

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MERKEZİ VE DİZİ TİPİ EVİRİCİ KULLANILAN GÜNEŞ ENERJİSİ
SANTRALİNİN MARDİN İLİ VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI
PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS

Kenan BABAOĞLU

TEMMUZ-2025
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**MERKEZİ VE DİZİ TİPİ EVİRİCİ KULLANILAN GÜNEŞ ENERJİSİ
SANTRALİNİN MARDİN İLİ VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI
PERFORMANS ANALİZİ**

**COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR POWER
PLANTS EMPLOYING CENTRAL AND STRING INVERTERS USING DATA
FROM MARDIN PROVINCE**

YÜKSEK LİSANS

Kenan BABAOĞLU

**TEMMUZ-2025
GÜMÜŞHANE**



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**MERKEZİ VE DİZİ TİPİ EVİRİCİ KULLANILAN GÜNEŞ ENERJİSİ
SANTRALİNİN MARDİN İLİ VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI
PERFORMANS ANALİZİ**

**COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR POWER
PLANTS EMPLOYING CENTRAL AND STRING INVERTERS USING DATA
FROM MARDIN PROVINCE**

YÜKSEK LİSANS

Kenan BABAOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Engin BAŞOĞLU

TEMMUZ-2025

GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Merkezi ve Dizi Tipi Evirici Kullanılan Güneş Enerjisi Santralinin Mardin İli Verileriyle Karşılaştırmalı Performans Analizi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

17/07/2025

Kenan BABAOĞLU

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, tezimin planlama, araştırma, yürütme ve şekillendirme süreçlerinde ilgisini ve desteğini esirgemeyen; engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, örnek aldığım değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Mustafa Engin BAŞOĞLU'na en içten minnet ve şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca üzerimde en büyük emeği olan, bugün fiziksel olarak yanımda olmasalar da sevgilerini, inançlarını ve dualarını her daim hissettiğim, rahmetli annem Ayhan BABAOĞLU'na ve rahmetli babam Yahya BABAOĞLU'na minnet, özlem ve rahmetle teşekkür ediyorum. Bana kazandırdıkları değerler ve verdikleri destek, bu çalışmanın en güçlü dayanaklarından biri olmuştur.

Bu süreçte en büyük manevi desteği sağlayan, her an yanımda olup bana güç ve cesaret veren, stresli zamanlarımda sabrıyla ve sevgisiyle yolumu aydınlatan, tez süreci boyunca çocuklarımızla daha fazla ilgilenerek bana zaman ve alan tanıyan ve bilgi birikimiyle görüşlerine sıkça başvurduğum kıymetli eşim Merve BABAOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim. Aynı şekilde, küçük yaşlarına rağmen bu yoğun süreçte beni anlayışla karşılayan, varlıklarıyla bana ilham ve mutluluk kaynağı olan sevgili kızım Ceren ile oğlum Muhammed Asaf'a da yürekten teşekkür ederim.

Kenan BABAOĞLU
GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Güneş enerjisi santrallerinde (GES) merkezi ve dizi tipi evirici teknolojileri, sistem verimliliği ve saha uyumu açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Merkezi eviriciler, geniş yüzeyli projelerde tercih edilirken, dizi tipi eviriciler ise gölgelenme gibi lokal değişkenlere karşı daha esnek yapılarıyla ön plana çıkmaktadır. Bu yüksek lisans tezinde Türkiye'nin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip Mardin ilinde farklı evirici teknolojileri kullanan iki fotovoltaik (FV) sistemin performansını karşılaştırılmıştır. Benzer iklim koşullarında çalışan merkezi ve dizi evirici kullanan sistemlerin enerji üretimleri, saha verileri ve PVSOL simülasyonlarıyla analiz edilmiştir. Simülasyonlar dizi eviricili sistemin yıllık üretimi 196.033 kWh, merkezi eviricili sistemin ise 178.568 kWh olarak tahmin edilmiştir. Ancak 2024 yılı gerçek elektrik üretim verilerine göre, dizi eviricili sistemde 128.180 kWh, merkezi eviricili sistemde 145.678 kWh elektrik üretildiği görülmüştür. Bu sonuçlar sırasıyla %34,6 ve %18,4 sapmaya işaret etmektedir. Simülasyonların ideal koşullara dayanmasına karşın, saha koşullarında panel yüzeyindeki toz ve kir birikimi, gölgelenme, evirici verimliliği, sıcaklık etkileri ve şebeke kesintileri üretimi olumsuz etkilediği görülmüştür. Özellikle Güneydoğu Anadolu'daki yüksek toz yükü performans kayıplarını artırmaktadır. Ayrıca, gölgelenme ve yüksek sıcaklığın birleşik etkisiyle %10 ila %30 arasında, bazı çalışmalarda ise %50'ye varan verim kayıpları yaşanabilmektedir. Sonuçlar dizi evirici sistemlerin gölgelenme ve modül bazlı izleme gereken durumlarda teknik avantaj sağladığını ancak bakım ve maliyet açısından zorluklar içerdiğini göstermektedir. Merkezi evirici sistemler ise maliyet avantajı sağlarken, gölgelenme ve sıcaklık değişimlerine karşı daha hassastır. Bu çalışma Mardin gibi sıcak ve yüksek ışıınım alan bölgelerde panel temizliği, bakım ve arıza yönetiminin sistem verimliliği için kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dizi evirici, Fotovoltaik Sistemler, Güneş Enerjisi Santrali, Merkezi evirici, PVSOL Simülasyonu,

SUMMARY

This thesis comparatively examines the performance of two photovoltaic (PV) systems using different inverter technologies in Mardin, a province in Turkey with high solar energy potential. The energy productions of solar power plants using central and string inverters operating under similar climatic conditions were analyzed through real field data and PVSOL simulations. According to simulation results, the annual energy production of the string inverter system was estimated as 196,033 kWh, while the central inverter system's production was 178,568 kWh. However, actual production data for 2024 indicated 128,180 kWh for the string inverter system and 145,678 kWh for the central inverter system, showing deviations of 34.6% and 18.4%, respectively. These differences demonstrate that simulation programs like PVSOL calculate under ideal conditions, but field conditions such as dust and dirt accumulation on panel surfaces, shading, inverter efficiency, temperature effects, and grid outages negatively affect actual production. In particular, the high dust load in Southeastern Anatolia increases performance losses. Moreover, combined effects of shading and high temperatures can cause efficiency losses between 10% and 30%, and up to 50% in some studies. The results show that string inverter systems provide technical advantages especially in situations requiring shading management and module-level monitoring, but these advantages are balanced with maintenance difficulties and investment costs. Central inverter systems, while offering cost and compactness advantages, are more sensitive to shading and temperature variations. This study emphasizes that panel cleaning, maintenance planning, and fault management must be considered for system efficiency in hot and high-irradiance regions like Mardin, and demonstrates that such investments contribute to renewable energy goals.

Keywords: String inverter, Photovoltaic Systems, Solar Power Plant, Central inverter, PVSOL Simulation.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1 Güneş Enerjisinin Küresel ve Ulusal Önemi.....	1
1.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Uygulamaları	2
1.3 Mardin İli Güneş Enerjisi Profili	3
1.4 Güneş Enerjisi Santrallerinde Evirici Teknolojilerinin Rolü	4
1.5 Araştırmanın Gerekçesi ve Problem Tanımı	5
1.6 Tezin Amacı ve Hedefleri	7
1.7 Tezin Kapsamı ve Yöntemsel Yaklaşım	8
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	9
2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihçesi ve Gelişimi	9
2.2 Güneş Enerjisi Santralleri	10
2.3 Evirici Teknolojileri.....	11
2.4 Karşılaştırmalı Akademik Çalışmalar	11
2.5. İklim ve Coğrafi Koşulların Performans Üzerindeki Etkileri.....	12
2.6. PVSOL ve Benzeri Simülasyon Yazılımları Üzerine Araştırmalar	13
3. TEORİK TEMELLER	15
3.1 Güneş Işımasının Temel Kavramları (GHI, DNI, DHI)	15
3.2. Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensipleri	16
3.3. Evirici Tipleri ve Elektriksel Dönüşüm Mekanizması.....	17
3.4. Performans Oranı, Verim ve Kayıp Analizi.....	20
3.5. Santral Tasarımı ve Üretim Tahmin Süreci.....	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM	24
4.1. Çalışma Alanı ve Güneş Enerjisi Santralleri Hakkında Genel Bilgi	24

4.2. Kullanılan Veri Setleri ve Ölçüm Parametreleri	29
4.3 Simülasyon Yöntemi	30
5. PVSOL SİMÜLASYONLARI.....	32
5.1. Merkezi Evirici İle GES Simülasyonu.....	33
5.2. Dizi Evirici İle GES Simülasyonu	43
5.3. PVSOL Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi: Merkezi ve Dizi Evirici Sistemler.....	53
5.3.1. Enerji Üretimi ve Sistem Performansı	53
5.3.2. Ekonomik Karşılaştırma.....	54
5.3.3. Şebeke Geliri ve Tarife Etkisi	54
5.3.4. Varsayımlar ve Değerlendirme Kapsamı	55
6. GERÇEK ÜRETİM VERİLERİNİN ANALİZİ.....	56
7. PVSOL TABANLI SİMÜLASYONLARIN GERÇEK VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	60
7.1. Simülasyon ve Gerçek Verilerin Karşılaştırması.....	60
7.2. Sapmaların Nedenleri.....	60
7.3. Panel Kirliliğinin Ekonomik Etkisi.....	61
7.4. Simülasyon için Sonuç ve Öneriler.....	61
7.5. Sınırlılıklar ve Varsayımlar	62
7.6. Literatürle Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Simülasyon Yazılımlarının Yatırımcılar ve Tasarım Sürecindeki Rolü	63
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	65
8.1. Tez Bulgularının Özeti.....	65
8.2. Bölgesel Güneş Enerjisi Stratejilerine Katkılar	65
8.3. Uygulayıcılara ve Yatırımcılara Yönelik Öneriler.....	65
8.4. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	66
KAYNAKÇA.....	67
ÖZGEÇMİŞ	72

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. GES kurulumunda kullanılan uygunluk kriterleri ve dereceleri (Tekdamar ve Tekdamar, 2024).....	28
Tablo 2. GES’lerde Kullanılan Ekipman listesi.....	30
Tablo 3. Sistem türüne göre kullanılan FV panel, evirici modelleri ve panel adetleri ...	32
Tablo 4. FV panel teknik özellikleri	33
Tablo 5. Evirici teknik özellikleri	33
Tablo 6. Merkezi eviricili sistemde 2024 yılına ait aylık ve toplam elektrik üretimi.....	58
Tablo 7. Dizi evirici kullanılan sistemin 2024 yılı aylık ve toplam elektrik üretimi	59
Tablo 8. Simülasyon ve gerçek üretim verileri karşılaştırma tablosu.....	60
Tablo 9. Panel kirliliğinin ekonomik etkisi.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Enerji arzı ve eksiklik durumu (Shrestha ve Shrestha, 2014).....	6
Şekil 2. Güneş ışınımı bileşenlerinin genel yapısı: doğrudan, saçılan ve yansıyan bileşenler (Uyarlandı: de Souza, Tiepolo ve Urbanetz, 2019).....	16
Şekil 3. FV hücrelerin seri ve paralel bağlanarak FV panellerin oluşumu (Uyarlandı: URL-7, 2019).....	17
Şekil 4. Farklı FV hücreli paneller (URL-8, 2025).....	17
Şekil 5. Mikro evirici tabanlı akıllı FV sistem arayüzü (Shrestha ve Shrestha, 2014). ..	19
Şekil 6. Şebekeye bağlı FV teknolojileri. a) Merkezi evirici, b) Çoklu merkezi evirici, c) Dizi evirici, d) Çoklu dizi evirici, e) Mikro evirici. (Hasan, R. vd., 2017).	20
Şekil 7. 2013–2015 yılları arasında poli-silikon tabanlı bir FV sistem için aylık ortalama günlük enerji üretimi, yakalama kayıpları ve sistem kayıpları. (Uyarlandı: Wang vd., 2017).....	22
Şekil 8. Türkiye'nin güneşlenme potansiyeli haritası (URL-10, 2025).....	24
Şekil 9. Türkiye güneşlenme süreleri (saat), (URL-10, 2025).....	25
Şekil 10. Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün), (URL-10, 2025).....	25
Şekil 11. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Mardin için güneş enerjisi potansiyel haritası [Harita]. (URL-11, 2025).....	26
Şekil 12. Mardin global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün), (URL-11, 2025).....	27
Şekil 13. Mardin güneşlenme süreleri (saat), (URL-11, 2025).....	27
Şekil 14. Merkezi eviricili GES için proje başlangıç ekranı.....	34
Şekil 15. Sistem türü, iklim ve şebeke tanımlama arayüzü.....	34
Şekil 16. 3D görselleştirme ile sistem planlaması arayüzü.....	35
Şekil 17. Arazi görünümünü 3D görselleştirme.....	36
Şekil 18. FV panel ekleme	36
Şekil 19. Evirici seçim ekranı	37
Şekil 20. Evirici konfigürasyon kontrol ekranı	38
Şekil 21. Kablo tasarım ve boyutlandırma ekranı	38
Şekil 22. Panel dizileri arasındaki seri bağlantı şeması	39
Şekil 23. Gölgeleme analizi	40
Şekil 24. GES bileşenlerinin projelendirilmesi	40
Şekil 25. Planlar ve parça listesi ekranı	41
Şekil 26. Finansal analiz ekranı	42
Şekil 27. Merkezi evirici sistemi için PVSOL finansal analiz çıktısı	43

Şekil 28. Dizi eviricili GES için proje başlangıç ekranı	44
Şekil 29. Dizi eviricili sistem türü, iklim ve şebeke tanımlama arayüzü	44
Şekil 30. Dizi eviricili sistem için 3D görselleştirme ile sistem planlaması arayüzü	45
Şekil 31. Dizi eviricili sistem için arazi görünümünü 3D görselleştirme ekranı	46
Şekil 32. Dizi eviricili sistemin FV panel yerleşimi	46
Şekil 33. Dizi tipi evirici seçimi	47
Şekil 34. Dizi evirici konfigürasyon kontrol ekranı	48
Şekil 35. Kablo tasarım ve boyutlandırma ekranı	48
Şekil 36. Panel dizileri arasındaki seri bağlantı şeması	49
Şekil 37. Dizi eviricili GES'in gölgelenme analizi	50
Şekil 38. Dizi eviricili GES sistemi bileşenlerinin projelendirilmesi	50
Şekil 39. Dizi eviricili GES'in planlar ve parça listesi ekranı	51
Şekil 40. Dizi eviricili sistemin finansal analiz ekranı	52
Şekil 41. Dizi evirici sistemi için PVSOL finansal analiz çıktısı	53
Şekil 42. 1. merkezi eviricinin 2024 yılı elektrik üretim değerleri ekran görüntüsü	57
Şekil 43. 2. merkezi eviricinin 2024 yılı elektrik üretim değerleri ekran görüntüsü	57
Şekil 44. 2 dizi eviricinin 2024 yılı toplam elektrik üretim değerleri ekran görüntüsü ..	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
AC/DC	: Alternatif Akım / Doğru Akım dönüşümü
AHS	: Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DNI	: Doğrudan Normal Işınım (Direct Normal Irradiance)
FV, PV	: Fotovoltaik (Photovoltaic)
GES	: Güneş Enerjisi Santrali
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
İKO	: İç Kârlılık oranı
İVO	: İç Verim Oranı
kWh	: Kilowatt-saat
kWp	: Kilowatt peak – Teorik maksimum güç
km	: Kilometre
KYI, GHI	: Küresel Yatay Işınım (Global Horizontal Irradiance)
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking)
m	: Metre
OMH	: Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
OMYH	: Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error)
PERC	: Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Hücre (Passivated Emitter and Rear Cell)
PR, PO	: Performans Oranı (Performance Ratio)
PVSOL	: Fotovoltaik sistem simülasyon yazılımı kısaltması
TMY	: Tipik Meteorolojik Yıl
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
V	: Volt
vb.	: Ve benzeri
W	: Watt
YGE, CSP	: Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (Concentrated Solar Power)
YGDS	: Yatırım Geri Dönüş Süresi
YYI, DHI	: Yayınık Yatay Işınım (Diffuse Horizontal Irradiance)

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının artması, geleneksel enerji kaynaklarının çevresel etkileriyle birlikte değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji teknolojileri önemli hale gelmiştir. Güneş enerjisi sürdürülebilirliği, çevre dostu ve teknolojik erişilebilirliği sayesinde öne çıkan doğal bir kaynaktır. Güneş ışıınımı sürekli ama istikrarsız bir enerji kaynağı gibi görülse de, enerji üretimindeki karbon salımını önemli ölçüde azaltma potansiyeline de sahiptir (Balat, 2005). Fotovoltaik (FV) sistemlerin yaygınlaşması, enerji dönüşüm teknolojilerinde yeni uygulamaların önünü açmıştır. Bu sistemlerin temel bileşenlerinden biri olan eviriciler, güneş panellerinden elde edilen doğru akımı alternatif akıma çevirerek şebekeye entegrasyonu sağlamaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerinden biri olan Mardin ili, yıllık ortalama 1550 – 1650 kWh/m²-gün güneş ışıınım değeri ile dikkat çekmektedir. (Uludağ ve Doğan, 2018). Ancak bu potansiyele rağmen Mardin'e özgü güneş enerjisi yatırımlarının bölgesel optimizasyonunda bilgi eksikliği söz konusudur. Bu tez çalışmasında, Mardin ilinde kurulmuş iki farklı tipte GES'in performans verileri incelenmiş, biri merkezi diğeri ise dizi tipi evirici kullanan bu santrallerin enerji üretim kapasiteleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Araştırmada hem gerçek saha verileri ele alınmış, hem de PVSOL yazılımı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Böylece simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri karşılaştırılarak PVSOL'un tahmin performansı da belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, sadece Mardin ili özelinde değil, benzer iklim koşullarına sahip bölgelerde de yatırım kararlarını yönlendirebilecek niteliktedir. Bu yönüyle tez, uygulamalı mühendislik açısından pratik bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

1.1 Güneş Enerjisinin Küresel ve Ulusal Önemi

Dünyada enerji talebi yıllar geçtikçe hızla artarken, fosil yakıt kaynaklarının çevreye olan zararı da giderek daha görünür hale gelmiştir. İklim değışikliği, karbon salınımındaki artış, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu ve enerji güvenliği gibi sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, hem erişilebilir olması hem de çevresel etkilerinin son derece düşük olması nedeniyle öne çıkmaktadır. Güneşten gelen ışıınım, dünya genelinde her gün devasa bir enerji potansiyeli oluşturur. Bu potansiyel FV sistemler sayesinde doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu dönüşüm diğeri enerji üretim biçimlerine göre sessiz,

atıksız ve yerinde üretime uygun bir yapıya sahiptir (Balat, 2005). Son yıllarda bu sistemlerin kurulum maliyetlerinin hızla düşmesi, küresel anlamda güneş enerjisi yatırımlarını da artırmıştır. 2000’li yılların başında sınırlı sayıda ülkede uygulama alanı bulan büyük ölçekli GES uygulamaları, 2020’li yıllarda hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerin enerji stratejilerinin merkezine oturmuştur (Sözen vd., 2005). Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, 2050 yılına kadar dünya genelinde enerji ihtiyacının %50’sinden fazlasının yenilenebilir kaynaklardan sağlanması hedeflenmektedir. (URL-1, 2021) Bu hedefe ulaşılmasında en büyük payın ise güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kaynaklarda olacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisinin özellikle elektrik üretiminde doğrudan kullanılabilir oluşu, bu kaynağı diğerlerinden ayıran temel özelliklerden biridir. Türkiye açısından değerlendirildiğinde ise ülkemiz yıllık ortalama 2.640 saat güneşlenme süresiyle Avrupa’nın çoğu ülkesinden daha avantajlı bir konumda yer almaktadır. Türkiye’nin yıllık ortalama güneş radyasyonu 1.527 kWh/m² üzerindedir ve bu güneş enerjisi yatırımlarının büyük bir potansiyel barındırdığını göstermektedir (Sözen vd., 2005). Ancak bu potansiyelin tamamına yakını hâlâ değerlendirilememiş durumdadır. Gerek teknik altyapı eksiklikleri gerekse bölgesel eşitsizlikler, yatırımların daha çok belirli bölgelerde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Küresel ve ulusal ölçekte enerji üretiminin geleceği düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanmak zorundadır. Güneş enerjisi, bu dönüşümde kritik rol oynayan stratejik bir kaynaktır. Hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de enerji arz güvenliğini korumak açısından güneş enerjisine dayalı teknolojilerin yaygınlaştırılması gereklidir. Bu bağlamda, doğru teknoloji seçimi ve bölgesel potansiyelin değerlendirilmesi güneş enerjisinin etkili kullanımı açısından belirleyici olmaktadır.

1.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Uygulamaları

Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneşlenme değerlerine sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Ülkenin yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2.640 saat, günlük ortalama güneşlenme süresi ise 7,2 saat civarındadır. Bu değerler, Türkiye’yi Avrupa ortalamasının üzerinde konumlandırırken, özellikle Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu bölgeleri gibi alanlarda daha da yüksek değerlere ulaşılmaktadır (Balat, 2005). Güneş enerjisinin elektrik üretiminde kullanılabilir hâle gelmesiyle birlikte Türkiye’de de GES’lere olan ilgi giderek artmıştır. 2010’lu yılların başında başlatılan teşvik programları sayesinde, lisanssız enerji üretimi kapsamında birçok küçük ve orta ölçekli GES kurulmuştur. Konya, Ankara, Kayseri gibi merkezlerde kurulan GES’ler, yüksek irtifa ve güneşlenme süreleri açısından avantaj sağlarken, doğu ve güneydoğu

bölgesindeki illerde bu potansiyel daha sınırlı şekilde değerlendirilmiştir. Halbuki Mardin, Şanlıurfa gibi illerde güneşlenme süresi 3.000 saate kadar çıkabilmektedir ve bu değişkenlik enerji politikalarının daha bölgesel odaklı yürütülmesi gerektiğini göstermektedir. Türkiye'nin enerji ithalatına olan yüksek bağımlılığı da yerli ve yenilenebilir kaynaklara yönelimi kaçınılmaz kılmaktadır. Son yıllarda ise sadece büyük ölçekli santraller yerine çatılara kurulan bireysel sistemler ve tarımsal sulama uygulamaları gibi küçük ölçekli çözümler de yaygınlaşmaya başlamıştır. Güneş enerjisinin kullanım alanı kırsal ve yarı kırsal bölgelerde de çeşitlenmiştir. Öte yandan, teknik ve ekonomik açıdan doğru sistem bileşenlerinin seçilmesi, bu yatırımların sürdürülebilirliği için önemlidir. Genel olarak değerlendirildiğinde Türkiye güneş enerjisi açısından büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen, bu potansiyelin verimli ve bölgesel bazda optimize edilmiş şekilde kullanımı hâlâ geliştirilmeye açıktır. Özellikle iklimsel koşullara göre sistem konfigürasyonlarının ve evirici teknolojilerinin doğru seçimi, güneş enerjisi uygulamalarının başarısını doğrudan etkilemektedir.

1.3 Mardin İli Güneş Enerjisi Profili

Türkiye genelinde güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan şehirlerden biri de Mardin'dir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Mardin hem coğrafi konumu hem de yıl boyunca aldığı güneş ışıınımı açısından öne çıkmaktadır. Şehir yaklaşık 6.83 kWh/m²-gün düzeyindeki ortalama global güneş ışıınımı ile, ülke genelinde en yüksek değerlere sahip iller arasında yer almaktadır (Sözen vd., 2005). Bu değerler Mardin'i büyük ölçekli güneş enerjisi yatırımları açısından cazip hâle getirmektedir. Bölge yarı kurak iklim özellikleri taşıdığı için yılın büyük bir bölümünde açık ve güneşli gün sayısı oldukça fazladır. Bu durum FV sistemlerin performansı açısından önemli bir avantaj sağlar. Her ne kadar yüksek sıcaklık değerleri uygun sistem tasarımı yapılmadığında verimliliği düşürebilse de, doğru havalandırma sistemleri ve uygun evirici teknolojileri sayesinde bu durum kontrol altına alınabilir. Bu nedenle Mardin gibi sıcak bölgelerde yerel koşullara göre teknoloji seçimi kritik öneme sahiptir. Mardin'in önemli avantajlarından biri de güneşlenme süresi ve ışıınım değerlerinde yıl içindeki dalgalanmaların oldukça düşük olmasıdır. Bu özellik santrallerin yıllık üretim tahminlerini daha öngörülebilir kılar. Sözen vd. (2005) tarafından yapılan yapay sinir ağı temelli modellemelerde de Mardin ve çevresindeki meteoroloji istasyonlarının düşük hata oranları ile öne çıktığı görülmüştür. Tüm bu avantajlara rağmen Mardin'de kurulu GES kapasitesi hâlen potansiyelinin oldukça gerisindedir. 2025 itibarıyla şehirde faal durumda olan GES'lerin kurulu gücü yaklaşık 41 MW düzeyindedir (URL-2, 2025). Bu

santrallerin büyük çoğunluğu küçük ve orta ölçekli lisanssız tesislerden oluşmaktadır. Örneğin RA Güneş Enerji'ye ait 9 MW kapasiteli santral şehirdeki en büyük sistemlerden biridir. Bunun yanında çeşitli özel sektör ve kamu kuruluşlarına ait küçük ölçekli GES'lerde faaliyet göstermektedir. Son yıllarda bu tabloyu değiştirecek ölçekte yeni yatırımlar planlanmaktadır. Bu kapsamda özellikle lisanslı ve depolamalı projelerin öne çıktığı görülmektedir. Bunlardan biri olan Artuklu-1 Depolamalı GES Projesi Egesa Enerji tarafından Mardin'de kurulacaktır. Projenin kurulu gücü 40 MW, batarya depolama kapasitesi ise 40 MWh olacak şekilde tasarlanmıştır. Yaklaşık 73.000 adet FV panel ve 200 evirici ile yılda 80 milyon kWh elektrik üretmesi planlanan tesisin yatırım değeri 408 milyon TL'dir (URL-3, 2024). Ayrıca, Exen Solar tarafından Midyat ve Artuklu ilçelerinde toplam 25 MW kurulu güce sahip iki farklı depolamalı GES projesi planlanmaktadır. Bu yatırımların toplam maliyeti 600 milyon TL'yi aşmaktadır (URL-4, 2024). Eda Solar tarafından Nusaybin ilçesinde kurulacak 15 MW kapasiteli bir diğer depolamalı GES projesi de bölgedeki kapasite artışına katkı sağlayacaktır (URL-5, 2024). En dikkat çeken projelerden biri ise İsdemir'in Mardin'de kuracağı 105 MW kapasiteli öztüketim GES projesidir. Bu proje ile sanayi tesislerinin doğrudan enerji ihtiyacını karşılaması amaçlanmaktadır (URL-6, 2024). Tüm bu yatırımlarla birlikte 2027 yılına kadar Mardin'deki toplam GES kurulu gücünün 500 MW'ı aşması beklenmektedir. Bu büyüme potansiyeli bölgenin yalnızca güneş enerjisi potansiyeliyle değil, şebeke entegrasyonu ve depolama teknolojileri açısından da stratejik önem kazandığını göstermektedir. Buna rağmen, çevresel faktörlerin (toz, gölgelenme, sıcaklık farkları vb.) sistem performansı üzerindeki etkilerine dair yerel ölçekte yürütülmüş çalışmalar yetersizdir. Ayrıca mevcut santrallerde kullanılan farklı evirici tiplerinin (örneğin merkezi evirici ile dizi evirici sistemlerin) karşılaştırmalı analizleri yapılmamıştır. Bu tür teknik değerlendirmeler yatırım kararlarının daha verimli yapılmasına katkı sağlayacak, bölgesel performans optimizasyonunu mümkün kılacaktır. Sonuç olarak Mardin ili yalnızca yüksek teorik potansiyeli değil, aynı zamanda hayata geçirilen ve planlanan yatırımlarla birlikte Türkiye'nin güneş enerjisi dönüşümünde önemli bir merkez olmaya adaydır.

