

**SICAKLIK VE PANEL AÇISININ FOTOVOLTAİK PANELİN ELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Omar Abdulrahman Alı Ezzı AL-WADEİ

Yüksek lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Zafer DEMİR

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Eylül 2021

ÖZET

SICAKLIK VE PANEL AÇISININ FOTOVOLTAİK PANELİN ELEKTRİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Omar Abdulrahman Alı Ezzı AL-WADEİ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül 2021

Danışman: Prof. Dr. Zafer DEMİR

Bir FV güneş panelinden daha fazla elektrik elde etmek için FV güneş panelinin sıcaklığının düşük olması ve o panel üzerine düşen güneş ışınımı şiddetinin yüksek olması gerekir ki FV güneş panelleri doğrudan güneşe doğru yönlendirilmiş olması anlamına gelmektedir. Bu çalışmanın amacı iki temel hedefe ulaşmaktır. Birinci hedefi, 285W Mono-güneş panelinin Matlab Simulink kullanarak kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç, dolgu oranı ve panel verimi olmak üzere elektrik özellikleri açısından performansına etki eden çalışma sıcaklığı ve panel eğim açısı (güneş ışınım) faktörlerinin incelenmesidir. Çalışma sıcaklığı ($10^{\circ}\text{C} : 40^{\circ}\text{C}$) ve panel eğim açısı ($0^{\circ}:75^{\circ}$) aralığında, çalışma sıcaklığı ve eğim açısı sırasıyla 10°C ve 60° (ışınım şiddeti 800 W/m^2) olduğunda seçilmiş güneş panelinin 249 W maksimum çıkış gücüne ve çalışma sıcaklığı ve eğim açısı ise sırasıyla 40° ve 0° (ışınım şiddeti 412 W/m^2) olduğunda 98,28 W minimum çıkış gücüne ulaşabileceği bulunmuştur. Sabit sıcaklıkta (20°C), 10 W/m^2 'lik bir güneş ışınımı artışı, 285 W'lık Mono-güneş panelinin kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç ve verimlilikte sırasıyla 0,09A ($\approx \%0,97$); 0,03 V ($\approx \%0,082$); 2,7 W ($\approx \%0,94$) ve $\%0,071$ artmaya ve dolgu oranında $\%0,012$ 'lik azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, sabit güneş ışınım şiddetinde ($60^{\circ}\approx 800\text{ W/m}^2$), 285 W'lık panelin panel sıcaklığındaki 1°C 'lik artış ise açık devre gerilimi, maksimum güç, verimlilik ve dolgu oranında sırasıyla 0,25 V ($\approx \%0,638$); 1,71 W ($\approx \%0,599$); $\%0,75$ ve $\%0,180$ 'lik azalmaya ve kısa devre akımının ise 0,043A ($\approx \%0,047$)'lik artmaya neden olduğunu tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci hedefi kapsamında, Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde kurulabilecek panellerin aylık optimum eğim açısı değerleri ocak ayından başlayarak sırasıyla; 63° , 54° , 41° , 23° , 9° , 0° , 4° , 19° , 35° , 51° , 62° ve 62° olarak belirlenmiştir.

Yıllık, yaz, ilkbahar, sonbahar ve kış mevsimlerinin optimum panel eğim açısı sırasıyla 33°, 9°, 24°, 48° ve 60° olarak bulunmuştur. Aylık optimum eğim açısı kullanıldığında alınan yıllık güneş ışıınım enerjisi 1919,07 kWh/m² ve panelin ürettiği elektrik enerjisi 406,17 kWh; mevsimlik ortalama optimum eğim açısı kullanıldığında alınan yıllık güneş ışıınım enerjisi 1899,15 kWh/m² ve panelin ürettiği elektrik enerjisi 401,96 kWh ve yıllık ortalama optimum eğim açısı kullanıldığında ise alınan yıllık güneş ışıınım enerjisi 1820,64 kWh/m² ve panelin ürettiği elektrik enerjisi 385,34 kWh'tır.

Anahtar Sözcükler: FV panel performansı, Optimum eğim açısı, Güneş ışıınımı, Panel sıcaklığı



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE AND PANEL ANGLE ON PHOTOVOLTAIC PANEL ELECTRICAL PROPERTIES

Omar Abdulrahman Alı Ezzı AL-WADEİ

Department of Advanced Technologies

Programme in Energy Resources and Management

Anadolu University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, September 2021

Supervisor: Prof. Dr. Zafer DEMİR

To get more electricity from a photovoltaic solar panel, the temperature of the solar panel should be low and the intensity of the solar radiation falling on that panel should be high, which means that the PV solar panels must be pointed directly at the sun. The aim of this work is to achieve two main goals. The first goal is to examine the operating temperature and panel tilt angle (solar radiation) factors that affect the performance of the 285W Mono-solar panel in terms of electrical properties such as short-circuit current, open-circuit voltage, maximum power, fill factor and panel efficiency using Matlab Simulink. In the range of the operating temperature (10 °C: 40 °C) and the tilt angle of the panel (0°: 75°), it has been found that the maximum output power of 249 W can be generated by the selected panel under the conditions of the operating temperature of 10 °C and the tilt angle of 60° (radiation 800 W/m²), and the minimum output power of 98.28 W can be generated under the conditions of the operating temperature of 40 °C and the tilt angle of 0° (radiation 412 W/m²). At constant temperature (20 °C), it was found that an increase in solar radiation by 10 W/m² caused an increase in short-circuit current, open-circuit voltage, maximum power, and efficiency of the 285W Mono-solar panel by 0.09 A ($\approx 0.97\%$); 0.03 V ($\approx 0.082\%$); 2.7 W (0.94 %); and 0.071 %, respectively, and a decrease in fill factor by 0.012 %. On the other hand, it was found that at constant solar irradiation (60° $\approx$ 800 W/m²), 1°C increase in panel temperature of the 285 W panel causes a decrease in open circuit voltage, maximum power, efficiency and fill factor by 0.25 V ($\approx 0.638\%$), 1.71 W ($\approx 0.599\%$), 0.75 % and 0.180 %, respectively, and an increase in short circuit current by 0,043 A ($\approx 0.047\%$). Within the scope of the second objective of the study, the monthly optimal tilt angle values of solar panels that can be installed in Yenimahalle district of Ankara were determined as 63°, 54°, 41°, 23°, 9°, 0°, 4°, 19°, 35°.

51°, 62°, and 62°, respectively starting from January. The optimal panel tilt angles for the annual, summer, spring, fall, and winter seasons were determined to be 33°, 9°, 24°, 48°, and 60°, respectively. When the monthly optimum angle of inclination is used, the annual solar radiation energy received is 1919.07 kWh/m² and the electrical energy produced by the panel is 406.17 kWh; When the seasonal average optimum tilt angle is used, the annual solar radiation energy received is 1899.15 kWh/m² and the electrical energy produced by the panel is 401.96 kWh, and when the annual average optimum tilt angle is used, the annual solar radiation energy received is 1820.64 kWh/m² and the electrical energy produced by the panel is 385.34 kWh.

Keywords: PV panel performance, Optimal tilt angle, Solar radiation, Panel temperature

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında kıymetli bilgileriyle bana destek olan ve değerli fikirleriyle tezimin planlanmasına yardımcı olan, teşvik eden danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zafer DEMİR'e, Eskişehir Teknik Üniversitesi'ndeki değerli hocalarıma ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım

.

Omar Abdulrahman Alı Ezzı AL-WADEİ



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Omar Abdulrahman Alı Ezzı AL-WADEİ

İÇİNDEKİLER

SAYFA

BAŞLIK SAYFASI.....	i
ÖZET	ii
ABS TRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMES İ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KIS ALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	9
3.1. Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji	9
3.2. Güneş Enerjisi	11
3.3. FV Enerji Sistemleri.....	12
3.3.1. Güneş hücrelerinin yapısı ve çalışması.....	12
3.3.2. FV sistem bileşenleri.....	15
3.3.2.1. FV panel.....	15
3.3.2.2. Şarj kontrol cihazı.....	16
3.3.2.3. Akü	17
3.3.2.4. İnvertör.....	18
3.3.2.5. Devre kesme şalteri	19
3.3.3. FV panel çeşitleri	20
3.3.3.1. Kristal yapılı silikon paneller	21
3.3.3.2. İnce film güneş paneli	23
3.3.4. Şebeke bağlantı tipine göre GES 'lerin sınıflandırılması	26
3.3.4.1. Şebekeden bağımsız sistemler.....	26

3.3.4.2. Şebeke bağlantılı sistemler	26
3.4. FV Modül Performansını Etkileyen Faktörler	27
3.4.1. Çevresel faktörler	27
3.4.1.1. Modül sıcaklığın etkisi	28
3.4.1.2. Gölgeleme	32
3.4.1.3. Kirlenme (Tozlanma)	32
3.4.1.4. Güneş ışınmı	33
3.4.2. FV sistem faktörleri	35
3.4.2.1. Invertör verimliliği	35
3.4.2.2. Pil verimliliği	35
3.4.2.3. Güneş panel yapısı	35
3.4.3. FV sistem kurulum faktörleri	36
3.4.3.1. Güneş panellerinin eğim açısı ve azimut açısı	36
3.4.3.2. Sabit veya takip mekanizması	37
3.4.3.3. Uyumsuzluk kayıpları	39
3.4.3.4. Kablo özellikleri	39
4. FOTOVOLTAİK MODÜLÜN MATLAB İLE MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU	41
4.1. MATLAB Yazılımı	41
4.2. Seçilmiş Güneş Panelinin Teknik Özellikleri	42
4.3. Modellenme ve Simulasyon	42
4.3.1. Eğimli yüzeye gelen güneş ışınmı şiddeti (G_i)	42
4.3.2. Güneş hücresinin tek diyotlu eşdeğer devresi	44
4.3.2.1. Fotoelektrik akımı (I_{ph})	46
4.3.2.2. Satürasyon akımı (I_s)	47
4.3.2.3. Ters satürasyon akımı (I_{rs})	47
4.3.3. Kısa devre akımı (I_{SC})	49
4.3.4. Açık devre gerilimi (V_{OC})	49
4.3.5. Maximum güç (P_{max})	50
4.3.6. Dolgu oranı (FF)	51
4.3.7. Panel verimi (η)	52
4.4. Simulasyon Sonuçları	53

4.4.1. FV Panel (I-V) & (P-V) Karakteristiği.....	53
4.4.2. Kısa devre akımı (I_{SC}).....	56
4.4.3. Açık devre gerilimi (V_{oc}).....	57
4.4.4. Maximum güç (P_{max}).....	58
4.4.5. Dolgu oranı-FF.....	59
4.4.6. Panelin verimi (η)	61
5. ANKARA’NIN YENİMAHALLE İLÇESİ İÇİN OPTİMUM PANEL EĞİM AÇISININ BELİRLENMESİ.....	63
5.1. Yöntem	63
5.2. Hesaplamalar.....	64
5.2.1. Yatay yüzeye gelen günlük güneş ışıını hesapı (H)	64
5.2.2. Eğimli yüzeye gelen günlük güneş ışıını hesapı (H_T).....	66
5.2.2.1. Eğimli yüzeye gelen direkt ışıını hesapı (H_B)	66
5.2.2.2. Eğimli yüzeye gelen difüz ışıını hesapı (H_D).....	67
5.2.2.3. Eğimli yüzeye gelen yansıyan ışıını hesapı (H_R)	67
5.2.3. Aylık (H_T), mevsimlik (H_T) ve yıllık toplam ışıını hesapı (H_T)	67
5.3. Hesaplamaların Sonuçları.....	68
5.3.1. Yatay yüzeye gelen günlük toplam güneş ışıını (H)	68
5.3.2. Aylık güneş ışıını (H_T) ve aylık otimum eğim açıları ($\beta_{opt, ay}$)	71
5.3.3. Toplam mevsimlik ışıını (H_T) ve mevsimlik optimum eğim açıları ($\beta_{opt, mev}$)	73
5.3.4. Toplam yıllık ışıını (H_T) ve yıllık optimum eğim açısı ($\beta_{opt, Yıl}$)	77
6. TARTIŞMA VE ÖNERİ	80
KAYNAKÇA	84
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Seçilmiş literatür çalışmalarının özeti.....	7
Tablo 3.1. Lityum iyon ve kurşun asit akülerin temel özellikleri ve farklılıkları [31]	17
Tablo 3.2. <i>Silisyum güneş hücrelerinin sıcaklığa bağlı olarak parametrelerindeki değişimler</i> [47]	31
Tablo 3.3. <i>Havalandırma durumuna göre panel verimliliği</i> [49]	32
Tablo 4.1. 285W Mono FV panelin elektrik özellikleri verileri [64,65].....	42
Tablo 4.2. Kısa devre akımının çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışınım şiddeti) ile değişimi değerleri.....	56
Tablo 4.3. Açık devre geriliminin sıcaklığı ve eğim açısı güneş ışıınım şiddeti ile değişimi	57
Tablo 4.4. Maksimum gücün çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (güneş ışıınım şiddeti) ile değişimi	58
Tablo 4.5. Dolgu oranının sıcaklığı ve eğim açısı (güneş ışıınım şiddeti) ile değişimi değerleri.....	60
Tablo 4.6. FV modülün verimliliğinin sıcaklığı ve eğim açısı (ışınım şiddeti) ile değişimi değerleri.....	61
Tablo 5.1. Ortalama hesaplamalarda her ay için Klein tarafından önerilen N değerleri [77].....	65
Tablo 5.2. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için eğik düzleme düşen ortalama aylık günlük güneş ışıınım değerleri (<i>HT</i>) [kWh/m ² -gün]	68
Tablo 5.3. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için toplam aylık ışıınım değerleri (<i>HT</i>) [kWh/m ² -ay]	71
Tablo 5.4. . Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için toplam mevsimlik ışıınım değerleri (<i>HT</i>) [kWh/m ² -mev]	73
Tablo 5.5. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için eğik düzleme β (°) düşen toplam aylık küresel güneş ışıınım değerleri (<i>HT</i>) [kWh/m ² -gün]	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin küresel kurulu kapasitesinin payı (GW) - 2020	9
Şekil 3.2. Dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisinin gelişimi [19]	10
Şekil 3.3. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü-95,90 GW (2020) [20,21]	10
Şekil 3.4. Güneş enerjisinin dünyadaki dağılımı [2]	12
Şekil 3.5. FV hücre, modül ve dizi tasarımları [25]	13
Şekil 3.6. Yalıtkan, yarı iletken ve metal için yasak bant aralıkları [26]	14
Şekil 3.7. FV panel yapısı [28]	15
Şekil 3.8. DGM şarj kontrol cihazı [29]	16
Şekil 3.9. Lityum iyon ve kurşun asit aküler [31]	18
Şekil 3.10. Dizi inverter [32]	19
Şekil 3.11. Devre kesme şalteri [32].....	20
Şekil 3.12. FV hücre türlerini gösteren diyagram [33]	21
Şekil 3.13. Monokristal silikon güneş paneli [32].....	22
Şekil 3.14. Polikristal güneş paneli [33].....	23
Şekil 3.15. Amorf silikon güneş paneli [37]	24
Şekil 3.16. Kadmiyum tellür güneş paneli (CdTe) [37]	25
Şekil 3.17. Bakır indiyum güneş paneli (CIGS) [37]	25
Şekil 3.18. Şebekeden bağımsız sistemin çalışma prensibi [39]	26
Şekil 3.19. Şebeke bağlantılı sistemin çalışma prensibi [40]	27
Şekil 3.20. FV hücre akımı üzerine sıcaklığın etkisi [42].....	30
Şekil 3.21. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası-GEPA [3]	34
Şekil 3.22. Geliş açısının ve kollektörün eğim açısı [59]	38
Şekil 3.23. Sabit, tek eksenli ve çift eksenli takip mekanizmaları [41]	38
Şekil 3.24. Modül bağlantıları ve DC kabloları [30]	39
Şekil 4.1. MATLAB masaüstü	41
Şekil 4.2. Eğimli yüzeye gelen güneş ışımasını şiddetine G_i (W/m ²) ait Matlab Simulink modeli	44
Şekil 4.3. FV hücrenin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) özellikleri [25]	45
Şekil 4.4. Güneş hücrelerinin eşdeğer devresi [68]	45
Şekil 4.5. Fotoelektrik akımına (I_{ph}) ait Matlab Simulink modeli	47

Şekil 4.6. Satürasyon akımına (I_s) ait Matlab Simulink modeli	48
Şekil 4.7. Panel çıkış akımına (I) ait Matlab Simulink modeli.....	48
Şekil 4.8. Açık devre gerilimine (V_{OC}) ait Matlab Simulink modeli.....	50
Şekil 4.9. Dolgu oranı [25]	51
Şekil 4.10. FV panelin Matlab Simulink modeli	53
Şekil 4.11. Matlab ekranında farklı sıcaklık ve ışıınım şiddeti (eğim açısı) değerleri için FV Akım-Gerilim (I-V) karakteristiğinin eğrileri	54
Şekil 4.12. Matlab ekranında farklı sıcaklık ve ışıınım şiddeti (eğim açısı) değerleri için FV Güç-Gerilim (P-V) karakteristiğinin eğrileri	55
Şekil 4.13. Matlab ekranında kısa devre akımının ve çalışma sıcaklığı ve eğim açısı ile değişimi.....	56
Şekil 4.14. Matlab ekranında açık devre geriliminin sıcaklık ve eğim açısı güneş ışıınım şiddeti ile değişimi	57
Şekil 4.15. Matlab ekranında maksimum gücün çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışıınım şiddeti) ile değişimi	59
Şekil 4.16. Matlab ekranında FV modülün dolgu oranının çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışıınım şiddeti) ile değişimi	60
Şekil 4.17. Matlab ekranında FV modülün verimliliğinin çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışıınım şiddeti) ile değişimi	61
Şekil 5.1. Ankara'nın Yenimahalle ilçesinin konumu [75]	63
Şekil 5.2. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için yatay yüzeye gelen aylık ortalama global günlük güneş ışıınımı (H) ve güneşlenme süresinin (S) değerleri [3]	65
Şekil 5.3. Atmosfer dışı (H_0), GEPA'dan alınan (H_{GEPA}) ve hesaplanan ($H_{HESAPLAMA}$) aylık ortalama günlük güneş ışıınımının ve berraklık indeksinin aylara göre (K_t) değişimi.....	70
Şekil 5.4. Ankara'da kurulabilecek güneye bakan panel eğim açıları için toplam aylık küresel güneş ışıınım değerinin değişimi	73
Şekil 5.5. Ankara'da kurulabilecek ve güneye bakan panel eğim açıları için toplam mevsimlik global güneş ışıınım (HT) değerinin değişimi	76
Şekil 5.6. Mevsimlerde kuzey kürede güneş yolu [81]	77
Şekil 5.7. Güneş geliş açısının güneş şiddetine etkisi [82].....	77

Şekil 5.8. Ankara’da kurulabilecek ve güneye bakan panelin eğim açlarına β (°)	
göre toplam yıllık küresel güneş ışınlam (HT) değerinin değişimi	78
Şekil 6.1. Ankara’nın Yenimahalle ilçesinde FV Tipine göre-FV sistem alanı ve	
üretilebilecek enerji (kWh-Yıl) [3]	82



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$^{\circ}$	: Derece
α	: Güneş Yükseklik Açısı
β	: Panel Eğim Açısı
$\beta_{opt,ay}$	: Aylık Optimum Eğim Açısı
$\beta_{opt,mev}$	: Mevsimlik Optimum Eğim Açısı
$\beta_{opt,Yıl}$	: Yıllık Optimum Eğim Açısı
γ	: Panel Azimut açısı
δ	: Deklinasyon Açısı
μ	: Mobilite
μm	: Micrometre
η	: Panelin Verimi
θ	: Geliş açısı
ρ	: Albedo Katsayısı
Σ	: Toblam
$\emptyset$	: Enlem
ω_{gb}	: Güneş Batış Açısı
ω'_{gb}	: Eğimli Yüzeydeki Güneş Batış Açısı
$\approx$	: Karşılık Gelen
L	: Panelin Yüzey Alanı
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AA	: Alternatif Akım
AM	: Hava Kütlesi
A	: Amper
Ah	: Amper saat
aSi	: Amorf Silikon
CdTe	: Cadmium Telluride Silicon (Kadmiyum Tellür Silikon)
CSP	: Concentrating Solar Power (Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri)
Cos	: Kosinüs
cm ²	: Santimetre Kare
°C	: Celsius Degree (Santigrat Derecesi)
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
E	: Üretilen enerji
E _g	: Enerji Bant Aralığı (Yasak Enerji Aralığı)
eV	: Elektron Volt
EVA	: Etilen-Vinil Asetat
FF	: Fill Factor (Dolgu Oranı)
FV	: FV
GEPA	: T.C. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	: Güneş Enerji Sistemleri
Gst	: Standart Güneş Şiddeti (1000 W/m ²)
GW	: Gigawatt
g	: Gram
G _i	: Güneş Işınım Şiddeti
G _{sc}	: Güneş Sabiti=1367 W/m ²
H	: Yatay Yüzeye Gelen Günlük Toplam Güneş Işınımı

H_B	: Eğimli Yüzeye Gelen Direkt Işınım
H_b	: Yatay Yüzey Üzerinde Direkt Işınım
H_D	: Eğimli Yüzeye Gelen Difüz Işınım
H_d	: Yatay Yüzey Üzerinde Yayılı Işınım
H_o	: Yatay Yüzeye Gelen Aylık Ortalama Günlük Atmosfer Dışı Güneş Işınımı
H_R	: Eğimli Yüzeye Gelen Yansıyan Işınım
H_T	: Eğimli Yüzeye Gelen Global Günlük Güneş Işınımı
$\dot{H}_T$	: Toplam Aylık Güneş Işınımı
$\hat{H}_T$	: Toplam Mevsimlik Güneş Işınımı
$\bar{H}_T$	: Toplam Yıllık Güneş Işınımı
Hz	: Hertz, Frekans Birimi
IP	: Ingress Protection (Giriş Koruması)
I_{FV}	: Panel çıkış akımı
I_{max}	: Maksimum Güç Akımı
$I_{ph,st}$	: Standart Şartlar Altında Fotoelektrik Akımı
I_{ph}	: Fotoelektrik Akımı
I_s	: Satürasyon Akımı
$I_{sc,st}$	: Standart Şartlar Altında Kısa Devre Akımı
I_{sc}	: Short Circuit Current (Kısa Devre Akımı)
J	: Jul, Enerji birimi
K_i	: Kısa Devre Akımının Sıcaklık Katsayısı
K_t	: Berraklık İndeksi
K_B	: Boltzman Sabiti
K	: Kelvin
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowattsaat
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleyici
mSi	: Monokristal Silikon
MW	: Megawatt
MJ	: Megajul
m^2	: Metrekare
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
N	: Yıl Gün Sayısı
NOCT	: Nominal Operating Cell Temperature (Nominal Çalışma Koşullarında Hücre Sıcaklığı)
N_a	: Days of Month (Ayın Gün Sayısı)
P_{max}	: Maksimum Çıkış Gücü
P	: Output Power (Çıkış Gücü)
PR	: Performance Rate (Performans Oranı)
PV	: Photovoltaic (FV)
pSi	: Polikristal Silikon
REN21	: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politika Ağı)

R_b	: Eğik Düzlem Üzerine Gelen Direkt Işınımın, Yatay Yüzeye Gelen Direkt Işınımına Oranı
R_d	: Eğik Düzlem Üzerine Gelen Difüz Işınımın, Yatay Yüzeye Gelen Difüz Işınımına Oranı
R_r	: Eğik Düzlem Üzerine Gelen Yansıyan Işınımın, Yatay Yüzeye Gelen Yansıyan Işınımına Oranı
R_s	: Seri direnç.(Ω)
R_{sh}	: Paralel direnç.(Ω)
S_o	: Gün Uzunluğu
S	: Güneşlenme Süresi
s	: Saniye
SoC	: State of Charge (Şarj Durumu)
STK	: Standart Test Koşulları
TWh	: Terawatt Saat
T_a	: Ortam Sıcaklığı
T_c	: Çalışma Sıcaklığı
V	: Panel Çıkış Gerilimi
V_{max}	: Maksimum Güç Gerilimi
$V_{oc,st}$	: Standart Şartlar Altında Açık Devre Gerilimi
V_{oc}	: Open Circuit Voltage (Açık Devre Gerilimi)
UV	: Ultraviyole
W	: Watt
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

1. GİRİŞ

Günümüzde ihtiyaç duyduğumuz enerjiyi elde etmek için kullandığımız fosil yakıtların yenilenemez olması, kaynakların hızla azalması, gelişen teknolojilere ve enerjiye olan talebin artması nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan ilgi her geçen gün daha da artmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerin artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak gereksinimleri, sınırlı enerji rezervlerinin verimsiz kullanılması ve ithalat-ihracat giderleri ülkelerin yenilenebilir enerji teknolojilerine ilgisini ve yatırımlarını artırmıştır. Ayrıca fosil yakıtlardan enerji üretmesi sırasında çevreye verilen zararlar ile meydana çıkan hava kirliliği gibi sorunlar insan sağlığını gün geçtikçe riske sokmakta ve farklı alternatif enerji kaynaklarının aranmasına yol açmıştır. Bu sorunları aşmada kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları arasında doğada en bol miktarda bulunan Güneş Enerjisi ön plana çıkmaktadır. Güneş enerjisi, dünyanın tüm enerji kullanımını sağlama potansiyeline sahip bir yenilenebilir enerji türüdür. Dünyanın bir saatte aldığı güneş ışığı miktarı ($4,3 \times 10^{20}$ J), tüm dünyanın bir yıl boyunca kullandığı toplam enerjiden ($4,1 \times 10^{20}$ J) daha fazladır [1].

Güneşten enerji üretiminde kullanılan FV paneller, yarı iletken malzemeye düşen güneş ışığı ile elektrik üretmektedirler. Bir FV modülün ürettiği çıkış gücü ve ömrü birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden bazıları şunlardır: FV malzemesinin türü, alınan güneş ışınım şiddeti, panel sıcaklığı, parazitik dirençler, bulut ve diğer gölgeleme etkileri, invertör verimliliği, toz ve kirlenme, modül oryantasyonu, hava koşulları, coğrafi konum, eğim açısı ve kablo özellikleridir. FV modüllerin yüksek verimli çalışmasının önündeki ana engeller, düşük güneş ışınımı ve yüksek ortam sıcaklıkları ile aşırı güneş ışınımı nedeniyle güneş modülünün aşırı ısınmasıdır.

Bu çalışmanın iki temel amacı bulunmaktadır: Bunlardan ilki dördüncü bölümde detaylıca ele alındığı üzere 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° eğim açıları ve 10°C , 20°C , 30°C ve 40°C çalışma sıcaklığının koşulları altında Matlab Simulink simülasyon yaparak kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum çıkış gücü (P_{max}), panel verimliliği (η) ve dolgu oranı (FF) gibi FV panelin elektrik özellikleri ve Akım-Gerilim (I-V) ile Güç-Gerilim (P-V) karakteristiklerini etkileyen faktörlerinin incelenmesidir. Güneş radyasyonu bölgeden bölgeye değiştiği için, simülasyonu çalıştırırken ortalama sıcaklık ve enlem gibi koşulları kullanmak için bir örnek çalışmanın belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada örnek çalışma olarak seçilen Ankara'nın ocak ayı

şartlarında kurulabilecek FV panelin çalışma sıcaklığı 16 °C ile 38 °C [2] arasında değiştiğinden bu çalışma kapsamında incelenecek sıcaklık değeri 10 °C ile 40 °C arasında 10 derecelik aralıklarla; eğim açıları ise 0° ile 75° arasında 15 derecelik aralıklarla değişecek şekilde rastgele belirlenmiştir. Monokristal güneş panelinin en yaygın kullanılan panel olması ve sıcaklığa daha duyarlı olması nedeniyle, Tablo 4.1'de gösterilen standart parametrelerle çalışma örneği olarak 285Wp-Monokristal FV panel kullanılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci temel amacı ise beşinci bölümünde detaylıca ele alındığı üzere, 39°96'22 Kuzey enlem ve 32°81'03 Doğu boylamında yer alan Ankara'nın Yenimahalle ilçesindeki farklı eğim açılarında (0°den 90°'a kadar 1°lik aralıklarla) kurulabilecek bir güneş kolektörünün aldığı aylık, mevsimlik ve yıllık toplam küresel güneş ışınımının matematiksel denklemlere dayanarak Excel'de hesaplanması ve bunların optimum eğim açılarının belirlenmesidir.

Bir güneş kolektörünün optimal eğim açısının ve güneş ışınımının bir bölgenin enlemine göre değiştiği bilinmektedir. Ankara hem Türkiye'nin merkezinde yer alması hem de güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu değerleri açısından Türkiye'nin ortalama değerlerine yakın değerlere sahip olması nedeniyle Ankara için hesaplayacağımız bir güneş panelinin optimum eğim açısının Türkiye'yi temsil edeceği değerlendirilmektedir [3]. Bu çalışmada Ankara'nın Yenimahalle ilçesinin seçilmesinin en önemli sebebi, Türkiye nüfusunun yaklaşık %30'unu kapsayan ve ülkenin en büyük üç şehri (Ankara, İzmir ve İstanbul) için yatay bir yüzey (H) üzerindeki aylık ortalama günlük küresel ışınımı tahmin etmek için literatürde Ülgen K. ve Hepbaşlı A. [4] tarafından geliştirilen ampirik bir modelin olmasıdır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Belirli konumda kurulabilecek güneş panellerinin optimum eğim açısı ve çalışma sıcaklığını tespit etmek ya da bu parametrelerin güneş panellerinin performansı üzerindeki etkisini incelemek için birkaç çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada bahsedilen kaynaklar konu içeriği ve metodoloji açısından daha uygun olduğu için kullanılmıştır. Metodolojik açıdan bakıldığında, bahsedilen çalışmaların çoğunda MATLAB programı bir benzetim yöntemi olarak kullanılmıştır. Tematik olarak, bu çalışmaların çoğu, güneş paneli sıcaklığının veya eğim açısının, çıkış gücü, gerilim ve akım gibi bir veya daha fazla güneş panelinin elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerinden birini veya her ikisini incelemektedir.

Durdağ, A. (2019) tarafından yapılan “Effect of Temperature on Photovoltaic Panels Efficiency” başlıklı çalışmada panel sıcaklığının verim üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, sıcaklığın güneş panellerini olumsuz etkilediği ve panel sıcaklığının artmasıyla verimin düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte panele eklenen soğutma kanalları sayesinde, verimdeki bu düşüş önlenmiştir. Bu çalışmanın en önemli sonucu, panelin bir soğutucuyla soğutulması durumunda panel veriminin arttığını göstermesidir [5].

Eker, B.S. (2019) tarafından çalışmada, Bursa'da kurulabilecek güneş panelleri için optimum eğim açıları belirlenmiş ve bu optimal eğim açılarının aylık, mevsimlik ve yıllık değişimi, geliştirilen bir simülasyon programı kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca rüzgârın soğutma etkisinin hücre sıcaklıkları, üretilen elektrik enerjileri ve güneş modüllerinin verimliliği üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, güneş panelinin en uygun aylık eğim açısına yerleştirilmesi durumunda güneş paneline gelen güneş ışınımının en yüksek seviyeye çıktığı tespit edilmiştir. Güneş modüllerinden elektrik enerjisinin en yüksek temmuz ve en düşük ise ocak ayında üretildiği; modüllerin verim değerlerinin ise en yüksek ocak ve en düşük ise ağustos aylarında olduğu tespit edilmiştir. Bursa ili için hava sıcaklığı değerinin panel verimliliğine etkisi rüzgâr hızının etkisinden daha büyük bulunmuştur [6].

Bakırcı, K. ve Kaltakkıran, G. (2018), tarafından yapılan çalışmada model denklemleri geliştirilerek Gaziantep ili için panel optimum eğim açıları belirlenmiştir. Gaziantep'in farklı eğimlerinde günlük toplam güneş ışınım değerlerinin aylık ortalaması MATLAB kullanılarak hesaplanmıştır. Kollektör eğim açılarının değerleri 0° ile 90°

arasında hesaplanmıştır. Sonuç olarak, modellerden elde edilen değerlerle ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür [7].

Sancar, M.R.(2018)'ın yaptığı bir çalışmada FV panelin performansına etki eden faktörlerden sıcaklık, rüzgâr, ışıınım, nem ve tozluluk faktörleri araştırılmıştır. Laboratuvar ortam koşullarında yapılan incelemelerin sonucunda, 115 g/m² toz yoğunluğunda FV panel performansının % 94 seviyesinde azaldığı tespit edilmiştir. Çevre hava koşullarında yapılan araştırmalarda, nem faktörünün % 3,9 oranında, rüzgâr ve sıcaklık faktörünün %4 oranında ve tozluluk faktörünün % 8 oranında FV panel performansını azalttığı hesaplanmıştır [8].

Yılmaz. G. (2018), güneş enerjisi en temel yenilenebilir enerji kaynaklarından olup Türkiye'nin bu enerji kaynağı bakımından önemli bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir. Dünyamıza gelen güneş ışınlarından maksimum oranda faydalanabilmek için, güneş panellerinin yatayla belirli bir eğim açısında olmaları gerekmektedir. Güneş panellerinin optimum eğim açısı, yılın günlerine ve ilgili bölgenin enlem açısına göre değişmektedir. Bu çalışmada, güneş enerjisinden maksimum oranda faydalanmak için Türkiye'deki tüm illerin optimum eğim açıları bir bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, optimum eğim açıları için bazı parametrelere bağlı model eşitlikler geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin performansı, MBE, RMSE ve t-istatistik gibi bazı istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir [9].

Şerif, S. J. M. (2017)'in “The Impact of Tilt Angle on Photovoltaic Panel Output” isimli çalışmasında, FV panelin etkinliği üzerine güneş paneli eğim açısıyla ilgili önemli tespitler yer almaktadır. İki servo motor kullanarak eğim açısı 0'den 90°'ye otomatik olarak değiştirilerek eğim açısının FV panelin performansına etkisini belirlemek için FV panelin çıkış gerilimi değerleri Arduino ile kaydedilmiş ve matematiksel denklemlerden yararlanarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, 36°15 Kuzey enlem ve 44°05 Doğu boylam koordinatlarında yer alan Irak'ın Erbil bölgesinde kurulabilecek FV panel maksimum çıkış gücü, optimum eğim açısı 45°'de meydana geldiği tespit edilmiştir [10].

Razak, A., Yusoff, M.I., Wai Zhe, L., Irwanto, M., Ibrahim, S. ve Zhafarina, M. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Malezya'daki (Perlis) çalışma sıcaklığının Mono kristal FV panel üzerindeki etkilerini incelemiştir. Seçilen bir FV panel, çıkış performansını değerlendirmek için PVsyst yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir.

Çalışmada, gün boyunca devam eden açık hava deneylerindeki tüm elektrik verilerinin ölçülmesi ve kaydedilmesi için PROVA 200A Solar Module Analyzer kullanılmıştır. Ayrıca termal dağılım, FV panel sıcaklıkları ve termal görüntüleme ile analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, FV panelin çıkış gücünün, çalışma sıcaklığının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Deneysel sonuçlar, standart test koşullarındaki (STK) güneş panelinin elektrik parametreleri, dış ortam koşulları için FV panelin gerçek çalışma koşullarını temsil etmediğini göstermektedir. Kısacası, FV panel sıcaklığının yükselmesi, panelin çıkış performansı üzerinde olumsuz etkiye sahip olmuştur [11].

Kocer, A., Gongur, A. ve Şevik. S. (2016) tarafından yapılan çalışmada Ankara ve ilçeleri için güneş kollektörü optimum eğim açısı tespit edilmiştir. Visual Studio alt yapısında geliştirilen ve teorik eşitliklere dayanan programa MGM ve GEPA'den alınan bazı bilgilerin girilmesiyle 0°-90° eğim açısı değerleri arasında eğik düzleme gelen aylık, mevsimlik, altı aylık ve yıllık bazda güneş kollektörlerinin maksimum güneş ışıınımı ve optimum eğim açısı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Optimum açı değeri ocak ayı için 64° ve FV kollektör üzerine gelen güneş ışıınımı değeri 436,62 MJ/m²-ay ($\approx 121,28$ kWh/m²-ay), haziran ve aralık ayları için ise sırasıyla optimum açı değeri 1° ve 67° güneş kollektörü üzerine düşen güneş ışıınımı değeri 652,52 MJ/m²-ay ($\approx 181,26$ kWh/m²-ay) ve 422,85 MJ/m²-ay ($\approx 117,46$ kWh/m²-ay) olarak hesaplanmıştır. Yaz, ilkbahar, sonbahar ve kış mevsimleri için mevsimlik optimum eğim açısı değerleri sırasıyla 6°, 23°, 49° ve 62° olarak hesaplanmıştır. Altı aylık ve yıllık bazda ise, yaz-ilkbahar, sonbahar-kış ve yıl için optimum eğim açıları sırasıyla 15°, 56° ve 34° olarak tespit edilmiştir [12].

Karafil, A., Özbay, H., Kesler, M. ve Şeyh, B. (2016) yaptığı çalışmalarında güneş ışıının ve sıcaklığın FV panel gücü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, panelin eş değeri devresi, FV panelin katalog verileri kullanılarak PSIM ve MATLAB'de simüle edilmiş ve FV panel gücü üzerindeki sıcaklık ve güneş radyasyonu etkileri incelenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre güneş ışıınım şiddetinin artması panel akımını orantılı bir şekilde artırırken panel gerilimini çok düşük miktarda artırmaktadır. Panelden elde edilen güç ise güneş ışıının artışı ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Panel sıcaklığının artması ise panel akımını çok az miktarda artırırken panel gerilimini orantılı bir şekilde düşürmektedir. Gerilimdeki düşme oranı, akımın artış oranına göre daha fazla olduğundan bu duruma bağlı olarak panel gücü de düşmektedir.

Bu sonuçlara göre FV panellerinden elde edilen güç değerleri için düşük sıcaklıklar ve yüksek güneş ışınım şiddetlerinin daha uygun olduğu görülmektedir [13].

