



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**VAN İLİNDE MONOFACİAL VE BİFACİAL PANELLERE
DAYALI AGRİVOLTAİK SİSTEMLERİN UYGULAMALI VE
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Fatih YALIN

**Kasım-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**VAN İLİNDE MONOFACİAL VE BİFACİAL PANELLERE
DAYALI AGRİVOLTAİK SİSTEMLERİN UYGULAMALI VE
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Fatih YALIN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI**

Diğer Jüri Üyeleri

**Doç. Dr. Hakan KARAKAYA Dr. Öğr. Üyesi Cihad FİDAN
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI**

**Kasım-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatih YALIN tarafından hazırlanan “Van İlinde Monofacial ve Bifacial Panellere Dayalı Agrivoltaik Sistemlerin Uygulamalı ve Karşılaştırmalı Analizi” adlı tez çalışması 27/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Hakan KARAKAYA

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Cihad FİDAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza

Fatih YALIN

Tarih: 27.11.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VAN İLİNDE MONOFACİAL VE BİFACİAL PANELLERE DAYALI AGRİVOLTAİK SİSTEMLERİN UYGULAMALI VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Fatih YALIN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI

2025, 78 Sayfa

Artan nüfus, küresel ısınma ve salgın hastalıklar, enerji ve gıda güvenliğini küresel ölçekte kritik bir sorun hâline getirmiştir. Bu bağlamda, tarım ve enerji üretiminin aynı arazi üzerinde birlikte gerçekleştirilebildiği agrivoltaik (AV) sistemler sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, Van ilinin Tuşba ve Başkale ilçelerinde kurulu iki farklı fotovoltaik (PV) sistem incelenmiştir. Çalışma kapsamında, panel altında tarımsal üretimin yapılmadığı geleneksel PV sistem ile panel altında tarımsal üretimin gerçekleştirildiği AV sistem uygulamalı ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tuşba ilçesinde bifacial paneller, Başkale ilçesinde ise monofacial paneller kullanılmıştır. Geleneksel PV ve AV sistemlerin performans analizinde, bifacial GES'in performans oranı (PR) %80, monofacial GES'in PR değeri ise %84,2 olarak belirlenmiş; her iki sistemde de tarımsal uygulamaya bağlı elektrik üretim azalışı yaklaşık %3 düzeyinde tespit edilmiştir. AV sistemlerde bifacial paneller altında patlıcan ve turp; monofacial paneller altında ise marul, turp, roka ve tere bitkileri yetiştirilmiştir. Panel altı mikroklima koşullarının, panel üstüne kıyasla 3–6 °C daha yüksek sıcaklık ve %5–7 oranında daha yüksek nem değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Arazi eşdeğer oranı (LER) değerleri bifacial AV sistemde patlıcan için 1,6 ve turp için 2,02; monofacial AV sistemde ise marul için 2,05, tere için 2,14, roka ve turp için 2,00 olarak hesaplanmıştır. Her iki sistem altında yetiştirilen turp bitkisi verimleri karşılaştırıldığında, monofacial panel altında bifacial panele kıyasla %7 oranında verim kaybı gözlenmiştir. Bu farkın, monofacial panellerde hücreler arasındaki boşlukların mat camla kaplanması nedeniyle bitkilere ulaşan ışık miktarının azalmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, AV sistemlerin arazi kullanım verimliliğini artırarak sürdürülebilir enerji ve tarımsal üretime önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Agrivoltaik sistemler, Monofacial fotovoltaik paneller, Bifacial fotovoltaik paneller, Arazi eşdeğer oranı, Güneş enerjisi, Tarımsal üretim, Yenilenebilir enerji

ABSTRACT

MASTER THESIS

APPLIED AND COMPARATIVE ANALYSIS OF AGRIVOLTAIC SYSTEMS BASED ON MONOFACIAL AND BIFACIAL PANELS IN VAN PROVINCE

Fatih YALIN

Batman University Graduate Education Institute

Renewable Energy Systems Department of Science

Advisor: Asst. Prof. Ali Serkan AVCI

2025, 78 Pages

Rapid population growth, global warming, and pandemic events have rendered energy and food security critical challenges at the global scale. In this context, agrivoltaic (AV) systems, where agricultural and energy production are simultaneously carried out on the same land, have emerged as a sustainable solution. In this study, two different photovoltaic (PV) systems installed in the Tuşba and Başkale districts of Van Province were investigated. A conventional PV system without agricultural activity beneath the panels and an AV system with crop cultivation beneath the panels were experimentally and comparatively evaluated. Bifacial PV panels were employed at the Tuşba site, while monofacial PV panels were used at the Başkale site. Performance analyses indicated that the performance ratio (PR) of the bifacial PV plant was 80%, whereas the PR of the monofacial PV plant was 84.2%. In both systems, an electricity production reduction of approximately 3% attributable to agricultural practices was identified. In the AV systems, eggplant and radish were cultivated beneath bifacial panels, while lettuce, radish, rocket, and cress were grown beneath monofacial panels. Microclimatic measurements revealed that sub-panel conditions exhibited temperatures 3–6 °C higher and relative humidity levels 5–7% higher than above-panel conditions. The land equivalent ratio (LER) values were calculated as 1.6 for eggplant and 2.02 for radish in the bifacial agrivoltaic system, and as 2.05 for lettuce, 2.14 for cress, and 2.00 for both rocket and radish in the monofacial agrivoltaic system. When radish yields grown under both systems were compared, a 7% yield reduction was observed under monofacial panels relative to bifacial panels. This difference was attributed to reduced light transmission to crops due to the opaque glass covering the inter-cell gaps in monofacial panels. Overall, the results demonstrate that agrivoltaic systems significantly enhance land-use efficiency and provide substantial contributions to sustainable energy and agricultural production.

Keywords: Agrivoltaic systems, Monofacial photovoltaic panels, Bifacial photovoltaic panels, Land equivalent ratio (LER), Solar energy, Agricultural production, Renewable energy

ÖN SÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ve tez çalışmamın her aşamasında bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, kendisine ne zaman danışsam kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve ilgiyle bana yardımcı olan, yapıcı yaklaşımı ve akademik destekleriyle çalışmama önemli katkılar sunan, örnek aldığım değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan AVCI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma sürecinde sahadaki ölçüm ve uygulama çalışmalarında desteklerini her zaman yanımda hissettiğim, bekçi olarak görev yapan Doğan KARADEMİR ve Şaabettin KARADEMİR'e; bunun yanında teknik süreçlerde bilgi ve tecrübesiyle katkı sağlayan Elektrik Teknikeri Burhan ERBEK ile Elektrik-Elektronik Mühendisi Abdolvahap DEMİR'e teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde manevi desteklerini ve sevgilerini her daim hissettiğim, bugünlere gelmemde büyük paya sahip olan sevgili annem Vildan YALIN ve babam Ahmet YALIN'a, aileme teşekkür ederim.

Fatih YALIN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖN SÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2.GÜNEŞ ENERJİSİ	3
2.1. Güneş Enerjisi Uygulamaları.....	3
2.1.1. Yoğunlaştırılmış güneş termik santralleri (CSP)	3
2.1.2. Yüzer güneş enerji santrali (Off-Shore).....	4
2.1.3. Bina entegreli fotovoltaik sistemler (BIPV)	4
2.1.4. Fotovoltaik sistemler ve uygulamaları.....	5
2.2. Güneş Açıları	6
2.2.1. Güneş pozisyonu.....	6
2.2.2 Güneş yükseklik açısı	7
2.2.3. Zenit açısı.....	7
2.2.4. Azimut açısı	8
2.2.5. Güneş sapma	8
2.2.6. Yüzey azimut açısı.....	8
2.2.7. Geliş açısı.....	9
2.2.8. Deklinasyon açısı.....	10
2.3. Güneş Takip Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	10
2.3.1. Tek eksenli takip sistemleri	10
2.3.2. İki eksenli takip sistemleri	11
2.3.3. Kapalı döngü takip sistemleri:	11
2.3.4. Açık döngü takip sistemleri	12
2.4. PV Sistemlerin Dünyadaki Kurulu Gücü.....	12
2.4.1. PV sistem verimini etkileyen faktörler	12
2.4.1.1. Tozlanma	13
2.4.1.2. Sıcaklık	13
2.4.1.3. DC kablo kayıpları.....	14
2.4.1.4. Spektrum kayıpları	14
2.4.1.5. PV panel yerleşimi	15
2.4.1.6. İnverter kayıpları	16

2.4.1.7. Gölgeleme kayıpları.....	17
2.5. Türkiye ve Van’da Güneş Enerji Potansiyeli	17
3. AGRİVOLTAİK SİSTEMLER.....	23
3.1 Agrivoltaik Sistem Uygulamaları	23
3.1.1. Açık agrivoltaik sistemler	23
3.1.2. Dikey agrivoltaik sistemler	24
3.1.3. Sabit açılı ve sabit eğimli sistemler	25
3.2. Türkiye’de Agrivoltaik Uygulamalar	26
3.3. Agrivoltaik Sistemlerin Tasarım Kriterleri.....	27
3.3.1. Panel yerleşim uyumu.....	28
3.4.İlgili Çalışmalar	28
4. MATERYAL VE METOD	36
4.1. Santrale Ait Fiziki Özellikler	36
4.2.Tesise Ait Elektriksel Üretim ve PV Santralının Teknik Özellikleri.....	37
4.2.1. Van-Başkale santral	37
4.2.2. Van-Tuşba santral	40
4.3.Tarımsal Üretim ve Parsel Düzeni.....	45
4.3.1. Van-Başkale.....	45
4.3.2. Van-Tuşba.....	50
4.4. FusionSolar	52
4.5. PVsyst	52
4.6.Verimlilik Analizi: Arazi Eşdeğer Oranı (LER).....	53
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	55
5.1.Elektriksel Üretim Verileri	55
5.1.1. Van-Başkale Elektrik Üretim Verileri	55
5.1.1.1. PVsyst Sistem Tasarımı	55
5.1.1.1.1. Yönlendirme	56
5.1.1.1.2. Sistem özellikleri	57
5.1.2 Van-Tuşba Elektrik Üretim Verileri	63
5.2. Tarımsal Üretim Verileri	67
5.2.1. Van-Başkale Tarımsal Üretim Verileri.....	67
5.2.1. Van-Tuşba Tarımsal Üretim Verileri.....	71
5.3. LER Analizi	73
6. SONUÇLAR	76
KAYNAKLAR	79

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yoğunlaştırılmış güneş termik santralleri (Bayraktar vd., 2023)	3
Şekil 2.2. Dünyada yüzer GES (off-shore) için kullanılan alanlar (Anonim, 2025a)	4
Şekil 2.3. Bina entegreli fotovoltaiik (BIPV) çatı uygulaması (Anonim, 2025b)	5
Şekil 2.4. PV sistem uygulaması (Anonim, 2025d)	5
Şekil 2.5. Güneş pozisyon açısı gösterimi (Salsabila, 2013)	6
Şekil 2.6. Güneş yükseklik açısı (Salsabila, 2013)	7
Şekil 2.7. Yüzey azimut açısı (Reddy ve Morehouse, 2017)	9
Şekil 2.8. Güneş geliş açısı (Kalogirou, 2023)	9
Şekil 2.9. Tek eksenli güneş takip sistemi (Anonim, 2025e)	11
Şekil 2.10. İki eksenli güneş takip sistemi (Anonim, 2025f)	11
Şekil 2.11. Dünya’da kurulu PV güç grafiği (Anonim, 2025h)	12
Şekil 2.12. PV sıcaklık verim kaybı eğrisi (Anonim, 2025j)	14
Şekil 2.13. İki eksenli güneş takip sistemi (Anonim, 2025k)	15
Şekil 2.14. PV eğim verimi (Boztepe, 2017)	16
Şekil 2.15. İnverter kayıp eğrisi (Boztepe, 2017)	16
Şekil 2.16. Gölgelemeye maruz kalan panel voltaj eğrisi	17
Şekil 2.17. Türkiye’nin güneş radyasyon haritası (Anonim, 2025l)	18
Şekil 2.18. Van ili güneşlenme radyasyonu (Anonim, 2025l)	19
Şekil 2.19. Van ili global radyasyon değeri (Anonim, 2025l)	20
Şekil 2.20. Başkale global radyasyon değeri (Anonim, 2025l)	21
Şekil 3.1. Agrivoltaiik sistemler ve tarım uygulaması (Anonim, 2025m)	24
Şekil 3.2. Dikey eksenli agrivoltaiik sistemler	25
Şekil 3.3. Sabit açılı ve eğimli agrivoltaiik sistemler	26
Şekil 3.4. Türkiye’de agrivoltaiik sistem (Anonim, 2025n)	27
Şekil 3.5. Panel yerleşim açısı	28
Şekil 4.1. Van ili Başkale ilçesi santrale ait uydu görüntüsü	37
Şekil 4.2. Van ili için a) Ortalama güneş radyasyonu dağılımı b) Başkale ilçesinin aylık ortalama güneşlenme süresi değeri c) Başkale ilçesi için PV Tipi-Alan üretililecek enerji (kWh-yıl) (Anonim, 2025l)	38
Şekil 4.3. a) Van Başkale iki sehpa arası AV alanı b) Van Başkale AV uygulamasının PV altı saha fotoğrafı	38
Şekil 4.4. Van Başkale 60 kW inverter görseli	39
Şekil 4.5. Van ili Tuşba santrale ait uydu görüntüsü	40
Şekil 4.6. Van ili için a) Ortalama güneş radyasyonu dağılımı b) Van ilini aylık ortalama güneşlenme süresi c) Van ili için PV Tipi-Alan üretililecek enerji (kWh-yıl) (Anonim, 2025l)	40
Şekil 4.7. a) PV alanının teknik çizimi b) Van AV uygulamasının saha fotoğrafı	41
Şekil 4.8. Van Tuşba 40 kw inverter görseli	42
Şekil 4.9. Huawei smart dongle	43
Şekil 4.10. a) Van Başkale termometre ölçümleri b) Van Tuşba termometre ölçümleri	44
Şekil 4.11. Pens ampermetre	45
Şekil 4.12. Van Başkale AV Deney Sahasının gösterimi	46
Şekil 4.13. Van Başkale Panel Altı Turp Gelişimi	47
Şekil 4.14. Van Başkale Panel Altı Marul Gelişimi	48
Şekil 4.15. Van Başkale Panel Altı Roka Gelişimi	49
Şekil 4.16. Van Başkale Panel Altı Tere Gelişimi	49
Şekil 4.17. Van Tuşba AV deney sahasının gösterimi	50

Şekil 4.18. Van Tuşba Panel Altı Patlıcan Gelişimi	51
Şekil 4.19. Van Tuşba Panel Altı Turp Gelişimi	52
Şekil 5.1. PVsyst program arayüzü.....	55
Şekil 5.2. Yıllık transpozisyon verimi	56
Şekil 5.3. PVsyst inverter panel seçimi	57
Şekil 5.4. Van-Başkale a) PV santralin bulunduğu konumun ufuk faktör açıları b) PVSYST gölgeleme analizi	58
Şekil 5.5. Van-Başkale a) GES topolojik yapıya panel diziliş gösterimi b) GES topolojik yapının harita üzerine oturtulması.....	59
Şekil 5.6. Van-Başkale GES santralının PR değeri	60
Şekil 5.7. Aylık üretim ve kayıp miktarları a) İnvertör kayıpları b) Yararlı enerji(üretilen) miktarı c) Işınım (kWh/m ²) miktarı	61
Şekil 5.8. Van'ın Başkale ilçesindeki GES panel verileri a) Güç (W) ve gerilim (V) grafiği b) Işınım sıcaklık arasındaki	62
Şekil 5.9. Van-Başkale, AV ve geleneksel PV panellerin aylık güç üretim analizi	63
Şekil 5.10. Van Tuşba yıllık üretim verileri	64
Şekil 5.11. Van Tuşba PV santralin PR oranı	65
Şekil 5.12. Van'ın Tuşba ilçesindeki GES panel verileri a) Güç (W) ve gerilim (V) grafiği b) Işınım sıcaklık arasındaki verim farkı	66
Şekil 5.13. Van-Tuşba AV ve geleneksel PV panellerin aylık güç üretim analizi	67
Şekil 5.14. Marul için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b)Yaprak boyu c) Mahsul miktarı ..	68
Şekil 5.15. Roka için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul miktarı ..	69
Şekil 5.16 Turp için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul miktarı ..	70
Şekil 5.17. Tere için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b)Yaprak boyu c) Mahsul miktarı ...	71
Şekil 5.18. Patlıcan için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul boyu d)Mahsul miktarı.....	72
Şekil 5.19. Turp için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul boyu d) Mahsul miktarı	73
Şekil 5.20. Patlıcan, turpa, marul, tere, roka ve turp ait LER değerleri	74

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Türkiye'nin aylara göre elektrik üretme potansiyeli.....	18
Tablo 2.2. Türkiye'nin aylara göre elektrik üretme potansiyeli.....	22
Tablo 4.1. Van iline ait genel meteorolojik istatistik veriler.....	37
Tablo 4.2.Başkale ilçesi GES kullanılan panel özellikleri	39
Tablo 4.3.Van Başkale GES'te kullanılan inverter özellikleri.....	39
Tablo 4.4. Van ili Başkale GES'te kullanılan panel özellikleri	41
Tablo 4.5. Van Tuşba GES'te kullanılan inverter özellikleri.....	42
Tablo 5.1. Literatürdeki yapılan benzer çalışmalara ait LER karşılaştırması	75



SİMGELER VE KISALTMALAR

AV	:	Agrivoltaik
BIPV	:	Bina Entegreli Fotovoltaik Sistemler
CSP	:	Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi
GEPA	:	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GW	:	Gigawatt
LER	:	Land Equivalent Ratio (Arazi Eşdeğer Oranı)
PV	:	Fotovoltaik
TW	:	Terawatt

1. GİRİŞ

Küresel ısınma, iklim değişikliği, artan nüfus, salgın hastalıklar ve savaşlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminin her geçen gün arttığını açıkça göstermektedir. Nüfus artışına paralel olarak enerjiye ve tarım ürünlerine olan ihtiyaç da artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında fotovoltaik (PV) sistemler önemli bir yere sahiptir. Ancak Güneş Enerji Santralleri (GES) için geniş ölçekli arazilere ihtiyaç duyulması, mevcut tarım arazilerinin kullanımı açısından gelecekte önemli sorunlara yol açabilecektir. Bu durum, arazilerin hibrit kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Agrivoltaik (AV) sistemler, tarım arazileri üzerine yerleştirilen PV paneller aracılığıyla hem tarımsal üretimin hem de enerji üretiminin eş zamanlı olarak gerçekleştirilebileceğini göstermektedir (Kırbaş, 2023).

Sanayileşmenin hız kazanması ve dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji ve tarım alanlarındaki ihtiyaç giderek daha kritik bir hale gelmiştir. Fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve enerji üretiminde bu kaynakların yakılmasının neden olduğu iklim değişikliği, insanlığı daha çevreci ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Ayrıca, son yıllarda yaşanan küresel salgınlar ve savaşlar, enerji arz güvenliği ile tarımsal üretimin stratejik önemini bir kez daha ortaya koymuştur.

Tarıma elverişli arazilerin sınırlı olması, nüfus artışı ve kentleşmenin hızlanması; mevcut arazi kullanımında yeni ve entegre yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu kapsamda, binalara entegre PV sistemler (BIPV), yüzer PV sistemler ve AV sistemler gibi hibrit çözümler giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

İnsan yaşamının temel ihtiyaçları arasında temiz hava, su, gıda ve enerji yer almaktadır. Tarihsel süreç incelendiğinde, insanlık enerjiyi en kolay şekilde elde etme ve kullanma eğiliminde olmuş; bu doğrultuda uzun yıllar fosil yakıtlara yönelmiştir. Ancak günümüzde enerji tüketiminin rastgele değil, çevresel etkiler gözetilerek planlanması gerektiği kabul edilmektedir. Çünkü fosil kökenli yakıtların çevreye ve ekosistemlere verdiği zararlar her geçen gün daha belirgin hale gelmektedir (Karaağaç vd., 2021).

Küresel ısınma, iklim değışikliği, nüfus artışı, salgın hastalıklar ve jeopolitik çatışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini giderek artırmaktadır. Özellikle PV sistemler, yenilenebilir enerji üretiminde öncü bir rol üstlenmektedir. Ancak GES geniş arazi kullanımına ihtiyaç duyduğundan, artan nüfusun tarımsal ürün ihtiyacını karşılamakta ilerleyen yıllarda arazi paylaşımı açısından sorunlar ortaya çıkabilecektir. Bu durum, arazilerin hibrit kullanımının önemini göstermektedir.

AV sistemler, tarım arazileri üzerine yerleştirilen PV paneller aracılığıyla aynı anda hem tarımsal üretim hem de enerji üretiminin gerçekleştirilebileceğini ortaya koyan yenilikçi bir yaklaşımdır (Kırbaş, 2023). Bu sistemler, sürdürülebilir tarım ve enerji üretimini bir arada mümkün kılarak, geleceğin entegre enerji-tarım modelleri için umut verici bir çözüm sunmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, Van ili Tuşba ve Başkale ilçelerinde kurulu monofacial ve bifacial fotovoltaiik panellere dayalı agrivoltaiik (AV) sistemlerin elektrik üretimi, mikroklima koşulları ve tarımsal verimlilik açısından uygulamalı ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmesidir. Bu kapsamda, panel altında tarımsal üretimin yapılmadığı geleneksel PV sistemler ile panel altında tarımsal üretimin gerçekleştirildiğı agrivoltaiik sistemler karşılaştırılmış; performans oranı (PR), mikroklimatik parametreler (sıcaklık ve bağıl nem) ve bitkisel verim değeri birliihte değeriendirilmiştir. Tarım ve enerji üretiminin eş zamanlı gerçekleştirildiğı bu hibrit sistemlerin arazi kullanım etkinliğı LER kullanılarak nicel olarak ortaya konulmuş; farklı panel tiplerinin ışık geçirgenliğı ve yapısal özelliklerinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri saha verilerine dayalı olarak tartışılmıştır. Elde edilen bulgular, Van ili gibi yüksek güneşlenme potansiyeline sahip bölgelerde agrivoltaiik sistemlerin sürdürülebilir enerji ve tarımsal üretimin birliihte planlanmasına yönelik uygulanabilirliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

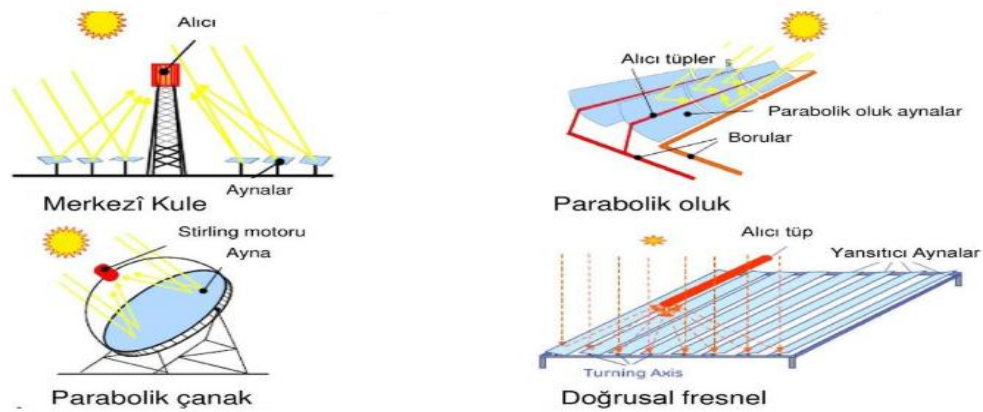
2.GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş çekirdeğinde gerçekleşen nükleer reaksiyonlar sayesinde her saniyesinde 4,3 milyon ton kütle kaybetmektedir. Bu kayıplar, enerjiye dönüşerek saniyede yaklaşık $3,6 \times 10^{26}$ joule'lük bir enerji yayılımına neden olur. Güneşten gelen bu büyük enerji akışının tamamı doğrudan yeryüzüne ulaşmaz. Canlı yaşamı için zararlı olan radyasyonlar, atmosferde bulunan karbondioksit, ozon ve su buharı gibi gazlar tarafından süzülerek etkisiz hale getirilir. Güneş enerjisinin yaklaşık %28'i atmosfer tarafından tekrar uzaya yansıtılır. Geriye kalan enerjinin %50'si kara parçaları ve okyanuslar tarafından emilir, bu enerji yeryüzünü ısıtır. Ayrıca bu enerjinin %18'i buharlaşma ve yağış döngüsüne katılır, yani su döngüsünü destekler. Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %2'si ise bitkiler tarafından fotosentez yoluyla besin üretiminde kullanılır (Vural vd., 2022).

2.1. Güneş Enerjisi Uygulamaları

2.1.1. Yoğunlaştırılmış güneş termik santralleri (CSP)

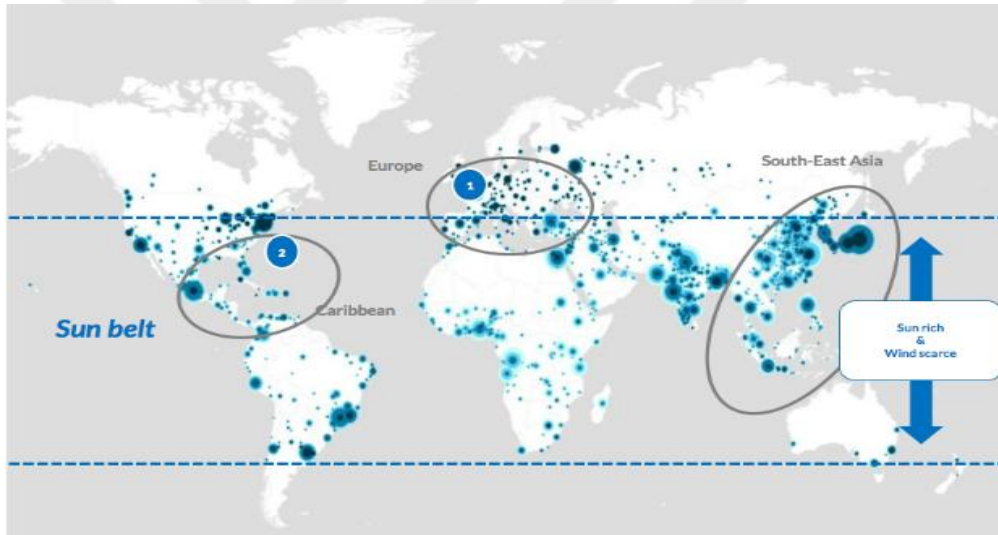
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (Concentrated Solar Power, CSP) sistemleri, güneş ışınımının akı yoğunluğunu artırarak yüksek sıcaklıklara ve yüksek enerji dönüşüm verimlerine ulaşmayı amaçlayan, bu yolla ısı enerjisi elde edilen bir enerji üretim yöntemidir. Güneş ışık akışının yoğunluğunu artırımı aynalar veya lensler kullanılarak büyük alanlara direk düşen güneş ışığının daha küçük alanlara odaklaması ile elde edilir (Bayraktar vd., 2023).



Şekil 2.1.Yoğunlaştırılmış güneş termik santralleri (Bayraktar vd., 2023)

2.1.2. Yüzer güneş enerji santrali (Off-Shore)

Kara alanları gibi su kütleleri de yoğun kullanım baskısı altında olan ve sınırlı alanlardır. Su kaynaklarının kıt olduğu bölgelerde, sulama kanallarının güneş panelleriyle kaplanması alternatif bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Ancak dünya genelindeki tüm nehirler ve göller, yeryüzünün yalnızca yaklaşık %0,2'sini kapsamaktadır. Ayrıca nehirler hâlihazırda iç ulaşım, sulama ve ekosistem hizmetleri gibi çoklu amaçlarla kullanılmakta olup, bu alanlara güneş panellerinin yerleştirilmesi mevcut kullanımlarla çakışma riski taşımaktadır. Buna karşın Karayipler, Japonya, Güney Kore ve Umman gibi bölgelerde güneş enerjisi potansiyeli yüksek olmasına rağmen rüzgâr enerjisi potansiyeli sınırlıdır (Anonim, 2025a). Bu bölgelerde kara alanlarının kısıtlı olması, karasal enerji altyapılarının kurulmasını maliyetli hâle getirirse de, çevrelerindeki deniz alanları açık deniz (off-shore) güneş enerjisi uygulamaları için önemli fırsatlar sunmaktadır.



Şekil 2.2. Dünyada yüzer GES (off-shore) için kullanılan alanlar (Anonim, 2025a)

2.1.3. Bina entegreli fotovoltaik sistemler (BIPV)

Binaya Entegre PV (BIPV) sistemler, bina kabuğunun bir veya birden fazla işlevini yerine getirirken mimari gereklilikleri karşılayan ve aynı zamanda yerinde yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlayan etkili bir çözümdür. BIPV, geleneksel bina bileşenlerinin yerini alabilecek PV modülleri ve sistemleri ifade eder, dolayısıyla güvenlik ve performans açısından hem elektrik hem de bina gereksinimlerini karşılamaları gerekir. BIPV modülleri ve sistemleri için performansla ilgili gereklilikler binanın enerji tüketimi üzerinde etkiye sahiptir ve BIPV elektrik performansını, ısı

yalıtım seviyesini, güneş ısısı kazanç katsayısını ve optik özellikleri içermektedir (Martin vd., 2022).