1.4 Güneş Enerjisi Santrallerinde Evirici Teknolojilerinin Rolü

FV sistemlerin şebekeye entegre edilebilmesi için doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi gereklidir. Bu dönüşüm işlemi, sistemin merkezi sayılabilecek eviriciler aracılığıyla gerçekleştirilir. Güneş panellerinden elde edilen doğru akım, şebekeye doğrudan aktarılabilir yapıda olmadığından, eviriciler sistemin işlevselliği açısından

temel bir bileşen konumundadır. Eviriciler sadece DC-AC dönüşümü yapmakla kalmayıp, sistemin güvenliği, izleme özellikleri ve maksimum güç noktası takibi (MGNT) gibi işlevleri de yerine getirir. Eviriciler genel olarak merkezi ve dizi tipi olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Merkezi eviriciler genellikle büyük ölçekli santrallerde tercih edilir. Birçok panel grubunun gücü tek bir merkezde işlenir, maliyet ve bakım kolaylığı açısından avantajlıdır. Fakat merkezi evirici kullanan GES'lerde sistemin herhangi bir bölümünde oluşabilecek bir arıza tüm santrali etkileyebilir.

Dizi tipi eviriciler, belirli panel gruplarının ayrı ayrı izlenmesine ve kontrol edilmesine olanak tanır. Özellikle gölgelenme, sıcaklık farkı veya toz birikimi gibi lokal çevresel değişkenlerin etkisini azaltmak için faydalıdır (Sözen vd., 2005). Son yıllarda özellikle sıcak ve güneşlenmenin eşit olmadığı yüzeylerde dizi tipi eviricilere olan ilgi artmıştır. Dizi tipi eviricili sistemlerde her bir MGNT ünitesi, panel grubuna özel çalıştığı için lokal optimizasyonu daha hassas yapılabildiğinden enerji kayıplarını azaltmada daha başarılıdır. Mardin gibi yüksek ışıınım değerlerine sahip ancak sıcaklık farklarının da yoğun yaşandığı bölgelerde evirici tipi seçimi santral verimliliği üzerinde doğrudan etkili olabilir. Fakat dizi tipi eviriciler parça sayısı fazla olduğu için bakım ve onarım süreçlerinde merkezi sistemlere göre daha karmaşıktır. İlk yatırım maliyeti, birim watt başına daha yüksek olabilse de uzun vadede özellikle üretim kayıplarını minimize etmesi sayesinde bu maliyet farkı çoğu durumda dengelenmektedir.

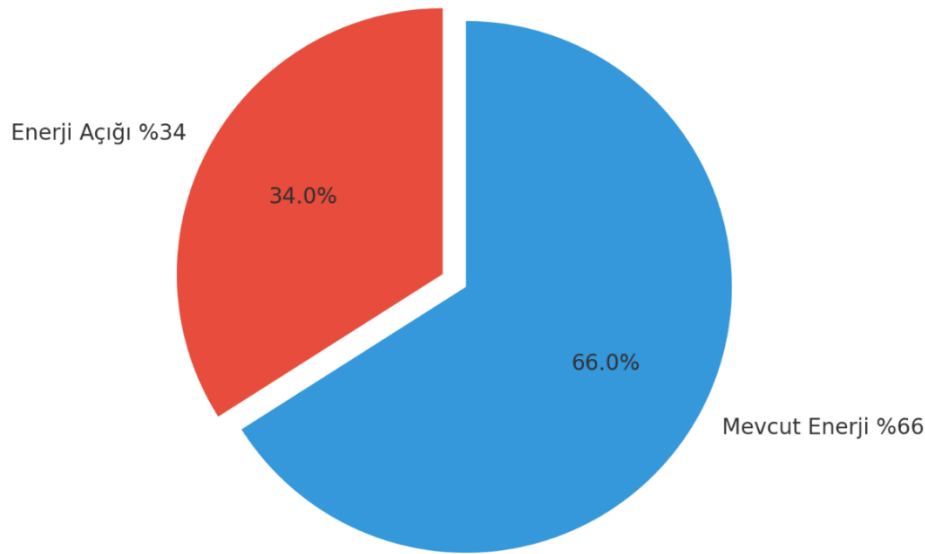
Bir diğer önemli konu ise ısı yönetimidir. Yüksek sıcaklık altında çalışan evirici sistemlerinde termal stres, elektronik bileşenlerin ömrünü azaltabilmekte ve arıza oranlarını artırabilmektedir. Bu nedenle sıcak iklim bölgelerinde evirici yerleşimi ve soğutma stratejileri de sistem verimliliğini etkileyen faktörler arasında yer alır. Özellikle merkezi sistemlerde yoğun ısı birikimi daha belirgin olabilmektedir. GES'lerde kullanılan evirici tipi, sadece elektriksel değil, çevresel, ekonomik ve operasyonel parametreler açısından da bütüncül olarak ele alınmalıdır. Yatırım maliyeti, bakım kolaylığı, performans kayıpları ve yerel iklim koşulları dikkate alındığında evirici tipi seçimi santralin genel elektrik üretim kapasitesini doğrudan belirleyen faktörlerden biridir.

1.5 Araştırmanın Gerekçesi ve Problem Tanımı

GES'lerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sistemlerin saha verimliliğini etkileyen birçok teknik parametreye dair araştırmalar da artış göstermiştir. Bu çalışmaların büyük bir bölümü, sistem performansını genel geçer ortalamalar üzerinden ele almakta, yerel iklim koşullarının etkisi ise çoğu zaman yeterince dikkate alınmamaktadır. Sıcaklık, gölgelenme, panel yönelimi, tozlanma ve özellikle kullanılan evirici teknolojisi gibi

etmenler, GES'lerin günlük elektrik üretiminde belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde özellikle Türkiye özelinde, farklı evirici tiplerine sahip GES'lerin aynı iklim koşullarında performans karşılaştırmasına dair saha verisine dayanan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Çoğu çalışma ya deneysel laboratuvar verilerine dayanmakta ya da sadece teorik simülasyon çıktıları üzerinden yorum yapılmaktadır (Sözen vd., 2005). Gerçek saha verileri sistemlerin çevresel etkilere karşı nasıl tepki verdiğini gözlemlemek açısından çok daha güvenilir ve anlamlı sonuçlar verir. Mardin ili yüksek ışıınım düzeyleri ve uzun güneşlenme süresi ile teorik olarak oldukça verimli sonuçlar vadeden bir bölgedir. Bu potansiyelin saha bazlı ve sistem türüne göre ne ölçüde değerlendirilebildiği yeterince analiz edilmemiştir. Bu sonuçlar özelinde Mardin gibi sıcak iklim bölgelerinde, merkezi mi yoksa dizi tipi eviricinin mi daha avantajlı olduğunun araştırılması gerekir.

Gelişmekte olan ülkelerde enerji arz-talep dengesizliği, sürdürülebilir çözümlere duyulan ihtiyacı daha da ön plana çıkarmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, enerji arzının sadece %66'lık kısmı mevcutken, %34'lük önemli bir kısım halen eksiklik göstermektedir. Bu oranlar yenilenebilir enerjiye yönelimin bir zorunluluk haline geldiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Enerji arzı ve eksiklik durumu (Shrestha ve Shrestha, 2014).

Evirici tipi seçimi, yatırımcının maliyet, bakım, sistem esnekliği ve üretim sürekliliği gibi kriterleri göz önünde bulundurduğu bir tercih sürecidir. Bu açıdan bakıldığında farklı tip eviricilerle çalışan GES'lerin aynı bölgesel koşullarda gösterdiği performansın karşılaştırılması, hem mühendisler hem de yatırımcılar için önemli veriler sağlar. Sistem performansı analizlerinde sıklıkla kullanılan simülasyon yazılımlarının tahminleri ile gerçek üretim verileri arasında ne kadar sapma olduğu da önemli bir

araştırma sorusudur. Gerçek verilerle simülasyon yazılımlarının çıktılarının karşılaştırılması, saha uygulamalarında hangi koşullarda ne kadar sapma yaşandığını görmek açısından önemlidir. Bu tez çalışmasında, yakın güçlere sahip merkezi eviricili ve dizi tipi eviricili iki GES'in gerçek saha verileri kullanılarak karşılaştırmalı olarak performansları değerlendirilmiş olup, PVSOL programı ile gerçekleştirilen simülasyonlar ile gerçek saha verileri arasındaki farkların nedenleri araştırılmıştır. Böylece literatürde eksik kalan bir boşluk doldurulurken, gelecekte yapılacak benzer uygulamalara da yerel düzeyde önemli bir referans sunulmuş olacaktır.

1.6 Tezin Amacı ve Hedefleri

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin güneş enerjisi bakımından en yüksek potansiyele sahip illerinden biri olan Mardin'de yer alan iki farklı GES'i karşılaştırmalı olarak analiz etmektir. Her iki santral benzer çevresel ve iklimsel koşullarda çalışmakla birlikte, biri merkezi evirici, diğeri ise dizi tipi evirici teknolojisi kullanmaktadır. Aynı ısıtım ve sıcaklık koşulları altında farklı evirici tiplerinin GES üzerindeki performansları incelenmiştir. Bu amacın temelinde, evirici teknolojisinin sistem genel verimliliğinin, yatırım geri dönüş süresinin (YGDS) ve bakım gereksinimlerinin belirleyicisi olması yatmaktadır. Özellikle sıcak iklimlerde çalışan santrallerde, ısı kaynaklı kayıplar ve gölgelenmeye karşı esneklik gibi faktörler evirici performansını ciddi şekilde etkilemektedir. Bu nedenle, bölgesel koşullara uygun evirici seçiminin, sistem başarısında anahtar rol oynadığı düşünülmektedir.

Çalışmanın özel hedefleri ise şu şekilde özetlenebilir:

- Mardin ilinde kurulmuş iki farklı GES'in, evirici tipi açısından üretim verimliliğini karşılaştırmak,
- Her bir santral için PVSOL yazılımı ile simülasyonlar gerçekleştirmek ve bu simülasyon sonuçlarını gerçek üretim verileriyle karşılaştırmak,
- Merkezi ve dizi tipi eviricilerin, eşit sıcaklık, ısıtım ve çevresel koşullar altındaki performans farklarını ortaya koymak,
- Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, benzer coğrafi ve iklimsel koşullara sahip bölgeler için evirici teknolojisi seçimine rehber olabilecek önerilerde bulunmak,
- Kullanılan simülasyon araçları tahminlerinin gerçek saha verilerine uyumunu analiz etmek,
- Enerji yatırımcılarına, mühendislik ekiplerine ve karar vericilere, bölgesel koşullara özgü sistem tasarımı konusunda teknik altyapı sağlamak.

Bu hedefler doğrultusunda çalışmanın hem akademik literatüre katkı sağlaması, hem de uygulayıcı kurumlar ve yatırımcılar için karar destek unsuru olması beklenmektedir. Gerçek saha verisine dayalı olması açısından mevcut teorik çalışmalardan farklılaşmakta ve Türkiye’de yerel performans kıyaslaması yapılan nadir örneklerden biri olarak literatürde yer edinmeyi amaçlamaktadır.

1.7 Tezin Kapsamı ve Yöntemsel Yaklaşım

Bu tez çalışması, Mardin ilinde kurulu merkezi eviricili GES ve dizi eviricili GES’i esas almaktadır. Çalışma bu iki GES’in aynı iklim koşulları altında sunduğu performansı karşılaştırmalı olarak incelemeyi hedeflemektedir. Çalışmanın ilk aşamasında 2024 yılı için sahalardan aylık enerji üretim verileri temin edilmiştir. Ardından karşılaştırılacak olan iki santral PVSOL simülasyon yazılımı kullanılarak aynı konum için 2024 yılı iklimsel veriler girilerek dijital ortamda modellenmiştir. Simülasyon giriş verileri olarak, panel yerleşimi, panel eğim ve yönelimi, panel ve evirici teknik verileri ile Mardin’e özgü ışınlam ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Santrallere ait enerji üretim verileri santrali işleten firmalardan alınmış, simülasyon için iklim verileri PVSOL yazılımının kullanmış olduğu MeteoSyn modülü aracılığı ile MeteoTest firmasının veri kaynaklarından temin edilmiştir. Analiz aşamasında, her iki sistem için “performans oranı (PO, PR)”, “toplam üretim (kWh)”, “spesifik üretim (kWh/kWp)”, “mevsimsel verimlilik değişimleri” gibi parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen teknik verimlilik sonuçları, yatırımcı ve mühendislik kararları için ön bilgi sağlayabilecek niteliktedir. Bu tezde kullanılan değerlendirme yöntemi başka bölgelerde yapılacak benzer karşılaştırmalı analizler için de bir şablon niteliği taşıyabilecek düzendedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihçesi ve Gelişimi

FV teknolojilerin geçmişi, 19. yüzyılın ortalarında Alexandre Edmond Becquerel'in ışık etkisiyle elektrik üretimini gözlemlemesiyle başlamıştır. Bu erken keşifler, uzun bir süre ticari uygulamaya dönüşmemiştir. Gerçek anlamda elektrik üretimine uygun ilk FV hücre, 1954 yılında Bell Laboratuvarları tarafından geliştirilmiş ve bu gelişme modern güneş enerjisi uygulamalarının temelini oluşturmuştur (Chapin vd., 1954). Başlangıçta yüksek maliyet ve düşük verimlilik gibi nedenlerle sadece uzay uygulamalarında kullanılan FV teknolojiler, zaman içinde hem teknik açıdan gelişmiş hem de maliyet yönünden daha ulaşılabilir hâle gelmiştir. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri güneş enerjisine olan ilgiyi artırmış ve birçok ülke bu alanda araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yatırım yapmaya başlamıştır. Bu süreçte polikristal ve monokristal hücre teknolojileri öne çıkmış, ardından ince film teknolojileriyle çeşitlilik kazanmıştır. 2000'li yıllara gelindiğinde FV modüllerin enerji dönüşüm verimlilikleri %12–15 seviyesinde iken, günümüzde laboratuvar ortamlarında bu oran %25'lerin üzerine çıkmıştır. Özellikle Passivated Emitter and Rear Cell (PERC), heterojunction ve tandem hücre gibi yeni nesil teknolojilerle verimlilik artışı sağlanmıştır. Tarihsel gelişim sürecinde FV sistemlerinin tasarımı da paralel biçimde dönüşmüştür. İlk sistemler genellikle bağımsız (off-grid) sistemler olarak kırsal alanlarda kullanılırken, günümüzde merkezi şebekeye entegre (on-grid) büyük ölçekli santraller daha ön plandadır. Dönüşüm aşaması hem panel teknolojisindeki ilerlemelerin hem de evirici enerji yönetim sistemleri gibi yardımcı bileşenlerin gelişmesinin bir sonucudur (Mohammad ve Mahjabeen, 2023). FV teknolojilerin yaygınlaşmasında maliyetlerin düşmesi belirleyici olmuştur. Modül başına maliyet 2000'li yılların başında watt başına 4-5 USD seviyesindeyken, 2025 yılı itibarı ile bu rakam 0.16–0.20 USD seviyelerine kadar gerilemiş, bu ekonomik iyileşme teknolojik ilerlemenin doğrudan sonucudur. Günümüzde FV teknolojileri sadece konut ölçekli olmamakla birlikte sanayi tesisleri, tarımsal uygulamalar ve mobil sistemlerde de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin ısıtma, soğutma ve hibrit sistemlerde destekleyici rolü çok önemlidir. Tüm bu gelişmeler, FV teknolojilerin enerji dönüşüm paradigmasının merkezinde yer almasına neden olmuştur. Bugün gelinen noktada FV sistemler, sürdürülebilir enerji politikalarının ayrılmaz bir parçası hâline gelmiş, çok sayıda ülkenin yenilenebilir enerji stratejilerinde temel unsur olarak kabul edilmiştir.

2.2 Güneş Enerjisi Santralleri

GES güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştüren entegre sistemlerdir. Santrallerin en temel amacı doğrudan ya da dolaylı olarak güneşten gelen enerjiyi yakalayarak sürekli ve güvenilir bir elektrik üretimi sağlamaktır. FV sistemler en yaygın kullanılan teknolojilerden biridir. Temel yapı taşları arasında güneş panelleri, eviriciler, montaj sistemleri, izleme sistemleri ve elektriksel bağlantı birimleri yer alır (Mohammad ve Mahjabeen, 2023). Bir GES’de güneş panelleri, güneş ışığını elektrik akımına dönüştüren ilk aşamayı oluşturur. Panellerin ürettiği doğru akım eviriciler vasıtasıyla alternatif akıma çevrilerek şebekeye aktarılabilir hâle gelir. Dönüşüm sürecinde kullanılan evirici teknolojisi sistem verimliliğinde belirleyici rol oynar. Bununla birlikte panellerin yönelimi, eğim açısı ve çevresel faktörler de üretim kapasitesini doğrudan etkiler (Akhan vd., 2025). GES’ler genel olarak iki ana tipe ayrılır: FV sistemler ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (YGE, CSP) sistemleri. FV sistemlerde yarı iletken malzeme kullanılarak doğrudan elektrik üretilirken, YGE sistemlerinde güneş ışını bir noktaya yoğunlaştırılarak ısı elde edilir ve bu ısı bir termodinamik döngüyle elektrik üretmekte kullanılır. YGE sistemleri özellikle büyük ölçekli uygulamalarda yüksek sıcaklık ve ısı depolama avantajları sayesinde dikkat çeker. FV santrallerde kullanılan hücre teknolojileri zamanla önemli ölçüde gelişmiştir. Başlangıçta tek kristalli (monokristal) ve çok kristalli (polikristal) hücreler yaygınken, günümüzde ince film teknolojileri, perovskit ve tandem hücre yapılarıyla daha yüksek verimlilik seviyelerine ulaşılmıştır. Bu yeni nesil paneller daha geniş ışık spektrumunu absorbe edebilme ve esnek uygulama yüzeylerine uyum sağlama açısından avantajlıdır (Mohammad ve Mahjabeen, 2023). Bir GES’in verimliliği sadece hücre tipi ile değil aynı zamanda çevresel koşullarla da yakından ilişkilidir. Özellikle sıcaklık, güneşlenme süresi, gölgelenme ve panel temizliği gibi parametreler enerji üretimini doğrudan etkiler. Bu nedenle santral kurulumu öncesinde detaylı bir saha analizi ve simülasyon çalışması yapılması kritik öneme sahiptir. Bu tür analizler sistemin yıllık üretim kapasitesini tahmin etmekte ve YGDS’yi belirlemekte kullanılır. GES tasarımlarında önemli bir diğer unsur da enerji depolama sistemlerinin entegrasyonudur. Enerji talebinin gündüz ve gece saatlerinde farklılık göstermesi FV sistemlerde üretim-tüketim dengesizliğine neden olabilmektedir. Bu sebeple batarya sistemleri ya da YGE santrallerde kullanılan ısı enerjisi depolama çözümleri arz güvenliğini artırmak için sıklıkla tercih edilmektedir. GES’ler sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretiminin önemli yapı taşlarından birini oluşturmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte verimlilikleri artmakta kurulum maliyetleri düşmekte ve farklı coğrafi koşullara uyum yetenekleri gelişmektedir. Gerek

FV gerekse YGE sistemleri, gelecekte enerji bağımsızlığına katkı sağlayacak stratejik yatırımlar olarak değerlendirilmektedir.

2.3 Evirici Teknolojileri

GES'lerde kullanılan başlıca evirici tipleri arasında merkezi ve dizi eviriciler yer alır ve bu iki tip, performans, maliyet, bakım gereklilikleri ve esneklik açısından farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Merkezi eviriciler birden fazla FV dizisinin DC çıkışlarını birleştirip tek bir büyük güçte eviriciye yönlendirir. Bu sistemlerde daha az cihaz ve kablo kullanıldığından yatırım maliyetleri daha düşüktür ve bakım süreçleri görece daha basittir. Sistemin tek bir noktada arızalanması durumunda tüm santralin üretimi durabilir. Tek MGNT birimiyle çalışmaları için gölgelenme veya modül performans farklılıklarından kaynaklı eşleşmeme (uyumsuzluk) kayıpları yüksektir. Dizi eviriciler ise her bir diziye özel evirici atayarak çoklu MGNT özelliği sunar. Sistemdeki her dizi optimum güç noktasında çalışabilir. Bu durum gölgelenme, sıcaklık farkı ya da modül kalitesi gibi durumlarda oluşabilecek eşleşmeme kayıplarını önemli ölçüde azaltır (Leva vd., 2020). Dizi tipi eviriciler modüler yapıları sayesinde sistem esnekliğini artırır ve arıza durumlarında sadece ilgili MGNT'ye bağlı dizilerin üretimi etkilenir. Dizi evirici kullanımı daha fazla sayıda evirici ve kablolama gerektirdiği için ilk yatırım maliyetini artırır. Düşük arıza riski, bakım kolaylığı ve daha yüksek enerji üretimi sayesinde uzun vadede toplam sahip olma maliyeti avantajlı hale gelir (Atasoy ve Tezcan, 2021). FV sistemlerde evirici tipi seçiminde başlangıç yatırım maliyetine, sistem esnekliği, performansı, arıza toleransı ve uzun vadeli bakım gereksinimleri gibi faktörlere de dikkat edilmelidir. Özellikle yüksek performans beklentisi ve değişken çevresel koşulların olduğu sahalarda dizi eviriciler daha avantajlı bir seçenek haline gelmektedir (Díez-Mediavilla vd., 2014).

2.4 Karşılaştırmalı Akademik Çalışmalar

Son yıllarda GES'lerde kullanılan evirici tiplerinin sistem performansına olan etkilerini analiz eden pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda özellikle merkezi evirici ve dizi evirici yapılarını farklı coğrafi koşullarda, farklı güç düzeylerinde ve çeşitli yük profilleri altında değerlendiren analizler öne çıkmıştır. Genel eğilim dizi eviricilerin performans ve enerji üretimi bakımından daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır (Leva vd., 2023). Díez-Mediavilla vd. (2014)'nin İspanya'da gerçekleştirdiği iki yıllık saha verisine dayalı çalışmada merkezi eviricili ve dizi eviricili sistemlerin üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar dizi eviricili sistemlerin her bir

kurulu kWp başına günlük ortalama 0.069 kWh daha fazla üretim sağladığını ve bu farkın 25 yıllık projeksiyonda yaklaşık 35.000 Euro daha fazla gelir anlamına geldiğini göstermiştir. Hindistan’da 2 MW kapasiteli iki farklı GES’de yapılan analizde dizi evirici sistemlerinin yıllık üretimde %2–3, kısmi gölgelenme veya bulutlu koşullarda ise %4–8 daha fazla enerji üretimi sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle değişken çevresel koşullara sahip bölgelerde dizi eviricilerin avantajlı olduğu belirtilmektedir. (Desai vd., 2020). Türkiye’den Atasoy ve Tezcan (2021) tarafından yapılan ve Ankara’da 10 MW’lık GES’in iki farklı evirici tipiyle modellenerek analiz edildiği çalışmada ise dizi evirici ile yapılan sistemde yatırım maliyetinin daha düşük olduğu, yıllık üretimin bir miktar daha yüksek gerçekleştiği ve evirici kayıplarının daha az olduğu rapor edilmiştir. Bazı çalışmalarda dizi eviricili sistemlerin daha fazla ekipman içerdiği, bu nedenle bakım ihtiyacının ve kurulum karmaşıklığının arttığı da belirtilmiştir. Ancak bu durum dizi eviricilerde sağlanan dijital izleme, arıza tespiti ve bölgesel yedekleme avantajlarıyla telafi edilebilmektedir. Bazı senaryolarda merkezi eviricili sistemlerin daha ekonomik olabileceği yönünde bulgular da mevcuttur. Örneğin belirli elektrik satış fiyatı senaryolarında merkezi eviricili sistemlerin daha yüksek iç kârlılık oranı (İKO) ve daha kısa YGDS sunduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın temel nedeni dizi evirici sistemlerinin daha yüksek ilk yatırım maliyetine sahip olmasıdır. Literatürde yapılan karşılaştırmalı çalışmalar genel olarak dizi eviricili sistemlerin enerji üretimi, esneklik ve kısmi arıza toleransı açısından daha avantajlı olduğunu göstermekte ve buna karşın merkezi eviricilerin bazı senaryolarda düşük yatırım maliyeti ile ekonomik açıdan tercih edilebilirliğini koruduğunu göstermektedir. Uygulama alanı saha koşulları, gölgelenme etkisi ve yatırımcı tercihlerine bağlı olarak en uygun evirici tipi farklılık gösterebilmektedir.

2.5. İklim ve Coğrafi Koşulların Performans Üzerindeki Etkileri

Güneş enerjisi sistemlerinin gerçek performansı yalnızca panel tipi ya da evirici teknolojisinden değil, aynı zamanda yerel iklim ve coğrafi özelliklerden de büyük oranda etkilenmektedir. Özellikle Mardin gibi yarı kurak iklim bölgelerinde sıcaklık, toz, radyasyon şiddeti ve rüzgar gibi parametreler, santral verimini doğrudan etkilemektedir. Yüksek ortam sıcaklığı FV panellerin veriminde düşüşe neden olur. FV hücrelerin çalışma sıcaklığı her 1 °C arttığında, elektrik üretiminde yaklaşık %0,4 ila %0,5 arasında verim kaybı yaşandığı çeşitli bilimsel çalışmalarla belirtilmektedir (Skoplaki ve Palyvos, 2009; Mussard ve Amara, 2018). Türkiye menşei teknik bir kaynak olan EElektrik platformunda da benzer doğrulama yapılmıştır: “Kristal silikon paneller için sıcaklık

katsayısı genellikle $-0,3$ ile $-0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Yani sıcaklık $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arttığında panel gücü yaklaşık $0,3\%$ – $0,5\%$ oranında düşer” (URL-12, 2025). Bu veriler hem uluslararası akademik kaynaklarla hem de yerli teknik gözlemlerle uyumlu olup, yaz aylarında sıcaklıkların $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’yi aştığı Mardin gibi yarı kurak bölgelerde performans kayıplarını kaçınılmaz hâle getirmektedir. Toz birikimi ise bir diğer önemli etkidir. Panel yüzeyine biriken tozlar güneş ışınımının emilimini azaltmanın yanı sıra yüzeyde lokal ısı birikimine neden olarak çift yönlü verim kaybına yol açar. Bu kayıpların 10% – 30% arasında değiştiği, bazı çalışmalarda ise 6 ay boyunca temizlenmeyen panellerde 78% ’lere kadar çıktığı rapor edilmiştir (Bayar, 2022). Modül yerleştirme açısı da toz birikimi üzerinde etkili bir parametredir. Daha yatay yerleştirilen panellerde toz birikimi daha fazla olurken, eğimin artması ile birlikte doğal temizlenme ihtimali yükselmektedir. Yerel rüzgar yönü ve hızının dikkate alındığı optimum yerleşim tasarımları sistem performansı üzerinde doğrudan olumlu etki yaratabilir. Rüzgarın serinletici etkisi sayesinde özellikle sıcak bölgelerde panel sıcaklıkları düşürülerek verim artışı sağlanabilir. Yapılan çalışmalarda panelin arka tarafından gelen veya yan yönden esen rüzgârın modül sıcaklığını düşürerek normalize güç üretiminde 3% ila $7,7\%$ arasında artış sağladığı gösterilmiştir (Hudişteanu vd., 2022). Öte yandan çok kuvvetli rüzgârların taşıdığı iri partiküller panel yüzeyinde aşındırıcı etki yaratabilir ve uzun vadede modül camında hasarlara neden olabilir. Bölgenin yağış rejimi de FV sistemlerin doğal temizlenme kapasitesini etkileyen önemli bir unsurdur. Düzenli aralıklarla yağın yağmur yüzeyde biriken tozların uzaklaştırılmasına yardımcı olarak geçici verim artışları sağlayabilir. Ancak Mardin gibi düşük yağışlı bölgelerde bu doğal temizlik mekanizması yeterli olmadığından, düzenli mekanik temizlik zorunlu hâle gelmektedir. Bunlara ek olarak çevresel koşulların sebep olduğu modül bozulmaları da göz önünde bulundurulmalıdır. İnce film paneller sıcaklığa daha az duyarlı olsalar da kurak bölgelerdeki yüksek toz konsantrasyonu ve UV radyasyonu nedeniyle daha hızlı bozunma eğilimindedir (Bayar, 2022). Sonuç olarak iklim ve coğrafi koşullar bir GES’in yıllık performansını ve YGDS değerini doğrudan etkileyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle Mardin gibi yarı kurak bölgelerde kurulacak sistemlerde panel tipi, evirici seçimi ve yerleşim geometrisi bu çevresel faktörlere göre dikkatle planlanmalıdır.

