-TE) hibrit güç üretim sistemlerinin performanslarının incelenmesi [Doktora tezi] Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
- [131] İslamoğlu, Y. (2018). Termoelektrik Enerji Sistemleri: Güç Üretimi ve Soğutma *Termodinamik*, no. 306, pp. 66-70, Şubat. 2018.
- [132] İslamoğlu, Y. (2018). Experimental Determination of Seebeck Coefficient of Thermoelectric Module. *IV Anadolu Energy Symposium with International Participation*, Edirne, pp. 2090-2095.
- [133] Yılmaz, U., Çavuş, T. F. and İslamoğlu, Y. (2022). Bidirectional Modeling of Thermoelectric Module Using MATLAB / Simulink for Circuit Simulations, *IEEE ACCESS*, vol. 10, no. July. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3195879>
- [134] Tsai, H. and Lin, J. (2010). Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab / Simulink. *Journal of Electronic Materials*, vol. 39, no. 9, pp. 2105–2111.
- [135] Kane, A., Verma, V., and Singh, B. (2012). Temperature dependent analysis of thermoelectric module using Matlab/SIMULINK. *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, pp. 632-637, doi: 10.1109/PECon.2012.6450291.
- [136] Verma, V., Kane, A., and Singh, B. (2016). Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1017–1026.
- [137] Kane, A., Verma, V., and Singh, B. (2017). Optimization of thermoelectric cooling technology for an active cooling of photovoltaic panel. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 75, 1295–1305. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.114>
- [138] Bhuiyan, M. S. R., El-Shahat, A. and Soloiu V. (2019). Thermoelectric Generator Analysis Through ANSYS and Matlab/Simulink. *2019 SoutheastCon*, pp. 1-5, doi: 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020528.

- [139] Kobbekaduwa, K. P. V. B., and Subasinghe, N. D. (2016). Modelling and Analysis of Thermoelectric Generation of Materials Using Matlab/Simulink. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 5(3), 97-104. <https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20160503.12>
- [140] Mamur, H., and Çoban, Y. (2020). Simulation of maximum power point tracking with buck-boost convertor for thermoelectric generators. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences.*, 26. 916-926. 10.5505/pajes.2020.92488.,2020.
- [141] Khamil, K. N., Sabri, M. F. M., Yusop, A. M., Mohamed, R., and M. S. Sharuddin, M. S. (2020). Modelling and Simulation of the Performance Analysis for Peltier Module and Seebeck Module using MATLAB/Simulink. *Jurnal Kejuruteraan*, 32. 231-238. 10.17576/jkukm-2020-32(2)-07.,2020
- [142] Vlach, R. (2014). Novel approach to thermoelectric generator modeling as energy harvesting system. *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics- Mechatronika*, pp. 725-728, doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018352.
- [143] Manikandan, S. and S. C. Kaushik, S. C. (2015). Thermodynamic studies and maximum power point tracking in thermoelectric generator – thermoelectric cooler combined system. *Cryogenics.*, vol. 67, pp. 52–62.
- [144] Trip, N. D. Şchiop A., and Burca, A. (2017). Considerations on the use of a MPPT circuit for a thermoelectric generator. *2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, 2017, pp. 252-255, doi: 10.1109/EMES.2017.7980427.
- [145] Thankakan, R., Rajan, E., and Nadar, S. (2019). Investigation of Thermoelectric Generator with Power Converter for Energy Harvesting Applications. *IETE J. Res.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13.
- [146] Elzalik, M., and Shehata, E. G. (2020). An experimental investigation on electrical performance and characterization of thermoelectric generator. *Int J Energy Res.*, no. August 2019, pp. 128–143.
- [147] Artal-Sevil, J. S., Beyza, J., Evangelista, M. A., and Redon, J. A. (2021). Cuk converter as Differential-Power Processing architecture applied to a low-power thermoelectric energy harvesting system with mismatched modules. *2021 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ROPEC53248.2021.9667967.
- [148] Liu, X., Yuan, S., Gu, B., Chen, Q., Pu, X., and Zhang, J. (2022). First principles study of monolayer Sb₂S₂Te and a mathematical model of a thin-film thermoelectric generator with maximum power point tracing. *Current Applied Physics*, vol. 36, no. February, pp. 117–130.
- [149] El-Shahat, A., and Bhuiyan, M. S. R. (2021). Thermoelectric Generator Performances and Efficiency Analysis Integrated with MPPT Techniques. *2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, pp. 1-7, doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375713.
- [150] Kanagaraj, N. (2021). An Enhanced Maximum Power Point Tracking Method for Thermoelectric Generator Using Adaptive Neuro - Fuzzy Inference System. *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 1207–1218.