Singh, S.K., Jain, U.A. ve Edison, G. (2014) tarafından yapılan çalışmada VIT Üniversitesi'nde (Vellore, Hindistan) bulunabilecek sabit destek panelleri için eğim açısını optimize etmeye çalışmışlardır. Bu çalışma, basit ortalamanın hesaplanmasından ziyade ağırlıklı ortalama eğim açısının hesaplanmasına odaklanmıştır. Grafik ve analitik hesaplamalar ve Simulink analizi, MATLAB'ta basit ortalama alma yöntemiyle bulunan 17°70'93 yerine 19°56'40 olarak bir eğim açısı vermektedir. Bu 2 derecelik fark küçük tesisler için önemli olmamasına rağmen, 5 MW'dan daha fazla kapasiteye sahip olan tesisler için çok önemlidir ve bu 2 derecelik optimizasyon çok fazla enerji tasarrufu sağlayabilir [14].

Javed, A. (2014) tarafından yapılan çalışmada, PC1D yazılımı kullanarak sıcaklıkların silikon güneş hücresi parametreleri üzerine etkisi açık devre gerilimi, kısa devre akımı, dolgu oranı ve verimlilik gibi parametreler üzerinden incelenmiştir. Silikon güneş hücrelerinin sıcaklık fonksiyonunu anlamak için, tüm ilgili parametreler 20°C - 80°C arasında incelenmiştir. Kısa devre akımı I_{sc} 'nin sıcaklıkla hafifçe arttığı, ancak gerilim V_{oc} 'nin düzenli olarak azaldığı ve bu sıcaklık koşullarında doğrusal davranış gösterdiği bulunmuştur. Dolgu oranı ve verimlilik varyasyonları, sırasıyla I_{sc} ve V_{oc} ile doğru orantılıdır. Bu sıcaklık aralığında $I_{sc}=37,56$ mA ve $V_{oc} = 667,3$ mv olan maksimum verimlilik (% 18,5) elde edilmiştir [15].

Eteiba, M. B., El Shenawy, E. T., Shazly, J. H. ve Hafez, A. Z. (2013) yaptığı bir çalışmada MATLAB®/ GUI ara yüzünü kullanarak geliştirilmiş bir FV simülasyon modelini uygulamaktadır. Bu model FV hücrelerin güneş ışınımı ve sıcaklık değişimlerinin etkileri de dahil olmak üzere temel devre denklemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, bu faktörlerin çalışma koşullarında FV panellerinden elde edilen maksimum gücün etkilendiğini göstermiştir [16].

Asowata, O., Swart J. ve Pienaar, C. (2012) tarafından yapılan "Güney Afrika/Vaal Triangle'i'nde Kış Aylarında FV Paneller İçin En Uygun Eğim Açıları" isimli çalışmada, bir FV panelin çıkış gücünü maksimize etmek için matematiksel modellerden ve simülasyon paketlerinden elde edilen eğim açıları denklemlerinin kullanımına dayanan deneysel bir analiz anlatılmıştır. Güç düzenlemesi bir DC-DC dönüştürücüsü, sabit bir

yük direnci ve tek bir FV panel kullanılarak sağlanmıştır. Raporun sonuçları, nisan ayından temmuz ayına kadar dört aylık bir süre boyunca alınmıştır. FV panel, 16°, 26° ve 36° eğim açılarıyla 0° oryantasyon açısına kurulmuştur. Sonuçlar, 26- 36° arasındaki eğim açılarının Güney Afrika'da kış ayları için optimum FV çıkış gücü sağladığını göstermiştir [17].

Hanif, M. (2012) güneş panellerinin farklı sıcaklıklarda (15°C - 45°C) ve eğim açılarında (0°, 20°, 35°, 50° ve 90°) çıkış gücünü incelemek için bir deney yapmıştır. Bu çalışmada, güneş panelleri, 35°'lik bir eğim açısında ve 15°C'lik düşük sıcaklık değerinde maksimum çıkış gücü göstermiştir. FV panellerin çıkış gücü, eğim açısının 35°'den 90°'ye yükseldiğinde veya 35°'den 0°'ye düştüğünde azalmaktadır. Maksimum güç çıkışı elde etmek için güneş panellerinin, Jamrud, Khyber, Agency ve Pakistan enlemine karşılık gelen 35°'lik bir eğim açısıyla kurulması gerektiği bulunmuştur. Ayrıca güneş panelleri, daha fazla hava akımı aldıkları bir yere kurulmalıdır, böylece sıcaklık düşük ve çıkış gücü yüksek kalmaktadır [18].

Tablo 2.1. Seçilmiş literatür çalışmalarının özeti

KYANAK	Etkileyen faktörler	Etkilenen parametre	Çalışma yönetimi	Çalışmamızdan farklılıkları
[5]	Panel sıcaklığı	Panel verimi	Deney	Eğim açısı, akım, gerilim ve dolgu faktörünü içermemesi
[6]	Panel sıcaklığı + Optimum açının belirlenmesi	Elektrik enerjisi ve panel verimi	Geliştirilen bir programı	Eğim açısı, akım, gerilim ve dolgu faktörünü içermemesi
[7]	Yıllık optimum açının belirlenmesi		MATLAB Yazılımı	Aylık ve mevsimlik optimum açıları içermemesi
[8]	Sıcaklık, rüzgâr, ışınım, nem ve tozluluk	FV panel performansı	Deney	Tüm elektriksel parametrelerin detaylı olarak incelenmemesi
[9]	Aylık optimum açıların belirlenmesi		İstatistiksel bir analiz	Mevsimlik ve yıllık açıları içermemesi
[10]	Panel eğim açısı	Çıkış gücü	Deney	Tüm ilgili etkileri ve parametrelerini içermemesi
[11]	Panel sıcaklığı	Gerilim, akım, çıkış gücü, verim ve dolgu oranı	PVsyst yazılımı+ Deney	Açısı ve faktörünü içermemesi

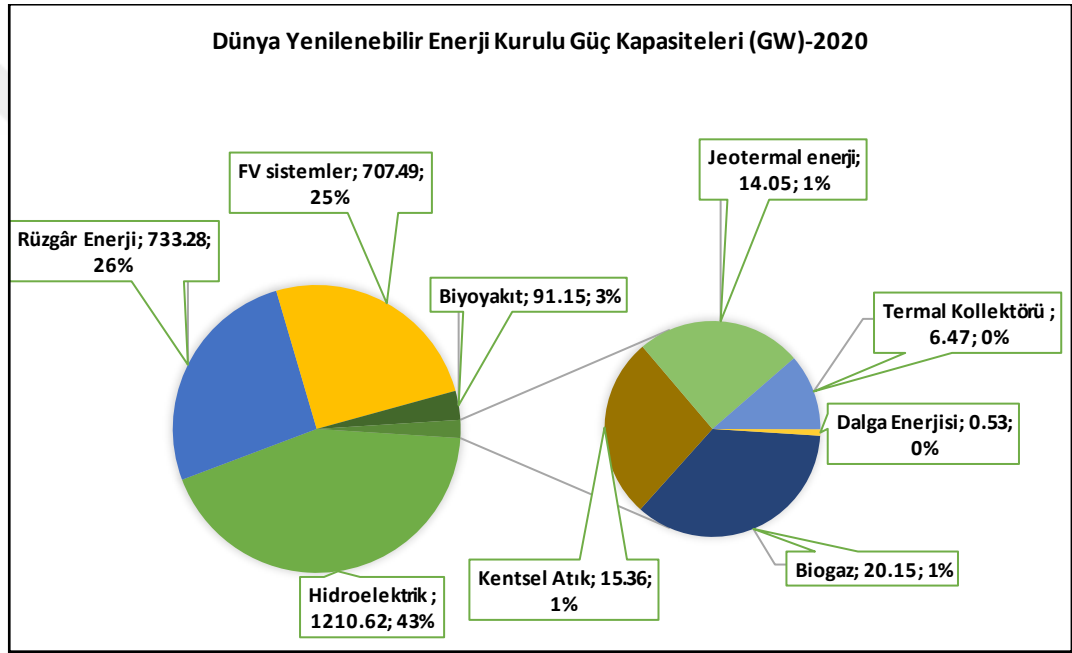
[12]	Aylık, mevsimlik ve yıllık optimum açının belirlenmesi		Geliştirilen bir programı	
[13]	Panel sıcaklığı + güneş ışıması	Akım, gerilim ve çıkış gücü	MATLAB yazılımı	Verim ve dolgu faktörünü içermemesi
[14]	Aylık optimum açının belirlenmesi		MATLAB yazılımı	Mevsimlik ve yıllık açılarını içermemesi
[15]	Panel sıcaklığı	Gerilim, akım, güç, dolgu oranı ve verim	PC1D yazılımı	Eğim açısı veya güneş ışımasını içermemesi
[16]	Sıcaklık ve güç ışıması	Gerilim, akım ve çıkış güç	MATLAB yazılımı	Verim ve dolgu faktörünü içermemesi
[17]	Aylık optimum açının belirlenmesi		Deney	Mevsimlik ve yıllık açılarını içermemesi
[18]	Panel sıcaklığı ve eğim açısı	Çıkış gücü	Deney	Akım, gerilim, verim ve dolgu faktörünü içermemesi

Tablo 2.1’de bahsedilen literatür çalışmaları özetlenmektedir. 2012-2019 yılları arasında ve yukarıda belirtilen ilgili çalışmalar incelendiğinde bizim yaptığımız çalışma kadar kapsamlı bir çalışma tespit edilememiştir. Seçilmiş literatür çalışmasından 5 tanesi MATLAB yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Etkilerden sadece birini (sıcaklık veya eğim açısı) incelemeye odaklanan ise 4 makale olduğunu belirlenmiştir. Hem eğim açısını hem de sıcaklık faktörlerini ele alan 4 çalışma olmasına rağmen, güneş panelinin davranışını tanımlayabilecek ilgili tüm elektriksel özellikleri incelenmemiştir. Optimum eğim açısını tespit etmeye yönelik 6 makale ve tez olmasına rağmen bunlardan sadece ikisi aylık, mevsimlik ve yıllık optimal eğim açılarını kapsamaktadır. Bu nedenle, çalışmamızda, güneş panellerinin çıkış gücü, gerilim, akım, dolgu oranı ve verimlilik olmak üzere beş temel elektriksel özelliğe iki önemli ana çevresel etkiden güneş ışıması ve sıcaklığın etkisinin birlikte incelenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda çalışmamız kapsamında Ankara’nın Yenimahalle ilçesi için aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açılarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

3.1. Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji

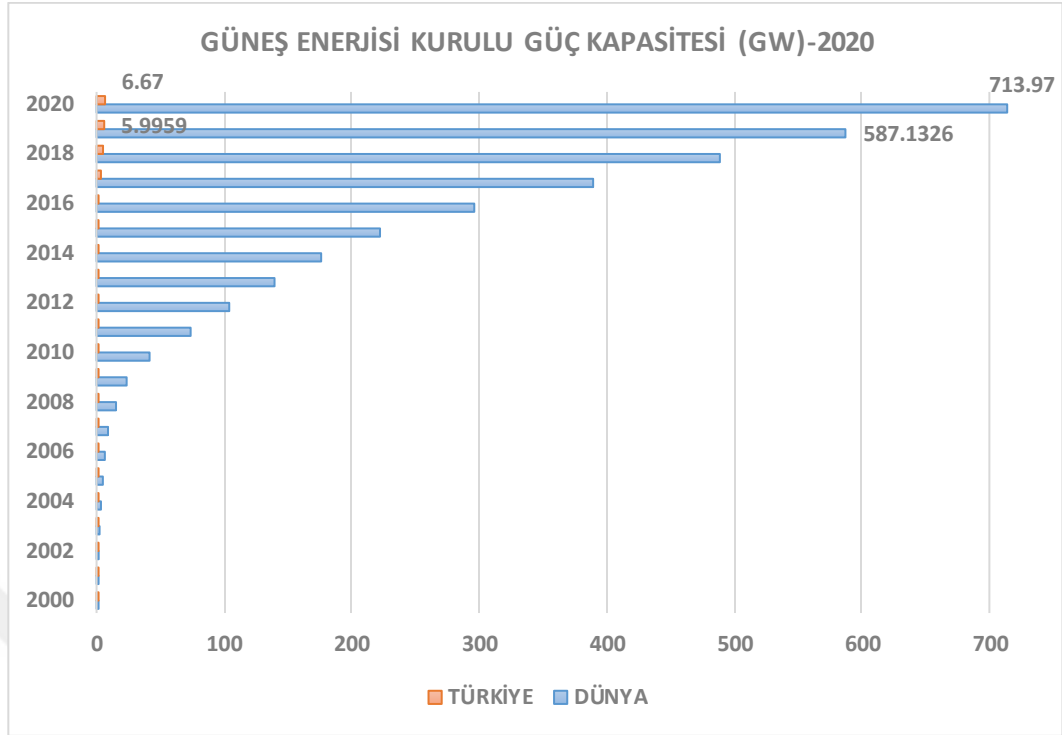
2020 yılı sonu itibari ile dünya genelinde enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretim miktarı 25.865,75 TWh olarak gerçekleşmiştir. Bu miktarı kömür (8.735,8 TWh $\approx$ % 33,8), doğal gaz (5.892,44 TWh $\approx$ % 22,8), hidroelektrik (4.355,04 TWh $\approx$ % 16,8), nükleer enerji (2.616,61 TWh $\approx$ % 10,1), rüzgâr (1.590,19 TWh $\approx$ % 6,1), petrol (1.128,39 TWh $\approx$ % 4,4), güneş enerjisi (844,39 TWh $\approx$ % 3,3) ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklar¹ ise (702,89 TWh $\approx$ % 2,7) şeklinde dağıtılmaktadır [19]. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik yaklaşık %28,9'a ulaştığını anlamına gelmektedir.



Şekil 3.1. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin küresel kurulu kapasitesinin payı (GW) - 2020

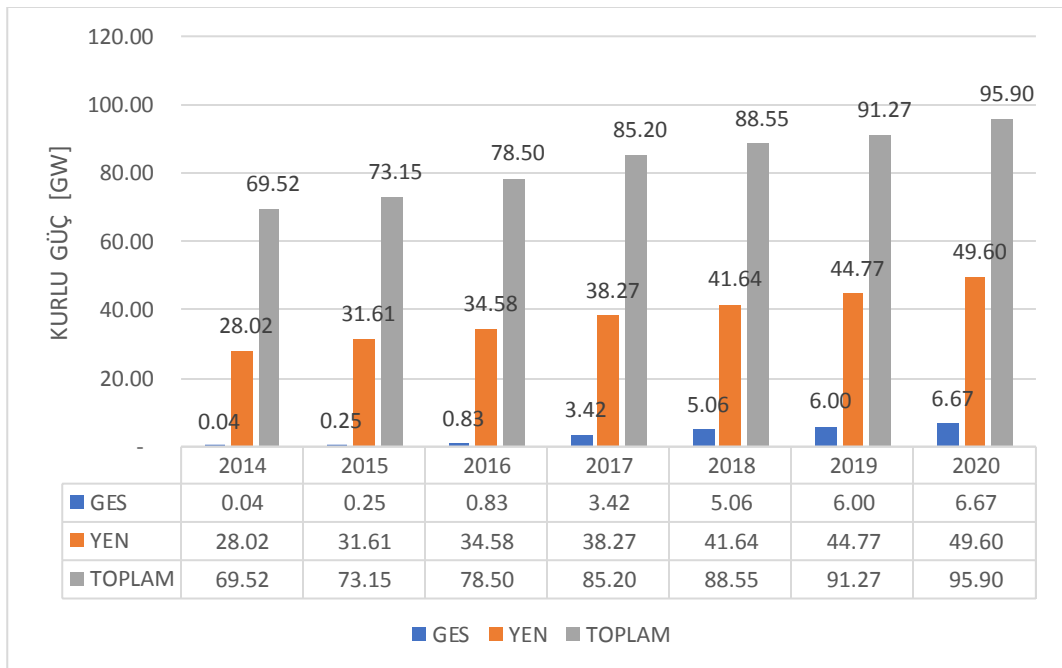
Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) sunduğu verilere göre, 2020 yılı sonu itibarıyla, dünya genelinde kurulu yenilenebilir enerji elektrik kurulu gücü 2.799,10 GW'a ulaşmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, küresel elektrik üretim kapasitesinin dağılımında ise ilk sırada % 43,3 ile hidroelektrik, % 26,2 ile rüzgâr enerjisi ve % 25,3 ile FV üçüncü sırada yer almaktadır [19].

¹ "Diğer yenilenebilir kaynaklar" biyokütle, atık, jeotermal ve dalga ve gelgit enerjisini içerir.



Şekil 3.2. Dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisinin gelişimi [19]

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, 2020 yılı sonunda dünyadaki güneş enerjisi kurulu güç 713,97 GW’a yükselmiştir. 2020 yılı itibarıyla Çin (254,35 GW), ABD (75,57 GW), Japonya (67 GW), Almanya (53,78 GW) ve Hindistan (39,21 GW), toplam FV kurulu güç kapasitesinin % 69’undan fazlasına sahip olduğu görülmektedir [19].

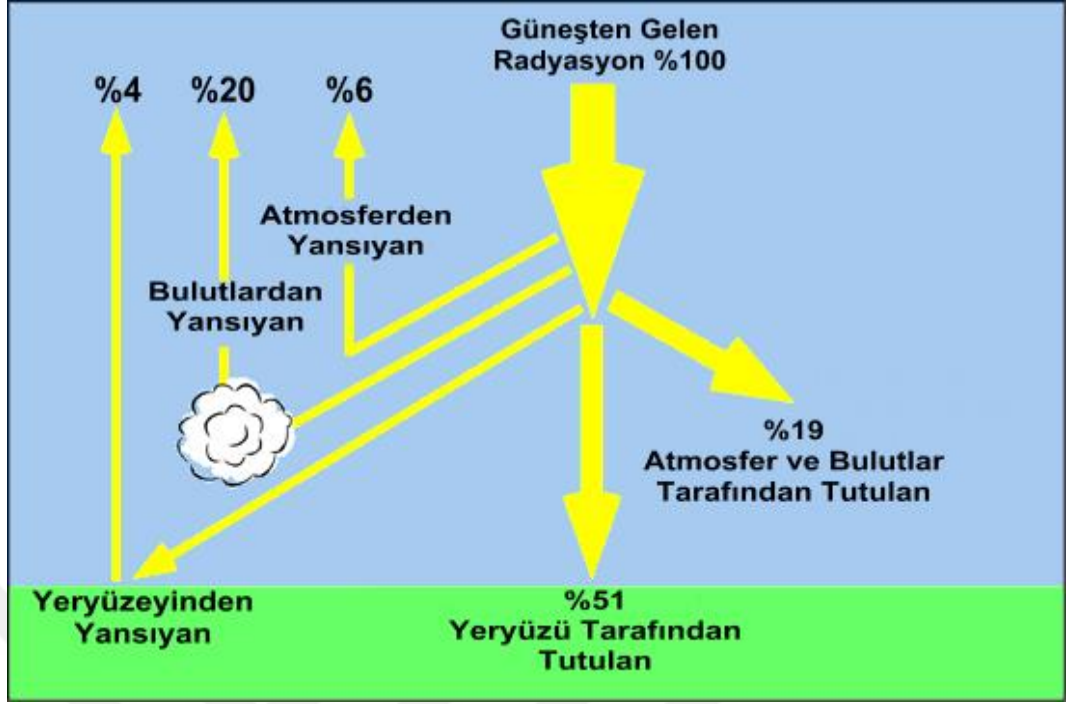


Şekil 3.3. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü-95,90 GW (2020) [20,21]

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, Türkiye'de 2020 sonu itibariyle elektrik kurulu güç 95,90 GW'a ulaşmıştır. Bu gücün 49,62 GW'ı yenilenebilir kaynaklardan olup bunun 22,93 GW'ı barajlı hidro, 8,06 GW'ı akarsu hidro, 8,83 GW'ı rüzgâr, 6,67 GW'ı güneş, 1,04 GW'ı biyokütle ve 1,34 GW'ı Jeotermal kaynaklardan oluşmaktadır. Başka bir deyişle, Türkiye'de güneş enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücünün payı yenilenebilir enerji kurulu gücünün %14,31'ine karşılık gelmektedir. Şekil 3.2 ve 3.3'te sunulan veriler 2014; 2015; 2016; 2017; 2018; 2019; 2020 yıllarında Türkiye'nin kurulu güneş enerjisi kapasitesindeki payının dünyanın kurulu güneş enerjisi kapasitesinin sırasıyla % 0,02; % 0,11; % 0,28; % 0,88; % 1,04; % 1,02 ve % 0,94'ü olduğunu göstermektedir. Bu verilere göre, son üç yılda güneş enerjisi sistemlerinin kurulumundaki büyüme hızının küresel gelişmeye kıyasla biraz yavaşladığı anlaşılmıştır. Yüksek düzeyde güneşlenme sürelerine rağmen, güneş enerjisi halen Türkiye'deki toplam kurulu gücün % 6,96'sını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, Türkiye'nin 2014 yılından itibaren hızla artmaya başlayan kurulu güneş enerjisi kapasitesi, 2020 yılı sonunda 2014 yılına kıyasla 163 kat artmıştır.

3.2. Güneş Enerjisi

$3,8 \times 10^{20}$ MW civarında enerjiyi sağlayan güneş, dünyadan ortalama $1,5 \times 10^{11}$ m uzaklıkta olan ve $1,39 \times 10^9$ m çapında yoğun şekilde sıcak gazlar içeren küttedir. Güneşin merkezindeki sıcaklığının çeşitli şekillerde 8×10^6 K ile 40×10^6 K arasında ve yoğunluğunun suyun yaklaşık 100 katı olduğu tahmin edilmektedir. Güneşin yüzeyinde yaklaşık 5777 K sıcaklığa sahip olan alana fotosfer denir. Güneş'in kütlelerinin %73'ünü hidrojen, %25'ini helyum, geri kalan kısmını ise diğer elementler oluşturmaktadır. Güneşte meydana gelen füzyon reaksiyonları (nükleer reaksiyonlar sırasında hidrojenin helyuma dönüşmesi olayı) sonucunda bir miktar enerji üretilmektedir [22,23].



Şekil 3.4. Güneş enerjisinin dünyadaki dağılımı [2]

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, güneşten dünyanın atmosferine ulaşan enerjinin yaklaşık %4'ü yer yüzeyinden, %26'sı ise atmosfer ve bulutlar tarafından yansımakta; %19'u ise atmosferdeki gazlar, partiküller ve bulutlar tarafından emilmekte; geri kalan %51'lik kısmı ise yeryüzüne ulaşmaktadır. Yeryüzüne ulaşan enerji ile dünyanın ısınmasını sağlayarak yaşamı mümkün kılmaktadır. Toplam güneş ışımasının yalnızca %10'u kullanılabilir olsa da sadece %0,1'i tüm dünyaya yeterli güç verebilecek düzeydedir [2].

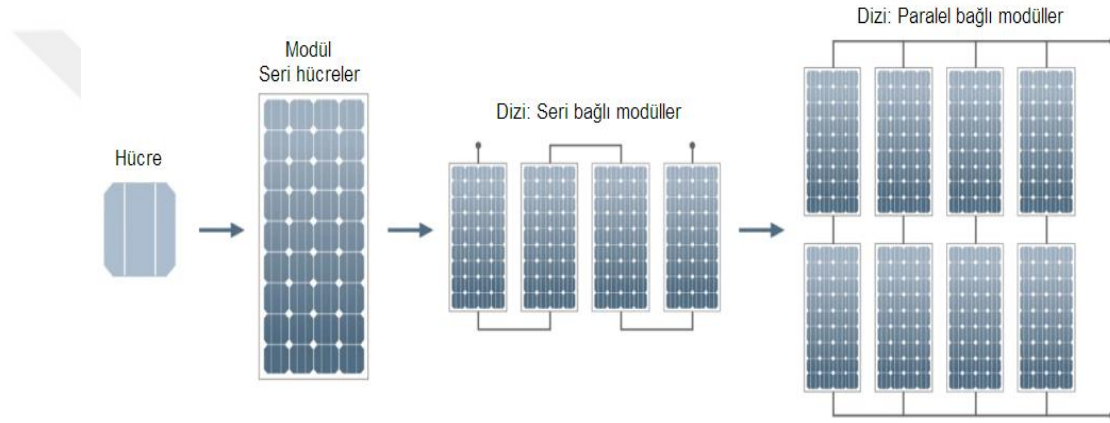
Güneş enerjisinin en büyük avantajlarından biri doğaya hiçbir zarar vermemesi ve yenilenebilir olmasıdır. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi, sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Güneş enerji sistemlerinden üretilen elektrik enerjisi bedava, gürültüsüz, sonsuz ve temiz bir kaynaktan elde edilir. Ayrıca yapılan yatırımın geri dönüş süresinin kısa olması da yatırımcıları motive etmektedir. Tüm bu avantajlar dikkate alındığında, güneşten enerjisinden elektrik üretmenin ne kadar önemli olduğu açıkça görülmektedir.

3.3. FV Enerji Sistemleri

3.3.1. Güneş hücrelerinin yapısı ve çalışması

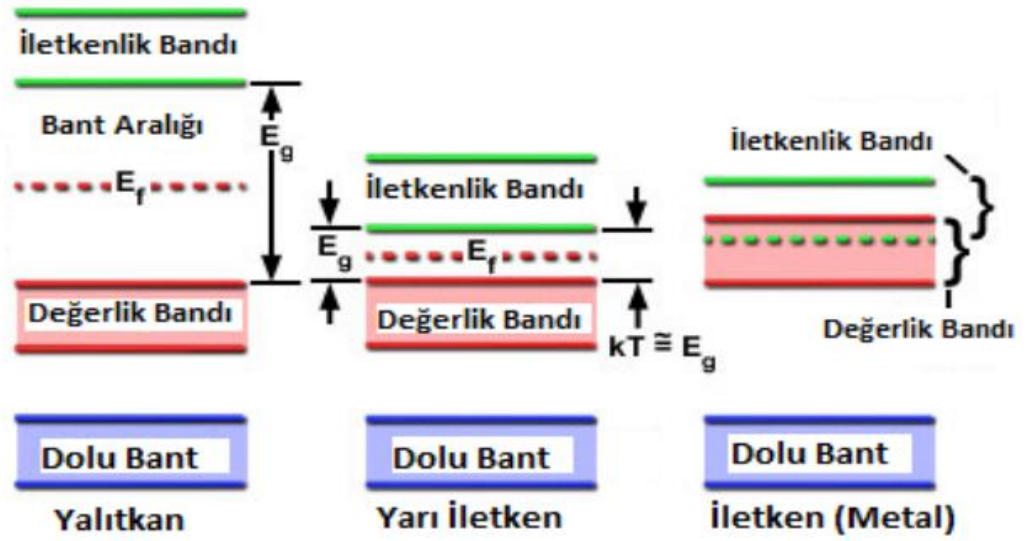
Güneş hücreleri, bireysel FV elemanı olup FV etkiye dayanarak güneş ışınlarının doğrudan elektriğe dönüştürebilen elektronik sistemlerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen,

daire şeklinde biçimlendirilebilen güneş hücrelerinin alanları genellikle 100 cm^2 civarında, kalınlıkları ise $0,1 - 0,4 \text{ mm}$ arasındadır. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına ve sıcaklık gibi çalışma şartlarına bağlı olarak % 5 ile % 30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Bir FV dizisi, belirli bir sistemin ihtiyaç duyduğu gerilim ve akımı sağlamak için seri ve/veya paralel olarak birbirine bağlanan birkaç ayrı FV modülden veya panelden oluşur. 12 voltluk modül, akü şarjı için endüstri standardıdır ve yaklaşık 2000 Wh'e kadar FV sistemler 12 voltta; 2000-7000 Wh arasındaki sistemler 24 voltta; 7000 Wh'den fazla çalışan sistemler 48 voltta daha iyi çalışmaktadır [24]. FV hücre, modül bağlantı örnekleri Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. FV hücre, modül ve dizi tasarımları [25]

Bir maddenin elektriksel olarak iletken olabilmesi için dışarıdan enerji sağlanması gerekir. İletkenlik bandı, elektronların değerlik bandından ayrıldığı ve akım taşıyabildiği banttır. Maddeler, elektronlarının bu banda geçmesiyle iletken hale gelirler. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, değerlik bandı ise, yasak enerji aralığının altında kalan ve elektronlarla dolu olan banttır. Değerlik bandındaki herhangi bir atomun elektronlarının yörüngelerinden ayrılıp iletim bandına girebilmeleri için bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığını geçmeleri gerekir. Yasak enerji aralığı, elektron içermeyen ve değerlik bandındaki elektronların iletim bandına girmesini zorlaştıran enerji aralığıdır [26].



Şekil 3.6. Yalıtkan, yarı iletken ve metal için yasak bant aralıkları [26]

Maddelerin elektriksel iletkenliği, atomlarının enerji seviyelerine bağlıdır. Her maddenin elektronlarının serbest kalabilmesi için bu maddeye dışarıdan yeterli seviyede enerji aktarılması gereklidir. Saf bir yarı iletken, elektronlar bir banttan diğerine geçtiğinde iletkenlik oluşur. Yani bir atomun son yörüngesinde değerlik elektronu serbest bırakıldığında, maddenin iletkenlik kazandığı anlamına gelir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, dışarıdan enerji (örneğin: güneş ışınımı) alan bir elektron bir üst banda (tabaka) yükselerek orada akım taşıyıcı olarak görev yapmaya başlayabilir. Elektron hareket ettiğinde arkasında bir (hole) bırakır [26]. Sıcaklık yükseltildiğinde, elektronlar termal uyarma yoluyla değerlik bandına geçerek hareketlilik kazanır. Hem iletkenlik bandındaki elektronlar hem de bu elektronların değerlik bandında bıraktığı holeler, elektrik iletkenliğine katılırlar. Hem iletim bandındaki elektronlar hem de bu elektronların değerlik bandında bıraktığı holeler elektriksel iletkenliğe katılır. Bant holelerin sıcaklıkla değişimi yaklaşık olarak Varshini fonksiyonula ifade edilebilir [27].

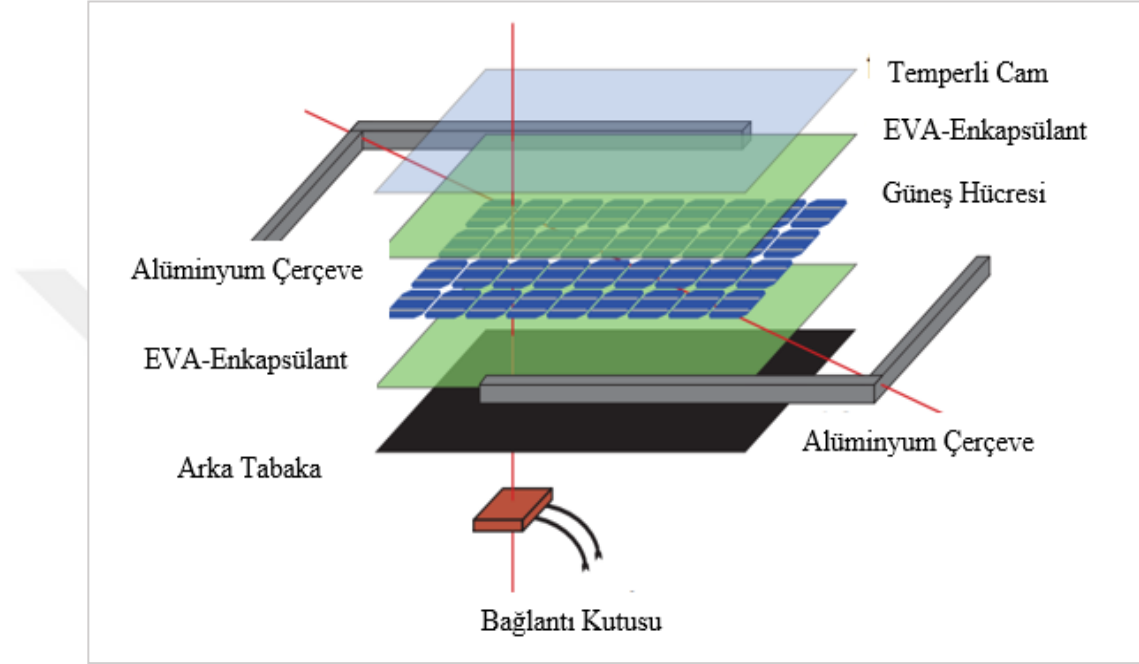
$$E_g = E_{g0} \frac{\alpha * T c^2}{T + \beta} \quad (3.1)$$

Burada α ve β deneysel olarak değerlendirilen sabitlerdir ve silikon (Si) için $\alpha = 4,9 \times 10^{-4}$ eV/T, $\beta = 655$ K'dır. Gallium Arsenide (GaAs) için ise $\alpha = 5,4 \times 10^{-4}$ eV/T, $\beta = 202$ K'dır. Yarı iletkenlerin yasak bant aralığı (E_g) 0,1 eV ile 5 eV arasındadır. Sıcaklıkta ($T = 0$ K), Si ve GaAs için yasak bant aralığı sırasıyla 1,169 ve 1,519 eV'tur. Sıcaklık artışından kaynaklanan güneş hücresinin yasak enerji aralığındaki azalma, gerilimin azalmasına yol açar.

3.3.2. FV sistem bileşenleri

3.3.2.1. FV panel

FV hücreleri akımı artırmak için paralel bağlanırken, seri bağlantı daha yüksek bir gerilim üretir. Şekil 3.7 güneş hücresi, güneş camı, EVA kapsülleme, arka tabaka, bağlantı kutusu ve çerçeve gibi güneş panellerinin ana parçalarını göstermektedir.



Şekil 3.7. FV panel yapısı [28]

Güneş hücreleri güneş panelinin en önemli parçasıdır. IP standartlarına göre üretilen temperli cam, güneş panelini dış etkilere koruyan koruyucu bir camdır. Buna ek olarak, güneş ışınlarını engellemez ve ısı depolaması düşüktür. EVA - Enkapsülasyon, güneş enerjisi endüstrisinde çapraz bağlanabilir etilen vinil asetat (EVA) kullanarak yapılan en yaygın enkapsülasyondur. Laminasyon makinesinin yardımıyla, hücreler EVA filmleri arasında sıkıştırılmış bir vakumda lamine edilir. EVA filmlerin dezavantajlarından biri, Ultraviyole (UV)'ye dayanıklı olmamasıdır. Bu nedenle UV taraması için koruyucu ön cam gereklidir. Sırt Folyosu – Backsheet (arka tabakası) elektrik yalıtkanı olarak işlev görür ve güneş hücrelerini nemden ve zorlu ortamlardan korur. Bu, güneş panelinin dayanıklılığını ve zaman içinde doğru çalışmasını sağlamaktadır. Panelden üretilen elektriğin çıkış noktası olarak tanımlanabilen bağlantı kutusu, elektrik bağlantılarını korur ve yalıtır. Alüminyum çerçeve, montaj için gerekli yapıyı oluşturur, paneli fiziksel darbelerden korur ve kolay panel montajı sağlar. Çerçeve ile cam arasında su geçirmez yalıtım malzemesi bulunmaktadır [28].

3.3.2.2. Şarj kontrol cihazı

Off grid FV sistemlerde çok kullanılan güneş paneli ve akü arasında bulunan şarj kontrolörü, akülerin verimli olarak şarj edilmesini sağlar. Akülerden panellere gidebilecek ters akımları engeller. Devredeki transistör bir anahtar görevi görür ve panelin gerilimi akü geriliminden yüksek olmadıkça herhangi bir akımın geçmesine izin vermez. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, şarj kontrol cihazı, akü grubu ile FV panel arasında olduğu için ana görevi bu iki sistem bileşeninin birbirine zarar vermesini önlemektir. Yani bu cihazdaki devre ile birlikte güneş panellerinin toplam çıkış gerilimi toplam akü gerilimini aştığında sistem şarj moduna geçerek şarj kontrol cihazı akımın panellerden akülere akmasına izin verir. Ancak FV panellerin çıkış gerilimi akü geriliminin altına düştüğünde akülerden panellere akım geçişine izin vermez. Genelde, 12 v gerilimli akülerin tam olarak şarj edilebilmesi için yaklaşık 14-14,5 Volta ihtiyacı vardır [29].



Şekil 3.8. DGM şarj kontrol cihazı [29]

Şarj kontrol cihazları MGNİ (maksimum güç noktası izleyici) kontrol ve DGM (darbe genişlik modülasyonu) kontrol cihazı (Şekil 3.8) olmak üzere ikiye ayrılır. DGM, ekonomik olduğu için güneş enerjisi sektöründe en çok kullanılan kontrol cihazıdır. DGM şarj kontrol cihazı, küçük şebekeden bağımsız uygulamaları için ideal bir sistem olmasına rağmen, MGNİ genellikle daha büyük sistemler için tercih edilir [29].

3.3.2.3. Akü

Aküler, güneşli dönemlerde FV panellerin ürettiği elektrik enerjisini depolar ve panellerin güç sağlayamadığı zamanlarda elektrik enerjisini iletir. Normalde akü gece veya bulutlu havalarda boşalır. Ancak yük gün boyunca dizi çıkışını aşarsa, aküler FV paneller tarafından sağlanan enerjiyi tamamlayabilir. Günde 24 saat güneş ışığı olmadığından, gece saatlerinde enerji talebini karşılamak ve bir güneş enerjisi tesisinin çalışma süresini uzatmak için bir depolama sistemine ihtiyaç vardır. Böylece akü, invertere doğru akım sağlar.

FV sistemlerde kullanılan en uygun güneş hücreleri, yüksek şarj/deşarj verimliliği, maliyet ve yüksek çevrim özellikleri ve hızlı şarj olma özelliklerine göre seçilir. Akülerin gerilimleri mutlaka invertör, şarj regülatörü ve modüller ile uyumlu olmalıdır. Akülerin verimli ve uzun ömürlü kullanılabilmesi için şarj kontrol üniteleri kurulmalı ve doluluk oranı %50'nin altında olduğu zaman şarj edilmeleri önerilmektedir [30]. Evlerde fotoelektrik depolaması için en yaygın olarak sunulan iki tür akü, lityum iyon (Li-ion) ve kurşun asit akülerdir. Bu iki akü çeşidinin temel özellikleri ve farklılıkları, Tablo 3.1'de gösterilmektedir. Şekil 3.9 ise Lityum-iyon ve kurşun-asit pillerinin görsellerini göstermektedir.