2.6. PVSOL ve Benzeri Simülasyon Yazılımları Üzerine Araştırmalar

FV sistemlerin performansını tahmin etmek ve yatırım öncesi teknik fizibiliteyi belirlemek için birçok simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımlar hem

mühendislik hem de ekonomik analizlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle PVSOL, PVSyst ve HOMER gibi araçlar yatırımcıların ve araştırmacıların karar alma süreçlerini destekleyen temel platformlar hâline gelmiştir (Dirlik vd., 2023). Yazılım araçları iki temel yapıda incelenebilir: performans simülasyonu odaklı olanlar ve sistem optimizasyonu temelli olanlar. Performans simülasyon modelleri kullanıcının belirlediği sistem parametrelerine göre enerji çıktısını tahmin ederken; optimizasyon modelleri hedeflere ulaşmak adına sistemin en uygun yapılandırmasını bulmaya çalışır (Tozzi ve Jo, 2017). PVSOL yazılımı, özellikle gölgeleme analizleri ve 3 boyutlu modelleme kabiliyeti ile öne çıkmaktadır. Gelişmiş grafik çıktıları ve kullanıcı dostu arayüzü sayesinde tasarım ve simülasyon süreçlerinde mühendisler tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Almanya’da kurulan bir GES’e ait verilerle yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada PVSOL yazılımının gerçek üretime en yakın tahmini sağladığı gözlemlenmiştir (Dirlik vd., 2023). Diğer taraftan PVsyst yazılımı daha akademik ve detaylı hesaplama isteyen projelerde tercih edilmektedir. Geniş veri tabanı, kayıpların detaylı şekilde modellenebilmesi ve sistem bileşenlerinin özelleştirilebilmesi gibi avantajlar sunar. Bazı çalışmalarda özellikle gölgeleme ve yerel iklim verilerinin hassasiyet gerektirdiği durumlarda sonuçlarının fazla sapma gösterebildiği ifade edilmiştir (Dirlik vd., 2023). Helioscope, SAM ve PVWatts gibi diğer araçlar ise daha çok ön fizibilite çalışmaları veya hızlı değerlendirmeler için uygundur. PVWatts gibi araçlar minimum veri girişi ile yaklaşık üretim tahminleri verirken, SAM daha karmaşık finansal modelleme özellikleri sunar (Kaleshwarwar ve Bahadure, 2023). Gerçek üretim verileri ile yapılan karşılaştırmalı analizler, farklı iklim bölgelerinde bu yazılımların doğruluğunu test etme imkanı sunmuştur. Örneğin Türkiye’nin yedi farklı ilinde yapılan bir çalışmada bazı yazılımlar belirli bölgelerde düşük sapma oranları gösterirken, başka bölgelerde bu sapmalar artmıştır. Bu sapmalar kullanılan meteorolojik veri kaynaklarının ve simülasyon algoritmalarının bölgesel farklılıklara duyarlılığına işaret etmektedir. Yazılımların doğruluk değerlendirmelerinde sapma yüzdesi genellikle %10’un altında kalıyorsa kabul edilebilir olarak değerlendirilir. Yazılımlar arasında aylık bazda -23.7% ile +22.2% arasında sapmalar olduğu da görülmüştür (Dirlik vd., 2023). PVSOL özellikle Türkiye gibi çeşitli iklim tiplerine sahip ülkelerde daha başarılı sonuçlar verirken; HOMER hibrit sistemler için avantaj sağlar. PVsyst ise ayrıntılı mühendislik analizleri gerektiren projelerde tercih edilmelidir. Yatırım kararlarının daha sağlıklı verilmesi adına bu yazılımların çıktılarına ek olarak sahadan elde edilen gerçek verilerle kalibrasyon yapılması önerilmektedir.

3. TEORİK TEMELLER

3.1 Güneş Işımasının Temel Kavramları (GHI, DNI, DHI)

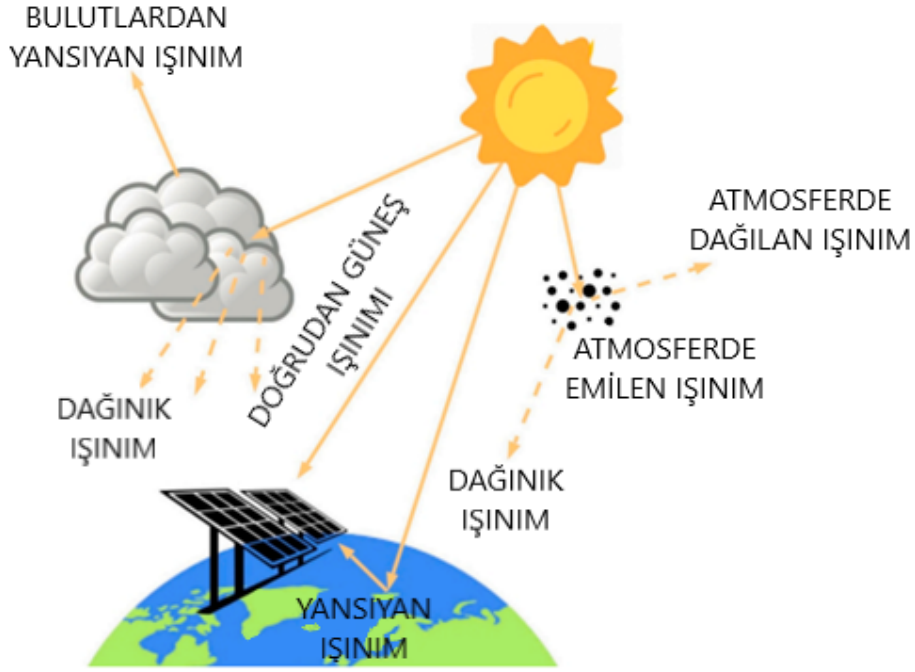
GES'lerin performansını etkileyen en temel çevresel parametrelerden biri güneş ışıdır. Güneşten gelen bu enerji üç ana bileşen şeklinde ölçülür: GHI (Global Horizontal Irradiance – Küresel Yatay Işınım (KYI)), DNI (Direct Normal Irradiance – Doğrudan Normal Işınım) ve DHI (Diffuse Horizontal Irradiance – Yayınık Yatay Işınım (YYI)). Her bir bileşen sistem tasarımı ve enerji üretimi açısından farklı teknik gereklilikler doğurur. GHI yatay düzleme gelen toplam güneş enerjisini ifade eder. Bu değer hem güneşten doğrudan gelen ışıdırı hem de atmosferik saçılma yoluyla gelen yayılı ışıdırı kapsar. Şekil 2'de güneş ışıdırı çeşitlerinin genel yapısı görölmektedir. Eşitlik 1 ile küresel yatay ışıdırı hesaplanır.

$$GHI = DNI \times \cos(\theta) + DHI \quad (1)$$

Bu denklemde:

- GHI: Küresel yatay ışıdırı (kWh/m²)
- DNI: Doğrudan normal ışıdırı (kWh/m²)
- DHI: Yayınık yatay ışıdırı (kWh/m²)
- θ : Güneş zenit açısı (derece)

Burada “ θ ” güneş zenit açısıdır (Pérez-Astudillo ve Bachour, 2014) DNI, güneşten doğrudan gelen ışıdırının güneşe dik konumlandırılmış bir yüzeye düşen bileşenidir. Bu ışıdırı türü sadece güneşi gören yüzeyler için geçerlidir ve genellikle iki eksenli güneş izleyicili sistemlerde değerlendirilir. DNI, YGE sistemleri gibi uygulamalarda özellikle önemlidir çünkü bu sistemler sadece doğrudan ışıdırı kullanabilir. DHI ise güneşin doğrudan görölemediği, ışıdırın bulutlar, toz veya atmosferdeki partiküller nedeniyle saçıldığı durumlarda yatay düzleme düşen yayınık ışıdırıyı temsil eder. DHI özellikle bulutlu günlerde FV sistemlerin hâlâ enerji üretmesini mümkün kılar. FV sistemlerde bu bileşen ihmal edilmemeli çünkü birçok bölge yıl içinde uzun süre bulutlu havaya maruz kalabilir.

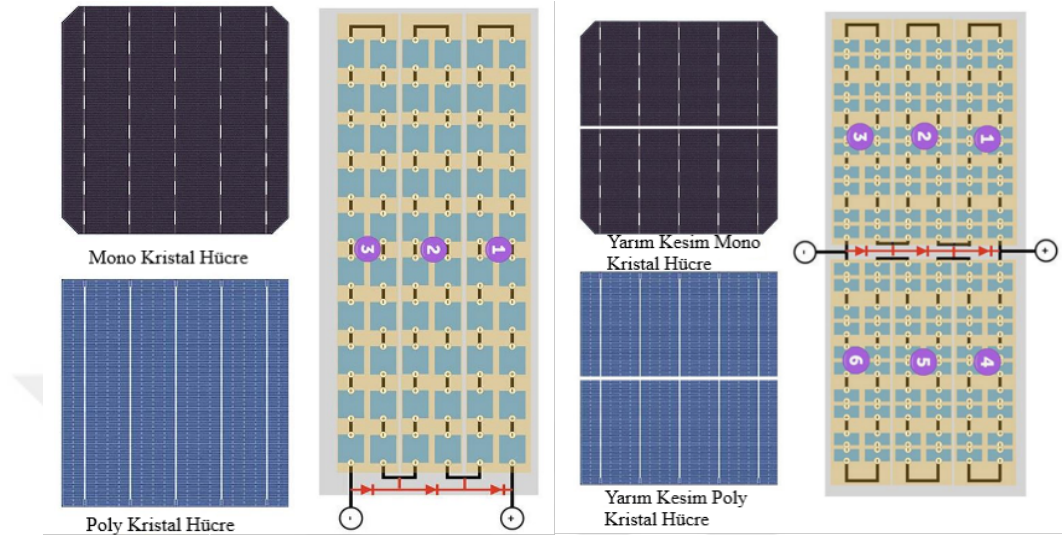


Şekil 2. Güneş ışınımı bileşenlerinin genel yapısı: doğrudan, saçılan ve yansayan bileşenler (Uyarlandı: de Souza, Tiepolo ve Urbanetz, 2019).

3.2. Fotovoltaik Hücrelerin Çalışma Prensibi

FV hücreler, güneşten gelen fotonları doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Bu dönüşüm fiziksel temelde “FV etki” adı verilen bir olguya dayanır. Bir FV hücrenin merkezinde farklı elektriksel özelliklere sahip iki yarı iletken malzemenin (tipik olarak silisyum) birleşmesiyle oluşturulmuş p-n bağlantısı yer alır ve güneş ışığını elektriğe çeviren tüm mekanizmanın temelini oluşturur. Hücreye düşen güneş ışınları, yani fotonlar, yeterli enerjiye sahipse p-n bağlantısındaki yarı iletken malzemede bulunan elektronları uyarır. Fotonun enerjisi yarı iletken malzemenin enerji bandı boşluğunu aşacak düzeyde ise bir elektron valans bandından iletim bandına sıçar ve burada serbest hale gelir. Bu sıçrama sonucunda bir elektron deliği çifti oluşur. Serbest kalan elektron n-tipi yarı iletken doğru hareket ederken oluşan boşluk ise p-tipi yarı iletken yönünde ilerler. Aralarındaki bu yük ayrımı hücre içerisinde bir elektrik alan yaratır. İşte bu alan sayesinde dış devre üzerinden bir akım oluşur. Güneş ışığı sürdükçe bu akım da devam eder. Hücrenin terminallerine bağlanan yük bu akımı kullanarak enerji üretimini sağlar (Al-Ezzi ve Ansari, 2022). Bu süreç üç temel adımdan oluşur: (1) fotonun soğurulması, (2) elektron-delik çiftinin oluşması ve ayrılması, (3) ayrılan yük taşıyıcılarının dış devre üzerinden hareket etmesiyle elektrik akımının oluşması şeklindedir. Her FV hücre, yaklaşık 0.5 V gibi düşük bir gerilim üretebildiğinden Şekil 3’te gösterildiği gibi hücreler seri ve paralel bağlanarak güneş panelini oluşturulur. Bu

sayede daha yüksek gerilim ve akım değerlerine ulaşılır. Uygulama alanına göre modül boyutu ve bağlama şekli değişkenlik gösterebilir. N-tipi katman daha ince yapılıdır. Bu sayede uyarılan elektronlar kısa sürede dış devreye ulaşarak yeniden birleşmeden önce enerji üretimini gerçekleştirebilir.



Şekil 3. FV hücrelerin seri ve paralel bağlanarak FV panellerin oluşumu (Uyarlandı: URL-7, 2019).

Modern FV teknolojilerde Şekil 4’te gösterildiği gibi monokristal, polikristal ve ince film gibi farklı FV hücre türleri geliştirilmiştir. Her biri farklı verimlilik, maliyet ve yapısal özellikler sunar. Monokristal hücreler yüksek verim sunarken polikristal hücreler daha ekonomik çözüm sağlar. İnce film hücreler ise esnek yapılarıyla mobil uygulamalarda avantaj sağlar (Marsh, 2023).

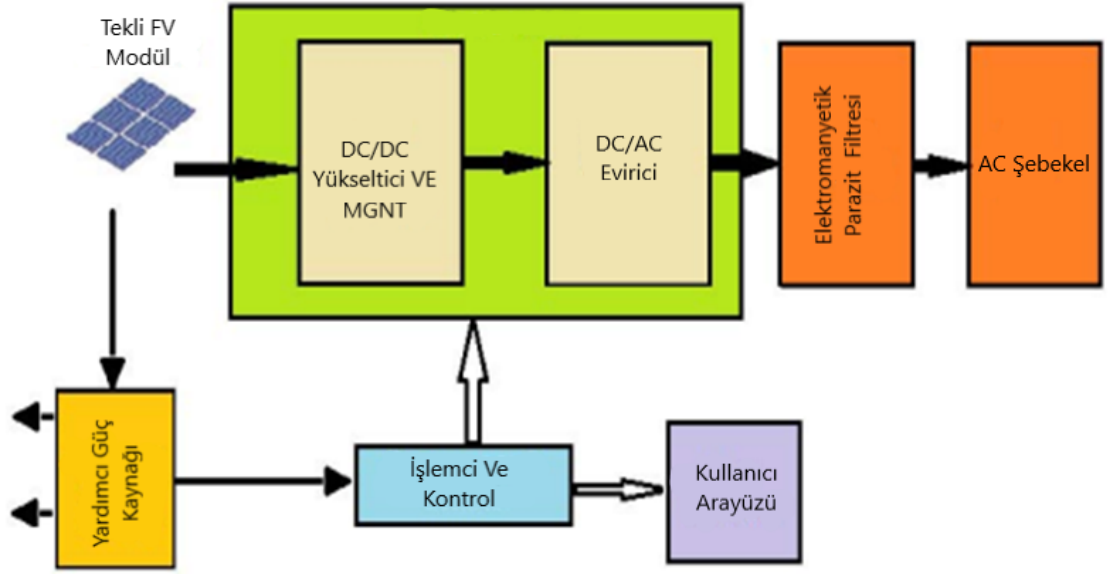


Şekil 4. Farklı FV hücreli paneller (URL-8, 2025).

3.3. Evirici Tipleri ve Elektriksel Dönüşüm Mekanizması

FV sistemlerde, güneş panelleri tarafından üretilen doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi, şebeke uyumlu ve kullanılabilir enerji üretimi açısından eviriciler

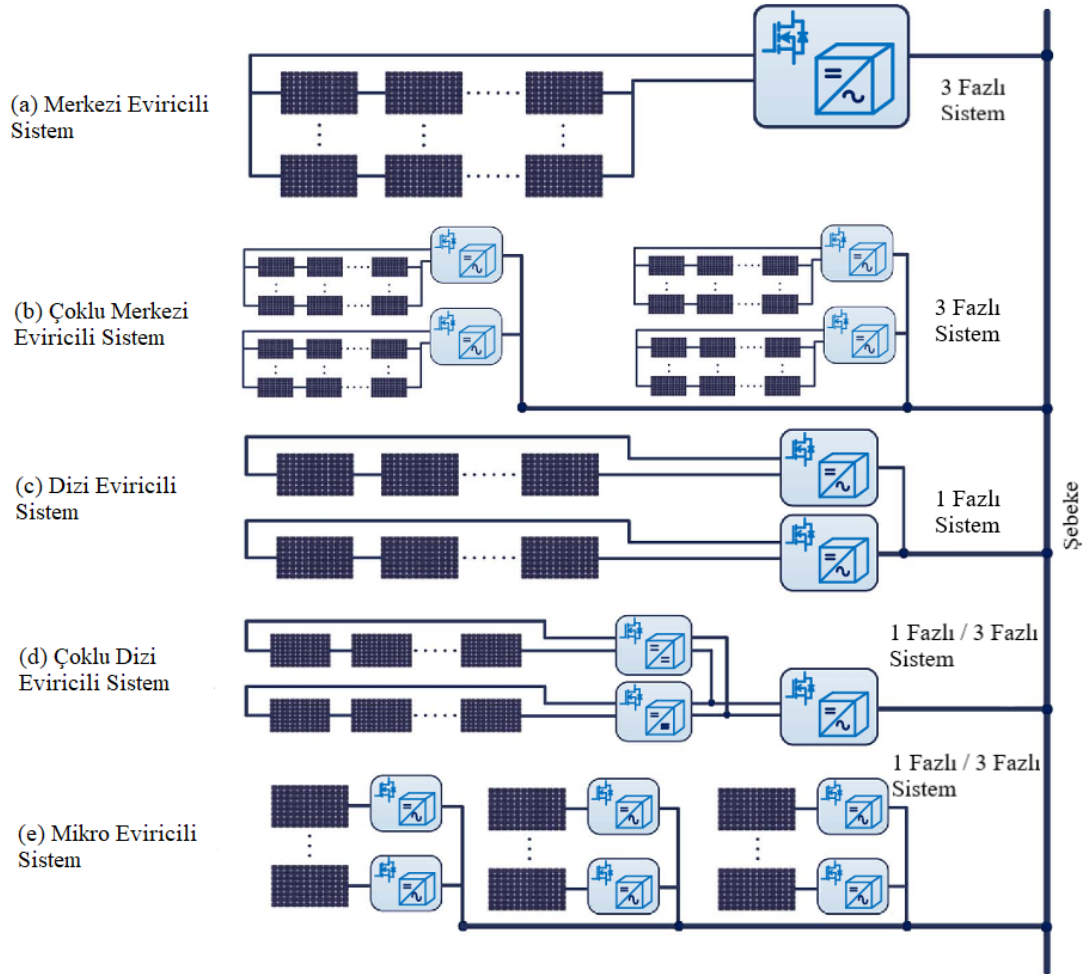
aracılığıyla gerçekleştirilir. Eviriciler yalnızca bir enerji dönüştürücüsü değil, aynı zamanda sistemin verimliliğini, güvenilirliğini ve enerji kalitesini belirleyen kritik bileşenlerdir. Günümüzde kullanılan başlıca evirici türleri; merkezi evirici, dizi evirici, mikro evirici, optimizier destekli evirici ve hibrit sistemler olarak gruplandırılabilir. Bu eviricilerin her biri, sistem boyutuna, gölgeleme durumuna ve yatırım maliyetine göre farklı avantajlar sunar. Merkezi eviriciler genellikle büyük ölçekli GES'lerde tercih edilir. Onlarca panel dizisini tek bir merkezde toplayarak yüksek güçte AC üretimi sağlarlar. Avantajları arasında düşük birim maliyet ve kompakt kurulum alanı bulunur. Arıza durumunda tüm sistemin devre dışı kalması gibi önemli bir dezavantajı vardır. Dizi eviriciler her bir panel dizisi için ayrı evirici kullanılarak sistem modüler şekilde kurulur. Bu yapı sayesinde arızalı bir panel dizisi diğerlerini etkilemez. Bakım ve izleme işlemleri daha kolay gerçekleştirilir. Bu nedenle çatı üstü uygulamalar ve orta ölçekli projelerde yaygın olarak tercih edilirler. Mikro eviriciler her bir güneş paneline özel olarak bağlanan küçük eviricilerdir. En büyük avantajları panel bazlı performans takibi sağlamasıdır. Mikro evirici sistemleri enerji dönüşümünü bireysel panel izleme ve kullanıcı etkileşimini de mümkün kılan daha gelişmiş yapılar barındırmaktadır. Şekil 5'te mikro evirici tabanlı tipik bir FV sistemin arayüz yapısı gösterilmektedir. Bu sistemde her bir panelin ürettiği doğru akım önce bir DC/DC dönüştürücü aracılığıyla gerilim seviyesinin yükseltilmesi ve MGNT işlemlerine tabi tutulur. Ardından elde edilen enerji DC/AC dönüştürücü birimi ile alternatif akıma çevrilerek şebekeye aktarılır. Sistem ayrıca kullanıcı arayüzü ve kontrol işlemcisi gibi birimlerle donatılmıştır. Bu sayede enerji yönetimi sistem izleme ve performans takibi gibi işlevler gerçekleştirilerek akıllı enerji yönetimi sağlanmaktadır. Mikro evirici mimarisi özellikle bireysel uygulamalar ve gölgeleme etkilerinin yoğun olduğu bölgelerde tercih edilmekte, her panelin bağımsız çalışabilmesi sayesinde panel bazlı izleme ve performans optimizasyonu mümkün hâle gelmektedir. Bu yapı sistem genelinde verimliliği artırmakta ve enerji kayıplarını minimuma indirmektedir.



Şekil 5. Mikro evirici tabanlı akıllı FV sistem arayüzü (Shrestha ve Shrestha, 2014).

Kısmi gölgelenmelerin sık yaşandığı bölgelerde sistem verimliliğini ciddi ölçüde artırır. Sistem maliyetini yükseltmeleri nedeniyle daha çok konut ölçekli sistemlerde tercih edilirler (Hasan vd., 2017). Optimizer destekli eviriciler mikro eviricilerin panel bazlı izleme avantajını dizi yapısıyla birleştiren hibrit sistemlerdir. Her panelin çıkışında yer alan optimizeler bireysel performans kontrolünü sağlar ve enerji kaybını en aza indirir. Özellikle gölgelenme etkilerinin yoğun olduğu ya da modüller arasında verim farklarının bulunduğu sistemlerde kullanıldığında mikro evirici mimarisi sistemin genel verimliliğini artırmaktadır (URL-9, 2023). Hibrit eviriciler şebekeye bağlı ve bağımsız sistemleri birleştiren çok işlevli yapıları sayesinde aynı anda hem batarya şarjı hem de AC çıkışı sağlar. Güneş ışığının yetersiz olduğu durumlarda batarya desteğiyle kesintisiz enerji temini sunar. Bu evirici türü, enerji bağımsızlığı hedefleyen sistemlerde ve ada tipi uygulamalarda ön plana çıkar. Modern eviriciler, MGNT algoritmalarıyla panel gerilimlerini sürekli optimize eder ve her an en verimli enerji çıkışı sağlanmaya çalışılır. MGNT'nin performansı ise çevresel değişkenlerin hızlı değiştiği alanlarda daha kritik hale gelir. Evirici verimliliği, sıcaklık ve ışıınım seviyeleri gibi çevresel etkenlere bağlı olarak dalgalanabilir. Güneş ışıınının bileşenleri evirici performansını doğrudan etkilemektedir. Güneşten gelen ışıınının bir kısmı atmosferde saçılmakta, bir kısmı ise yüzeyden yansımaktadır. Panel üzerine doğrudan düşen ışıınım atmosferden saçılarak gelen ışıınım ve yüzeyden yansıyan (albedo) ışıınımlar, toplam ışıınının ana bileşenlerini oluşturur. Bu bileşenlerin yoğunluğu panelin üreteceği DC gücü ve dolayısıyla eviriciye aktarılan enerjinin miktarını belirler.

Şekil 6’da merkezi, dizi ve mikro gibi farklı evirici türlerinin her birinin kullanım amacı, dizi yapıları, dizi bağlantı şekilleri ile şebekeye bağlantı şekilleri örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 6. Şebekeye bağlı FV teknolojileri. a) Merkezi evirici, b) Çoklu merkezi evirici, c) Dizi evirici, d) Çoklu dizi evirici, e) Mikro evirici. (Hasan, R. vd., 2017).

3.4. Performans Oranı, Verim ve Kayıp Analizi

FV sistemlerin saha performansını değerlendirmek amacıyla çeşitli metrikler kullanılmaktadır. Bu değerlendirme için en yaygın kullanılan ve anlamlı parametre performans oranı (PO, PR)’dır. PO sistemin gerçek üretim kapasitesinin, teorik maksimum üretim kapasitesine oranını ifade eder. Matematiksel olarak PO Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanır.

$$PO = \frac{E_{DC}}{GHI \times \eta_{module} \times A} \quad (2)$$

Burada:

- PO : Performans oranı (%)
- E_{DC} : Gerçek üretim (kWh),
- GHI : Yatay yüzeye gelen toplam güneş ışıması (kWh/m²),
- η_{module} : Modülün üretici tarafından belirtilen verim değeri,
- A : Panel yüzey alanıdır (m²).

Enerji sistemlerinde yapılan saha analizlerinde ortalama PO değerleri yıllık bazda %78–%85 arasında görülmektedir (U.S. Department of Energy [DOE], 2022). %100’e ulaşmak teoride mümkündür ancak pratikte çevresel, elektriksel ve yapısal kayıplar nedeniyle bu mümkün olmaz. Verim ise sistemin girişte aldığı güneş enerjisinin ne kadarını elektriğe çevirebildiğini gösterir. Dış ortam verimliliği (η) Eşitlik 3 ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{E_{DC}}{A \times GHI} \quad (3)$$

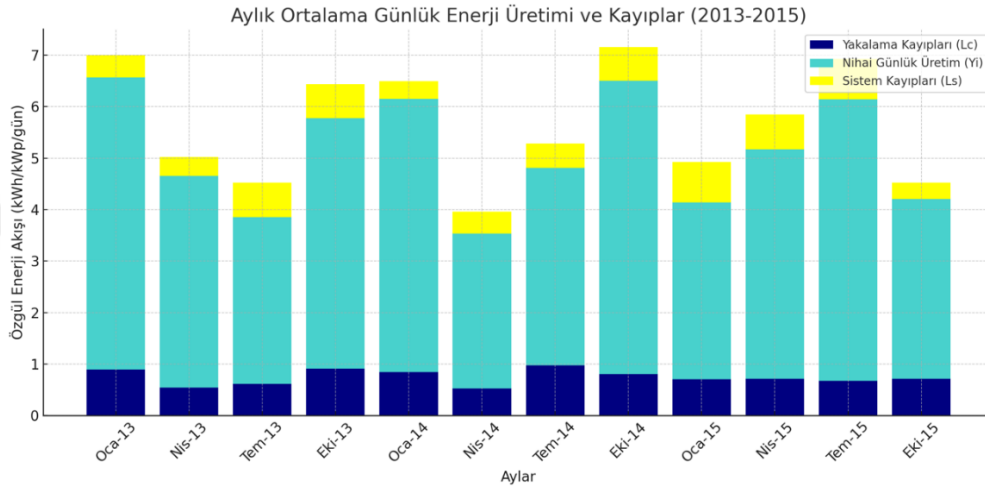
Burada:

- η : Verim (%)
- E_{DC} : Gerçek üretim (kWh),
- GHI : Yatay yüzeye gelen toplam güneş ışımasını (kWh/m²),
- A : Panel yüzey alanıdır (m²).