Şekil 2.3. Bina entegreli fotovoltaik (BIPV) çatı uygulaması (Anonim, 2025b)

2.1.4. Fotovoltaik sistemler ve uygulamaları

Güneş panellerinde yer alan PV hücreler, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesine sahiptir. Bu hücreler genellikle kristal silikon veya galyum arsenit esaslı malzemelerden üretilmekte olup, yarı iletken özellik kazandırmak amacıyla fosfor veya bor gibi katkı elementleriyle katkılanmaktadır. Bu katkılama işlemi sonucunda biri negatif yüklü (n-tipi), diğeri pozitif yüklü (p-tipi) olmak üzere iki farklı yarı iletken bölge oluşur. Hücre yüzeyine gelen fotonlar, elektronların enerji seviyelerini yükselterek hareket etmelerini sağlar ve bu sayede hücre uçları arasında potansiyel fark oluşur. Oluşan bu elektriksel akım, doğru akım (DC) şeklinde elde edilir (Anonim, 2025c).

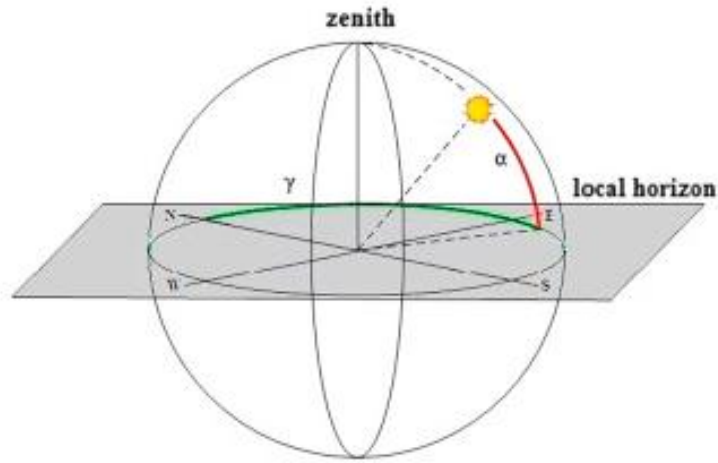


Şekil 2.4. PV sistem uygulaması (Anonim, 2025d)

2.2. Güneş Açıları

2.2.1. Güneş pozisyonu

Güneş pozisyonu, Dünya yüzeyindeki belirli bir nokta için Güneş'in gökyüzündeki konumunu tanımlayan temel bir geometrik parametredir ve güneş yükseklik açısı (α) ile güneş azimut açısı (γ) olmak üzere iki açı ile ifade edilir. Güneş yükseklik açısı, Güneş ışınlarının gözlem noktasındaki yerel ufuk düzlemi ile yaptığı açıyı temsil eder ve Güneş'in gökyüzündeki en yüksek konumuna ulaştığı yerel öğle saatinde maksimum değerini alır. Bu açı, coğrafi konum ve zamana bağlı olarak değişmekte olup yerel enlem (ϕ), güneş sapma açısı (δ) ve yerel saat açısı (ω) parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu parametreler kullanılarak güneşin anlık konumu analitik olarak hesaplanabilmekte ve PV sistemlerin konumlandırılması, eğim açısı optimizasyonu ve gölgeleme analizlerinde temel girdi olarak kullanılmaktadır (Salsabila, 2013).



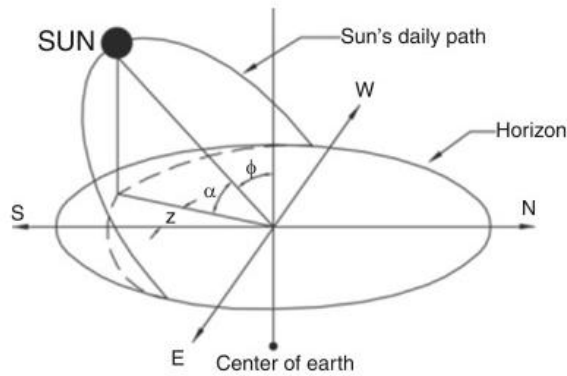
Şekil 2.5. Güneş pozisyon açısı gösterimi (Salsabila,2013)

Yukarıdaki görsele bakarak aşağıdaki denkleme göre hesaplama yapılır.

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \phi \times \sin \delta) \quad (2.1)$$

2.2.2 Güneş yükseklik açısı

Güneş yükseklik açısı, güneş ışınlarının yatay bir düzlem ile yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır. Bu açı, güneş ışınları ile düşey doğrultu arasındaki açı olan güneş zenit açısı (Φ) ile tamamlayıcı niteliktedir. Başka bir ifadeyle, güneş yükseklik açısı ile zenit açısının toplamı 90° 'dir. Bu geometrik ilişki, güneşin gökyüzündeki konumunun tanımlanmasında temel bir parametre olup güneş enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Salsabila, 2013).



Şekil 2.6. Güneş yükseklik açısı (Salsabila,2013)

$$\alpha = 90 + \varphi - \delta \quad (2.2)$$

2.2.3. Zenit açısı

Güneş zenit açısı, Güneş ışınları ile gözlem noktasındaki yerel düşey eksen arasındaki açıyı ifade eder. Bu açı, Güneş ışınlarının yatay düzlemle yaptığı açı olan güneş yükseklik açısı ile tamamlayıcı bir ilişkiye sahiptir ve iki açının toplamı 90° 'dir. Güneş zenit açısı, güneşin gökyüzündeki konumunun tanımlanmasında ve güneş geometrisine dayalı enerji hesaplamalarında temel bir parametre olarak kullanılmaktadır (Salsabila, 2013).

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (2.3)$$

2.2.4. Azimut açısı

Güneş azimut açısı, Güneş'in yatay düzlemdeki konumunu tanımlar ve gün boyunca değişir. Güney yarımkürede bu değişim belirgindir; ekinoks dönemlerinde Güneş, enleminden bağımsız olarak doğudan doğar ve batıdan batar. Azimut açısı, enlem ve yılın zamanına bağlı olup güneş geometrisi parametreleri kullanılarak hesaplanır (Mawire, 2015).

$$\sin z = \frac{\cos \delta \cdot \sin h}{\cos a} \quad (2.4)$$

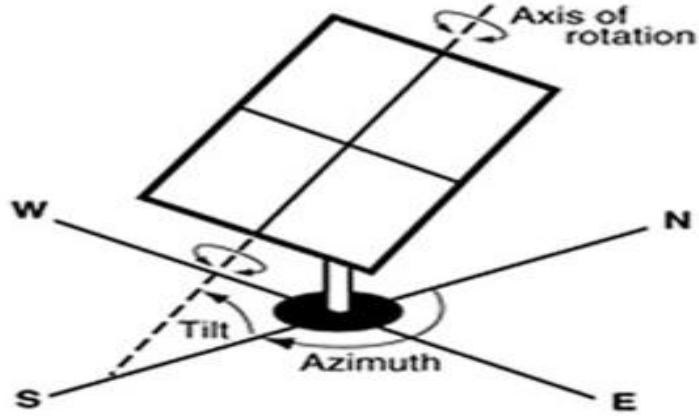
2.2.5. Güneş sapma

Güneş sapması δ (derece), Güneş yönü ile Dünya'nın ekvator düzlemi arasındaki açıdır. Kış gündönümünde $-23^\circ 27'$ ile yaz gündönümünde $+23^\circ 27'$ arasında değişirken, ekinokslarda sıfırdır. Aşağıdaki denkleme göre hesaplanır (El Mghouchi vd., 2016).

$$\delta = 23.45 \sin(0.986(J+284)) \quad (2.5)$$

2.2.6. Yüzey azimut açısı

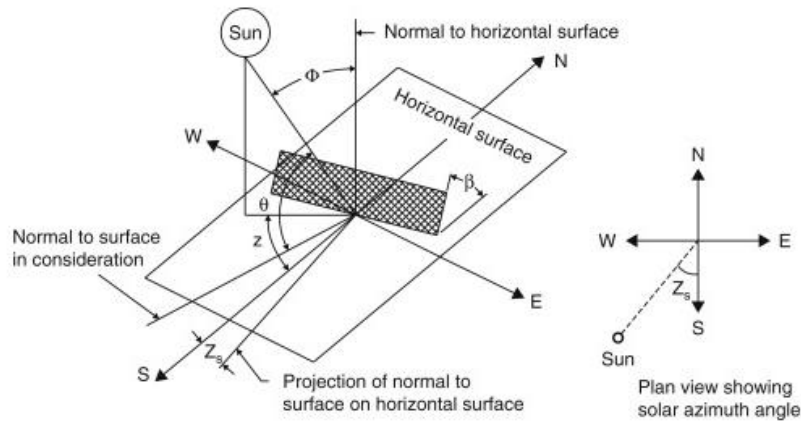
Yüzey azimut açısı γ , yüzeye dik olan yatay düzlemdeki izdüşümün yerel meridyenden sapmasıdır. Yüzey eğimi olarak da adlandırılan eğim β , söz konusu yüzeyin düzlemi ile yatay arasındaki açıdır; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. Güneşi takip etmek ve güneş ışınımını yakalamak için, takip düzlemi güneşe odaklanmalı, böylece düzlem yatay düzleme döndürülmelidir. Bu durumda, yüzey azimut açısı önemli bir rol oynar. Bu, dünyanın merkezini kuzeye bağlayan çizginin ve takip yüzeyinin normal vektörünün yatay yüzeye izdüşümünün oluşturduğu açıdır (Reddy ve Morehouse, 2017). Yüzey azimut açısı, Şekil 2.7'de gösterildiği üzere tanımlanmaktadır.



Şekil 2.7.Yüzey azimut açısı (Reddy ve Morehouse, 2017).

2.2.7. Geliş açısı

Güneş olay açısı (θ), güneş ışınları ile bir yüzeyin normal doğrultusu arasındaki açıyı ifade eder. Yatay bir düzlem için olay açısı θ , ve zenit açısı Φ , aynıdır. Şekil 2.8’de gösterimi verilmiştir. Doğal ağaçlar, yapraklarının farklı yönelimlere sahip olması sayesinde güneş ışığını yakalamada oldukça etkilidir. Bu nedenle, tüm yapraklar aynı anda aynı geliş açısına (olay açısına) maruz kalmaz. Güneşin geliş açısı, gün içerisinde ve yılın farklı mevsimlerinde sürekli olarak değişmektedir. Bu durum, sabit açılı PV panellere sahip sistemlerde güneş ışınımının her zaman optimum açıyla alınamamasına neden olmaktadır. Güneş ağacı (solar tree) tasarımlarında ise paneller farklı açılarda konumlandırılarak değişen güneş geliş açılarına daha etkin şekilde uyum sağlanmaktadır (Kalogirou, 2023).



Şekil 2.8. Güneş geliş açısı (Kalogirou, 2023)

2.2.8. Deklinasyon açısı

Dünya, hem kendi eksenini etrafında dönmekte hem de güneş etrafında yörüngesel hareket gerçekleştirmektedir. Ancak bu hareketler sırasında Dünya'nın dönme ekseninin eğik olması belirleyici bir faktördür. Dünya'nın dönme eksenini, tam dik olmayıp yaklaşık $23,45^\circ$ eğiktir. Bu eksen eğikliği olmasaydı, Dünya'ya gelen güneş ışınlarının geliş açısı yıl boyunca değişmeyecek ve güneş sapma açısı sürekli 0° olarak kalacaktı. Mevcut eksen eğikliği nedeniyle güneş ışınlarının yeryüzüne geliş açısı yıl içinde değişmekte, bu durum mevsimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Güneş sapma açısı, ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında 0° değerini almakta ve güneş ışınları ekvatora dik gelmektedir. Yılın diğer zamanlarında ise bu açı $+23,45^\circ$ ile $-23,45^\circ$ aralığında değişmektedir. Formülde yer alan n , hesaplamanın yapıldığı yılın gün numarasını ifade etmektedir. Deklinasyon (sapma) açısı, literatürde yaygın olarak kullanılan ve Cooper (1969) tarafından önerilen bağıntı ile hesaplanmaktadır (Cooper vd., 1969)

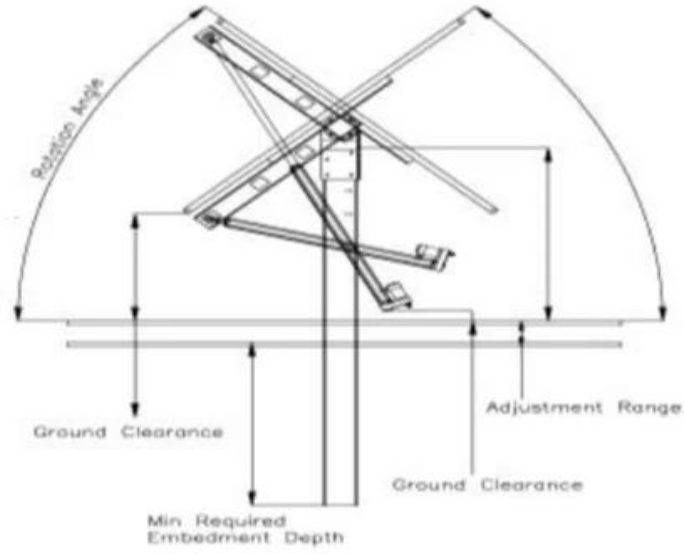
$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.6)$$

2.3. Güneş Takip Sistemlerinin Sınıflandırılması

Güneşten gelen ışıınımdan maksimum verim elde etmek amacıyla tasarlanan güneş takip sistemleri; kurulum yapılacak bölgenin eksen koordinatları, kullanılan taşıyıcı yapı ve tercih edilen kontrol sistemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Sistem tasarımında, kurulum bölgesinin iklim koşullarına uygun taşıyıcı ve kontrol elemanlarının seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Güneş takip sistemleri, dönüş eksen sayısına ve kontrol yöntemine göre sınıflandırılmaktadır. Dönüş eksen sayısına göre tek eksenli ve iki eksenli sistemler olarak ayrılırken; kontrol yöntemine göre kapalı döngü (pasif kontrollü) ve açık döngü (aktif kontrollü) sistemler şeklinde tanımlanmaktadır.

2.3.1. Tek eksenli takip sistemleri

Tek eksenli güneş takip sistemi, panellerin tek bir eksen etrafından hareket etmesiyle olur. Bu hareket Kuzey-Güney yönünde güneşin hareketiyle meydana gelir. Yapılan bu hareketle sistem verimini %20-25 oranında artırmaktadır.



Şekil 2.9. Tek eksenli güneş takip sistemi (Anonim, 2025e)

2.3.2. İki eksenli takip sistemleri

Güneş ışınımı aylara, günün saatine, iklim şartlarına, coğrafi bölgeye ve güneşin gökyüzündeki hareketine göre değişir. Çift eksenli takip sistemleri Doğu-Batı ve Kuzey-Güney olmak üzere iki eksenle güneşin yörüngesini takip eder. İzleme sistemlerini kontrol etmek için kapalı döngü ve açık döngü kontrol sistemleri kullanılabilir.



Şekil 2.10. İki eksenli güneş takip sistemi (Anonim, 2025f)

2.3.3. Kapalı döngü takip sistemleri:

Kapalı kontrol sistemleri, güneşin yıl boyunca gökyüzündeki konumunu önceden tanımlanmış astronomik konum algoritmaları aracılığıyla belirleyerek sistemi buna göre

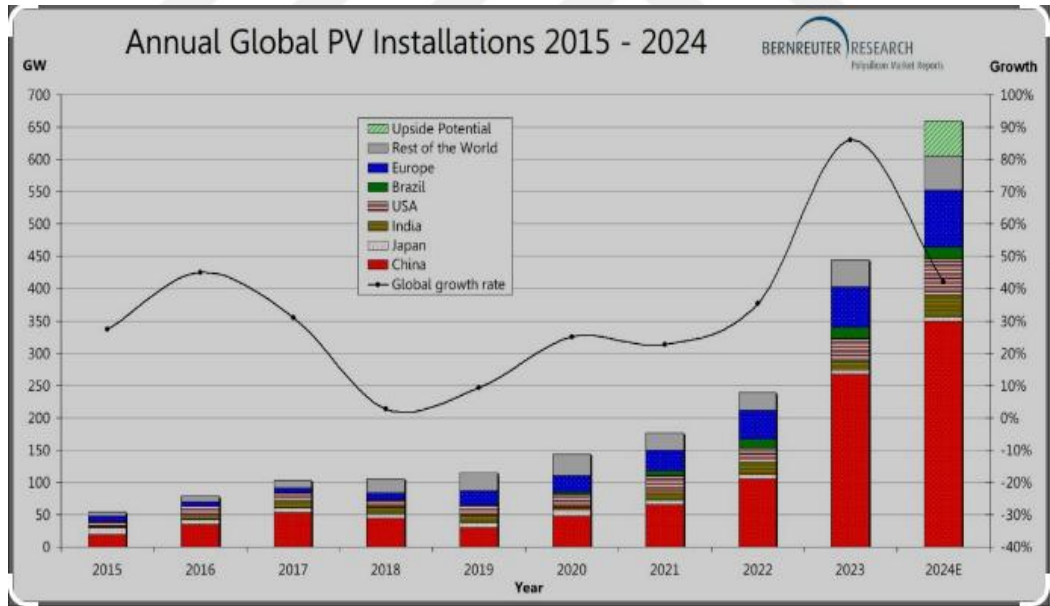
yönlendiren yapılardır. Bu sistemler, yıl içerisinde güneşin konumunu herhangi bir geri besleme sinyali kullanmadan izler.

2.3.4. Açık döngü takip sistemleri

Havanın bulutlu olma durumuna karşılık güneşin konumunu matematiksel bir algorithmadan alır ve güneş panelini güneşin matematik konumuna göre konumlandırır. Bulutlu havalarda kapalı döngü kontrol sistemi fazla hareket edeceğinden enerji tüketimi yüksek olur.

2.4. PV Sistemlerin Dünyadaki Kurulu Gücü

Dünya genelinde PV sistemlerin kurulu gücü, 2022 yılında ilave edilen 239 GW ile terawatt (TW) ölçeğini aşmıştır. 2023 yılında ise PV sistemlere 402 GW ek kurulu güç ilave edilmiştir. 2024 yılı itibarıyla toplam PV kurulu gücü 1.634 GW seviyesine ulaşmış olup, 2027 yılına kadar yaklaşık 800 GW ilave kurulu gücün sisteme dâhil edilmesi beklenmektedir (Anonim, 2025g).



Şekil 2.11. Dünya’da kurulu PVgüç grafiği (Anonim, 2025h)

2.4.1. PV sistem verimini etkileyen faktörler

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, bol ve temiz bir kaynağa dayanması nedeniyle önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak PV modüllerin verimliliğini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler arasında tozlanma, modül sıcaklığı,

panel eğim açısı, gölgeleme etkileri, inverter verimliliği ile AC ve DC bağlantılarında kullanılan malzemelerin kalitesi öne çıkmaktadır.

2.4.1.1. Tozlanma

Tozlanma, değiştirilemeyen faktörler arasında yer alan ve lokasyona bağlı çevresel etkenlerden biridir. Panel yüzeyinde biriken toz, gelen güneş ışınımını azaltarak modül sıcaklığının artmasına ve dolayısıyla panelin elektriksel özelliklerinde değişimlere neden olur. Bu durum, PV panellerin verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılan çalışmalara göre, bir PV panel yüzeyinde 20 g/m² düzeyinde toz birikmesi; kısa devre akımında %15–21, açık devre geriliminde %2–6 ve genel verimlilikte %15–35 oranında azalmaya yol açmaktadır (Zaihidee vd., 2016).

2.4.1.2. Sıcaklık

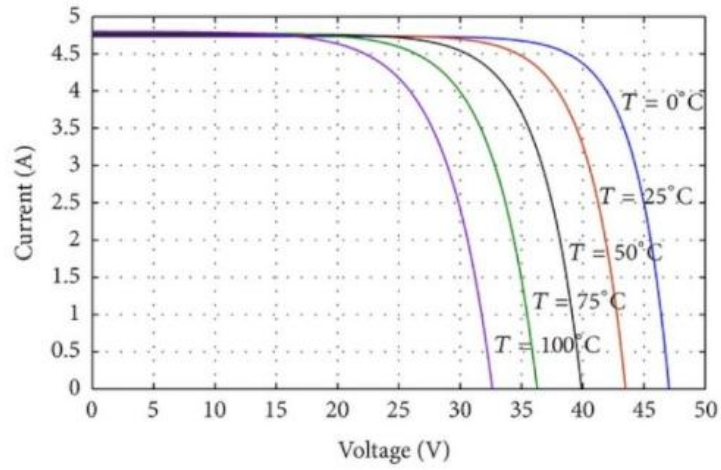
PV modüllere ulaşan güneş ışınımının yalnızca küçük bir bölümü elektrik enerjisine dönüştürülmekte, ışınımın geri kalan kısmı ise ısıya dönüşerek modül sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak performansın düşmesine neden olmaktadır (Rahman vd., 2015).

Bir PV panel hücre sıcaklığı (T_c), hava sıcaklığı (T_a) ve ışınım (G) değeri için NOCT sıcaklığı kullanılarak tahmin edilebilir.

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{0.8} G \left(\frac{kW}{m^2} \right) \quad (2.7)$$

Panel gücü çıkışı sıcaklıkla ters orantılıdır çıkış gücünün hesaplanması aşağıdaki gibidir. Panel sıcaklığı eğrisi aşağıdaki görselde verilmiştir (Boztepe, 2017).

$$P_m(T_c) = P_{m,STC} [1 - \mu_P (T_c - 25)] \quad (2.8)$$



Şekil 2.12. PV sıcaklık verim kaybı eğrisi (Anonim, 2025j)

2.4.1.3. DC kablo kayıpları

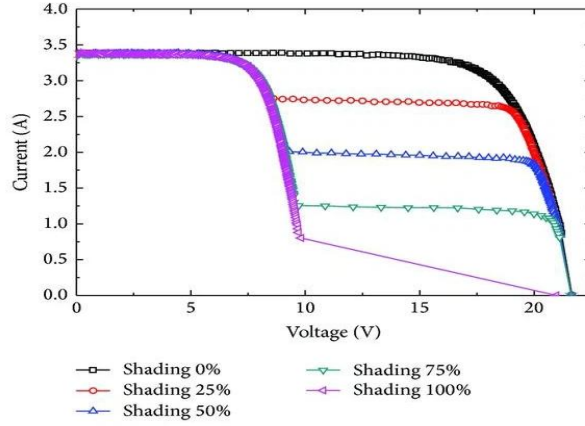
Kablo kayıpları da sistem performansını 1,5 mm 2,4 mm ve 10 mm 2 kesit alanları için sırasıyla %1,7, %0,6 ve %0,2 olarak etkilemektedir. Mevcut deneysel çalışmada da küçük PV sistemlerde farklı kesit alanına ve farklı uzunluğa sahip güneş kablolarının kullanımının PV sistem performansını önemli ölçüde etkilemediği gösterilmiştir. Geniş bir alana kurulan ve hassas ölçüm yapılan bir sistemde solar kablo kayıpları daha net gözlemlenmektedir (Ekici ve Köprü, 2017).

2.4.1.4. Spektrum kayıpları

İnce film PV teknolojilerinin dış ortam performansı, kristalin silikon teknolojilerine kıyasla henüz yeterince kapsamlı ve tatmin edici biçimde açıklığa kavuşturulamamıştır. Tüm PV malzemeler spektral ışıınımdan etkilenmekle birlikte, ince film PV modülleri bu etkiye karşı özellikle daha hassastır. Bu nedenle spektral faktör (SF), standart AM 1,5-G spektrumu ile karşılaştırıldığında, bir PV modülünün gerçek güneş spektrumu altında maruz kalabileceği spektral kazanç ve kayıpları nicel olarak değerlendirmek için kullanılan yararlı bir göstergedir. Ortalama foton enerjisi (Average Photon Energy, APE) spektrumunun hesaplanması aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$APE = \frac{\int_0^B E(\lambda) d\lambda}{\int_0^B \phi(\lambda) d\lambda} \quad (2.9)$$

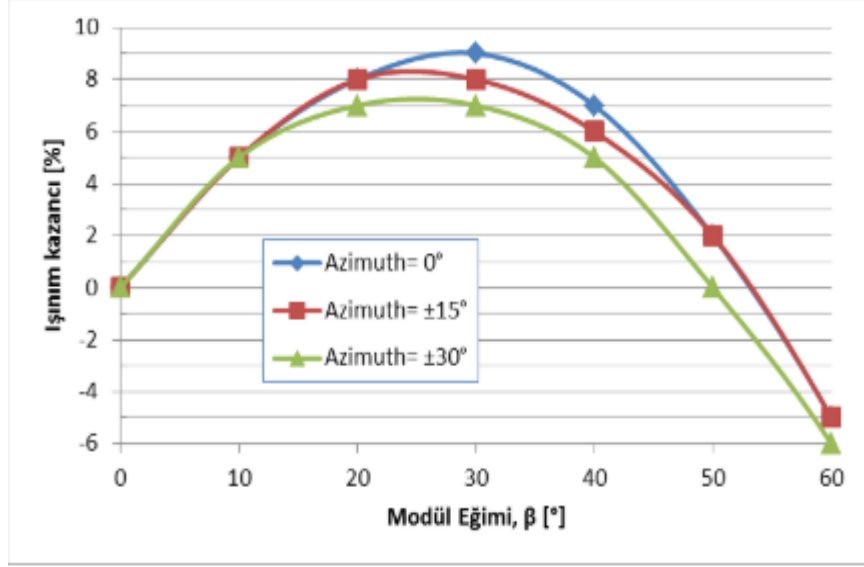
Burada $E(\lambda)$ [$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$] spektral ışınlım, $\Phi(\lambda)$ [$\text{m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{s}^{-1}$] spektral foton akısı yoğunluğu, a [nm] ve b [nm] sırasıyla spektrumun dikkate alınan aralığının alt ve üst sınırlarıdır. a ve b rakamları genellikle spektro-radyometrenin ölçüm aralığı tarafından belirlenir.



Şekil 2.13. İki eksenli güneş takip sistemi (Anonim, 2025k)

2.4.1.5. PV panel yerleşimi

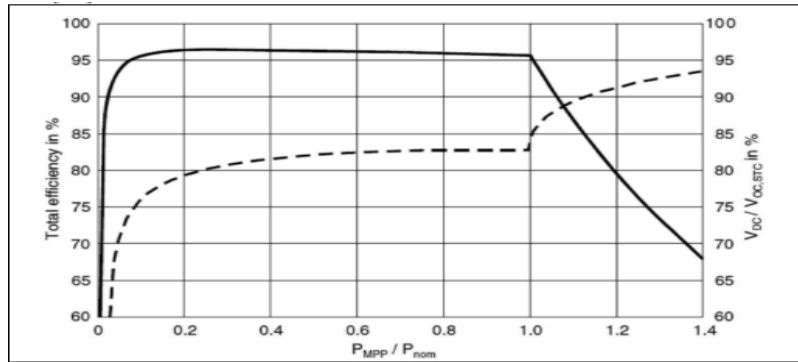
Panel üzerine düşen güneş ışını ne kadar fazla olursa elektrik üretiminde de artmalar meydana gelir. Bu nedenden dolayı panel açısı ve yönü önem arz etmektedir. Bir güneş enerji santrali için yıl boyunca üretim toplamı en yüksek olduğu değer seçilmelidir. Gökyüzü ışınlım hesaplarına göre bu değer Enlem=Eğim sonucuna varılmıştır. Panel eğimi %30'luk bir eğimde çalışan bir panel yatay bir panele göre %9 civarında daha fazla enerji üretebilir (Ekici ve Köprü, 2017). Şekil 2.14'te farklı ışınlım açılarında panel üretim verimini göstermektedir.



Şekil 2.14. PV eğim verimi (Boztepe, 2017)

2.4.1.6. İnverter kayıpları

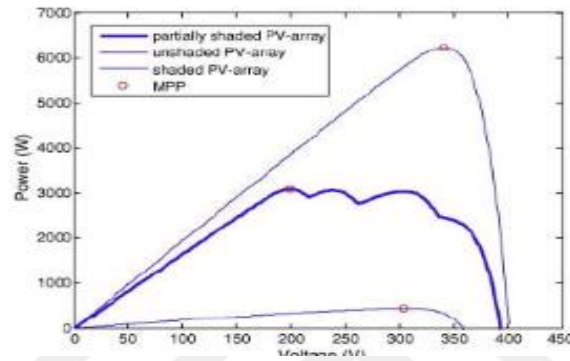
Tipik olarak PV inverter verimi, DC giriş gerilim genliğinde her 150 V'luk artış için %0,3–%1 oranında azalmaktadır. Buna ek olarak, düşük ışınlım koşullarında ve yüksek DC giriş gerilimlerinde, kontrol ünitesinin güç tüketimi ile anahtarlama kayıpları nedeniyle inverter veriminde %5'e varan düşüşler gözlenebilmektedir. Günümüzde üretilen trafosuz şebeke bağlantılı inverterler, nominal DC giriş gerilimlerinde maksimum ve Avrupa verimi açısından yaklaşık %98 seviyelerine ulaşmaktadır (Deniz, 2013).