Tablo 3.1. *Lityum iyon ve kurşun asit akülerin temel özellikleri ve farklılıkları* [31]

Lityum İyon (Li-ion) Aküler	Kurşun Asit Aküler
Genellikle dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi elektronik cihazlarda bulunur.	Arabalarda kullanılır.
Daha pahalı.	Daha ucuz.
Ev içi şebekeye bağlı solar FV depolama sistemlerinde giderek yaygınlaşıyor.	Genellikle daha fazla depolamanın gerekli olduğu şebekeden bağımsız mülkler için kullanılır.
Daha hafif.	Daha ağır ve daha büyük.
Şarj /deşarjı yöneten entegre denetleyici gerektirir.	Akü sağlığını korumak için iyi bir şarj vedeşarj rutinine ihtiyaç duyar.
Daha verimlidir.	Daha az verimli.
Daha fazla depolanmış enerjiyi boşaltabilir.	Daha az depolanmış enerjiyi boşaltabilir.
Beklenen ömür daha uzundur.	Beklenen ömür daha kısadır.



Şekil 3.9. Lityum iyon ve kurşun asit aküler [31]

Batarya depolama sistemleri genellikle kilovat (kW) cinsinden bir güç derecesi ile sağlanır. Şebekeye bağlı bir FV depolama sistemi için depolama pilleri tipik olarak yaklaşık 1 kW ile 7 kW arasındadır. Tüm piller şarj ve deşarj sırasında bir miktar enerji kaybettiğinden, pilin kilovat saat (kWh) olarak ifade edilen elektrik kapasitesi, genellikle pilin gerçek kullanılabilir kapasitesinden daha fazladır. Bu nedenle bazı piller diğerlerinden daha iyi bir "şarj-deşarj verimliliğine" sahiptir. Bir pilin verimi ömrü, teknolojiye ve pilin kullanım yöntemine, yani önemli ölçüde, geçirdikleri döngülerin sayısına (tam dolu pil şarjı ve deşarjı) bağlıdır. Üreticiler genellikle yıl bazında ve/veya "şarj-deşarj döngüleri" bazında ömür tahmininde bulunurlar [31]. Bir kablounun içerisindeki tel çapı mm olarak bir gauge değerine denk gelir. Örneğin: 23 gauge = 0.5733 mm, 24 gauge = 0.5105 m'ye denk gelir.

3.3.2.4. İnvörtör

Genel olarak güç çevirici olarak bilinen invertörler, FV diziden çıkan doğru akımı evlerde kullanılan şebeke uyumlu alternatif akıma (AC) çeviren cihazdır. İnvörtör, FV modülü dizisinden gücü alıp 60 Hz'de (saniye başına 1 devir) güç şebekesinin frekansı ile eşleşene kadar salınmasına neden olur. Bir elektrik kesintisi varsa, invertör şebekeye elektrik sağlamayı keser ve elektrik hatlarına elektrikli geri beslemeye engel olur.

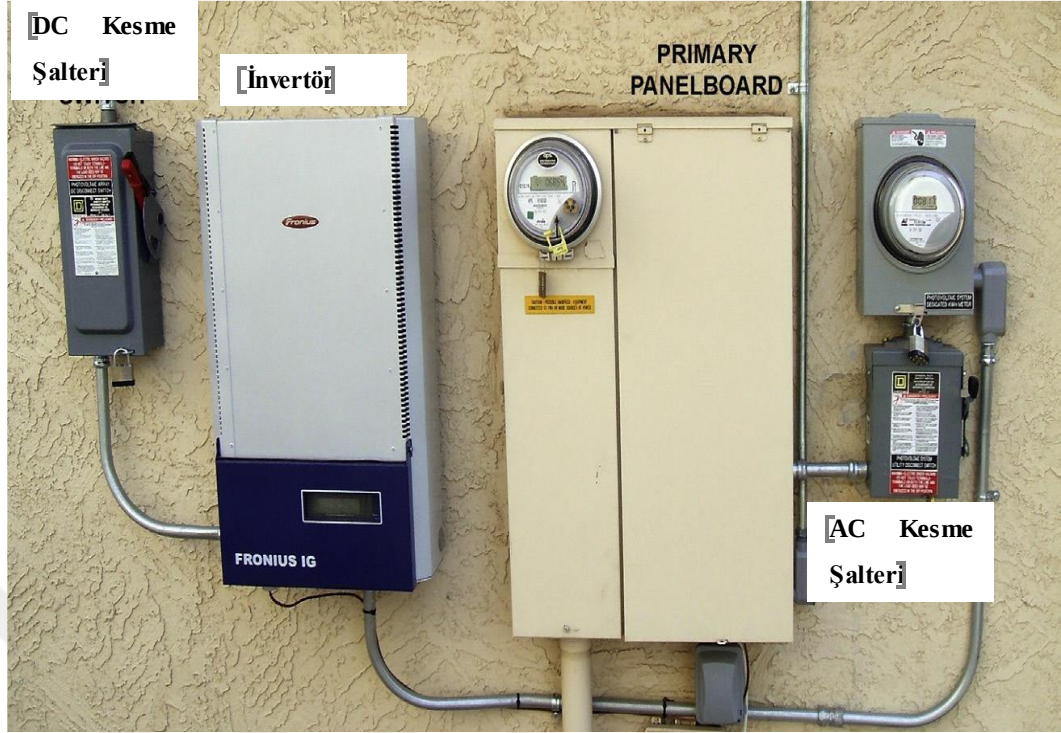


Şekil 3.10. Dizi invertör [32]

Çoğu invertör, marka ve modele bağlı olarak % 85 - % 96 arasında verimliliğe sahiptir. Şekil 3.10'da gösterilen dizi invertör, % 96'ya ulaşan dönüşüm verimliliği ile ticari ve endüstriyel çatılar ile küçük ve orta ölçekli FV enerji santralleri için uygundur. İnvertörler, uygulanan yükleri ayarlayarak FV çıkışı optimize etmek için maksimum güç noktası izleme (MGNI) olarak bilinen bir teknik kullanır. Değişken açılar ve çatı hatları, bazı dizi invertör sistemlerinde sorun oluşturabilir, çünkü bu sistemlerin en üst düzeyde çalışması için tüm FV panellerin aynı güneş ışığı yoğunluğuna sahip olması gerekir. Bu nedenle, tüm FV paneller aynı geliş açısına ve aynı yöne bakacak şekilde monte edilmelidir. Ek olarak, dizi invertörler sınırlı bir güç derecelendirmesine sahip olabilir ki bu da güneş panellerinin güç derecesinin dizi invertörün güç derecesi ile eşleşmesi gerektiği anlamına gelir [32].

3.3.2.5. Devre kesme şalteri

Devre kesme şalteri, invertör ve şebeke arasındaki alternatif akım gücünü kesen ek anahtarlardan oluşur. DA- Devre kesme şalteri, sistem bakımı ve olası sistem sorunlarını gidermek için FV dizinden eviriciye giden elektrik akışını güvenli bir şekilde keser. FV bağlantı kesme sisteminin bir örneği Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

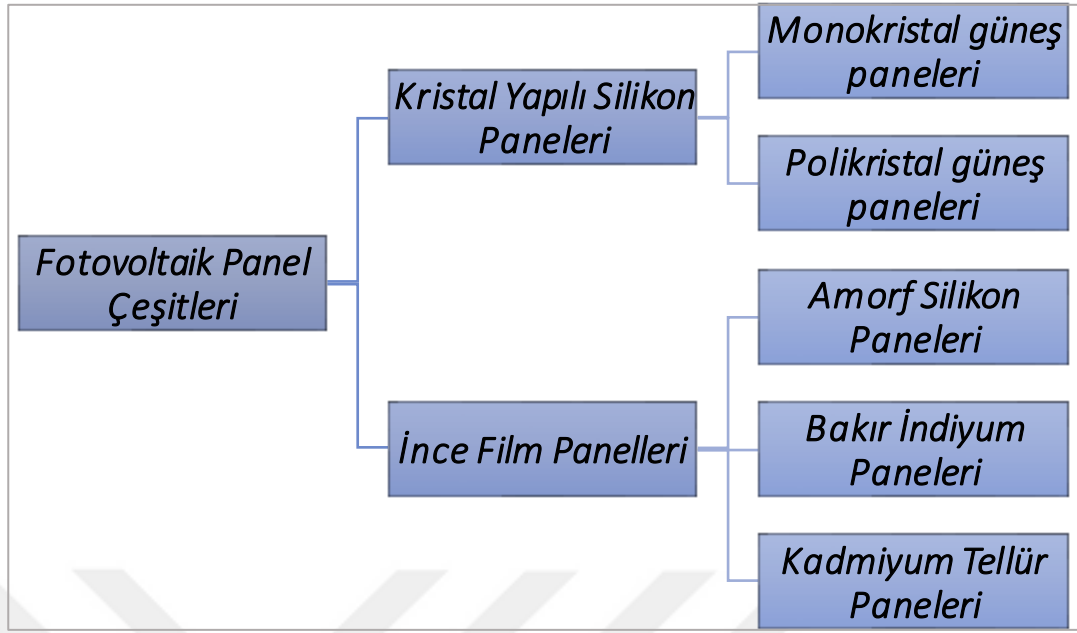


Şekil 3.11. Devre kesme şalteri [32]

Bu devre kesme şalteri FV sistemi karmaşık ve maliyetli hale getirir. Bunun yanında sistem güvenliği ve aşırı akım koruması da sağlar. İletim kayıplarını % 3'ten daha az tutmak için kabloların çalışma uzunluğu yeterli boyutlarda olmalıdır. Normalde, güneş dizisi ile 30,48 m'den az ise bir dize invertörü arasındaki kablolama için 12 gauge tel yeterliyken, 30,48 m'den fazla ise 10 gauge yeterlidir [32]. Bir kablonun içerisindeki tel çapı mm olarak bir gauge değerine denk gelir. Örneğin: 23 gauge = 0.5733 mm, 24 gauge = 0.5105 m'ye denk gelir.

3.3.3. FV panel çeşitleri

Şekil 3.12'de görüldüğü üzere, FV panel türleri kristal yapılı silikon ve ince film yapılı olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Kristal yapılı paneller monokristal ve polikristal olmak üzere ikiye ayrılırken, ince film panelleri bakır indiyum, amorf silikon ve kadmiyum tellür olmak üzere üçe ayrılır [33].



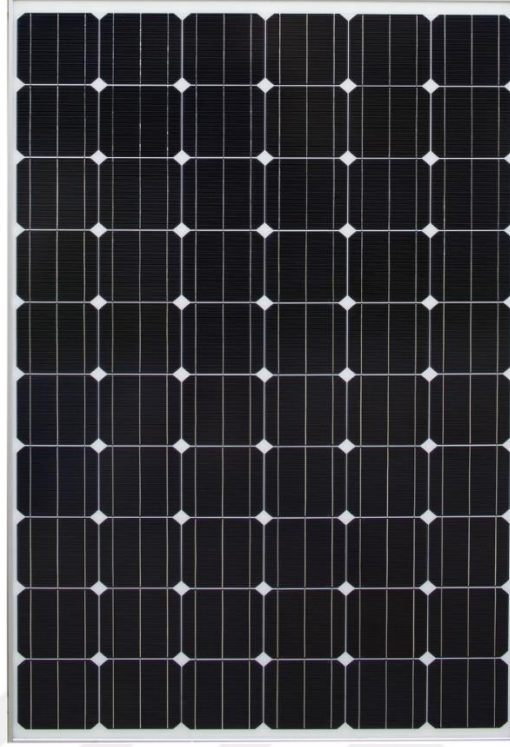
Şekil 3.12. FV hücre türlerini gösteren diyagram [33]

3.3.3.1. Kristal yapılı silikon paneller

Kristal solar panellerde en önemli materyal olan Silikon oksijenden sonra doğada kum ya da kuvars formunda en çok bulunan ikinci elementtir. Bu şekildeki kuvarstan (kumdan) çeşitli kimyasal ve fiziksel ayrışma yöntemleri kullanılarak saf (arı) halde silikon elde edilir. Bu malzeme (silikon), polikristal ve monokristal hücrelerinin temelini oluşturur.

Monokristal güneş paneli

Şekil 3.13'te gösterilen monokristal güneş pilleri, tek kristalli güneş hücrelerinden yapılı ve rengi, yüksek silikon saflığının olduğunu gösteren homojen görünümünden kolayca tanınabilir. Monokristal yapılı güneş hücreleri, en yüksek verimlilik değerlerine sahip, üretim teknikleri ile en eski ve aynı zamanda en pahalı hücre türüdür. Konu güneş hücreleri olduğunda verimlilik; en kritik özelliklerden biridir. Monokristal hücrelerin verimliliği % 15 - % 18 arasında değişmektedir. Ancak yapılan çalışmalar sonucunda, son yıllarda piyasadaki monokristal hücrelerin verimlilik değerlerinin % 20 - % 22'ye kadar ulaştığı görülmektedir [6].



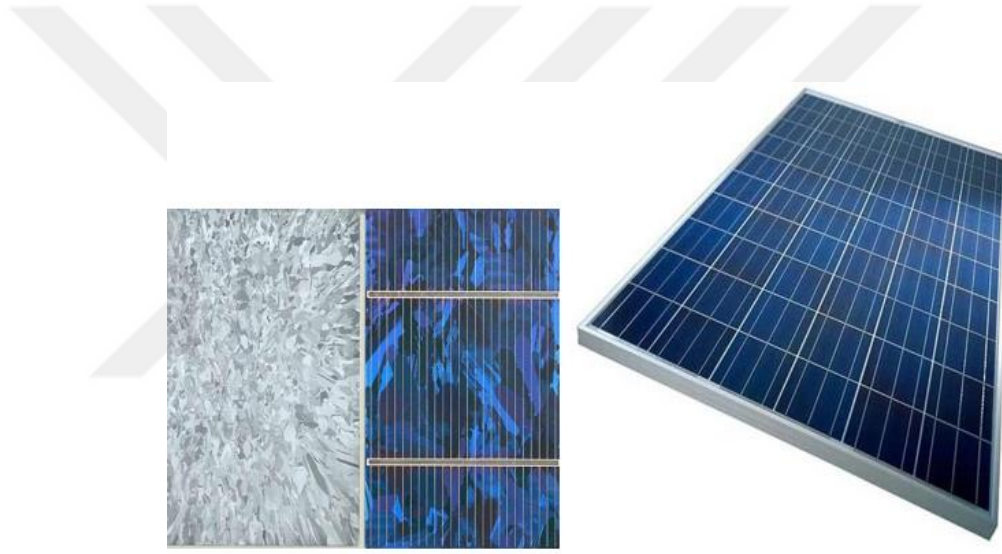
Şekil 3.13. *Monokristal silikon güneş paneli* [32]

Monokristal güneş pilleri yerden tasarruf sağlar, yani polikristalden daha yüksek güç çıkışını daha az yer ile sağlamaktadır. Polikristal panellere kıyasla monokristal paneller daha pahalıdır ve sıcaklığa daha duyarlıdır. Mobilite (μ) taşıyıcının uygulanan elektrik alan altında ne kadar kolay hareket edebildiğinin bir ölçüsüdür ve taşıyıcı iletimi için önemli bir parametredir. Yük taşıyıcıların mobilitesi, çarpışmalar nedeniyle sıklıkla bozulur. Çarpışma sayısı arttıkça mobilite azalır. Sıcaklığın artması, titreşen örgü atomları ile yüklü taşıyıcıların çarpışarak saçılmalarının artması ve düşük mobilite ile sonuçlanır. Tek kristal silikon, oda sıcaklığında (300 K) ve $10^{15} \text{ cm}^{-3} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ katkılama konsantrasyonu aralığında, sırasıyla $1400 \text{ cm}^2/\text{V.S}$ ve $90 \text{ cm}^2/\text{V.S}$ taşıyıcı mobilitesine sahiptir. Bundan dolayı mono kristal panel bu çalışmada çalışma örneği olarak seçilmiştir. Bu, donörlerin veya alıcıların katkılama konsantrasyonunun arttırılmasının, iyonize katkı atomlarıyla daha sık çarpışmalara yol açtığı ve bu da yine daha düşük mobilite ile sonuçlandığı anlamına gelir [34].

Polikristal güneş paneli

Polikristal silikon, çok sayıda küçük silikon kristalinden oluşan bir malzemedir. Polikristal hücrelerinin üretilmesi oldukça verimlidir; bu, monokristal hücrelere kıyasla daha ucuz hale getirmek için maliyetleri önemli ölçüde azaltması açısından önemlidir.

Polikristal panellerde, dökülmüş ve mükemmel kareler halinde kesilmiş, erimiş silikon kullanılır. Bu eritme işlemi, üretim sırasında malzemelerin neredeyse tamamının kullanılmasını sağlayarak atık oluşumunu çok önemli ölçüde azaltmaktadır. Polikristal güneş hücrelerinin verimlilik değerleri % 14 - % 17 arasında değişmektedir. Polikristal güneş hücrelerinin yapıları çok kristallidir ve ışığın yansımaları kırılmalar gözlemlenebilir. Yansımayla oluşan kırılmaları engellemek için amaçlanan anti-reflektif kaplama yapıldığından polikristal hücrelerin renkleri maviye dönmektedir. Kaplama olmayan hücrelerin rengi ise gümüşdür [6]. 300 K sıcaklıkta ve 10^{15}cm^{-3} ve 10^{20}cm^{-3} aralığında, fosfor katkılı polikristal silikon nanotellerin mobilitesi sırasıyla $600\text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve $69\text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'dir [34].



Şekil 3.14. Polikristal güneş paneli [33]

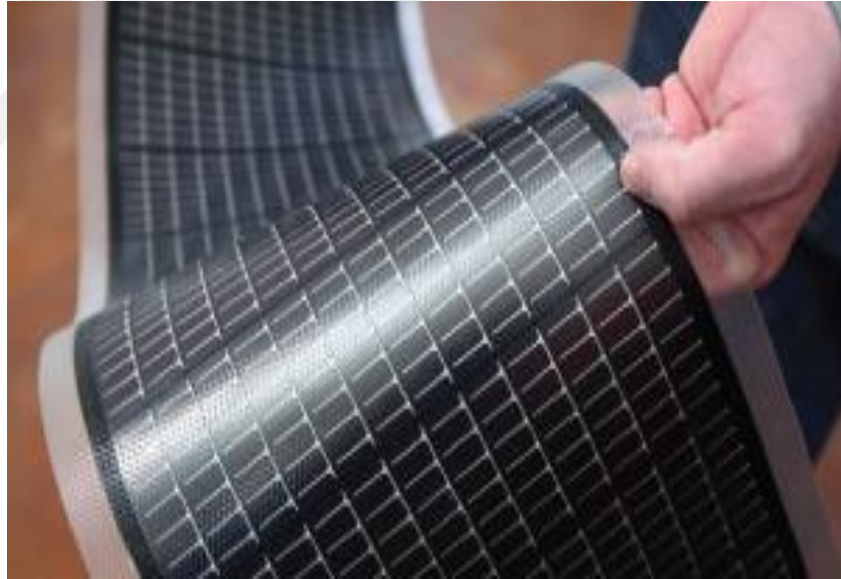
3.3.3.2. İnce film güneş paneli

"İnce film güneş panelleri" terimi, bu tür güneş panellerinin, monokristal veya polikristal güneş panellerine göre çok daha ince FV malzeme kullanılmış olduğunu ifade etmektedir. İnce film güneş hücreleri, kristalin silikon hücreler için 200-300 nm katmanlara kıyasla yaklaşık 10 nm kalınlığında aktif malzeme katmanlarından oluşur. En yaygın üç ince film FV panel aşağıdaki şekilde ele alınmaktadır.

Amorf silikon güneş panelleri

Amorf Silikon (a-Si) FV paneller, ticari amaçlarla üretilen ilk ince film FV panellerdir. Amorf bir silikon (kristalin olmayan silikon formu) güneş hücresi, bir kristalin-silikon hücresindeki aktif maddenin sadece yaklaşık 1/300'ü kadarını içerir. En

basit haliyle, Amorf Silikon (a-Si) hücre yapısı tek bir p-i-n katman dizisine sahiptir. Amorf silikon güneş pillerinin temel avantajı, daha düşük üretim maliyetleridir ki bu özellikleri onları rekabetçi hale getirir. Bu tür teknolojinin bir diğer temel avantajı, sıcaklığa karşı daha yüksek direnç sağlamalarıdır. Bu paneller, monokristal hücrelerden polikristal hücrelerden bile daha düşük bir verime sahiptir. Kristal silikon yaklaşık %18'lik bir verime ulaşırken, amorf güneş hücrelerinin verimi yaklaşık %7'de kalmaktadır. Ayrıca, amorf hücrelerin beklenen kullanım ömrü, kristal hücrelerin kullanım ömründen daha kısadır [35]. Amorf yarı iletken, bant aralığı büyük olduğundan ve Fermi seviyesi hole içinde olduğundan, düşük termal ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Amorf yarı iletkenin elektron/delik mobilitesi, karşılık gelen kristaldekinden daha küçük hale gelir. 4×10^{20} doping konsantrasyonunda n-tipi amorf silikonun (a-Si:H) maksimum delik ve elektron mobilitesi sırasıyla, $0,3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve $2 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ dir [36].



Şekil 3.15. Amorf silikon güneş paneli [37]

Kadmiyum tellür güneş panelleri (CdTe)

CdTe FV, başka bir tür ince film güneş enerjisi teknolojisidir. kWh başına düşük maliyet nedeniyle oldukça popüler hale gelmiştir. CdTe hücreleri ile elde edilen en fazla verimlilik yaklaşık % 16'dır. CdTe hücrelerinin avantajlarından biri, silikon hücrelerin yapabileceğinden daha kısa dalga boylarını yakalamalarıdır. Bununla birlikte yapısındaki sınırlı tellür arzı ve CdTe panelin bertaraf aşamasında kadmiyumun açığa çıkması nedeniyle potansiyel toksik etkisi ile ilgili bazı çevresel endişeler vardır [35].



Şekil 3.16. *Kadmiyum tellür güneş paneli (CdTe)* [37]

Bakır indiyum güneş panelleri (CIGS)

CIGS güneş pilleri, ince bir bakır indiyum selenidi filmi ve bakır galyum selenidi ve az miktarda sodyum içerir. CIGS modülleri, kristal silikon (c-Si) güneş hücrelerine kıyasla en yüksek verimlilik düzeyine (% 22,8) sahiptir. Bu panel tipi laboratuvar koşullarında 1 m² panel yüzeyi ile 1.000 W/m² güneş ışınımını 160 W elektriğe dönüştürebilir [38].



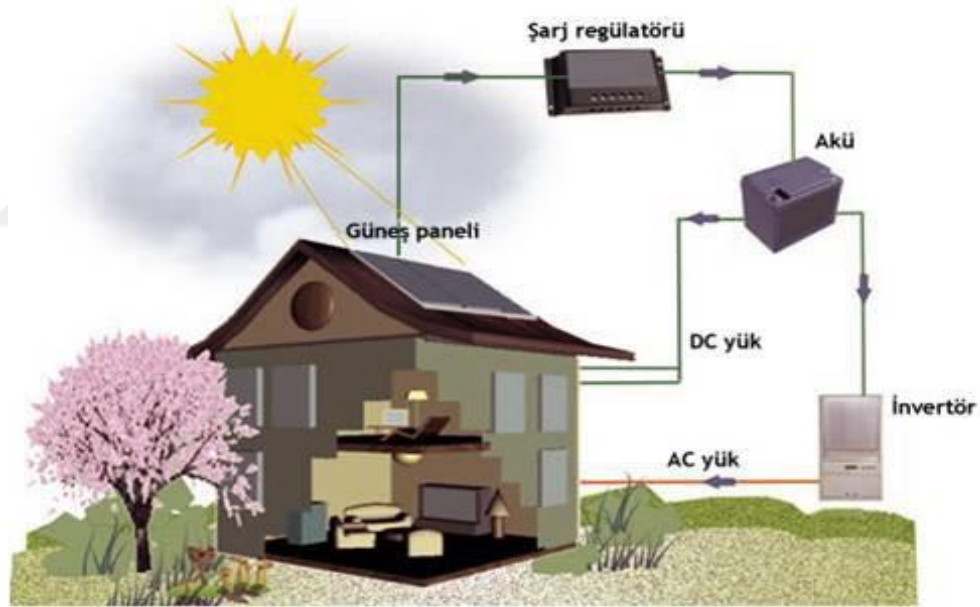
Şekil 3.17. *Bakır indiyum güneş paneli (CIGS)* [37]

3.3.4. Şebeke bağlantı tipine göre GES 'lerin sınıflandırılması

Teknolojinin son kullanım uygulamasına göre iki ana tür güneş FV sistem bulunmaktadır. Bunlar, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız güneş FV sistemlerdir.

3.3.4.1. Şebekeden bağımsız sistemler

Şekil 3.18’de gösterildiği gibi, şebekeden bağımsız FV sistemler, güç şebekesi olmayan alanlar için uygulanabilir. Bugünlerde, bu tür FV sistemler genellikle kırsal alan veya kıyı adaları gibi güç şebekesinin çok uzak olduğu ayrılmış alanlara kurulmaktadır. Ayrıca, elektrik şebekesinden elektrik almanın uygun olmadığı veya çok pahalı olduğu durumlarda da şehir içine kurulabilirler. Şebekeden bağımsız bir FV sistem, FV sistemden (gece boyunca olduğu gibi) çok az çıkışın olduğu veya hiç olmadığı durumlarda kullanılmak üzere elektriği depolamak için kurşun asit, nikel kadmiyum veya lityum iyon piller gibi derin devirli şarj edilebilir piller gerektirmektedir.

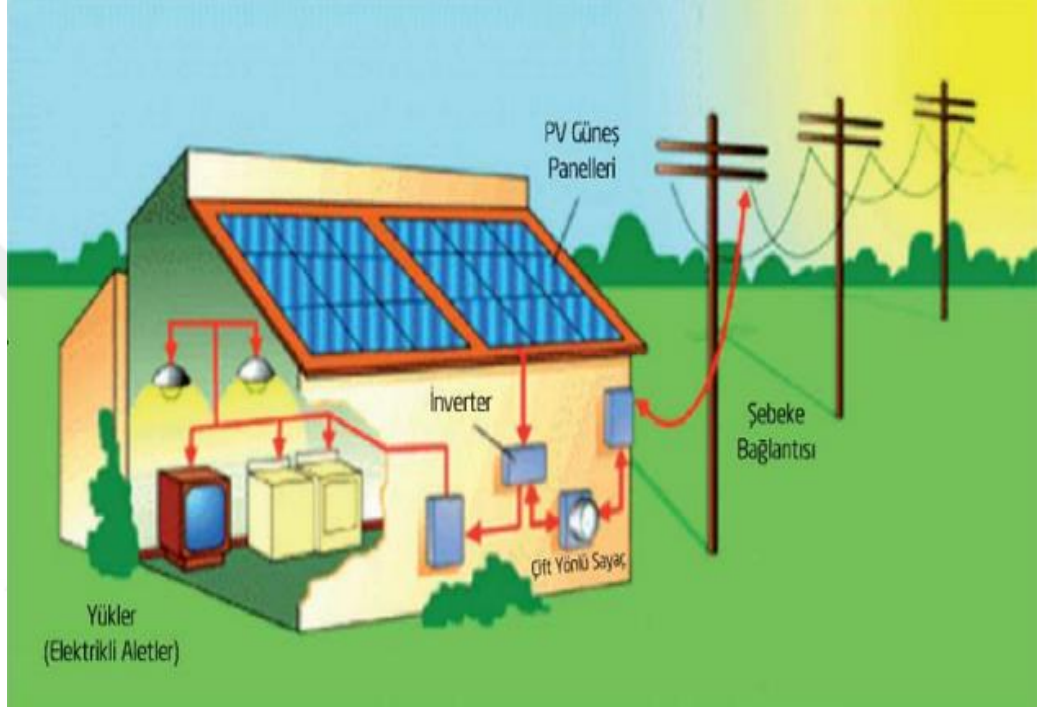


Şekil 3.18. Şebekeden bağımsız sistemin çalışma prensibi [39]

3.3.4.2. Şebeke bağlantılı sistemler

Şebekeye bağlı FV sistemler, merkezi elektrik şebekesine bağlanır ve üretilen elektriği şebekeye aktarır. Şekil 3.19’de gösterildiği gibi, şebekeye bağlı FV sistem güneş panelleri, bir veya birkaç invertör, bir güç düzenleyici ünite ve şebeke bağlantı ekipmanından oluşur. Küçük konut ve ticari çatı sistemlerinden büyük ölçekli güneş enerjisi istasyonlarına kadar çeşitlilik gösterir. Bağımsız güç sistemlerinden farklı olarak, şebekeye bağlı bir sistem, hâlâ çok pahalı olması nedeniyle nadiren entegre aküler

içermektedir. Şebeke olan yerlerde, üretilen elektriği depolamaya gerek kalmadan şebekeye pompalayan sistem şebeke bağlantılı sistemdir. Bu sistem ile, üretim fazlası elektrik dağıtım şirketlerine satılabileceği gibi, üretimin yeterli olmadığı durumlarda da şebekeden elektrik kullanılabilir. Diğer bir ifadeyle, şebeke bir alıcı veya bir depo olarak kullanılabilir. Bu işlem, sisteme monte edilecek çift yönlü sayaçla kayıt altına alınacaktır.



Şekil 3.19. Şebeke bağlantılı sistemin çalışma prensibi [40]

3.4. FV Modül Performansını Etkileyen Faktörler

FV sistemlerin performansını ve üretilen gücü etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler bu alt bölümde çevresel faktörler, FV sistem faktörleri ve kurulum faktörleri olarak sınıflandırılmış ve her biri alt faktörleri ile birlikte ayrı ayrı incelenmiştir.

3.4.1. Çevresel faktörler

Güneş ışınımı, sıcaklık, kirlenme (tozlanma) ve gölgeleme gibi çeşitli çevresel faktörler FV sistemlerinin performansını etkiler. Bu faktörler aşağıda detaylıca ele alınmıştır.

3.4.1.1. Modül sıcaklığın etkisi

Bir güneş hücresi, güneş ışınımının yaklaşık % 20'sinden küçük bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürürken geri kalanını ısıya dönüştürür. Güneş modülünün aşırı ısınması, esas olarak aşırı güneş radyasyonu ve yüksek ortam sıcaklıkları nedeniyle oluşur. Modül sıcaklığı, sistem verimliliğini ve enerji çıktısını büyük ölçüde etkilediği için bir güneş sisteminin davranışı üzerinde büyük etkisi olan bir parametredir. Hücre sıcaklığının artmasının ana etkisi, hücre sıcaklığının artmasıyla açık devre gerilimini lineer olarak azaltması şeklindedir. Hücre gerilimi, çalışma sıcaklığındaki 1 °C artış başına yaklaşık 2,2 mv azalır ve bu nedenle kristalli FV hücrelerin verimliliği yaklaşık %0,5 oranında düşer [48-49]. Kristal modüller için tipik bir sıcaklık düşürme faktörü % 89'dur, bu nedenle örnek olarak 100 W'lık bir modül alırsak, tipik olarak yaklaşık 89 W'ta ($100 \times 0,89 = 89 \text{ W}$) çalışır [41].

Nominal Çalışma Hücresi Sıcaklığı (NOCT), aşağıdaki koşulların altındaki bir modülde açık devreli hücrelerle ulaşılan sıcaklık olarak tanımlanır: denklem 3.2'den yararlanarak güneş hücreler sıcaklığı panelyüzeyindeki ışınlam $=800 \text{ W/m}^2$, hava sıcaklığı $=20 \text{ °C}$, rüzgâr hızı $=1 \text{ m/s}$ gibi parametreler kullanarak tahmin edilmektedir [5].

$$T_c = T_a + \frac{\text{NOCT} - 20}{0,8} \times G_i (\text{kW/m}^2) \quad (3.1)$$

Burada T_a ve G_i sırasıyla ortam sıcaklığını ve güneş ışınlam şiddetini temsil etmektedir. Bir güneş panelinde panelden elde edilen güç panel sıcaklığıyla ters orantılı olarak artar veya azalır. Panelin sıcaklığı, optimum sıcaklık olarak kabul edilen 25 °C 'den daha yüksek olursa panelin çıkış gücü azalır. Bir FV sistemde panel sıcaklığının artması önemli derecede kayıplara neden olmaktadır. Bir güneş panelinin nominal çalışması olarak kabul edilen durumlar; ışınlamın 1000 W/m^2 , rüzgâr esiş hızının 1 m/s , hava sıcaklığının ise 25 °C olduğu şartlardır [5].

Bu çalışmamızda kullanılan FV panelin kısa devre akımının sıcaklık katsayısı $\%0,005/\text{°C}$ 'dir, bu da her 1 °C 'lik sıcaklık artışının kısa devre akımında $\%0,005$ 'lik bir artışa karşılık geldiğini göstermektedir. Ters yönde, FV panelin açık devre geriliminin ve maksimum gücün sıcaklık katsayısı ise sırasıyla $\% -0,38$ ve $\% -0,29 \text{ °C}$ 'dir, bu da her 1 °C 'lik sıcaklık artışının açık devre geriliminde $\% 0,38$ 'lik ve $\% 0,29$ 'lik bir düşüşe karşılık geldiğini göstermektedir. Kristal silisyum hücreler bu sıcaklıktan amorf silisyum

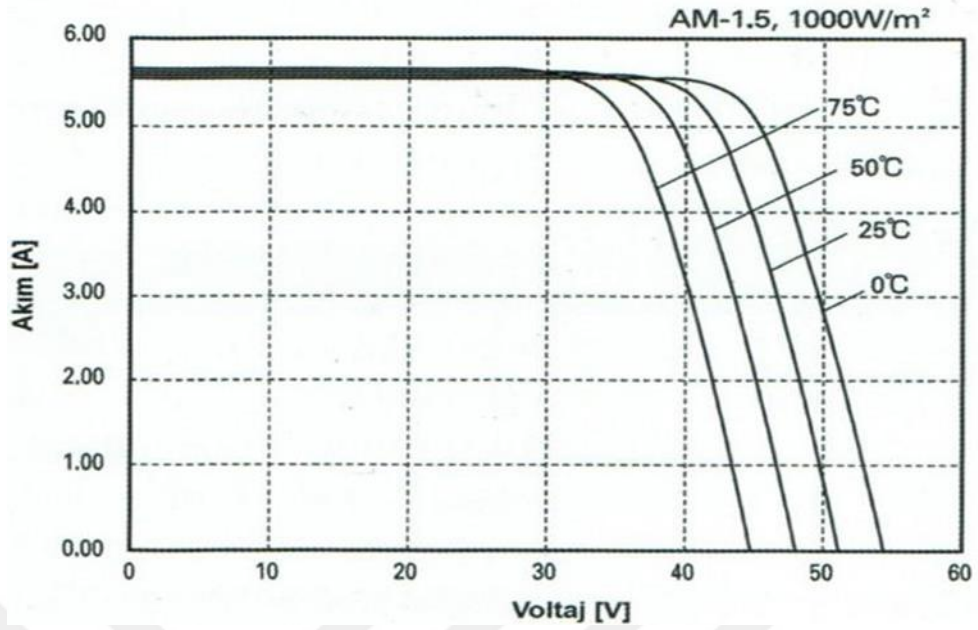
hücrelere oranla daha fazla etkilenirler. Bu nedenle daha fazla performans düşüklüğü gösterirler.

Sıcaklığın modül performansı üzerindeki etkisi esas olarak hem açık devre gerilimine hem de sıcaklıkla önemli ölçüde azalan dolgu oranına (bir güneş hücresi ve devresinde ne kadar seri direncin ve ne kadar az şönt direncinin olduğunun ölçüsü) yansıtılır. Bir FV modül tarafından üretilen elektrik gücü üzerindeki çalışma sıcaklığı etkisi, denklem 3.2’de gösterildiği gibi, sıcaklığın akım ve gerilim üzerindeki etkisi ile ilişkilendirilebilir [25]:

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} = (FF)I_{SC} * V_{OC} \quad (3.2)$$

Burada FF, I_{SC} ve V_{OC} sırasıyla dolgu oranı, kısa devre akımı ve açık devre gerilimini temsil eder. Sıcaklık artışından kaynaklanan güç kaybını belirleyen bir diğer önemli parametre ise güç sıcaklık katsayısıdır. Örneğin, monokristal güneş panelleri için tipik güç sıcaklık katsayıları % 0,38 ile % 0,45/°C arasındadır [41]. Bu da her 1 °C’lik sıcaklık artışıyla birlikte % 0,38 ile %0,45 güç kaybı olduğu anlamına gelir. Tablo 4.1’de ifade edildiği gibi, yaptığımız çalışmada seçilen güneş panelinin güç sıcaklık katsayısı % 0,38’dir.

Sıcaklığın FV hücrenin karakterizasyonu üzerindeki etkisini gösteren Şekil 3.20’de görüldüğü gibi, 25 °C sıcaklık 1000 W/m² güneş ışınımı ve 1,5 AM (hava kütlesi) olarak kabul edilen ideal test koşullarında, çalışma sıcaklığı arttıkça panel çıkış gerilimi büyük ölçüde düşerken panel çıkış akımı önemsiz ölçüde artar ve dolayısıyla çıkış gücü ve verimlik düşer.