Verim FV modül teknolojisine, sıcaklığa, radyasyon yoğunluğuna ve panelin yüzey özelliklerine bağlı olarak değişir (Makrides vd., 2012). Kayıp analizi PO ’yu etkileyen tüm düşürücü unsurların incelenmesini kapsar. Bu kayıplar başlıca şu kategorilere ayrılır:

- **Optik Kayıplar:** Panel yüzeyine gelen ışığın tamamı hücreye ulaşmaz; yansımalar ve kirlenme gibi nedenlerle kayıplar oluşur.
- **Termal Kayıplar:** Hücre sıcaklığındaki artış verimi doğrudan düşürür. Yüksek sıcaklıkta elektron hareketliliği artar ama gerilim düşer, bu da güç kaybına neden olur.
- **Elektriksel Kayıplar:** DC kablolarda direnç, evirici verimsizlikleri ve AC kablolarda harmonik kayıplar verim düşüşü yaratır.
- **Uyumsuzluk ve Gölgeleme Kayıpları:** Panel dizileri arasında üretim farkları veya gölgeleme, sistem genel verimliliğini önemli ölçüde düşürebilir.

Şekil 7’de poli-silikon tabanlı bir FV sistem için 2013–2015 yılları arasında aylık ortalama günlük enerji üretimi, yakalama kayıpları ve sistem kayıpları ayrı ayrı gösterilmiştir. PO analizleri yapılırken bu üç bileşenin birlikte değerlendirilmesi sistemin gerçek saha koşullarındaki başarımını anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle Türkiye gibi yaz aylarında sıcaklıkların yükseldiği bölgelerde PO üzerindeki termal etkiler daha da belirgindir. İyi bir sistem tasarımı ve bakım uygulaması sayesinde PO %85’in üzerine çıkarılabilir.



Şekil 7. 2013–2015 yılları arasında poli-silikon tabanlı bir FV sistem için aylık ortalama günlük enerji üretimi, yakalama kayıpları ve sistem kayıpları. (Uyarlandı: Wang vd., 2017).

3.5. Santral Tasarımı ve Üretim Tahmin Süreci

Bir GES tasarımı yalnızca panel yerleşiminden ibaret değildir. Meteorolojik veri analizi, sistem optimizasyonu, gölgelenme etkilerinin değerlendirilmesi ve doğru evirici seçiminden YGDS değerine kadar pek çok parametreyi içerir. Bu nedenle GES tasarımı teknik bir planlamadan çok daha fazlasıdır. Aynı zamanda çok boyutlu bir mühendislik analizidir (Arca ve Çıtıroğlu, 2022). Tasarım süreci önce konum seçimi ve güneş ışınımı analizleri ile başlar. Mardin gibi yüksek güneşlenme süresine sahip bölgelerde yapılan yatırımlar yıllık ortalama 1800 kWh/m²’ye ulaşan ışınlama ile ciddi üretim potansiyeli sunar. Güneş radyasyonu, panel eğim açısı ve yönü gibi veriler, panel yerleşimini doğrudan etkiler. Genelde eğim açısının bulunduğu bölgenin enlemiyle örtüşecek şekilde belirlenmesi tavsiye edilir. Ancak özel mikroiklim koşulları dikkate alındığında bu açıda optimizasyon gerekebilir. Bu bakımdan tasarım ve üretim tahmini için kullanılan simülasyon yazılımları devreye girer. Türkiye’de en sık kullanılan programlardan PVSOL üç boyutlu çevresel modelleme, gölge analizleri, modül konfigürasyonu, evirici

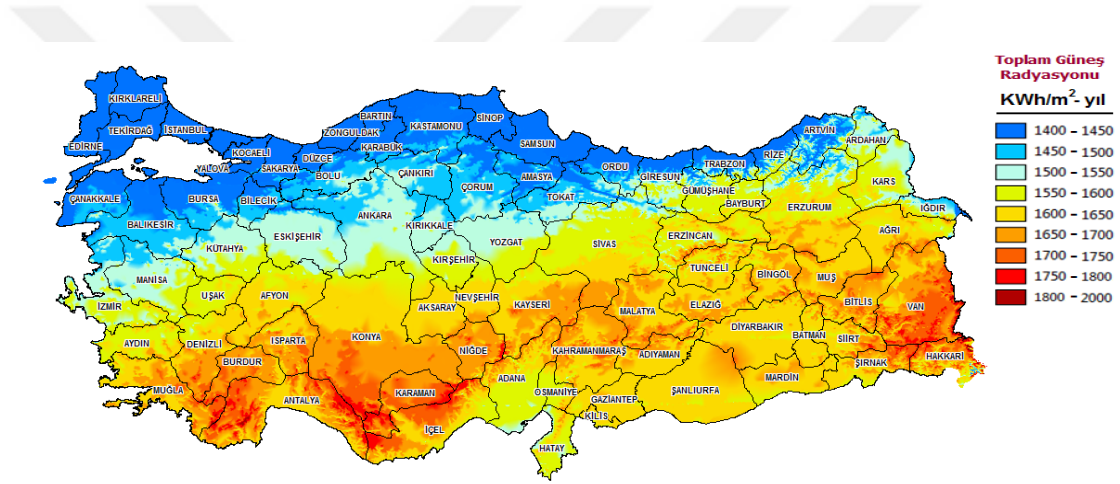
bağlantıları ve aylık-yıllık üretim tahminleri sunabilmektedir (Dirlik vd., 2023). PVSOL aynı zamanda farklı evirici teknolojilerini (örneğin dizi ve merkezi evirici) bağımsız olarak simüle etme kapasitesine sahiptir.

Yazılımda kullanılan meteorolojik veri kaynakları (Meteonorm, DWD vb.) yardımıyla simülasyonlar belirli bir konum için günlük saatlik ışıınım ve sıcaklık değerlerine göre çalıştırılır. Bu veriler ile enerji üretimi, PO ve sistem verimliliği gibi değerler elde edilir. Simülasyon sonuçları, santralden elde edilecek ortalama üretim değerini öngörerek yatırım kararlarını doğrudan etkiler (Kaleshwarwar ve Bahadure, 2023). PVSOL'un güvenilirliğini değerlendirmek için yapılan saha bazlı karşılaştırmalarda, örneğin Konya'da kurulu bir 12 MWp santral ile yapılan analizde yazılımın yıllık bazda %91'e yakın doğruluk oranına ulaştığı görülmüştür. Yine de aylık bazda sapmaların -14% ile +3.6% arasında değiştiği tespit edilmiştir. Üretim tahmini sürecinde dikkate alınması gereken diğer bir husus da sistem kayıplarıdır. Bunlar; kablo direnci, evirici verimsizliği, sıcaklık kaynaklı kayıplar ve panel uyumsuzluklarıdır. PVSOL yazılımı bu kayıpları ayrı ayrı analiz edebilme yetisine sahiptir ve toplam sistem verimini de bu kayıplara göre düzeltir (Tozzi ve Jo, 2017). Bir GES'in üretim tahmini yalnızca bir simülasyon çıktısı değil, çok değişkenli ve yüksek doğruluk gerektiren teknik bir süreçtir. Doğru yazılımın seçilmesi, gerçek verilerle kalibrasyon yapılması ve iklimsel faktörlerin hesaba katılması bu sürecin en kritik yapı taşlarıdır. Simülasyon yazılımları, bu sürecin merkezinde yer alarak hem yatırım öncesi kararları hem de işletme sürecindeki optimizasyonları desteklemektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

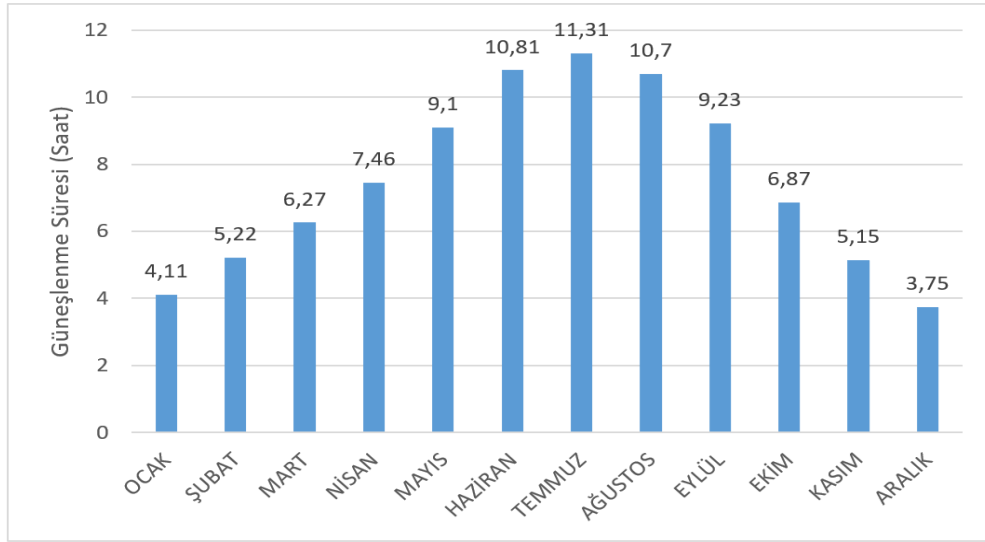
4.1. Çalışma Alanı ve Güneş Enerjisi Santralleri Hakkında Genel Bilgi

Şekil 8’de gösterildiği gibi Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyel haritası, farklı bölgelerin güneş enerjisi üretimine uygunluğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle Güneydoğu Anadolu ve Orta Anadolu bölgeleri yüksek güneş ışıınımı seviyeleri ve uzun güneşlenme süreleri ile dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde yıllık ortalama 1.700–1.800 kWh/m² arasında ışıınım potansiyeli vardır (IEA, 2023). Buna karşılık Karadeniz ve Marmara bölgelerinde güneşlenme süreleri daha kısa olup bu durum güneş enerjisi üretim potansiyelini sınırlamaktadır (IRENA, 2020).



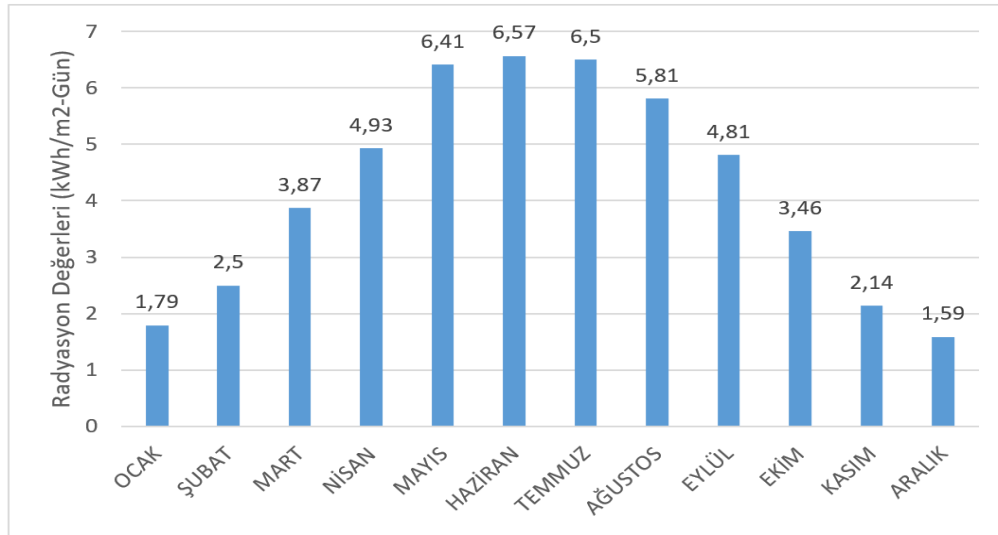
Şekil 8. Türkiye'nin güneşlenme potansiyeli haritası (URL-10, 2025).

Türkiye’nin güneş enerjisi kaynaklarının değerlendirilmesi ve yenilenebilir enerji yatırımlarının bölgesel dağılımının optimize edilmesi açısından güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA) önemli bir rehber niteliğindedir. Özellikle güneş ışıınımının yüksek olduğu bölgelerde yatırım yapılması sürdürülebilir enerji dönüşümüne önemli katkılar sağlama potansiyeli oluşturmaktadır. Şekil 9’da Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının sunduğu GEPA verilerine göre aylık güneşlenme saatleri güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde kritik bir gösterge olarak kabul edilir.



Şekil 9. Türkiye güneşlenme süreleri (saat), (URL-10, 2025).

Şekil 10’da Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yayımladığı “Türkiye Global Radyasyon Değerleri” ne göre, özellikle yaz aylarında güneşlenme saatlerinde belirgin bir artış gözlemlenir. Bu dönemde günlerin uzun olması atmosferdeki bulut örtüsünün azlığı ve güneşin yüksek açılarla doğrudan gelmesi FV sistemler için maksimum enerji üretim potansiyelini ortaya çıkarmaktadır. Öte yandan, kış aylarında artan bulutluluk ve kısa gün süresi nedeniyle güneşlenme süresi düşmektedir.

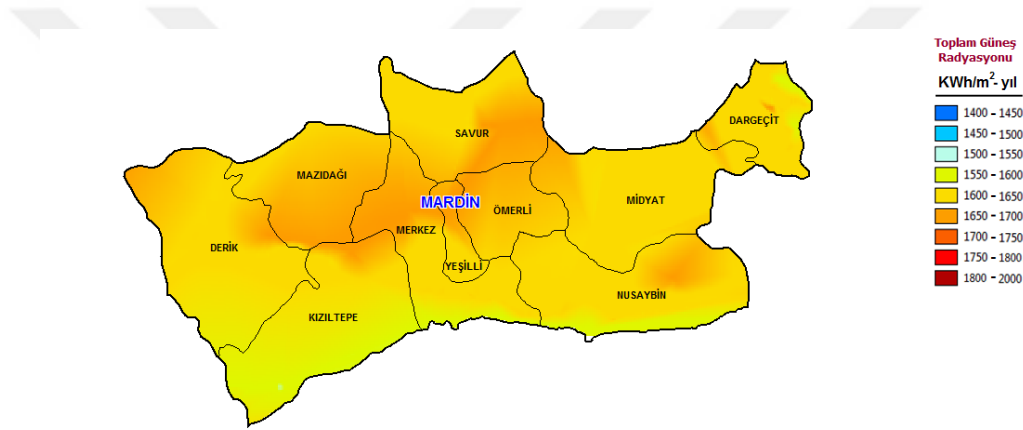


Şekil 10. Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün), (URL-10, 2025).

Mevsimsel farklılıklar enerji üretiminde dalgalanmalara neden olurken enerji depolama sistemlerinin ve destekleyici teknolojilerin önemini de artırmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, t.y.). Bu bağlamda değerlendirildiğinde Mardin ili coğrafi konumu ve iklimsel avantajları ile Türkiye’nin güneş enerjisi açısından en yüksek potansiyele sahip illerinden biridir. Türkiye’nin güneydoğusunda yer alan ve Suriye ile

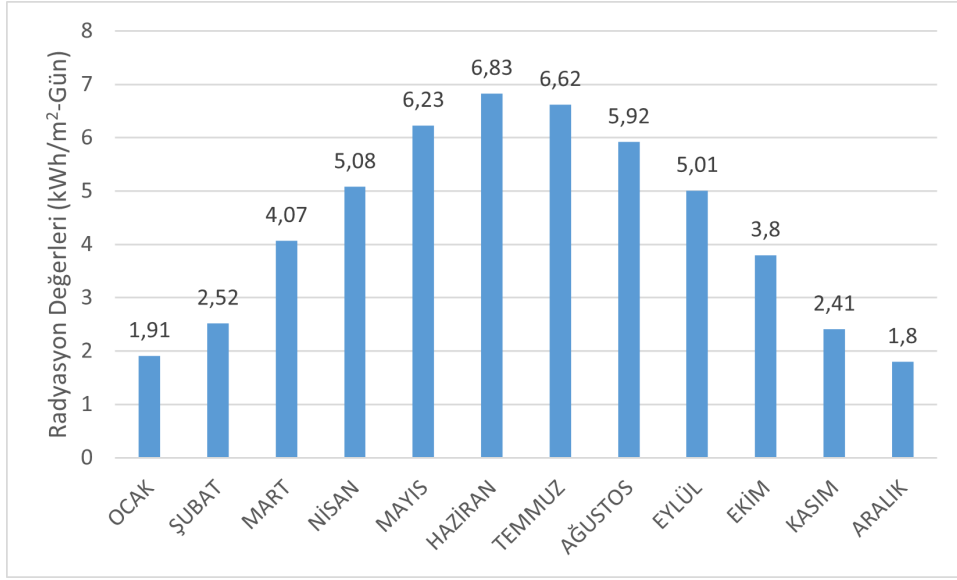
sınırı bulunan Mardin, yaklaşık 8784 km² yüzölçümüne sahiptir. Arazi yapısının %56'sı düşük eğimli, güneye bakan alanların oranı ise %41'in üzerindedir. Bu özellikler GES kurulumu için oldukça uygun zemin koşulları sunmaktadır. İlde yıllık ortalama sıcaklık 16.1 °C, güneşlenme süresi ise 8.1 saat/gün seviyesindedir.

Şekil 11'de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayınladığı haritada da görüldüğü gibi yıllık toplam ışıınım miktarı yaklaşık 1588.66 kWh/m²'dir. Mardin'de yıllık ortalama 3000 saatlik güneşlenme süresi ve 1.800 kWh/m²'lik güneş enerjisi radyasyonu bölgeyi GES yatırımları açısından cazip kılmaktadır. Coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleriyle yapılan analizler özellikle Kızıltepe ve Artuklu ilçelerinde büyük ölçekli GES kurulumları için uygun alanların bulunduğunu ortaya koymuştur (Tekdamar & Tekdamar, 2024).

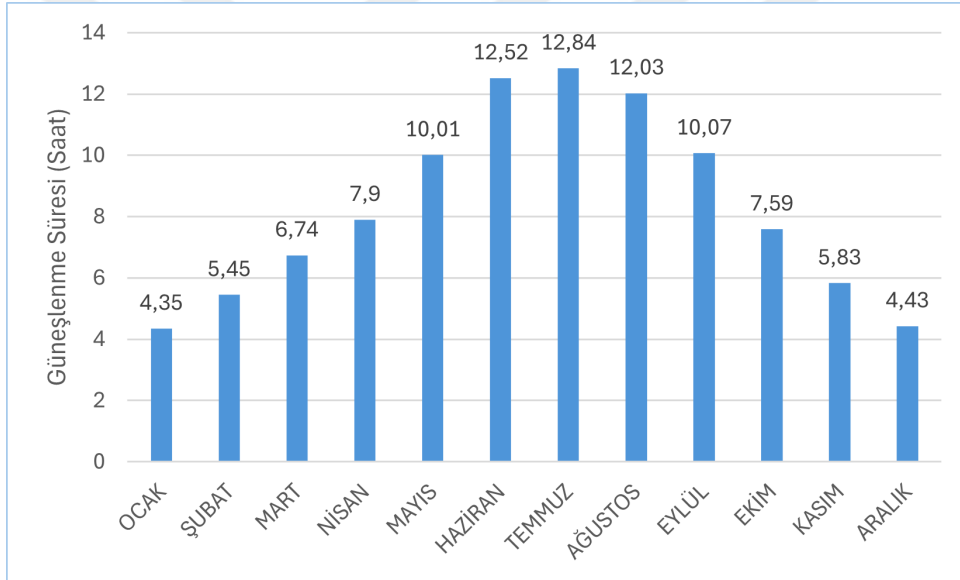


Şekil 11. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Mardin için güneş enerjisi potansiyel haritası [Harita]. (URL-11, 2025).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Mardin için yayınlamış olduğu global radyasyon değerleri Şekil 12'de, güneşlenme süreleri ise Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 12. Mardin global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün), (URL-11, 2025).



Şekil 13. Mardin güneşlenme süreleri (saat), (URL-11, 2025).

GES'lerin kurulacağı alanların seçimi yalnızca yüksek radyasyon değeriyle değil, aynı zamanda sosyal, çevresel ve ekonomik faktörlerle de doğrudan ilişkilidir. Bu kapsamda santral kurulumu için belirlenen uygunluk kriterleri çeşitli başlıklar altında sınıflandırılarak değerlendirilmelidir. Tablo 1'de, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu için belirlenen teknik, sosyo-çevresel ve ekonomik kriterler ile bu kriterlere göre arazilerin uygunluk dereceleri gösterilmektedir. Teknik parametreler arasında güneşlenme süresi, eğim ve bakı gibi doğal koşullar yer alırken sosyo-çevresel kriterler arasında arazi kullanımı, yerleşim alanlarına ve yol ağına uzaklık gibi etmenler bulunmaktadır. Ekonomik açıdan ise trafo merkezine ve enerji iletim hatlarına olan mesafeler yatırım maliyetlerini doğrudan etkileyen başlıca unsurlar arasında yer alır.

Tablo 1. GES kurulumunda kullanılan uygunluk kriterleri ve dereceleri (Tekdamar ve Tekdamar, 2024).

Uygunluk Derecesi						
	Kriter	En Uygun	Uygun	Orta Derecede uygun	Az Uygun	Uygun Değil
	Sıralama	5	4	3	2	1
Teknik	Güneş Radyasyonu (kWh/m ² /gün)	>1800	1850-1650	1650-1550	-	-
	Eğim(derece)	<1	1-2	2-3	3-5	>5
	Bakı	Güney, Düz	Güneydoğu ve Güney batı	Doğu ve Batı	Kuzeydoğu ve Kuzeybatı	Kuzey
Sosyo - Çevresel	Arazi Kullanımı	Çıplak Alanlar, Ortak	Maden Ocağı, Çalılık	Mera Alanları	Yerleşim	Orman, Su, Tarım
	Yerleşim Alanlarına Uzaklık (m)	>5000	3000-5000	3000-2000	2000-1000	<1000
	Yol Ağına Uzaklık (m)	100-1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	>4000
Ekonomik	Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık (m)	<2500	2500-5000	5000-7500	7500-10000	10000 <
	Tırafo Merkezine Uzaklık (m)	<7500	7500-15000	15000-22500	22500-30000	>30000

Bu kriterlerin detaylandırıldığı Tablo 1 saha seçimi çalışmalarında kullanılan çok kriterli analiz yöntemlerine temel teşkil etmektedir. Bu kriterler ışığında çalışma alanı olan Mardin ilinde en uygun bölgelerin belirlenmesinde çok kriterli analiz yapılması gerekmiştir. Mardin ili özelinde yapılan CBS tabanlı çok kriterli analizlere göre, çalışma alanının %70'e yakın kısmı GES kurulumu için “uygun” veya “en uygun” kategorisinde yer almaktadır. Yer seçimi analizlerinde dikkate alınan kriterler arasında güneş radyasyonu, eğim, bakı yönü, yerleşim yerlerine uzaklık ve trafo hatlarına mesafe gibi teknik ve çevresel faktörler bulunmaktadır (Tekdamar ve Tekdamar, 2024). Güneş enerji potansiyelinin yalnızca coğrafi değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik yönüyle de desteklendiği vurgulanmalıdır. Türkiye genelinde bölgesel kalkınma planlarında Güneydoğu illerinden Mardin, güneş enerjisine dayalı yatırımlar için öncelikli bölgeler arasında yer almaktadır. Güneş enerjisi yatırımları yalnızca enerji arz güvenliğini

artırmakla kalmayıp aynı zamanda yerel kalkınmayı destekleyen çok boyutlu etkiler yaratmaktadır. Bu yatırımlar özellikle kırsal ve gelişmekte olan bölgelerde istihdam olanaklarının artırılması, yerel ekonominin canlandırılması ve altyapı gelişiminin hızlandırılması gibi alanlarda önemli katkılar sağlamaktadır. Güneş enerjisi santrallerinin kurulumu ve işletilmesi süreçleri teknik personel istihdamı, yerel tedarik zincirlerinin etkinleştirilmesi ve arazi kullanımının planlı bir şekilde yönetilmesi gibi çeşitli sosyal ve ekonomik dinamikleri beraberinde getirmektedir. Ayrıca bu yatırımlar yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılması yoluyla karbon salımının azaltılmasına da katkıda bulunarak sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile uyumlu bir enerji dönüşüm sürecine hizmet etmektedir. Bu çerçevede güneş enerjisine dayalı projeler yalnızca enerji üretim kapasitesinin artırılması açısından değil aynı zamanda bölgesel kalkınma politikalarının desteklenmesi açısından da stratejik önem taşımaktadır.

4.2. Kullanılan Veri Setleri ve Ölçüm Parametreleri

Bu çalışmada kullanılan veri setleri Mardin ilinde kurulu bulunan iki farklı GES'den elde edilen gerçek zamanlı üretim verilerine dayanmaktadır. Veriler doğrudan sistemdeki eviricilerin kullanıcı ara yüzleri üzerinden temin edilmiş olup, 2024 yılına ait aylık bazda enerji üretim bilgilerini içermektedir. Her iki sistemde de iki adet 50 kW gücünde evirici kullanılmış, sistemlerin her biri toplamda 100 kW kurulu güce sahiptir. Bu kurulumlar referans alınarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Söz konusu sistemlerin farklı donanım yapılarına sahip olması enerji üretim davranışlarının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak tanımıştır. Sahaya ilişkin yapılan incelemelerde gölgeleme etkisinin minimum düzeyde olduğu belirlenmiş ve analiz sürecinde bu etki ihmal edilebilir kabul edilmiştir. Ölçüm verilerinin detaylı incelenmesi sonucunda her bir eviricinin üretim performansı gözlemlenmiş; farklı evirici teknolojilerinin sistem genel performansına olan etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen saha verileri ilerleyen bölümlerde yer alan simülasyon çıktıları ile karşılaştırılmış ve performans farklılıkları yorumlanmıştır.

Tablo 2'de belirtilen ve gerçek sistemlerde kullanılan FV paneller ile eviricilere ait katalog verileri simülasyon yazılımına entegre edilmiştir. Ayrıca simülasyon aşamasında Meteonorm veri tabanından temin edilen yıllık GHI ve ortalama sıcaklık gibi meteorolojik veriler ile birlikte fiziksel parametreler yerine deneysel verilerden elde edilen ilişkilerin kullanıldığı Hoffmann (2006) tarafından geliştirilen ampirik model kullanılmıştır. Bu yaklaşım sistem performans analizinin daha güvenilir ve gerçekçi bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamıştır.