Şekil 2.15. İnverter kayıp eğrisi (Boztepe, 2017)

2.4.1.7. Gölgeleme kayıpları

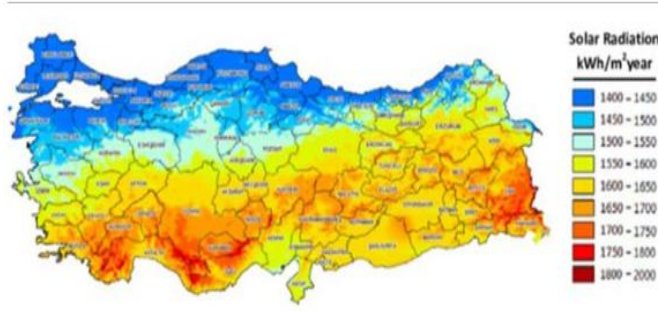
PV sisteminin verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri gölgelenmeye maruz kalan paneldir. Bir PV sisteminde panellere seri veya paralel bağlantı yapılır. Paralel veya seri bağlanan panellerin bir tanesine gölgelemeye maruz kaldığında bütün dizideki paneller gölgelenme yapan panelin çıkış gücüne göre ayarlanır buda verimi düşürür. Aynı zamanda gölgelenmeye maruz kalan panel üzerinde geçen akıma karşı direnç görevi görür. Buda yangın riski taşıyabilir. Aşağıdaki görselde gölgelenme yapan panel dizisinde düzensiz voltajı gösterilmiştir.



Şekil 2.16.Gölgelenmeye maruz kalan panel voltaj eğrisi

2.5. Türkiye ve Van'da Güneş Enerji Potansiyeli

Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), yıllık toplam güneşlenme süresinin 2.737 saat (günlük 7,5 saat), güneşten gelen yıllık toplam güneş enerjisinin ise 1.527 kWh/m² olduğunu belirtmektedir. Türkiye yedi bölgeden oluşmakta bunlar Karadeniz bölgesi, Marmara bölgesi, Ege bölgesi, Akdeniz, İç Anadolu, Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgeleridir. Güneyden kuzeye doğru gidildikçe güneş ışıınım değerleri azalmaktadır. Birçok Avrupa ülkesiyle karşılaştırıldığında Karadeniz bölgesinin radyasyon değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye'nin ortalama güneş ışığı radyasyonu haritası aşağıda verilmiştir. Türkiye'de aylara göre güneşten üretilen elektrik miktarı aşağıdaki Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.17. Türkiye'nin güneş radyasyon haritası (Anonim, 2025l)

Tablo 2.1'de Türkiye'nin aylara göre elektrik üretme potansiyel verilmiştir. Tabloya göre en yüksek elektrik üretimi temmuz ayında olmuştur, En düşük üretim miktarı ise aralık ayında olmuştur.

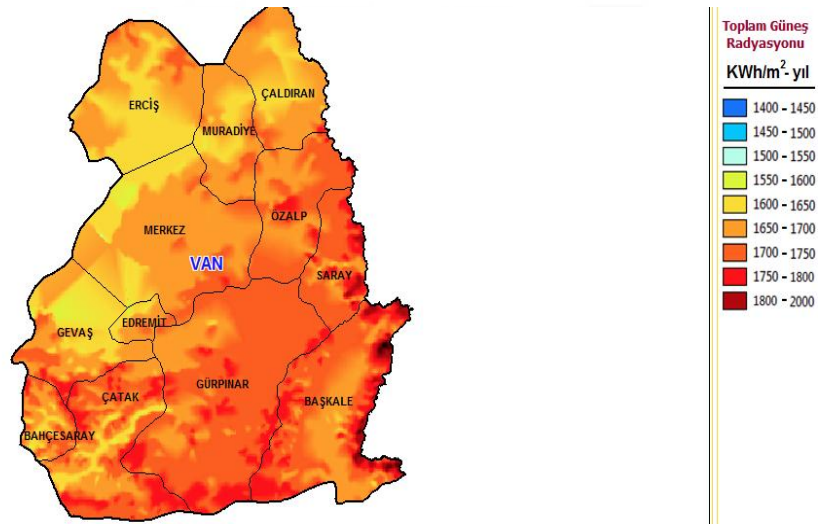
Tablo 2.1. Türkiye'nin aylara göre elektrik üretme potansiyeli

Aylar	Kcal/cm ² -ay	kWh/m ² -ay
Ocak	4,45	51,75
Şubat	5,44	63,27
Mart	8,31	96,65
Nisan	10,51	122,23
Mayıs	13,23	153,86
Haziran	14,51	168,75
Temmuz	15,08	175,38
Ağustos	13,62	158,4
Eylül	10,60	123,28
Ekim	7,73	89,9
Kasım	5,23	60,82
Aralık	4,03	46,87

Tabloda Türkiye ait yıllık toplam güneş radyasyonu değerleri kWh/m²·yıl cinsinden gösterilmiştir.

Şekil 2.18' de, Van ilin farklı bölgelerinde güneşlenme potansiyelinin mekânsal değişimini açıkça ortaya koymaktadır. Renk skalasına göre Van genelinde radyasyon değerleri 1.400–2.000 kWh/m²·yıl aralığında değişmektedir. İlin kuzey kesimlerinde yer alan Erciş, Muradiye ve Çaldıran ilçelerinde güneş radyasyonu görece daha düşük olup 1.450–1.600 kWh/m²·yıl aralığındadır. Bu bölgelerde yüksek rakım ve daha soğuk iklim koşulları, güneş radyasyonunun yıl genelinde sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Buna karşın, Gürpınar, Başkale, Saray, Çatak ve Bahçesaray gibi güney ve güneydoğu ilçelerinde yıllık güneş radyasyonu değerleri 1.750–2.000 kWh/m²·yıl düzeyine ulaşmaktadır. Bu durum, söz konusu bölgelerin güneş enerjisi yatırımları, tarımsal

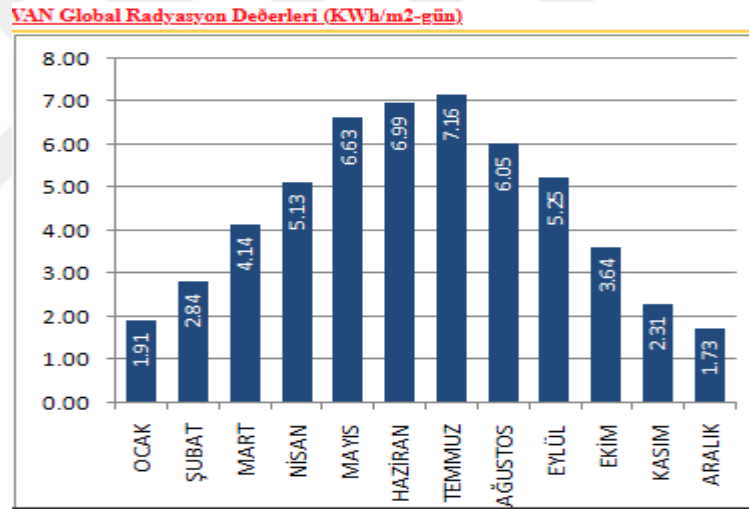
kurutma sistemleri ve AV uygulamaları için oldukça elverişli olduğunu göstermektedir. Ayrıca Van il merkezinde ve çevresindeki Edremit ve Gevaş ilçelerinde radyasyon değerlerinin $1.600\text{--}1.700 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yıl}$ arasında seyrettiği görülmektedir. Bu bölgeler, hem yüksek radyasyon potansiyeli hem de altyapı olanaklarının gelişmişliği nedeniyle GES kurulumu açısından uygun bölgeler olarak değerlendirilebilir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Van ili Türkiye'nin ortalama güneş radyasyon değerinin (yaklaşık $1.527 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yıl}$) üzerinde bir potansiyele sahiptir. Bu da ilin hem yenilenebilir enerji yatırımları hem de tarım ve enerji entegrasyonuna dayalı AV sistemlerin kurulumu açısından stratejik bir bölge olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.18. Van ili güneşlenme radyasyonu (Anonim, 2025l)

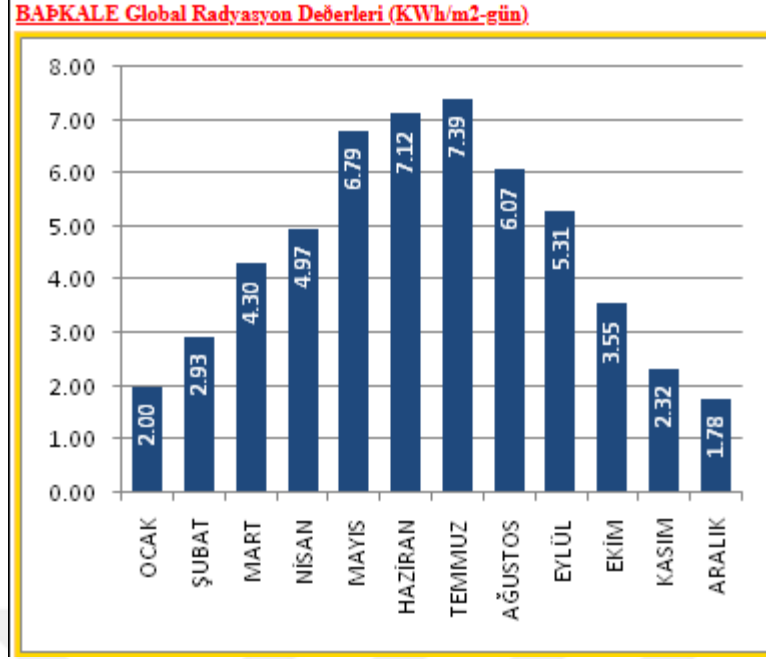
Şekil 2.19’de Van iline ait aylık ortalama global güneş radyasyonu değerleri gösterilmektedir. Verilere göre, il genelinde güneş radyasyonu yıl boyunca belirgin bir mevsimsel değişim göstermektedir. Kış aylarında (Aralık–Şubat) güneş radyasyonu değerleri oldukça düşüktür. Ocak ayında $1,91 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{gün}$, Şubat ayında $2,84 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{gün}$ olarak ölçülmüştür. Bu dönemde düşük radyasyon seviyeleri, gün uzunluklarının kısa olması, güneşin düşme açısının daralması ve artan bulutluluk oranlarından kaynaklanmaktadır. İlkbahar aylarıyla birlikte radyasyon değerlerinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Mart ayında $4,14 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{gün}$, Nisan ayında $5,13 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{gün}$, Mayıs ayında ise $6,63 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{gün}$ düzeyine ulaşarak yılın en hızlı artış eğilimi gösteren dönemi olmuştur. Yaz aylarında Van ili güneş radyasyonunun en yüksek olduğu dönemi yaşamaktadır. Haziran $6,99 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{gün}$ ve Temmuz 7.16

kWh/m²·gün ayları yılın en yüksek değerlerine sahiptir. Bu durum, güneş ışınlarının dik açıyla düşmesi, gün uzunluklarının artması ve bulutsuz atmosfer koşullarının hâkim olmasıyla açıklanabilir. Ağustos ayında radyasyon değeri 6,05 kWh/m²·gün'e düşmekle birlikte hâlâ yüksek düzeyde kalmaktadır. Eylül ve Ekim aylarında sırasıyla 5,25 ve 3,64 kWh/m²·gün değerleriyle kademeli bir azalma görülmektedir. Sonbaharın ilerleyen dönemlerinde, özellikle Kasım (2,31 kWh/m²·gün) ve Aralık (1,73 kWh/m²·gün) aylarında radyasyon miktarı minimum seviyelere gerilemektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Van ilinde güneş enerjisinden etkin yararlanma süresi Mart ile Ekim ayları arasındadır. Özellikle Mayıs–Ağustos dönemi, güneş enerjisi sistemlerinin optimum verimle çalışabileceği dönem olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, Van ilinin güneş enerjisine dayalı sistemler, örneğin GES, tarımsal kurutma sistemleri veya AV uygulamalar açısından oldukça uygun iklim koşullarına sahip olduğunu ve yıllık ortalama güneş radyasyonu değerinin Türkiye ortalamasının üzerinde seyrettiğini göstermektedir.



Şekil 2.19. Van ili global radyasyon değeri (Anonim, 2025l)

Güneş tarlası olarak bilinen ve adlandırılan Van ili, yaz aylarında en fazla güneş enerjisi alan, Antalya ve Karaman'dan sonra üçüncü sırada yer almaktadır. Tablo 2.2'de Van İlinin Türkiye güneşlenme sürelerine göre karşılaştırma yapılarak verilmiştir. Türkiye'nin ortalama yıllık güneşlenme süresi toplam 2.736,89 saat/yıl iken Van ili için 3.068,74 saat/yıl olarak ölçülmüştür. Toplam radyasyon şiddeti ise Türkiye ortalaması 1.524,18 kW/m² iken Van ili için bu değer metre kare düşen ışınlam şiddeti 1.635,81 kW/m²'dir. Aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi Van ili her iki kategoride Türkiye ortalamasının üstünde bir ışınlam değerine sahiptir (Yaman vd., 2019).



Şekil 2.20. Başkale global radyasyon değeri (Anonim, 2025l)

Van ili Başkale ilçesine ait yıllık ortalama global radyasyon değerleri incelendiğinde, bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Aylık ortalama global radyasyon değerleri Ocak ayında 2,00 kWh/m²·gün seviyesinden başlayarak, Temmuz ayında 7,39 kWh/m²·gün ile maksimum seviyeye ulaşmakta, ardından Aralık ayında 1,78 kWh/m²·gün ile yeniden minimum değerlere inmektedir. Bu durum, yüksek karasal iklim etkisinin belirgin bir göstergesidir. Başkale'nin yüksek rakımı yaklaşık 1.726 m ve düşük atmosferik nem oranı, güneş radyasyonunun atmosferdeki saçılım ve absorpsiyon kayıplarını azaltmakta, bu da özellikle yaz aylarında yüksek radyasyon değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Kış aylarında ise, yoğun bulutluluk, kısa gün uzunluğu ve kar yüzeyinden yansıyan difüz bileşenlerin etkisiyle radyasyon değerleri düşüş göstermektedir. Yıllık ortalama global radyasyon değeri yaklaşık 4,8–5,0 kWh/m²·gün düzeyindedir. Bu değer, Türkiye ortalamasının yaklaşık 4,2 kWh/m²·gün üzerinde olup, Başkale'nin güneş enerjisi üretimi açısından avantajlı bir bölge olduğunu göstermektedir. Özellikle Mayıs–Ağustos döneminde elde edilen 6,0–7,4 kWh/m²·gün aralığındaki yüksek radyasyon değerleri, PV sistemler için optimum üretim koşullarını oluşturmaktadır. Enerji üretimi açısından değerlendirildiğinde, bu düzeydeki radyasyon değerleriyle sabit eğimli PV sistemlerde yıllık 1.750–1.900 kWh/kWp düzeyinde enerji üretimi mümkündür. Ayrıca, AV uygulamalarda (tarım ve enerji entegrasyonu) bu radyasyon seviyeleri hem bitkisel üretim

hem de elektrik üretimi açısından dengeli bir ışınlım ortamı sağlamaktadır (Anonim, 2025l). Aşağıdaki Tablo 2.2’ de Türkiye’nin aylara göre elektrik üretme potansiyeli verilmiştir.

Tablo 2.2. Türkiye’nin aylara göre elektrik üretme potansiyeli

Aylar	Van Güneşlenme Potansiyeli		Türkiye Güneşlenme Potansiyeli	
	Günlük Global radyasyon (Kw/m ² -gün)	Günlük güneşlenme süresi(saat/gün)	Günlük Global radyasyon (kW/m ² -gün)	Günlük Güneşlenme Süresi (saat/gün)
Ocak	1,91	5,27	1,79	4,11
Şubat	2,84	6,40	2,50	5,22
Mart	4,14	7,39	3,87	6,27
Nisan	5,13	8,50	4,93	7,46
Mayıs	6,63	10,11	6,14	9,10
Haziran	6,99	11,55	6,57	10,81
Temmuz	7,16	11,65	6,50	11,31
Ağustos	6,05	10,97	5,81	10,70
Eylül	5,25	10,31	4,81	9,23
Ekim	3,64	7,65	3,46	6,87
Kasım	2,31	6,16	2,14	5,15
Aralık	1,73	4,93	1,59	3,75
Toplam	1.635,81 Kw/m²-yıl	3.068,74 saat/yıl	1.524,18 Kw/m²-yıl	2.736,89 saat-yıl

3. AGRİVOLTAİK SİSTEMLER

AV sistem, aynı arazi üzerinde tarımsal üretim ile güneş enerjisi üretiminin eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği entegre bir arazi kullanım modelidir. Bu sistemlerde PV paneller, belirli yükseklik ve aralıklarla yerleştirilerek hem elektrik üretimi hem de bitkisel üretim için uygun koşullar sağlanır. Kavram ilk olarak 1981 yılında Adolf Goetzberger ve Armin Zastrow tarafından ortaya atılmış, tarım ve enerji üretiminin bir arada yapılabileceği fikrine dayandırılmıştır. AV sistemlerin temel amacı, aynı alan üzerinden iki farklı üretim çıktısı gıda ve enerji elde ederek arazi kullanım verimliliğini (LER) artırmaktır. Panellerin oluşturduğu kısmi gölgeleme, bitkileri aşırı sıcaklık ve ışık stresinden korurken toprak nemini muhafaza eder; bu da özellikle kurak bölgelerde verim artışı sağlar. Sistemler genellikle açık alanlı ve seraya entegre olmak üzere iki ana gruba ayrılır. AV uygulamaları; arazi verimliliğinin artırılması, su tasarrufu sağlanması, karbon salınımının azaltılması ve çiftçilere ek gelir imkânı sunması gibi çok yönlü faydalar sağlar. Ancak sistem tasarımında gölgeleme oranı, panel yüksekliği ve bitki türü gibi parametrelerin dikkatli biçimde planlanması gerekmektedir. AV sistemler, tarım arazilerine kurulan PV paneller ile hem elektrik üretimi sağlanmakta hem de PV panel altındaki arazilerde tarım ürünlerinin yetiştirilmesine olanak sağlar. Hibrit bir şekilde hem enerji hem de tarım yapılması tekniği 1980 yıllarında tasarlanmış olsa da AV sistemler 2010 yılında itibaren kullanılmaya başlanmıştır (Kırbaş, 2023).

3.1 Agrivoltaik Sistem Uygulamaları

3.1.1. Açık agrivoltaik sistemler

Açık AV sistemler, tarımsal üretimin doğrudan açık atmosfer koşulları altında sürdürüldüğü ve PV panellerin belirli yüksekliklerde veya aralıklarla yerleştirildiği sistemlerdir. Bu sistemlerde amaç, aynı arazide hem tarımsal üretimi hem de enerji üretimini eşzamanlı olarak gerçekleştirmektir. Paneller genellikle bitkilerin fotosentez için ihtiyaç duyduğu doğal ışığın bir kısmının geçişine izin verecek biçimde tasarlanır. Böylece bitkiler kısmi gölgelemeden yararlanırken, paneller aracılığıyla elektrik enerjisi üretilir (Dupraz vd., 2011).

Açık sistemlerde panellerin yerleştirme biçimine göre iki ana alt tip bulunmaktadır: Aralıklı PV panel sıraları arasında tarımsal üretimin yapıldığı sistemler

ve PV panellerin tarım alanının üzerinde, genellikle 4–5 metre yükseklikte kurulduğu sistemler. Bu tür sistemler sabit, tek eksenli veya çift eksenli izleme mekanizmalarıyla donatılabilir. Sistem tipi, coğrafi konum, güneşlenme süresi, yetiştirilen ürün türü ve tarımsal ekipmanların hareket alanı gibi faktörlere bağlı olarak seçilmektedir (Barron vd., 2016).

Açık AV sistemlerin temel avantajı, toprak kullanım verimliliğini artırmalarıdır. LER değeri 1'in üzerinde olduğunda, aynı arazide ayrı yapılan tarım ve enerji üretimine kıyasla, birleşik üretimin daha verimli olduğu anlaşılr. Ayrıca bu sistemler, özellikle kurak ve yarı kurak iklimlerde toprağın nem kaybını azaltarak bitkisel üretim üzerinde olumlu etkiler oluşturabilmektedir.

Bu sistemler; mera tarımı, tarla tarımı ve bahçecilik gibi farklı üretim biçimlerine uyarlanabilir. Panellerin alt veya aralarındaki boşluklarda yem bitkileri, tahıllar, sebzeler ve meyveler yetiştirilebilir. Ayrıca arıcılık ve biyo çeşitliliği artırmaya yönelik ot ekimleri gibi ek faaliyetlerle çevresel sürdürülebilirlik güçlendirilebilir.



Şekil 3.1. Agrivoltaik sistemler ve tarım uygulaması (Anonim, 2025m)

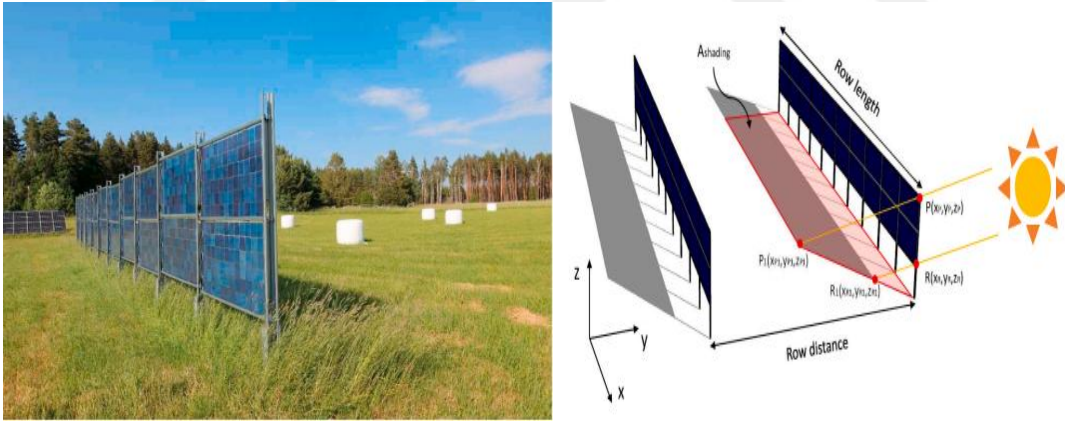
3.1.2. Dikey agrivoltaik sistemler

Dikey AV sistemler, PV panellerin doğu-batı yönelimli olarak dikey biçimde konumlandırıldığı ve hem elektrik üretiminin hem de tarımsal üretimin aynı alanda gerçekleştirildiği yenilikçi bir enerji-tarım entegrasyon modelidir. Bu sistemlerde kullanılan bifacial (çift yüzeyli) PV modüller, gelen doğrudan güneş ışınımının yanı sıra

zemin ve atmosferden yansıyan difüz bileşenleri de elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesine sahiptir (Agostini vd., 2021). Dikey konumlandırma sayesinde paneller sabah saatlerinde doğudan, öğleden sonra ise batı yönünden gelen ışıınımdan faydalanarak gün boyu dengeli bir üretim profili sergiler.

Bu sistemlerin tasarımında temel hedef, arazi kullanım verimliliğini artırmak ve aynı zamanda tarımsal üretim alanlarını korumaktır. Dikey kurulum, yatay veya eğimli sistemlere kıyasla daha az gölgeleme yaratır ve panel sıraları arasında tarımsal faaliyetlerin veya hayvancılığın sürdürülebilmesine olanak tanır. Bu nedenle özellikle mera alanları, yem bitkisi üretim bölgeleri ve yüksek enlemli iklim kuşaklarında tercih edilmektedir.

Sistem genellikle çelik destekli çerçeveler üzerine monte edilmiş modüllerden oluşur. Panellerin alt kenarı topraktan ortalama 1–1,5 metre yüksekte konumlandırılır; bu yükseklik, tarım makinelerinin geçişine veya hayvan otlatmasına izin verir. Satırlar arası mesafe, ışıını geçişi ve gölge yönetimi dikkate alınarak ortalama 6–8 metre olarak tasarlanır. Kullanılan modüller çoğunlukla tam hücreli N-tipi bifacial panellerdir ve ortalama bifacial oranı %80 civarındadır.



Şekil 3.2. Dikey eksenli agrivoltaik sistemler

3.1.3. Sabit açılı ve sabit eğimli sistemler

Bu çalışma kapsamında kurulan sistem, enerji üretimi amacıyla tasarlanmış sabit eğimli PV panellerden oluşan bir AV uygulamadır. Sistem, geleneksel güneş enerji santrali PV santrali yapısına dayalı olup, arazinin tamamı PV panellerle kaplanmıştır. Paneller sabit çelik konstrüksiyon üzerine monte edilmiş, ön kenarı topraktan yaklaşık 1 metre, arka kenarı ise 3 metre yükseklikte olacak biçimde yaklaşık 25° sabit eğim açısıyla

yerleştirilmiştir. Bu yerleşim açısı, bölgenin yıllık güneşlenme süresine göre maksimum enerji üretimi sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Sistem tamamen sabit yapıdadır ve herhangi bir izleme (tracking) mekanizması bulunmamaktadır. PV modüller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmekte olup, sistemin birincil işlevi enerji üretimidir. Ancak panellerin altında kalan alan, doğrudan açık atmosfer koşullarına sahip olması sayesinde tarımsal üretim amacıyla da değerlendirilmiştir. Böylece aynı arazide hem elektrik hem de bitkisel üretim birlikte gerçekleştirilmektedir. Bu sistem, uluslararası literatürde “açık alan sabit eğimli AV sistem (open-field fixed-tilt agrivoltaic system)” veya “enerji odaklı AV sistem (energy-driven agrivoltaic system)” olarak tanımlanan yapı sınıfına girmektedir. Sistem tasarımında panellerin gölgeleme etkisiyle toprak yüzeyinde mikroklimatik bir denge sağlanmakta, bu durum hem toprak neminin korunmasına hem de bitkilerin ısı stresinin azalmasına katkı sunmaktadır. Gölgeleme etkisine uyum gösterebilen bitkiler, özellikle yaz aylarında yüksek ışınım koşullarında daha dengeli gelişim göstermektedir. Bu bağlamda sistem, hem yenilenebilir enerji üretimi hem de sürdürülebilir tarımsal faaliyetlerin aynı alanda entegre biçimde yürütülmesine olanak sağlayan yenilikçi bir uygulamadır (Dupraz vd., 2011).



Şekil 3.3. Sabit açılı ve eğimli agrivoltaik sistemler

3.2. Türkiye’de Agrivoltaik Uygulamalar

Türkiye’de AV sistemlere geçiş başlamıştır “Enerjisa” önderliğinde İstanbul Komşu köyde İlk AV sistem bulunmaktadır. Komşu köydeki 20 kilowatt’lık bir güce, 24 kw bir depolama kapasitesine sahiptir (Şentürk vd., 2024). Buradan üretilen elektrik off-grid olarak köyün aydınlatılmasında kullanılmaktadır. Bu sistemle, komşu köyde gölge seven yaban mersini, lahanagiller, ıspanak gibi bitkiler yetiştirilecektir (Anonim, 2025n).



Şekil 3.4. Türkiye’de agrivoltaik sistem (Anonim, 2025n)

3.3. Agrivoltaik Sistemlerin Tasarım Kriterleri

- **Faydaları**

Karşılıklı faydalar: AV’lerin temel faydalarından biri, bu sistemin arazi kullanımını iki katına çıkarması, yüksek mahsul verimi sağlarken temiz elektrik üretilmesine yardımcı olmasıdır. AV’ler ayrıca mahsulü aşırı güneş enerjisi veya aşırı hava koşullarından korumaya yardımcı olur. PV modüllerin en yüksek verimlere çıkması için modüllerin soğutulmasına yardımcı olur.

Korunan su kaynağı: Su kıtlığı birçok yerde önemli bir sorundur ve AV sistemler yardımcı olabilir. Güneş panellerinin mahsullerin üzerini kaplamasıyla buharlaşma engellenmiş olur veya panellerin yıkanması için gereken su miktarı aynı zamanda mahsullerin sulanmasında kullanılabilir.

Sıcak ve kuru bölgelerde performansı: Sıcak ve kuru bir iklimde ürün yetiştirmeye çalışıyorsanız yoğun güneş ışığı ve kuru toprak nedeniyle zorluklarla karşılaşabilirsiniz. Bu sistemler zorlu iklimlerde mahsul verimini önemli ölçüde arttırabilir.

Artan gıda üretimi: AV sistemlerin en dikkate değer faydalarından biri, genel mahsul verimini arttırabilmeleridir. PV modül mahsulleri korur buda ürün verimini arttırmaktadır.

- **Zorlukları**

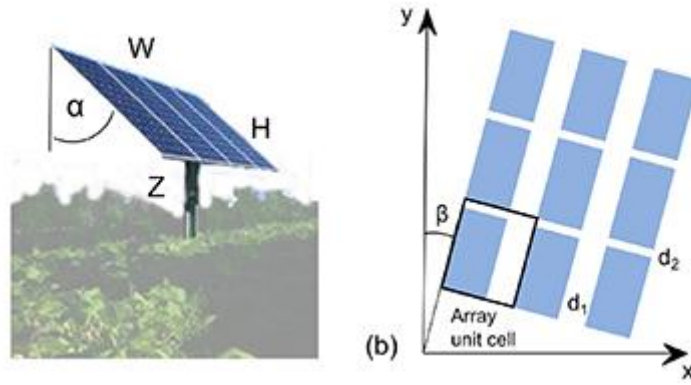
Yüksek ön maliyet: AV sistemlerin geleneksel çatı ve arazi modellerine göre yüksektir. Bu sistemin belirli bir yüksekliğe kurulması gerektiğinden, geleneksel bir PV modellerine göre maliyeti 2-3 katı kadar olmaktadır.