Şekil 3.20. FV hücre akımı üzerine sıcaklığın etkisi [42]

Ortam ve çalışma sıcaklığının FV panelin elektrik özelliklerinin performansı üzerindeki etkisini incelemek için yapılan birçok araştırma vardır. Adak ve ark. yaptığı çalışmada, monokristalden yapılan FV hücrelerin, sıcaklığın çok yüksek olduğu ortamlarda polikristalden yapılanlardan daha yüksek verimliliğe sahip olduğu sonuçlarına ulaşmıştır [43]. Jehad Adeeb tarafından yapılan çalışmada ise, Amman şehrindeki (Ürdün) çalışma koşullarında sıcaklıkla ilgili farklı güneş pili teknolojilerinin performansının değişiklikleri incelenmiştir. Bu çalışmada ince film güneş panellerinin verim sıcaklık katsayısı ile % -0,0984 seviyesinde sıcaklıktan daha az etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Monokristal ve polikristal için verim sıcaklık katsayısı ise sırasıyla % -0,109 ve % -0,124'tür [44].

Dash ve Gupta [45] tarafından yapılan bir çalışmada, New Delh Solar Energy Center'ın FV test tesisinde, piyasada bulunan farklı tipteki güneş modüllerinin sıcaklık katsayıları test edilmiştir. Monokristal, polikristal, amorf silikon ve CdTe tabanlı modüller için akım & gerilim ortalama sıcaklık katsayıları sırasıyla % 0,032/°C & % -0,232/°C; % 0,0328/°C & % -0,16/°C; % 0,098/°C & % -0,294/°C ve % 0,0525/°C & % -0,239/°C olarak bulunmuştur. Aynı sırada ortalama sıcaklık güç katsayısının sırasıyla % -0,446/°C, % -0,387/°C, % -0,234/°C ve % -0,172/°C olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, monokristal silikon modülün sıcaklık katsayısının diğer güneş modüllerine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Yarı iletken enerji bant aralıkları genellikle sıcaklıkla azaldığından açık devre gerilimi ve dolgu oranı azalır. Kullanılan yarı iletkenin yasak bant aralığı (E_g) arttıkça, FV hücre tarafından soğurulan foton sayısı azalır. Bu yüzden, FV hücrede elde edilen akım değerinin yüksek olması için kullanılan yarı iletkenin yasak bant aralığı küçük olmalıdır. Bu şekilde, kullanılacak yarı iletkenin yasak bant aralığı için en uygun değeri bulma gereksinimi ortaya çıkar. Bunun için ideal verimin yasak bant aralığı ile değişimine bakılır. Bir FV hücrenin en yüksek verime sahip olabilmesi için, yapımında kullanılan yarı iletkenin 1,4 eV ile 1,6 eV değerinde yasak bant aralığına sahip olması gerekir [46].

Denklem 3.1’de ifade edildiği gibi, enerji bant aralığı oda sıcaklığında lineer, düşük sıcaklıklarda ise lineer olmayan bir şekilde değişir. Tablo 3.2’de silisyum güneş hücrelerinin sıcaklığa bağlı olarak parametrelerindeki değişimler gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Silisyum güneş hücrelerinin sıcaklığa bağlı olarak parametrelerindeki değişimler [47]

Sıcaklık-T (K)	Enerji bant aralığı - E_g (eV)	Gerilim-V(v)	Verimlilik- η (%)
273	1,1312	0,750	26,83
300	1,1245	0,699	24,67
323	1,1185	0,654	22,80
353	1,1104	0,595	20,33
373	1,1048	0,555	18,67

Artan sıcaklık güneş panelinin verimliliği üzerine negatif etkilerini önlemek için birçok yöntem vardır. Dorobanțu, L. ve Popescu, M.O tarafından yapılan deneysel bir çalışmada FV modülün soğutulması için panelin önünden ince bir su tabakası akıtılmıştır. Böylece FV modül çalışma sıcaklığı her iki tarafta da 15 °C – 16 °C düşmüştür. Bu durumda modül, su sıcaklığı 24 °C iken üretici tarafından önerilen optimum sıcaklık değerine (25 °C - 30 °C aralığı) ulaşmıştır. 15 °C - 16 °C'lik bir sıcaklık düşüşü, 1,5 v'luk bir gerilim artışı ve 0,2 A'lik bir akım düşüşü sağlamaktadır. Genel olarak, % 9,5'e eşit olan yaklaşık 3,5 W güç çıkışında bir artış görülmüştür [48].

FV modülün arkasında oluşan sıcaklık seviyesi ve panel havalandırmaları arasında doğrudan bir ilişki vardır. FV modülün arka tarafında havalandırmanın olmaması durumunda arka yüzeyde artan sıcaklık nedeniyle performans düşmektedir. Buna bağlı olarak, FV panelin arka yüzeyi ile montaj yüzeyi arasında bir hava boşluğu bırakılarak doğal havalandırma sağlanması istenmeyen sıcaklık etkilerini önlemektedir. Tablo 3.3’te kristal silikon modüllerden oluşan bir güneş panelin çatı ve cephe sistemi ile

bağlantılarında, arkasında havalandırma olup olmamasına bağlı olarak meydana gelen güç azalmalarına ilişkin bazı gösterge değerler verilmiştir [49].

Tablo 3.3. *Havalandırma durumuna göre panel verimliliği [49]*

Havalandırma durumu	Çatı	Cephe
İyi havalandırma	%2,1 (29 °C)	%3,9 (35 °C)
Zayıf havalandırma	%2,6 (32 °C)	%4,8 (39 °C)
Havalandırma olmayan	%5,4 (43 °C)	%8,9 (55 °C)

Bu değerler, ortam sıcaklığından 22 °C daha yüksek ve tamamen bağımsız bir FV dizinin güç çıkışı karşılaştırılarak belirlenmektedir. Tablo 3.3'te görüldüğü üzere havalandırma durumunda FV panelin arkasındaki ortalama sıcaklığın 29 °C olduğu, havalandırma olmaması durumunda 43 °C'ye çıkabileceği görülmektedir.

3.4.1.2. Gölgeleme

Güneş panellerinin çıkış gücü, gölgeleme etkisine maruz kalması durumunda düşmektedir. Panelin hücreleri seri olarak bağlı ve kablolanmış olduğundan, gölgeler (sadece gölgeli hücrelerde değil) tüm paneldeki akım akışını etkiler. Bu gölgeleme direkler, ağaçlar ve binalardan kaynaklanabileceği gibi diğer yapılar üzerindeki modül montaj yapılarından da kaynaklanabilmektedir. Doğrudan güneş modüllerinin üzerine düşebilecek yaprak, kuş ve kuş pislikleri de gölgelenmeye neden olabilir. Kısmi gölgelemenin neden olduğu kayıpları azaltmak için hücrelerin birkaç ara bağlantı şeması önerilmiştir. Çalışmalardan birinde, Quaschnig & Hanitsch [50] modül alanının sadece %2'si gölgeli olmasına rağmen performans kaybının % 70 olduğunu göstermiştir. Viitanen [51], dizinin %5 - %10'u gölgelenirse güç çıkışının % 80'in üzerinde azaltılabileceğini göstermiştir. Alonso-Garcia ve ark.tarafından yapılan bir çalışmada, aynı miktarda gölgeleme için, yalnızca gölgelenen hücrenin özellikleri değiştirilerek farklı güç kayıpları fark edilmiştir. Kayıplar % 59 ile % 73 arasında değişmiştir. Bu nedenle, gölgelemeden kaynaklanan kayıpların miktarı, hücrenin malzemesine, paneller arasındaki bağlantıya ve gölgeli hücrelerin yüzdesine de bağlıdır. Ayrıca, paneldeki gölgeler, yakındaki binaların yüksekliğine ve diğer panellerden veya ağaçlardan gelen gölgelerin bulunmasına bağlıdır [41].

3.4.1.3. Kirlenme (Tozlanma)

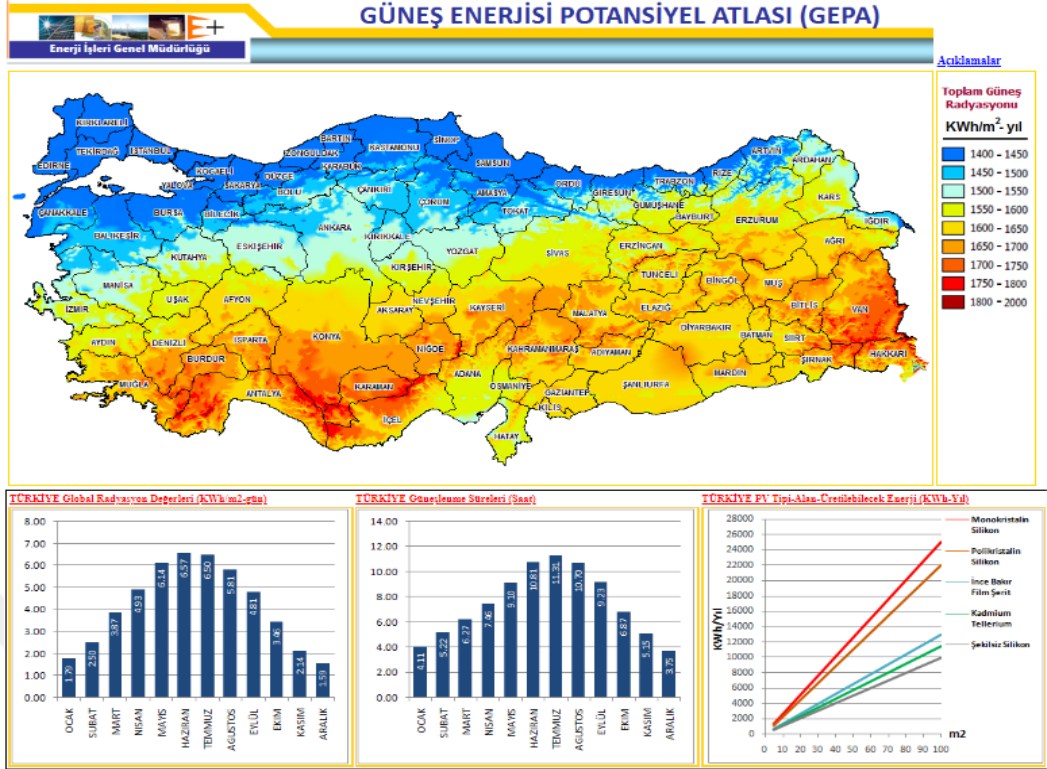
Bir FV modülde toz ve diğer kirleticilerin birikmesi o modül üzerinde ince bir tabaka oluşumuna yol açar. Toz 500 µm'den küçük çaplı katı parçacıkları temsil eder. Toz

yerleşimi, toz özellikleri (şekil, boyut, ağırlık), hava koşulları (yağmur, nem, kar), modül eğim açısı, yüzey ölçümü, rüzgâr hızı ve konumu (kıyı veya tozlu alan) gibi etkenlere bağlı bulunmaktadır. Özellikle eğimli bir modül altında, yüzeye nem ile toz yapışınca kalıcı kirlenme meydana gelebilir [52]. Tozun toplanması ve modül çerçevesi boyunca likenlerin büyümesi alt sıra hücrelerinde kısmi gölgeler oluşturur ve bu da zamanla kaplamaya zarar verebilir.

Güneş ışığının bir kısmı kir veya toz nedeniyle FV modülden engellenebilir ve bu da güneş ışınımının FV panelin yüzeyine dağılmasından dolayı üretilen güçte önemli miktarda kayıplara neden olur. Tipik bir yıllık toz azaltma faktörü %93 veya 0,93'tür, bu nedenle örnek olarak 100 W'lık bir modül alırsak, kir birikimi nedeniyle tipik olarak yaklaşık 93 W ($100 \times 0,93 = 93$ W) ile çalışır [41]. El-Shobokshy ve Hussein [53], 73 g/m^2 çimento tozu birikiminin FV kısa devre geriliminde % 80'lik bir düşüşle sonuçlandığını göstermiştir. Ayrıca, ortalama çapı $80 \text{ }\mu\text{m}$ olan atmosferik toz, 250 g/m^2 'de test edildi ve kısa devre akımını %82 oranında azalttığı bulunmuştur. Zaihidee ve ark. [53-54] tarafından yapılan bir çalışmada, güneş panelinde 20 g/m^2 toz birikmesi kısa devre akımını % 15 – % 21, açık devre gerilimini % 2 – % 6 ve verimliliği % 15 – % 35 oranında azaltmıştır.

3.4.1.4. Güneş ışıını

Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) tarafından sunulan verilere göre, Şekil 3.22, Türkiye'nin yılda 2741 saat ortalama güneşlenme süresine ve yılda 1527 kWh/m^2 gelen güneş enerjisine sahip olduğunu göstermektedir [3]. Şekil 3.21'de görüldüğü gibi Kuzey bölgelerden Güneye doğru gidildikçe güneşlenme potansiyeli artmaktadır. Karadeniz Bölgesi, coğrafi konumu ve yağmurlu gün sayısının fazla olması nedeniyle en az güneş ışıını alan bölgedir. Marmara ve Ege orta değerde ışıını alırken, Doğu Anadolu, İç Anadolu, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu yüksek değerde güneş ışıını alan bölgelerimizdir. Onun için bu bölgelerde güneş enerjisine yatırım yapmak daha verimli ve yatırım maliyetlerinin geri dönüş süresi diğer bölgelere göre daha kısadır.



Şekil 3.21. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası-GEPA [3]

Birim alan başına güneş kaynağından gelen güç miktarı güneş ışıınımı olarak bilinir. Bir FV modül tarafından üretilen enerji, doğrudan güneş enerjisinin bulunması ile ilgilidir ve sonuç olarak sahaya bağlıdır. Işınım genellikle hava ve güneşin gökyüzündeki konumuna göre değişiklik gösterir. Güneş ışıınları ile yatay düzlem arasındaki açı olan güneşin yüksekliğindeki değişiklikler nedeniyle güneşin konumu gün boyunca değişir. Bir yüzeye çarpan güneş ışıınımı, doğrudan, dağınık ve yansıyan radyasyondan oluşur. Güneş ışıınımının en büyük kısmı doğrudan bileşendir; ancak sistemin işleyişinin analizi sırasında hem dağınık hem de yansıyan radyasyon dikkate alınmalıdır. FV modüllerdeki güneş ışıınımı, modülün konumuna göre değişir; modüller doğrudan radyasyona dik olduğunda maksimum güneş ışıınımı gerçekleşir. Güneş ışıınımı arttıkça, FV panelden elektrik gücü çıkışı da artar. Modül akımı ve güneş ışıınımı arasındaki ilişki yaklaşık olarak doğrusaldır, buna karşın güneş ışıınımı artar, modül akımı da artar [41].

Işınım kayıpları, modülün eğim açısından kaynaklanan kazanç ve kaybı ortaya koyar. FV panel yüzeyini maruz kaldığı güneş radyasyonunun miktarı ne kadar çok olursa o kadar fazla elektrik üretecektir. Onun için modülün radyasyonundan kaynaklanan

kayıpların en aza indirilmesi, mükemmel bir güneş enerjisi sistemi tasarımı için önemli bir konudur.

3.4.2. FV sistem faktörleri

FV sistem bileşenleriyle ilgili çeşitli faktörler, genel sistemden gelen güç çıkışını etkileyebilir. Bu faktörler aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.4.2.1. Invertör verimliliği

Invertör, FV sistemin genel performansını etkiler. Diğer bir deyişle, şebekeye bağlı bir güneş sistemindeki eviricinin güç dönüştürme verimliliği (DC'den AC'ye dönüştürme sırasında yaşanan kayıpların bir ölçüsü) çok küçükse, FV dizisi tarafından üretilen güç, FV dizi tarafından üretilen çıkış gücü AC sistemine etkin bir şekilde gönderilmez. Bu nedenle, dönüşüm verimliliğini mümkün olduğunca maksimum olacak şekilde artırmak gereklidir. Gerçek alan koşulları genellikle, ortalama değer olarak %90 azaltma faktörü ile yaklaşık % 88 - %92 'lik genel DC-AC dönüşüm verimliliği ile sonuçlanır. Invertörlerden kaynaklanan kayıpların miktarının, kullanılan invertör tipine ve ayrıca transformatörlerin bulunmasına veya yokluğuna bağlı olduğu sonucuna varılabilir [55].

3.4.2.2. Pil verimliliği

Bir pilin batarya verimliliği (round-trip efficiency); depolayabildiği enerjinin ne kadarını kullanabileceğini gösteren bir göstergedir. Bağımsız sistemlerde, piller esas olarak FV sistem yükünü tamamen kapladığında veya yük gerekli olmadığında üretilen fazla elektrik enerjisini depolamak için kullanılır. Bir pilin verimliliği, deşarj sırasında çıkarılan şarjın (Ah) ilk şarj durumunu geri yüklemek için gereken şarj miktarına (Ah) oranıdır. Pil şarj ve deşarj verimliliği sabit değildir. Kullanılan pil tipine ve şarj cihazına göre değişkenlik gösterir. Viitanen [51] tarafından yapılan bir çalışmada, şarj verimliliğinin %0 - %84 şarj durumu (SoC) arasında %91, %79 - %84 SoC arasında %55 ve %90'ın üzerindeki SoC seviyelerinde %50'den düşük olduğu bulunmuştur. Bu, pilin SoC'sinin tipik olarak yüksek olduğu güneşli koşullarda, üretilen enerjinin büyük bir kısmının pillerde depolanması durumunda kayıplara gidebileceği anlamına gelir.

3.4.2.3. Güneş panel yapısı

Güneş panelinin yapısı, güç çıkışını büyük ölçüde etkiler. Bu yapı, panelin yapıldığı malzemeyi, atomik yapısını ve kullanılan malzemenin bant aralığı enerjisini içerebilir. FV malzemesinin seçiminin sistem tasarımı ve performansı üzerinde önemli etkileri olur.

FV malzemeleri arasında silikon, galyum arsenit (GaAs), bakır indiyum diselenid (CuInSe₂), kadmiyum tellürid (CdTe), fosfit ve benzeri malzemeler içerir. Bu malzemelerin herbiri farklı hücre verimliliği ve farklı panel maliyeti meydana getirir. Monokristal hücrelerin dönüşüm verimliliği genellikle polikristal hücrelerinkinden daha yüksektir; yani, monokristal olanlar için %16 – %22 ve polikristal olanlar için %14 – %18'dir. Kristal silisyum hücreler, mevcut ticari güneş hücresi teknolojileri arasında en verimli olanıdır, ancak diğer teknolojilere kıyasla nispeten daha fazla miktarda ham maddeye ihtiyaç duyarlar ve bu da maliyetlerini artırır. Bir FV hücrenin atomik yapısı monokristal, polikristal, amorf veya nano olabilir. Monokristal hücrelerin en önemli avantajı, tipik olarak yaklaşık %15 olan yüksek verimlilikleridir, ancak bunların üretim süreçleri karmaşık ve maliyetleri daha yüksektir. Polikristal hücreler daha ekonomik ve ortalama verimleri yaklaşık %12 civarındadır. Amorf, çeşitli substratlar üzerinde biriktirilebilir, ancak verimlilik oranı %6'dır. Böylece FV panelin atomik yapısı, maliyetinin yanı sıra verimliliğini de etkiler. Güneş ışığı fotonları FV panelin yüzeyine çarptığında, belirli bir minimum enerji seviyesine sahip fotonlar, bir elektrik akımı üretmek için elektronları atomik bağlarından serbest bırakabilir. Bant aralığı enerjisi, her malzeme için ve aynı malzemenin her atomik yapısı için farklıdır. Kristal silisyum için bant aralığı enerjisi 1,1 elektron voltur (eV). Diğer FV hücre malzemeleri, 1 ila 3,3 eV arasında değişen bant aralığı enerjilerine sahiptir [41].

3.4.3. FV sistem kurulum faktörleri

Bir güneş panelinin performansını etkileyebilecek en önemli faktörler, güneş enerjisi sisteminin nasıl kurulduğu ve onun bileşenleriyle ilgilidir. Bu faktörlerin bazıları: eğim açısı ve yönelme açısı, güneş takibi, uyumsuzluk ve kablolardır.

3.4.3.1. Güneş panellerinin eğim açısı veazimut açısı

FV panellerden günlük ve aylık enerji üretimi, modül yönelim açısından önemli bir şekilde etkilenir. Güneş modülüne çarpan güneş ışığının geliş açısına göre değişen bazı optik kayıplar vardır. Güneş ışınımının doğrudan bileşeni geliş açısından etkilenirken, dağınık bileşen modül oryantasyonundan neredeyse bağımsızdır. Bir güneş paneli, yüzeyi güneş ışınlarına dik olduğunda güneş ışınımını en verimli şekilde kullanır. Paneller sabit bir eğim açısıyla kurulursa, yıllık optimum eğim açısı kurulum yapılan bölgenin enlemiyle aynı olmalıdır. Ancak, bu kural 45°'nin üzerindeki enlemlerde çok iyi çalışmaz [41].

Kaddoura ve ark. [56], MATLAB yazılımı kullanarak güneş ışınlamını maksimize etmiş ve optimum eğim açısını hesaplamıştır. Sonuçlar, eğim açıları yılda altı kez ayarlandığında güneş radyasyonunun % 99,5'inin alındığını göstermiştir. Bu nedenle, güneş panellerinin eğim açısı konuma bağlıdır ve dolayısıyla bölgeden bölgeye değişir. Kollektörün oryantasyonu, azimut ve eğim açıları ile tanımlanır. Genellikle kuzey yarımkürede kurulan sistemler güneye doğru yönlendirilir ve belirli bir eğim açısıyla ayarlanır.

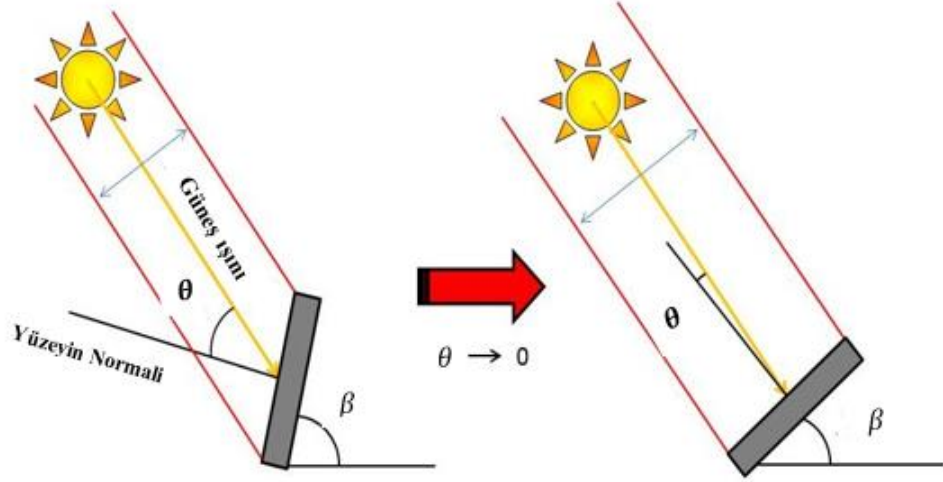
Pavlović ve ark. [57] tarafından yapılan bir deneyde, NIŞ/SERBIA'de kurulan 55 W-güneş modülü Doğu, Güney ve Batı'ya doğru yönlendirilmiş ve 0°, 30°, 45°, 60° ve 90° açılara yerleştirilmiştir. Bu konumlarda akım, gerilim, güç ve güneş ışınlam şiddeti değerleri ölçülmüştür. Optimum konumlar, maksimum güneş şiddeti ve maksimum güç değerlerinin kaydedildiği konumlar olarak belirlenmiştir. Bu çalışma [57], güneye doğru yönlendirilen güneş modülünün, maksimum kayıtlı değer olan 30° açısı için en fazla elektrik enerjisi değerini (219,81 Wh) verdiğini, dolayısıyla güneş modülü için ağustos ayındaki optimum sabit konumu temsil ettiğini belirlemiştir.

3.4.3.2. Sabit veya takip mekanizması

Son yıllarda güneş enerjisi sistemlerinin yaygınlaşması ile birlikte, bu sistemlerin verimini artırmak için yapılan uygulamalara da büyük önem verilmektedir. Şekil 3.23'te gösterildiği üzere, FV modüllerin üzerine düşen güneş ışınlam değeri, güneş ışığının FV modüllerinin normali ile yaptığı (Denklem 3.2) açının kosinüsü ($\cos \theta$) ile hesaplanmaktadır. Diğer bir deyişle güneş ışığı modüllerin üzerine dik açıyla gelmesi durumunda üretim azami olmaktadır. Bu nedenle, güneşi takip ederek güneş ışınlarını devamlı dik alınmasını sağlayan bir sistemin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

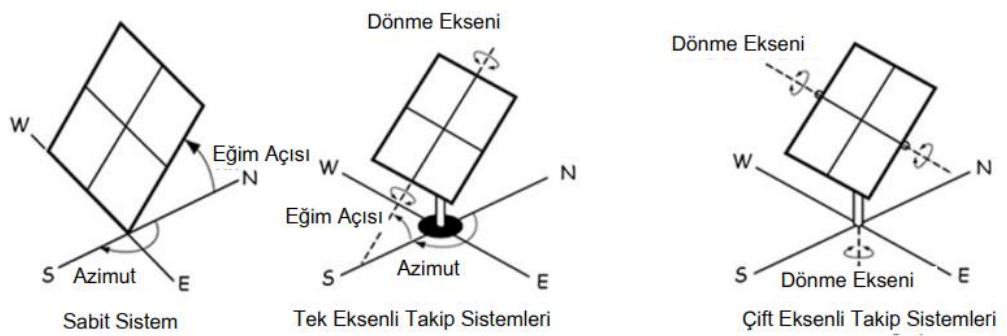
$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varnothing \cos \beta - \sin \delta \cos \varnothing \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varnothing \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varnothing \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (3.3)$$

Burada $\varnothing$, β ve γ sırasıyla enlem açısı, eğim açısı ve yüzeyin dikinin yatay düzlemdeki iz düşümü ile güney doğrultusundaki ve $-180 \leq \gamma \leq 180$ değer alan yüzey azimut açısını temsil etmektedir [58]. Güneye yönlendirilmiş panellerde azimut açısı 0°, doğu için -90° ve batı için 90°'dir.



Şekil 3.22. Geliş açısının ve kollektörün eğim açısı [59]

Şekil 3.22’de gösterildiği gibi, güneş ışıının şiddetinin alması için güneş ışıınının $\theta = 0^\circ$ olması gerekir. Şekil 3.23’te gösterildiği gibi güneş takip sistemi, tek eksenli veya çift eksenli tipte olabilir. Viitanen [51] tarafından yapılan çalışmalardan birinde, çift eksenli izleme sistemine sahip panellerin, sabit optimum eğim açısına monte edilen panellerden % 25 – % 45 daha fazla güç ürettiğini saptanmıştır. Bununla birlikte, bulutlu koşullarda, güneş radyasyonu izotropik olarak dağıldığı için izleme sisteminin verimliliği azalmaktadır.



Şekil 3.23. Sabit, tek eksenli ve çift eksenli takip mekanizmaları [41]

Sungur [60] tarafından sunulan çalışmalardan birinde, bulutlu koşullarda 2 eksenli güneş takip sistemine kıyasla, yatay bir güneş modülünden % 50 daha fazla güç üretilmiştir. Abdallah ve Nijmeh [61] tarafından yapılan bir çalışmada, iki eksenli izleme FV paneli için sabit panele kıyasla enerji çıkışında %41,34 artış olduğu bulunmuştur.

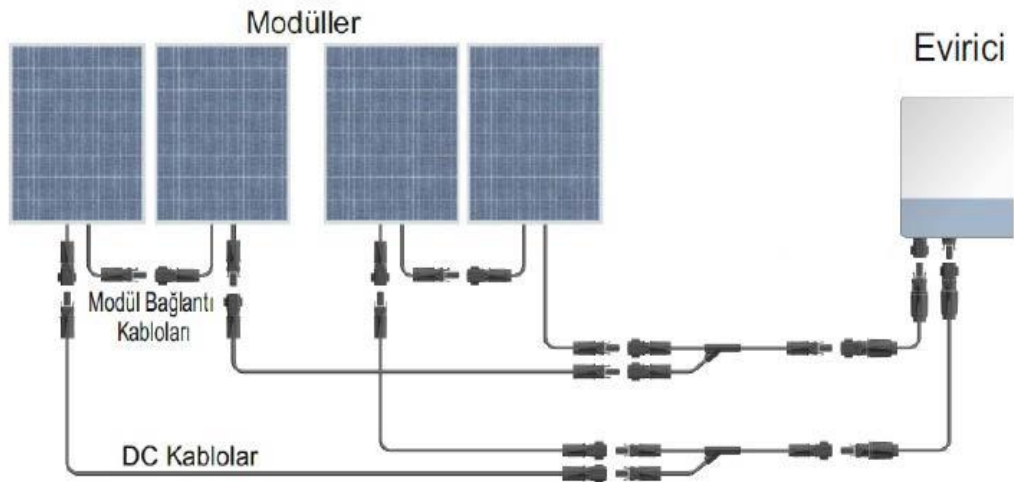
Güneş izleme sisteminin maliyetini artırdığından, bir izleme mekanizması kullanmanın ilk yatırıma bağlı olduğu sonucuna varılabilir. Aşırı sıcak havalarda, güneş takibi, aşırı ısınmaya ve dolayısıyla panelden güç kaybına neden olabileceğinden, bu konunun konum ve hava koşullarına bağlı olarak değerlendirilmesi gerekir.

3.4.3.3. Uyumsuzluk kayıpları

Uyumsuzluk kayıpları, özellikle ortak özelliği olmayan veya birbirinden farklı koşullara maruz kalan güneş modüllerinin seri ve paralel bağlanmasından kaynaklanmaktadır. Uyumsuzlukla ilgili en ciddi sorunlardan biri, tüm FV dizisinin çıktısının en düşük çıktıya sahip güneş modülü tarafından belirlenmesidir [54-55]. Dizi performansları, diziyi oluşturan modüllerin varyasyon derecesine, güneş modüllerini oluşturan güneş pillerine ve ayrıca güneş modüllerinin seri ve paralel bağlantılarına bağlıdır. Modül uyumsuzluğu, sistem gücünde en az %2'lik bir kayba neden olur ve bazen bu kayıp % 10'a kadar ulaşabilir (ortalama kayıp % 6'dır) [62].

3.4.3.4. Kablo özellikleri

Şekil 3.24 FV modülden elde edilen enerjiyi eviricilere taşıyan DC kablolar göstermektedir. FV sistemi kablolamak için kullanılan kabloların, çalışmalarının beklenebileceği aşırı ortam koşullarına, gerilime ve akım koşullarına dayanabilmelerini sağlamak için dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir. Ayrıca dizi, dönüştürücü, piller ve diğer bileşenler arasındaki kablolarda tüketilen güç vardır. Bu kayıpların mümkün olduğu kadar minimumda tutulması gerekir, ancak % 3'ün altında tutmak zordur. Bu kayıplar için ortalama bir azaltma faktörü % 95'tir [41].



Şekil 3.24. Modül bağlantıları ve DC kabloları [30]

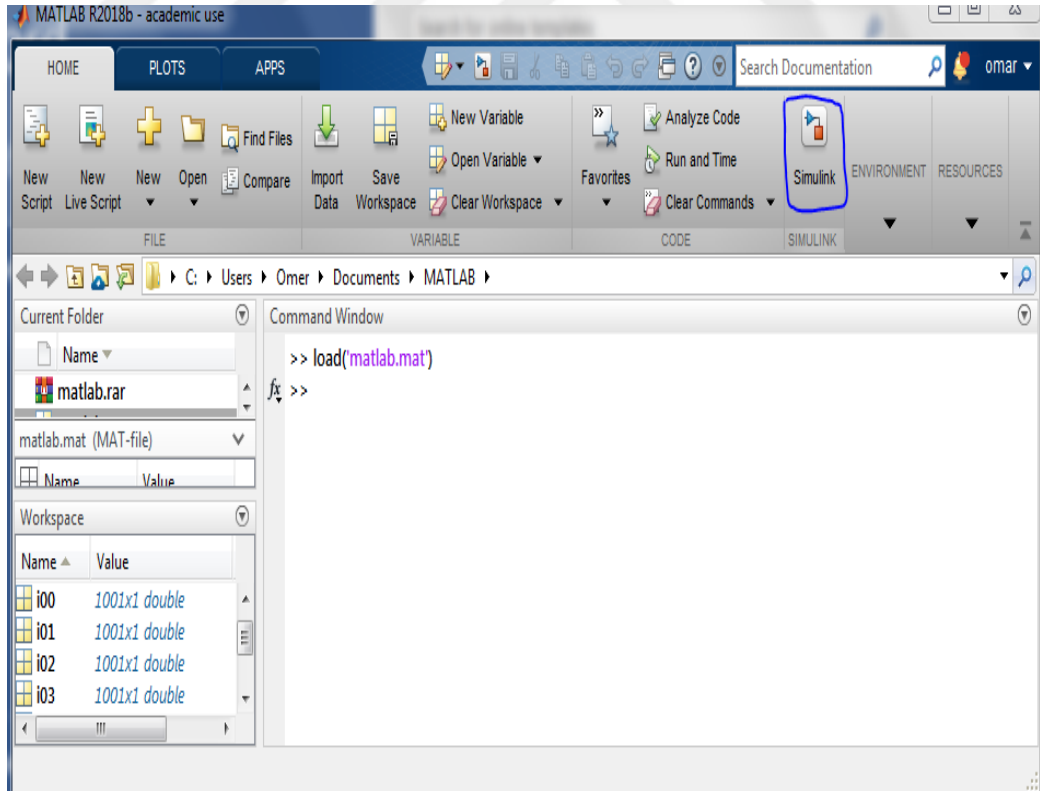
Bu çalışmada, güneş ışınımı/eğim açısı ve panel sıcaklığı faktörleri aşağıdaki belirtilen nedenlerden dolayı incelenmek üzere seçilmiştir:

Güneş radyasyonu, güneş panelinin kurulumu ve çalışma sıcaklığının faktörleri konuma bağlıdır ve bölgeden bölgeye değişir. Dolayısıyla bu alışma, FV sistem çıktısının tahmin edilmesinde bir rehber sunmayı amaçlamaktadır. Araştırmacı gelecekte yoğun çalışmalar yapmayı ve güneş panellerinin verimliliğini artırmaya yönelik projeler yapmayı hedeflemektedir. Böylece, seçilen iki faktörü incelemek, araştırmacının güneş hücrelerinin nasıl çalıştığını anlamasını sağlamaktadır. Uyumsuzluk, kablo özellikleri, ak verimliliği, invertör verimliliği gibi faktörlerin alandaki uzmanlar ve teknik personel tarafından daha detaylı olarak teknik değerlendirmeye tabi tutulması gerekmektedir.

4. FOTOVOLTAİK MODÜLÜN MATLAB İLE MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

4.1. MATLAB Yazılımı

MATLAB, 1984 yılında kurulan MathWorks Firması tarafından oluşturulan yüksek performanslı bir teknik programlama dilidir. MATLAB® (MATrix LABoratory – Matris Laboratuvarı), genel olarak teknik ve bilimsel hesaplamalar için kullanılmaktadır. MATLAB, matematik-istatistik, neural network, fuzzy, uzay araştırmaları, işaret ve görüntü işleme, optimizasyon, yöneylem çalışmaları, kontrol tasarımları, finans ve tıbbi araştırmalar gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. MATLAB, mühendislik ve araştırma alanlarında karşılaşılan problemlere hızlı ve pratik sonuçlar sunması sebebiyle tüm dünyada üniversiteler başta olmak üzere binlerce devlet, endüstri ve akademik kurumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [63]. Matlab Simulink görsel yazılımının, sayısal ifadeler ve formüller yazarken, bu ifadeleri oluşturan sistemlerin modellenmesinde ve diğer sistemlerle birleştirilmesinde oldukça kolaylık sağladığı için benzetim programı olarak tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. MATLAB masaüstü

Bu çalışmada çok alanlı simülasyon ve model tabanlı tasarım için bir blok diyagram ortamı olarak tanımlanan Matlab Simulink kullanılmıştır. Simulink; Grafik tasarım, simülasyon ve dinamik sistemleri analiz eden MATLAB programının bir uzantısıdır.

4.2. Seçilmiş Güneş Panelinin Teknik Özellikleri

En yaygın olan ve teknik özellikleri Tablo 4.1'de verilen 285Wp Mono-Panel, Matlab Simulink ile modellenmek üzere çalışma örneği olarak seçilmiştir. Tablo 4.1'de gösterilen veriler, standart test koşulları altında ölçülmüştür: 1000 W/m² güneş ışıınımı, (AM 1,5) hava kütlesi, 25 °C hücre sıcaklığıdır. Nominal Test Koşulları ise: 800 W/m² güneş ışıınımı, 20 °C ortam sıcaklığı ve 1m/s rüzgâr hızıdır.