Tablo 2. GES’lerde Kullanılan Ekipman listesi

Evirici					
	Marka	Model	Gücü (kW)	Adet	Toplam Güç (kWe)
Merkezi Sistem	KACO New Energy	Blueplanet 50.0 TL3 M	50	2	100
Dizi Sistem	Huawei Technologies	SUN2000-50KTL-M3-380V	50	2	100
FV Panel					
	Marka	Model	Gücü (W)	Adet	Toplam Güç (kWp)
Merkezi Sistem	Alfa Solar	A3S72M	400	288	115.2
Dizi Sistem	Smart Phono Solar	PS450M4H-24/TH	450	272	122.4

4.3 Simülasyon Yöntemi

FV sistem performanslarının karşılaştırılması amacıyla PVSOL simülasyon yazılımı kullanılmıştır. PVSOL kullanıcıya sistem verimliliği, yıllık enerji üretimi, ekonomik geri dönüş süreleri gibi birçok analiz fonksiyonu sunmaktadır (Valentin Software, 2023). Simülasyon süreci FV sistem performans analizinin güvenilirliğini artırmak amacıyla beş temel aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, sistem konfigürasyonları tanımlanmıştır. Bu kapsamda FV panellerin yönelimi, eğim açıları ve dizilim düzenleri gibi fiziksel yerleşim parametreleri simülasyon yazılımına tanıtılmıştır. Bu adım sistemin geometrik yapısının doğru modellenmesini sağlamıştır. İkinci aşamada, meteorolojik verilerin entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda Meteonorm veri tabanından temin edilen yıllık GHI ve ortalama sıcaklık değerleri yazılıma entegre edilerek çevresel koşulların enerji üretimine etkisi dikkate alınmıştır. Üçüncü adımda, sıcaklık etkisinin daha hassas biçimde modellenmesi amacıyla Hoffmann ampirik modeli kullanılmıştır. Bu model çevresel sıcaklık ve ışıınım verilerinden yola çıkarak modül sıcaklığının hücre sıcaklığına olan etkisini simüle etmeye olanak tanımaktadır. Bu sayede sıcaklığın FV panel verimliliği üzerindeki rolü daha gerçekçi bir biçimde değerlendirilmiştir. Dördüncü olarak, yıllık bazda sistemin toplam enerji üretimi hesaplanmıştır. Bu analiz sistem performansının teorik düzeydeki potansiyelini ortaya koymuştur. Son olarak simülasyon çıktıları, gerçek sistemlerden elde edilen ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada, modelin doğruluk düzeyi Ortalama Mutlak Hata (OMH, MAE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH, MAPE) gibi istatistiksel hata ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Bu yöntem tahmin edilen üretim

değerleri ile gerçek ölçümler arasındaki farkların nicel olarak analiz edilmesini sağlamıştır.



5. PVSOL SİMÜLASYONLARI

Simülasyonlara başlamadan önce, her iki santralin kurulum parametreleri ayrıntılı biçimde belirlenmiş ve tanımlanmıştır. Modül tipi, dizi bağlantı yapısı, evirici ve panel konfigürasyonu ile panel eğimi ve yönelimi, PVSOL yazılımı ara yüzüne eksiksiz şekilde girilmiştir. Panel eğimi ve yönü yazılımın 3D görselleştirme aracı aracılığıyla elde edilen gerçek çatı verilerine dayanmaktadır (9° eğim, güney yönü). Her iki sistem için bina yüksekliği 8 metre, çatı malzemesi ise sandviç panel olarak belirlenmiştir. Bu fiziksel yapı özellikleri altında gerçekleştirilen analizlerde, kablo, sıcaklık ve evirici kaynaklı sistem kayıpları bu aşamada dikkate alınmamış; böylece sistemlerin ideal koşullardaki teorik performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Güneşlenme verisi olarak PVSOL yazılımının sunduğu Meteoronorm veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti Mardin iline ait yıllık bazda ışınlam, sıcaklık ve rüzgar hızı gibi meteorolojik parametreleri içermektedir. Evirici ve FV panel verileri üretici kataloglarına dayanarak tanımlanmıştır. Tablo 3 kullanılan panel ve evirici modelleri hakkında teknik bilgileri, Tablo 4 ve Tablo 5 ise panellerin ve eviricilerin ayrıntılı teknik verilerini göstermektedir. Bu bilgiler doğrultusunda sistemlerin aylık ve yıllık enerji üretimleri PVSOL programı ile modelleme yapılmıştır.

Tablo 3. Sistem türüne göre kullanılan FV panel, evirici modelleri ve panel adetleri

Sistem Türü	FV Panel Modeli	Evirici Modeli	Panel Sayısı	Evirici Adedi
Merkezi Evirici	Alfa Solar A3MS72M400	KACO Blueplanet 50 TL3	288	2
Dizi Evirici	Smart Phono Solar PS450M4H-24/TH	Huawei SUN2000- 50KTL-M3	272	2

Tablo 4. FV panel teknik özellikleri

Özellik	Alfa Solar A3MS72M400	Smart Phono Solar PS450M4H-24/TH
Panel Tipi	Monokristal	Monokristal Half-Cut
Maksimum Güç (P_{max}) (W)	400	450
Panel Verimliliği (%)	20.29	20.7
Açık Devre Gerilimi (V_{oc}) (V)	49.17	50.2
Kısa Devre Akımı (I_{sc}) (A)	10.31	10.81
Maksimum Güç Gerilimi (V_{mp}) (V)	41.54	41.6
Maksimum Güç Akımı (I_{mp}) (A)	9.78	9.82
Hücre Sayısı	72	144 (Half-Cut)
Panel Ölçüleri (mm)	1969 × 997 × 35	2094 × 1038 × 35
Ağırlık (kg)	23	23
Sıcaklık Katsayısı (P_{max}) (%/°C)	-0.36	-0.34

Tablo 5. Evirici teknik özellikleri

Özellik	KACO Blueplanet 50 TL3	Huawei SUN2000- 50KTL-M3
Tip	Merkezi Evirici	Dizi Evirici
Maksimum DC Gücü (kW)	50	50
Nominal AC Gücü (kW)	50	50
Başlangıç Voltajı (V)	670	200
Nominal DC Voltaj (V)	600	600
MGN Voltaj Aralığı (V)	580 - 900	200 - 1000
Maksimum Giriş Akımı (A)	90	20
Kısa Devre Akımı (A)	190	30
MGNT Sayısı	1	4
Dizi Sayısı (Bağlantı/MGNT)	1 (S/B/M), 10 (XL)	8
AC Çıkış Gerilimi (V)	220-240 / 380-415 (3/N/PE; 3/PEN)	400 / 480 V_{AC}
AC Frekansı (Hz)	50 / 60 (42 - 68)	50 / 60
AC Nominal Akımı (A)	3 x 69.6 @ 415 V	72.2 @ 400 V_{AC}
Maksimum Akım (A)	3 x 76.5	79.8 @ 400 V_{AC}
Maksimum Verimlilik (%)	98.5	98.6

5.1. Merkezi Evirici İle GES Simülasyonu

Şekil 14'te PVSOL yazılımında merkezi evirici projesine ait tanımlama ekranı yer almaktadır. Bu ekran projenin genel başlık bilgileri, kurulumun yapılacağı yerin adı, proje tasarımcısı, proje adı ve sistemin devreye alınma tarihi, adres gibi temel parametreleri içerir. Bu bilgiler simülasyonun başlangıç ayarlarını oluşturarak sistemin yapısal çerçevesini belirlemektedir.

Proje Verileri

Telâf no.

Proje Tasarımcısı

Devreye Alma

Proje Başlığı

Proje Resmî

Hüsten Detayları

Müşteri numarası

İlgili Kişi

Şirket

Telefon

Faks

E-Posta

Adres

Proje Tanım

Kurulum adresi

Yükle Sil

Daha fazla resim

Seçtiğiniz şebekeyi besleme tarihinin başvuru tarihi, tanımlanmış geçerlilik uymuyor. Lütfen girişlerinizi kontrol ediniz.

Şekil 14. Merkezi eviricili GES için proje başlangıç ekranı

Şekil 15'te sistem türü, iklim ve şebeke parametreleri FV santralının kurulumuna dair temel bilgilerin girildiği arayüz gösterilmiştir. Örneğin; kurulum konumu olarak Mardin'in seçilmesi, meteorolojik veri setlerinin bu bölgeye özgü olmasını sağlar. Burada yer alan proje başlangıç ekranında tasarımının 3D ve sistemin şebekeye bağlı olduğu tanımlanmış konum olarak Artuklu-Mardin seçilmiştir. Ardından, sistem tipi, iklim ve şebeke parametreleri belirlenmiştir. Burada kullanılan Meteoronorm verileriyle yıllık GHI ve ortalama sıcaklık gibi meteorolojik veriler simülasyona dahil edilmiştir.

Sistem Türü, İklim ve Şebeke

Ek türü

Tasarım Türü ☒ 3D Tasarım kullan

İklim verileri

Ülke

Konum

Enlem

Boylam

Saat Dilimi

Zaman dilimi

Kaynak

Küresel ışınlama yıllık toplam

Yıllık Ortalama Sıcaklık

Simülasyon zaman adımı

☐ 1 Saat (sadece hızlı simülasyon)

☒ 1 Dakika (sadece hassas simülasyon)

AC Şebekesi

Giriş Ta...

Gerilim (V~LL)

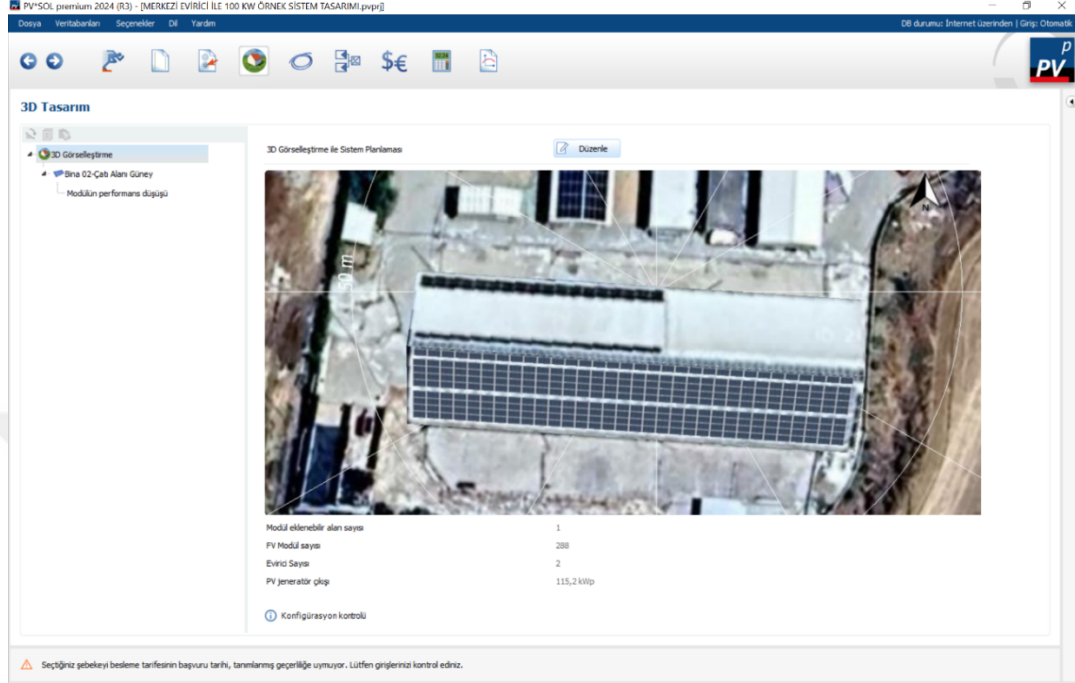
Faz Adet

Ölçü

Maximum Güç Sınırlaması

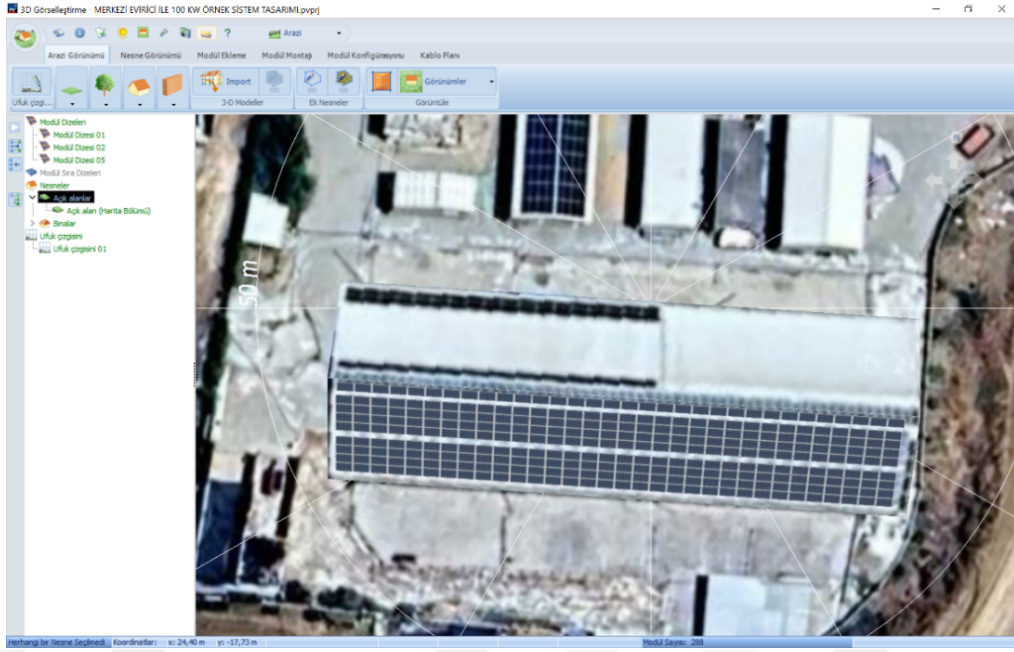
Şekil 15. Sistem türü, iklim ve şebeke tanımlama arayüzü

Şekil 16’da, üç boyutlu görselleştirme ile sistem planlaması ekranından sistemin kurulacağı konum harita üzerinden belirlenir.

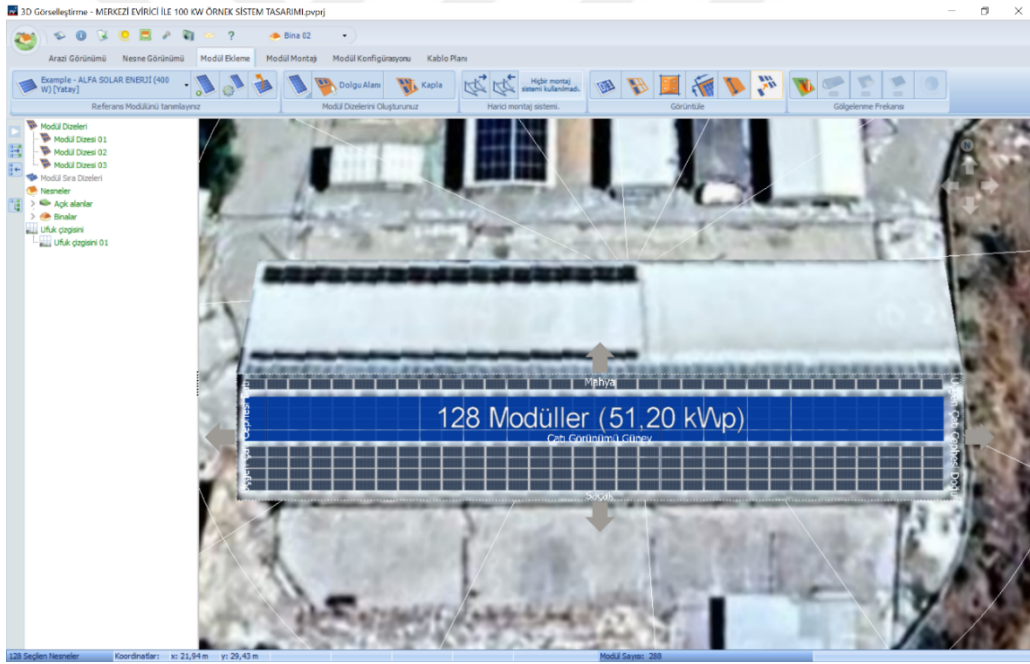


Şekil 16. 3D görselleştirme ile sistem planlaması arayüzü

Şekil 17’de yer alan üç boyutlu görselleştirme arazi görünümü ekranında uydu görüntüsü üzerinden santralin kurulacağı alan seçilmiş ve 3D modelleme yardımıyla yapı öne çıkarılmıştır. Bu aşamada bina yüksekliği, çatı tipi ve eğimi gibi fiziksel parametreler tanımlanarak sistem tasarımı için gerekli altyapı oluşturulmuştur. Şekil 18’de sistemde kullanılacak FV panellere ait katalog verileri tanımlanmış ve çatı yüzeyine uygun şekilde yerleşimleri gerçekleştirilmiştir. Çatı yüzeyleri arasında güney yönüne bakan alan tercih edilerek FV paneller bu yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde sistemin gün boyunca maksimum güneş ışınlamından faydalanması ve dolayısıyla enerji üretiminin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 17. Arazi görünümünü 3D görselleştirme

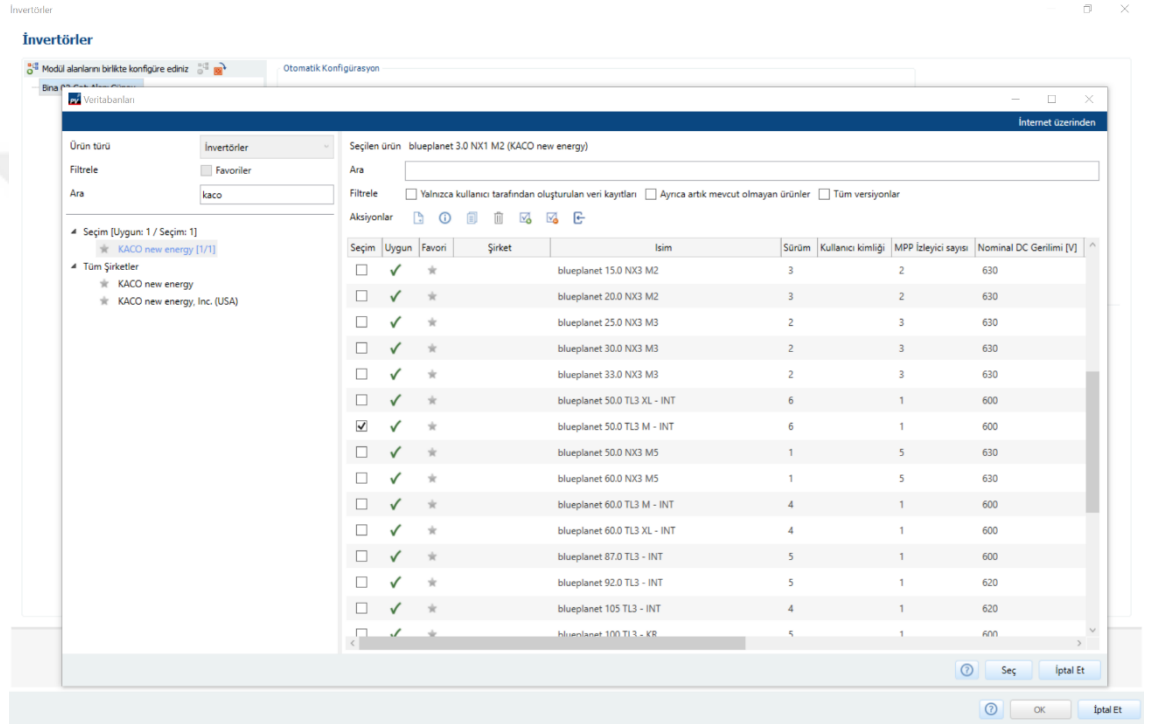


Şekil 18. FV panel ekleme

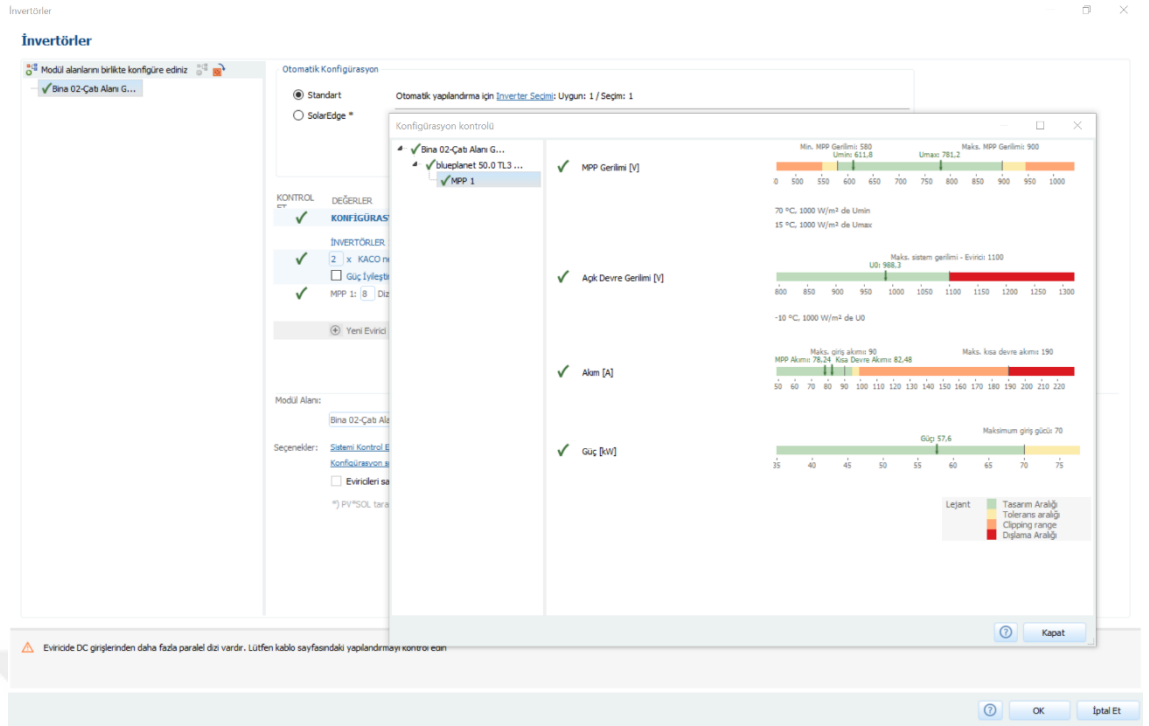
Bu aşamada gölgeleme etkisinin sistem performansı üzerindeki etkisi modellenmiş ve simülasyon süresi boyunca yıllık enerji üretimine yansımaları analiz edilmiştir. Gölgeleme kaynaklı enerji kayıplarının doğru bir şekilde belirlenmesi, sistem performans tahminlerinin gerçekçi biçimde yapılabilmesi ve yatırımın ekonomik fizibilitesinin sağlıklı şekilde değerlendirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Merkezi eviricili sistem tasarımı kapsamında her bir eviricinin kontrol ettiği modül dizileri belirli konfigürasyonlara göre tanımlanmıştır. Şekil 19'da sistem tasarımına

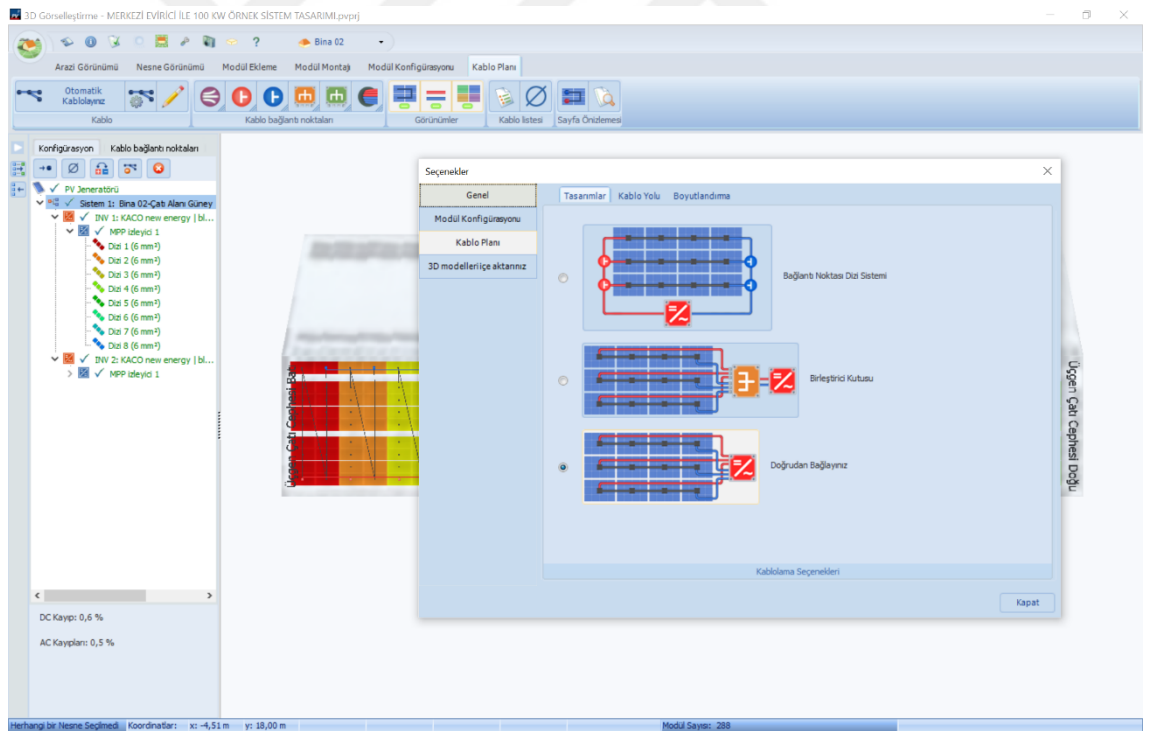
yönelik olarak evirici seçim ekranı görülmektedir. Şekil 20’de kullanılacak dizi sayısı, her bir dizide yer alacak FV panel sayısı ve dizilerin bağlantı türü gibi parametreler belirlenerek modül konfigürasyonu gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde eviricilerin MGNT noktalarına bağlanan dizi sayıları ile bu dizilerin seri ve paralel bağlantı yapıları ayrıntılı biçimde yapılandırılmıştır. Şekil 19’da görüldüğü üzere sistemde iki adet KACO marka evirici kullanılmıştır. Ayrıca DC giriş sınırlarının aşılması gibi simülasyon uyarıları da bu aşamada dikkate alınmıştır. Şekil 21’de ise seçilen evirici, FV panelleri ve dizilere ait AC ve DC kablolama planları detaylandırılarak sistemin elektriksel altyapısı görsel olarak ortaya konulmuştur.