Bazı mahsullerle uyumsuz: Bazı mahsuller güneş PV panellerinin altında ekildiğinde iyi performans göstermez. Örneğin buğday bu sisteme uyumlu değildir çünkü mahsulün büyümesi için çok fazla güneş ışınına ihtiyaç vardır.

Yetiştirme uygulamalarını uyarlama ihtiyacı: Geleneksel yetiştirme uygulamalarını kullanmaya çalışılırsa ürün veriminin azalmasına sebep olabilir.

3.3.1. Panel yerleşim uyumu

Dizi kapsamındaki panellerin ön görülen gölge deseninin oluşturmak için öncelikle yılın her günü için her lokasyondan altı dakikalık aralıklarla güneş açısı hesaplanır. Zemin düzlemine yansıtılan panel gölgesinin alanını dizi birim hücresinin alanıyla karşılaştırarak gölge fraksiyonu belirlenir.



Şekil 3.5. Panel yerleşim açısı

3.4.İlgili Çalışmalar

Coşgun (2021) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye’de 50 MW ve üzeri kurulu güce sahip GES bulunduğu Konya, Kayseri, Ankara, Afyonkarahisar, Denizli ve Antalya illerinde AV sistemlerin uygulanabilirliği incelenmiştir. AV sistemlerin, aynı arazide hem elektrik üretimi hem de tarımsal faaliyetleri entegre ederek arazi verimliliğini artırdığı vurgulanmıştır. Araştırma bulgularına göre, bu sistemlerin su tasarrufu sağladığı, PV panellerin verimliliğini yükselttiği, ürün rekoltesini artırdığı ve sürdürülebilir tarım için uygun mikroiklim koşulları oluşturduğu belirlenmiştir. Türkiye’nin yüksek güneşlenme potansiyeli ve geniş tarım alanlarına sahip olması, AV sistemlerin yaygınlaştırılmasının ülke açısından önemli avantajlar sunabileceğini göstermektedir.

Santra vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AV sistemlerin aynı arazide güneş enerjisi üretimi ile tarımsal üretimi birleştirerek arazi ve su verimliliğini

artırma potansiyeli incelenmiştir. Çalışmada, panel sıraları arasındaki boşlukların ve panel yıkama sularının tarımsal sulamada değerlendirilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, gölgeye dayanıklı ve düşük su tüketimine sahip bitki türlerinin AV sistemler için daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Araştırma sonuçları, AV'lerin enerji ve gıda üretimini entegre ederek kuraklık ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlara çözüm sunabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, sistem performanslarının farklı iklim bölgelerinde saha deneyimleriyle test edilmesinin gerekliliği de ifade edilmiştir.

Dobos (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AV sistemlerin potansiyeli ele alınmıştır. Çalışmada, arazi kullanım verimliliğinin artırılması, su tasarrufu sağlanması ve yenilenebilir enerji üretiminin teşvik edilmesi gibi temel faydalar vurgulanmıştır. Ayrıca, gölgeye dayanıklı ve az su tüketen bitki türlerinin seçimiyle, bu sistemlerin tarımsal verimliliği düşürmeden enerji üretimini mümkün kıldığı ifade edilmiştir. Farklı iklim bölgelerinde uygulanabilirliğin değerlendirilmesi için saha çalışmalarıyla desteklenen testlerin yapılmasının gerekliliği de belirtilmiştir.

Zainol Abidin vd. (2021) tarafından yürütülen çalışmada AV sistemler ele alınmıştır. Çalışmanın temelinde, sistem performansının belirlenmesinde kullanılan LER kavramı bulunmaktadır. Araştırmada, yüksek LER değerine ulaşmak için iki ana faktör öne çıkarılmıştır: birincisi, PV panellerin yükseklik ve aralık gibi parametrelerinin bitkilere yeterli fotosentetik aktif radyasyon (PAR) geçişini sağlayacak şekilde tasarlanması; ikincisi ise gölgeye toleranslı ürün seçimi ve etkin su yönetimi gibi agronomik uygulamalardır. Uygun sistem tasarımı ve yönetimiyle LER değerinin artırılabilirliği ve sürdürülebilir bir gıda-enerji üretim modelinin oluşturulabileceği sonucuna varılmıştır.

Agostini vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, AV sistemlerin aynı arazi üzerinde hem tarımsal üretim hem de güneş enerjisi üretimine imkân tanıdığı belirtilmiştir. Ayrıca, gölgeleme etkisi sayesinde topraktaki su kaybının azaldığı, bitkilerin aşırı sıcak stresinden korunduğu ve çiftçiler için ek gelir kaynağı oluşturduğu vurgulanmıştır. Böylece AV sistemlerin, tarımsal üretim ile enerji üretimini entegre ederek sürdürülebilir kırsal kalkınmaya katkı sunduğu ifade edilmiştir.

Kumpanalaisatit vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı bölgelerde ve çeşitli bitki türleriyle uygulanan AV sistemlerde değişken verim sonuçları elde edilmiştir. Hindistan'da Aloe vera ve üzüm yetiştiriciliğiyle entegre edilen sistemlerde hem elektrik üretimi sağlanmış hem de toplam ekonomik değer 15 kata kadar arttığı rapor edilmiştir. Tayland'da yapılan uygulamalarda ise PV paneller altında

yetiştirilen lahana ve biber bitkilerinde elektrik üretim verimliliğinin yükseldiği, ancak lahana veriminin belirgin biçimde azaldığı gözlemlenmiştir. Fransa ve Japonya’da yürütülen araştırmalarda, marul ve mısır gibi ürünlerde uygun sistem tasarımı ile tarımsal verim kaybının %4 seviyelerine kadar düşürülebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, su kültürü havuzları ve koyun otlatma alanları gibi farklı kullanım senaryolarında kurulan AV sistemlerde hem hayvansal üretimin sürdüğü hem de panellerin soğutma etkisiyle PV verimliliğinin %30’a kadar arttığı tespit edilmiştir.

Dinesh vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, AV sistemlerin tarım ve güneş enerjisi üretimini aynı arazide birleştirerek arazi kullanımındaki rekabet sorununa yenilikçi bir çözüm sunduğu belirtilmiştir. Bu sistemlerin, elektrik satışından elde edilen ek gelir sayesinde çiftçi gelirlerini %30’dan fazla artırabileceği ifade edilmiştir. Araştırmada ayrıca, yalnızca ABD’deki marul tarlalarının AV sistemlerle dönüştürülmesi durumunda 40–77 GW arasında ek PV kapasite sağlanabileceği ortaya konmuştur. Uygun bitki türlerinin seçilmesiyle tarımsal verim kayıplarının minimize edilebileceği ve gıda güvenliğinin korunabileceği vurgulanmıştır. Enerji ve tarım üretimini entegre eden bu modelin, sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Neupane Bhandari vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, AV sistemlerin ekonomik uygulanabilirliği Nijer’in Dar Es Salam köyü örneğinde incelenmiştir. Araştırmada, geleneksel yağmura bağımlı tarımın yalnızca geçim düzeyinde üretim sağladığı, dizel pompalı sulama sistemlerinin ise yüksek maliyet ve karbon emisyonu nedeniyle sürdürülebilir olmadığı belirlenmiştir. Buna karşın, güneş enerjili sulama sistemlerinin tüm ekonomik göstergelerde olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Çalışmada, 50 kW kapasiteli bir AV sistemin net bugünkü değerinin pozitif olduğu ve arazinin çift amaçlı kullanım verimliliğini gösteren LER’in 1.13–1.33 aralığında hesaplandığı bildirilmiştir. Ayrıca, kurulacak benzer sistemlerin bir köyün temel elektrik ihtiyacını karşılayabileceği ve su kıtlığı sorununa çözüm olabileceği öngörülmüştür. Sonuç olarak, AV sistemlerin Nijer gibi kurak bölgelerde enerji, gıda ve su güvenliği açısından sürdürülebilir bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır.

Dupraz vd. (2011) tarafından Fransa’nın Montpellier bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada, AV sistemlerin verimliliği incelenmiştir. Araştırma, 820 m² büyüklüğündeki deneysel bir alan üzerinde yürütülmüş ve monokristal PV paneller kullanılmıştır. Paneller, yerden 4 metre yüksekliğe ve güneye 25° eğim açısıyla yerleştirilmiştir. Çalışmada iki farklı panel yoğunluğu test edilmiştir: tam yoğunluk (FD) ve yarı yoğunluk

(HD). Denemelerde ana ürün olarak buğday yetiştirilmiş ve modelleme analizleri bu ürün üzerinden yapılmıştır. Araştırma sonuçları, AV sistemlerin arazi kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Tam yoğunluk sisteminde LER değeri 1.73, yarı yoğunluk sisteminde ise LER 1.35 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, AV sistemlerin aynı arazi üzerinde hem gıda hem de enerji üretimini mümkün kıldığını ve arazi verimliliğini %35–73 oranında artırabildiğini göstermektedir.

Trommsdorff vd. (2020) tarafından Almanya'nın Heggelbach bölgesinde Fraunhofer ISE öncülüğünde yürütülen AV araştırmada, tarım ve enerji üretiminin entegrasyonunun önemli verim artışları sağladığı ortaya konmuştur. 194 kWp kapasiteli pilot sistemde buğday ve patates yetiştiriciliği gerçekleştirilmiştir. LER ölçümlerine göre buğday üretiminde %50, patates üretiminde ise %86'lık verimlilik artışı elde edilmiştir. Sistem tasarımında panellerin standart sistemlere göre %33 daha yüksek konumlandırıldığı, ancak arazi kira gelirleri sayesinde bu farkın ekonomik olarak dengelendiği belirlenmiştir. Tarım makinelerinin rahatça çalışabilmesi için bırakılan 5 metre dikey açıklık, tarımsal operasyonların kesintisiz yürütülmesini sağlamıştır.

Braik vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Filistin'de AV sistemlerin potansiyeli değerlendirilmiştir. Araştırmada doğrudan uygulama örnekleri sunulmamış olsa da, teorik olarak sabit eğimli paneller veya güneşi takip eden sistemler gibi farklı PV yapıların kullanılabileceği belirtilmiştir. Özellikle gölge toleransı yüksek sebze türlerinden marul, ıspanak ve bazı meyvelerin bu sistemler için uygun adaylar olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada yapılan modellemelere göre, mevcut güneş enerji santrallerinin altındaki 168 dönümlük alanda tarım yapılması durumunda yılda 300 ton sebze ve 22 ton tarla bitkisi üretiminin mümkün olabileceği öngörülmüştür. Bununla birlikte, optimal sistem tasarımı ve ürün seçimi için yerel saha çalışmalarına ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Kostik vd. (2020) tarafından Rusya'nın güney bölgelerinde yürütülen çalışmada, AV sistemlerin tarım ve enerji üretimini entegre etme potansiyeli incelenmiştir. Krasnodar bölgesinde 1 hektarlık alanda yapılan simülasyon sonuçlarına göre, paneller arası 3,2 metre mesafeye sahip sistemin yıllık 721.216 kWh, 6,4 metre mesafeli sistemin ise 471.593 kWh elektrik ürettiği belirlenmiştir. Ekonomik analizler, sistem maliyetlerinin sırasıyla 558.277 ABD Doları ve 424.216 ABD Doları olduğunu göstermiştir. Tarımsal verimlilik açısından ise, gölgeleme etkisine bağlı olarak ürün veriminde %10–30 arasında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, LER

hesaplamaları sonucunda sistemlerin arazi verimliliğini %45–70 oranında artırdığı ortaya konmuştur.

Cossu vd. (2023) tarafından İtalya'nın Sardinia Adası'nda yürütülen çalışmada, kapalı AV sistemlerin tarımsal sürdürülebilirliği artırma potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada dört farklı marul çeşidi kullanılmış ve sistem, %100 kaplama oranına sahip çok kristalli silikon PV panellerle donatılmıştır. Toplam 176 panel içeren sistemin kurulu gücü 40,48 kWp olarak belirtilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, yeşil yapraklı çeşitlerde LER maksimum 1,53, kırmızı yapraklı çeşitlerde ise 1,09 olarak bulunmuştur. Bu bulgular, dikey tarım ile kapalı AV sistemlerin entegrasyonunun hem ürün verimliliğini hem de arazi kullanım etkinliğini artırdığını ortaya koymaktadır.

Dal Prà vd. (2023) tarafından Kuzey İtalya'nın Mantova bölgesinde yer alan Borgo Virgilio AV tesisinde yürütülen çalışmada, yaz aylarında yüksek sıcaklık ve yoğun güneş ışığı nedeniyle verimi düşen kıvırcık marulun, çift eksenli güneş takipli AV paneller altında yetiştirilebilirliği araştırılmıştır. Tesis, 15 hektarlık bir alan üzerine kurulmuş olup, toplam 7680 panel içermektedir. Denemelerde %13 ve %41 gölgeleme oranları uygulanmış, ayrıca tam güneş alan kontrol parselleri kullanılmıştır. Marul fidelerinde %50 azaltılmış sulama rejimleri test edilmiş; ölçümler taze/kuru ağırlık, bitki boyu ve yaprak sayısı gibi parametreler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, özellikle %41 gölgeleme oranında verim ve bitki boyunun arttığını, gölgeleme altında su kısıtlamasının verim kaybını sınırlı tuttuğunu göstermiştir. Kuru ağırlık açısından ise anlamlı fark gözlenmemiştir. Çalışma, AV paneller altında kıvırcık marulun başarıyla yetiştirilebileceğini, su verimliliği ve ısı stresi yönetimi açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, sistem performansının mevsimsel optimizasyonla geliştirilebileceği vurgulanmıştır.

Malu vd. (2017) tarafından Hindistan'daki üzüm çiftliklerinde yürütülen çalışmada, güneş panelleri ile tarımsal üretimi birleştiren AV sistemlerin teknik ve ekonomik potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma, aynı arazide hem geleneksel üzüm üretiminin sürdürülebileceğini hem de güneş enerjisi üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. Modelleme sonuçlarına göre, üzüm sıraları arasına yerleştirilen panellerin ürün verimini olumsuz etkilemediği belirlenmiştir. Ekonomik analizler ise AV sistemlerin çiftçilerin yıllık gelirlerini 15 kata kadar artırmabileceğini ortaya koymuştur. Ülke genelinde bu sistemin uygulanması durumunda, 15 milyondan fazla kişinin enerji ihtiyacını karşılayabilecek bir potansiyel olduğu öngörülmüştür. Çalışma ayrıca,

konseptin pratikte doğrulanması için pilot ölçekli uygulamalara ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.

Warmann vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'ın Maharashtra eyaletinde yer alan Nashik bölgesindeki üzüm bağlarında AV sistemlerin uygulanabilirliği incelenmiştir. Araştırmada kullanılan paneller, 310 W gücünde polikristal silikon modüllerden oluşmakta ve %15,7 verim değerine sahiptir. Paneller, üzüm bağlarındaki direk aralıklarına yerleştirilerek hem enerji üretimi hem de tarımsal faaliyetin eşzamanlı yürütülmesi amaçlanmıştır. Üzüm bitkisinin kısmi gölge toleransı dikkate alınarak yapılan uygulamada, tarımsal üretimde herhangi bir kayıp gözlenmemiştir. Modelleme sonuçlarına göre, AV sistemler sayesinde elektrik üretiminden elde edilen ek gelirle çiftçi gelirinde yaklaşık 15 kat artış sağlanmıştır. Çalışmada doğrudan bir LER değeri hesaplanmış olmakla birlikte, hem tarımsal üretimin korunması hem de enerji üretiminin sürdürülmesi sonucunda sistemin arazi kullanım verimliliğini artırdığı ve LER değerinin pratikte 1'in üzerinde olduğu belirtilmiştir.

Magarelli vd. (2025) tarafından İtalya'nın Puglia bölgesinde yürütülen çalışmada, üzüm bağlarında ince film amorf silikon paneller kullanılarak AV sistemlerin etkileri incelenmiştir. Araştırmada paneller, bağ sıralarının üzerine yerleştirilmiş ve üzüm bitkileri gölgeleme altında yetiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gölgelemenin toprak nemini artırdığı ve sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyerek üzüm üretimini desteklediğini ortaya koymuştur. Ayrıca panellerin sağladığı elektrik üretimiyle birlikte sistemin arazi kullanım verimliliği LER bakımından 3,54 olarak belirlenmiştir. Bu değer, aynı arazide ayrı ayrı yapılan tarım veya enerji üretimine kıyasla çok daha yüksek bir verimlilik sağlandığını göstermektedir.

Jia vd. (2025) tarafından Çin'in Hubei Eyaleti Qichun County bölgesinde yürütülen çalışmada, sabit eğimli çift yüzeyli silikon paneller altında gerçekleştirilen pirinç yetiştiriciliğinin AV sistemlerdeki performansı değerlendirilmiştir. 140 hektarlık bir sahada iki yıl boyunca süren denemelerde, panellerin oluşturduğu farklı gölgeleme koşullarının pirinç bitkisinin büyüme parametreleri ve fotosentetik verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre, panellerin gölgesinde yetiştirilen pirinç bitkilerinin fotosentetik verimliliği %77 oranında korunmuş, genel verim kaybı ise %18 düzeyinde gerçekleşmiştir. Ancak panellerin düşük kenar (LP) bölgesinde %53 verim kaybı gözlenmiştir. Elektrik üretiminin katkısı da dikkate alındığında, sistemin LER değerinin 1,48–1,49 aralığında olduğu hesaplanmıştır. Bu bulgular, pirinç üretiminde kısmi verim

kayıpları yaşansa da, AV sistemlerin toplam arazi verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Roxani vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Avrupa Yeşil Mutabakatı hedefleri doğrultusunda AV sistemlerin su-enerji-gıda bağlantısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada, Batı Yunanistan'da yer alan Arta Ovası örnek alan olarak seçilmiş ve farklı tasarım parametrelerine sahip hipotetik AV sistemleri değerlendirilmiştir. Modelleme sürecinde monokristal silikon PV paneller kullanılarak farklı yükseklik (1–5 m), eğim açıları (30–50°) ve dizi aralıkları (1,345–10 m) senaryoları analiz edilmiştir. Tarımsal üretim açısından mısır, yonca ve kışlık buğday ürünleri ele alınmış; sonuçlar, gölge toleransı yüksek olan kışlık buğdayın AV sistemlerde en avantajlı ürün olduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgulara göre, LER değerlerinin 1'in üzerinde olduğu ve gölgelemenin buharlaşmayı %50'den fazla azaltarak su tasarrufu sağladığı belirlenmiştir. Genel olarak çalışma, AV sistemlerin tarımsal verimi korurken enerji üretimini artırdığını ve özellikle su kıtlığı yaşanan bölgelerde sürdürülebilir tarım için önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymuştur.

Anusuya vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, farklı PV panel türlerinin enerji üretimi ve arazi verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada 195 kWp gücünde çift taraflı PV paneller, 200 kWp gücünde tek taraflı PV paneller ve 4,32 kWp gücünde AV tek taraflı PV paneller kullanılmıştır. AV paneller yerden 4 metre yükseklikte ve 0,5° eğim açısıyla, geleneksel paneller ise 1 metre yükseklikte ve 2° eğim açısıyla sabitlenmiştir. LER analizine göre, AV sistemlerin hem enerji üretimi hem de tarımsal ürün verimliliğini artırarak arazi kullanım etkinliğini yükselttiği belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, AV panellerin geleneksel sistemlere kıyasla %12,7 daha yüksek güç çıkışı ve %4,4 daha yüksek enerji verimliliği sağladığını göstermiştir. Sistem tasarımında, panellerin tarım alanı üzerinde 4 m yükseklikte yerleştirilerek %25–32 gölgeleme oranına izin verecek şekilde konumlandırıldığı belirtilmiştir.

Günhan ve Taşkın (2025) Bu çalışmada, PV panel altındaki gölgeli koşullarda marul yetiştiriciliği değerlendirilmiş ve farklı sulama seviyelerinin (60–120%) kalite ve verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. PV gölgelemesi altında ışık şiddeti açık alana kıyasla belirgin şekilde azalmış, ancak mikroklima etkisiyle bitki yaprak sıcaklıkları düşmüş ve su kaybı azalmıştır. AV altında en iyi sonuçlar %100 sulama koşulunda elde edilmiş; kafa ağırlığı, kök gelişimi, yaprak sayısı ve pazarlanabilir kalite parametreleri bu grupta en yüksek bulunmuştur. Elektrik üretimi klasik panele göre yalnızca %2,92 daha

düşük gerçekleşmiştir. Sonuçlar, AV sistemlerde marul üretiminin mikroklima avantajıyla birlikte sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Rondan-Sanabria vd. (2023) Peru'nun Arequipa kentinde yürütülen çalışmada, iki farklı büyüme mevsiminde turp yetiştiriciliği AV gölgeleme koşullarında değerlendirilmiştir. Denemede kısmi gölgeleme ile tam ışıklı açık alan koşulları karşılaştırılmış ve gölgelenmenin kök gelişimi, yaprak kütlesi ve toplam hasat verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre, düşük–orta düzey gölgeleme altında yetiştirilen turpların kök çapı ve pazar boyutunda iyileşme görüldüğü, yaprak–kök oranının dengelendiği ve su tüketiminin azaldığı belirlenmiştir. Özellikle sıcak ve kurak dönemlerde gölgelemenin sıcaklık stresini azalttığı, bitki fizyolojisini stabilize ettiği ve kök kalitesini artırdığı tespit edilmiştir. Ancak aşırı gölgelemenin kök gelişimini sınırladığı ve verim düşüşüne yol açtığı görülmüş; optimum gölgeleme oranının turp için orta seviyelerde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, kök sebzelerin yarı gölge ortamlarında AV sistemlerle uyumlu şekilde yetiştirilebileceğini göstermektedir.

Barron vd. (2016) Bu çalışma, büyük ölçekli güneş santrallerinin çevresine kıyasla daha sıcak bir mikroiklim yarattığını göstermektedir. Arizona'da aynı bölgede doğal çöl ekosistemi, otopark ve PV santrali karşılaştırılmıştır. PV sahası, doğal alana göre özellikle gece saatlerinde 3–4°C daha sıcak ölçülmüştür. Bu ısınmanın temel nedenleri; düşük albedo, panel yüzeylerinden yayılan termal radyasyon, ve bitki örtüsü olmaması nedeniyle evapotranspirasyonun azalmasıdır. Sonuç olarak makale, PV ısı adası etkisinin gerçek olduğunu ve gözle görülür sıcaklık artışına neden olabildiğini kanıtlamaktadır.

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Santrale Ait Fiziki Özellikler

Bu çalışmanın gerçekleştirildiği santrallerden ilki, Şekil 4.5'te gösterildiği üzere Van ilinin Tuşba ilçesinde yer almakta olup, bims üretimi yapan bir firmanın kendi elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulmuştur. Söz konusu santral, 38,54° kuzey enlemi, 43,35° doğu boylamı ve 1.729,9 m rakımda konumlanmaktadır. İkinci santral ise Şekil 4.1'de gösterildiği üzere Van ilinin Başkale ilçesinde ticari amaçlı olarak kurulmuştur. Bu santral, 38,05° kuzey enlemi, 44,02° doğu boylamı ve 2.302 m rakımda yer almaktadır. Santrallerin bulunduğu bölge, Türkiye'nin en yüksek güneşlenme potansiyeline sahip alanları arasında yer almaktadır. Van ili, yarı kurak karasal iklim özellikleri göstermekte olup, yaz aylarında uzun süreli güneşlenme ve yüksek sıcaklık değerleri ile öne çıkmaktadır. Kış aylarında ise düşük sıcaklıklar ve sık kar yağışı gözlenmektedir. Tablo 4.1'de Van iline ait 1939–2024 yıllarını kapsayan uzun dönem meteorolojik istatistik verileri özetlenmiştir. Buna göre, yıllık ortalama sıcaklık 9,5 °C, yıllık ortalama günlük güneşlenme süresi ise yaklaşık 7,5 saat olarak belirlenmiştir. En yüksek aylık sıcaklıklar Temmuz ve Ağustos aylarında 36–37 °C seviyelerine ulaşırken, en düşük sıcaklıklar genellikle Ocak ve Şubat aylarında görülmektedir. Bölge, aynı zamanda ortalamanın üzerinde yağış alması nedeniyle tarımsal faaliyetler açısından da önemli bir avantaja sahiptir. Santrallerin fiziksel yerleşimi ve PV panellerin konumlandırılması, Şekil 4.1 ve Şekil 4.5'te yer alan uydu görüntülerinde ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Bu görsellerde, panel dizilerinin arazi üzerindeki dağılımı ve çevredeki tesislerin konumu açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 4.1. Van iline ait genel meteorolojik istatistik veriler

VAN	Oca k	Şub at	Ma rt	Nisa n	May ıs	Hazir an	Temm uz	Ağust os	Eyl ül	Eki m	Kası m	Aralı k	Yıllı k
Ölçüm Periyodu (1939 - 2024)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	-3,1	-2,4	1,7	7,9	13,2	18,3	22,3	22,3	17,9	11,4	5,0	-0,3	9.5
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	2,0	2,7	6,6	13,0	18,6	24,1	28,3	28,5	24,4	17,5	10,3	4,6	15.0
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-7,5	-7,0	-2,7	2,7	7,1	10,9	14,7	14,7	10,8	5,7	0,4	-4,4	3.8
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	4,7	5,5	6,0	7,4	9,3	11,7	12,1	11,4	9,8	7,1	5,6	4,3	7.9
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	10,1	9,87	12,2	12,0	11,1	5,07	1,97	1,29	2,35	8,24	8,97	9,80	93.2
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	36,7	33,5	46,9	54,9	46,6	18,1	6,2	5,8	15,3	46,5	47,1	37,5	395.1
Ölçüm Periyodu (1939 - 2024)													
En Yüksek Sıcaklık (°C)	12,6	14,3	22,7	27,2	29,3	33,5	37,5	36,7	35,0	28,8	20,1	15,5	37.5
En Düşük Sıcaklık (°C)	-	-	-	-	-3,5	-2,6	3,6	5,0	-0,1	-	-18,6	-21,3	-
Sıcaklık (°C)	28,7	28,2	22,7	13,1						14,0			28.7

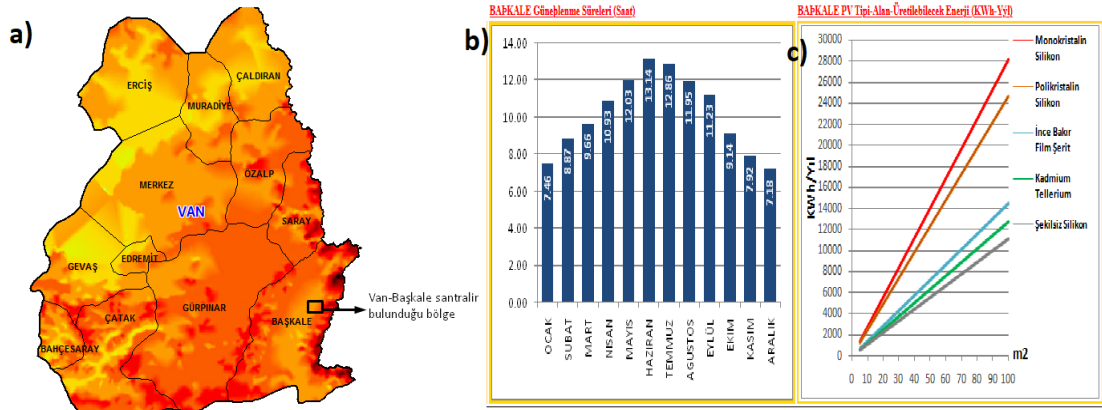
4.2.Tesise Ait Elektriksel Üretim ve PV Santralinin Teknik Özellikleri

4.2.1. Van-Başkale santral

Çalışma kapsamında incelenen santrallerden biri, Van ilinin Başkale ilçesinde yer alan ve 50.000 m²'lik bir alan üzerine kurulu, 4.000 kW AC / 4.400 kW DC kurulu güce sahip, ticari amaçlı olarak işletilen şebeke bağlantılı (on-grid) güneş enerji santralidir. Santrale ait uydu görüntüsü Şekil 4.1'de, GEPA verileri ise Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1.Van ili Başkale ilçesi santrale ait uydu görüntüsü



Şekil 4.2. Van ili için a) Ortalama güneş radyasyonu dağılımı b) Başkale ilçesinin aylık ortalama güneşlenme süresi değeri c) Başkale ilçesi için PV Tipi-Alan üretilebilecek enerji (kWh-yıl) (Anonim, 2025l)

Van'ın Başkale ilçesinde bulunan santralde kullanılan PV paneller, tek yüzeyli (monofacial), 330 W gücünde ve monokristal teknolojisine sahiptir. Paneller, ön kenarı yerden 110 cm, arka ayakları ise 310 cm yüksekliğinde olacak şekilde; 2,5 m genişliğinde ve 2 m uzunluğundaki çelik konstrüksiyonlar üzerine monte edilmiştir. Bu yerleşim düzeni, panellerin optimum güneş ışınımını almasını sağlarken, aynı zamanda panel altı alanların tarımsal üretim amacıyla kullanılmasına olanak tanımaktadır. PV altı saha görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. a) Van Başkale iki sehpa arası AV alanı b) Van Başkale AV uygulamasının PV altı saha fotoğrafı

Panel teknik özellikleri Tablo 4.2’de, bu panellere ait inverter görüntüsü Şekil 4.4’te, özellikleri ise Tablo 4.3’te verilmiştir. Üretici fabrika testlerinde (STC koşullarında; 1000 W/m², 25°C, 1,5 AM) bir panelin yüzey alanı 1,9 m² olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.2.Başkale ilçesi GES kullanılan panel özellikleri

Özellik	Değer
Maksimum Güç – P _{max} (Wp)	330
Maksimum Güç Voltajı – V _{mp} (V)	34,07
Maksimum Güç Akımı – I _{mp} (A)	9,69
Açık Devre Voltajı – V _{oc} (V)	40,91
Açık Devre Akımı – I _{sc} (A)	10,21
Modül Verimi STC (%)	19,78
Güç Toleransı	0-+5
Maksimum Gücün Sıcaklık Katsayısı – P _{max} (%/°C)	-0,393%/°C
Açık Devre Voltajının Sıcaklık Katsayısı – V _{oc} (%/°C)	-0,31%/°C
Açık Devre Akımının Sıcaklık Katsayısı – I _{sc} (%/°C)	0,041%/°C



Şekil 4.4.Van Başkale 60 kW inverter görseli

Tablo 4.3.Van Başkale GES’te kullanılan inverter özellikleri

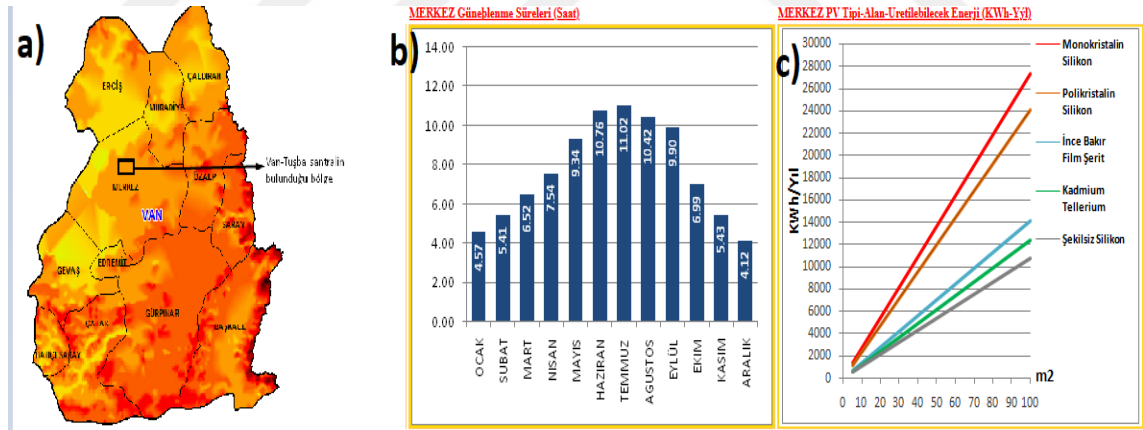
Özellik	Değer
Nominal Aktif Güç	60000
Maks. Aktif Güç	66000
Maksimum Giriş Voltajı	1100
MPPT Başına Maks. Giriş Akımı	22
MPPT Başına Maks. Kısa Devre Voltajı	30
Maksimum Verimlilik (%)	98,9
MPPT Çalışma Voltaj Aralığı	200-1000
Maksimum Giriş Adedi	12
MPPT Adedi	6

4.2.2. Van-Tuşba santral

İkinci santral olan Van’ın Tuşba ilçesindeki tesis, endüstriyel bir işletmenin kendi elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla, mülkiyetine ait 250 m²’lik bir alan üzerine kurulan, 40 kW AC / 43 kW DC kurulu güce sahip şebeke bağlantılı (on-grid) bir güneş enerji santralidir. Şekil 4.5’te bu santrale ait uydu görüntüsü Şekil 4.6’da ise GEPA verileri verilmiştir.