- [151] Thankakan, R., Rajan, E., and Nadar S. (2020). Application of fuzzy logic-based MPPT technique for harvesting the heat energy dissipated by the wind generator stator windings to power single-phase AC grid systems. *Neural Comput. Appl.*, vol. 32, no. 18, pp. 15155–15170.
- [152] Ibrahim, M. N., Rezk, H., Al-Dahifallah, M., and Sergeant, P. (2019). Hybrid Photovoltaic-Thermoelectric Generator Powered Synchronous Reluctance Motor for Pumping Applications. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 146979-146988, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2945990.
- [153] Zouak, B., Ardjal, A., Bettayeb, M., Zirmi, R., and Belkaid, M. S. (2020). System of cooling and improving power output of photovoltaic solar cells. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ASET48392.2020.9118243.
- [154] Alhammad, Y. A., Al-Azzawi, W. F., and Tutunji, T. A. (2016). Current control to improve COP of thermoelectric generator and cooler for PV panel cooling. *13th Int. Multi-Conference Syst. Signals Devices*, pp. 53–58, 2016.
- [155] Al-nimr, M. A., Tashtoush, B. M., and Jaradat, A. A. (2015). Modeling and simulation of thermoelectric device working as a heat pump and an electric generator under Mediterranean climate. *Energy*, vol. 90.
- [156] Kwan. T. H., Wu, X., & Yao, Q. (2018). Thermoelectric device multi-objective optimization using a simultaneous TEG and TEC characterization. *Energy Conversion and Management*, 168, 85–97. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.04.108>
- [157] Kwan. T. H., Wu, X., & Yao, Q. (2018). Bidirectional operation of the thermoelectric device for active temperature control of fuel cells. *Applied Energy*, 222, 410–422. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.04.016>
- [158] Kwan.T. H., Wu, X., & Yao, Q. (2020). Complete implementation of the combined TEG-TEC temperature control and energy harvesting system. *Control Eng. Pract.*, 95, 104224 <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2019.104224>
- [159] Faheem, M., Abu Bakr, M., Ali, M., Majeed, M. A., Haider, Z. M., & Khan, M. O. (2024). Evaluation of Efficiency Enhancement in Photovoltaic Panels via Integrated Thermoelectric Cooling and Power Generation. *Energies*, 17(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/en17112590>
- [160] Nesarajah, M., and Frey, G. (2016). Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator," *IECON 2016- 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4252-4257, doi: 10.1109/IECON.2016.7793029.
- [161] İslamoğlu, Y. (2017). *Termoelektrik Enerji*, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Dersi, Ders Notları.
- [162] H. Lee., (2017). *Thermoelectrics: Design and Materials*, 1st ed., John Wiley & Sons, Ltd., pp. 8-37.
- [163] Al-Sharai, A. A., Muneer, A., Nataraj, C., and Salman, A. (2021). A Hybrid Clean Energy System Based Thermal Solar Technologies. *2021 Third International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change*, pp. 126-133, doi: 10.1109/IEEECONF53624.2021.9668101.

- [164] Ferrotec. Thermoelectric technical reference. <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref11/> adresinden 02 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- [165] N. Panigrahi, K. Venkatesan & M. V. Ramanan, “Performance study of thermoelectric cooler using multiphysics simulation and numerical modelling”, *International Journal of Ambient Energy*, 42:14, 1600-1606, 2021.
- [166] Chen, M., Rosendahl, L. A., Condra, T. J., and Pedersen, J. K. (2009). Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varing Material Properties in a Circuit Simulator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 112-124, March 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2005310.
- [167] Qing, S., Rezaniakolaei, A., Rosendahl, L. A., and Gou, X. (2018). An Analytical Model for Performance Optimization of Thermoelectric Generator With Temperature Dependent Materials. *IEEE Access*, vol. 6, pp. 60852-60861, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874947.
- [168] Yusuf, A., Bayhan, N., Ibrahim, A. A., Tiryaki, H., & Ballikaya, S. (2021). Geometric optimization of thermoelectric generator using genetic algorithm considering contact resistance and Thomson effect. *International Journal of Energy Research.*, 45(6), 9382–9395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.6467>
- [169] Meng, F., Chen, L., and Sun, F. (2011). A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities. *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3513–3522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.057>
- [170] Ramousse, J., Sgorlon, D., Fraisse, G., and Perier-muzet, M. (2015). Analytical optimal design of thermoelectric heat pumps. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 82, pp. 48–56, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.042>
- [171] Yuanli, F., Lingen, C., Fankai, M., and Fengrui, S. U. N. (2018). Influences of external heat transfer and Thomson effect on the performance of TEG-TEC combined thermoelectric device. *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 61, no. 10, pp. 1600–1610. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9223-5>
- [172] Kinage, A., Sahoo, S., and Chaudhuri, S. (2021). Effects of different electrical arrangements and Thomson effect on the system performance as well as the optimum allocation of thermocouples in a self-driven two-stage TEC & TEG. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 25, no. January, p. 101035, 2021.
- [173] Laird Thermal Systems. <https://www.lairdthermal.com/> adresinden 04 Şubat 2022 tarihinde alınmıştır.
- [174] Hi-Z. Datasheet of HZ-20 HV module. <https://hi-z.com/wp-content/uploads/2019/07/Data-Sheet-HZ-20HV-1.pdf>/ adresinden 04 Şubat 2022 tarihinde alınmıştır.
- [175] Ferrotec. Datasheet of 9500/071/060B module. https://thermal.ferrotec.com/products/peltier-thermoelectric-cooler-modules/9500_071_060-b/ adresinden 02 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- [176] Kryotherm. Datasheet of TB-127-1.4-2.0 module. <https://kryothermttec.com/assets/dir2attz/ru/TB-127-1.4-2.0.pdf>/ adresinden 04 Şubat 2022 tarihinde alınmıştır.