Şekil 19. Evirici seçim ekranı



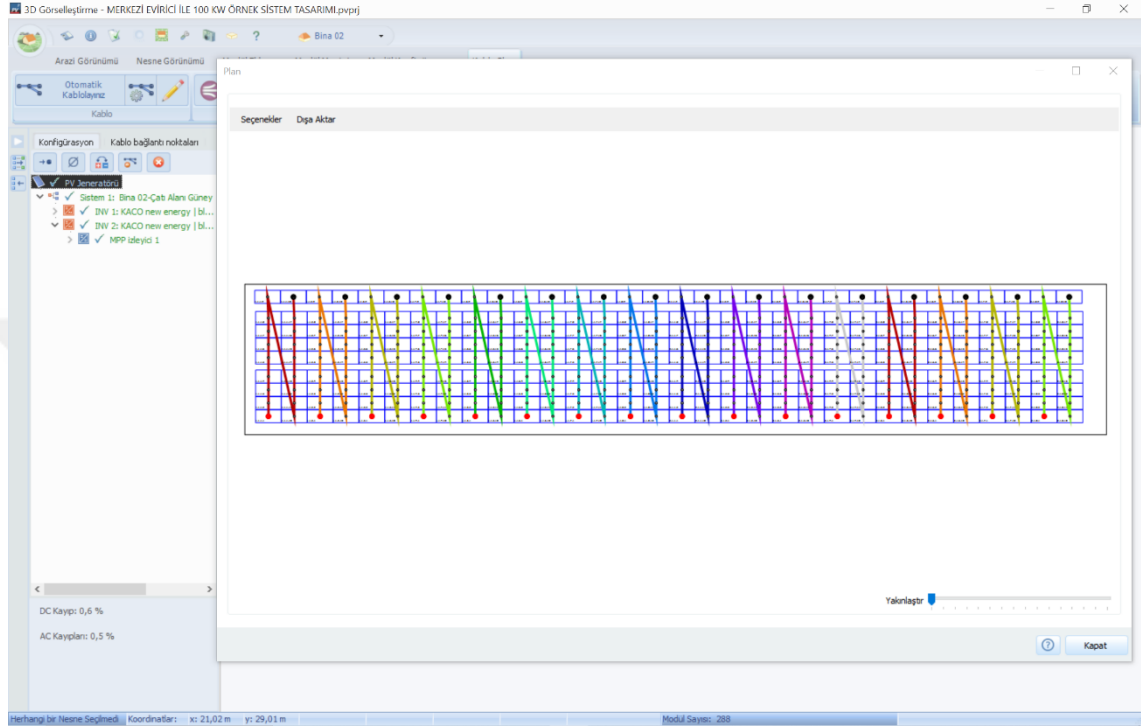
Şekil 20. Evirici konfigürasyon kontrol ekranı



Şekil 21. Kablo tasarım ve boyutlandırma ekranı

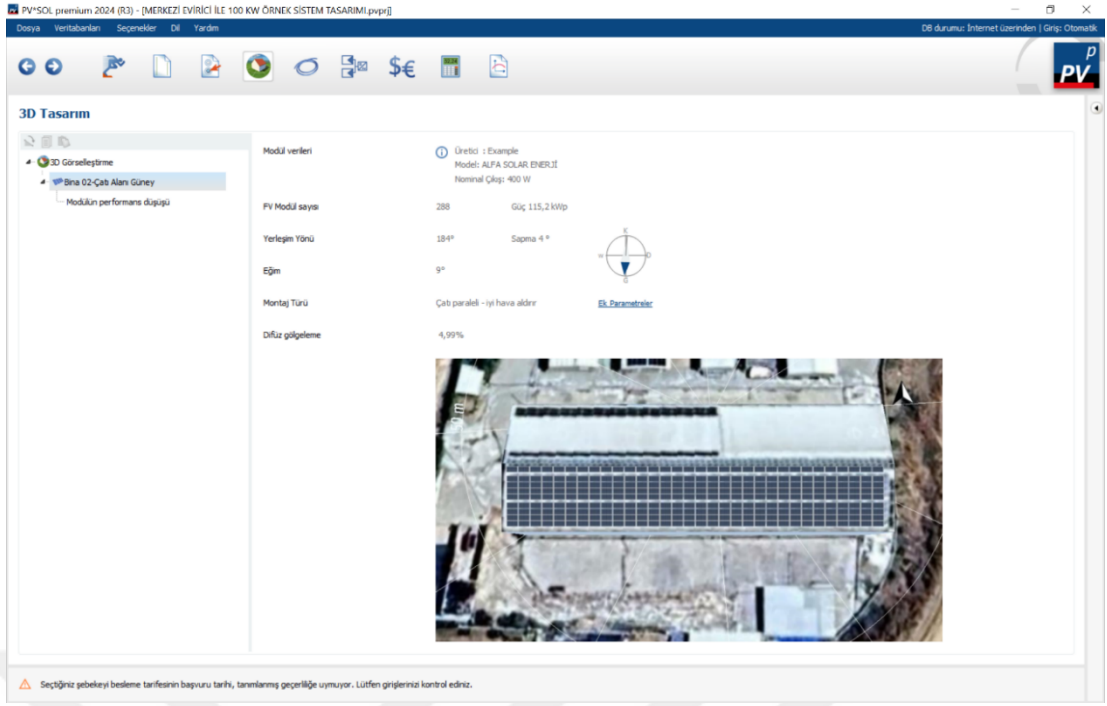
Şekil 22 GES'e ait panel dizilerinin seri bağlantı yapılarını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Her bir renk farklı bir seri bağlantı dizisini temsil etmekte olup, bu diziler ilgili eviricilerin MGNT noktalarına yönlendirilmiştir. Diziler arası bağlantıların bu düzeyde görselleştirilmesi sistemin elektriksel dengesinin analiz edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bağlantı hatlarının optimize edilmesi yalnızca enerji kayıplarının

azaltılmasına katkı sağlamakla kalmaz; aynı zamanda bakım ve işletme süreçlerini de kolaylaştırır. Bu şema aracılığıyla FV modüllerin nasıl organize edildiği, hangi dizilerin aynı eviriciye bağlandığı ve bağlantı yollarının simülasyon ortamında nasıl planlandığı açık biçimde görülebilmektedir. Dolayısıyla sistem tasarımının elektriksel güvenliği ve operasyonel stabilitesi bu aşamada doğrulanmıştır.



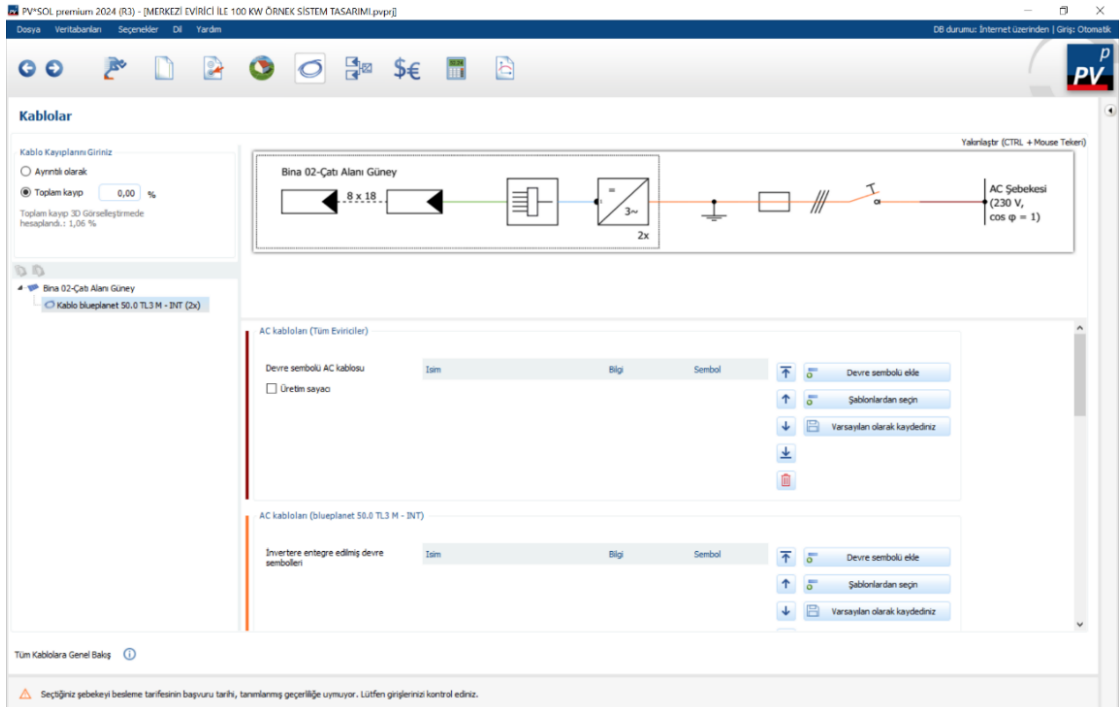
Şekil 22. Panel dizileri arasındaki seri bağlantı şeması

Simülasyon sürecine başlamadan önce sistem performansını etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biri olan gölgeleme etkisi, Şekil 23'te gösterildiği üzere analiz edilmiştir. FV sistemin kurulu olduğu çatı çevresinde yer alan yapılar, bacalar, antenler ve diğer yakın objelerin oluşturduğu fiziksel engeller, sistemin günlük ve mevsimsel performansını doğrudan etkilemektedir. Bu analiz kapsamında, panel yüzeyine düşen gölgeler yüzdesel olarak hesaplanmış ve %4,99 oranında difüz gölgelenme etkisi tespit edilmiştir. Söz konusu oran, sistem performansını önemli ölçüde etkileyecek düzeyde olmamakla birlikte, simülasyon sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği açısından mutlaka dikkate alınması gereken bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Gölgeleme analizi, panel yönelimi ve eğimi gibi diğer sistem parametreleriyle birlikte optimize edilerek genel tasarımın verimliliği artırılmıştır.



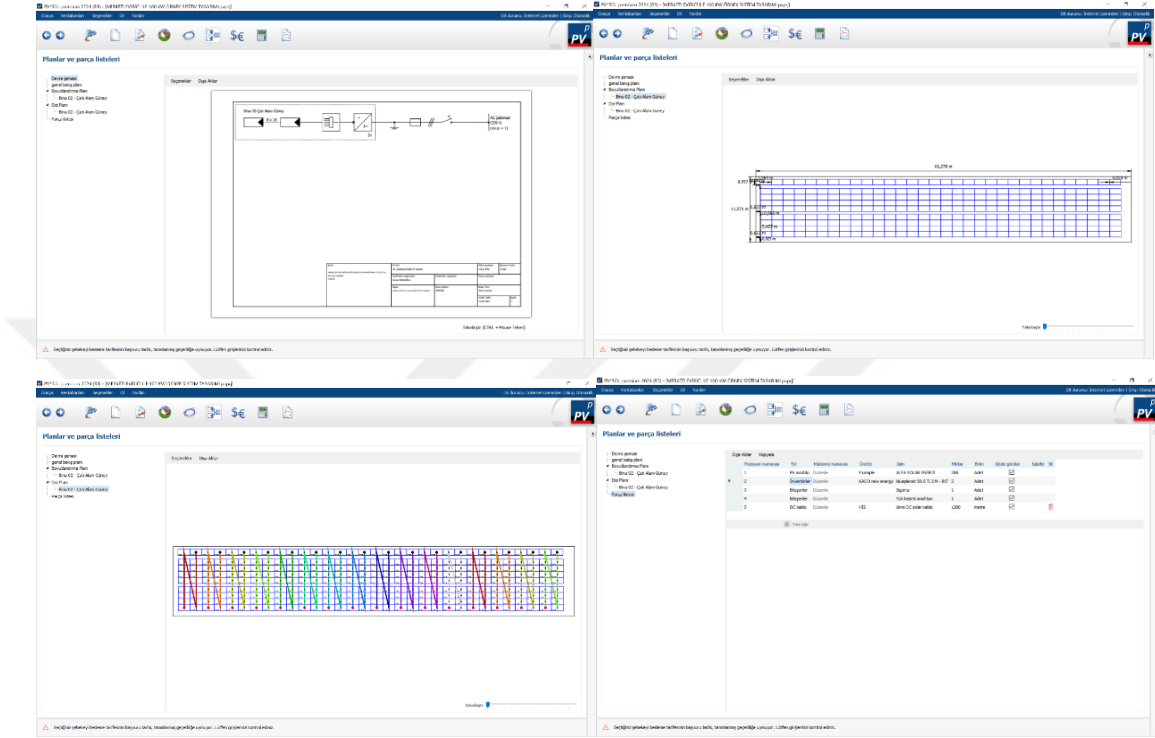
Şekil 23. Gölgeleme analizi

Şekil 24’de FV paneller, evirici, devre kesiciler, sayaç ve benzeri GES bileşenlerinin yer aldığı projelendirme ekranı aracılığıyla, başka bir yazılıma ihtiyaç duyulmaksızın sistemin tek hat şemaları oluşturulmuştur. Bu özellik tasarım sürecinin bütünlük bir yazılım ortamında yürütülmesini sağlayarak hem zaman tasarrufu hem de mühendislik hatalarının azaltılması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.



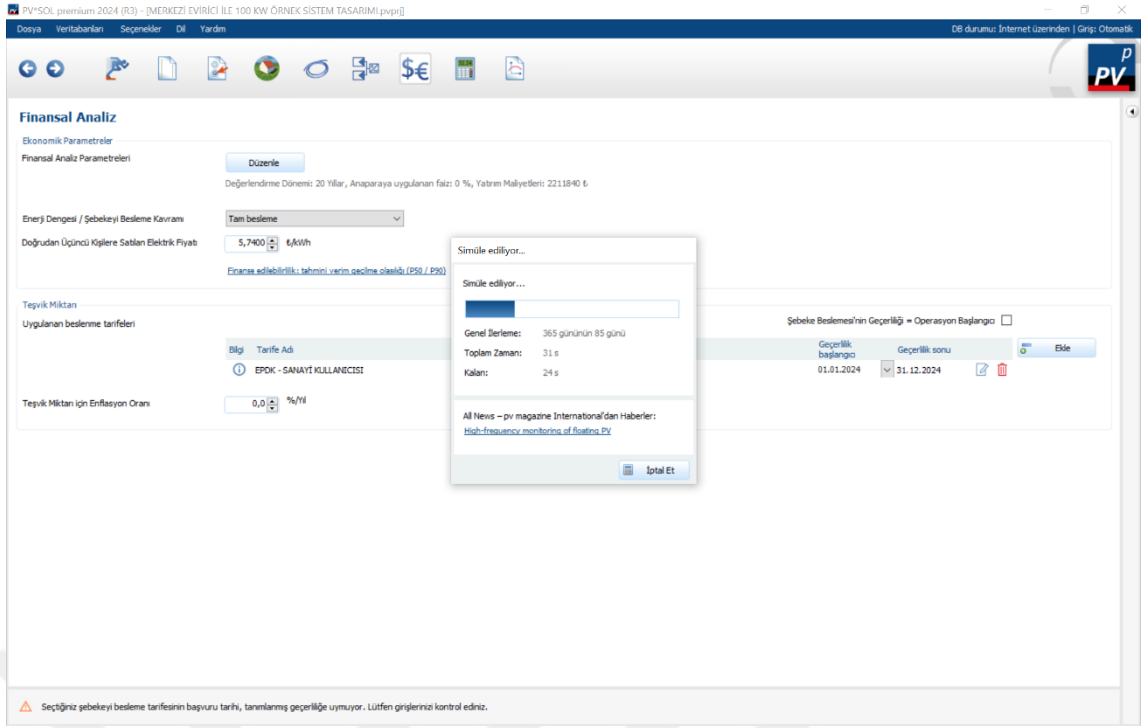
Şekil 24. GES bileşenlerinin projelendirilmesi

Şekil 25'te yer alan "Planlar ve Parça Listesi" modülü finansal analize geçilmeden önce sistem tasarımına ait tüm bileşenlerin son kontrollerinin yapıldığı aşamayı temsil etmektedir. Bu modül aracılığıyla tek hat şeması, çatı alanı, FV panel yerleşimi, kablo planı ve sistemde kullanılacak ekipmanlara ilişkin parça listesi gözden geçirilmiş ve doğrulama işlemleri tamamlanmıştır.



Şekil 25. Planlar ve parça listesi ekranı

Finansal analiz PVSOL yazılımının finansal analiz ekranında gerçekleştirilmiş olup, sistemin ekonomik performansına ilişkin temel parametreler Şekil 26'da verilen ekran ile sunulmuştur. İlk yıl için şebeke beslemesi (modül performans düşüşü dahil) 178.568 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. FV panel çıkışı 115,2 kWp düzeyindedir. Sistem 1 Ocak 2024 tarihinde devreye alınmış olup değerlendirme dönemi 20 yıl olarak belirlenmiştir. Anaparaya uygulanan faiz oranı %0 olarak kabul edilmiştir. Ekonomik parametreler kapsamında İVO %43,08 olarak hesaplanmış biriktirilmiş nakit akışı 15.198.421,67 ₺ seviyesinde gerçekleşmiştir. Amortisman süresi 2,2 yıl olarak belirlenmiş, elektrik üretim maliyeti ise 0,6016 ₺/kWh olarak ortaya çıkmıştır. Yatırım maliyetleri toplam 2.211.840,00 ₺ olup, belirli yatırım giderleri 19.200,00 ₺/kWp olarak hesaplanmıştır. Tek seferlik ödemeler sübvansiyonlar ve yıllık giderler analizde sıfır olarak alınmıştır.



Şekil 26. Finansal analiz ekranı

Ödemeler ve tasarruflar bölümünde şebeke işletmecisi tarafından ilk yılda yapılan toplam ödeme 1.024.978,45 ₺ olarak tahmin edilmiştir. Bu tutar Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK, 2025) 2025 yılı için sanayi kullanıcılarına yönelik belirlediği özel besleme tarifesini kapsamında kWh başına 5,74 ₺ fiyat baz alınarak hesaplanmıştır. Analiz sürecinde enflasyon ve elektrik bedeli artışları dikkate alınmamıştır. Simülasyon analiz sonuçları PVSOL yazılımı tarafından sunulmuş olup detaylı veriler Şekil 27'de gösterilmiştir.

Finansal Analiz

Genel Bakış

Sistem bilgileri

İlk yıl içindeki şebeke beslemesi (Modülün performans düşüşü dahil)	178.568 kWh/Yıl
PV jeneratör çıkışı	115,2 kWp
Sistemin devreye alınması	1.01.2024
Değerlendirme Dönemi	20 Yıllar
Anaparaya uygulanan faiz	0 %

Ekonomik Parametreler

İç Verim Oranı (IRR)	43,08 %
Biriktirilmiş nakit akışı (nakit dengesi)	15.198.421,67 ₺
Amortisman süresi	2,2 Yıllar
Elektrik üretim maliyeti	0,6016 ₺/kWh

Ödemelere Genel Bakış

Belirli yatırım giderleri	19.200,00 ₺/kWp
Yatırım Maliyetleri	2.211.840,00 ₺
Tek Seferlik Ödemeler	0,00 ₺
Gelen Sübvansiyonlar	0,00 ₺
Yıllık giderler	0,00 ₺/Yıl
Diğer Gelirler veya Tasarruflar	0,00 ₺/Yıl

Ödemeler ve tasarruflar

Şebeke İşletmecisi tarafından ilk yılda yapılan toplam ödeme	1.024.978,45 ₺/Yıl
--	--------------------

EPDK - SANAYİ KULLANICISI

Geçerlilik	1.01.2024 - 31.12.2024
Özel Besleme Ücreti	5,74 ₺/kWh
Teşvik Miktarı	1024978,4451 ₺/Yıl

Şekil 27. Merkezi evirici sistemi için PVSOL finansal analiz çıktısı

5.2. Dizi Evirici İle GES Simülasyonu

Şekil 28’de PVSOL yazılımında dizi evirici projesine ait tanımlama ekranı yer almaktadır. Bu ekran projenin genel başlık bilgileri, kurulumun yapılacağı yerin adı, proje tasarımcısı, proje adı ve sistemin devreye alınma tarihi, adres gibi temel parametreleri içerir.

Şekil 29’da gösterilen sistem türü, iklim ve şebeke parametreleri FV santralinin kurulumuna dair temel bilgilerin girildiği ara yüzdür. Burada yer alan proje başlangıç ekranında, tasarımının 3D ve sistemin şebekeye bağlı olduğu tanımlanmış, konum olarak Artuklu-Mardin seçilmiştir. Ardından, sistem tipi, iklim ve şebeke parametreleri belirlenmiştir.

PV*SOL premium 2024 (R3) - [DİZİ EVİRİCİLİ İLE 100KW ÖRNEK SİSTEM TASARIMI.pvpr]

Dosya Veritabanları Seçenekler Dk Yardım

DB durumu: İnternet üzerinden | Giriş: Otomatik

Proje Verileri

Teklif no.

Proje Tasarımı Kenan BABAOĞLU

Devreye Alma 01.01.2024

Proje Başlığı DİZİ EVİRİCİLİ İLE 100 KW ÖRNEK SİSTEM TASARIMI

Proje Resmi 

Yükle Sil

Daha fazla resim

Proje Tanımı KENAN BABAOĞLU YÜKSEK LİSANS TEZİ DİZİ EVİRİCİLİ İLE 100 KW ÖRNEK SİSTEM TASARIMI

Kurulum adresi

Müşteri Detayları

Müşteri numarası

İlgili Kişi

Şirket

Telefon

Faks

E-Posta

Adres

Seçtiğiniz şebekeyi besleme tarifesinin başvuru tarihi, tanımlanmış geçerlilik uymuyor. Lütfen girişinizi kontrol ediniz.

Besleme noktasında aşağı düzenleme kontrolü etkinleştirilmeden dinamik besleme kontrolü için bir devre sembolü kullanırsanız! (Seçenekler> AC uyarası)

Şekil 28. Dizi eviricili GES için proje başlangıç ekranı

PV*SOL premium 2024 (R3) - [DİZİ EVİRİCİLİ İLE 100KW ÖRNEK SİSTEM TASARIMI.pvpr]

Dosya Veritabanları Seçenekler Dk Yardım

DB durumu: İnternet üzerinden | Giriş: Otomatik

Sistem Türü, İklim ve Şebeke

Ek türü 3D, Şebekeye bağlı PV sistemi



Tasarım Türü ☒ 3D Tasarım kullan

İklim verileri

Ülke Türkiye Konum Artıkü (2001-2020, Meteonorm 8.20)

Enlem	37° 15' 35" (37,33°)	Küresel ışınlama yıllık toplam	1936 kWh/m²
Boylam	40° 42' 55" (40,72°)	Yıllık Ortalama Sıcaklık	20,6 °C
Saat Dilimi	UTC+3		
Zaman dilimi	2001 - 2020		
Kaynak	Meteonorm 8.20		

[Simülasyon parametreleri](#)

Simülasyon zaman adımı

☐ 1 Saat (daha hızlı simülasyon)

☒ 1 Dakika (daha hassas simülasyon)

AC Şebekesi

Giriş Ya...

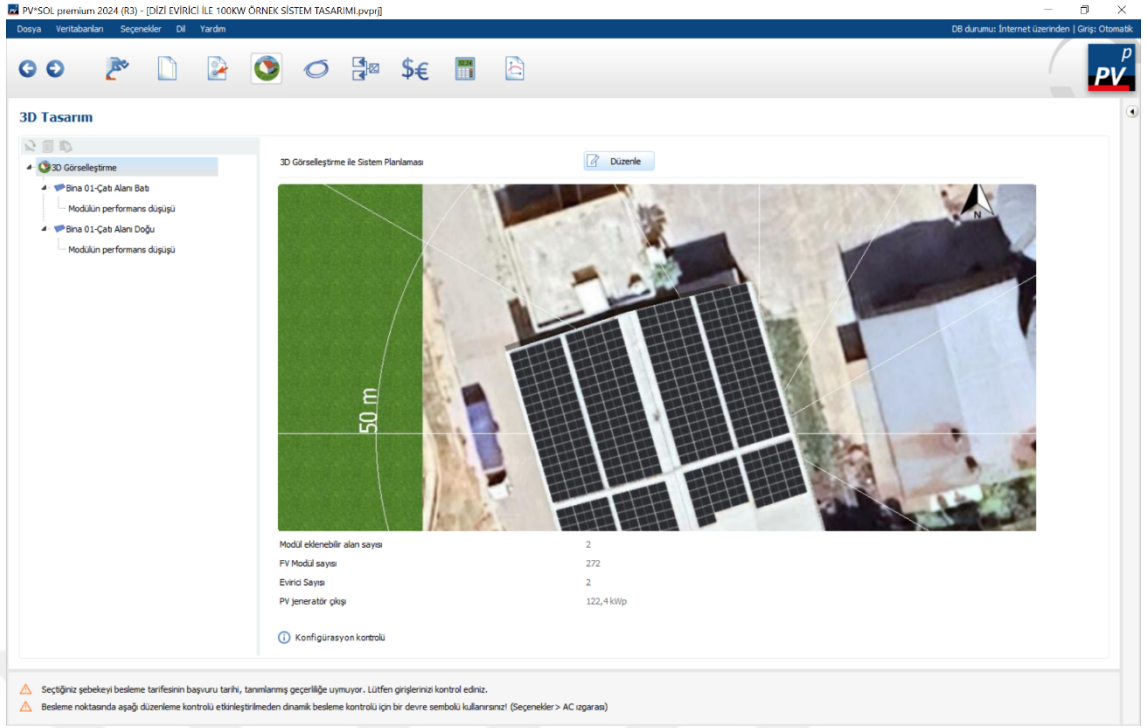
Gerilim (N+L)	230 V
Faz Adeti	3-fazlı
cos φ	1
Makimum Güç Sınırlaması	Hayır

Seçtiğiniz şebekeyi besleme tarifesinin başvuru tarihi, tanımlanmış geçerlilik uymuyor. Lütfen girişinizi kontrol ediniz.

Besleme noktasında aşağı düzenleme kontrolü etkinleştirilmeden dinamik besleme kontrolü için bir devre sembolü kullanırsanız! (Seçenekler> AC uyarası)

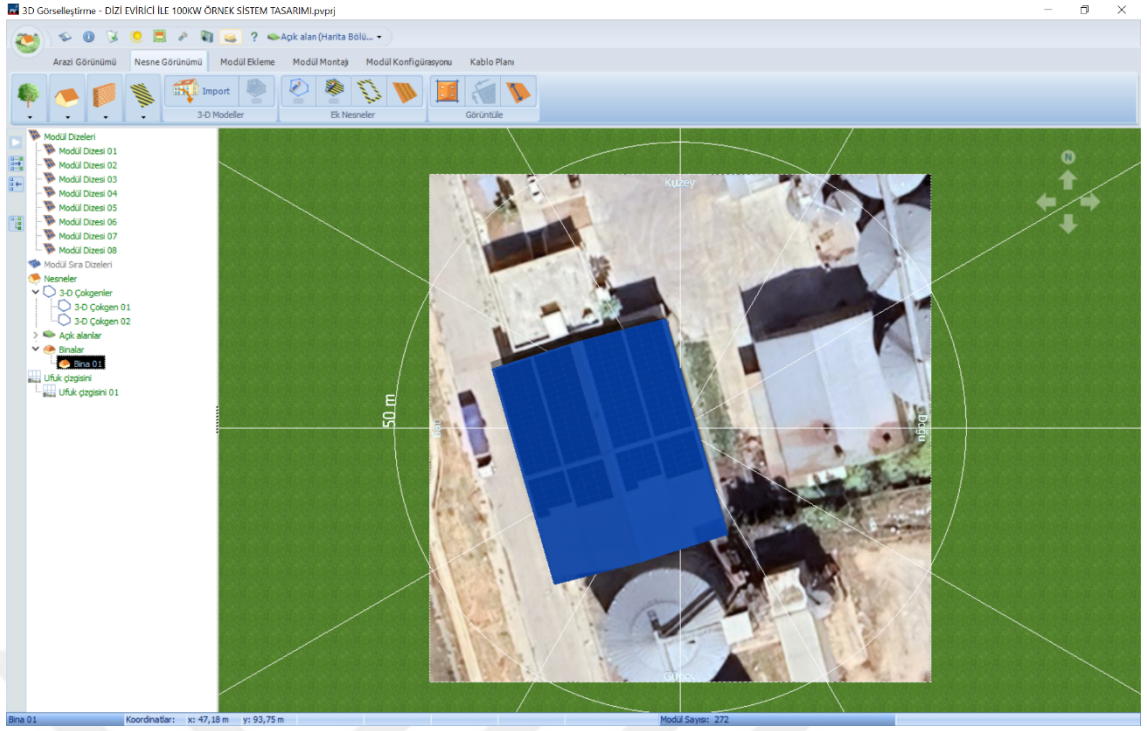
Şekil 29. Dizi eviricili sistem türü, iklim ve şebeke tanımlama arayüzü

3D görselleştirme ile sistem planlaması ekranından sistemin kurulacağı konum harita üzerinden belirlenir. Şekil 30'da bu işlemin yapıldığı ekranın görüntüsü verilmiştir.