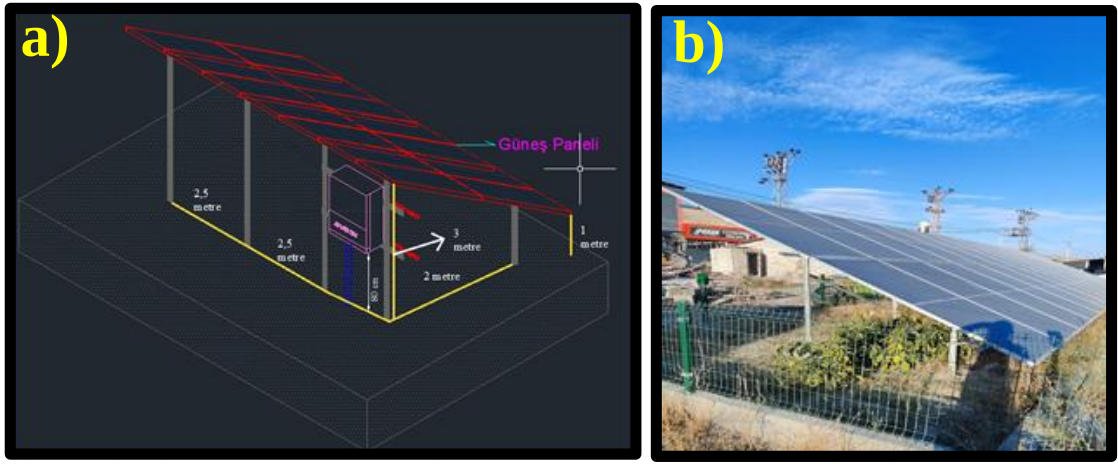
Şekil 4.5. Van ili Tuşba santrale ait uydu görüntüsü



Şekil 4.6. Van ili için a) Ortalama güneş radyasyonu dağılımı b) Van ilini aylık ortalama güneşlenme süresi c) Van ili için PV Tipi-Alan üretilebilecek enerji (kWh-yıl) (Anonim, 2025l)

Van’ın Tuşba ilçesinde bulunan santral alanı, açık ve düz bir arazide konumlanmış olup kuzey-güney doğrultusunda yerleştirilmiştir (Şekil 4.7). Santralde kullanılan PV paneller, çift yüzeyli (bifacial), 500 W gücünde monokristal Half-cut teknolojisine sahiptir. Toplamda 86 adet panel kullanılmış olup, paneller yerden ön uçta 1 metre, arka uçta ise 3 metre yükseklikte, 2,5 metre genişliğinde ve 2 metre uzunluğunda

konstrüksiyonlar üzerine monte edilmiştir. Panel dizilimi yatayda 15, düşeyde 2 adet olacak şekilde yapılmış; paneller arasında ise 2 cm havalandırma boşluğu bırakılmıştır.



Şekil 4.7. a) PV alanının teknik çizimi b) Van AV uygulamasının saha fotoğrafı

Panel teknik özellikleri Tablo 4.4’de bu panellere ait inverter görüntüsü Şekil 4.8’de, özellikleri ise Tablo 4.5’te verilmiştir. Üretici fabrika testlerinde (STC koşullarında; 1000 W/m², 25°C, 1,5 AM) bir panelin yüzey alanı 2,223 m² olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.4. Van ili Başkale GES’te kullanılan panel özellikleri

Özellik	Değer
Maksimum Güç – P _{max} (Wp)	500
Maksimum Güç Voltajı – V _{mp} (V)	33,95
Maksimum Güç Akımı – I _{mp} (A)	14,73
Açık Devre Voltajı – V _{oc} (V)	40,38
Açık Devre Akımı – I _{sc} (A)	15,63
Modül Verimi STC (%)	22,48
Güç Toleransı	0-+5
Maksimum Gücün Sıcaklık Katsayısı – P _{max} (%/°C)	-0,29%/°C
Açık Devre Voltajının Sıcaklık Katsayısı – V _{oc} (%/°C)	-0,25%/°C
Açık Devre Akımının Sıcaklık Katsayısı – I _{sc} (%/°C)	0,045%/°C



Şekil 4.8. Van Tuşba 40 kw inverter görseli

Tablo 4.5. Van Tuşba GES’te kullanılan inverter özellikleri

Özellik	Değer
Nominal Aktif Güç	40000
Maks. Aktif Güç	44000
Maksimum Giriş Voltajı	1000
MPPT Başına Maks. Giriş Akımı	36
MPPT Başına Maks. Kısa Devre Voltajı	30
Maksimum Verimlilik (%)	98.8
MPPT Çalışma Voltaj Aralığı	200-1000
Maksimum Giriş Adedi	2/4
MPPT Adedi	8

İnverterlerin izlenmesi ve veri iletimi amacıyla sistemde Huawei Smart Dongle iletişim modülü kullanılmıştır (Şekil 4.9). Bu cihaz, inverter ile merkezi izleme platformu arasında veri alışverişini sağlayarak performans oranı (PR), enerji üretimi ve çalışma parametrelerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak tanımaktadır. Smart Dongle, inverterin RS485 portu üzerinden bağlanmakta olup Wi-Fi, Ethernet veya LTE/4G bağlantı seçenekleri ile uzaktan izleme imkânı sunmaktadır. IP65 koruma sınıfına sahip olan cihaz, dış ortam koşullarında güvenilir şekilde çalışabilmektedir.



Şekil 4.9. Huawei smart dongle

Panel sıcaklık ve nem ölçümü

Bu çalışmada, AV sistemlerin mikroklimatik koşullar üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla Van ili Başkale ve Tuşba ilçelerinde sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, panel altı ve panel dışı bölgelerde birer saatlik aralıklarla gün boyunca yapılmış; dijital termometreler kullanılarak sensörler hem panel gölgesi altında hem de doğrudan güneş ışınımına maruz kalan referans alanlara yerleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, AV sistemlerin mikroklima üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, panel altı bölgelerdeki hava sıcaklığı panel dışı alanlara kıyasla ortalama 3–6 °C daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu durum; panel altında hava sirkülasyonunun sınırlandırılması, uzun dalga boylu radyasyonun hapsolmesi ve yer yüzeyinde biriken ısıнын tahliyesinin kısıtlanmasıyla açıklanabilir. Özellikle öğle saatlerinde panel altı alanlarda sıcak hava birikiminin daha belirgin hâle geldiği gözlenmiştir.

Bağıl nem ölçümleri ise panel altı bölgelerde %5–7 oranında daha yüksek nem değerleri olduğunu ortaya koymuştur. Bu artış, panel gölgesi altında buharlaşma hızının azalması, doğrudan güneş ışınımının etkisinin zayıflaması ve toprak yüzeyinin daha uzun süre nemli kalmasıyla ilişkilidir. Nem farkının özellikle öğleden sonraki saatlerde maksimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, AV sistemlerin yalnızca enerji

üretimi açısından değil, aynı zamanda mikroklimatik denge üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Panel altındaki daha sıcak ve nemli mikroiklim koşulları, bazı bitki türleri için büyüme koşullarını iyileştirebilir. Van ili gibi yarı kurak iklim bölgelerinde bu durum, bitkisel stresin azalmasına ve toprak neminin korunmasına katkı sağlayabilir. Literatürde klasik PV santralleri için çevreye göre 1–4 °C’ye varan sıcaklık artışları raporlanırken, bu çalışmada panel altı sıcaklığın açık alana göre 3–6 °C daha yüksek ölçülmesi; düşük havalandırmalı konstrüksiyon, sulamaya bağlı yüksek nem ve PV panellerinden kaynaklanan uzun dalga boylu ısı radyasyonunun birleşik etkisine bağlanmıştır. Termometre ölçüm cihazı Şekil 4.10’da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. a)Van Başkale termometre ölçümleri b) Van Tuşba termometre ölçümleri

Pens Ampermetre

Pens ampermetre (clamp meter), iletken üzerinden geçen elektrik akımını devreyi kesmeden, yalnızca manyetik alan değişimini algılayarak ölçebilen temassız bir elektrik ölçüm cihazıdır. True RMS (gerçek etkin değer) özelliğine sahip modeller, özellikle PV sistemlerde değişken ışınım koşulları altında oluşan dalgalı akımların doğru şekilde ölçülmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, DC akım ölçüm kapasitesine sahip UNIT UT204 serisi pens ampermetre kullanılmıştır. Cihaz, PV panellerin anlık akım değerlerinin doğrudan DC kablo üzerinden güvenli ve hızlı bir şekilde ölçülmesine olanak tanımakta; temas gerektirmeyen ölçüm prensibi sayesinde enerji üretimi devam ederken saha ölçümlerinin yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu özellikleriyle, PV sistem performansının yerinde değerlendirilmesi için uygun bir ölçüm aracı olarak tercih edilmiştir. Her iki santralde gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, AV sistemlerde ölçülen

DC gerilim değerlerinin, açık alan (ürünsüz) PV sistemlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

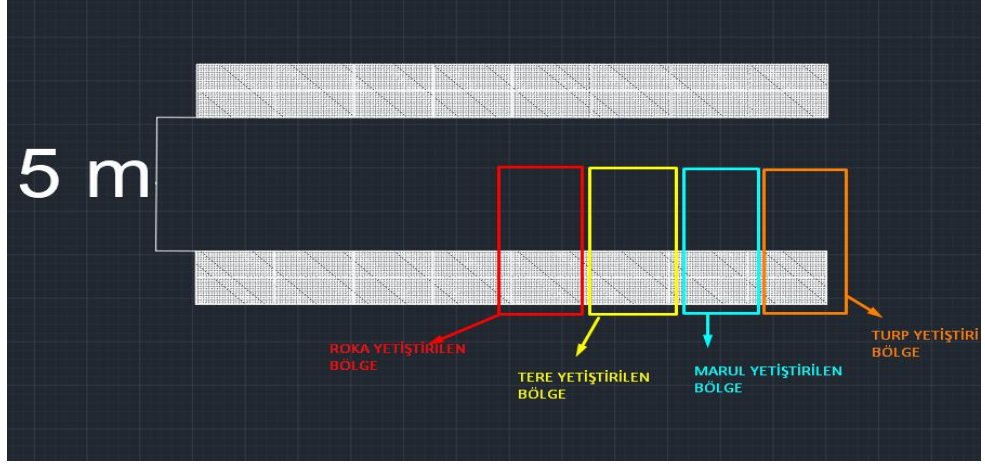


Şekil 4.11. Pens ampermetre

4.3.Tarımsal Üretim ve Parsel Düzeni

4.3.1. Van-Başkale

Van'ın Başkale ilçesinde, AV sistemlerin yüksek rakım koşullarındaki etkilerini incelemek amacıyla turp, marul, roka ve tere bitkileri yetiştirilmiştir. Bu türler, kısa büyüme dönemleri ve serin–nemli iklim koşullarına uyum kabiliyetleri nedeniyle tercih edilmiştir. Başkale’de hâkim olan düşük sıcaklıklar ve yüksek bağıl nem, bu bitkilerin gelişimi için elverişli bir mikroklima oluşturmuştur. Başkale deneme sahasında AV panel altı ve tam açık (kontrol) parseller eşit büyüklükte tasarlanmış olup, her bir parsel yaklaşık 60 m² olacak şekilde düzenlenmiştir. Yetiştirme süreci boyunca damla sulama sistemi, gübreleme programı ve zararlı yönetimi uygulamaları her iki parsel tipinde de aynı koşullarda uygulanmıştır. Deneme sahasının genel görünümü Şekil 4.12’de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Van Başkale AV Deney Sahasının gösterimi

Turp, kısa gelişme süresine sahip bir kök sebze olup optimum gelişimini 10–20 °C arasındaki serin iklim koşullarında göstermektedir. Yüksek sıcaklıklara karşı hassas olan bu bitkide, 30 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar erken saplanma, iç boşluk oluşumu ve kalite kaybına neden olabilmektedir. Turp, doğrudan güneş ışığı altında gelişebilse de aşırı radyasyon ve sıcaklık fotosentetik etkinliği sınırlandırmaktadır. Bu nedenle AV sistemlerde sağlanan kısmi gölgeleme, yaprak sıcaklığını düşürerek su kullanım verimliliğini artırmakta ve bitki gelişimini desteklemektedir. Organik maddece zengin, iyi drene edilmiş tınlı topraklar turp yetiştiriciliği için uygun olup, düzensiz nem koşulları kök deformasyonlarına yol açabilmektedir. Serin ve nemli mikroiklim koşullarında yüksek verim ve kalite göstermesi nedeniyle turp, AV uygulamalarında panel altı yetiştiricilik için uygun türlerden biridir. Van Başkale AV panel altı turp gelişimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Van Başkale Panel Altı Turp Gelişimi

Marul, serin iklim koşullarını seven ve kısa gelişme dönemine sahip bir yaprak sebzesidir. Optimum gelişimini 15–20 °C sıcaklık aralığında göstermektedir. 25 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar, bitkide erken saplanmaya (çiçeklenme) yol açarak yaprak kalitesini olumsuz etkilemektedir. Marul, doğrudan güneş ışığına karşı hassas bir tür olup yoğun radyasyon koşullarında yaprak yanıkları ve su kaybı artmaktadır. Bu nedenle AV sistemlerde oluşan yarı gölgeli mikroiklim koşulları, yaprak sıcaklığının düşmesi ve toprak neminin korunması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. İyi drene edilmiş, organik maddece zengin ve nemli tınlı topraklar marul yetiştiriciliği için ideal olup, düzensiz sulama koşullarında baş yapısında bozulma ve acılaşma meydana gelebilmektedir. Serin ve nemli ortam isteği nedeniyle marul, AV uygulamalarında panel altı yetiştiriciliğe uyum sağlayabilen ve verimliliğini koruyabilen önemli türlerden biridir. Van Başkale AV panel altı marul gelişimi Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Van Başkale Panel Altı Marul Gelişimi

Roka, hızlı gelişen ve serin iklim koşullarını tercih eden bir yaprak sebzesidir. Optimum gelişimini 10–20 °C sıcaklık aralığında göstermektedir. 25 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar bitkide erken çiçeklenmeye, yapraklarda küçülmeye ve tat kalitesinde azalmaya neden olmaktadır. Roka, doğrudan güneş ışığı altında gelişebilmesine rağmen, yoğun radyasyon ve yüksek sıcaklık koşullarında yaprak dokularında solma ve su kaybı gözlenmektedir. Bu nedenle AV sistemlerde sağlanan kısmi gölgeleme, yaprak sıcaklığının düşürülmesi ve fotosentetik etkinliğin korunması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Organik maddece zengin, iyi drene edilmiş ve hafif nemli tınlı topraklar roka yetiştiriciliği için uygun olup, düzenli sulama ve nem dengesinin korunması yaprak kalitesini ve aromatik bileşen yoğunluğunu artırmaktadır. Serin ve nemli mikroiklim koşullarına uyum yeteneği sayesinde roka, AV uygulamalarında panel altı yetiştiricilik için uygun türlerden biridir. Van Başkale AV panel altı roka gelişimi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Van Başkale Panel Altı Roka Gelişimi

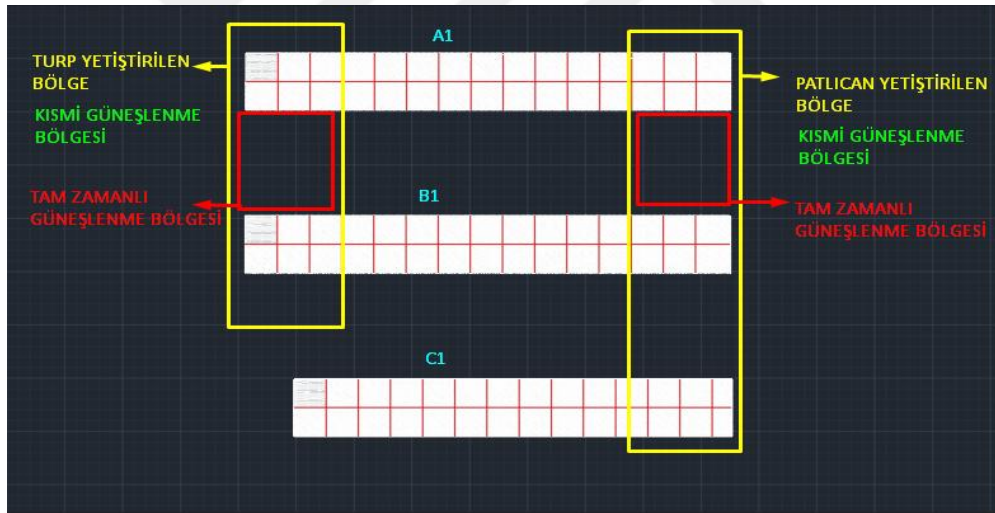
Tere, hızlı gelişen ve serin iklim koşullarına iyi uyum sağlayabilen bir yaprak sebzesidir. Optimum gelişimini 10–20 °C sıcaklık aralığında göstermekte olup, yüksek sıcaklıklara karşı hassasiyet göstermektedir. 25 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar bitkide erken çiçeklenmeye, yaprak kalitesinde düşüşe ve aromatik özelliklerin zayıflamasına neden olabilmektedir. Tere, doğrudan güneş ışığı altında yetişebilmesine rağmen, yoğun radyasyon ve yüksek sıcaklık koşullarında yapraklarda su kaybı ve solma gözlenmektedir. Bu nedenle AV sistemlerde oluşan kısmi gölgeleme, yaprak sıcaklığının düşürülmesi ve fotosentetik etkinliğin korunması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Organik maddece zengin, iyi drene edilmiş ve sürekli nemli tınlı topraklar tere yetiştiriciliği için ideal olup, düzensiz sulama koşulları bitki gelişimini olumsuz etkileyebilmektedir. Serin ve nemli mikroiklim koşullarına olan yüksek adaptasyon kabiliyeti sayesinde tere, AV uygulamalarında panel altı yetiştiricilik için uygun ve verimliliğini koruyabilen türlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Van Başkale AV panel altı tere ekimi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Van Başkale Panel Altı Tere Gelişimi

4.3.2. Van-Tuşba

Van'ın Tuşba ilçesinde, AV sistemlerin tarımsal verimlilik ve mikroiklim koşulları üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla patlıcan ve turp yetiştirilmiştir. Bu türler, bölgenin yaz dönemine özgü yüksek sıcaklık, yoğun güneş ışınlamı ve değişken nem koşullarına verdikleri farklı fizyolojik tepkiler nedeniyle seçilmiştir. Patlıcan, yüksek sıcaklık ve ışık yoğunluğuna dayanıklı olup kısmi gölge koşullarında da gelişimini sürdürebilen bir türdür. Buna karşılık turp, kısa gelişme periyoduna sahip olup serin ve nemli mikroiklim koşullarında optimum gelişim göstermektedir. Deneme parselleri, AV panellerin altında ve tam açık (kontrol) alanlarda oluşturulmuş; her bir parsel yaklaşık 60 m² olacak şekilde düzenlenmiştir. Panel altı parseller PV panel sıralarının doğrudan altına, kontrol parselleri ise gölgeleme almayan açık alanlara yerleştirilmiştir. Tüm parsellerde damla sulama ile düzenli su temini sağlanmış; bitki besleme ve zirai mücadele uygulamaları her iki parsel tipinde de aynı şekilde yürütülmüştür. Deneme sahasının genel görünümü Şekil 4.17'de sunulmuştur.



Şekil 4.17. Van Tuşba AV deney sahasının gösterimi

Patlıcan, sıcak iklim koşullarını seven ve uzun gelişme dönemine sahip bir yazlık sebzedir. Optimum gelişimini 25–30 °C sıcaklık aralığında göstermekte olup, 15 °C'nin altındaki sıcaklıklarda büyüme yavaşlamakta, 10 °C'nin altında ise durmaktadır. Bununla birlikte, 35 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar çiçek dökülmesine ve meyve tutumunda azalmaya neden olabilmektedir. Patlıcan yüksek ışık şiddetine ihtiyaç duymakla birlikte, aşırı radyasyon yaprak sıcaklığını artırarak su kaybına yol açabilmektedir. Bu nedenle AV sistemlerde sağlanan kısmi gölgeleme, yaprak sıcaklığının düşürülmesi yoluyla su

kullanım verimliliğini artırmakta ve bitki gelişimini desteklemektedir. Ancak yapılan gözlemler, patlıcan bitkisinin tam açık (kontrol) alanlarda, AV panel altına kıyasla daha güçlü ve dengeli bir gelişim sergilediğini ortaya koymuştur. Patlıcan yetiştiriciliğinde dengeli sulama büyük önem taşımakta; su eksikliği veya aşırı sulama meyve kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Organik maddece zengin, iyi drene edilmiş tınlı topraklar patlıcan için uygun olup, optimum toprak pH aralığı 6,0–7,0'dır. Bu bulgular, patlıcanın yüksek ışık gereksinimi nedeniyle açık alan koşullarında daha avantajlı olduğunu, AV uygulamalarında ise tür seçiminin kritik önem taşıdığını göstermektedir. Van Tuşba AV panel altı patlıcan gelişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Van Tuşba Panel Altı Patlıcan Gelişimi

Hasat olgunluğuna ulaşan ürünler belirli aralıklarla toplanmış, verim değerlendirmesi taze sebze ağırlığı esas alınarak gerçekleştirilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Bunun yanı sıra mahsul miktarı, fide boyu, bitki boyu ve yaprak boyu gibi gelişim parametreleri de ölçülerek değerlendirilmiştir. Her yetiştirme sezonu sonunda, AV parseller ile kontrol (açık alan) parsellerinin verim ve gelişim parametreleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Van Tuşba AV panel altı turp gelişimi Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Van Tuşba Panel Altı Turp Gelişimi

4.4. FusionSolar

FusionSolar, Huawei tarafından geliştirilen ve PV santrallerinin izlenmesi ile yönetilmesine olanak sağlayan bulut tabanlı bir enerji izleme platformudur. Sistem, sahadaki inverterler ve ölçüm sensörlerinden elde edilen verileri merkezi bir altyapı üzerinden işleyerek kullanıcıya sunmaktadır. Bu sayede enerji üretimi ve sistem performansı gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir. FusionSolar platformu; veri toplama, analiz, alarm yönetimi ve uzaktan kontrol olmak üzere dört temel işlevi bir arada sunmaktadır. Güç üretimi, panel sıcaklığı, ışınlım ve sistem verimliliği gibi parametreler sürekli olarak izlenmekte, inverter veya string bazında oluşabilecek performans sapmaları otomatik olarak tespit edilmektedir. Bu özellik, bakım ve işletme süreçlerinin daha etkin yürütülmesine ve işletme sürekliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca sistem, günlük, aylık ve yıllık enerji üretimi ile performans oranı (PR) gibi göstergeleri otomatik olarak hesaplayarak raporlamaktadır. Bu çalışma kapsamında FusionSolar platformu, PV ve AV sistemlere ait elektrik üretim verilerinin izlenmesi, kaydedilmesi ve analiz edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu raporlar, PV ve AV sistemlerin teknik ve ekonomik performanslarının uzun dönemli değerlendirilmesinde önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır.

4.5. PVsyst

PVsyst, PV sistemlerin tasarımı, simülasyonu ve performans analizinde yaygın olarak kullanılan profesyonel bir yazılımdır. İsviçre’de CUEPE tarafından geliştirilmiş

olup, akademik çalışmalar ve mühendislik uygulamalarında PV santrallerinin teknik ve ekonomik değerlendirilmesinde referans bir araç olarak kabul edilmektedir. Yazılım; şebeke bağlantılı (on-grid), bağımsız (off-grid) ve hibrit PV sistemlerin analizine olanak tanımaktadır.

PVsyst'te coğrafi konum, PV panel ve inverter özellikleri, eğim açısı, azimut ve gölgeleme koşulları tanımlanarak saatlik ve yıllık bazda enerji üretim simülasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Meteorolojik veriler (Meteonorm, NASA-SSE, PVGIS vb.) kullanılarak yıllık enerji üretimi, performans oranı (PR), kayıp diyagramları ve enerji dengesi raporları elde edilmektedir. Yazılımın gölgeleme analiz modülü sayesinde panel sıraları, ara mesafe ve yükseklik gibi geometrik parametreler dikkate alınarak farklı gölgeleme senaryoları modellenmektedir. Bu özellik, AV sistemlerde gölge yoğunluğu ve ışık geçişinin değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca PVsyst, optik, termal, inverter, kablo ve kirlenme (soiling) kaynaklı enerji kayıplarını ayrıntılı biçimde analiz ederek sistem performansının bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında PVsyst yazılımı, PV ve AV sistemlerin yıllık enerji üretim tahminlerinin yapılması, performans oranlarının (PR) hesaplanması ve kayıp analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

4.6. Verimlilik Analizi: Arazi Eşdeğer Oranı (LER)

Bu çalışmada, AV sistemlerin arazi kullanım verimliliği LER kullanılarak değerlendirilmiştir. LER, birim arazi üzerinde aynı üretim miktarına ulaşmak için gereken monokültür (yalnızca tarımsal üretim veya yalnızca enerji üretimi) alanı ile entegre AV sistemin arazi ihtiyacını karşılaştıran bir göstergedir. $LER > 1$ olması, aynı miktarda ürün ve/veya enerji üretimi için AV sistemin daha az araziye ihtiyaç duyduğunu ve arazi kullanım verimliliğinin arttığını; $LER < 1$ olması ise entegre sistemin monokültüre kıyasla daha düşük verim sunduğunu ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Van ili Tuşba ilçesinde patlıcan ve turp, Başkale ilçesinde ise marul, roka, tere ve turp bitkileri için yıllık LER değerleri hesaplanmıştır. Tarımsal bileşen için LER hesaplamasında, AV panel altı parsellerden elde edilen mahsul miktarları ile tam açık (kontrol) alanlardan elde edilen mahsul miktarları karşılaştırılarak ürün verimindeki değişim değerlendirilmiştir. Enerji bileşeni için ise AV sistemden elde edilen elektrik üretimi, aynı konumda ve benzer kurulu güce sahip tam kapasiteli bir PV

santralinin tahmini elektrik üretimi ile karşılaştırılmıştır. Tarımsal ve elektriksel üretim verileri birlikte analiz edilerek, AV sistemin toplam arazi kullanım verimliliği ortaya konmuştur. Elektrik üretimine ilişkin veriler inverter kayıtlarından aylık bazda temin edilerek değerlendirmeye dâhil edilmiştir.

$$LER = \frac{Y_{tarım(AV)}}{Y_{tarım(AA)}} + \frac{Y_{elektrik(AV)}}{Y_{elektrik(PV)}} \quad (4.1)$$

Burada, $Y_{tarım(AV)}$ AV sistemde elde edilen tarımsal ürün verimini, $Y_{tarım(AA)}$ ise geleneksel (panelsiz) tarımda elde edilen ürün verimini ifade etmektedir. $Y_{elektrik(AV)}$, AV sistemde elde edilen elektrik üretimini; $Y_{elektrik(PV)}$ ise standart PV santralinde elde edilen elektrik üretimini göstermektedir. Bu oran, tarım ve güneş enerjisinin birlikte entegre edilmesinin arazi verimliliğine katkısını nicel olarak ortaya koymaktadır.