Tablo 4.1. 285W Mono FV panelin elektrik özellikleri verileri [64,65]

Parametre	Değer
Maksimum Çıkış Gücü (P_{max})	285 W
Modül Verimliliği (η)	%17,38
Maksimum Güç Gerilimi (V_{mp})	32,77 v
Maksimum Güç Akımı (I_{mp})	8,73 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	38,46 v
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	9,24 A
Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (K_i)	0,055 %/°C = 0,0051 A/°C
Açık Devre Geriliminin sıcaklık katsayısı (K_v)	-0,29 %/°C = -0,11 v/°C
Gücün sıcaklık katsayısı (K_p)	-0,38 %/°C = -1,1 W/°C
Seri Hücre Sayısı (N_s)	60
Paralel Hücre Sayısı (N_p)	1
İdealite Faktörü (n)	1,2
Boltzmann Sabiti (K)	$1,381 \times 10^{-23} (J/^{\circ}K)$
Elektron yükü (q)	$1,60210^{-19} (c)$

4.3. Modellenme ve Simulasyon

4.3.1. Eğimli yüzeye gelen güneş ışıınım şiddeti (G_i)

Bir gün boyunca maksimum güneş ışıınım şiddeti, güneşin en tepede olduğu öğlen vaktinde meydana gelir. Böylece denklem 4.1 kullanılarak, belirli bir günde (N=1) ve konumda ($\emptyset$) öğle saatinde direkt güneş ışıınlarının yatay düzlem ile yaptığı açı olarak tanımlanan (α) güneş yükseklik açısı;

$$\alpha = 90 - \emptyset + \delta \quad (4.1)$$

formülü ile bulunmaktadır [66]. Burada, $\emptyset$, ekvator düzlemi ile yerden dünyanın merkezine olan radyal çizgi arasındaki açı olarak tanımlanan enlem açısıdır. Enlem kuzey

yarım küre için artı değerli olup -90° ile 90° arasında değişir. Ankara'nın enlem acısının değeri ($\emptyset$) $39^\circ 96'$ Kuzeydir. δ , güneşin doğrultusu ile ekvator düzlemi arasındaki açı miktarıdır olarak ifade edilen deklinasyon açısını temsil etmektedir. Deklinasyon açısı δ [$^\circ$] aşağıdaki denkleme göre yıl boyunca değişir [66]:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} \times (284 + N) \right] \quad (4.2)$$

Burada N , bu çalışmadaki 1'e eşit (1 Ocak) olarak varsayılan yılın günüdür. Bu çalışmada Schwartz modeli, Ankara ilinde ve yılın birinci gününde çeşitli eğim açıları ile kurulan FV panele düşen maksimum güneş ışıyım şiddetini hesaplamak için kullanılmıştır. Al-Sayyab ve ark. [66], Basra şehrinde bulunabilecek bir FV panelin eğim açısının varyasyonunun üretilen gücüne etkilerini değerlendirmek ve yıllık optimal eğim açısını tespit etmek için Matlab R218a ile Schwartz modelini (Denklemler:4.3:4.7) kullanarak modellemişlerdir. Eğim açısı 0° ile 90° arasında değişerek bu model deneysel bir test düzeneği kullanılarak kontrol edilmiş ve sonuçlar, bu modelin optimum eğim açısını tespit etmek için daha doğru olduğunu ve Basra şehrinde ($30^\circ 30'$ Kuzey enlem) bulunabilecek bir FV hücrenin optimum yıllık eğim açısının 28° 'ye eşit olduğunu göstermektedir.

Açık gökyüzü koşullarında yatay yüzeye direkt güneş ışıyım şiddeti I_D (W/m^2) ve herhangi bir gökyüzü koşulu için difüz güneş ışıyım şiddeti D_H (W/m^2), Schwartz modeli kullanarak hesaplaşmıştır [66].

$$I_D = 1230 * e^{\left[\frac{-1}{3.8 \sin(\alpha + 1.6)} \right]} \quad (4.3)$$

$$D_H = 125(\sin(\alpha))^{0.4} \quad (4.4)$$

Burada, α Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için yılın birinci gününde güneş yüksekliğini temsil eder. Yatay düzlem tarafından alınan toplam güneş ışıyım şiddeti G_H (W/m^2) şu şekilde hesaplanır [66]:

$$G_H = D_H + I_D \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

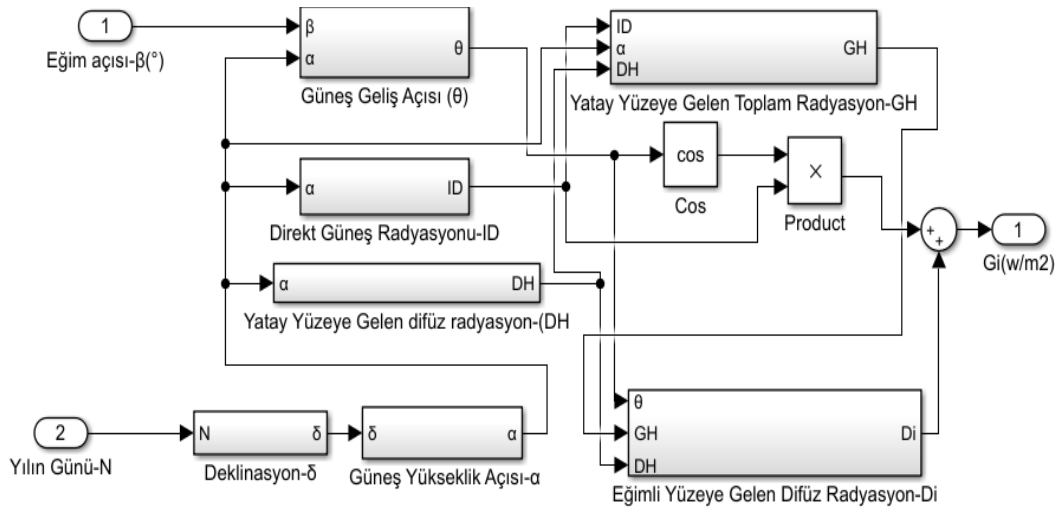
Eğimli yüzeye gelen difüz güneş ışıyım şiddetini D_i (W/m^2) ve toplam güneş ışıyım şiddeti G_i (W/m^2) şu şekilde hesaplanır [66]:

$$D_i = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} D_H + \frac{1 - \cos(\beta)}{2} G_H * \rho \quad (4.6)$$

$$G_i = I_D * \cos(\theta) + D_i \quad (4.7)$$

Burada, genellikle 0,2'ye eşit olan ρ , FV panellerin önündeki toprağın yansım katsayısını temsil etmektedir. θ ve β , ise sırasıyla güneş geliş açısı ve panelin eğim açısıdır [22].

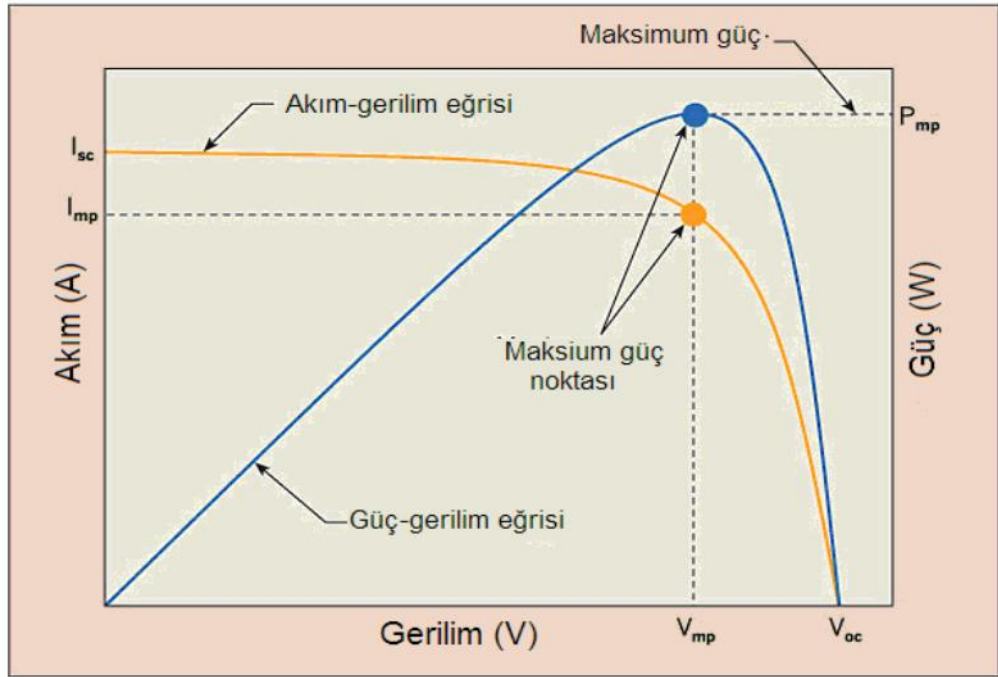
Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, denklemler (4.1: 4.7), belirli bir zamanda, kuzey yarımkürenin bulunduğu yere ve eğim açısına monte edilmiş herhangi bir toplayıcı tarafından alınan maksimum anlık güneş radyasyonunu hesaplamak için Matlab Simulink kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 4.2. Eğimli yüzeye gelen güneş ışıınımı şiddetine G_i (W/m^2) ait Matlab Simulink modeli

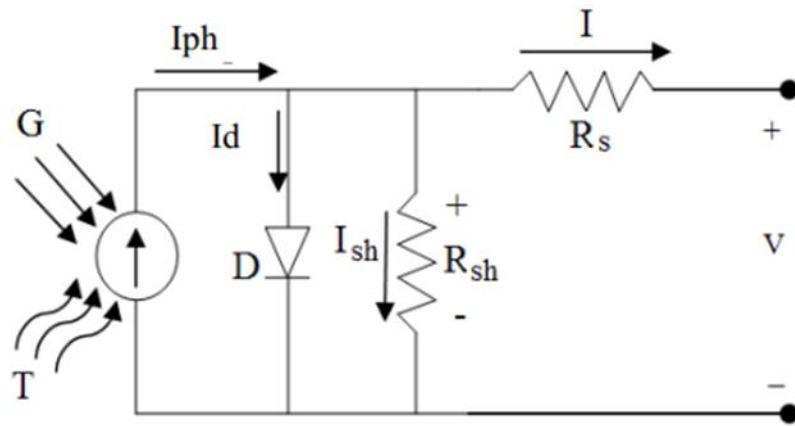
4.3.2. Güneş hücresinin tek diyoftlu eşdeğer devresi

Üretici tarafından belirtilen FV modül güç-gerilim karakteristiğinin maksimum güç noktası değeri, 25 °C modül sıcaklığı ve 1000 W/m^2 ışıınım olan standart test koşullarında (STK) belirlenir. Ancak belirli bir yerdeki sıcaklık ve güneş radyasyonu sürekli değişimlerinden, bu elektriksel özelliklerin değerleri olumlu veya olumsuz yönde etkilenir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, güneş panel performansı genellikle kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), gücün maksimum noktası (P_{max}), dolgu oranı (FF) ve dönüşüm verimi (η) olmak üzeri beş parametre ile karakterize edilmektedir. Bu bölümde, yukarıda bahsedilen elektriksel parametrelerin çalışma sıcaklığı ve güneş paneli yüzeyine gelen güneş radyasyonu miktarına panel eğim açısının etkileri incelenecektir.



Şekil 4.3. FV hücrenin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) özellikleri [25]

Bir FV hücrenin elektronik davranışının anlaşılması için, davranışları iyi bilinen farklı elektrik bileşenler kullanılarak elektriksel eşdeğer devresinin elde edilmesi gerekir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, ideal bir FV hücre, paralel bir akım kaynağı ve bir diyot kullanılarak modellenilebilir. Güneş ışınımı şiddeti (G_i) ile doğru orantılı olan fotoelektrik akımı (I_{ph}) oluşturulur. Pratikte hiçbir ideal güneş hücresi olmadığı için iki direnç (biri seri ve biri paralel) eklenir [67].



Şekil 4.4. Güneş hücrelerinin eşdeğer devresi [68]

Şekil 4.4'teki gösterilen modele Kirchhoff'un akımlar kanunu uygulanarak, güneş hücresinin çıkış gücü, aşağıdaki gibi ifade edilebilir [68]:

$$\begin{aligned}
I &= I_{ph} - I_d - I_{sh} \\
&= I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{nKT_c} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

İdeal bir durum için, seri direnci çok küçüktür (Yani: $R_s \cong 0 \Omega$) ve şönt direnci çok büyük ($R_{sh} = \infty$) olduğu için denklem 4.8'in son bölümü ihmal edilebilir. Seri ve paralel olarak bağlanan, ayırt edilemez, tekdüze, eş değer ışıyım ve sıcaklık altında olan hücreleri içeren bir FV modül için:

$$\begin{aligned}
I_{modül} &= N_p * I_{hücre} \\
\text{ve } V_{modül} &= N_s * V_{hücre}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Bu çalışmadaki seçilen FV modül için seri bağlanan hücreler ($N_p = 1$), paralel bağlanan hücreler ($N_s = 60$) ve FV modülün çıkış akımı (I):

$$\begin{aligned}
I &= N_p I_{ph} - N_p I_s \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{N_s n K T_c} \right)} - 1 \right] \\
&= I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{N_s n K T_c} \right)} - 1 \right]
\end{aligned} \tag{4.10}$$

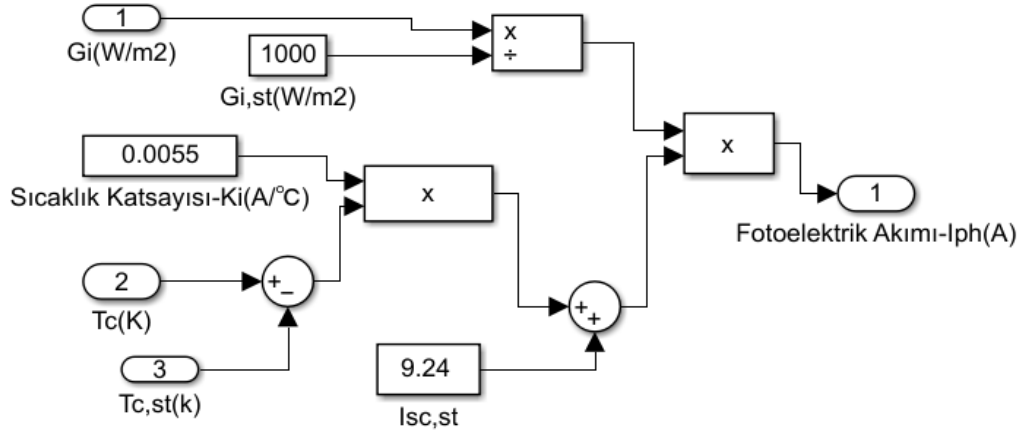
formülü ile hesaplanır [67]. Burada I , yük direnci üzerinden geçen akımı (çıkış akımı); V , çıkış gerilimi bilinmeyenleri; I_{ph} , fotonlar tarafından üretilen akımı; I_s , satürasyon akımı; n , idealite faktörü; K , boltzmann sabiti ve T_c , güneş hücrenin çalışma sıcaklığı olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki denklemi çözmek için hesaplanacak dört parametre vardır: I_{ph} , I_s , n ve R_s . Bu çalışmada ideal bir silikon hücre için idealite faktörü $n = 1,2$ ve seri direnci $R_s = 1,1 \Omega$ 'dur [64].

4.3.2.1. Fotoelektrik akımı (I_{ph})

Fotoelektrik akımının (I_{ph}), güneş hücre çalışma sıcaklığına (T_c) ve güneş ışıyım şiddetine (G_i) bağlı ifadesi denklem 4.11'de verilmektedir [68-69].

$$\begin{aligned}
I_{ph} &= [I_{ph,st} + K_i(T_c - T_{st})] \times G_i / G_{st} \quad , \quad I_{ph,st} = I_{sc,st} \\
&= [I_{sc,st} + K_i(T_c - 25)] \times G_i / 1000
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Burada, $I_{ph,st}$, $I_{sc,st}$, K_i , T_c , T_{st} ve G_i sırasıyla standart şartlar altında fotoelektrik akımı, standart koşulların altında kısa devre akımı, kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (bu çalışmada $K_i = 0,005$ (A/°C), güneş hücresinin çalışma sıcaklığı (K), referans sıcaklığını (standart olarak 293 K) ve güneş ışıyımını temsil etmektedir.



Şekil 4.5. Fotoelektrik akımına (I_{ph}) ait Matlab Simulink modeli

Fotoelektrik akımı (I_{ph}), denklem 4.11'e göre Matlab Simulink kullanılarak modellenmiştir. Bu alt sistemin çıkış bloğu Amper cinsinden fotoelektrik akımı I_{ph} iken, gridileri, 1000 W/m^2 değeriyle ışıınım, $9,24 \text{ A}$ değeriyle kısa devre akımı $I_{sc,st}$, standart sıcaklık $T_{c,st} \text{ (K)}$ ve çalışma sıcaklığı $T_c \text{ (K)}$ 'dir.

4.3.2.2. Satürasyon akımı (I_s)

Denklem 4.12'de ifade edildiği gibi, panel satürasyon akımı, ortam sıcaklığı ve ışık şiddetine bağlanan hücre sıcaklığına göre değişir [70]:

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T_c}{T_{st}} \right]^3 e^{\left\{ \frac{q * E_g \left(\frac{1}{T_{st}} - \frac{1}{T_c} \right)}{N_s n K} \right\}} \quad (4.12)$$

Burada, I_{rs} ve E_g , ters satürasyon akımı ve enerji bant aralığını temsil eder.

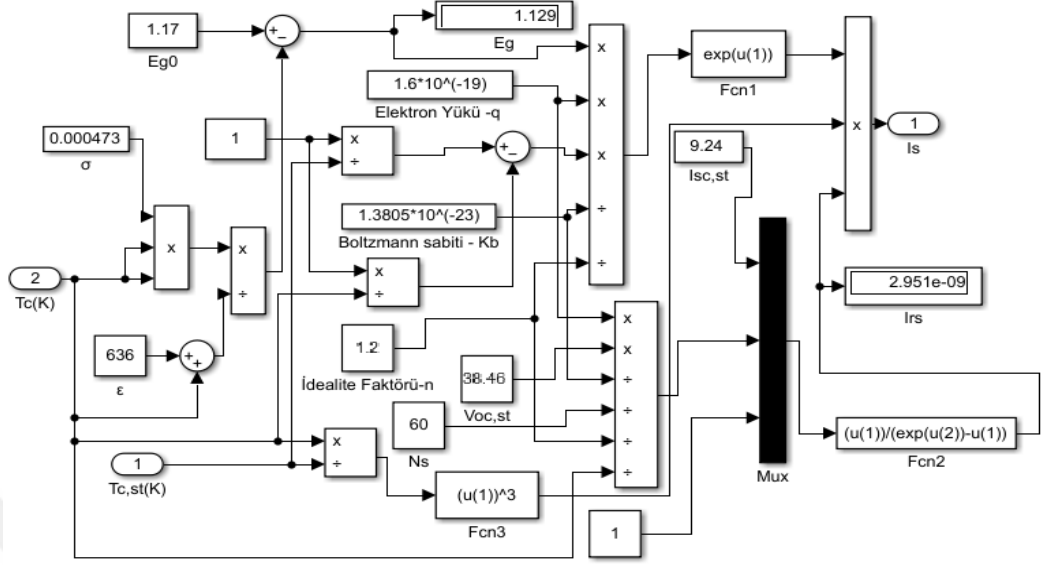
4.3.2.3. Ters satürasyon akımı (I_{rs})

Ters satürasyon akımı yaklaşık olarak şu şekilde elde edilebilir [51]:

$$I_{rs} = I_{scr} / \left[e^{(q V_{oc} / N_s k n T_c)} - 1 \right] \quad (4.13)$$

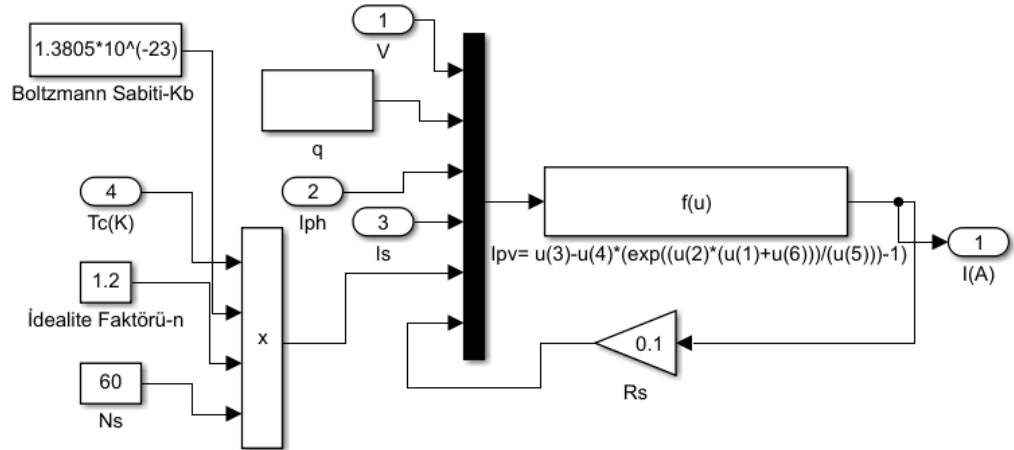
Burada, q ve V_{oc} , sırasıyla elektrik yükü ve açık devre gerilimi temsil etmektedir. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, denklem 4.14'e göre, satürasyon akımı, Matlab Simulink kullanılarak modellenmiştir.

$$I_s = \left\{ I_{scr} / \left[e^{(q V_{oc} / N_s k n T_c)} - 1 \right] \right\} \left[\frac{T_c}{T_{st}} \right]^3 e^{\left\{ \frac{q * \left(E_{g0} - \frac{\alpha * T_c^2}{T + \beta} \right) \left(\frac{1}{T_{st}} - \frac{1}{T_c} \right)}{n N_s K} \right\}} \quad (4.14)$$



Şekil 4.6. Satürasyon akımına (I_s) ait Matlab Simulink modeli

Bu alt sistem (N_s , $V_{oc,st}$ ve $I_{sc,st}$) gibi birçok sabit bloklar; ($T_c(K)$ ve $T_{st}(K)$) gibi giriş blokları ve (çarpım ve ekleme) gibi matematiksel işleme bloklarından oluşur. Ayrıca giriş veya matematiksel işlem değerini gösteren (E_g ve I_{rs}) iki blok ve çıkış bloğu I_s vardır. Denklem 4.10 : 4.14'e göre çıkış akımı, Şekil 4.7'de görüldüğü gibi modellenmiş ve simüle edilmiştir.



Şekil 4.7. Panel çıkış akımına (I) ait Matlab Simulink modeli

Çıkış geriliminin değerinin simülasyonu zamanla 0 volt ile 44 volt arasında değiştiği “Repeating Sequence” bloğunu kullanılmıştır. Panelin çıkış gücü ise (P) şu şekilde hesaplanır [43]:

$$P = V * I \quad (4.15)$$

4.3.3. Kısa devre akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı, FV hücre üzerindeki gerilim sıfır olduğunda FV hücre içinden geçen akımdır. Kısa devre akımı (I_{sc}), güneş hücresi elektrotlarının kısa devre edildiğinde, harici devre üzerinden akan akımdır. İdeal güneş hücrelerinde (I_{sc}), ışınlama yaratılan fotoelektrik akımı (I_{ph})'ye eşit kabul edilir. Denklem 4.10'a göre kısa devre akımı (I_{sc})

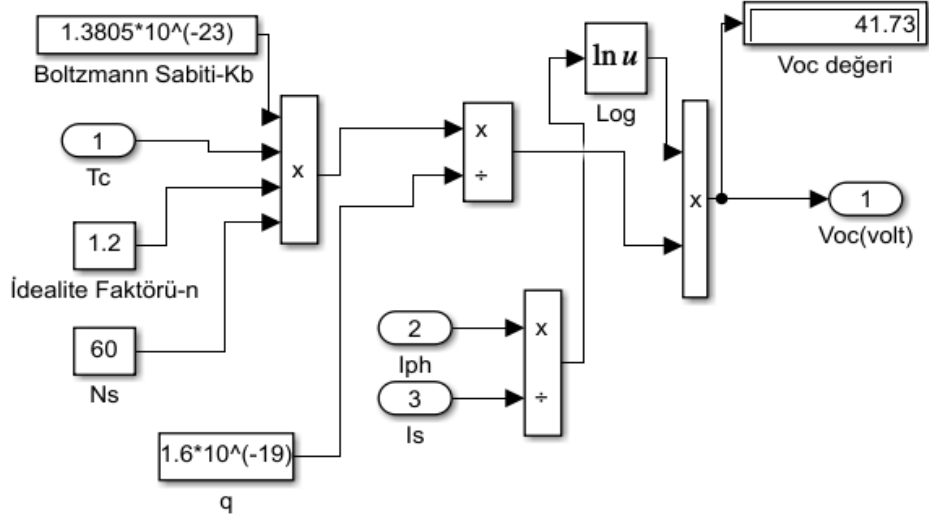
$$I_{sc} = I(V = 0) = I_{ph} - I_s \quad (4.16)$$

formülü ile hesaplanır [70]. Bir güneş hücresinin kısa devre akımı, gelen ışığın spektrumu ile belirlenen FV hücreye düşen ışınlam şiddetine bağlı olmaktadır. FV hücre sıcaklığı arttıkça, I_{sc} da artar. Bu durumda, FV hücre enerji bant aralığı (4×10^{-4} eV/°C - 5.6×10^{-4} eV/°C) oranında küçülmektedir. Böylece daha fazla sayıda elektron değerlik kuşağından iletim kuşağına kolayca hareket edebilmektedir. Denklem 4.11, 4.14 ve 4.16'dan anlaşıldığı üzere kısa devre akımı, büyük ölçüde ışık şiddetine (G_i) bağlı olup önemsiz ölçüde de hücre çalışma sıcaklığına (T_c) bağlıdır.

4.3.4. Açık devre gerilimi (V_{oc})

Açık devre gerilimi (V_{oc}), devreden akım geçmezken güneş hücresinden alınabilecek maksimum gerilim değeridir. Denklem 4.10'daki çıkış akımının değerini 0'a eşitleyerek [15], V_{oc} , aşağıdaki gibi elde edilmekte ve Şekil 4.9'deki gibi modellenmektedir.

$$V_{oc} = \frac{KT_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (4.17)$$



Şekil 4.8. Açık devre gerilimine (V_{oc}) ait Matlab Simulink modeli

Denklem 4.17 ve Şekil 4.8, V_{oc} 'un güneş hücresindeki rekombinasyona bağlı olan satürasyon akımına ve fotoelektrik akımına bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle açık devre gerilimi, hücre içindeki rekombinasyon ölçümü olarak kabul edilmektedir. Diğer bir deyişle güneş panelinin yüksek açık devre gerilimi (V_{oc}) için satürasyon akımı (I_s) düşük olmalıdır. Laboratuvar şartları altındaki kristalli silikon güneş hücreleri, 720 mv'ye kadar bir (V_{oc}) değerine sahiptir. Ticari güneş hücrelerinin ise (V_{oc}) değeri 600 mv'u aşabilir [71].

4.3.5. Maximum güç (P_{max})

FV hücre için en verimli maksimum güç noktası (MGN) olarak adlandırılan (P_{max}) çalışma noktasıdır. Bu noktada FV hücreden alınan güç

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} \quad (4.18)$$

olarak ifade edilir [42-43]. Panel sıcaklığı, standart sıcaklık olarak kabul edilen 25 °C değerinden yüksek olduğunda, panelin çıkış gücü de düşer. Bir FV sistemde panel sıcaklığının artması önemli derecede kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada, maksimum güç noktası, I_{max} ve V_{max} değerleri çarpılarak "product" bloğu ile belirlenir. I_{max} ve V_{max} değerlerini hesaplamak için aşağıdaki gibi MATLAB fonksiyon kodu geliştirilmiştir:

```
function [ max_I, max_V ] = max_val (I,V)
persistent Ipre Vpre
```

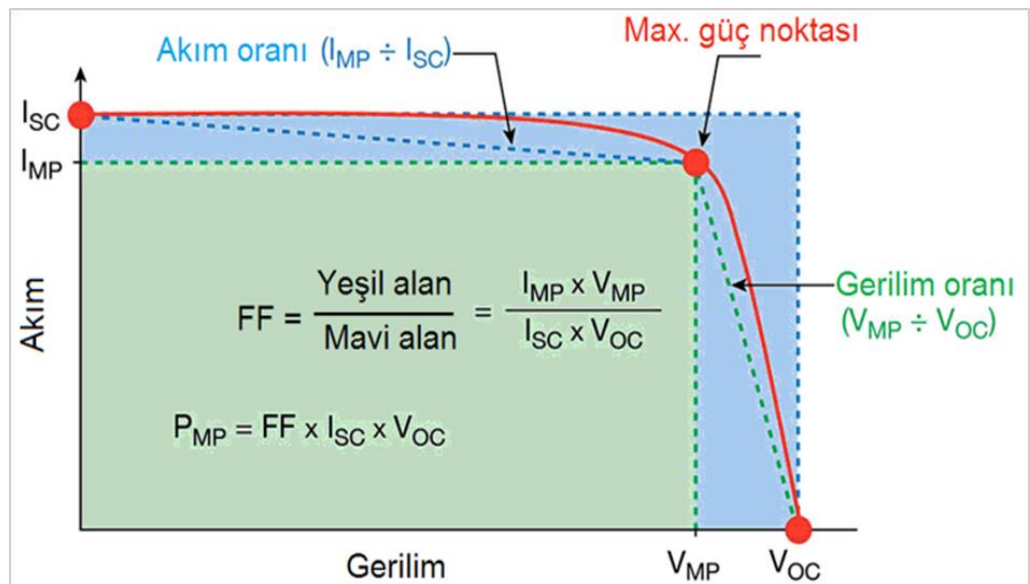
```

if isempty (Ipre)
    Ipre =0;
    Vpre =0;
end
if (Ipre*Vpre > I*V)
    max_I= Ipre;
    max_V= Vpre;
else
    max_I = I;
    max_V = V;
end
Ipre = max_I;
Vpre = max_V;

```

4.3.6. Dolgu oranı (FF)

Dolgu oranı, FV hücrenin bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür. Şekil 4.9’da gösterildiği gibi, dolgu oranı, yeşil ile taralı bölgenin mavi ile taralı bölgeye oranıdır. İdeal akım kaynağını (maksimum çıkış gerilimine kadar) gösteren bir hücrede akım-gerilim eğrisi dikdörtgen şeklinde olacağından, dolgu oranı bu durumda 1’e eşittir. Dolayısıyla bu faktör FV panelin ideallliğini belirtir. Pratik olarak, silikon hücresinin dolgu oranının değeri yaklaşık 0,8’e ulaşabilir [25].



Şekil 4.9. Dolgu oranı [25]

Dolgu oranı (FF), maksimum gücün (P_{max}) açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) çarpımına oranıdır ve

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (4.19)$$

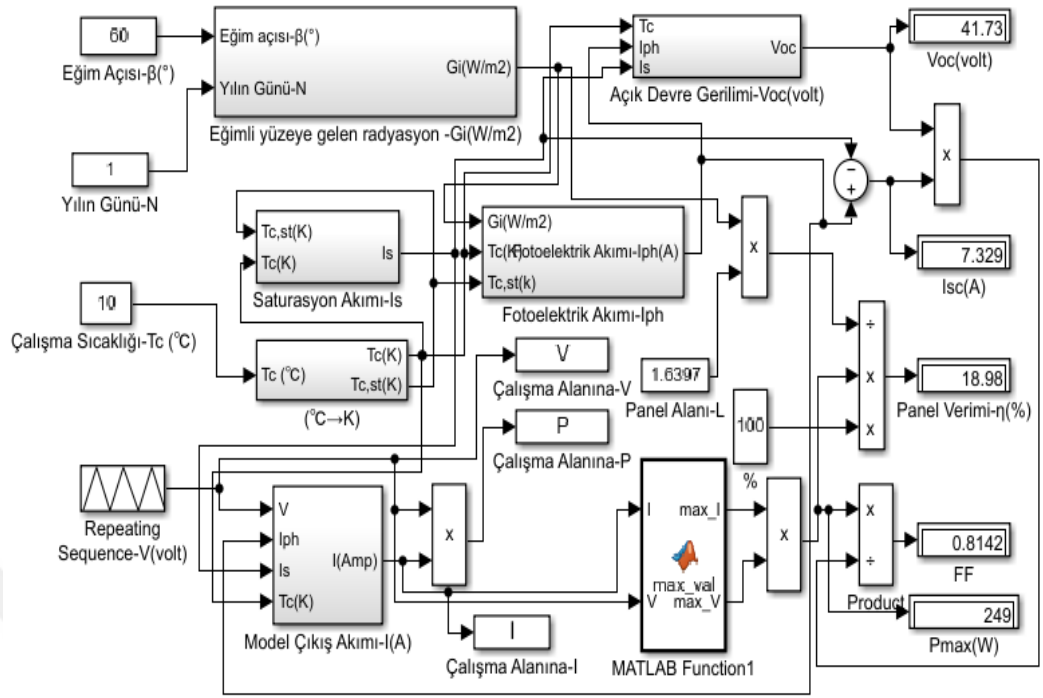
formülü ile hesaplanır [25]. Dolgu faktörünün modellenmesi, Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

4.3.7. Panel verimi (η)

Geleneksel FV panellerde verimlilik kaybına neden olan iki önemli faktör; yüksek enerjili fotonların fazlalık enerjisinin ısıya dönüşmesi ve enerjisi yasak bant aralığından düşük olan fotonların soğrulamamasıdır. FV panel verimliliği, güneş enerjisinin FV etki ile elektriğe dönüştürülebilen kısmını belirtmektedir. Örneğin, Standart Test Koşulları altında (1000 W/m^2), verimi %25 ve yüzey alanı 1 m^2 olan bir FV modül, 250 W elektrik güç üretmektedir. Bir FV modülünün verimliliği, üretilebilecek maksimum gücün, (L) alanına sahip FV modülü tarafından emilen güneş enerjisine oranıdır ve şu şekilde hesaplanır [30]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{G_i * L} \quad (4.20)$$

Burada, L , FV panelin yüzeyinin alanını temsil etmektedir. Bir FV panelden elde edilen güç, ortam sıcaklığından ve gelen güneş radyasyonundan etkilenen panel sıcaklığıyla ters orantılı olarak artar veya azalar. Denklemlere 4.1 : 4.20 göre, seçilen güneş paneli, Şekil 4.10'da gösterildiği üzere modellenmiştir.



Şekil 4.10. FV panelin Matlab Simulink modeli

Şekil 4.10’de görüldüğü gibi, güneş panelinin eğim açısının ve çalışma sıcaklığının değerini her değiştirdiğimizde, çıkış gerilimi (V), çıkış akımı (I) ve çıkış gücü (P) değerleri hesaplanır ve MATLAB çalışma alanına "to workspace" adlı bloğun yardımı ile gönderilir. Elde edilen verilerden yararlanarak Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, farklı sıcaklık ve eğim açılarında uygulanan FV panelin I-V ve P-V karakteristiği çizilir.

4.4. Simulasyon Sonuçları

4.4.1. FV Panel (I-V) & (P-V) Karakteristiği

Bu bölümün temel amacı, seçilen bölgenin tam optimum eğim açısını ve sıcaklığını bulmak değil, eğim açısı ve sıcaklığın güneş panelinin elektriksel özelliklerini nasıl etkilediğini anlamaktır. Bu nedenle Matlab/Simulink ortamında incelenecek panel sıcaklığı ve eğim açısı değerleri, sıcaklık ve enlem gibi Ankara’nın Yenimahalle ilçesi koşulları aralığında rastgele seçilmiştir. Ocak ayında Ankara’nın ortam sıcaklığı 7,13 °C ile 18,4 °C arasında değişmekte ve onun için kurulabilecek FV panelin çalışma sıcaklığı 16 °C ile 38 °C [2] arasında değişmektedir. Bu nedenle bu çalışmada incelenecek olan panel sıcaklık değerleri 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C olarak seçilmiştir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12, Matlab Simulink yazılımını kullanarak

0° (412 W/m²),

15° (565 W/m²),

30° (686 W/m²),

45° (766 W/m²),

60° (800 W/m²) ve

75° (786 W/m²)

olmak üzere altı farklı eğim açısı (Işınım şiddetinin seviyeleri) ile

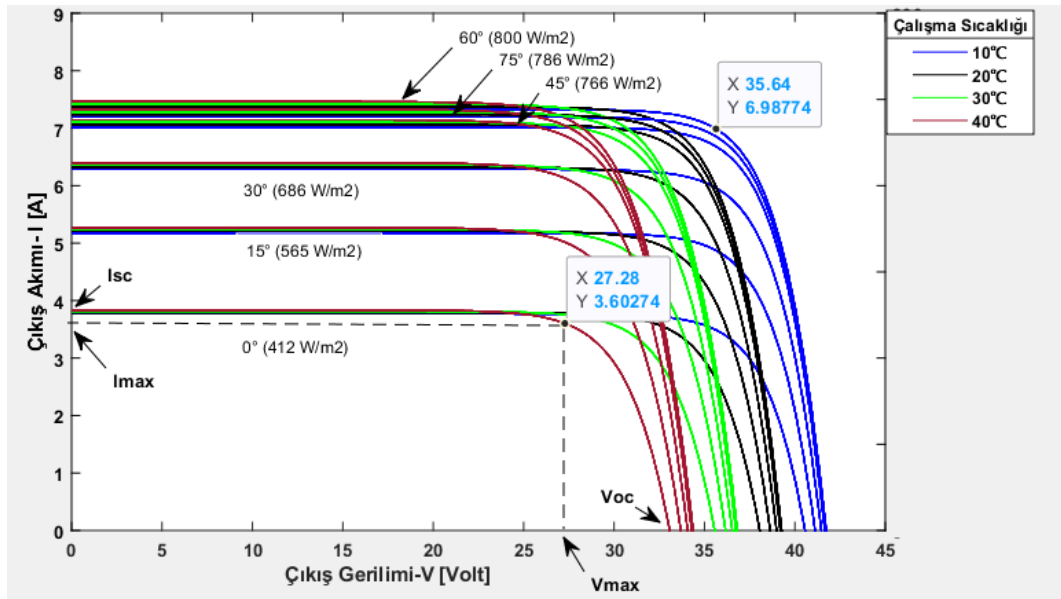
10 °C (mavi),

20 °C (siyah),

30 °C (yeşil) ve

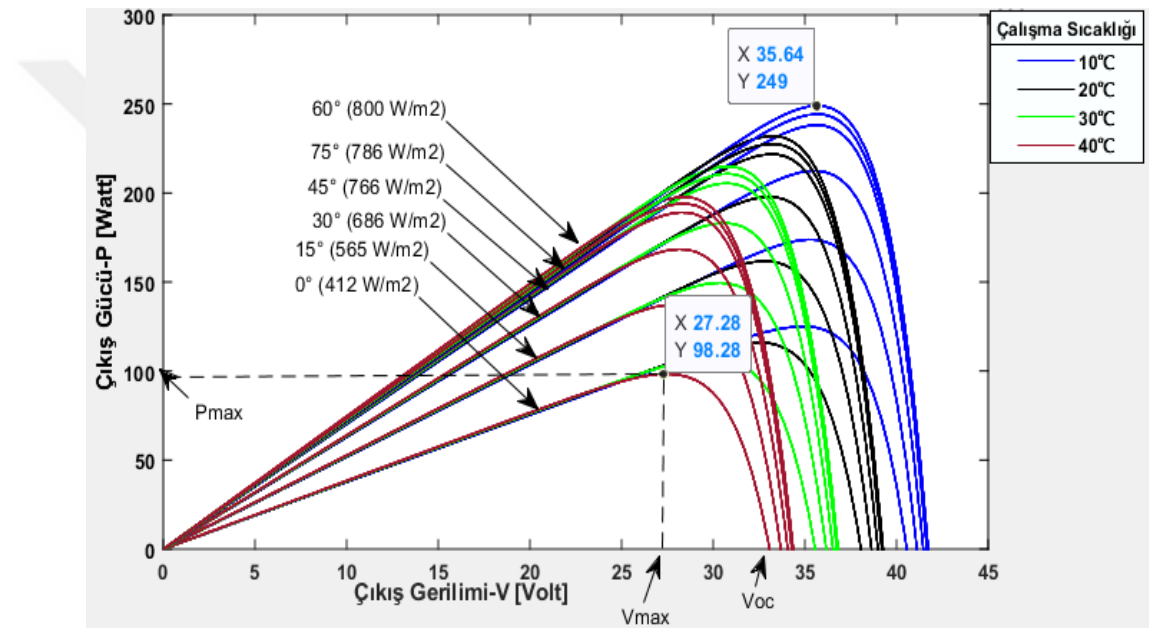
40 °C (kahverengi)

olmak üzere dört farklı çalışma sıcaklığı şartları altında 285W monokristal FV panelin Akım-Gerilim (I-V) ve Güç-Gerilim (P-V) karakteristikleri etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.11. Matlab ekranında farklı sıcaklık ve ışınım şiddeti (eğim açısı) değerleri için FV Akım-Gerilim (I-V) karakteristiğinin eğrileri

Şekil 4.11'de görüldüğü gibi en yüksek kısa devre akımı için çalışma sıcaklığı ve güneş ışıınım şiddeti, 10 °C ve 800 W/m² (yani: eğim açısı 60°) olmasına karşın; en düşük kısa devre akımı çalışma sıcaklığı ve güneş ışıının şiddeti sırasıyla 40 °C ve 412 W/m² (eğim açısı 0°) olduğu görülmektedir. Denklem 3.1'e göre, ortam sıcaklığıyla bağlanan güneş hücresi sıcaklığındaki artışın enerji bant boşluğunun azalmasına yol açtığı anlaşılabilir. Bu, daha düşük enerjili fotonların bile silikon elektronlarını daha enerjik hale getirme ve böylece onları ana atomlarından ayırma yeteneğine sahip olduğu anlamına gelir. Elektronların hareketi, güneş panelinin saturasyon akımının biraz artmasına neden olur [72].