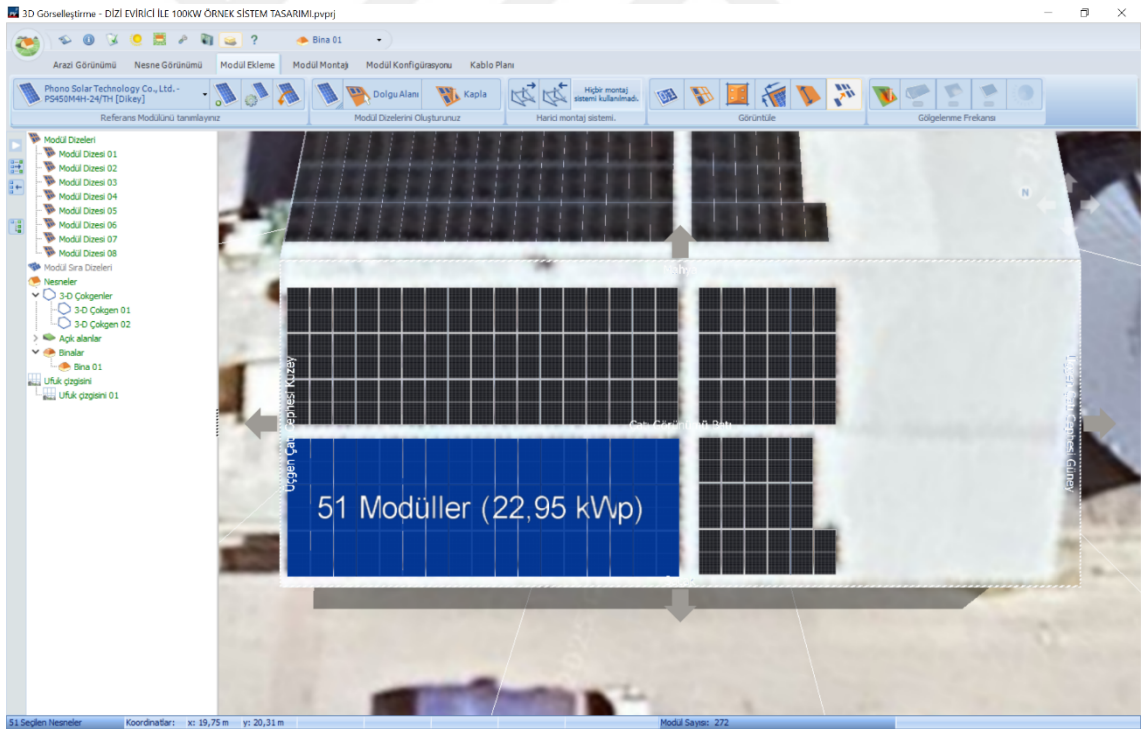


Şekil 30. Dizi eviricili sistem için 3D görselleştirme ile sistem planlaması arayüzü

Şekil 31’de yer alan 3D görselleştirme arazi görünümü ekranında uydu görüntüsü üzerinden santralin kurulacağı alan seçilmiş, 3D modelleme yardımıyla yapı öne çıkarılmıştır. Bu aşamada bina yüksekliği, çatı tipi ve eğimi gibi fiziksel parametreler tanımlanarak sistem tasarımı için gerekli altyapı oluşturulmuştur. Şekil 32’de sistemde kullanılacak FV panellere ait katalog verileri tanımlanmış ve çatı yüzeyine uygun şekilde yerleşimleri gerçekleştirilmiştir. Çatı yüzeyleri arasında güney yönüne bakan alan tercih edilerek FV paneller bu yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Bu yerleşim sayesinde sistemin gün boyunca maksimum güneş ışıınımından faydalanması ve dolayısıyla enerji üretiminin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 31. Dizi eviricili sistem için arazi görünümünü 3D görselleştirme ekranı

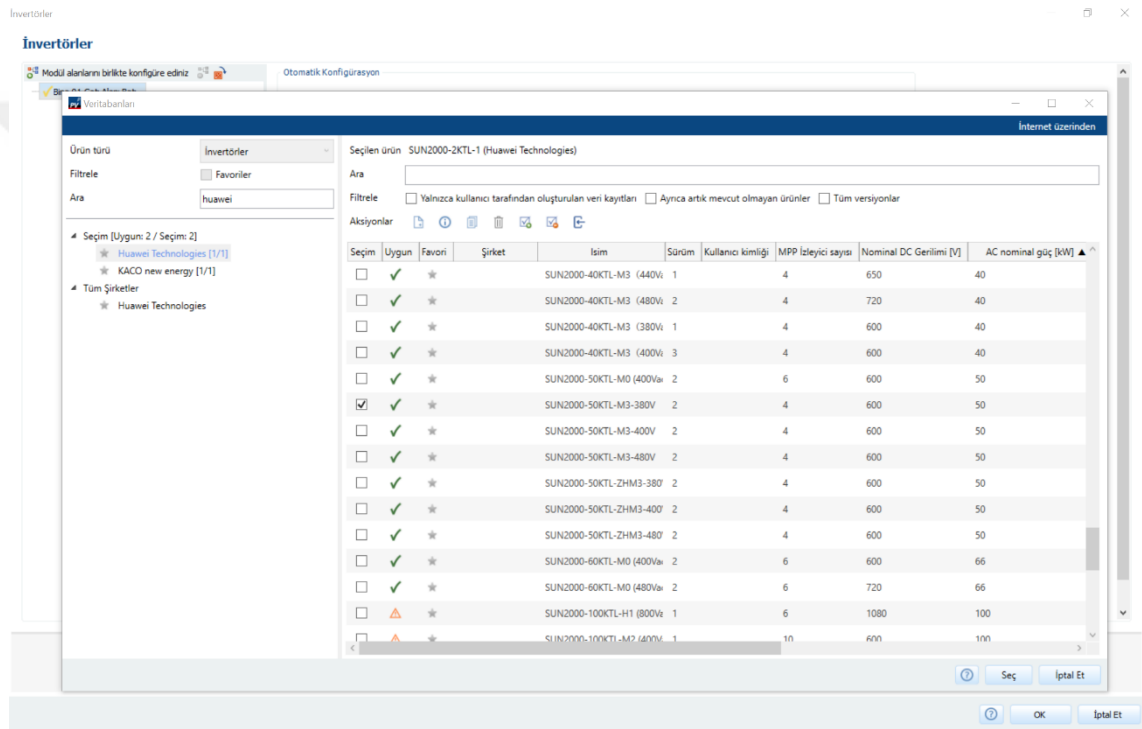


Şekil 32. Dizi eviricili sistemin FV panel yerleşimi

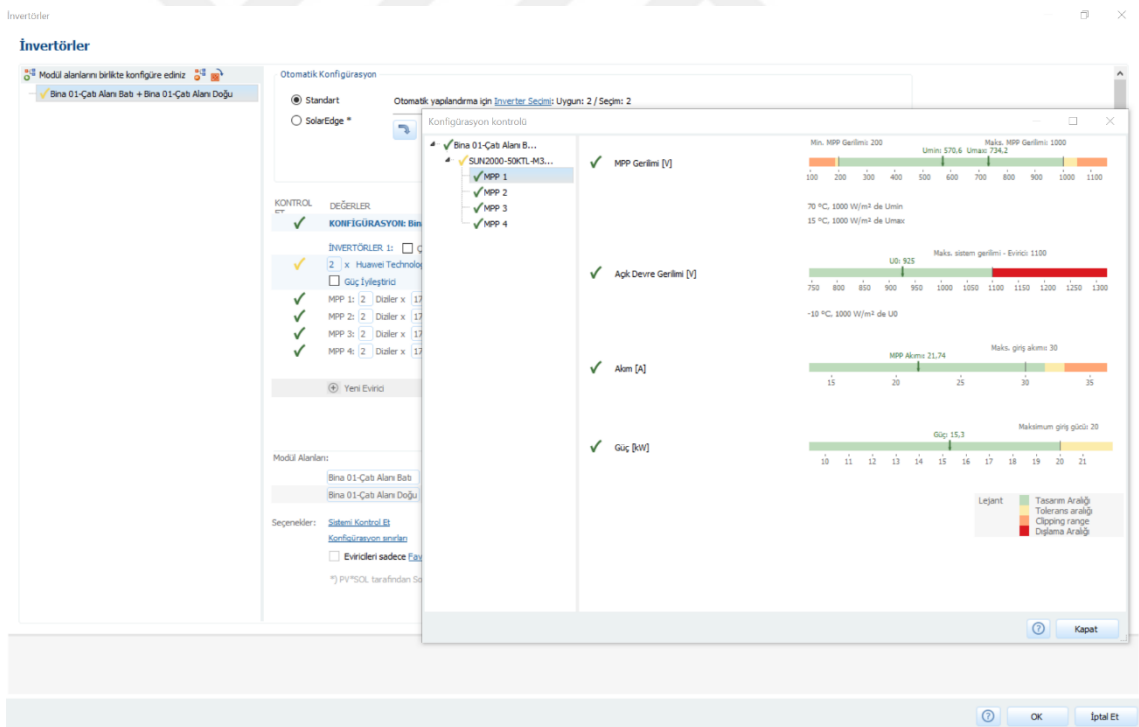
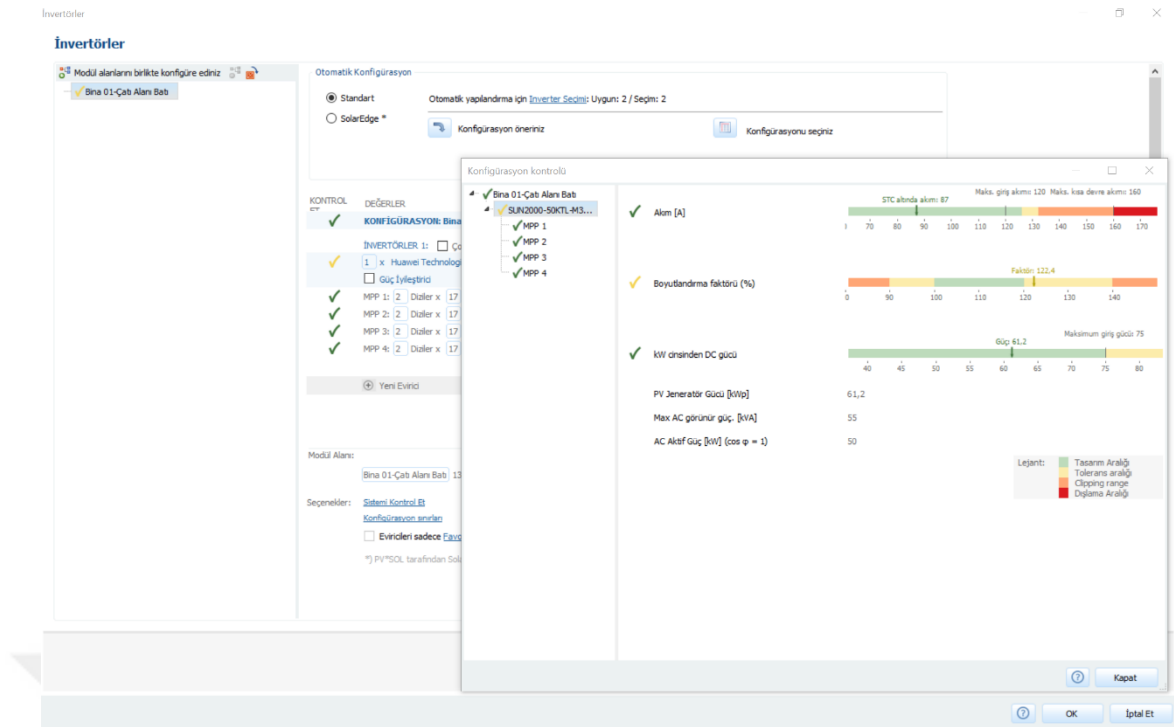
Bu aşamada gölgeleme etkisinin sistem performansı üzerindeki etkisi modellenmiş ve simülasyon süresi boyunca yıllık enerji üretimine yansımaları analiz edilmiştir.

Dizi eviricili GES tasarımı kapsamında her bir eviricinin kontrol ettiği modül dizileri belirli konfigürasyonlara göre tanımlanmıştır. Şekil 33'te sistem tasarımına

yönelik olarak evirici seçimi yapılmış, Şekil 34'te kullanılacak dizi sayısı, her bir dizide yer alacak FV panel sayısı ve dizilerin bağlantı türü gibi parametreler belirlenerek modül konfigürasyonu gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde eviricilerin MGNT noktalarına bağlanan dizi sayıları ile bu dizilerin seri ve paralel bağlantı yapıları ayrıntılı biçimde yapılandırılmıştır. Şekil 33'de görüldüğü üzere, sistemde iki adet Huawei marka evirici kullanılmıştır. Ayrıca DC giriş sınırlarının aşılması gibi simülasyon uyarıları da bu aşamada dikkate alınmıştır. Şekil 35'te seçilen evirici, FV panelleri ve dizilere ait AC ve DC kablolama planları detaylandırılarak sistemin elektriksel altyapısı görsel olarak ortaya konulmuştur.

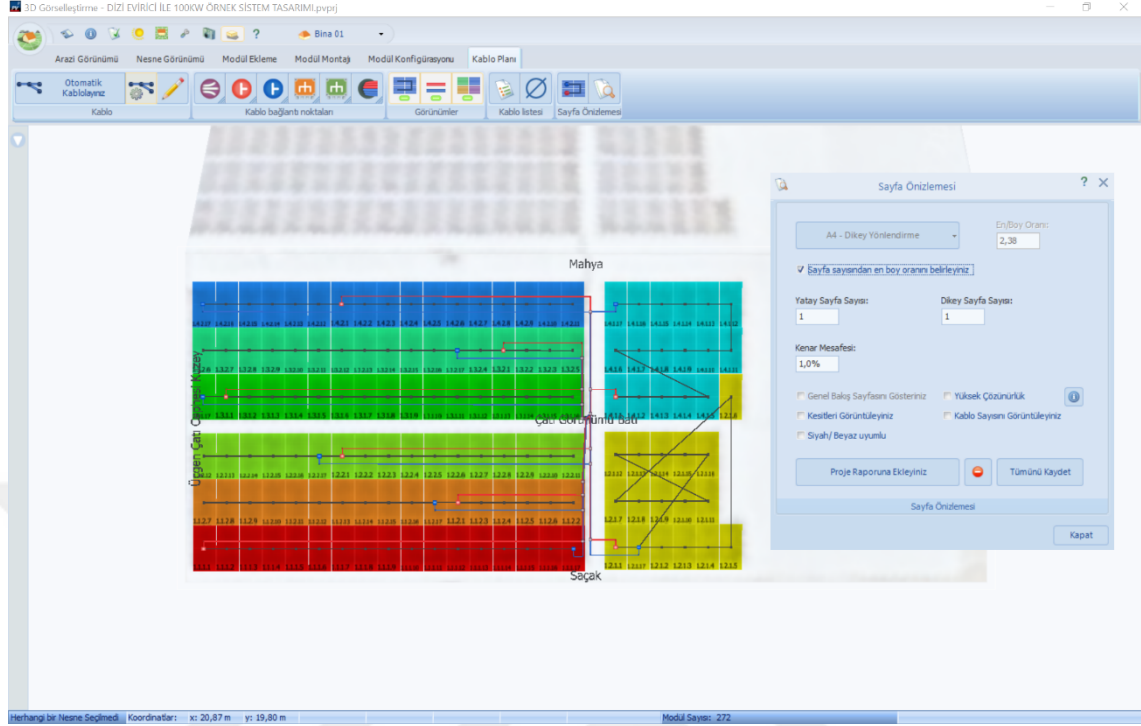


Şekil 33. Dizi tipi evirici seçimi



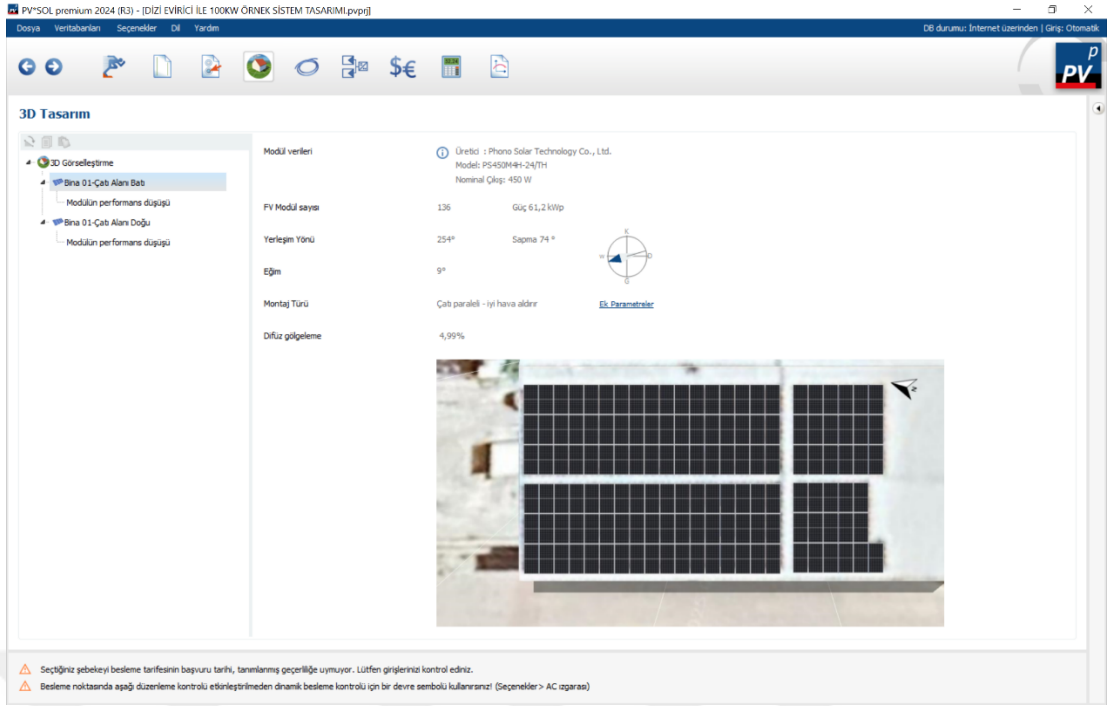
Şekil 36 dizi tipi eviricili GES’e ait panel dizilerinin seri bağlantı yapılarını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Her bir renk farklı bir seri bağlantı dizisini temsil etmekte olup, bu diziler ilgili eviricilerin MGNT noktalarına yönlendirilmiştir. Bu şema aracılığıyla FV modüllerin nasıl organize edildiği, hangi dizilerin aynı eviriciye

bağlandığı ve bağlantı yollarının simülasyon ortamında nasıl planlandığı açık biçimde görülebilmektedir.



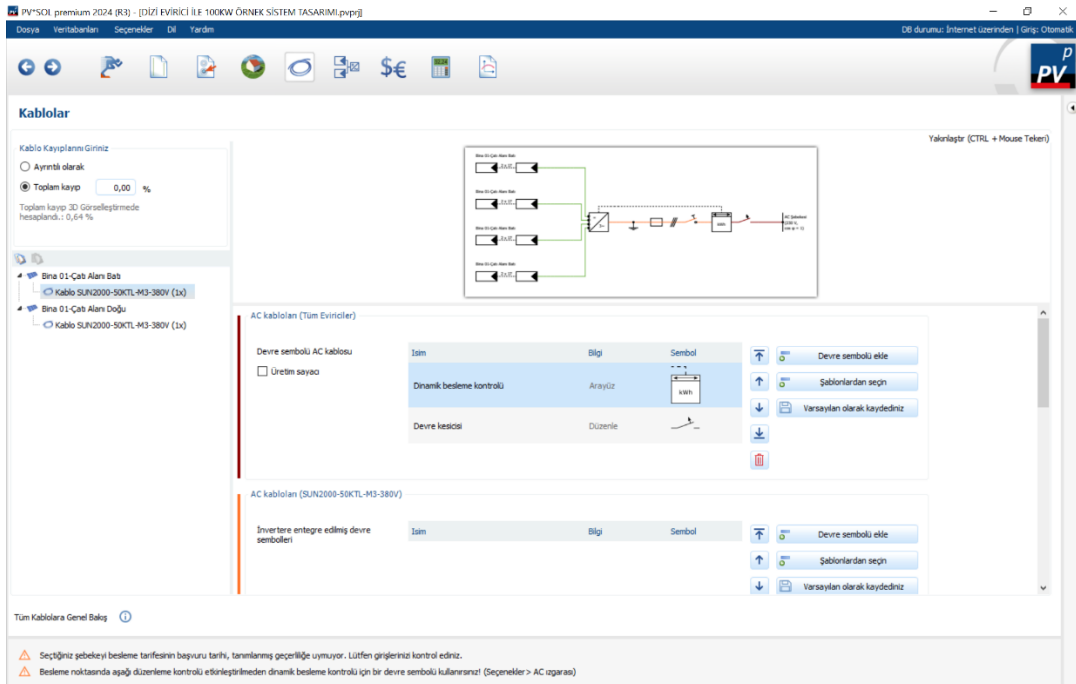
Şekil 36. Panel dizileri arasındaki seri bağlantı şeması

Simülasyon sürecine başlamadan önce dizi tipi eviricili GES performansını etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biri olan gölgeleme etkisi Şekil 37’de gösterildiği üzere analiz edilmiştir. GES’in kurulu olduğu çatı çevresinde yer alan yapılar, bacalar, antenler ve diğer yakın objelerin oluşturduğu fiziksel engeller, sistemin günlük ve mevsimsel performansını doğrudan etkilemektedir. Bu analiz kapsamında, panel yüzeyine düşen gölgeler yüzdesel olarak hesaplanmış ve %4,99 oranında difüz gölgelenme etkisi tespit edilmiştir. Bu oran sistem başarımını büyük oranda etkileyecek seviyede olmamakla birlikte, simülasyon sonuçlarının doğruluğu açısından dikkate alınması gereken bir parametre olarak yorumlanmıştır.

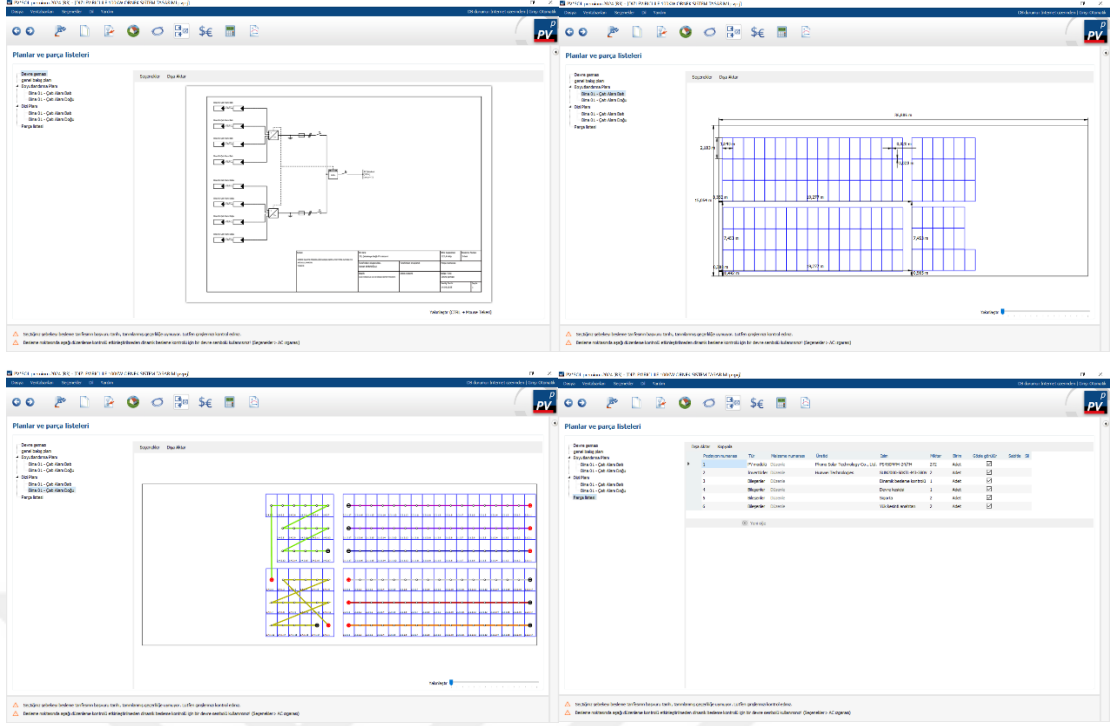


Şekil 37. Dizi eviricili GES'in gölgeleme analizi

Şekil 38'de FV panellerin, eviricilerin, devre kesici ve sayaçların yer aldığı projelendirme ekranı aracılığıyla sistemin tek hat şemaları oluşturulmuştur. Şekil 39'da yer alan "Planlar ve Parça Listesi" modülü, finansal analize geçilmeden önce sistem tasarımına ait tüm bileşenlerin son kontrollerinin yapıldığı aşamayı temsil etmektedir.

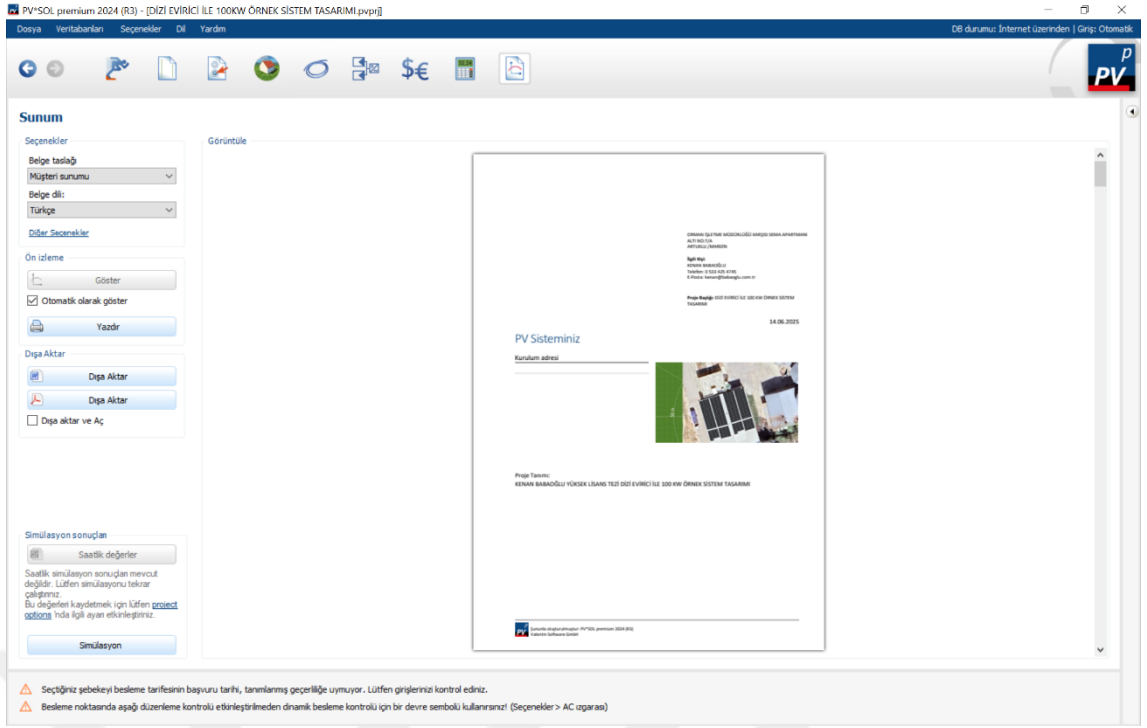


Şekil 38. Dizi eviricili GES sistemi bileşenlerinin projelendirilmesi



Şekil 39. Dizi eviricili GES'in planlar ve parça listesi ekranı

Finansal analiz PVSOL simülasyon yazılımının finansal değerlendirme ekranı üzerinden gerçekleştirilmiş olup dizi tipi evirici kullanılan GES'in ekonomik performansını değerlendirmeye yönelik temel göstergeler Şekil 40'ta sunulmuştur. Sistemin 1 Ocak 2024 tarihinde devreye alındığı ve değerlendirme süresinin 20 yıl olarak belirlendiği senaryoda ilk yıl şebekeye aktarılan toplam enerji miktarı (modül performans düşüşü dahil) 196.033 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. FV sistem kapasitesi ise 122,4 kWp seviyesindedir. Bu analizde anaparaya herhangi bir faiz uygulanmamış ve böylece sabit maliyet yaklaşımı benimsenmiştir. Ekonomik göstergeler açısından sistemin İVO değeri %44,59 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, yatırımın güçlü ekonomik geri dönüş potansiyelini göstermektedir. Biriktirilmiş nakit akışı 16.761.612,91 ₺ düzeyinde gerçekleşmiş, amortisman süresi ise 2,1 yıl olarak belirlenmiştir. Sistemin üretim başına maliyeti 0,5824 ₺/kWh olarak hesaplanmıştır. Toplam yatırım maliyeti 2.350.080,00 ₺ olarak belirlenmiş; bu tutar, birim kapasite başına 19.200,00 ₺/kWp yatırım harcamasına karşılık gelmektedir. Analiz kapsamında tek seferlik ödemeler, gelen sübvansiyonlar, yıllık işletme giderleri ve ek gelir kalemleri sıfır olarak alınmıştır. Dolayısıyla analiz, yatırımın sadece enerji satış geliriyle değerlendirilmesini sağlamaktadır.