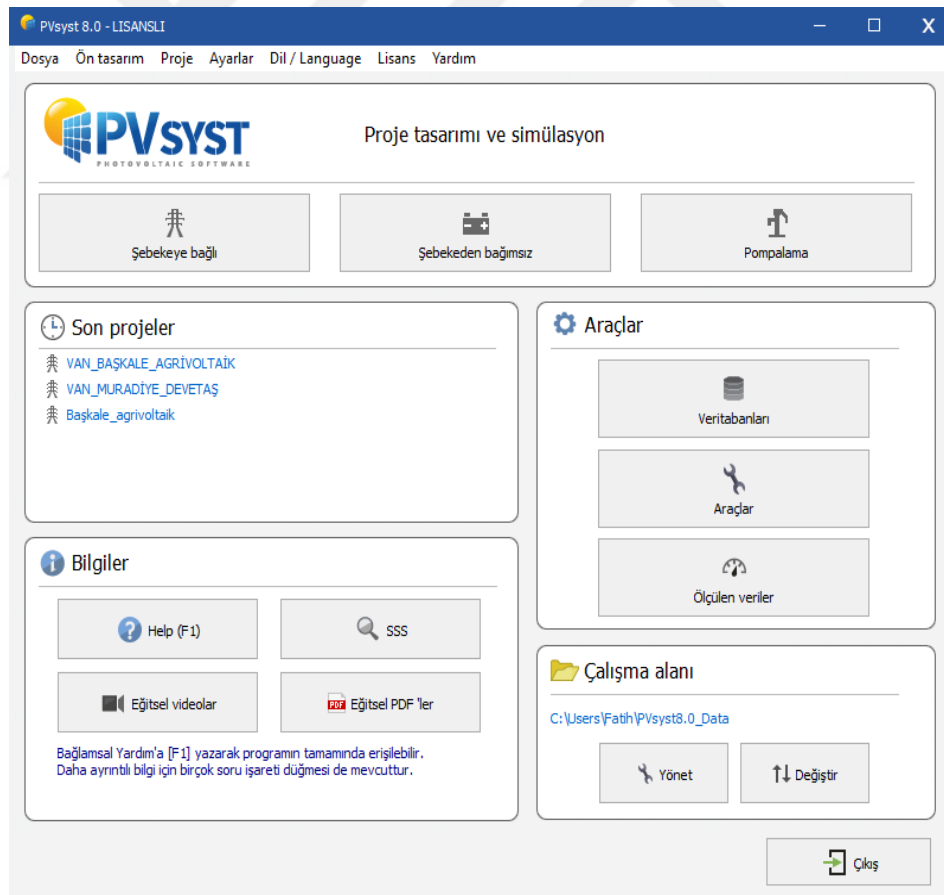
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1.Elektriksel Üretim Verileri

5.1.1. Van-Başkale Elektrik Üretim Verileri

5.1.1.1. PVsyst Sistem Tasarımı

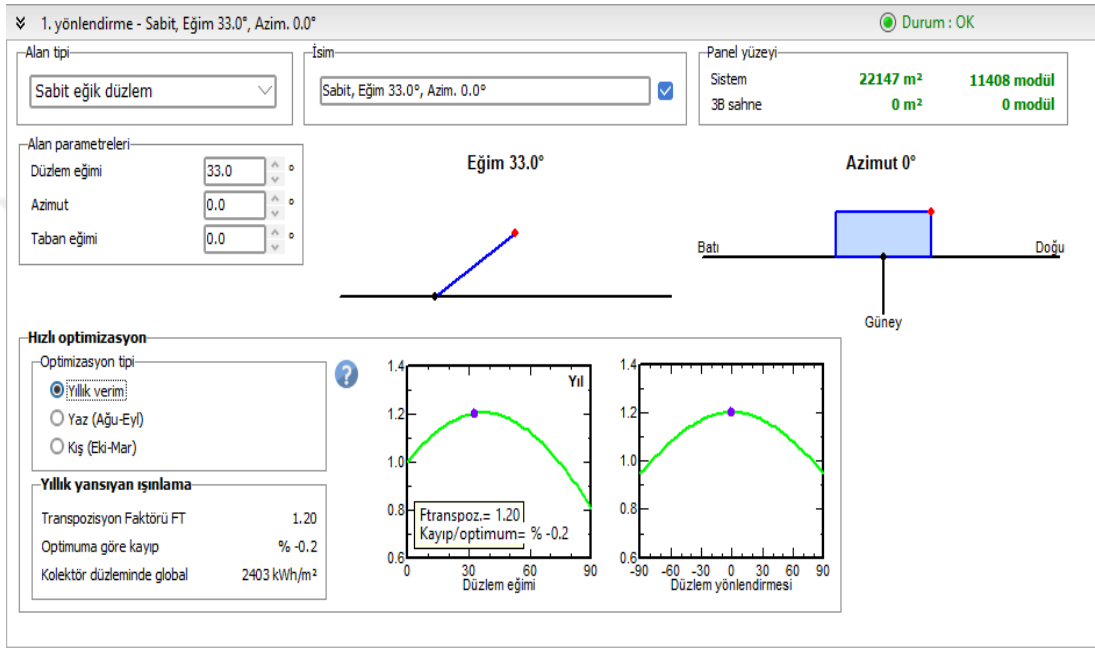
PVsyst yazılımı, bu çalışmada Van–Başkale santraline ait PV sisteminin yıllık enerji üretim potansiyelinin tahmin edilmesi ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Simülasyonlarda güneş radyasyonu, gölgeleme etkileri, sıcaklık kaynaklı kayıplar ve sistem konfigürasyonları dikkate alınarak aylık ve yıllık üretim değerleri elde edilmiştir. PVsyst çıktıları, saha ölçümleriyle karşılaştırılarak sistem performansının doğrulanmasında ve kayıp mekanizmalarının yorumlanmasında kullanılmıştır. PVsyst yazılımına ait arayüz Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. PVsyst program arayüzü

5.1.1.1.1. Yönlendirme

Aşağıda verilen Şekil 5.2’de Transpozisyon yıllık verimi PVsyst simülasyon yazılımında sabit eğik düzlem tipinde bir PV sistem için yapılan yönlendirme optimizasyonuna ait temel yapılandırma ekranını göstermektedir. Bu sistem konfigürasyonunda, panel yüzeyi sabit eğimli olacak şekilde tasarlanmıştır ve dinamik izleme sistemi kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Yıllık transpozisyon verimi

- Sistem Geometrisi ve Panel Dizilimi

Düzlem Eğimi: PV modüllerinin yatay düzleme göre olan eğimini ifade etmektedir. 33⁰ eğim, Van ili gibi yüksek enlemi bölgeler için genellikle yıllık üretimi maksimize etmeye yönelik optimal bir değer olan 33⁰ değer seçilmiştir.

Azimut Açısı: Bu değer, sistemin tam güney yönelimli olduğunu gösterir. Azimut 0⁰ olması, modüllerin güneşe maksimum doğrudan maruz kalması açısından avantaj sağlar.

- Yıllık Yansıyan Işınlama

Transpozisyon Faktörü: Sol alttaki grafik, sistem eğiminin yıllık toplam ışınlam (FT) etkisini göstermektedir. En yüksek verimin elde edildiği eğim değeri 33⁰ olarak belirlenmiş ve Transpozisyon değeri 1,20 olarak hesaplanmıştır. Bu yataya gelen ışınlama kıyasla panel düzlemine düşen ışınlamın 1,20 kat daha fazla olduğunu ifade eder.

Kayıp/optimum: %-0,2 değeri ise, seçilen eğimin teorik maksimuma çok yakın olduğunu, dolayısıyla ışıınım açısından optimal bir tasarım yapıldığını göstermektedir.

Kollektör Düzlemine Global Işıınım: 2403 kWh/m²/yıl'dır. Bu değer, PV modüllerinin yüzeyine bir yıl boyunca düşen toplam güneş enerjisi miktarını göstermektedir. Bu seviye, yüksek verimli sistemler için oldukça uygun bir değer olup, üretim tahminlerini temellere dayandığını gösterir.

5.1.1.1.2. Sistem özellikleri

- PV Modül ve İnvertör Seçimi: Bu çalışma kapsamında oluşturulan PV sistem tasarımında, PVsyst yazılımı aracılığıyla PV modülleri ve inverterler arasında uygun elektriksel eşleştirme yapılmıştır. Seçilen modül, yüksek sıcaklıklarda performans düşüşünü minimize edecek şekilde tasarlanmış olup, sistem tasarımında ısıya bağlı gerilim değişimleri dikkate alınarak uygun dizi yapılanması planlanmıştır. İnverter, çoklu bağımsız MPPT (Maximum Power Point Tracker) yapısına sahip olup, MPPT'ler arasında güç paylaşımı olmaksızın her bir girişte farklı dizi konfigürasyonlarının izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellik, arazide farklı eğim, yönelim ya da gölgeleme koşullarına sahip alanlarda sistem performansının artırılmasına katkı sağlar. Şekil 5.3'te PVsyst inverter panel seçimi ekranı verilmiştir.

PV modül seçimi

Mevcut Filtre Tüm PV modülleri Gereken tahmini modül sayısı **12121**

HT Solar (Tangshan Ha) 330 Wp 32V Si-poly HTM330PA-72 2018 yılından beri Manufacturer 2018

☐ Optimizer kullan

Gerilim boyutlama : Vmp (60°C) **32.4 V**
Voc (-10°C) **51.0 V**

İnvertör seçimi

Mevcut Çıkış gerilimi 480 V Tri 50Hz ☒ 50 Hz ☒ 60 Hz

Huawei Technologies 60 kW 200 - 1000 V TL 50/60Hz SUN2000-60KTL-M0-480Vac 2018 yılından beri

MPPT giriş sayısı ☒ Çalışma gerilimi: **200-1000 V** Kullanılan invertör gücü **3080 kWac**
Maksimum giriş gerilimi: **1100 V** **6 MPPT ile invertör**

☐ İnvertör içinde PNom paylaşımı
☒ Bağımsız MPPT girişleri

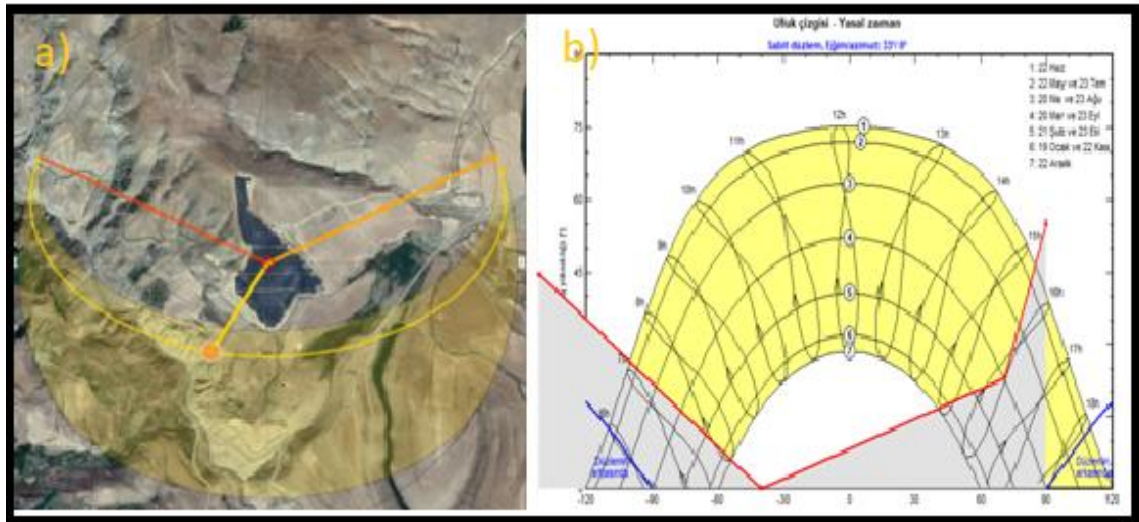
MPPT'ler arasında güç paylaşımı yok

Şekil 5.3. PVsyst inverter panel seçimi

PVsyst kullanılarak gerçekleştirilen ufuk faktörü ve gölgeleme analizleri, PV sistemin kurulu olduğu konumda çevresel engellerin (topografya ve arazi eğimi) güneş ışıınımı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Ufuk çizgisi, özellikle gün doğumu ve gün

batımı saatlerinde doğrudan güneş ışınımının panellere ulaşmasını sınırlandırmakta ve bu zaman aralıklarında enerji üretiminde kayıplara neden olmaktadır.

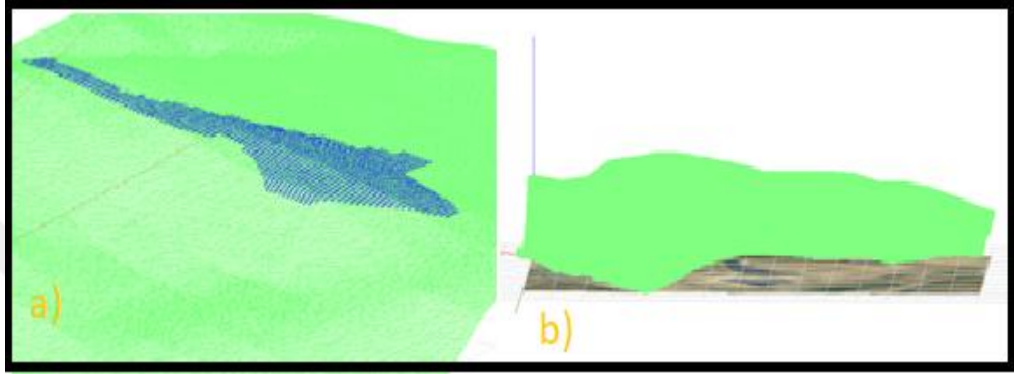
Şekil 5.4(a)'da santralin bulunduğu konuma ait ufuk faktörü açıları gösterilirken, Şekil 5.4(b)'de PVsyst güneş yolu diyagramı üzerinde ufuk çizgisi ile birlikte gölgeleme durumu sunulmuştur. Diyagram incelendiğinde, yılın belirli dönemlerinde ve özellikle sabah ile akşam saatlerinde güneşin ufuk çizgisinin altında kaldığı zaman aralıklarında doğrudan ışınım alınamadığı görülmektedir. Bu durum, sistemin üretim yapamadığı saatlerin belirlenmesine ve toplam enerji kayıplarının nicel olarak değerlendirilmesine imkân sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, kurulum alanının topografik özelliklerinin PV sistem performansı üzerinde belirleyici olduğunu ve ufuk faktörünün yıllık enerji üretim tahminlerinde dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Van-Başkale a) PV santralin bulunduğu konumun ufuk faktör açıları b) PVSYST gölgeleme analizi

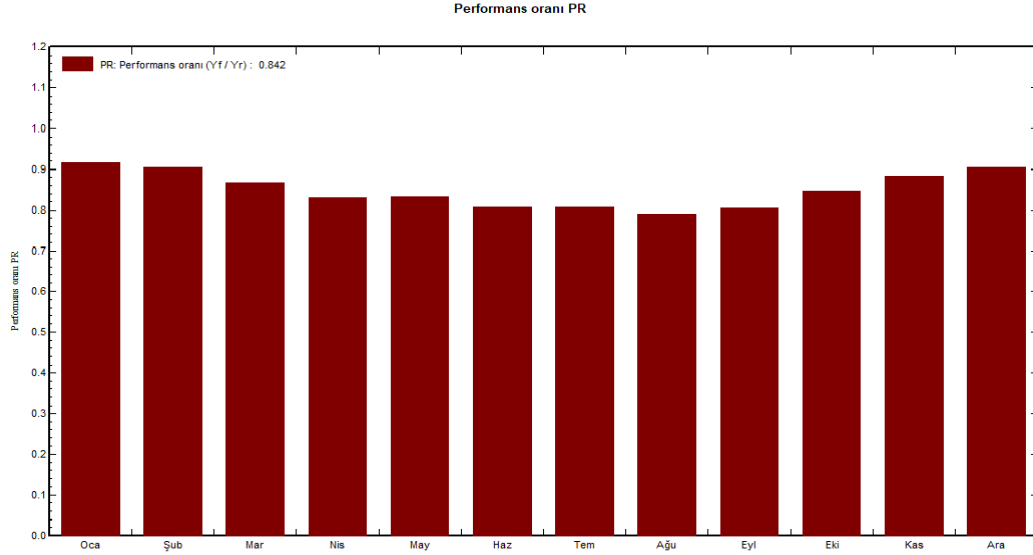
Şekil 5.5'te, PVsyst yazılımı kullanılarak güneş enerji santralının kurulacağı arazinin üç boyutlu topografik modellemesi gösterilmektedir. Bu modelleme sayesinde santral sahasına ait eğim, yönelim (azimut) ve yükseklik değişimleri dikkate alınarak panel yerleşimi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, arazi topografyasının panel dizilimleri ve gölgeleme kayıpları üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

PVsyst aracılığıyla gerçekleştirilen simülasyonlar, güneş ışınımının arazi üzerindeki dağılımını ve topografyaya bağlı gölgeleme etkilerini net biçimde ortaya koymuştur. Bu doğrultuda panel dizilimleri optimize edilerek gölgeleme kaynaklı enerji kayıplarının azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca eğimli arazilerde doğal eğimin kullanılması, panel eğiminin ek konstrüksiyon ihtiyacı olmadan sağlanmasına imkân tanımış; bu durum hem montaj maliyetlerinin düşmesine hem de enerji üretim verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 5.5. Van-Başkale a) GES topolojik yapıya panel diziliş gösterimi b) GES topolojik yapının harita üzerine oturtulması

Performans oranı (PR), bir PV santralının teorik maksimum üretimine kıyasla gerçek üretim performansını gösteren temel bir göstergedir ve sıcaklık, inverter, kablo, gölgeleme ve tozlanma gibi tüm sistem kayıplarını içermektedir. Aylık PR değerlerinin incelenmesi, mevsimsel koşulların sistem performansı üzerindeki etkisini ortaya koyarken, yıllık ortalama PR değeri santralin genel verimliliğini yansıtmaktadır. Van–Başkale santraline ait aylık PR değişimi incelendiğinde, yaz aylarında sıcaklık artışına bağlı olarak PR değerlerinde sınırlı bir düşüş gözlenmiş, sonbahar ve kış aylarında ise daha yüksek PR değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Yıllık ortalama PR değeri 0,842 olarak hesaplanmış olup, bu değer santralin yüksek verimlilikle çalıştığını ve sistem kayıplarının kabul edilebilir düzeylerde olduğunu göstermektedir. Van–Başkale santraline ait aylık PR dağılımı Şekil 5.6’da sunulmuştur.



Şekil 5.6. Van-Başkale GES santralinin PR değeri

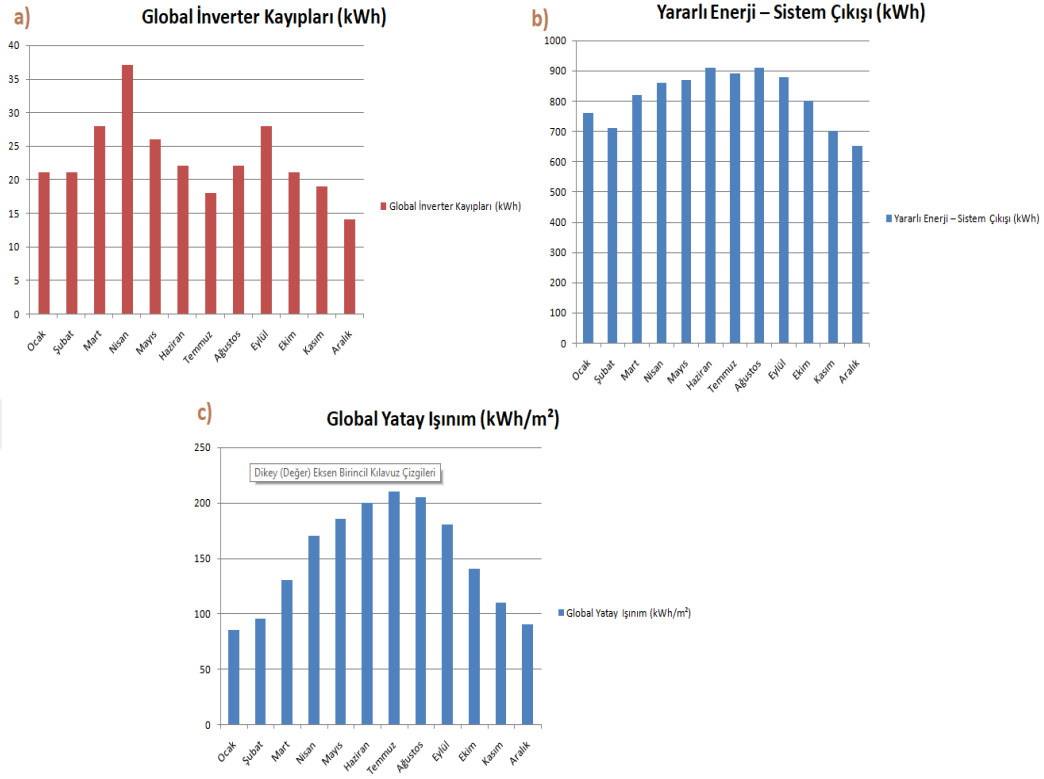
Van'ın Başkale ilçesinde sistemden elde edilen elektrik üretimi, saha üzerindeki inverter kayıtlarına dayanarak belirlenmiştir. Çalışmada, aynı koşullarda ve aynı panel tipiyle, yalnızca elektrik üretimine ayrılmış standart bir PV santralinde elde edilebilecek teorik maksimum üretim hesaplanmış ve bu değer saha ölçeğinde gerçekleştirilen PR hesaplaması için referans olarak değerlendirilmiştir. Yapılan ölçümlerde, elektrik üretimi sahanın tüm kurulu gücünü temsil edecek biçimde, toplam üretim verileri üzerinden ele alınmıştır.

Şekil 5.7(a)'da global inverter kayıpları, sistemdeki PV panellerden elde edilen doğru akımın (DC), inverter cihazları vasıtasıyla alternatif akıma (AC) dönüştürülmesi sırasında meydana gelen enerji kayıplarını ifade etmektedir. Yıllık toplam inverter kaybı 271.845 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu kayıplar, aylık bazda incelendiğinde Nisan ayında maksimum seviyeye ulaşırken, Temmuz ve aralık aylarında minimum seviyelerdedir. Bu durum, inverter kayıplarının üretim miktarıyla paralel olarak değiştiğini göstermektedir.

Şekil 5.7(b)'de global yatay ışınlam, yıllık toplam 2001 kWh/m² olarak ölçülmüştür. Bu değer, sistemin kurulu bulunduğu bölgeye yatay düzlemde düşen toplam güneş enerjisi miktarını temsil etmektedir. Güneş ışınlamı, PV sistemlerde enerji üretiminin temel belirleyicisidir. ve mevsimsel değişimlere bağlı olarak yıl içerisinde farklılık göstermektedir.

Şekil 5.7(c)'de yararlı enerji(sistem çıkışı), güneş enerji sisteminden inverter sonrası elde edilen ve şebekeye verilen net elektrik enerjisini göstermektedir. Yıllık toplam

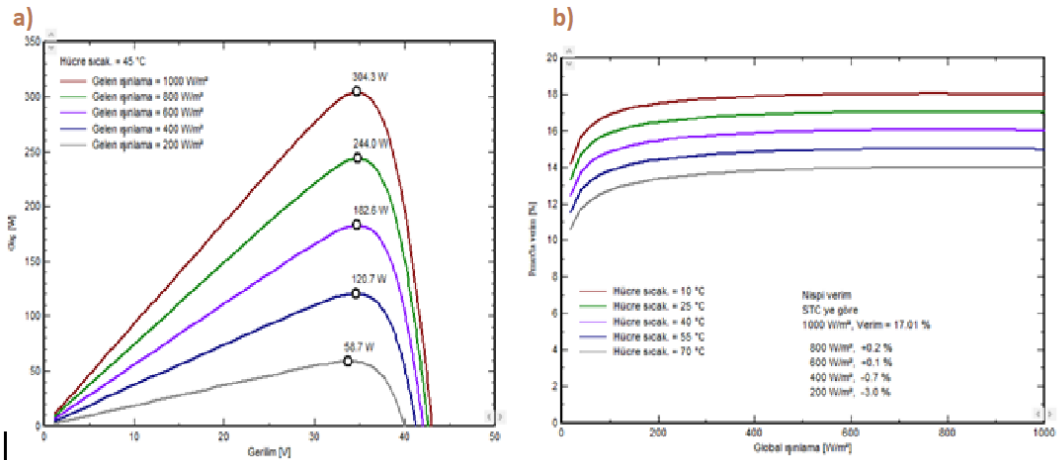
üretim 975840 kWh olarak hesaplanmıştır. Aylık üretim değerleri değerlendirildiğinde, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında üretim maksimum seviyelere ulaşmaktadır. Ocak, Şubat ve Aralık aylarında ise minimum değerlere düşmektedir.



Şekil 5.7. Aylık üretim ve kayıp miktarları a) İnvertör kayıpları b) Yararlı enerji(üretilen) miktarı c) Işınım (kWh/m²) miktarı

Şekil 5.8'de, elektriksel üretimin çevresel koşullara ve sistem sıcaklığına duyarlılığını göstermektedir. Şekil 5.8(a)'da 1000 W/m² ışıınım için farklı hücre sıcaklıklarında (10°C - 70°C) PV modülün akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri sunulmuştur. Sıcaklık arttıkça, modülün maksimum güç noktası (P_{mp}) ve genel verimi belirgin şekilde düşmektedir. Bu durum, AV sistemlerde, özellikle panel altı mikroklima sayesinde panel sıcaklığının arttırılması ile elektrik üretiminde kısmi bir düşüş göstermektedir. Şekil 5.8(b)'de ise farklı sıcaklıklarda ve ışıınım seviyelerinde PV modülün nispi verimi gösterilmektedir. Yüksek sıcaklık ve düşük ışıınımda verim kaybı daha belirgin olup, STC (standart test koşulları) altında %17,01 seviyesinde maksimum verime ulaşabilmektedir. AV sahalarda, tarımsal üretimin panel altındaki toprakta nemi koruyarak ve buharlaşmayı azaltarak panel sıcaklığını arttırdığını, böylece yaz aylarında

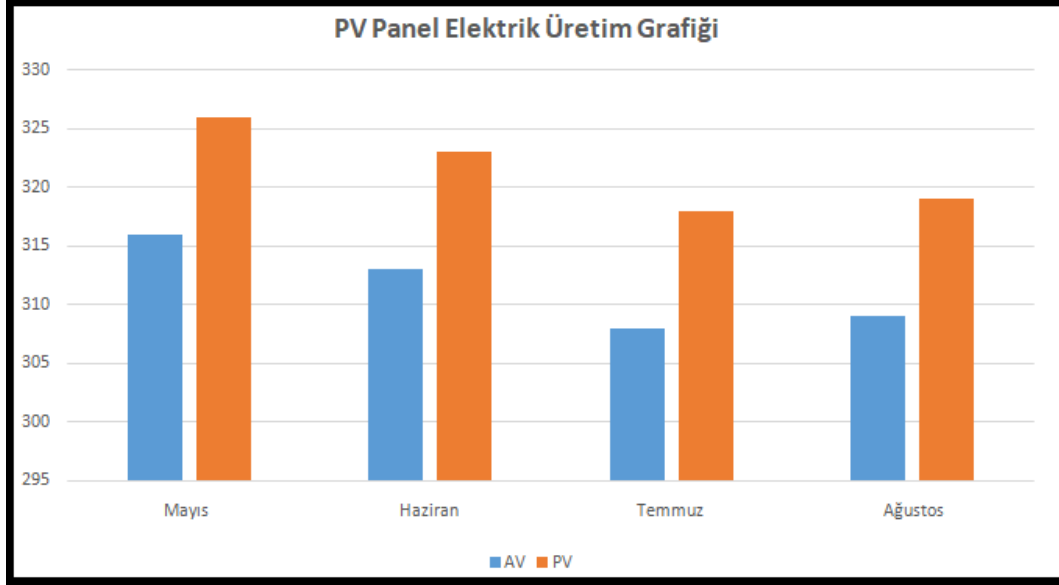
elektrik üretim performansını olumsuz yönde etkileyebildiği literatürde de vurgulanmaktadır.