Şekil 4.12. Matlab ekranında farklı sıcaklık ve ışıınım şiddeti (eğim açısı) değerleri için FV Güç-Gerilim (P-V) karakteristiğinin eğrileri

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'den anlaşılacağı gibi, her iki şekilde analiz edildiğinde, sabit bir eğim açısında (Ör. $\beta = 30^\circ$) çalışma sıcaklığının artması, FV modülün çıkış gerilimini olumsuz etkilerken, çıkış akımını ise olumlu etkilemektedir. FV panel çıkış gücü; gerilim ve akımın çarpımı olduğu için, çalışma sıcaklığındaki artış çıkış gücünü de olumsuz etkilemektedir. Benzer bir şekilde, sabit bir sıcaklıkta (Ör. $T_c = 10^\circ\text{C}$), eğim açısının değişmesine bağlı olarak güneş paneli yüzeye düşen güneş ışıınım şiddeti arttıkça, çıkış akımı önemli bir şekilde artarken çıkış gerilimi ise düşük miktarda artmaktadır. Dolayısıyla panelin çıkış gücü de büyük miktarda artmaktadır. FV modülün performansının güneş ışıının şiddetindeki artıştan olumlu, panel sıcaklığındaki artıştan ise olumsuz etkilendiği anlaşılmaktadır. Ocak ayının birinci gününde, güneşe

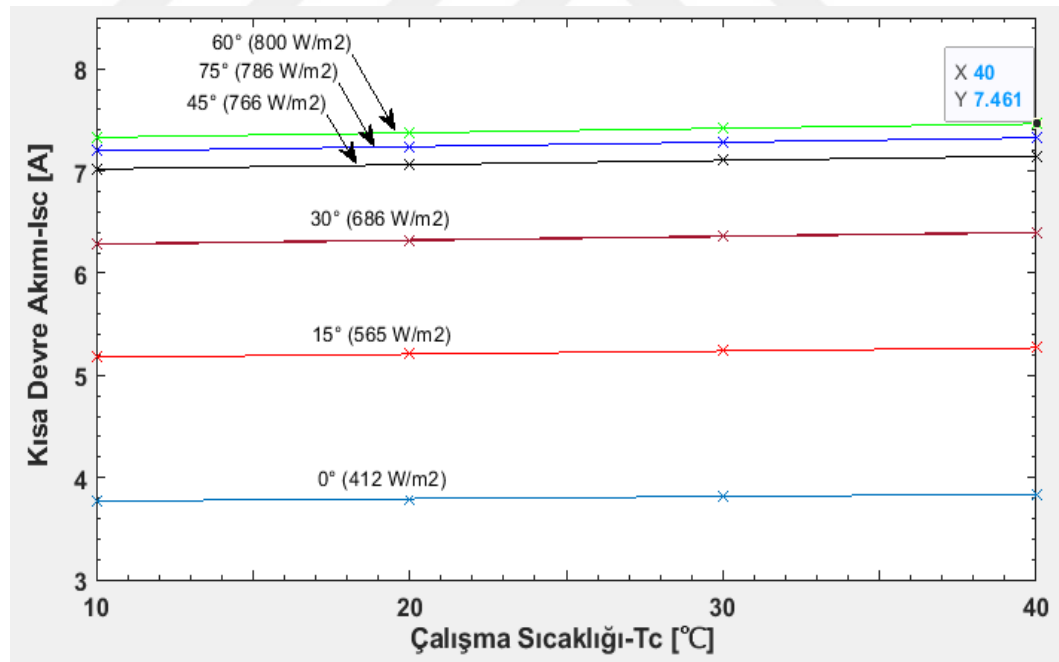
bakan FV kollektörünün 60° eğim açısıyla maksimum güneş ışınlam şiddetini alabildiği görülür ve bu durumda en yüksek çıkış gücü 249 W olarak elde edilmektedir.

4.4.2. Kısa devre akımı (I_{SC})

Şekil 4.10’da gösterilen ve denklem 4.16’ya göre modellenen belirtilen çalışma koşullarında (eğim açısı, güneş ışınlamı ve sıcaklık), FV panelin kısa devre akımının değerleri elde edilmektedir. Elde edilen veriler, Tablo 4.2’de ifade edilmiş ve Şekil 4.13’te gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Kısa devre akımının çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışınlam şiddeti) ile değişimi değerleri

Sıcaklık [°C]	0°	15°	30°	45°	60°	75°
	412(W/m ²)	565(W/m ²)	686(W/m ²)	766(W/m ²)	800(W/m ²)	786(W/m ²)
10	3,77	5,18	6,28	7,02	7,33	7,20
20	3,79	5,21	6,32	7,06	7,37	7,24
30	3,81	5,24	6,36	7,10	7,42	7,28
40	3,84	5,27	6,40	7,15	7,46	7,32



Şekil 4.13. Matlab ekranında kısa devre akımının ve çalışma sıcaklığı ve eğim açısı ile değişimi

Table 4.2 ve Şekil 4.13’te görüldüğü gibi, ışınlam şiddetinin değişimi, kısa devre akımını önemli ölçüde etkilemektedir. 1W/m²’lik bir güneş ışınlamı artışı, seçilen panel kısa devre akımında 0,0088 A $\approx$ %0,096’lik bir artışa neden olur. Sıcaklık bakımından ise, 1°C’lik bir panel sıcaklık artışı, 0° $\approx$ 412 W/m²; 15° $\approx$ 565 W/m²; 30° $\approx$ 686 W/m²;

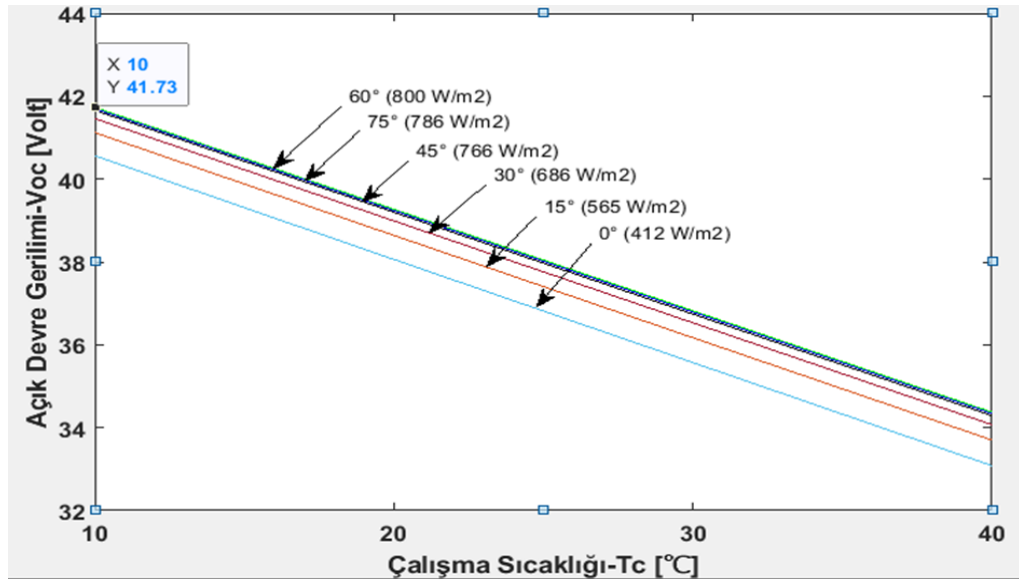
$45^\circ \approx 766 \text{ W/m}^2$; $75^\circ \approx 786 \text{ W/m}^2$ ve $60^\circ \approx 800 \text{ W/m}^2$ güneş ışınlımı değerlerinde; kısa devre akımı sırasıyla $0,0023 \text{ A} \approx \% 0,025$; $0,0031 \text{ A} \approx \% 0,034$; $0,0038 \text{ A} \approx \% 0,041$; $0,0042 \text{ A} \approx \% 0,045$; $0,0044 \text{ A} \approx \% 0,048$; ve $0,0043 \text{ A} \approx \% 0,047$ oranında artışa neden olmaktadır. Bu değerlerden, yüksek güneş şiddeti değerlerinde güneş modülünün akımının sıcaklıktaki artışa daha duyarlı tepki verdiği anlaşılabilmektedir. Bu, daha yüksek bir güneş ışınlımı şiddetinin, panele daha fazla fotonun ve dolayısıyla sıcaklıkla motive olma şansına sahip daha fazla elektronun çarptığı anlamına geldiği gerçeğiyle açıklanabilir.

4.4.3. Açık devre gerilimi (Voc)

Matematiksel denklem 4.17'ye dayalı olarak yapılan simülasyon sonucunda, ilgili koşullarda FV panelin açık devre geriliminin değerleri elde edilmiş ve Tablo 4.3 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Açık devre geriliminin sıcaklığı ve eğim açısı güneş ışınlım şiddeti ile değişimi

Sıcaklık [°C]	0° 412 (W/m ²)	15° 565 (W/m ²)	30° 686 (W/m ²)	45° 766 (W/m ²)	60° 800 (W/m ²)	75° 786 (W/m ²)
10	40,56	41,12	41,46	41,66	41,73	41,7
20	38,06	38,64	38,99	39,2	39,27	39,24
30	35,57	36,17	36,53	36,74	36,82	36,79
40	33,08	33,7	34,07	34,29	34,37	34,34



Şekil 4.14. Matlab ekranında açık devre geriliminin sıcaklık ve eğim açısı güneş ışınlım şiddeti ile değişimi

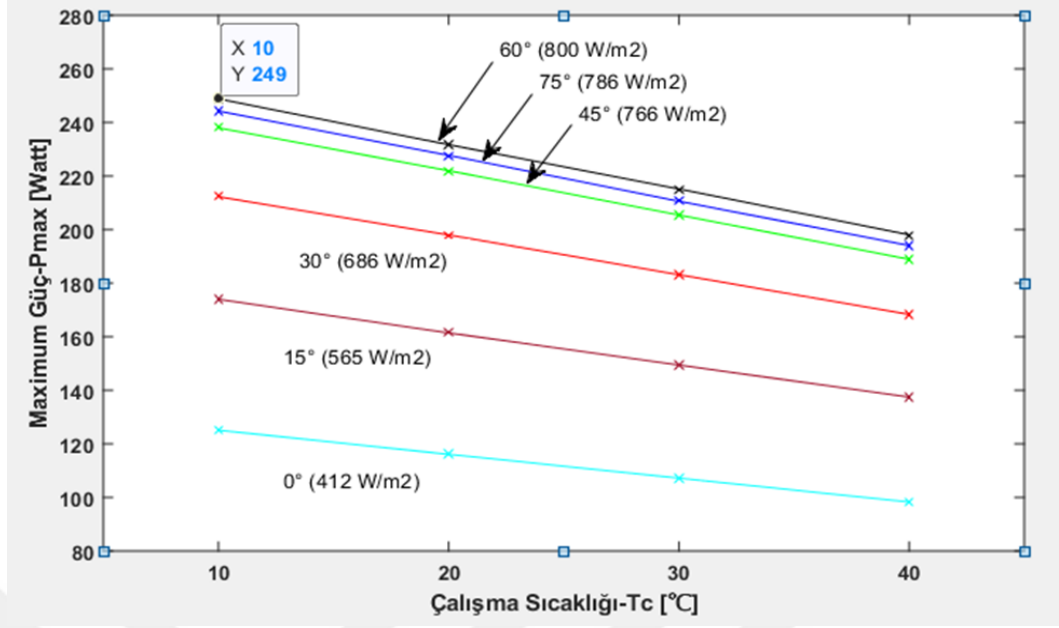
Tablo 4.3 ve Şekil 4.14'te görüldüğü gibi, temel olarak ortam sıcaklığından etkilenen FV panelin çalışma sıcaklığındaki artış (T_c), açık devre geriliminin düşmesinde ana rol oynamaktadır. Tablo 4.3'ten, seçilen FV monokristal panelin tüm eğim açıları için, sıcaklık artmasından kaynaklanan açık devre gerilimindeki düşüşün miktarı, bir - $0,25 \text{ V/}^\circ\text{C} \approx \% 0,64/^\circ\text{C}$ 'ye ulaşabilir. Elde edilen bu değerin, üretici tarafından Tablo 4.1'de belirtilen değeri $\% 0,29/^\circ\text{C}$ olan güneş panelinin açık devre geriliminin sıcaklık katsayısından (K_v) biraz farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere, güneş ışınım şiddeti 800 W/m^2 (eğim açısı 60°) ve panel sıcaklığı 10°C olduğunda $41,73 \text{ V}$ 'a ulaşan maksimum açık devre gerilimi elde edilebilir. Hücre sıcaklığı arttıkça enerji bant aralığının azaldığı, dolayısıyla saturasyon akımının arttığı ve açık devre geriliminin azaldığı anlaşılmaktadır. Açık devre geriliminin güneş ışınımının artmasıyla biraz arttığı bulunmuştur. Güneş ışınımındaki artıştan kaynaklanan açık devre geriliminin artışı yüzdesi $\%0,0076/(\text{W/m}^2)$ ile $\%0,0084/(\text{W/m}^2)$ arasındadır.

4.4.4. Maximum güç ($P_{\max}$)

FV panellerin maksimum verimlilikle ve maksimum çıkış gücü sağlayarak çalıştığı maksimum güç noktası, panel sıcaklığına ve güneş ışınlarının panel yüzeyine yaptığı açıya bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.10'deki Matlab Simulink ile modellenen matematiksel denklem 4.18'den yararlanarak, belirtilen çalışma şartları altında elde edilen FV panelinin maksimum güç değerleri, Tablo 4.4'te verilip Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Maximum gücün çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (güneş ışınım şiddeti) ile değişimi

Sıcaklık [$^\circ\text{C}$]	0° 412(W/m ²)	15° 565(W/m ²)	30° 686(W/m ²)	45° 766(W/m ²)	60° 800(W/m ²)	75° 786(W/m ²)
10	125,1	173,5	212,5	238,2	249	244,3
20	116,1	161,7	197,8	221,8	231,9	227,5
30	107,2	149,6	183,1	205,5	214,9	210,8
40	98,28	137,3	168,4	189	197,8	194



Şekil 4.15. Matlab ekranında maksimum gücün çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışınım şiddeti) ile değişimi

Sıcaklık artışı nedeniyle çıkış gerilimindeki düşüş, çıkış akımındaki hafif artıştan daha büyük olduğundan, çıkış gücü panel sıcaklığıyla ters orantılıdır. Tablo 4.4'te gösterilen verilerine göre, 1 °C'lik bir panel sıcaklık artışı, 0° ≈ 412 W/m²; 15° ≈ 565W/m²; 30° ≈ 686 W/m²; 45° ≈ 766 W/m²; 75° ≈ 786 W/m² ve 60° ≈ 800 W/m² güneş ışıınımı değerlerinde, panel maksimum gücünde sırasıyla 0,89 W ≈ % 0,31; 1,22 W ≈ % 0,43; 1,47 W ≈ % 0,52; 1,64 W ≈ % 0,58; 1,71 W ≈ % 0,60 ve 1,68 W ≈ %0,59 oranında azalmaya neden olur. Bu, panel sıcaklığındaki artışın öncelikle güneş modülünün performansı için olumsuz bir faktör olarak görüldüğü anlamına gelir.

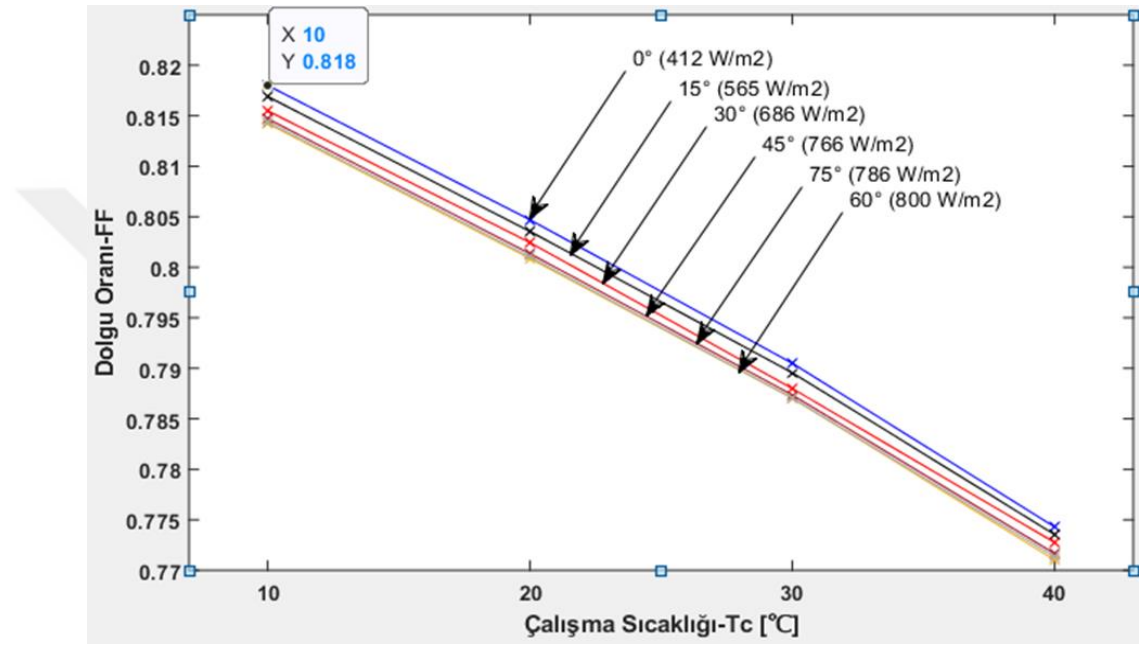
Güneş ışıınımı bakımından, 1 W/m²'lik bir güneş ışıınım artışı, 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C çalışma sıcak değerlerinde, panel maksimum gücünde sırasıyla 0,31 W ≈ % 0,11; 0,29 W ≈ % 0,1; 0,27 W ≈ % 0,09 ve 0,25 W ≈ % 0,09 oranında artışa neden olmaktadır. Elde edilen verilerden, ağırlıklı olarak eğik açıyla bağlanan güneş ışıınımının, FV panel çıkış gücünün ürettiği elektrik enerjisi miktarının belirlenmesinde en önemli faktör olarak kabul edildiği anlaşılmaktadır.

4.4.5. Dolgu oranı-FF

Maksimum güç değerinin (P_{max})açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) çarpımına oranı olarak tanımlanan dolgu oranının hesaplanması denklem 4.19'den yararlanarak yapılmış ve sonuçları Tablo 4.5 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Dolgu oranının sıcaklığı ve eğim açısı (güneş ışıyım şiddeti) ile değışimi değeri

Sıcaklık [°C]	0°	15°	30°	45°	60°	75°
	412(W/m ²)	565(W/m ²)	686(W/m ²)	766(W/m ²)	800(W/m ²)	786(W/m ²)
10	0,8180	0,8169	0,8155	0,8147	0,8142	0,8144
20	0,8047	0,8035	0,8025	0,8014	0,8008	0,8011
30	0,7905	0,7895	0,7880	0,7873	0,7870	0,7871
40	0,7743	0,7735	0,7727	0,7716	0,7710	0,7713



Şekil 4.16. Matlab ekranında FV modülün dolgu oranının çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışıyım şiddeti) ile değışimi

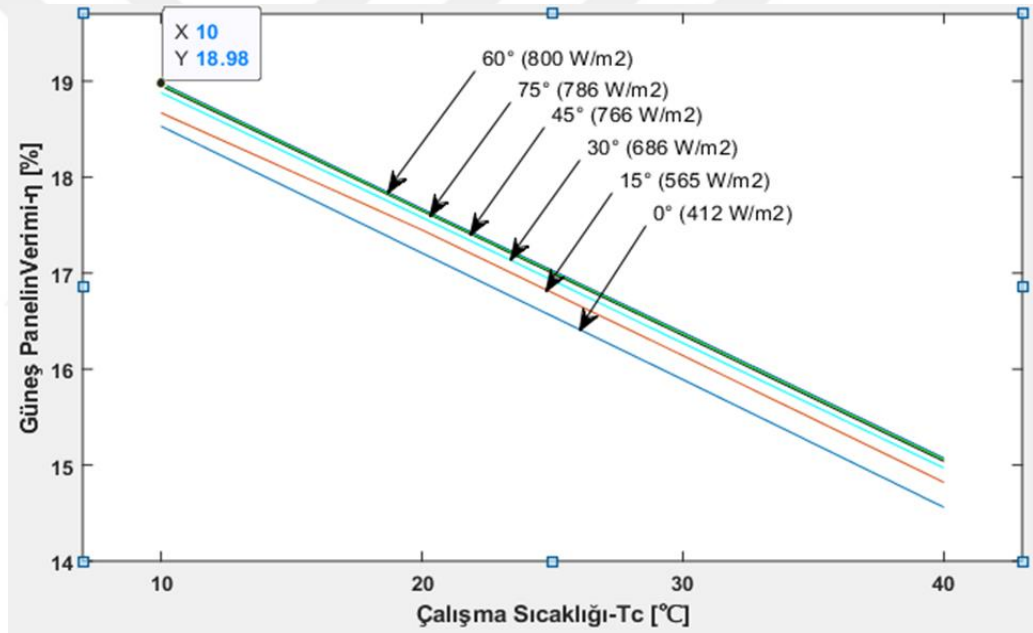
Yukarıdaki tablo ve şekil, dolgu oranının sıcaklık ve eğim açısı ile ilişkisini göstermektedir. Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça panel dolgu oranının değeri (FF) hızlı bir şekilde düşmektedir. Panel eğim açısına ve güneş ışıyım şeditine baktığımızda, 0° - 60° arasındaki eğim açısı arttığında güneş ışıyımını artmakta; eğim açısı 60°’ı aştığı zaman ise güneş ışıyımını azalmaya başlamaktadır. Güneş ışıyımını arttıkça, dolgu oranı (FF) hafifçe azalmaktadır. FF’deki düşüş, modülün kalitesini düşüren güneş ışıyım şiddetinden kaynaklanan sıcaklık artışına atfedilebilir. Dolgu oranının elde edilen simülasyon sonuçları Chegaar, M [73] ve Chander ve ark. [74] tarafından yapılan çalışmalar ile uyumludur.

4.4.6. Panelin verimi (η)

Bir FV modülün verimliliği güneş ışınlam şiddetine, modül sıcaklığına ve FV malzemenin bileşimlerine bağlıdır. Şekil 4.18 ve Tablo 4.6, FV panel sıcaklığının farklı güneş ışınlam şiddetinde FV panelin çıkış performansı üzerindeki etkisini göstermektedir.

Tablo 4.6. FV modülün verimliliğinin sıcaklığı ve eğim açısı (ışınlam şiddeti) ile değişimi değerleri

Sıcaklık [°C]	0°	15°	30°	45°	60°	75°
	412(W/m ²)	565(W/m ²)	686(W/m ²)	766(W/m ²)	800(W/m ²)	786(W/m ²)
10	18,53	18,67	18,88	18,95	18,98	18,97
20	17,21	17,45	17,58	17,65	17,67	17,66
30	15,89	16,14	16,27	16,35	16,38	16,37
40	14,56	14,82	14,97	15,04	15,07	15,06



Şekil 4.17. Matlab ekranında FV modülün verimliliğinin çalışma sıcaklığı ve eğim açısı (ışınlam şiddeti) ile değişimi

Çalışma sıcaklığı ile modül verimliliği arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu FV modülün çevre sıcaklığı ile etkilenen direkt çalışma sıcaklığının düşürülmesi daha fazla verimlilik sağlayacağı anlamına gelmektedir. Ne yazık ki, FV panel yüksek sıcaklığına maruz kaldığında verimliliği azalmaktadır. Tablo 4.6’da görüldüğü gibi, 800 W/m² güneş ışınlamında, panel sıcaklığı 40°C olduğu zaman verimlilik en kötü duruma yani %15,06’e kadar düşmektedir. 1 ocak tarihinde Ankara’nın Yenimahalle ilçesinde (Enlem: 39°9 Kuzey ve Boylam: 32°81 Doğu) tüm eğim açıları ile bulunabilecek bir güneş modülün sıcaklığının bir derecelik çıkarıldığı zaman, modülün verimliliğinin % 0,13 azalmasına

neden olmaktadır. Sonuç olarak FV modülün veriminin sıcaklığına duyarlı olduğu anlaşılmaktadır.

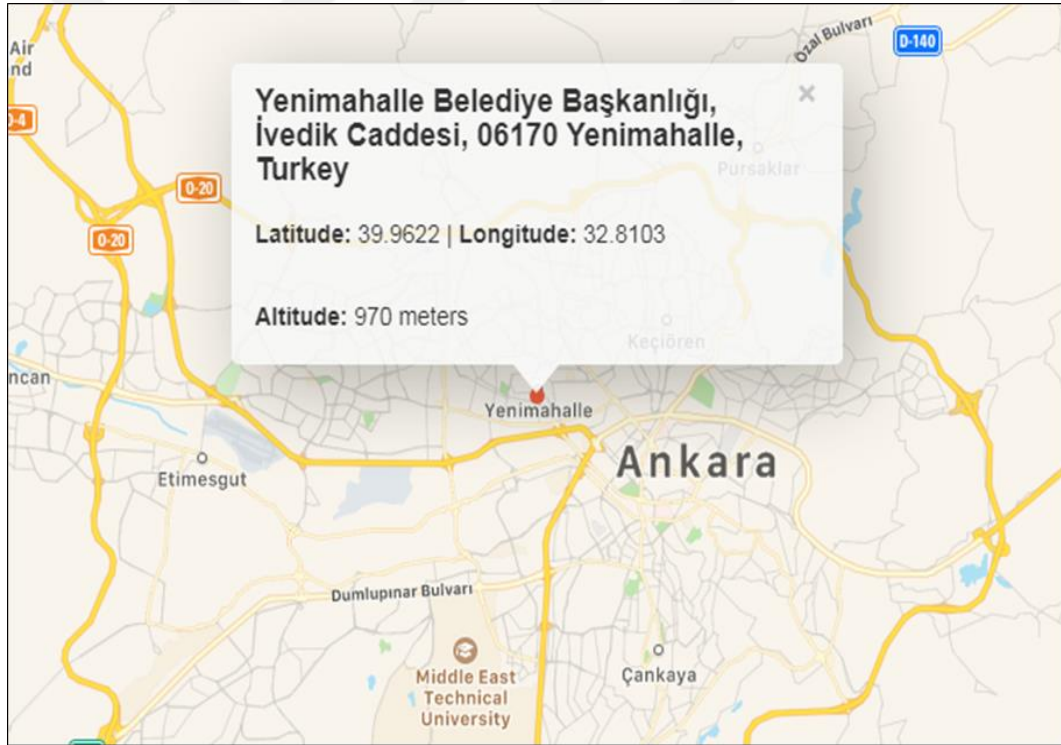
Güneş ışıının şiddetine baktığımızda, sabit bir sıcaklık için, FV panelin verimliliği güneş ışıının şiddetinden pozitif olarak etkilenmekte ancak bu etki düşük ölçüde kalmaktadır. Bu sonucun nedeni matematiksel olarak denklem 4.20 ile açıklanabilir. Güneş ışıının şiddetindeki herhangi bir değişikliğe maksimum güç miktarındaki bir değişiklik eşlik eder ve böylece her biri diğerinin etkisini minimize eder veya ortadan kaldırır. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, 10 °C’de eğim açısı 60° ve ışıının şiddeti 800 W/m² olduğunda panelin verimli enerji üretimi % 18,98 ile en yüksek seviyededir.



5. ANKARA’NIN YENİMAHALLE İLÇESİ İÇİN OPTİMUM PANEL EĞİM AÇISININ BELİRLENMESİ

5.1. Yöntem

Ankara’nın Yenimahalle ilçesi, güneş radyasyonunun hesaplanması için geliştirilen matematiksel modeller ve güneş radyasyonu verilerinin bulunması nedeniyle çalışma örneği olarak seçilmiştir. Teorik denklemlere göre Excel programını kullanarak, eğimli FV panelin aldığı global günlük güneş ışıınımı ve Ankara’nın Yenimahalle ilçesinde bulunabilecek FV modülün aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açısı değerleri hesaplanacak ve grafikleri çizilecektir. Bazı güneş enerjisi verileri, Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası’ndan (GEPA) alınmıştır. Şekil 5.1’deki görüldüğü gibi, Yenimahalle 39°96’22 Kuzey enlem ve 32°81’03 Doğu boylam koordinatlarına sahip bir ilçedir. Nüfus, TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verilerine göre 2015 yılında 608,217’dir [75].



Şekil 5.1. Ankara’nın Yenimahalle ilçesinin konumu [75]

Kuzey yarımkürede 23° ve 90° enlemleri arasında güneş daima güneydedir. Bu nedenle, güneşin enerjisinden en iyi şekilde yararlanmak için FV modüller güneye yönlendirilir. Güney yarımkürede ise tam tersidir. Türkiye kuzey yarım kürede yer aldığından, kurulan FV panelin azimut açısı ($\gamma=0^\circ$) güneye bakmalıdır [76].

5.2. Hesaplamalar

5.2.1. Yatay yüzeye gelen günlük güneş ışıını hesap (H)

Güneş enerjisi sistemlerin dizayn edilmesinde, bir bölgeye ait güneş ışıını verilerinin bilinmesi çok önemli bir parametredir. Güneş radyasyonunu ölçmek, güneş radyasyonu ölçüm cihazlarının bakımı, kalibrasyonu ve yüksek maliyeti nedeniyle zordur. Bu nedenle, araştırmacılar belirli bir bölge ve zamanda güneş ışıını hesaplamak için birçok ampirik model geliştirmeye çalışmışlardır.

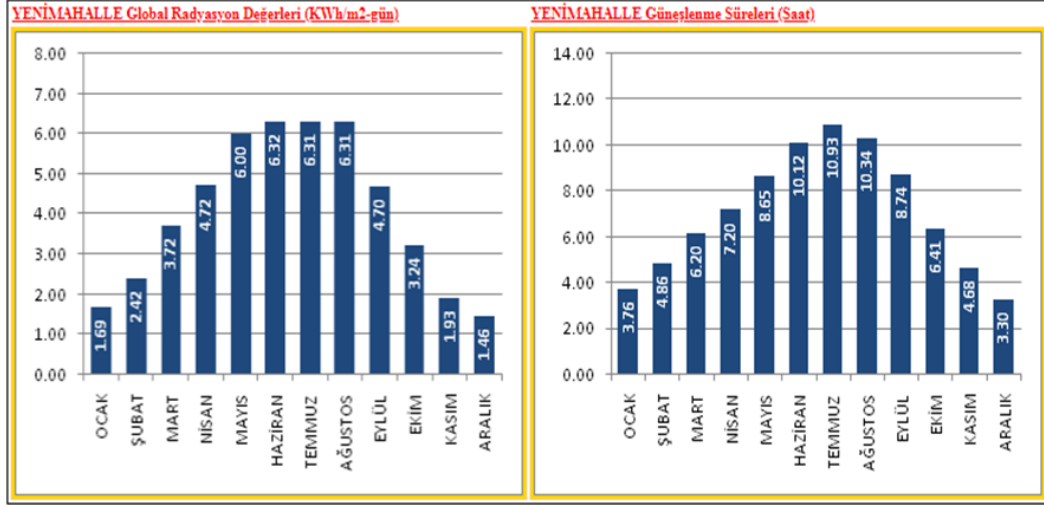
Bu modellerden birisi Ankara, İstanbul ve İzmir illerine ait yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük global güneş ışıını hesaplanması için kullanılan ve çalışmamızda kullanılan Ülgen ve Hepbaslı modelidir (denklem 5.1) [4]. Belirli bölgelerde, global güneş radyasyonunun tahmini için en önemli parametreler güneşlenme süresi ve güneş ışıını değeridir.

$$H = H_0 \left[0,2854 + 0,2591 \left(\frac{S}{S_0} \right) + 0,6171 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 - 0,4837 \left(\frac{S}{S_0} \right)^3 \right] \quad (5.1)$$

Burada, H_0 , aylık ortalama atmosfer dışı günlük güneş ışıını; S_0 , maksimum aylık ortalama günlük güneşlenme süresi (gün uzunluğu); S ise güneşlenme süresini ifade etmektedir. Denklem 5.2’de görüldüğü gibi, saat cinsinden gün uzunluğu, ω_{gb} gün batımının saat açısına bağlı yıl boyunca çeşitli dönemlerde farklılık göstermektedir [23].

$$S_0 = \left(\frac{5}{15} \right) \omega_{gb} \quad (5.2)$$

Şekil 5.2’de gösterildiği gibi, Ankara’nın Yenimahalle ilçesinin S güneşlenme süresinin verileri, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na ait olan Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası’nın (GEPA) resmî internet sitesinden alınmıştır [3].



Şekil 5.2. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için yatay yüzeye gelen aylık ortalama global günlük güneş ışınlamı (H) ve güneşlenme süresinin (S) değerleri [3]

Yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük atmosfer dışı güneş ışınlamı (H_o);

$$H_o = \frac{24 \times G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 N}{365} \right) \times \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_{gb} + \frac{\pi}{180} \omega_{gb} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (5.3)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada, G_{sc} , değeri 1367 W/m^2 olan dünya ile güneş arasındaki yatay birim alana dik olarak gelen ışınlamı miktarı olarak tanımlanan güneş sabitini; N , değeri 1-365 arasında olan yılın gününü; denklem 4.2'de ifade edilen δ deklinasyon açısını; ϕ bölgenin enlem değeri ve ω_{gb} ise gün batımı saat açısını temsil etmektedir. Gün batımındaki saat açısı değeri olan ω_{gb} aşağıda belirtilen eşitlik ile hesaplanabilir [22]:

$$\omega_{gb} = \cos^{-1}[-\tan(\delta) \tan(\phi)] \quad (5.4)$$

Tablo 5.1'de ifade edildiği gibi Klein, aylık ortalama toplam günlük radyasyon miktarının her ayın ortalama günüyle hesaplanması gerektiğini önermiştir [77]. Tablo 5.1, ortalama aylık güneş ışınlamının hesaplanması sırasında ayın hangi gününün seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 5.1. Ortalama hesaplamalarda her ay için Klein tarafından önerilen N değerleri [77]

Ay	Belirli Bir Gün İçin N Değeri	Ayı Temsil Eden Gün Sayısı - (İ)	Ortalama Gün İçin N Değeri	Güneşin Deklinasyonu- (δ)
OCAK	İ	17	17	-20,92
ŞUBAT	31+İ	16	47	-12,95
MART	59+İ	16	75	-2,42
NİSAN	90+İ	15	105	9,41

MAYIS	120+İ	15	135	18,79
HAZİRAN	151+İ	11	162	23,09
TEMMUZ	181+İ	17	198	21,18
AĞUSTOS	212+İ	16	228	13,45
EYLÜL	243+İ	15	258	2,22
EKİM	273+İ	15	288	-9,60
KASIM	304+İ	14	318	-18,91
ARALIK	334+İ	10	344	-23,05

Berraklık indeksi (K_t), atmosfer açıklığının bir ölçüsüdür ve dünya yüzeyine çarpmak için atmosfer yoluyla iletilen güneş ışınımının oranıdır. Berraklık endeksi, açık, güneşli koşullarda yüksek bir değere ve bulutlu koşullarda düşük bir değere sahiptir. Tipik K_t değerleri 0,25 (çok bulutlu bir ay) ile 0,75 (çok güneşli bir ay) arasındadır. Berraklık indeksi, yatay düzlemdeki günlük ışınlam (H) değerinin günlük atmosfer dışı ışınlam (H_0) değerine oranıdır [78].