- [177] Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E., & Jenkins, P. (2012). A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. *Solar Energy*, 86(9), 2695–2706. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2012.06.004>
- [178] Bayrakci, M., Choi, Y., and Brownson, J. R. S. (2014). Temperature Dependent Power Modeling of Photovoltaics. *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 745–754.
- [179] Duffie, J.A., Beckman, W.A., (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [180] Davis, M.W., Dougherty, B.P., Fanney, A.H., (2001). Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures. *Journal of Solar Energy Engineering*, 123, 200–210.
- [181] Honsberg, C.B., and Bowden, S.G. Photovoltaics Education Website. (2019). Heat loss in pv modules. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/heat-loss-in-pv-modules/> adresinden 14 Nisan 2024 tarihinde alınmıştır.
- [182] Skoplaki, E., and J. A. Palyvos. (2009). On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations. *Solar energy*, 83 (5): 614–624.
- [183] Kraemer, D., B. Poudel, H. P. Feng, J. Christopher Caylor, Bo Yu, Xiao Yan, Yi Ma, et al. (2011). High-performance Flat-Panel Solar Thermoelectric Generators with High Thermal Concentration. *Nature Materials*, 10 (7): 532–538.
- [184] Palyvos, J. A. (2008). A Survey of Wind Convection Coefficient Correlations for Building Envelope Energy Systems’ Modeling. *Applied Thermal Engineering*, 28 (8–9): 801–808.
- [185] Wong, L. T., and W. K. Chow. (2001). Solar Radiation Model. *Applied Energy*, 69 (3): 191–224. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(01\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(01)00012-5)
- [186] Enrique, J. M., and Dura, E. (2007). Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. *Solar Energy*, vol. 81, pp. 31–38.
- [187] Hart, D. W. (2010). *Power Electronics*. McGraw-Hill.
- [188] Arifoğlu, U. (2020). *Simulink 10.1 ve Uygulamaları*. Alfa Yayınları.
- [189] Mathworks. Documentation of the *Peltier Device* in MATLAB/ Simulink. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/peltierdevice.html> adresinden 02 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- [190] Hebei I. T. (Shanghai) Co., Ltd. TEC1-12706 peltier module datasheet. <https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf/> adresinden 25 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- [191] Giermak, A. (2025, 25 Şubat). How Does Temperature Affect My Solar Panels? Solar Panel Temperature Range Explained. <https://palmetto.com/solar/solar-panel-temperature-range-explained/> adresinden 25 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- [192] Jackman, J. (2023, 26 Temmuz). Can it actually get too hot for solar panels?. <https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/too-hot-for-solar-panels/> adresinden 25 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Uğur Yılmaz

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2004-2011 yılları arasında Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş. (SEDAŞ)'ta proje tesis mühendisi, ilçe başmühendisi ve işletme-bakım başmühendisi olarak çalıştı.
- 2011-2015 yılları arasında Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş. (SEDAŞ)'ta OG ölçüm müdürü ve büyük müşteriler müdürü olarak çalıştı.
- 2015 yılından itibaren BYS Enerji Mühendislik İnş. Mak. San. ve Tic. LTD. ŞTİ.'de Şirket Ortağı olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Yılmaz, U., Çavuş, T. F. and İslamoğlu, Y. (2022). Bidirectional Modeling of Thermoelectric Module Using MATLAB / Simulink for Circuit Simulations, *IEEE ACCESS*, vol. 10, no. July. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3195879>