Şekil 5.8. Van'ın Başkale ilçesindeki GES panel verileri a) Güç (W) ve gerilim (V) grafiği
b) Işınım sıcaklık arasındaki

Şekil 5.9'da sunulan elektrik üretim grafiği, aynı sahada yer alan aynı tip ve aynı sabit eğimli PV panellerin, panel altı alanın tarımsal üretim için kullanıldığı AV koşulu ile panel altının boş bırakıldığı kontrol (PV) koşulu altındaki Mayıs–Ağustos dönemine ait aylık elektrik üretimlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen tüm aylarda kontrol (PV) koşulundaki panellerin elektrik üretimi, AV koşulundaki panellere kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında iki kullanım koşulu arasındaki üretim farkı aylık ortalama yaklaşık 10 W seviyesinde olup, bu farkın yaz aylarında daha belirgin hâle geldiği görülmüştür. Gözlenen üretim farkı, panel eğimi, montaj geometrisi veya panel tipindeki bir değişimden kaynaklanmamakta; panel altı alanın tarımsal faaliyetler nedeniyle değiştirdiği mikroklimatik koşullarla ilişkilendirilmektedir. AV koşulunda panel altında bitki yetiştirilmesi ve buna bağlı düzenli sulama uygulamaları, panel altı bölgede bağıl nemin artmasına ve toprak yüzeyinden kaynaklanan ısı–nem akılarının güçlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, panel arka yüzeyinde doğal soğutmayı sınırlandırarak hücre sıcaklığının yükselmesine yol açmakta; artan hücre sıcaklığı ise PV modüllerin sıcaklık katsayısı etkisiyle elektrik üretiminde azalmaya neden olmaktadır. Sonuç olarak, AV koşulunda gözlenen elektrik üretim düşüşü; aynı PV panelin, altında tarımsal üretim yapılan farklı mikroklimatik bir çevrede çalışmasının birleşik bir sonucu olarak

değerlendirilmekte olup, bu etkinin özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında daha belirgin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.9. Van-Başkale, AV ve geleneksel PV panellerin aylık güç üretim analizi

5.1.2 Van-Tuşba Elektrik Üretim Verileri

Şekil 5.10’da Van Tuşba PV sahasının 2025 yılına ait aylık PV enerji üretim değerleri görülmektedir. Üretim eğrisi tipik bir kara iklimi özellikleri taşıyan bölgelerdeki yıllık güneşlenme süresi dağılımına paralel bir biçim göstermektedir. Ocak ve Aralık aylarında düşük üretim değerleri gözlenirken, enerji üretimi Mart ayından itibaren artışa geçmekte ve Haziran–Temmuz aylarında maksimum düzeye ulaşmaktadır. Bu dönemde aylık üretim değerleri 9.000–10.000 kWh aralığında gerçekleşmiştir. Ağustos ayından itibaren üretim miktarlarında kademeli bir azalma görülmekte, Kasım ve Aralık aylarında ise minimum düzeye inmektedir.

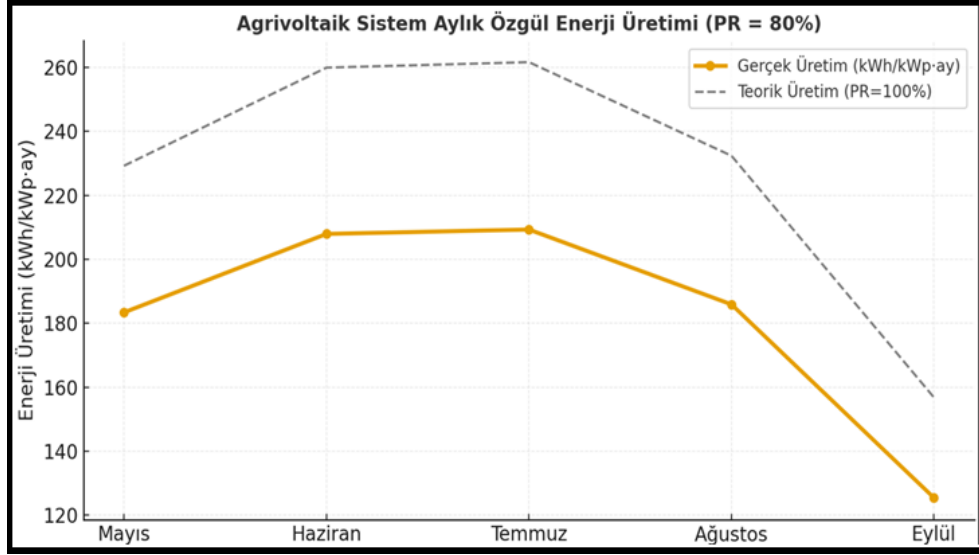
Bu durum, PV sistemlerin yıllık performansında güneş radyasyonu yoğunluğu, gündüz süresi ve panel eğim açısına bağlı olarak ortaya çıkan mevsimsel varyasyonların etkisini açıkça göstermektedir. Yaz aylarında yüksek güneşlenme süresi ve düşük bulutluluk oranı, enerji üretimini artırırken; kış aylarında güneşin zenit açısının küçülmesi, radyasyon açısının azalması ve olası kar örtüsü etkisi üretimi sınırlamaktadır. Dolayısıyla, sistemin yıllık üretim profili, bölgesel iklim koşullarına ve sistemin sabit eğimli tasarımına bağlı olarak doğal bir mevsimsel değişkenlik sergilemektedir.



Şekil 5.10. Van Tuşba yıllık üretim verileri

Şekil 5.11’de 2025 yılı Mayıs–Eylül dönemi için sistemin aylık özgül enerji üretimi değerleri gösterilmektedir. Grafikte, gerçek enerji üretimi ($PR = \%80$) ile teorik enerji üretimi ($PR = \%100$) karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistem performansının mevsimsel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

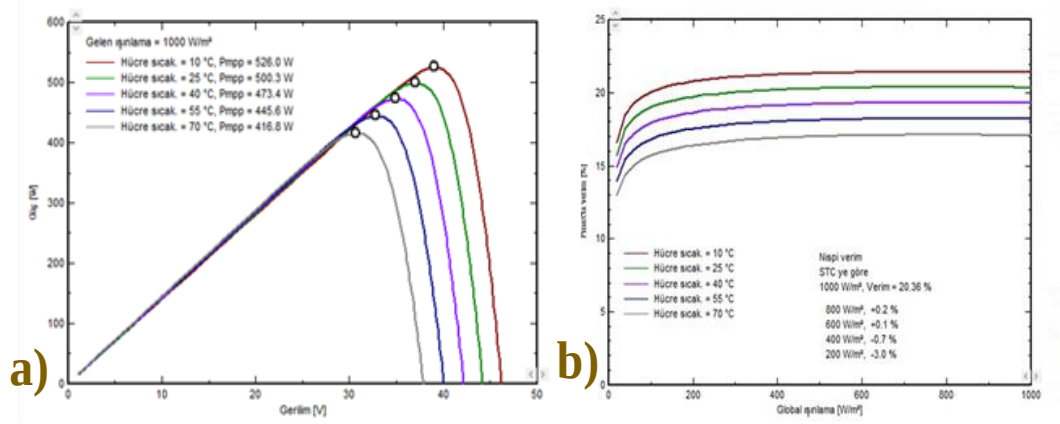
Gerçek üretim değerleri incelendiğinde, Mayıs ayında $180 \text{ kWh/kWp}\cdot\text{ay}$ seviyesinde başlayan üretim miktarının, Haziran ve Temmuz aylarında yaklaşık $200\text{--}205 \text{ kWh/kWp}\cdot\text{ay}$ düzeyine ulaştığı görülmektedir. Bu dönem, hem yüksek güneşlenme süresi hem de optimum panel sıcaklık koşulları nedeniyle sistemin en verimli çalıştığı aralığı temsil etmektedir. Ancak, Ağustos ayından itibaren üretim değerleri kademeli bir düşüş göstermekte ve Eylül ayında $140 \text{ kWh/kWp}\cdot\text{ay}$ seviyesine kadar gerilemektedir. Bu azalma, özellikle yaz sonu döneminde artan panel sıcaklıkları, düşen radyasyon şiddeti ve olası gölgeleme etkileriyle ilişkilendirilebilir. Teorik üretim eğrisi ($PR=100\%$), sistemin ideal koşullarda ulaşabileceği maksimum enerji üretim potansiyelini göstermektedir. Gerçek ve teorik üretim arasındaki fark, saha koşullarında sistemin karşılaştığı optik kayıplar (yansıma, gölgeleme), elektriksel kayıplar (kablo, inverter verimsizlikleri) ve çevresel faktörler (tozlanma, sıcaklık artışı) gibi etkenlerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, sistemin ortalama aylık performans oranı (PR) yaklaşık $\%80$ düzeyinde seyretmiştir. Bu oran, tarımsal alanla entegre PV sistemlerde beklenen verimlilik düzeyine uygun olup, sistemin mevsimsel radyasyon değişimlerine duyarlı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Enerji üretimindeki bu dalgalanmalar, AV sistemlerde panel eğimi, yükseklik, gölgeleme oranı ve bitki türü seçimi gibi parametrelerin optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.



Şekil 5.11. Van Tuşba PV santralin PR oranı

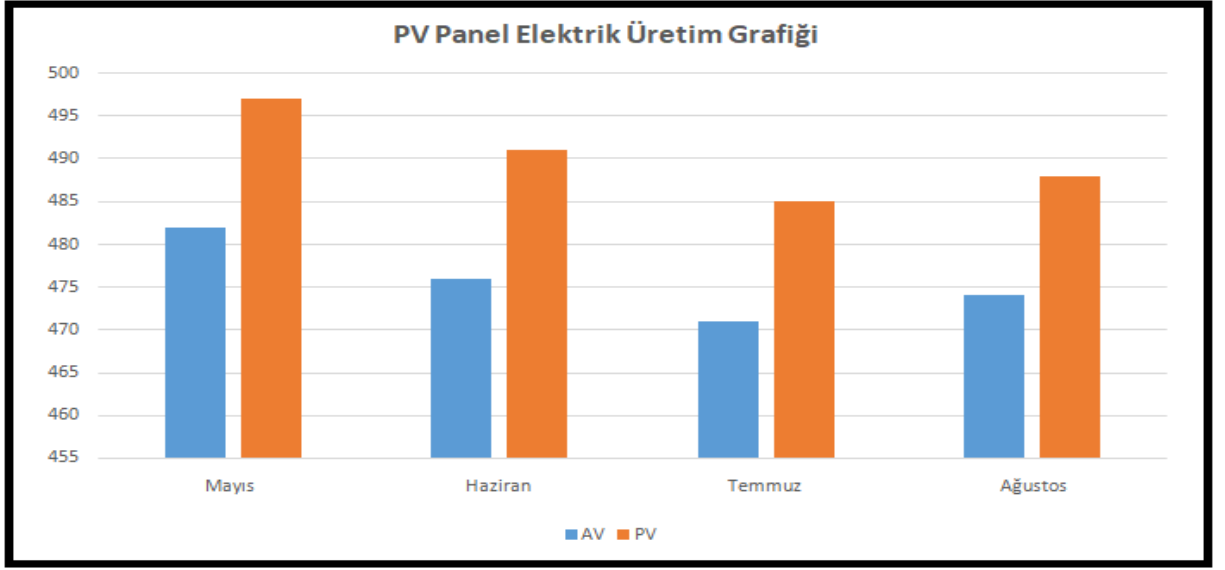
Şekil 5.12, PV modüllerin elektriksel davranışının sıcaklık ve ışıınım koşullarına olan hassasiyetini ortaya koyan temel fiziksel ilişkileri göstermektedir. Şekil 5.12(a)'da, 1000 W/m² sabit ışıınım altında hücre sıcaklığının 10–70 °C aralığında değişmesiyle birlikte modülün akım–gerilim (I–V) ve güç–gerilim (P–V) karakteristiklerinin nasıl evrildiği görülmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte açık devre geriliminde belirgin bir azalma meydana gelmekte, buna bağlı olarak maksimum güç noktası daha düşük güç seviyelerine kaymaktadır. Bu durum, PV modüllerde güç kaybının esas olarak gerilim bileşenindeki düşüşten kaynaklandığını göstermektedir.

Şekil 5.12(b)'de farklı sıcaklık ve ışıınım koşulları altında modülün nispi verim değişimi sunulmuştur. Grafik, yüksek ışıınım koşullarında dahi artan hücre sıcaklığının verimi sınırlayıcı bir etken olduğunu ortaya koymaktadır. STC koşullarında modül verimi %20,36 seviyesine ulaşırken, sıcaklık yükseldikçe verimin kademeli olarak azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle düşük ışıınım ve yüksek sıcaklık kombinasyonlarında verim kaybının daha belirgin hâle geldiği dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, PV sistem performansının yalnızca güneş ışıınımı ile değil, aynı zamanda termal koşullarla da güçlü biçimde ilişkili olduğunu göstermekte; farklı kurulum tipleri ve çevresel senaryolar altında enerji üretiminin doğru değerlendirilmesi için sıcaklık etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.12. Van'ın Tuşba ilçesindeki GES panel verileri a) Güç (W) ve gerilim (V) grafiği
b) Işınım sıcaklık arasındaki verim farkı

Şekil 5.13'te, Tuşba sahasında aynı tip ve aynı sabit eğimli PV panellerin, panel altı alanın tarımsal üretim için kullanıldığı AV koşulu ile panel altının boş bırakıldığı kontrol (PV) koşulu altındaki elektrik üretimleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Mayıs–Ağustos döneminde AV koşulunda çalışan panellerin elektrik üretimi tüm aylarda kontrol panellerine kıyasla daha düşük gerçekleşmiş; iki kullanım koşulu arasındaki fark aylık bazda yaklaşık 12–15 W seviyesinde olup, bu değer ortalama olarak yaklaşık %3'lük bir üretim azalmasına karşılık gelmiştir. Gözlenen bu fark, panel tipi, eğim açısı veya yerleşim geometrisindeki bir farklılıktan değil, panel altı alanın kullanım biçimine bağlı olarak değişen mikroklimatik koşullardan kaynaklanmaktadır. AV parsellerinde bitkisel üretimle birlikte uygulanan sulama, panel altı bölgede bağıl nemin artmasına ve toprak yüzeyinden kaynaklanan ısı–nem akılarının güçlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, panel arka yüzeyinde doğal soğutma mekanizmasını sınırlandırarak hücre sıcaklığının yükselmesine yol açmakta; artan hücre sıcaklığı ise PV modüllerin sıcaklık katsayısı nedeniyle elektriksel verimin azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla Tuşba sahasında AV koşulunda ölçülen yaklaşık %3'lük üretim kaybı, aynı PV panelin farklı mikroklimatik çevre koşulları altında çalışmasını doğrudan bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

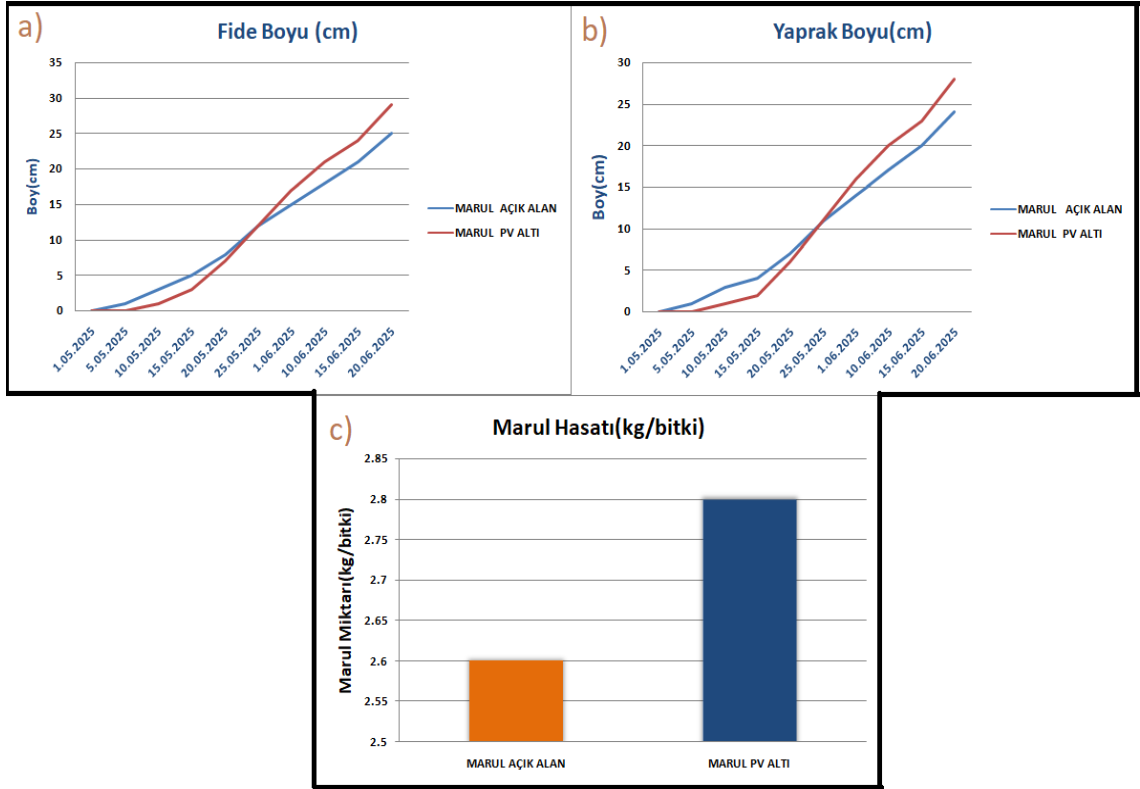


Şekil 5.13. Van-Tuşba AV ve geleneksel PV panellerin aylık güç üretim analizi

5.2. Tarımsal Üretim Verileri

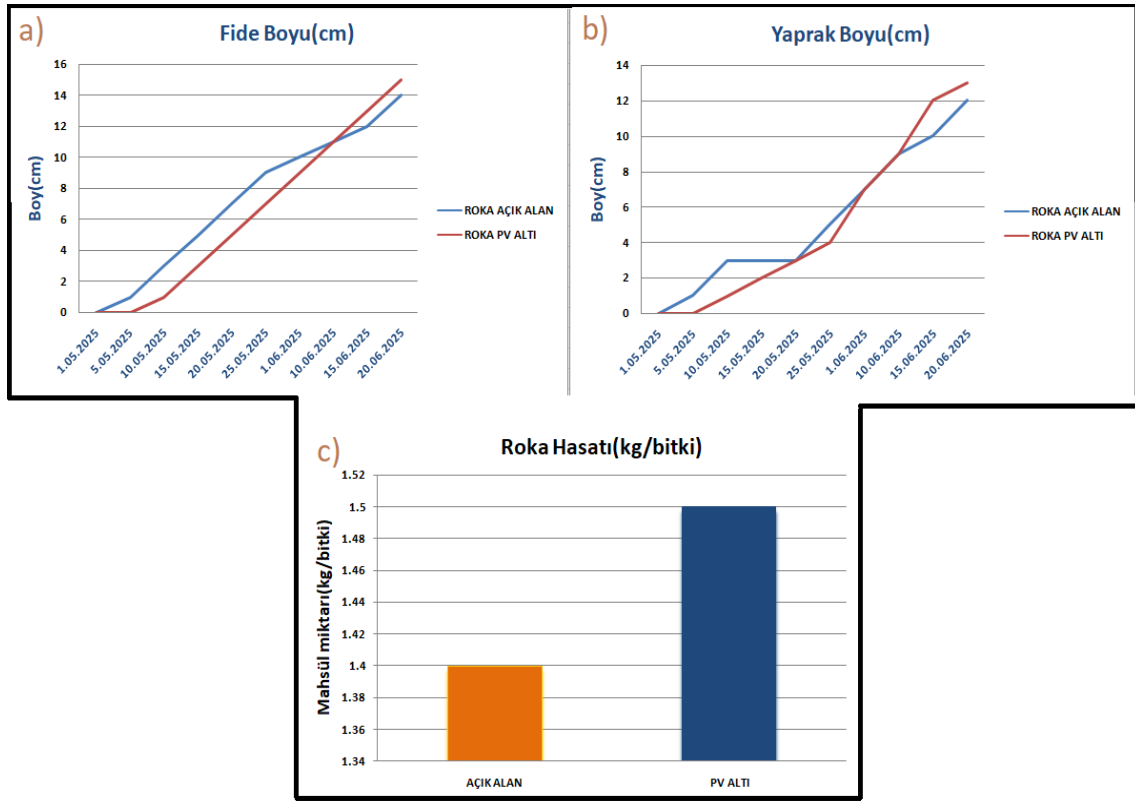
5.2.1. Van-Başkale Tarımsal Üretim Verileri

Şekil 5.14’te marul bitkisinin fide boyu, yaprak boyu ve hasat verimi, açık alan ve PV panel altı koşullarında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fide boyu gelişimi incelendiğinde, sezon boyunca her iki ortamda da büyüme hızlarının benzer olduğu ve dönem sonunda açık alanda 25 cm, PV panel altında ise yaklaşık 29 cm’ye ulaşıldığı görülmektedir. Yaprak boyu verilerine göre, PV panel altındaki marul sezon sonu yaprak boyunun 28 cm ile açık alan değerine (yaklaşık 24 cm) göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Hasat edilen mahsul miktarlarında da benzer bir eğilim gözlenmiş; PV panel altında yetiştirilen marulların bitki başına ortalama 2,8 kg verim sağladığı, açık alanda ise bu değer 2,6 kg olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, marul bitkisinin gölge ve mikroklima koşullarında büyüme ve verim açısından PV panel altı ortamda açık alana göre avantaj sağlayabildiğini, AV sistemler için önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.



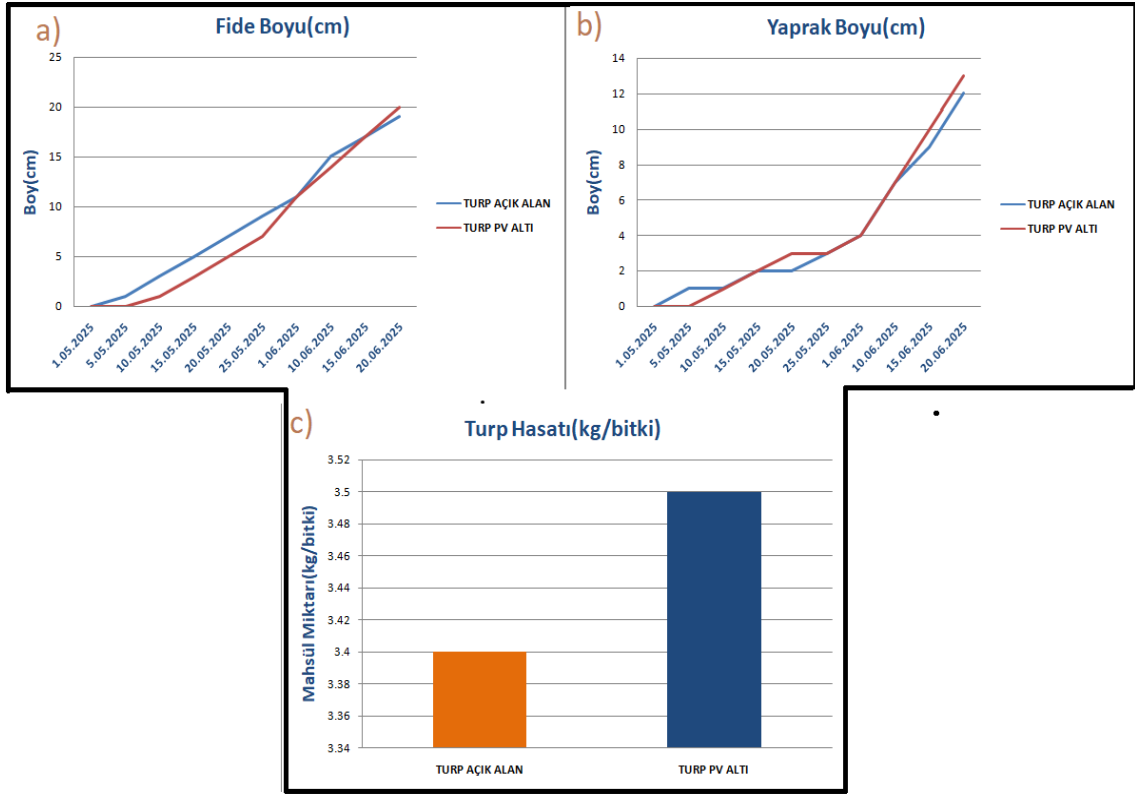
Şekil 5.14. Marul için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b)Yaprak boyu c) Mahsul miktarı

Şekil 5.15'te roka bitkisinin fide boyu, yaprak boyu ve hasat verimi, açık alan ve PV panel altı koşullarında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fide boyu gelişimi incelendiğinde, sezon boyunca her iki ortamda da büyüme hızlarının benzer olduğu ve dönem sonunda açık alanda 14 cm, PV panel altında ise yaklaşık 15 cm'ye ulaşıldığı görülmektedir. Yaprak boyu verilerine göre, PV panel altındaki roka sezon sonu yaprak boyunun 13 cm ile açık alan değerine (yaklaşık 12 cm) göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Hasat edilen mahsul miktarlarında da benzer bir eğilim gözlenmiş; PV panel altında yetiştirilen roka bitki başına ortalama 1,5 kg verim sağladığı, açık alanda ise bu değer 1,4 kg olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, roka bitkisinin gölge ve mikroklima koşullarında büyüme ve verim açısından PV panel altı ortamda açık alana göre avantaj sağlayabildiğini, AV sistemler için önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.