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (5.5)$$

Denklemler 5.1 ve 5.5'e göre, Ankara'nın Yenimahalle ilçesinin aylık ortalama günlük atmosfer dışı ışınlam (H_0), yatay yüzeye düşen aylık ortalama günlük global ışınlam (H) ve berraklık indeksi (K_t) hesaplanmış ve sonuçların verileri Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, ölçülen yatay yüzeye düşen aylık ortalama günlük küresel ışınlam değerlerinin verileri (H_{GEPA}) GEPA resmî internet sitesinden alınmış ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

5.2.2. Eğimli yüzeye gelen günlük güneş ışınlamı hesabı (H_T)

Eğik yüzeye gelen güneş ışınlamı (H_T), direkt ışınlam (H_B), yayılı ışınlam (H_D) ve yansıyan ışınlamın (H_R) değerlerinin toplamından oluşur ve şu şekilde hesaplanır [79].

$$H_T = H_B + H_D + H_R \quad (5.6)$$

5.2.2.1. Eğimli yüzeye gelen direkt ışınlam hesabı (H_B)

Direkt güneş ışınlamı, herhangi bir yüzeye dik olarak ve yön değiştirmeden, dolaysız olarak gelen ışınlam olarak tanımlanır. Bulutsuz bir gökyüzünde yeryüzüne ulaşan toplam ışınlam % 75 - % 80 arasındadır. Eğimli yüzeye gelen direkt ışınlam (H_B) aşağıdaki gibi hesaplanır [79]:

$$H_B = H_b * R_b = (H - H_d) * R_b \quad (5.7)$$

Burada, R_b eğik düzlem üzerine gelen güneş ışınımının, yatay yüzeye gelen güneş ışınımına oranıdır. H_d ve H_b ise sırasıyla yatay yüzey üzerinde yayılım ışınımı ve yatay yüzey üzerinde direkt ışınımı temsil eder ve aşağıdaki gibi verilir [79]:

$$H_d = H (1,390 - 4,027 K_T + 5,531 K_T^2 - 3,108 K_T^3) \quad (5.8)$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos(\delta) \sin(\omega_{gb}') + \frac{\pi}{180} \omega_{gb}' \sin(\phi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_{gb}') + \frac{\pi}{180} \omega_{gb}' \sin(\phi) \sin(\delta)} \quad (5.9)$$

Burada, ω_{gb}' , eğimli yüzeydeki güneş batış açısını temsil eder ve

$$\omega_{gb}' = \min \left\{ \frac{\cos^{-1}[-\tan(\phi) \tan(\delta)]}{\cos^{-1}[-\tan(\phi - \beta) \tan(\delta)]} \right\} \quad (5.10)$$

formülü ile hesaplanır [22]. Yukarıdaki denklemde "min" ifadesi, parantez terimlerindeki en küçük değerin kullanılacağı anlamına gelmektedir.

5.2.2.2. Eğimli yüzeye gelen difüz ışınım hesabı (H_D)

Difüz güneş ışınımı, atmosferden geçerken yansıtma ve yutma nedeniyle yön değiştirmiş bir şekilde ve her yönde gelen ışıdır. Panelin (β) eğim açısına bağlı, eğik yüzey üzerinde düşen difüz (yayılı) ışınım şu şekilde hesaplanır [23]:

$$H_D = H_d * R_d = H_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (5.11)$$

5.2.2.3. Eğimli yüzeye gelen yansıyan ışınım hesabı (H_R)

Yansıyan güneş ışınımı, dünya yüzeyinden yansıyan ve düz, yatay olarak monte edilen, eğimli veya aşağı bakan yüzeye gelen toplam radyasyonun kısmıdır. Eğimli yüzeye gelen yansıyan ışınım (H_R), yataya gelen toplam ışınım (H), panelin eğim açısı (β) ve yüzey yansıtma katsayısına (ρ) bağlıdır ve şu şekilde hesaplanır:

$$H_R = H * \rho * R_r = H * \rho \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (5.12)$$

Burada ρ , ortalama değeri $\rho=0,2$ olan ortamın yansıtma katsayısını temsil eder. ρ bitki örtüsü, topoğrafik yapı ve kar koşullarına göre değişir [23].

5.2.3. Aylık ($\bar{H}_T$), mevsimlik ($\bar{H}_T$) ve yıllık toplam ışınım hesabı ($\bar{H}_T$)

Toplam aylık küresel güneş ışınımı ($\bar{H}_T$), ayın gün sayısı (N_a) ile ortalama aylık günlük ışınımının (H_T) çarpımı olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{H}_T = H_T * N_a \quad [kWh/m^2 - Ay] \quad (5.13)$$

Bir mevsimin toplam ışıınım miktarı ($\dot{H}_T$), o mevsim aylarının toplam aylık güneş radyasyonunun toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{H}_T = \sum \dot{H}_T \quad [kWh/m^2 - Mevsim] \quad (5.14)$$

Bir yılın toplam güneş ışıınım miktarı ($\bar{H}_T$), o yılın aylarının toplam aylık güneş radyasyonunun toplamı olarak tanımlanır ve şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{H}_T = \sum \dot{H}_T \quad [kWh/m^2 - Yıl] \quad (5.15)$$

5.3. Hesaplamaların Sonuçları

5.3.1. Yatay yüzeye gelen günlük toplam güneş ışıınımı (H)

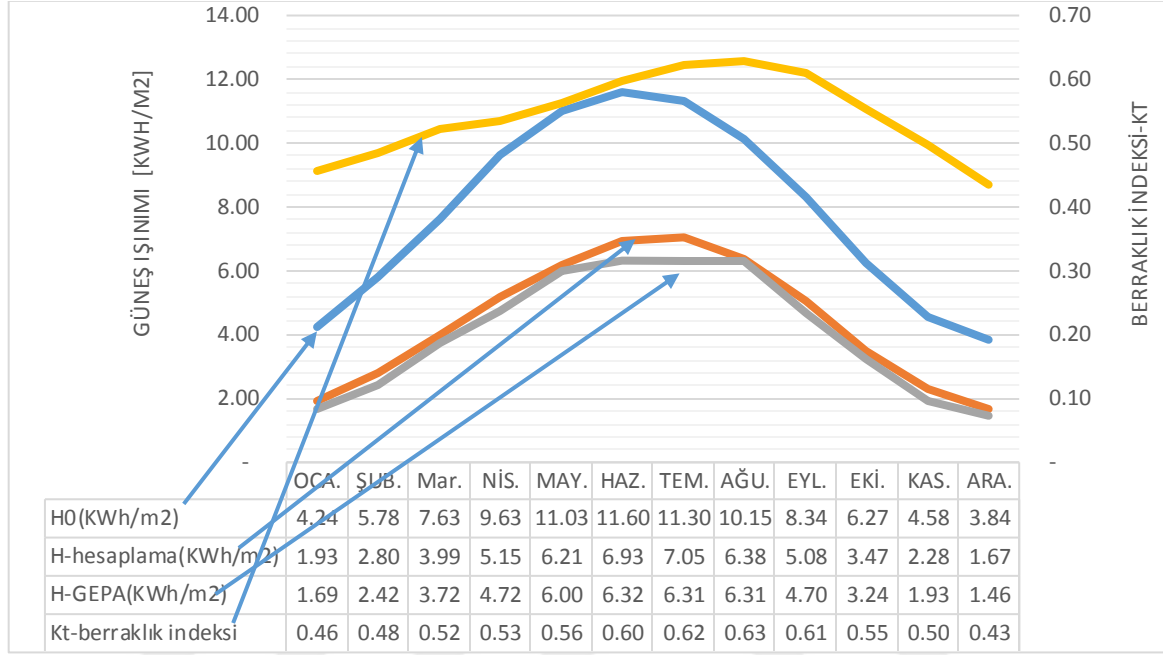
Tablo 5.2’de, 1°’lik adımla 0-90° arasında değişen eğim açılarıyla eğimli yüzey üzerindeki aylık ortalama günlük toplam güneş ışıınımının Excel’de yapılan hesaplama sonuçları verilmiş ve Şekil 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Ankara’nın Yenimahalle ilçesi için eğik düzleme düşen ortalama aylık günlük güneş ışıınım değerleri (H_T) [kWh/m²-gün]

β [°]	Ock.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Eki.	Kas.	Ara.
0	1,925	2,796	3,994	5,147	6,208	6,924	7,049	6,375	5,078	3,464	2,279	1,667
1	1,971	2,844	4,037	5,172	6,216	6,921	7,052	6,398	5,124	3,518	2,331	1,71
2	2,016	2,891	4,078	5,197	6,223	6,918	7,054	6,421	5,169	3,572	2,383	1,752
3	2,06	2,938	4,119	5,221	6,229	6,914	7,055	6,442	5,213	3,625	2,434	1,794
4	2,105	2,983	4,159	5,244	6,235	6,91	7,055	6,462	5,255	3,678	2,484	1,835
5	2,149	3,029	4,198	5,265	6,239	6,904	7,055	6,481	5,296	3,729	2,534	1,876
6	2,192	3,073	4,236	5,286	6,243	6,898	7,053	6,498	5,336	3,78	2,584	1,916
7	2,235	3,117	4,273	5,305	6,245	6,891	7,05	6,514	5,375	3,83	2,633	1,956
8	2,277	3,16	4,31	5,323	6,247	6,883	7,047	6,529	5,413	3,878	2,681	1,995
9	2,319	3,203	4,345	5,341	6,247	6,874	7,042	6,543	5,449	3,926	2,729	2,034
10	2,36	3,245	4,379	5,357	6,247	6,864	7,036	6,555	5,484	3,973	2,776	2,072
11	2,401	3,286	4,412	5,372	6,245	6,853	7,029	6,566	5,517	4,02	2,822	2,11
12	2,441	3,326	4,444	5,386	6,242	6,841	7,021	6,576	5,55	4,065	2,868	2,147
13	2,481	3,365	4,476	5,398	6,238	6,828	7,012	6,584	5,581	4,109	2,913	2,184
14	2,52	3,404	4,506	5,41	6,234	6,814	7,001	6,591	5,611	4,152	2,957	2,22
15	2,559	3,442	4,535	5,42	6,228	6,799	6,99	6,597	5,639	4,194	3,001	2,256
16	2,596	3,479	4,563	5,43	6,22	6,782	6,977	6,601	5,666	4,236	3,044	2,291
17	2,634	3,515	4,59	5,438	6,212	6,765	6,963	6,604	5,692	4,276	3,086	2,325
18	2,67	3,551	4,616	5,445	6,203	6,746	6,947	6,606	5,716	4,315	3,127	2,359
19	2,706	3,586	4,641	5,451	6,192	6,726	6,931	6,606	5,739	4,353	3,168	2,392
20	2,742	3,619	4,665	5,455	6,18	6,706	6,913	6,605	5,761	4,39	3,208	2,425
21	2,776	3,652	4,687	5,459	6,167	6,684	6,894	6,602	5,781	4,427	3,247	2,457
22	2,811	3,684	4,709	5,461	6,153	6,66	6,873	6,598	5,8	4,462	3,286	2,488
23	2,844	3,716	4,73	5,462	6,138	6,636	6,852	6,592	5,818	4,495	3,323	2,519
24	2,877	3,746	4,749	5,462	6,122	6,611	6,829	6,585	5,834	4,528	3,36	2,549
25	2,909	3,775	4,767	5,461	6,104	6,584	6,805	6,577	5,849	4,56	3,396	2,579
26	2,94	3,804	4,784	5,458	6,085	6,556	6,779	6,567	5,862	4,591	3,431	2,607
27	2,97	3,832	4,801	5,455	6,065	6,527	6,753	6,556	5,874	4,62	3,465	2,635

28	3	3,858	4,815	5,45	6,044	6,497	6,725	6,544	5,884	4,649	3,499	2,663
29	3,029	3,884	4,829	5,444	6,022	6,465	6,695	6,53	5,894	4,676	3,531	2,689
30	3,058	3,909	4,842	5,437	5,999	6,433	6,665	6,514	5,901	4,702	3,563	2,715
31	3,085	3,933	4,854	5,428	5,974	6,399	6,633	6,497	5,908	4,727	3,593	2,74
32	3,112	3,956	4,864	5,419	5,949	6,364	6,6	6,479	5,912	4,751	3,623	2,765
33	3,138	3,978	4,873	5,408	5,922	6,328	6,566	6,46	5,916	4,773	3,652	2,788
34	3,164	3,999	4,881	5,396	5,894	6,291	6,53	6,439	5,918	4,795	3,68	2,811
35	3,188	4,019	4,888	5,383	5,865	6,253	6,493	6,416	5,919	4,815	3,707	2,834
36	3,212	4,038	4,894	5,369	5,834	6,213	6,455	6,393	5,918	4,834	3,734	2,855
37	3,235	4,056	4,899	5,353	5,803	6,173	6,416	6,368	5,916	4,852	3,759	2,876
38	3,257	4,073	4,902	5,337	5,771	6,131	6,376	6,341	5,912	4,869	3,783	2,896
39	3,278	4,089	4,905	5,319	5,737	6,088	6,334	6,313	5,907	4,884	3,807	2,915
40	3,299	4,104	4,906	5,3	5,702	6,044	6,291	6,284	5,9	4,898	3,829	2,933
41	3,318	4,118	4,906	5,28	5,667	5,999	6,247	6,253	5,892	4,911	3,85	2,951
42	3,337	4,131	4,905	5,259	5,63	5,953	6,202	6,222	5,883	4,923	3,871	2,968
43	3,355	4,143	4,902	5,237	5,592	5,906	6,155	6,188	5,872	4,934	3,89	2,984
44	3,372	4,154	4,899	5,213	5,553	5,858	6,108	6,154	5,86	4,943	3,909	2,999
45	3,389	4,165	4,894	5,189	5,513	5,809	6,059	6,118	5,847	4,951	3,926	3,014
46	3,404	4,174	4,888	5,163	5,472	5,759	6,009	6,081	5,832	4,958	3,943	3,027
47	3,419	4,182	4,882	5,136	5,43	5,708	5,958	6,042	5,815	4,964	3,958	3,04
48	3,432	4,189	4,873	5,109	5,387	5,655	5,906	6,003	5,798	4,969	3,973	3,052
49	3,445	4,194	4,864	5,08	5,342	5,602	5,853	5,962	5,778	4,972	3,986	3,063
50	3,457	4,199	4,854	5,05	5,297	5,548	5,799	5,919	5,758	4,974	3,999	3,073
51	3,468	4,203	4,842	5,019	5,251	5,493	5,744	5,876	5,736	4,975	4,01	3,083
52	3,479	4,206	4,83	4,987	5,204	5,437	5,687	5,831	5,713	4,974	4,021	3,092
53	3,488	4,208	4,816	4,953	5,156	5,38	5,63	5,785	5,688	4,972	4,03	3,1
54	3,497	4,209	4,801	4,919	5,107	5,322	5,572	5,738	5,662	4,969	4,038	3,107
55	3,504	4,208	4,785	4,884	5,057	5,263	5,513	5,69	5,635	4,965	4,046	3,113
56	3,511	4,207	4,768	4,848	5,007	5,203	5,452	5,64	5,606	4,96	4,052	3,118
57	3,517	4,205	4,749	4,811	4,955	5,143	5,391	5,59	5,576	4,953	4,057	3,123
58	3,522	4,201	4,73	4,772	4,903	5,082	5,329	5,538	5,545	4,945	4,061	3,126
59	3,526	4,197	4,71	4,733	4,849	5,02	5,266	5,485	5,512	4,936	4,065	3,129
60	3,529	4,192	4,688	4,693	4,795	4,957	5,202	5,431	5,479	4,926	4,067	3,131
61	3,531	4,185	4,665	4,652	4,74	4,893	5,137	5,376	5,443	4,914	4,068	3,132
62	3,532	4,178	4,642	4,61	4,684	4,829	5,072	5,32	5,407	4,902	4,068	3,132
63	3,533	4,169	4,617	4,567	4,628	4,763	5,005	5,262	5,369	4,888	4,067	3,132
64	3,532	4,16	4,591	4,523	4,57	4,698	4,938	5,204	5,33	4,872	4,065	3,13
65	3,531	4,149	4,564	4,478	4,512	4,631	4,87	5,145	5,29	4,856	4,062	3,128
66	3,529	4,137	4,536	4,432	4,454	4,564	4,801	5,085	5,249	4,839	4,058	3,125
67	3,526	4,125	4,507	4,386	4,394	4,496	4,732	5,024	5,206	4,82	4,053	3,121
68	3,522	4,111	4,477	4,338	4,334	4,428	4,662	4,961	5,162	4,8	4,046	3,116
69	3,517	4,097	4,445	4,29	4,273	4,359	4,591	4,898	5,117	4,779	4,039	3,111
70	3,511	4,081	4,413	4,241	4,212	4,289	4,519	4,834	5,071	4,756	4,031	3,104
71	3,504	4,065	4,38	4,191	4,15	4,219	4,447	4,769	5,023	4,733	4,022	3,097
72	3,496	4,047	4,346	4,14	4,087	4,149	4,375	4,704	4,975	4,708	4,011	3,089
73	3,488	4,028	4,311	4,089	4,024	4,077	4,301	4,637	4,925	4,682	4	3,08
74	3,479	4,009	4,275	4,036	3,96	4,006	4,228	4,57	4,874	4,655	3,988	3,07
75	3,468	3,988	4,237	3,983	3,896	3,934	4,153	4,502	4,822	4,627	3,974	3,059
76	3,457	3,967	4,199	3,93	3,831	3,862	4,078	4,433	4,769	4,598	3,96	3,048
77	3,445	3,944	4,16	3,875	3,766	3,789	4,003	4,363	4,715	4,568	3,945	3,036
78	3,432	3,921	4,12	3,82	3,7	3,716	3,927	4,293	4,66	4,536	3,928	3,023
79	3,419	3,897	4,08	3,764	3,634	3,642	3,851	4,221	4,604	4,504	3,911	3,009
80	3,404	3,871	4,038	3,708	3,567	3,569	3,775	4,15	4,547	4,47	3,893	2,994
81	3,389	3,845	3,995	3,651	3,5	3,495	3,698	4,077	4,489	4,435	3,873	2,979
82	3,372	3,818	3,952	3,593	3,433	3,421	3,621	4,004	4,43	4,399	3,853	2,962
83	3,355	3,79	3,907	3,535	3,365	3,346	3,543	3,931	4,37	4,363	3,832	2,945
84	3,337	3,761	3,862	3,476	3,297	3,272	3,466	3,857	4,309	4,325	3,809	2,927
85	3,318	3,731	3,816	3,417	3,229	3,197	3,388	3,782	4,247	4,286	3,786	2,909
86	3,299	3,7	3,769	3,357	3,161	3,123	3,31	3,707	4,184	4,246	3,762	2,889

87	3,278	3,669	3,721	3,297	3,092	3,048	3,232	3,631	4,12	4,205	3,737	2,869
88	3,257	3,636	3,673	3,236	3,024	2,973	3,153	3,555	4,055	4,163	3,711	2,848
89	3,235	3,603	3,623	3,175	2,955	2,899	3,075	3,479	3,99	4,12	3,684	2,826
90	3,212	3,568	3,573	3,113	2,886	2,824	2,997	3,402	3,924	4,076	3,656	2,804
β_{opt}	63	54	41	23	9	0	4	19	35	51	62	62



Şekil 5.3. Atmosfer dışı (H_0), GEPA'dan alınan (H_{GEPA}) ve hesaplanan ($H_{HESAPLAMA}$) aylık ortalama günlük güneş ışınlamalarının ve berraklık indeksinin aylara göre (K_t) değişimi

Bekleneceği gibi, Tablo 5.2 ve Şekil 5.3'ten, Ankara ilinin yatay düzlemine ($\beta = 0^\circ$) düşen en yüksek ve en düşük aylık ortalama günlük güneş radyasyonu miktarı, sırasıyla temmuz ve aralık aylarında olup $7,05 \text{ (kWh/m}^2\text{-gün)}$ ve $1,67 \text{ (kWh/m}^2\text{-gün)}$ 'ye ulaşabilir. Bu değerler, GEPA resmi sayfasında yayınlanan Ankara'ya ait güneş enerjisi verileri olup, sırasıyla $6,31 \text{ (kWh/m}^2\text{-gün)}$ ve $1,46 \text{ (kWh/m}^2\text{-gün)}$ ile yaklaşık olarak uyumludur. Bakırcı, Kadir [80] çalışmasında Ankara ilinin (enlem = $39^\circ 57'$ Kuzey) ortalama aylık günlük güneş ışınlamalarının (H) değerini hesaplamış ve temmuz ve aralık aylarında güneş radyasyonu miktarının sırasıyla $23,88 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ ($\approx 6,63 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$) ve $5,11 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ ($\approx 1,41 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$) değeriyle en yüksek seviyede olduğunu tespit etmiştir.

Yaz aylarında güneş ışınları dünyaya dik bir açıyla çarptığı için ışık çok fazla yayılmaz ve herhangi bir noktaya çarpan enerji miktarı artar. Ayrıca yaz günlerinin uzun güneşlenme süresi, dünyanın daha fazla güneş ışığı almasına neden olur. Yaz aylarında bulut azaldığı için ağustos ayında berraklık indeksi 0,63'e ulaşarak yükselir.

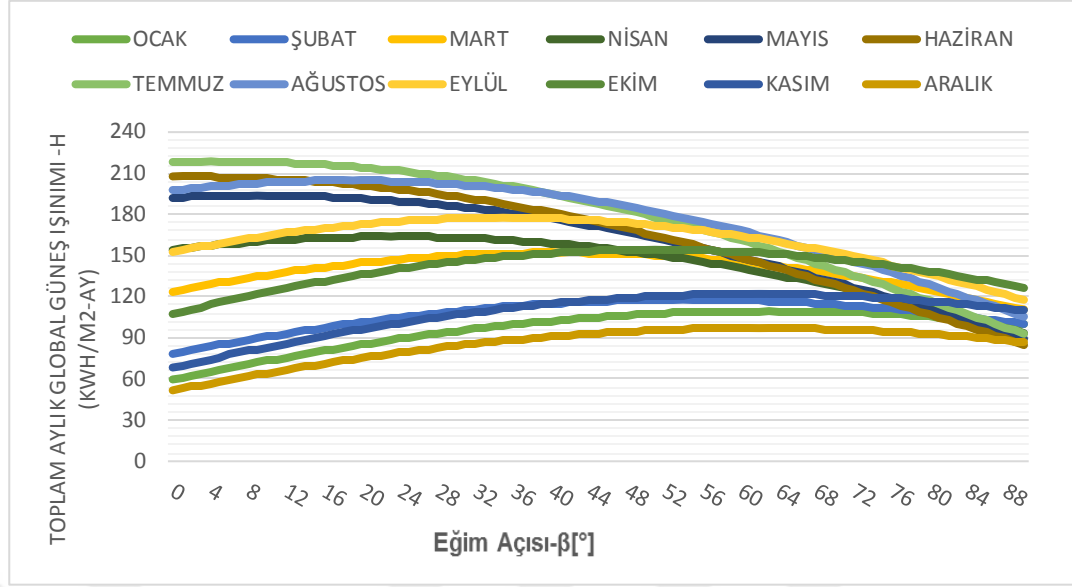
5.3.2. Aylık güneş ışınlamı ($\dot{H}_T$) ve aylık otimum eğim açıları ($\beta_{opt,ay}$)

Denklem 4.11 ve Tablo 5.2’de ifade edilen verilere göre, farklı eğim açılarında tüm aylar için toplam aylık güneş ışınlamı hesaplanmış ve maksimum toplam aylık ışınlamın olduğu açı değeri tespit edilerek, aylık bazda optimum eğim açıları değeri saptamada bulunmuştur. Bu sonuçlar, Tablo 5.3’te verildi ve Şekil 5.4’te gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Ankara’nın Yenimahalle ilçesi için toplam aylık ışınlam değerleri ($\dot{H}_T$) [$kWh/m^2\text{-ay}$]

β [°]	Ock.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Eki.	Kas.	Ara.
0	59,7	78,3	123,8	154,4	192,4	207,7	218,5	197,6	152,3	107,4	68,4	51,7
1	61,1	79,6	125,1	155,2	192,7	207,6	218,6	198,4	153,7	109,1	69,9	53,0
2	62,5	80,9	126,4	155,9	192,9	207,5	218,7	199,0	155,1	110,7	71,5	54,3
3	63,9	82,3	127,7	156,6	193,1	207,4	218,7	199,7	156,4	112,4	73,0	55,6
4	65,2	83,5	128,9	157,3	193,3	207,3	218,7	200,3	157,7	114,0	74,5	56,9
5	66,6	84,8	130,1	158,0	193,4	207,1	218,7	200,9	158,9	115,6	76,0	58,1
6	67,9	86,1	131,3	158,6	193,5	206,9	218,6	201,4	160,1	117,2	77,5	59,4
7	69,3	87,3	132,5	159,2	193,6	206,7	218,6	201,9	161,3	118,7	79,0	60,6
8	70,6	88,5	133,6	159,7	193,7	206,5	218,4	202,4	162,4	120,2	80,4	61,8
9	71,9	89,7	134,7	160,2	193,7	206,2	218,3	202,8	163,5	121,7	81,9	63,1
10	73,2	90,9	135,8	160,7	193,6	205,9	218,1	203,2	164,5	123,2	83,3	64,2
11	74,4	92,0	136,8	161,2	193,6	205,6	217,9	203,6	165,5	124,6	84,7	65,4
12	75,7	93,1	137,8	161,6	193,5	205,2	217,7	203,9	166,5	126,0	86,0	66,6
13	76,9	94,2	138,7	162,0	193,4	204,8	217,4	204,1	167,4	127,4	87,4	67,7
14	78,1	95,3	139,7	162,3	193,2	204,4	217,0	204,3	168,3	128,7	88,7	68,8
15	79,3	96,4	140,6	162,6	193,1	204,0	216,7	204,5	169,2	130,0	90,0	69,9
16	80,5	97,4	141,5	162,9	192,8	203,5	216,3	204,6	170,0	131,3	91,3	71,0
17	81,6	98,4	142,3	163,1	192,6	202,9	215,8	204,7	170,8	132,6	92,6	72,1
18	82,8	99,4	143,1	163,3	192,3	202,4	215,4	204,8	171,5	133,8	93,8	73,1
19	83,9	100,4	143,9	163,5	192,0	201,8	214,9	204,8	172,2	135,0	95,0	74,2
20	85,0	101,3	144,6	163,7	191,6	201,2	214,3	204,7	172,8	136,1	96,2	75,2
21	86,1	102,3	145,3	163,8	191,2	200,5	213,7	204,7	173,4	137,2	97,4	76,2
22	87,1	103,2	146,0	163,8	190,8	199,8	213,1	204,5	174,0	138,3	98,6	77,1
23	88,2	104,0	146,6	163,9	190,3	199,1	212,4	204,4	174,5	139,4	99,7	78,1
24	89,2	104,9	147,2	163,8	189,8	198,3	211,7	204,1	175,0	140,4	100,8	79,0
25	90,2	105,7	147,8	163,8	189,2	197,5	210,9	203,9	175,5	141,4	101,9	79,9
26	91,1	106,5	148,3	163,7	188,6	196,7	210,2	203,6	175,9	142,3	102,9	80,8
27	92,1	107,3	148,8	163,6	188,0	195,8	209,3	203,2	176,2	143,2	104,0	81,7
28	93,0	108,0	149,3	163,5	187,4	194,9	208,5	202,9	176,5	144,1	105,0	82,5
29	93,9	108,8	149,7	163,3	186,7	194,0	207,6	202,4	176,8	144,9	105,9	83,4
30	94,8	109,4	150,1	163,1	186,0	193,0	206,6	201,9	177,0	145,8	106,9	84,2
31	95,6	110,1	150,5	162,8	185,2	192,0	205,6	201,4	177,2	146,5	107,8	84,9
32	96,5	110,8	150,8	162,6	184,4	190,9	204,6	200,9	177,4	147,3	108,7	85,7
33	97,3	111,4	151,1	162,2	183,6	189,8	203,5	200,3	177,5	148,0	109,6	86,4
34	98,1	112,0	151,3	161,9	182,7	188,7	202,4	199,6	177,5	148,6	110,4	87,2
35	98,8	112,5	151,5	161,5	181,8	187,6	201,3	198,9	177,6	149,3	111,2	87,8
36	99,6	113,1	151,7	161,1	180,9	186,4	200,1	198,2	177,5	149,9	112,0	88,5
37	100,3	113,6	151,9	160,6	179,9	185,2	198,9	197,4	177,5	150,4	112,8	89,2
38	101,0	114,0	152,0	160,1	178,9	183,9	197,6	196,6	177,4	150,9	113,5	89,8
39	101,6	114,5	152,0	159,6	177,8	182,6	196,4	195,7	177,2	151,4	114,2	90,4
40	102,3	114,9	152,0	159,0	176,8	181,3	195,0	194,8	177,0	151,8	114,9	90,9
41	102,9	115,3	152,1	158,4	175,7	180,0	193,7	193,9	176,8	152,3	115,5	91,5
42	103,5	115,7	152,0	157,8	174,5	178,6	192,3	192,9	176,5	152,6	116,1	92,0
43	104,0	116,0	152,0	157,1	173,3	177,2	190,8	191,8	176,2	152,9	116,7	92,5
44	104,5	116,3	151,9	156,4	172,1	175,7	189,3	190,8	175,8	153,2	117,3	93,0

45	105,1	116,6	151,7	155,7	170,9	174,3	187,8	189,7	175,4	153,5	117,8	93,4
46	105,5	116,9	151,5	154,9	169,6	172,8	186,3	188,5	174,9	153,7	118,3	93,8
47	106,0	117,1	151,3	154,1	168,3	171,2	184,7	187,3	174,5	153,9	118,7	94,2
48	106,4	117,3	151,1	153,3	167,0	169,7	183,1	186,1	173,9	154,0	119,2	94,6
49	106,8	117,4	150,8	152,4	165,6	168,1	181,4	184,8	173,4	154,1	119,6	95,0
50	107,2	117,6	150,5	151,5	164,2	166,4	179,8	183,5	172,7	154,2	120,0	95,3
51	107,5	117,7	150,1	150,6	162,8	164,8	178,1	182,1	172,1	154,2	120,3	95,6
52	107,8	117,7	149,7	149,6	161,3	163,1	176,3	180,8	171,4	154,2	120,6	95,8
53	108,1	117,7	149,3	148,6	159,8	161,4	174,5	179,3	170,6	154,1	120,9	96,1
54	108,4	117,8	148,8	147,6	158,3	159,7	172,7	177,9	169,9	154,1	121,1	96,3
55	108,6	117,7	148,3	146,5	156,8	157,9	170,9	176,4	169,0	153,9	121,4	96,5
56	108,8	117,7	147,8	145,4	155,2	156,1	169,0	174,8	168,2	153,8	121,6	96,7
57	109,0	117,7	147,2	144,3	153,6	154,3	167,1	173,3	167,3	153,5	121,7	96,8
58	109,2	117,6	146,6	143,2	152,0	152,4	165,2	171,7	166,4	153,3	121,8	96,9
59	109,3	117,5	146,0	142,0	150,3	150,6	163,2	170,0	165,4	153,0	121,9	97,0
60	109,4	117,4	145,3	140,8	148,6	148,7	161,3	168,4	164,4	152,7	122,0	97,1
61	109,4	117,2	144,6	139,6	146,9	146,8	159,3	166,6	163,3	152,3	122,0	97,1
62	109,4	117,0	143,9	138,3	145,2	144,9	157,2	164,9	162,2	152,0	122,0	97,1
63	109,5	116,7	143,1	137,0	143,5	142,9	155,2	163,1	161,1	151,5	122,0	97,1
64	109,4	116,5	142,3	135,7	141,7	140,9	153,1	161,3	159,9	151,0	121,9	97,0
65	109,4	116,2	141,5	134,3	139,9	138,9	151,0	159,5	158,7	150,5	121,9	97,0
66	109,4	115,8	140,6	133,0	138,1	136,9	148,8	157,6	157,5	150,0	121,7	96,9
67	109,3	115,5	139,7	131,6	136,2	134,9	146,7	155,7	156,2	149,4	121,6	96,8
68	109,2	115,1	138,8	130,1	134,4	132,8	144,5	153,8	154,9	148,8	121,4	96,6
69	109,0	114,7	137,8	128,7	132,5	130,8	142,3	151,8	153,5	148,1	121,2	96,4
70	108,8	114,3	136,8	127,2	130,6	128,7	140,1	149,9	152,1	147,4	120,9	96,2
71	108,6	113,8	135,8	125,7	128,6	126,6	137,9	147,9	150,7	146,7	120,7	96,0
72	108,4	113,3	134,7	124,2	126,7	124,5	135,6	145,8	149,2	146,0	120,3	95,8
73	108,1	112,8	133,6	122,7	124,7	122,3	133,3	143,8	147,8	145,2	120,0	95,5
74	107,8	112,2	132,5	121,1	122,8	120,2	131,1	141,7	146,2	144,3	119,6	95,2
75	107,5	111,7	131,4	119,5	120,8	118,0	128,7	139,5	144,7	143,4	119,2	94,8
76	107,2	111,1	130,2	117,9	118,8	115,8	126,4	137,4	143,1	142,5	118,8	94,5
77	106,8	110,4	129,0	116,3	116,7	113,7	124,1	135,3	141,5	141,6	118,3	94,1
78	106,4	109,8	127,7	114,6	114,7	111,5	121,7	133,1	139,8	140,6	117,9	93,7
79	106,0	109,1	126,5	112,9	112,6	109,3	119,4	130,9	138,1	139,6	117,3	93,3
80	105,5	108,4	125,2	111,2	110,6	107,1	117,0	128,6	136,4	138,6	116,8	92,8
81	105,0	107,7	123,8	109,5	108,5	104,8	114,6	126,4	134,7	137,5	116,2	92,3
82	104,5	106,9	122,5	107,8	106,4	102,6	112,2	124,1	132,9	136,4	115,6	91,8
83	104,0	106,1	121,1	106,1	104,3	100,4	109,8	121,9	131,1	135,2	115,0	91,3
84	103,4	105,3	119,7	104,3	102,2	98,2	107,4	119,6	129,3	134,1	114,3	90,7
85	102,9	104,5	118,3	102,5	100,1	95,9	105,0	117,2	127,4	132,9	113,6	90,2
86	102,3	103,6	116,8	100,7	98,0	93,7	102,6	114,9	125,5	131,6	112,9	89,6
87	101,6	102,7	115,4	98,9	95,9	91,4	100,2	112,6	123,6	130,3	112,1	88,9
88	101,0	101,8	113,8	97,1	93,7	89,2	97,8	110,2	121,7	129,0	111,3	88,3
89	100,3	100,9	112,3	95,2	91,6	87,0	95,3	107,8	119,7	127,7	110,5	87,6
90	99,6	99,9	110,8	93,4	89,5	84,7	92,9	105,5	117,7	126,3	109,7	86,9
β_{opt}	63	54	41	23	9	0	4	19	35	51	62	62



Şekil 5.4. Ankara'da kurulabilecek güneye bakan panel eğim açıları için toplam aylık küresel güneş ışınlamı değerinin değişimi

Tablo 5.3 ve Şekil 5.4'ten, haziran ayında optimum eğim açısının minimum 0°dereceye ulaştığı ve bu açıda aylık toplam radyasyonun genellikle 218,5 kWh/m² değerinde maksimum olduğu görülmüştür. Yaz günlerinde Ankara'nın gökyüzünde güneşin yörüngesinin ufuktan daha uzak ve daha uzun süre kalması nedeniyle güneş ışınları nispeten tek bir alanda yoğunlaşacaktır. Bu nedenle güneş paneli yaz aylarında yatay veya daha küçük bir açıyla monte edilmelidir. Diğer taraftan, aralık ayında güneş radyasyonu diğer aylara göre düşük seviyede 97,10 kWh/m² olup 62°'lik eğim açısı ile maksimum değere ulaşabilmektedir.

5.3.3. Toplam mevsimlik ışınlamı ($\hat{H}_T$) ve mevsimlik optimum eğim açıları ($\beta_{opt,mev}$)

Denklem 4.12 ve Tablo 5.2'de ifade edilen verilere göre, farklı eğim açılarında dört mevsim için toplam mevsimlik güneş ışınlamı ($\hat{H}_T$) hesaplanıp maksimum toplam mevsimlik ışınlamının olduğu açı değeri tespit edilerek, mevsimlik bazda optimum eğim açı değeri belirlenmiştir. Bu hesaplamaların sonuçları Tablo 5.4'te ifade edilmiş ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

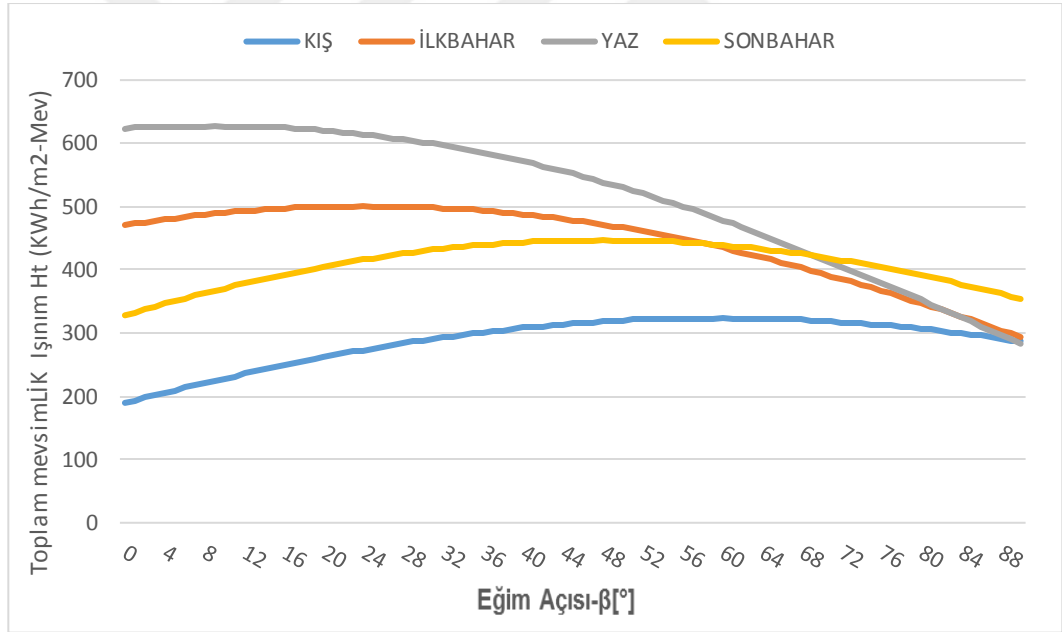
Tablo 5.4. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için toplam mevsimlik ışınlamı değerleri ($\hat{H}_T$) [kWh/m²-mev]

Eğim Açısı- β [°]	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
0	189,65	470,66	623,84	328,08
1	193,72	473,00	624,59	332,72
2	197,75	475,26	625,25	337,29
3	201,73	477,43	625,83	341,78

4	205,67	479,52	626,32	346,19
5	209,56	481,52	626,72	350,53
6	213,40	483,42	627,02	354,78
7	217,19	485,23	627,23	358,95
8	220,93	486,95	627,34	363,04
9	224,62	488,57	627,35	367,04
10	228,26	490,10	627,25	370,96
11	231,85	491,53	627,05	374,79
12	235,38	492,86	626,74	378,54
13	238,85	494,09	626,32	382,19
14	242,27	495,22	625,79	385,75
15	245,63	496,25	625,15	389,22
16	248,93	497,17	624,39	392,60
17	252,17	498,00	623,52	395,89
18	255,35	498,72	622,53	399,08
19	258,46	499,33	621,43	402,18
20	261,52	499,85	620,21	405,18
21	264,51	500,25	618,87	408,08
22	267,43	500,56	617,42	410,88
23	270,29	500,75	615,85	413,59
24	273,09	500,84	614,16	416,19
25	275,81	500,83	612,35	418,70
26	278,47	500,71	610,42	421,10
27	281,06	500,48	608,38	423,40
28	283,58	500,15	606,21	425,60
29	286,03	499,71	603,93	427,69
30	288,41	499,16	601,53	429,68
31	290,71	498,51	599,02	431,56
32	292,94	497,75	596,38	433,34
33	295,10	496,88	593,63	435,02
34	297,19	495,91	590,77	436,58
35	299,20	494,83	587,78	438,04
36	301,14	493,64	584,69	439,40
37	303,00	492,35	581,47	440,64
38	304,78	490,96	578,15	441,78
39	306,48	489,46	574,71	442,81
40	308,11	487,86	571,16	443,72

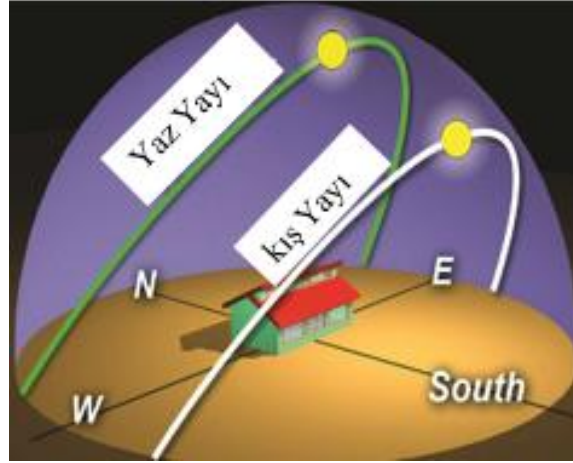
41	309,66	486,15	567,50	444,53
42	311,14	484,33	563,72	445,24
43	312,53	482,42	559,84	445,83
44	313,84	480,40	555,85	446,31
45	315,08	478,28	551,75	446,68
46	316,23	476,06	547,55	446,94
47	317,30	473,74	543,24	447,09
48	318,30	471,32	538,83	447,13
49	319,21	468,80	534,32	447,06
50	320,04	466,18	529,70	446,88
51	320,79	463,46	524,99	446,59
52	321,45	460,65	520,17	446,19
53	322,04	457,74	515,27	445,69
54	322,54	454,73	510,26	445,07
55	322,96	451,64	505,16	444,34
56	323,30	448,44	499,97	443,50
57	323,55	445,16	494,69	442,55
58	323,72	441,78	489,32	441,50
59	323,81	438,32	483,87	440,33
60	323,82	434,76	478,32	439,06
61	323,74	431,12	472,70	437,68
62	323,58	427,39	466,99	436,19
63	323,34	423,58	461,21	434,60
64	323,02	419,68	455,34	432,90
65	322,61	415,70	449,40	431,09
66	322,12	411,64	443,39	429,18
67	321,55	407,49	437,31	427,17
68	320,89	403,27	431,15	425,05
69	320,16	398,97	424,93	422,82
70	319,34	394,59	418,64	420,50
71	318,44	390,14	412,29	418,07
72	317,46	385,62	405,88	415,54
73	316,40	381,03	399,42	412,91
74	315,26	376,36	392,89	410,18
75	314,03	371,63	386,31	407,35
76	312,73	366,83	379,69	404,43
77	311,35	361,96	373,01	401,40

78	309,89	357,03	366,29	398,28
79	308,35	352,04	359,52	395,07
80	306,74	346,99	352,72	391,76
81	305,04	341,88	345,87	388,36
82	303,27	336,72	338,99	384,86
83	301,42	331,50	332,08	381,28
84	299,50	326,23	325,14	377,60
85	297,50	320,91	318,18	373,84
86	295,43	315,54	311,19	369,99
87	293,28	310,12	304,18	366,05
88	291,06	304,66	297,16	362,02
89	288,76	299,16	290,12	357,92
90	286,39	293,62	283,07	353,73
$\beta_{opt} [^\circ]$	60	24	9	48

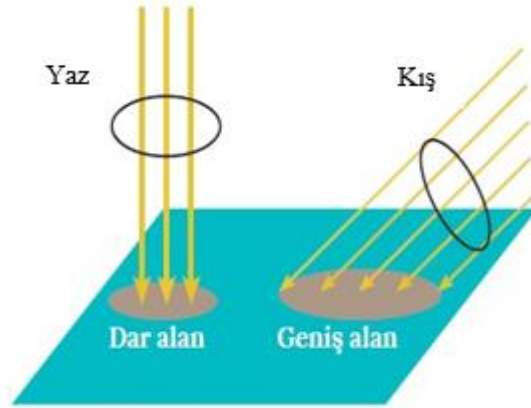


Şekil 5.5. Ankara'da kurulabilecek ve güneye bakan panel eğim açıları için toplam mevsimlik global güneş ışınlam ($\hat{H}_T$) değerinin değişimi

Hesaplanan sonuçlardan (Tablo 5.4), eğimli kolektörün kışın 323,82 kWh/m² ile eğim açısı 60°; ilkbaharda 500,84 kWh/m² ile eğim açısı 24°; yazın 627,35 kWh/m² ile 9°; sonbaharda ise 447,13 kWh/m² ile eğim açısı 48° olduğunda maksimum güneş enerjisinin yakalandığı görülmektedir. Yaz aylarında panel yüzeyinin eğimi arttıkça aylık toplam günlük ışınlam değerleri azalmaktadır. Kış aylarında ise yüksek eğim açılarında global ışınlam değerleri artmaktadır.



Şekil 5.6. Mevsimlerde kuzey kürede güneş yolu [81]



Şekil 5.7. Güneş geliş açısının güneş şiddetine etkisi [82]

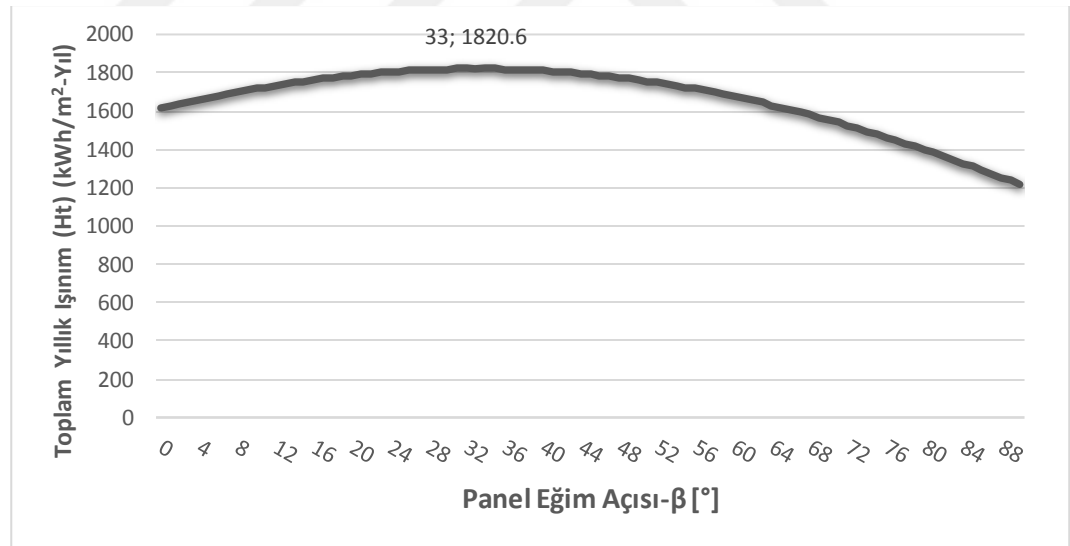
Yaz günlerinde uzun güneşlenme süresi (Şekil 5.6) olmasının yanı sıra, güneş ışınlarının dünyaya dik bir açıyla çarpması (Şekil 5.7) nedeniyle ışık çok fazla yayılmamakta ve dolayısıyla herhangi bir noktaya çarpan günlük enerji miktarı artmaktadır. Kış günlerinin güneşlenme süresinin kısa olmasının yanı sıra güneşin ufka daha yakın olması nedeniyle güneş ışığı dünyaya daha küçük açıyla ulaşmakta ve güneş enerjisi geniş bir alana yayılmaktadır.

5.3.4. Toplam yıllık ışıınımı ($\bar{H}_T$) ve yıllık optimum eğim açısı ($\beta_{opt,Yıl}$)

Denklem 5.15 ve Tablo 5.2'ye dayanarak Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde bulunabilecek eğimli yüzeye düşen toplam yıllık küresel güneş ışıınımı miktarı tahmin edilmiş ve Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.5. Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için eğik düzleme β (°) düşen toplam aylık küresel güneş ışınlam değerleri ($\bar{H}_T$) [kWh/m²-gün]

β (°)	$\bar{H}_T$	β (°)	$\bar{H}_T$	β (°)	$\bar{H}_T$	β (°)	$\bar{H}_T$	β (°)	$\bar{H}_T$
0	1612,2	18	1775,7	36	1818,9	54	1732,6	72	1524,5
1	1624,0	19	1781,4	37	1817,5	55	1724,1	73	1509,7
2	1635,5	20	1786,7	38	1815,7	56	1715,2	74	1494,7
3	1646,8	21	1791,7	39	1813,5	57	1706,0	75	1479,3
4	1657,7	22	1796,3	40	1810,9	58	1696,3	76	1463,7
5	1668,3	23	1800,5	41	1807,8	59	1686,3	77	1447,7
6	1678,6	24	1804,3	42	1804,4	60	1676,0	78	1431,5
7	1688,6	25	1807,7	43	1800,6	61	1665,2	79	1415,0
8	1698,3	26	1810,7	44	1796,4	62	1654,2	80	1398,2
9	1707,6	27	1813,3	45	1791,8	63	1642,7	81	1381,2
10	1716,6	28	1815,5	46	1786,8	64	1630,9	82	1363,8
11	1725,2	29	1817,4	47	1781,4	65	1618,8	83	1346,3
12	1733,5	30	1818,8	48	1775,6	66	1606,3	84	1328,5
13	1741,4	31	1819,8	49	1769,4	67	1593,5	85	1310,4
14	1749,0	32	1820,4	50	1762,8	68	1580,4	86	1292,1
15	1756,2	33	1820,6	51	1755,8	69	1566,9	87	1273,6
16	1763,1	34	1820,4	52	1748,5	70	1553,1	88	1254,9
17	1769,6	35	1819,9	53	1740,7	71	1538,9	89	1236,0
								90	1216,8
β_{opt} [°]									33



Şekil 5.8. Ankara'da kurulabilecek ve güneye bakan panelin eğim açılarına β (°) göre toplam yıllık küresel güneş ışınlam ($\bar{H}_T$) değerinin değişimi

Tablo 5.5 ve Şekil 5.8'de sunulan verilerden, Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde kurulabilecek güneye bakan sabit eğimli bir güneş enerjisi sisteminin, eğim açısı 33° olduğunda maksimum güneş ışınlamını aldığını görebiliriz. Bu çalışmanın sonuçları literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Güngör ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Ankara il ve ilçeleri için yıllık

optimum eğim açısı $34^{\circ} \pm 1$ olarak hesaplanmıştır [12]. Aynı zamanda bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile uyumlu olmayan çalışmalar da vardır. Çalışmamızın sonuçları, Mark Z. Jacobson ve Vijaysinh Jadhav'ın, PVWatts programını kullanarak dünyadaki tüm ülkeler için FV panellerinin optimum eğim açılarının tahminlerini sağlamayı amaçlayan çalışmalarından nispeten farklıdır. Çalışmalarının kapsamında $40^{\circ}12$ Kuzey enlem ve $32^{\circ}98$ Doğu boylamı olan Ankara şehri için eğim açısı 29° olarak hesaplanmıştır [83].



6. TARTIŞMA VE ÖNERİ

Literatür taramasında bu konuyla ilgili 15 çalışma bulunmuştur. Bu çalışmalar incelendiğinde bizim çalışmamız kadar kapsamlı olmadıkları görülmektedir. Ayrıca bizim çalışmamızın literatürde tespit edilen eksikliklerin giderilmesine katkı sağlayacak nitelikte olduğu da söylenebilir. Çalışmamızın literatürden temel farklılıkları aşağıda yer almaktadır:

- Faktörlerden sadece birini (sıcaklık veya eğim açısı) incelemeye odaklanan 4 çalışma bulunmuştur. Yaptığımız bu çalışmada ise hem panel sıcaklığı hem de eğim açısı (güneş ışıınım şiddeti) faktörleri yer almaktadır.
- Hem eğim açısını hem de sıcaklık faktörlerini ele alan 4 çalışma olmasına rağmen, güneş panelinin davranışını tanımlayabilecek ilgili tüm ana elektrik özellikleri (Akım, gerilim, güç, verim, dolgu oranı) incelenmemiştir. Yaptığımız bu çalışmada ise akım, gerilim, güç, verim, dolgu oranı olmak üzere panel elektriksel özelliklerine etkileyen panel sıcaklığı ve eğim açısı (güneş ışıınım şiddeti) faktörleri yer almaktadır.
- Optimum eğim açısını tespit etmeye yönelik 6 makale ve tez olmasına rağmen, tek bir çalışmada hem aylık, mevsimlik hem de yıllık optimal eğim açılarını kapsayan sadece iki çalışma bulunmuştur. Yaptığımız bu çalışmada ise Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açılarının tespit edilmiştir.

Bu çalışma iki ana amaca ulaşmayı amaçlamaktadır:

Birinci amaç, sıcaklık ve esas olarak eğim açısına göre değişen güneş ışıınım şiddeti ile 285 W Mono panelin elektriksel özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesidir. FV panellerin performansına etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar: güneş ışıınımı, sıcaklık, kirlenme (tozlanma) ve gölgeleme gibi çevresel faktörler; invertör verimliliği, pil verimliliği ve güneş panel yapısı olmak üzere FV sistem faktörleri; eğim açısı ve azimut açısı, uyumsuzluk kayıpları ve kablo özellikleri olmak üzere FV sistem kurulum faktörleridir. Bu faktörlerden güneş ışıınım şiddeti ve sıcaklık, panel verimine etki eden en önemli iki faktördür.

10°C - 40°C sıcaklık aralığında 0°(412 W/m²) - 75°(786 W/m²) eğim açısı (güneş ışıınımı) aralığında Matlab'da simülasyon yaparak şu sonuçlara ulaştık: panelin eğim açısına bağlı olarak güneş ışıınımı arttıkça, kısa devre akımı önemli ölçüde artmakta ve açık devre gerilimi kısmen artmakta; bu da maksimum güçte önemli bir artışa neden

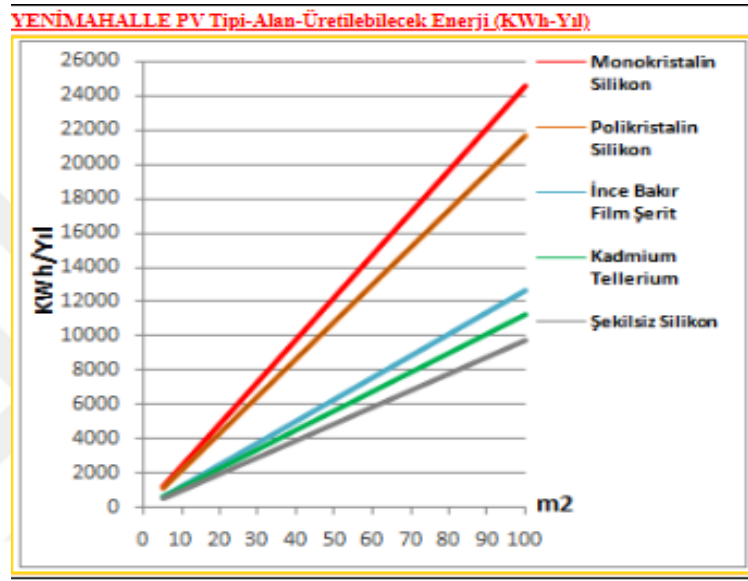
olmaktadır. Güneş panelinin verimliliği, fotonların (güneş enerjisi) yakalanıp o güneş paneli tarafından elektriğe dönüştürülebilir kısmını ifade etmektedir. Güneş ışınım şiddetinin, modül veriminde küçük bir artışa neden olduğu görülmektedir. Bu, elektron-hole çifti oluşturmak için yeterli enerjiye sahip çok sayıda foton olduğu ve dolayısıyla güneş modülünün devresinde akım yarattığı gerçeğiyle açıklanabilir. Güneş panelinin diğer elektrik parametresinden farklı olarak, güneş ışınımı azaldıkça FV hücrenin kalitesinin bir ölçüsü olarak kabul edilen dolgu oranı artmaktadır.

Sabit güneş ışınım şiddetinde ($800 \text{ W/m}^2 \approx 60^\circ$), Panel sıcaklığındaki 1°C 'lik bir artış, gerilim, maksimum güç, verimliliği ve dolgu oranında sırasıyla $0,25 \text{ v}$ ($\approx \%0,638$); $1,71 \text{ W}$ ($\approx \%0,599$); $\%0,75$ ve $\%0,180$ azalışa ve akımda ise $0,0044 \text{ A}$ ($\approx \%0,048$) artışa neden olmuştur. Bu sonuçlar literatür ile bir dereceye kadar uyumludur. Dash ve Gupta [44-45] tarafından 1000 W/m^2 'lik güneş ışınım şiddeti altında yapılan çalışmada, 1°C 'lik sıcaklık artışı gerilimi ve maksimum gücü sırasıyla $\%0,232$ ve $\%0,446$ oranında azalışa ve akımda ise $\%0,0327$ oranında artışa neden olmuştur. Sabit sıcaklıkta (20°C), 10 W/m^2 'lik bir ışınım artışı, 285 W 'lık Mono-güneş panelinin kısa akımı, gerilimi, maksimum gücü ve verimliliğinde sırasıyla $0,09 \text{ A}$ ($\approx \%0,97$); $0,03 \text{ v}$ ($\approx \%0,082$); $2,7 \text{ W}$ ($\approx \%0,94$) ve $\%0,071$ artmasına ve dolgu oranının $\%0,012$ azalmasına neden olduğunu tespit edilmiştir.

İkinci amaç ise, *Microsoft Excel hesap tablosunu geliştirerek Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde kurulabilecek panellerin aylık, mevsimlik, yıllık optimum eğim açılarının tespit edilmesidir*. Ankara ili çalışma vakasının seçilmesinin iki nedeni vardır. Birincisi, Türkiye'nin merkezinde yer alan ve güneşlenme süresi ve güneş ışınımı değerleri açısından Türkiye ortalamalarına yakın değerlere sahip olan Ankara, hesaplayacağımız güneş panelinin optimum eğim açısında Türkiye'yi temsil edeceği değerlendirilmiştir. İkincisi ise Ankara, İzmir ve İstanbul illeri için yatay bir yüzey (H) üzerindeki aylık ortalama günlük küresel ışınımı tahmin etmek için literatürde Ülgen K. ve Hepbaşlı A. [4] tarafından geliştirilen ampirik bir modelin olmasıdır.

Hesaplamalar sonucunda; aylık optimum eğim açısı değerleri ocak ayından başlayarak sırasıyla; 63° , 54° , 41° , 23° , 9° , 0° , 4° , 19° , 35° , 51° , 62° ve 62° olarak belirlenmiştir. Bu açılar kullanıldığında alınan yıllık güneş ışınım enerjisi $1919,07 \text{ kWh/m}^2$ ve 285 W -panelin ürettiği elektrik enerjisi $406,17 \text{ kWh}$ 'tır. Yaz, ilkbahar, sonbahar ve kış mevsimlerinin optimum eğim açısı sırasıyla 9° , 24° , 48° ve 60° olarak bulunmuştur. Bu

açılar kullanıldığında alınan yıllık güneş ışıınım enerjisi 1899,15 kWh/m² ve panelin ürettiği elektrik enerjisi 401,96 kWh'tır. Yıllık optimum eğim açısı 33° tespit edilmiştir. Bu açı kullanıldığında alınan yıllık güneş ışıınım enerjisi 1820,64 kWh/m² ve panelin ürettiği elektrik enerjisi 385,34 kWh'tır. 100 m²'lik Mono-güneş panellerinden oluşan güneş enerjisi sisteminin 23213,3 kWh/yıl enerji üretebileceği hesaplanmıştır. Karşılaştırıldığında bu değerin YEGM tarafından Ankara'nın Yenimahalle ilçesi için Şekil 6,1'de gösterilen FV panel tipi üretim miktarları ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.1. Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde FV Tipine göre-FV sistem alanı ve üretilen enerji (kWh-Yıl) [3]

Bu çalışmanın sonucunda aşağıdaki öneriler sunulabilir:

Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde kurulabilecek FV sistemlerden daha fazla elektrik elde etmek veya FV sistem performansını artırmak için güneş panellerinin çalışma sıcaklığının olabildiğince düşük (20 °C den az) ve yıl boyunca sabit panellerin eğim açısı optimum (33°) tutulmalıdır. Literatür taramasından polikristal güneş panellerinin sıcaklığa daha az duyarlı olduğu ve bu nedenle sıcak iklimlerde tercih edildiği anlaşılmıştır. FV hücrelerin sıcaklığını azaltmak için paneller iyi havalandırılmalıdır. Ayrıca soğutma amacıyla güneş panellerinin arkasının havalandırılabilmesi için çatının inşası sırasında gerekli fizibilitenin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmanın kapsamında geliştirilen simülasyon modelleme (MATLAB Grafik Arayüzü-GUI) yardımıyla geliştirilebileceği ve dünyanın herhangi bir

konumunda bulunabilecek bir FV modülün elektrik performansını hesaplayabilmek için araç (Program) olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Ocak ayından başlayarak her ay sonunda güneş panellerinin eğim açılarının 63°, 54°, 41°, 23°, 9°, 0°, 4°, 19°, 35°, 51°, 62° ve 62° olarak ayarlanmasıyla Ankara'nın Yenimahalle ilçesinde kurulabilecek güneş paneli sisteminden daha verimli bir performans elde edilebileceği düşünülmektedir. Aylık eğim açısına göre ayarlamamanın mümkün olmadığı durumlarda yaz, ilkbahar, sonbahar ve kış mevsimlerinin optimum panel eğim açısının sırasıyla 9°, 24°, 48° ve 60° olduğu bulunmaktadır. FV paneller, kuzey yarım kürede güney yönüne, güney yarım kürede ise kuzey yönüne yönlendirilmelidir. Bina tasarımı yapılırken çatının yönelimi ve eğim açısı dikkate alınmalıdır. Ankara'daki binaların çatısı güneye doğru yönlendirilmeli ve 33° eğimli olmalıdır.

KAYNAKÇA

- [1] Lewis, N. S. & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 103(43), 15729-15735.
- [2] (MGM) Meteoroloji Genel Müdürlüğü <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=7/>. Erişim Tarihi: 05.06.2020.
- [3] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (GEPA). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator>. Erişim Tarihi: 11.06.2020.
- [4] Ulgen, K. and Hepbasli, A. (2004). Solar radiation models. Part 2: Comparison and developing new models. *Energy Sources*, 26: 521-530.
- [5] Durdağ, A. (2019). Effect of temperature on photovoltaic panels efficiency. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep University, Engineering Physics, Gaziantep-Türkiye.
- [6] Eker, B. S. (2019). Güneş panelleri için optimum eğim açısının belirlenmesi, rüzgarın soğutma etkisinin verime etkilerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Bursa, Türkiye.
- [7] Bakırcı, K. & Kaltakkıran, G. (2018). Determination of tilt angles of solar panels: a study on gaziantep. *UEMK 2018 Bildiri Özetleri Kitabı 18-19 Ekim 2018 Hukuk Fakültesi*, 393.
- [8] Sancar, M.R. (2018). FV panelin performansına etki eden faktörlerin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı*, Isparta, Türkiye.
- [9] Yılmaz, G., (2018). Türkiye'deki güneş panellerinin optimum eğim açılarının analizi. *Yüksek lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalı*. Erzurum, Türkiye.
- [10] Shareef, S. J. M. (2017). The impact of tilt angle on photovoltaic panel output. *ZANCO J. Pure Appl. Sci*, 29, 107-118.

- [11] Amelia, A. R., Irwan, Y. M., Leow, W. Z., Irwanto, M., Safwati, I., & Zhafarina, M. (2016). Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 6(5), 682-688.
- [12] Koçer, A., Şevik, S., & Güngör, A. (2016). Ankara ve İlçeleri için Güneş Kollektörü Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1), 63-78.
- [13] Karafil, A., Özbay, H., & Kesler, M. (2016). Sıcaklık ve güneş ışıının değişimlerinin FV panel gücü üzerindeki etkilerinin simülasyon analizi. *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 11-13.
- [14] Singh, S.K., Jain, U.A., & Edison, G. (2014). MATLAB/Simulink model for optimization of tilt angle of solar panels using weighted average method. *VIT University. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11, 27-32.
- [15] Javed, A. (2014). *The effect of temperatures on the silicon solar cell. International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, 9(3). 305-308.
- [16] Eteiba, M. B., El Shenawy, E. T., Shazly, J. H., & Hafez, A. Z. (2013). A Photovoltaic (Cell, Module, Array) Simulation and Monitoring Model using MATLAB?/GUI Interface, *International Journal of Computer Applications*, 69(6).
- [17] Asowata, O., Swart, J., & Pienaar, C. (2012). Optimum tilt angles for photovoltaic panels during winter months in the vaal triangle, south africa. *Smart Grid and Renewable Energy*, 3(02), 119.
- [18] Hanif, M., Ramzan, M., Rahman, M., Khan, M., Amin, M., & Aamir, M. (2012). Studying power output of PV solar panels at different temperatures and tilt angles. *ISESCO JOURNAL of Science and Technology*, 8(14), 9-12.
- [19] International Renewable Energy Agency (IRENA). " <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies> ' adrisinden alındı. Erişim Tarihi: 25.04.2021.

- [20] Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ) Resmi Web sitesi. Web URL: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari7>. Erişim Tarihi: 06.09.2020.
- [21] Türkiye'nin Enerji Görünümü. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/TEG-202012_T%C3%BCrkiye%27de%20G%C3%BCne%C5%9F%20Enerjisi_Evre_n%20%C3%96zg%C3%BCr.pdf. Erişim Tarihi: 02.03.2020.
- [22] Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons.
- [23] Eren, C. (2019). Güneş Panellerinin Yerleştirilmesinde Optimum Eğim Açısı İçin Arayüz Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Ankara.
- [24] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS). (2013). *Planning and Installing Photovoltaic Systems. A Guide for Installers, Architects and Engineers*. London: Routledge.
- [25] Öztürk, H. H.. (2017). Güneş Enerjisinden FV Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi Ve Etkili Etmenler. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam/Adana.
- [26] Akçay, E. M. (2012). Sol-gel yöntemleriyle hazırlanmış titanyum oksit (TiO_x) ve çinko oksit kompakt tabakalarının tersine çevrilmiş FV hücrelerin verimine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı. İstanbul.
- [27] Colinge, J. P., & Colinge, C. A. (2005). *Physics of semiconductor devices*. Springer Science & Business Media.
- [28] Jäger, K. D., Isabella, O., Smets, A. H., van Swaaij, R. A., & Zeman, M. (2016). *Solar energy: fundamentals, technology and systems*. UIT Cambridge.
- [29] Mühendistan. “<https://muhendistan.com/sarj-kontrol-cihaz-i-nedir-nasil-secilir/>” adristen alındı. Erişim Tarihi: 02.05.2021.

- [30] Öztürker, H. (2016). Batman'da farklı teknolojilere sahip FV modüllerin performans karşılaştırması. *Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı*. Batman.
- [31] BRE.Narunal solar center. “Batteries and Solar Power:Guidance for domestic and small commercial” consumers. https://www.bre.co.uk/filelibrary/nsc/Documents%20Library/NSC%20Publications/88166-BRE_Solar-Consumer-Guide-A4-12pp-JAN16.pdf
- [32] Plante, R. H. (2014). Solar Energy, Photovoltaics, and Domestic Hot Water: A Technical and Economic Guide for Project Planners, Builders, and Property Owners. *Academic Press*.
- [33] Atılım, F. (2019). Balıkesir ilindeki FV sistemlerin analizi. *Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir*.
- [34] Ma, J., & Sinha, S. (2012). Thermoelectric properties of highly doped n-type polysilicon inverse opals. *Journal of Applied Physics*, 112(7), 073719.
- [35] Solar Facts and Advice. <https://www.solar-facts-and-advice.com/thin-film.html>. Erişim Tarihi: 11.01.2021
- [36] Liang, J., Schiff, E. A., Guha, S., Yan, B., & Yang, J. (2006). Hole-mobility limit of amorphous silicon solar cells. *Applied physics letters*, 88(6), 063512.
- [37] Energy Sage. <https://news.energysage.com/types-of-thin-film-solar-panels/> Erişim Tarihi:10.01.2021.
- [38] Solar Feed. <https://solarfeeds.com/wiki/copper-indium-gallium-selenide/>. Erişim Tarihi: 07.01.2021.
- [39] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı. Güneş Enerjisi Kurulum, Bakım Ve Onarım Kontrol Sisteminin Kurulumu. <https://docplayer.biz.tr/113186765-T-c-milli-egitim-bakanligi-gunes-enerjisi-kurulum-bakim-ve-onarim-kontrol-sisteminin-kurulumu.html>. Erişim Tarihi:11.08.2020.
- [40] <http://genelmekanik.com/index.php/2018/07/30/pv-enerji-sistmeleri-ve-FV-gunes-panelleri/>: Erişim Tarihi: 01.02.2020

- [41] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511.
- [42] (TSE) *Türk Standart Enstitüsü*. <https://www.fmo.org.tr/wp-content/uploads/2017/10/gokhan-durukan-3-pv-calistayi.pdf>
- [43] Adak, S., Cangi, H., & Yılmaz, A. S. (2019). FV sistemin çıkış gücünün sıcaklık ve ışımaya bağlı matematiksel modellemesi ve simülasyonu. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(1), 316-327.
- [44] Adeeb, J., Farhan, A., & Al-Salaymeh, A. (2019). Temperature effect on performance of different solar cell technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5).
- [45] Dash, P. K., & Gupta, N. C. (2015). Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(1), 148-151.
- [46] Bilgin, M. (2013). FV panellerin verimine panel yüzey sıcaklığı etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul*.
- [47] Karamanav, M. (2007). Güneş enerjisi ve güneş pilleri. *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya*.
- [48] Dorobanțu, L., & Popescu, M. O. (2013). Increasing the efficiency of photovoltaic panels through cooling water film. *UPB Sci. Bull., Series C*, 75(4), 223-232.
- [49] BAŞ, H. Ç. (2016 Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Anadalı.). “FV Sistemlerin Performans Değerlendirmesi”. Bitirme Tezi.
- [50] Quaschnig, V., & Hanitsch, R. (1996). Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. *Solar energy*, 56(6), 513-520.

- [51] Viitanen, J. (2015). Energy efficient lighting systems in buildings with integrated photovoltaics.
- [52] Vidyanandan, K.V. (2017). An overview of factors affecting the performance of solar photovoltaic systems. *Energy Scan (A house journal of Corporate Planning, NTPC Ltd.)*, 27, 2-8.
- [53] El-Shobokshy, M. S., & Hussein, F. M. (1993). Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar energy*, 51(6), 505-511.
- [54] Zaihidee, F. M., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., & Horan, B. (2016). Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1267-1278.
- [55] Verma, A., & Singhal, S. (2015). Solar PV performance parameter and recommendation for optimization of performance in large scale grid connected solar PV plant—case study. *Journal of Energy Power Sources*, 2(1), 40-53.
- [56] Kaddoura, T. O., Ramli, M. A., & Al-Turki, Y. A. (2016). On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 626-634.
- [57] Pavlović, T., Pavlović, Z., Pantić, L., & Kostić, L. J. (2010). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in niš, Serbia. *Contemporary Materials I*, 2.
- [58] Abood, A. (2015). *A comprehensive solar angles simulation and calculation using MATLAB*. *International Journal Of Energy And Environmentin dergisi*, 6(4), ss.367-376.
- [59] <https://www.quora.com/Why-is-the-angle-of-inclination-of-a-solar-still-panel-32-degrees>. Erişim Tarihi: 11.05.2021.
- [60] Sungur C. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. *Renew Energy* 2009;34(4):1119–25.
- [61] Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Convers Manag* 2004;45(11):1931–9.

- [62] Chouder A, Silvestre S. Analysis model of mismatch power losses in PV systems. *J Sol Energy Eng* 2009;131(2):024504.
- [63] Kauko, H. (2008). A MATLAB program for PV module performance analysis based on real outdoor data stored in a PostgreSQL database. *Yüksek Lisans Tezi, Jyväskylä Üniversitesi, Fizik Bilim Dalı*, Finland.
- [64] CW Enerji. <https://www.cw-enerji.com/wp-content/uploads/2019/12/CWT-60M-285-300WP.pdf>. Erişim Tarihi: 15.11.2019
- [65] Mboumboue, E. ve Njomo, D. (2013). Mathematical modeling and digital simulation of PV solar panel using MATLAB software. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3(9).
- [66] Al-Sayyab, A. K. S., Al Tmari, Z. Y., & Taher, M. K. (2019). Theoretical and experimental investigation of photovoltaic cell performance, with optimum tilted angle: Basra city case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100421.
- [67] Hamdi, R. T. A. (2017). Solar cell system simulation using MATLAB-Simulink. *Kurdistan Journal for Applied Research*. 2. 10.24017/science.2017.1.5. .
- [68] Şahin, M., & Okumuş, H. (2013). Güneş pili modülünün MATLAB/simulink ile modellenmesi ve simülasyonu (Modeling and simulation of solar cell module in MATLAB/simulink). *EMO Bilimsel Dergi*, 3(5), 17-25.
- [69] Rusirawan, D., & Farkas, I. (2014). Identification of model parameters of the photovoltaic solar cells. *Energy Procedia*, 57, 39-46.
- [70] Pandiarajan, N. & Muthu, R. Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink. *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*. ss. 258-263.
- [71] https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar_energy_section_9_1_9_3.pdf. Erişim Tarihi: 10.07. 2020
- [72] Singh, P., & Ravindra, N. M. (2012). Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar energy materials and solar cells*. 101, 36-45.

- [73] Chander, S., Purohit, A., Sharma, A., Nehra, S. P., & Dhaka, M. S. (2015). A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature. *Energy Reports*, 1, 104-109.
- [74] Chegaar, M., Hamzaoui, A., Namoda, A., Petit, P., Aillerie, M., & Herguth, A. (2013). Effect of illumination intensity on solar cells parameters. *Energy Procedia*, 36, 722-729.
- [75] *GPS Coordinates*. <https://www.gps-coordinates.net/>. (Erişim Tarihi:02.7.2020)
- [76] Dhimish, M., & Silvestre, S. (2019). Estimating the impact of azimuth-angle variations on photovoltaic annual energy production. *Clean Energy*, 3(1), 47-58.
- [77] Maleki, S. A. M., Hizam H., Gomes, C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models re-visited. *Energies*. 2017; 10(1):134.
- [78] "https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/clearness_index.html" adrisinden alındı. Erişim Tarihi: 01.05.2021.
- [79] Moltames, R. & Farajimohamad, A. (2018). Optimum tilt angle of solar pv arrays and collectors for different time periods used in Iran. *International Congress on Science and Engineering. HAMBURG – GERMANY*.
- [80] Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(8), ss. 6149–6159.
- [81] *Permaculture Research Institute*. <https://www.permaculturenews.org/2015/10/23/charting-the-suns-motion-in-relation-to-your-home-and-permaculture-site/>. (Erişim Tarihi: 02.10.2020)
- [82] Kavaz A et al. (2014). Solar Tree Project. "https://www.researchgate.net/publication/322628682_Solar_Tree_Project". Conference: IEEEESTEC 6th Student project conferenceAt: Niş, SerbiaVolume: 978-86-6125-097-2.

- [83] Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*, 169, 55-66.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Adı Soyadı: Omar AL-WADEİ

Yabancı Dili: İngilizce/Türkçe

Eğitim Geçmişi:

2010: (Lise) Osama Bin Zaid Lisesi. Yemen

2015: (Lisans) Amran Üniversitesi. Eğitim ve Fen Fakültesi. Fizik. Yemen.

2021: (Yüksek Lisans) Eskişehir Teknik Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. İleri Teknolojiler Anabilim Dalı. Enerji Kaynakları ve Yönetimi Dalı. Türkiye.