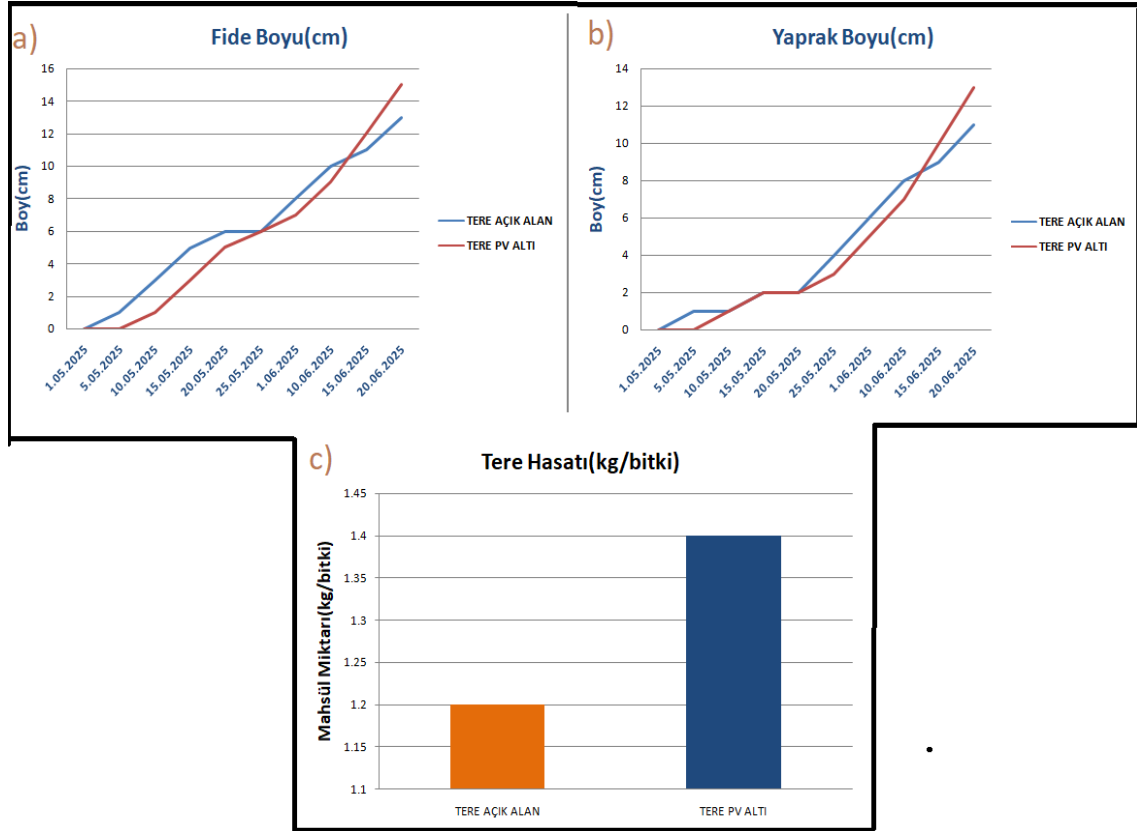
Şekil 5.15. Roka için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul miktarı

Şekil 5.16’da turp bitkisinin fide boyu, yaprak boyu ve hasat verimi, açık alan ve PV panel altı koşullarında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fide boyu gelişimi incelendiğinde, sezon boyunca her iki ortamda da büyüme hızlarının benzer olduğu ve dönem sonunda açık alanda 19 cm, PV panel altında ise yaklaşık 20 cm’ye ulaşıldığı görülmektedir. Yaprak boyu verilerine göre, PV panel altındaki turp sezon sonu yaprak boyunun 13 cm ile açık alan değerine (yaklaşık 12 cm) göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Hasat edilen mahsul miktarlarında da benzer bir eğilim gözlenmiş; PV panel altında yetiştirilen turpların bitki başına ortalama 3,5 kg verim sağladığı, açık alanda ise bu değer 3,4 kg olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, turp bitkisinin gölge ve mikroklima koşullarında büyüme ve verim açısından PV panel altı ortama açık alana göre avantaj sağlayabildiğini, AV sistemler için önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.16 Turp için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul miktarı

Şekil 5.17’de tere bitkisinin fide boyu, yaprak boyu ve hasat verimi, açık alan ve PV panel altı koşullarında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fide boyu gelişimi incelendiğinde, sezon boyunca her iki ortamda da büyüme hızlarının benzer olduğu ve dönem sonunda açık alanda 13 cm, PV panel altında ise yaklaşık 15 cm’ye ulaşıldığı görülmektedir. Yaprak boyu verilerine göre, PV panel altındaki tere sezon sonu yaprak boyunun 13 cm ile açık alan değerine (yaklaşık 11 cm) göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Hasat edilen mahsul miktarlarında da benzer bir eğilim gözlenmiş; PV panel altında yetiştirilen terelerin bitki başına ortalama 1,4 kg verim sağladığı, açık alanda ise bu değer 1,2 kg olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, tere bitkisinin gölge ve mikroklima koşullarında büyüme ve verim açısından PV panel altı ortamda açık alana göre avantaj sağlayabildiğini, AV sistemler için önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

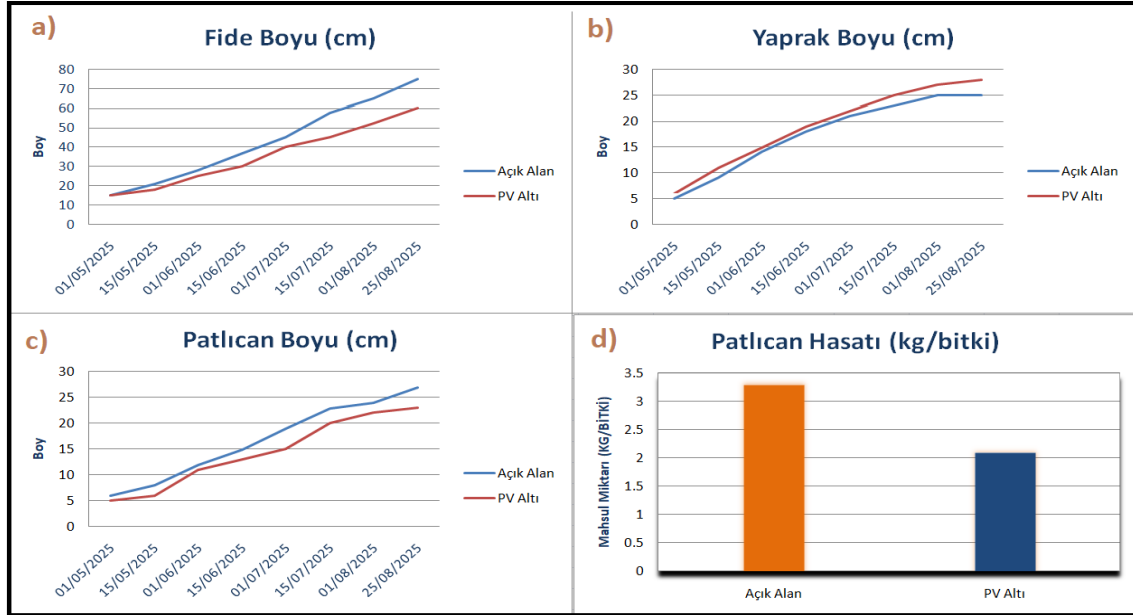


Şekil 5.17. Tere için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b)Yaprak boyu c) Mahsul miktarı

5.2.1. Van-Tuşba Tarımsal Üretim Verileri

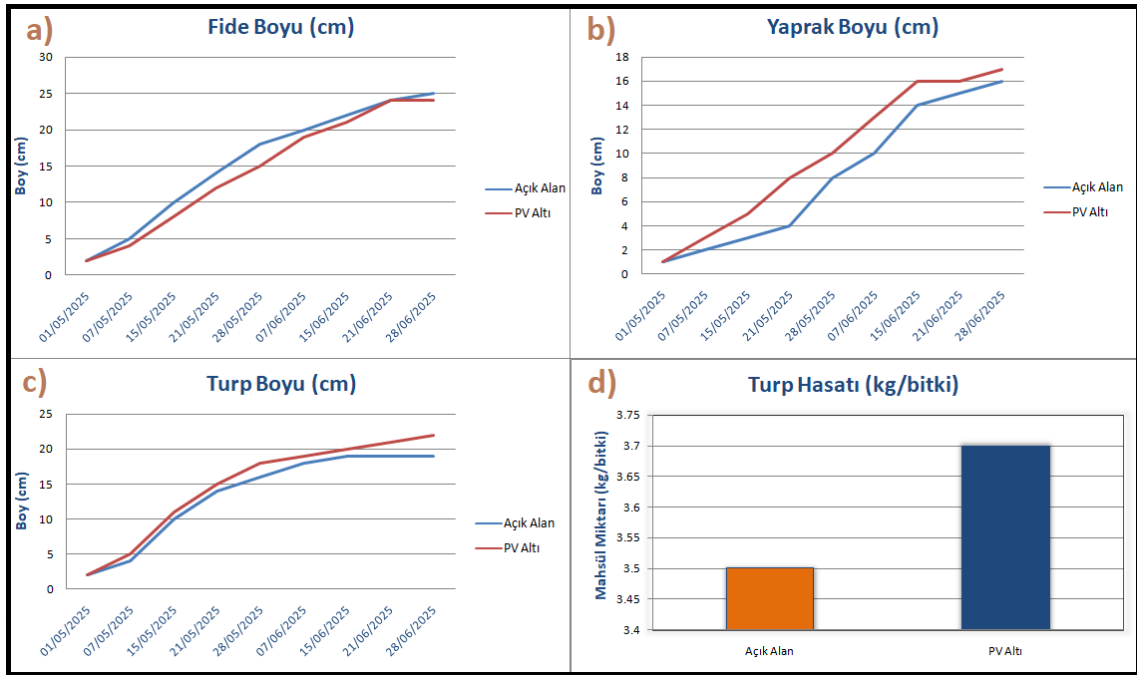
Şekil 5.18’de patlıcan bitkisinin AV sistemdeki gelişimi, fide boyu, yaprak boyu, bitki boyu ve mahsul verimi açısından açık alan ve PV panel altı koşullarında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Fide boyu bakımından açık alanda büyüme sezonu sonunda 77 cm’ye ulaşırken, PV altı koşullarda bu değer yaklaşık 60 cm’de kalmıştır; bu da panel gölgelemesinin bitki gelişimini bir miktar yavaşlattığını göstermektedir. Yaprak boyu verilerine bakıldığında, PV panel altındaki patlıcanların sezon sonuna doğru açık alandakilere göre daha uzun yapraklara sahip olduğu, bu durumun ise gölge koşullarında ışık arayışıyla ilişkili olduğu görülmektedir. Bitki boyu açısından da benzer bir eğilim gözlenmiştir; açık alanda 74 cm’ye ulaşan patlıcan boyu, PV altında yaklaşık 63 cm ile sınırlı kalmıştır. Mahsul verimi incelendiğinde ise, açık alanda bitki başına ortalama 3,3 kg ürün alınırken, PV panel altındaki patlıcanlarda bu miktar 2,1 kg olarak belirlenmiştir. Genel olarak, panel gölgelemesi büyüme ve verimi azaltmakla birlikte, yaprak morfolojisi üzerinde adaptif değişikliklere ve mikroklimanın

olumlu etkilerine yol açmıştır. Buna rağmen, PV altı koşullarda elde edilen ürün miktarı ekonomik olarak hâlâ anlamlı seviyededir ve enerji üretimiyle birlikte değerlendirildiğinde LER avantajı sürmektedir.



Şekil 5.18. Patlıcan için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul boyu d) Mahsul miktarı

Şekil 5.19’da turp bitkisinin fide boyu, yaprak boyu, toplam bitki boyu ve hasat verimi, açık alan ve PV panel altı koşullarında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fide boyu gelişimi incelendiğinde, sezon boyunca her iki ortamda da büyüme hızlarının benzer olduğu ve dönem sonunda açık alanda 25 cm, PV panel altında ise yaklaşık 24 cm’ye ulaşıldığı görülmektedir. Yaprak boyu verilerine göre, PV panel altındaki turplarda sezon sonu yaprak boyunun 18 cm ile açık alan değerine (yaklaşık 16 cm) göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Toplam turp boyu açısından, sezon sonunda PV panel altında yetiştirilen bitkilerin 22 cm’ye ulaştığı, açık alanda ise bu değer 19 cm’de kaldığı belirlenmiştir. Hasat edilen mahsul miktarlarında da benzer bir eğilim gözlenmiş; PV panel altında yetiştirilen turpların bitki başına ortalama 3,7 kg verim sağladığı, açık alanda ise bu değer 3,5 kg olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, turp bitkisinin gölge ve mikroklima koşullarında büyüme ve verim açısından PV panel altı ortamda açık alana göre avantaj sağlayabildiğini, AV sistemler için önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

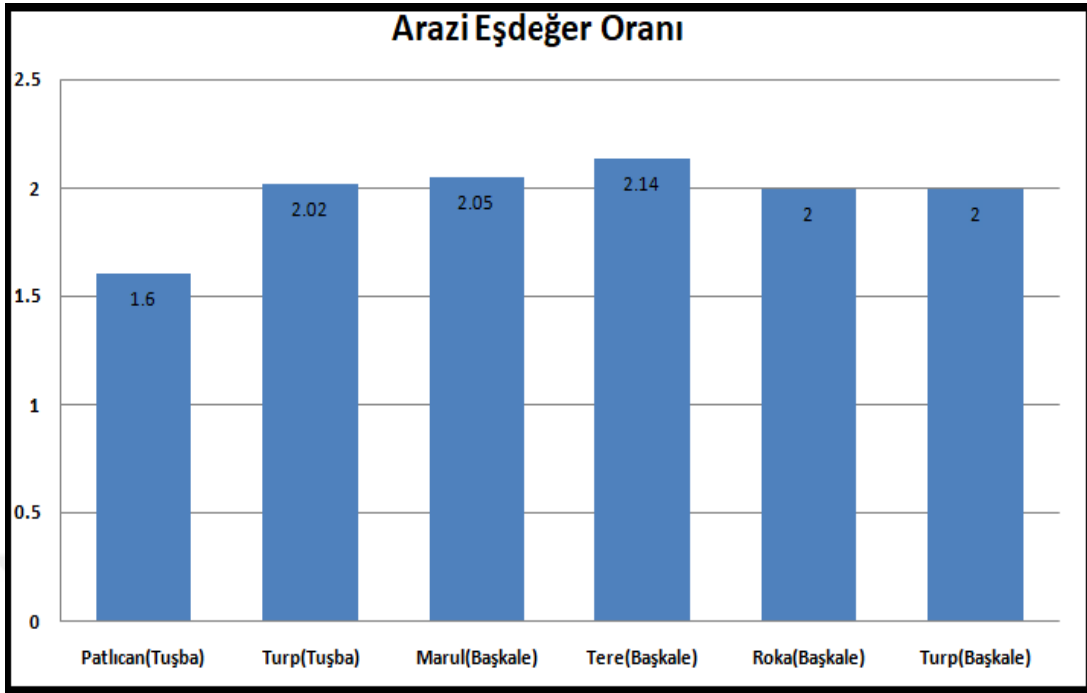


Şekil 5.19. Turp için açık alan ve PV altının a) Fide boyu b) Yaprak boyu c) Mahsul boyu d) Mahsul miktarı

5.3. LER Analizi

Şekil 5.20’de sunulan LER değerleri, AV sistemlerin toplam arazi kullanım verimliliği açısından sağladığı kazanımları açık biçimde ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında hesaplanan LER değerleri; Tuşba sahasında patlıcan için 1,6, turp için 2,02; Başkale sahasında ise marul için 2,05, tere için 2,14, roka ve turp için 2,00 olarak belirlenmiştir. $LER > 1$ olması, aynı miktarda tarımsal ürün ve elektrik enerjisinin elde edilebilmesi için gereken toplam arazi alanının, tarım ve enerji üretiminin ayrı ayrı yapılmasına kıyasla azaldığını ve AV sistemlerin arazi kullanım verimliliğini artırdığını göstermektedir. Özellikle turp, marul, tere ve roka bitkilerinde LER değerlerinin 2,00–2,14 aralığında gerçekleşmesi, bu türlerin PV panel gölgesi altında dahi yüksek verimle yetiştirilebildiğini ve AV uygulamalarda arazi kullanımının son derece etkin olduğunu ortaya koymaktadır.

Patlıcan için hesaplanan 1,6 değerindeki LER, diğer türlere kıyasla daha düşük olmakla birlikte, AV uygulamanın yine de önemli ölçüde arazi tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu durum, patlıcanın ışık ve sıcaklık gereksinimlerinin diğer ürünlere göre daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak elde edilen bulgular, AV sistemlerin farklı bitki türleri için toplam arazi verimliliğini artırdığını ve sürdürülebilir tarım–enerji entegrasyonu açısından güçlü bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.20.Patlıcan, turpa, marul, tere, roka ve turp ait LER değerleri

Tablo 5.1’de, bu çalışma kapsamında elde edilen LER değerleri ile literatürde farklı ülkelerde ve çeşitli tarımsal ürünlerle yürütülen AV uygulamalardan raporlanan LER değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Literatürde sabit eğimli, dikey, çift yüzeyli veya izleyicili PV sistemlerle üzüm, zerdeçal, pancar, marul, yaban mersini ve zeytin gibi ürünler için bildirilen LER değerlerinin çoğunlukla 1,27–1,70 aralığında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen LER sonuçları, literatürde raporlanan bu değerlerle uyumlu olmakla birlikte, özellikle yapraklı sebzeler için bildirilen birçok çalışmanın üzerinde yer almaktadır. Bu durum, yarı gölgeye toleranslı ürünlerin uygun sistem tasarımı ve iklim koşulları altında AV uygulamalarda arazi kullanım verimliliğini belirgin biçimde artırabildiğini göstermektedir.

Tablo 5.1. Literatürdeki yapılan benzer çalışmalara ait LER karşılaştırması

Yazar	Yer	Mahsül	Panel Özellikleri	LER Değeri
Bu Çalışma	Türkiye	Patlıcan(Tuşba) Turp(Tuşba)	Sabit açılı ve çift yüzeyli (bifacial)	1,6 2,02
		Marul(Başkale)	Sabit açılı ve Tek yüzeyli	2,05
		Tere(Başkale)		2,14
		Roka(Başkale)		2
		Turp(Başkale)		2
Giri ve Mohanty (2022)	Hindistan	Zerdeçal	Çift yüzeyli	1,42
Padilla vd. (2022)	İspanya	Üzüm	Sabit dikey,tek ve çift yüzeyli	1,27-1,5
Kostik vd. (2020)	Rusya	Pancar ve marul	Sabit eğimli	1,45-1,7
Katsikogiannis vd. (2022)	ABD (Boston)	Yaban mersini	Sabit eğimli, dikey ve hareketli	1,5
De La Torre vd. (2022)	İspanya	Zeytin, Meyve Ağaçları	Yatay eksenli izleyicili	1,29–1,47
Jia vd. (2025)	Çin	Turp	Sabit açılı, bifacial	1,48-1,55
Dinesh vd. (2021)	Hindistan	Patlıcan	Sabit açılı, monofacial	1,32-1,41

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Van ilinin Tuşba ilçesinde sabit açılı ve çift yüzeyli PV panellerle, Başkale ilçesinde ise sabit açılı ve tek yüzeyli PV panellerle yürütülen AV uygulamaların tarımsal ve elektriksel üretim üzerindeki nicel etkileri analiz edilmiştir. Her iki sahadan elde edilen bulgular, AV sistemlerin aynı arazi üzerinde tarım ve enerji üretimini birlikte mümkün kılarak arazi kullanım verimliliğini artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, AV uygulamaların farklı panel tipleri ve saha koşulları altında uygulanabilir, verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur.

Çalışmada elde edilen teknik bulgular özetle şunlardır:

Van Başkale:

- İncelenen monofacial PV santralinde PR değeri %84,2 olarak belirlenmiştir.
- AV koşulunda (panel altının tarımsal üretimde kullanıldığı durumda) elektrik üretimi, kontrol PV koşuluna göre yaklaşık %3 daha düşük gerçekleşmiş ve enerji bileşeni 0,97 olarak bulunmuştur. Bu azalmanın, sulama ile panel altı bağıl nemin artması ve buna bağlı mikroklima koşullarının değişmesi ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.
- Bitki gelişimi açısından dönem sonunda fide boyları; marulda açık alanda 25 cm, PV altında 29 cm; rokada açık alanda 14 cm, PV altında 15 cm; tere de açık alanda 13 cm, PV altında 15 cm; turpta açık alanda 19 cm, PV altında 20 cm olarak raporlanmıştır.
- Hasat verimi açısından, PV panel altı koşullarda yetiştirilen bitkilerin açık alan koşullarına kıyasla eşit veya daha yüksek verim değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.
- LER analizi sonucunda Başkale sahasında marul için 2,05; tere için 2,14; roka ve turp için 2,00 değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, AV uygulamasının toplam arazi kullanım verimliliğini artırdığını ve aynı üretim çıktısı için gereken toplam alanın monokültür (yalnız tarım + yalnız enerji) senaryosuna kıyasla belirgin biçimde azaldığını göstermektedir.

Van Tuşba:

- Bu çalışmada incelenen saha koşullarında kurulu güneş enerjisi santralının performans oranı (PR) %80 olarak hesaplanmıştır.
- AV koşulunda elektrik üretimi, panel altının boş bırakıldığı kontrol koşuluna göre ortalama yaklaşık %3 daha düşük gerçekleşmiştir.
- Tarımsal üretim açısından Tuşba sahasında patlıcan ve turp bitkileri değerlendirilmiş; her iki üründe de PV panel altı koşullarının bitki gelişimini olumsuz etkilemediği, mikroklimatik koruma sayesinde dengeli bir gelişim sağlandığı gözlenmiştir.
- Patlıcan için açık alanda sezon sonunda fide boyu 77 cm'ye, PV panel altında ise 60 cm'ye ulaşmıştır. Turpta ise her iki ortamda fide boyu yaklaşık 25 cm olmuştur.
- Hasat edilen mahsul miktarı, patlıcanda açık alanda ortalama 3,3 kg/bitki, PV altında 2,1 kg/bitki; turpta ise PV altında 3,7 kg/bitki, açık alanda ise 3,5 kg/bitki olarak ölçülmüştür.
- Yaprak boyunda PV altı koşullarda açık alana göre belirgin artış görülmüş, patlıcanda 2 cm, turpta ise 2 cm'den fazla uzama kaydedilmiştir.
- LER analizi sonucunda Tuşba sahasında patlıcan için 1,6, turp için 2,02 değerleri elde edilmiştir
- Buna ek olarak, her iki panel tipi altında yetiştirilen turp bitkisinin verimleri karşılaştırıldığında, monofacial PV panel altında elde edilen verimin, bifacial PV panel altına kıyasla yaklaşık %7 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu farkın, bifacial panellerde yansımadan faydalanma potansiyelinin daha yüksek olması ve panel altı ışık dağılımının daha homojen gerçekleşmesiyle ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sınırlamaları:

- Denemeler yalnızca bir yıllık yaz sezonunu kapsamakta, farklı iklim yıllarındaki değişkenlikler analiz edilmemiştir.
- Saha büyüklüğü ve ürün çeşitliliği sınırlı tutulmuş; uzun vadeli ekonomik analiz, karbon ayak izi ve toprak iyileşmesi gibi çevresel etkiler kapsam dışı bırakılmıştır.

- Gölgeleme etkisi farklı panel yüksekliği, eğimi veya panel yerleşim yoğunluğunda ayrıca test edilmemiştir.

Gelecekteki çalışmalar için öneriler:

- Farklı ürün çeşitlerinin ve çok yıllık denemelerin entegre edildiği, panel eğimi ve yüksekliğinin optimizasyonunu içeren kapsamlı analizler yapılmalıdır.
- Uzun vadeli ekonomik analiz, karbon salımı, su kullanımı ve toprak sağlığı üzerindeki etkiler ayrıntılı şekilde değerlendirilmelidir.
- Farklı bölgelerde ve çeşitli iklim koşullarında karşılaştırmalı saha uygulamaları ile sonuçların genellenebilirliği artırılabilir.



KAYNAKLAR

- Agostini, Alessandro, Michele Colauzzi, and Stefano Amaducci. "Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment." *Applied Energy* 281 (2021): 116102.
- Anonim 2025a Web: <https://interestingengineering.com/energy/offshore-floating-solar-netherlands> [Ziyaret tarihi: 1 Ocak 2025].
- Anonim 2025b Web: <https://voltimo.io.com> [Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2025].
- Anonim 2025c Web: <https://www.iberdrola.com> [Ziyaret tarihi: 3 Ocak 2025].
- Anonim 2025d Web: <https://www.turktarim.com.tr/> [Ziyaret tarihi: 4 Ocak 2025].
- Anonim 2025e Web: <https://www.firgelliauto.com/> [Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2025].
- Anonim 2025f Web: <http://www.maximaenerji.com.tr/> [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2025].
- Anonim 2025g Web: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail> [Ziyaret tarihi: 22 Ocak 2025].
- Anonim 2025h Web: <https://www.pv-magazine.com/> [Ziyaret tarihi: 25 Ocak 2025].
- Anonim 2025j Web: <https://www.sevensensor.com/> [Ziyaret tarihi: 27 Ocak 2025].
- Anonim 2025k Web: <https://tr.dsisolar.com/> [Ziyaret tarihi: 3 Şubat 2025].
- Anonim 2025l Web: <https://gepa.enerji.gov.tr/> [Ziyaret tarihi: 29 Mart 2025].
- Anonim 2025m Web: <https://www.iklimhaber.org/> [Ziyaret tarihi: 22 Şubat 2025].
- Anonim 2025n Web: <https://www.aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/enerji/enerjisa-uretim-komsukoy-is-birligiyle-agrivoltaik-tarima-basliyor-677797> [Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2025].
- Anusuya, K., Vijayakumar, K., Martin, M. L. J., & Manikandan, S. (2024). Agrophotovoltaics: enhancing solar land use efficiency for energy food water nexus. *Renewable Energy Focus*, 50, 100600.
- Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The photovoltaic heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6, 35070.
- Bayraktar, F. S., Yazıcı, M., Köse, R. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (Csp) Teknolojileri ve Türkiye’de Csp’ye Yönelik Politikalar. *Journal of Scientific Reports-B*, (007), 1-13.
- Boztepe, M. (2017). Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler. *EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni*, 321, 13-17.
- Braik, A., Makhalfih, A., Sopian, K., Jarimi, H., & Ibrahim, A. (2021). Review of agrivoltaics systems potential in Palestine. In *2021 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)* (pp. 176-180). IEEE.

- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 12(3), 333-346.
- Cossu, M., Tiloca, M. T., Cossu, A., Deligios, P. A., Pala, T., & Ledda, L. (2023). Increasing the agricultural sustainability of closed agrivoltaic systems with the integration of vertical farming: A case study on baby-leaf lettuce. *Applied Energy*, 344, 121278.
- Coşgun, A. E. (2021). Türkiye’de 50MW üstü GES üretimi gerçekleştiren şehirlerimizde agrivoltaic sistem kullanılabilirliğinin incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 711-718.
- Dal Prà, A., Genesio, L., Miglietta, F., Carotenuto, F., Baronti, S., Moriondo, M., ... & Reboldi, A. (2023). Salad yields under Agrivoltaics: a field test. In *AgriVoltaics Conference Proceedings* (Vol. 2).
- Deniz E (2013). Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar. III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri, 21-24 Kasım 2013, İzmir
- De La Torre FC, Varo M, López-Luque R, Ramírez-Faz J, Fernández-Ahumada LM. Design and analysis of a tracking/backtracking strategy for PV plants with horizontal trackers after their conversion to agrivoltaic plants. *Renew Energy* 2022;187:537–50.
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308
- Dobos, A. P. (2014). *PVWatts version 5 manual* (No. NREL/TP-6A20-62641). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, 36(10), 2725-2732.
- Ekici, S., & Kopru, M. A. (2017). Investigation of PV system cable losses. *International journal of renewable energy research*, 7(2), 807-815.
- El Mghouchi, Y., El Bouardi, A., Choulli, Z., & Ajzoul, T. (2016). Models for obtaining the Daily direct, diffuse and global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 87-99.
- Günhan, Y., & Taskin, O. (2025). Agrivoltaic impact on some lettuce quality attributes and photovoltaic power generation. *Plants*, 14(18), 2853.
- Giri NC, Mohanty RC. Design of agrivoltaic system to optimize land use for clean energy-food production: a socio-economic and environmental assessment. *Clean Technol Environ Policy* 2022;24:2595–606.
- Jia, Y., Gao, X., He, J., Luo, J., Sui, X., & Su, P. (2025). Variations in Solar Radiation and Their Effects on Rice Growth in Agro-Photovoltaics System. *Agronomy*, 15(8), 1975.
- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier.

- Karaağaç, M. O., Oğul, H., & Bulut, F. (2021). Sinop İli Koşullarında Monokristal ve Polikristal Fotovoltaik Panellerin Değerlendirilmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 176-181.
- Katsikogiannis OA, Ziar H, Isabella O. Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach. *Appl Energy* 2022;309:118475.
- Kırbaş, İ. (2023). Agrivoltaik Sistemler ve Tarım Alanlarının Hibrit Kullanımı. *Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 5(1-2), 9-19.
- Kostik, N., Bobyl, A., Rud, V., & Salamov, I. (2020). The potential of agrivoltaic systems in the conditions of southern regions of Russian Federation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 578, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Kumpanalaisatit, M., Setthapun, W., Sintuya, H., Pattiya, A., & Jansri, S. N. (2022). Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 952-963.
- Magarelli, A., Mazzeo, A., & Ferrara, G. (2025). Exploring the Grape Agrivoltaic System: Climate Modulation and Vine Benefits in the Puglia Region, Southeastern Italy. *Horticulturae*, 11(2), 160.
- Malu, P. R., Sharma, U. S., & Pearce, J. M. (2017). Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 104-110.
- Martin-Chivelet, N., Kapsis, K., Wilson, H. R., Delisle, V., Yang, R., Olivieri, L., ... & Wijeratne, W. P. U. (2022). Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior. *Energy and Buildings*, 262, 111998.
- Mawire, A. (2015). Solar thermal energy storage for solar cookers. In *Solar Energy Storage* (pp. 327-358). Academic Press.
- Neupane Bhandari, S., Schlüter, S., Kuckshinrichs, W., Schlör, H., Adamou, R., & Bhandari, R. (2021). Economic feasibility of agrivoltaic systems in food-energy nexus context: Modelling and a case study in Niger. *Agronomy*, 11(10), 1906.
- Padilla J, Toledo C, Abad J. Enovoltaics: Symbiotic integration of photovoltaics in vineyards. *Front Energy Res* 2022;10:1007383.
- Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2015). Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, 103, 348-358.
- Reddy, T. A., & Morehouse, J. H. (2017). Solar thermal energy conversion. In *Energy conversion* (pp. 525-653). CRC Press.
- Rondán-Sanabria, G. G., Sacsi, E. S. F., Huamani, E. R. D., & Allazo, E. A. V. (2023, December). Evaluation of radish (*Raphanus sativus* L.) crop productivity under shading in an agrovoltaic system in two seasons of the year in Arequipa, Perú-2023. In *2023 International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE)* (pp. 1-7). IEEE.

- Roxani, A., Zisos, A., Sakki, G. K., & Efstratiadis, A. (2023). Multidimensional role of Agrovoltatics in era of EU green Deal: Current status and analysis of water–energy–food–land dependencies. *Land*, 12(5), 1069.
- Salsabila, R. S., & Halimi, B. (2023). Computational Analysis of Passive Cooling System to Improve Solar Photovoltaic Module Performance. In *2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (pp. 257-260). IEEE.
- Santra, P., Pande, P. C., Kumar, S., Mishra, D., & Singh, R. (2017). Agri-voltaics or solar farming: The concept of integrating solar PV based electricity generation and crop production in a single land use system. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 7(2), 694-699.
- Şentürk, B., Kuzyaka, D., Yalçın, Ö., Akyıldız, U. M., Eröz, M., & Özden, T. (2024). Gıda ve Enerji Üretimini Birleştiren Arazilerde Verimlilik Analizi: Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik Modeli. *Verimlilik Dergisi*, 58(3), 443-460.
- Trommsdorff, M. (2020). Performance indices for parallel agriculture and PV. *Proceedings of the EU PVSEC*.
- Warmann, E., Jenerette, G. D., & Barron-Gafford, G. A. (2024). Agrivoltaic system design tools for managing trade-offs between energy production, crop productivity and water consumption. *Environmental Research Letters*, 19(3), 034046.
- Vural, A., Ural, M. N., & Çiftçi, A. (2022). Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Kaynaklarının Retrospektif Değerlendirilmesi. *Journal of Investigations on Engineering and Technology*, 5(2), 115-134.
- Yaman, A., Yakın, A., & Behçet, R. (2019). Van ili güneş ve hidroelektrik enerjilerinin potansiyeli ve ilin ekonomisine katkıları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 243-250.
- 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.
- Zainol Abidin, M. A., Mahyuddin, M. N., & Mohd Zainuri, M. A. A. (2021). Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review. *Sustainability*, 13(14), 7846.