Şekil 40. Dizi eviricili sistemin finansal analiz ekranı

Şebeke işletmecisi tarafından ilk yılda yapılması beklenen toplam ödeme sanayi tarifi bazında 1.125.229,32 ₺/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun yayımladığı 27.03.2025 tarihli, 13426 sayılı tarife raporunda belirtilen 2025 yılına ait sanayi kullanıcılarına özel besleme tarifi esas alınarak yapılmıştır. Söz konusu tarife göre elektrik birim satış bedeli 5,74 ₺/kWh olarak belirlenmiştir (EPDK, 2025). Analiz kapsamında enflasyon oranı ve elektrik bedelindeki artışlar dikkate alınmamıştır. Sisteme ait finansal çıktılar PVSOL yazılım arayüzü ile oluşturulmuş olup, yazılımın finansal analiz ekranı Şekil 40 yıllık üretim ve ekonomik kazanç değerlerinin görselleştirildiği analiz çıktıları ise Şekil 41'de sunulmuştur.

Finansal Analiz

Genel Bakış

Sistem bilgileri

İlk yıl içindeki şebeke beslemesi (Modülün performans düşüşü dahil)	196.033 kWh/Yıl
PV jeneratör çıkışı	122,4 kWp
Sistemin devreye alınması	1.01.2024
Değerlendirme Dönemi	20 Yıllar
Anaparaya uygulanan faiz	0 %

Ekonomik Parametreler

İç Verim Oranı (IRR)	44,59 %
Biriktirilmiş nakit akışı (nakit dengesi)	16.761.612,91 ₺
Amortisman süresi	2,1 Yıllar
Elektrik üretim maliyeti	0,5824 ₺/kWh

Ödemelere Genel Bakış

Belirli yatırım giderleri	19.200,00 ₺/kWp
Yatırım Maliyetleri	2.350.080,00 ₺
Tek Seferlik Ödemeler	0,00 ₺
Gelen Sübvansiyonlar	0,00 ₺
Yıllık giderler	0,00 ₺/Yıl
Diğer Gelirler veya Tasarruflar	0,00 ₺/Yıl

Ödemeler ve tasarruflar

Şebeke İşletmecisi tarafından ilk yılda yapılan toplam ödeme	1.125.229,32 ₺/Yıl
--	--------------------

EPDK - SANAYİ KULLANICISI

Geçerlilik	1.01.2024 - 31.12.2024
Özel Besleme Ücreti	5,74 ₺/kWh
Teşvik Miktarı	1125229,3175 ₺/Yıl

Şekil 41. Dizi evirici sistemi için PVSOL finansal analiz çıktısı

5.3. PVSOL Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi: Merkezi ve Dizi Evirici Sistemler

Bu bölümde PVSOL yazılımı ile 2024 yılı için simülasyonu gerçekleştirilen merkezi ve dizi tipi evirici içeren iki farklı FV sistemin karşılaştırmalı analizi sunulmaktadır. Analiz kapsamında her iki sistemin enerji üretim performansı ve ekonomik geri dönüş parametreleri değerlendirilmiştir. Değerlendirme süresi 20 yıl olarak kabul edilmiş ve FV panellerin performansındaki yıllık azalma simülasyona dahil edilmiştir.

5.3.1. Enerji Üretimi ve Sistem Performansı

Dizi evirici kullanılan sistemde yıllık enerji üretimi PVSOL’de yapılan simülasyonlara göre 196.033 kWh olarak belirlenmiştir. Bu sistemin kurulu gücü 122,4 kWp’tir. Merkezi evirici kullanılan diğer sistemin kurulu gücü ise 115,2 kWp olup yıllık enerji üretimi 178.568 kWh olarak hesaplanmıştır. Her iki sistemde de modül

verimliliğinde ilk yıl yaşanacak düşüş dikkate alınarak şebekeye verilen net enerji miktarı için simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre merkezi eviricinin İVO'su %43,08, dizi eviricinin ise %44,59 olarak belirlenmiştir. Dizi eviricilerin her panel dizisini bağımsız olarak MGNT ile yönetebilmesi, gölgelenme, sıcaklık farkı ve kirlenme gibi lokal verim kayıplarını azaltma konusunda önemli bir avantaj sağlar. Bu durum, özellikle çatı tipi uygulamalarda ve gölgelenmenin sık görüldüğü orta ve küçük ölçekli sistemlerde önemli performans artışı sunar. Öte yandan merkezi eviriciler, daha homojen ışıyım koşullarına sahip geniş arazilerde tercih edilmektedir.

5.3.2. Ekonomik Karşılaştırma

Her iki sistemin yatırım maliyeti vergiler hariç olmak üzere 19.200 ₺/kWp birim maliyet üzerinden hesaplanmıştır:

- Dizi eviricili sisteminin yatırım maliyeti: $122,4 \text{ kW} \times 19.200 \text{ ₺/kWp} = 2.350.080 \text{ ₺}$
- Merkezi eviricili sistemin yatırım maliyeti: $115,2 \text{ kWp} \times 19.200 \text{ ₺/kWp} = 2.211.840 \text{ ₺}$

Sisteme uygulanan faiz oranı %0 olarak kabul edilmiştir. Yıllık işletme gideri veya ek sübvansiyonlar hesaba katılmamıştır. Dizi eviricili sistemin İVO'su %44,59 olarak belirlenmişken, merkezi evirici sistemin İVO değeri %43,08 olarak hesaplanmıştır. Amortisman süresi dizi eviricili sistem için 2,1 yıl, merkezi eviricili sistem için ise 2,2 yıl olarak öngörülmüştür. Her iki sistem için 20 yıllık dönemde elde edilmesi beklenen toplam birikimli nakit akışı aşağıdaki gibidir:

- Dizi eviricili sistem: 16.761.612,91 ₺
- Merkezi eviricili sistem: 15.198.421,67 ₺

Merkezi eviricilerin daha yüksek DC yükleme oranına izin vermesi sayesinde evirici başına daha fazla panel bağlanabilmesi mümkündür. Ancak bu durum eviricilerin sürekli daha yüksek akım altında çalışmasına neden olabileceğinden termal stres kaynaklı arızalar ve verim düşüşü gibi olası teknik riskleri de beraberinde getirebilir (Yılmaz, 2022).

5.3.3. Şebeke Geliri ve Tarife Etkisi

Her iki sistem için elektrik satış fiyatı, EPDK'nun 2025 yılı sanayi kullanıcıları için belirlediği 5,74 ₺/kWh özel besleme tarifesine göre hesaplanmıştır (EPDK, 2025). Buna göre, sistemlerin ilk yıl şebeke gelirleri:

- Dizi eviricili sistem: 1.125.229,32 ₺

- Merkezi eviricili sistem: 1.024.978,45 ₺

Bu fark dizi eviricili sistemin daha yüksek üretim kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. MGNT özelliği, sistemin dalgalı ışınlım koşullarında daha dengeli bir üretim profiline sahip olmasını sağlamaktadır.

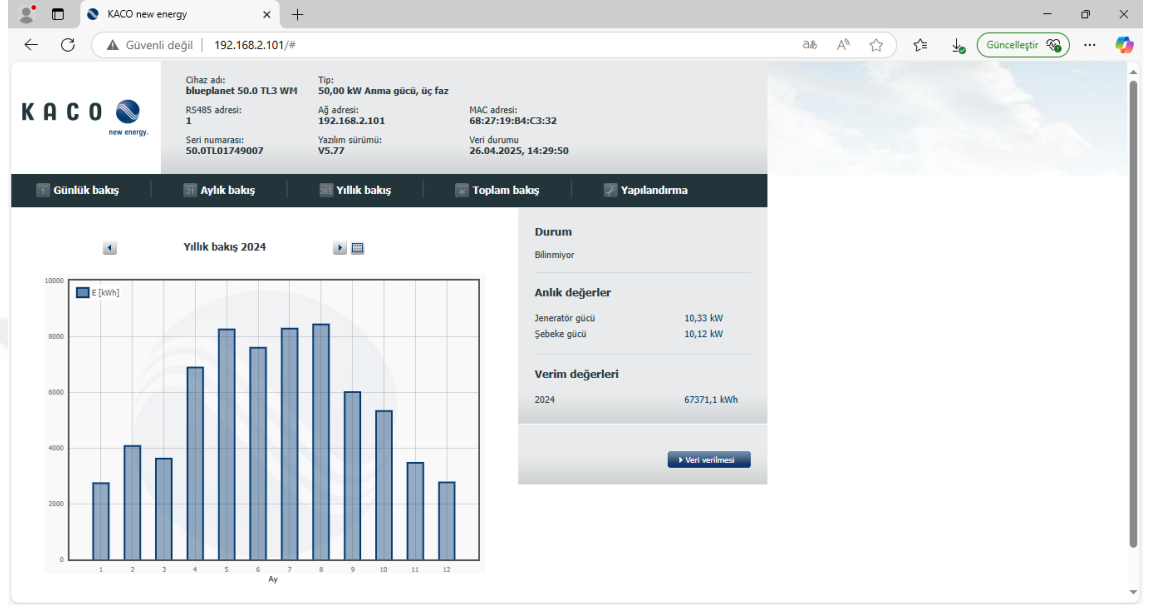
5.3.4. Varsayımlar ve Değerlendirme Kapsamı

Simülasyon çıktıları üzerinden hesaplanan birikimli nakit akışı ve diğer ekonomik göstergeler sistemlerin öz tüketim esasına göre çalışacağı varsayımı şeklinde kabul edilmiştir. Yani üretilen enerjinin tamamının kullanıcı tarafından tüketileceği kabul edilmiştir. Bu nedenle enerji iletim bedeli, sistem kullanım ücreti, sayaç okuma gibi şebeke bağlantılı maliyetler dikkate alınmamıştır. Aynı şekilde FV sistemlerden şebekeye satılan enerji karşılığında alınan bedel ya da mahsuplaşma gibi mekanizmalar da hesaba katılmamıştır. Ancak pratikte FV sistemlerin ürettiği enerjinin tamamı her zaman sistem içinde tüketilemeyebilir. Bu durumda fazla enerji şebekeye aktarılacak ve kullanıcı, dağıtım firmasıyla yaptığı anlaşmalara göre değişen oranlarda ödeme alacaktır. Bu senaryolarda birim başına ekonomik kazanç azalacak dolayısıyla sistemin toplam getirisi düşerek amortisman süresi uzayacaktır. Bu nedenle burada sunulan sonuçlar, yalnızca tam öz tüketim senaryosu için geçerlidir.

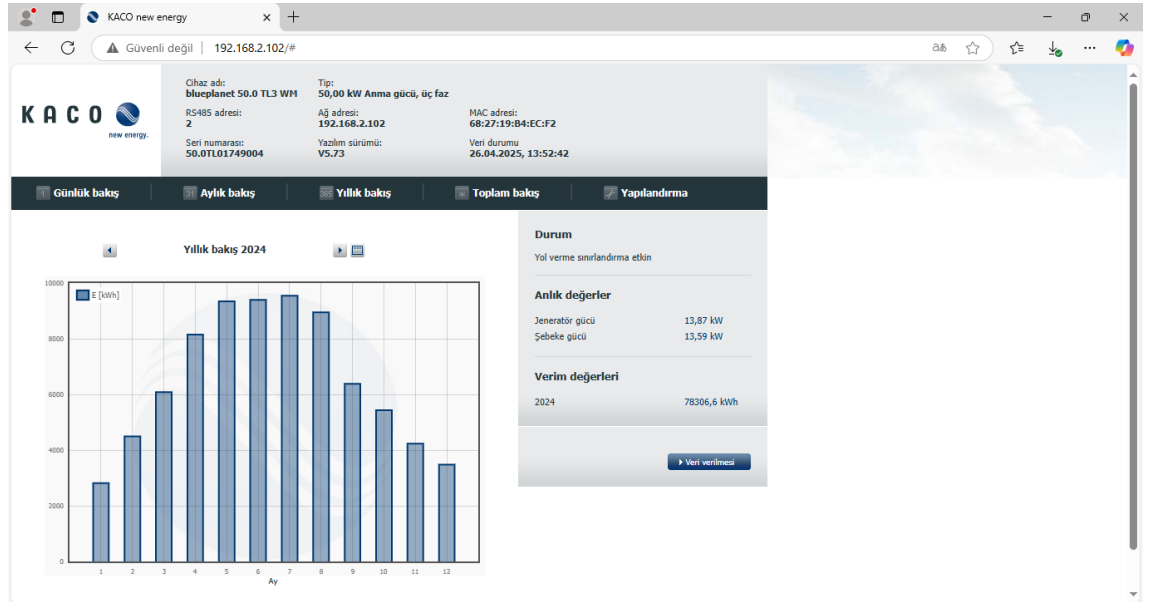
6. GERÇEK ÜRETİM VERİLERİNİN ANALİZİ

Tez çalışmasında karşılaştırılan iki GES sisteminden ilki merkezi eviricili sistem olup, sistemde 288 adet 400 W panel kullanılmıştır. İkinci sistem ise dizi eviricili sistem olarak tasarlanmış ve 272 adet 450 W panel ile kurulmuştur. Her iki sistemde de panellerin yönü güney ve eğim açıları 9° dir. Merkezi eviricili sistemin kurulu gücü 115,2 kWp (288×400 W) iken, dizi eviricili sistemin kurulu gücü 122,4 kWp (272×450 W) seviyesindedir. Bu bağlamda, dizi eviricili sistemin kurulu gücünün merkezi eviricili sisteme göre yaklaşık %6,25 daha yüksek olduğu söylenebilir. 2024 yılına ait merkezi evirici kullanılan GES'in aylık ve yıllık toplam elektrik üretimi Tablo 6'da, dizi evirici kullanılan sistemin elektrik üretim verileri ise Tablo 7'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 42 ve Şekil 43'de merkezi eviricili sistemin 2024 yılı elektrik üretim değerleri ekran görüntüleri, Şekil 44'de ise iki adet dizi eviricinin 2024 yılı toplam elektrik üretim değerlerini gösteren ekranlar sunulmuştur. Toplam elektrik üretim miktarları değerlendirildiğinde merkezi eviricili sistem 145.679 kWh enerji üretirken, dizi eviricili sistem 128.180 kWh üretim gerçekleştirmiştir. Kurulu güç açısından dizi eviricili sistem daha yüksek olmasına rağmen, merkezi eviricili sistemin toplam üretimi yaklaşık %13,7 daha yüksektir. Bu durum merkezi eviricili sistemin kurulu gücüne göre daha yüksek spesifik üretim değerine (kWh/kWp) sahip olduğunu göstermektedir. Her iki sistemde de panel yönü ve eğimi aynı olduğundan bu verimlilik farkının evirici tipi, sistem dizaynı, MGNT performansı ve diğer teknik faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte sistemlerin bulundukları coğrafi konuma bağlı olarak anlık elektrik kesintileri, çevresel tozlanma, panellerin düzenli temizliği ve bakım koşulları gibi etkenlerin de performans üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Özellikle toz, kir ve diğer çevresel faktörler, panel yüzeyinde biriken tabaka nedeniyle ışıının azalmasına ve dolayısıyla üretim kayıplarına yol açabilir. Aynı şekilde bakım eksikliği ve elektrik kesintileri, sistemin çalışma sürekliliğini etkileyerek gerçek üretim değerlerinde dalgalanmalara sebep olabilir. İki sistem arasındaki performans farkları sadece kurulu güçle açıklanamayacak, sistem tasarımı, kullanılan ekipmanların verimliliği ile birlikte çevresel ve işletme koşullarının da dikkate alınması gereken önemli faktörler olduğu görülmektedir. Bu analiz sonuçlarına göre daha düşük elektrik üretimi gözlemlenen sistemin özellikle panel temizlik ve bakımına önem vermesi gerekmektedir. Tozlanma ve kir birikiminin performans kaybına yol açtığı tahmin edilmekte olup sistem verimliliğinin

artırılması için düzenli temizlik ve bakım işlemlerinin titizlikle gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Ancak temizlik sonrası belirgin bir performans artışı gözlemlenmezse ya da tozlanma ve kir birikimi gibi çevresel faktörlerin olumsuz etkisi tespit edilmezse sistemde teknik bir arıza veya tasarım kaynaklı başka performans sorunlarının varlığı ihtimali değerlendirilerek detaylı ve kapsamlı bir inceleme yapılması gerekmektedir.



Şekil 42. 1. merkezi eviricinin 2024 yılı elektrik üretim değerleri ekran görüntüsü



Şekil 43. 2. merkezi eviricinin 2024 yılı elektrik üretim değerleri ekran görüntüsü

Tablo 6. Merkezi eviricili sistemde 2024 yılına ait aylık ve toplam elektrik üretimi

Evirici Tipi	Evirici		Toplam
	1. Evirici	2. Evirici	
Blueplanet 50.0 TL3 WM			
Tarih	E [kWh]	E [kWh]	E [kWh]
Oca.24	2.731,323	2.811,322	5.542,645
Şub.24	4.065,285	4.496,073	8.561,358
Mar.24	3.613,490	6.084,439	9.697,929
Nis.24	6.881,960	8.152,789	15.034,749
May.24	8.244,917	9.346,342	17.591,259
Haz.24	7.589,807	9.398,321	16.988,128
Tem.24	8.278,241	9.545,234	17.823,475
Ağu.24	8.426,676	8.946,457	17.373,133
Eyl.24	5.998,078	6.384,281	12.382,359
Eki.24	5.320,296	5.432,356	10.752,652
Kas.24	3.462,799	4.229,910	7.692,709
Ara.24	2.758,295	3.479,101	6.237,396
Toplam kWh			145.678



Şekil 44. 2 dizi eviricinin 2024 yılı toplam elektrik üretim değerleri ekran görüntüsü

Tablo 7. Dizi evirici kullanılan sistemin 2024 yılı aylık ve toplam elektrik üretimi

Evirici Tipi	
Huawei SUN2000-50KTL-M3	
Tarih	E [MWh]
Oca.24	3,87
Şub.24	6,16
Mar.24	9,83
Nis.24	13,25
May.24	15,67
Haz.24	15,67
Tem.24	16,46
Ağu.24	15,25
Eyl.24	12,39
Eki.24	9,86
Kas.24	5,66
Ara.24	4,11
Toplam elektrik (MWh)	128,18

7. PVSOL TABANLI SİMÜLASYONLARIN GERÇEK VERİLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde PVSOL yazılımı kullanılarak simüle edilen iki farklı GES'in 2024 yılı elektrik üretim tahminleri sahadan elde edilen gerçek üretim verileri ile karşılaştırılmıştır. Amaç simülasyon sonuçlarının saha koşullarındaki doğruluğunu değerlendirmek ve merkezi ile dizi evirici sistemlerin performans farklılıklarını analiz etmektir.

7.1. Simülasyon ve Gerçek Verilerin Karşılaştırması

PVSOL simülasyon sonuçlarına göre dizi evirici kullanılan sistemin yıllık elektrik üretiminin 196.033 kWh, merkezi evirici kullanılan sistemin ise 178.568 kWh olması öngörülmüştür. Ancak 2024 yılına ait sahadan elde edilen gerçek üretim verilerine göre dizi eviricili sistemin yıllık toplam üretiminin 128.180 kWh, merkezi eviricili sistemin üretiminin ise 145.678 kWh olarak gerçekleştiği görülmüştür.

Tablo 8'de görüldüğü üzere, her iki sistemde de simülasyon sonuçları gerçek üretimden daha yüksektir. Dizi evirici sistemlerde simülasyon ile gerçek üretim arasında %34,6 oranında, merkezi eviricili sistemlerde ise %18,4 oranında sapma gözlemlenmiştir.

Tablo 8. Simülasyon ve gerçek üretim verileri karşılaştırma tablosu

Sistem Türü	Simülasyon Üretimi (kWh)	Gerçek Üretim (kWh)	Fark (kWh)	Fark (%)
Dizi Evirici	196.033	128.180	-67.853	-34,6%
Merkezi Evirici	178.568	145.678	-32.890	-18,4%

7.2. Sapmaların Nedenleri

Simülasyon ile gerçek üretim verileri arasındaki farkların temel nedenleri şunlardır:

a) **Meteorolojik Farklılıklar:** PVSOL simülasyonları uzun yıllar ortalaması meteorolojik verileri kullanır. 2024 yılı gerçek ısıtım değerleri ortalamanın altında kalmış olabilir.

b) **Panel Kirliliği ve Bakım:** Dizi eviricili sistemlerde geniş modül yüzeyleri ve modül sayısının fazla olması nedeniyle panel yüzeyindeki toz, kir ve diğer kirlleticiler performans kaybına yol açar.

c) **Gölgelenme:** Dizi eviricili sistemlerde gölgelenme etkileri çoklu MGNT teknolojisi ile azaltılsa da tamamen yok edilememekte ve üretimde kayıplar oluşmaktadır.

d) Evirici Verimliliği ve Isı Etkisi: Yaz aylarında artan sıcaklıklar evirici performansını olumsuz etkileyerek enerji üretimini düşürebilir.

e) Elektrik Kesintileri ve Şebeke Arızaları: Gerçek saha koşullarında meydana gelen elektrik kesintileri ve şebeke problemleri, üretimin sürekliliğini engelleyerek toplam yıllık üretimi azaltır.

f) Meteorolojik Farklar: PVSOL geçmiş ortalama iklim verilerine dayalı simülasyonlar sunar. Ancak gerçek üretim o yılın güncel hava koşullarındaki sapmalara bağlı olarak farklılık gösterebilir.

7.3. Panel Kirliliğinin Ekonomik Etkisi

Panel kirliliği elektrik üretiminin düşmesine bağlı olarak ekonomik performansı olumsuz etkiler. Türkiye gibi toz ve kir oranının yüksek olduğu bölgelerde bu etki daha da belirgindir. Düzenli temizlik maliyetleri ve bakım ihtiyaçları YGDS'yi uzatabilir. Basit bir hesaplama ile panel kirliliğinin etkisi Tablo 9'da ki gibi özetlenebilir:

Tablo 9. Panel kirliliğinin ekonomik etkisi

	Açıklama	Değer
Yıllık Üretim Tahmini	Dizi evirici sistem için	196.033 kWh
Kirlilik Kaynaklı Üretim Kaybı (%)	Panel yüzeyindeki toz ve kir nedeniyle	5%
Üretim Kaybı (kWh)	$196.033 \times 0,05$	9.801,65 kWh
Enerji Birim Fiyatı	Güncel satış fiyatı	5,74 ₺/kWh
Yıllık Gelir Kaybı	$9.801,65 \times 5,74$	56.243,47 ₺

Bu kayıp YGDS'yi uzatmakta ve sistem karlılığını azaltmaktadır.

7.4. Simülasyon için Sonuç ve Öneriler

PVSOL simülasyonları merkezi eviricili sistemler için gerçek üretim verilerine daha yakın tahminler sunarken dizi eviricili sistemlerde sapma oranı daha yüksektir. Dizi eviricili sistemlerde simülasyon sonuçlarından sapmanın yüksek olmasının başlıca sebepleri, panel kirliliği, gölgelenme, evirici arızaları ve elektrik kesintileridir.

Bu kapsamda;

- Dizi eviricili sistemlerde panel yüzey temizliği ve kirlilik kontrolü düzenli olarak yapılmalıdır.
- Evirici ve modül arızalarının erken tespiti için bakım ve kontrol sistemleri geliştirilmelidir.

- Sistem tasarımında gölgelenmenin en aza indirileceği alan seçimi ve MGNT teknolojisinin doğru kullanımı sağlanmalıdır.
- Gerçek saha koşulları ve bölgesel faktörler simülasyon analizlerine dahil edilmelidir.
- Yatırım planlamasında elektrik kesintileri ve bakım maliyetleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu önlemler sistem performansının optimize edilmesi, ekonomik faydanın artırılması ve amortisman sürelerinin kısaltılması açısından kritik öneme sahiptir.

7.5. Sınırlılıklar ve Varsayımlar

Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyon ve performans analizleri belirli sınırlılıklar ve varsayımlar çerçevesinde yürütülmüştür. Bu sınırlılıklar analiz sonuçlarının yorumlanmasında dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Modelleme sürecinde kabul edilen ideal koşullar ve saha gerçekleri arasındaki farklılıklar sonuçların pratik uygulamalara aktarımında sapmalara neden olabilmektedir.

Gerçek üretim verileri aylık bazda elde edilmiştir ve bazı aylarda eksik veya düşük çözünürlüklü kayıtlar bulunabilmektedir. Ayrıca evirici çıkış verileri panellerin üretim performansını doğrudan değil, sistemin toplam çıkışını yansıttığı için mikro düzeydeki üretim farklılıklarını gözlemlemek mümkün olmamıştır. Meteorolojik veriler ise Tipik Meteorolojik Yıl (TMY) formatında alınmış olup, yıllık ortalama değerleri temsil ettiğinden anlık ekstrem hava koşullarını tam olarak yansıtmayabilir. PVSOL simülasyonlarında kullanılan birçok parametre ideal koşulları varsaymaktadır. Örneğin:

- Panellerin yüzeyinde herhangi bir kirlenme, tozlanma ya da yaşlanma etkisi hesaba katılmamıştır.
- Gölgeleme analizleri yalnızca yazılım içindeki statik 3D modellemeye dayalı olarak yapılmış; mevsimsel değişiklikler ve geçici gölgelenme etkileri ihmal edilmiştir.
- Panel yüzey sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasında oluşabilecek farklara bağlı verim kayıpları genel ortalama değerler üzerinden tahmin edilmiştir.
- Sistem kayıpları (DC ve AC kablo kayıpları, evirici verimsizlikleri, uyumsuzluk kayıpları) üretici katalog verileri doğrultusunda standart oranlarla belirlenmiştir.

Saha uygulamalarında bakım periyotları, evirici arızaları, elektrik kesintileri ve enerji iletim kesintileri gibi etkenler üretimi doğrudan etkilemekte olup, bu durumlar simülasyona yansıtılamamaktadır. Bölgedeki yüksek toz ve kir oranları ve sahadan alınan bilgiler doğrultusunda her iki GES uygulamasında temizlik faaliyetlerinin aksatıldığı, özellikle dizi eviricili sistemde uzun süredir panel temizliği yapılmadığı tespit edilmiştir.

Bu durum simülasyon sonuçları ile saha üretimi arasındaki sapmayı artıran önemli faktörlerden biridir. Ayrıca modül performansını zamanla düşüren potansiyel kaynaklı bozulma ve ışık kaynaklı bozulma gibi uzun vadeli bozunma türleri bu simülasyon modelinde dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada karşılaştırma amacıyla yalnızca iki GES üzerinden analiz yapılmış olup sonuçların benzer kapasiteli ve coğrafi özellikteki sistemler için geçerli olduğu varsayılmıştır. Ancak farklı bölgelere panel/evirici tipine veya sistem yapılarına sahip santrallerde sonuçların farklılık gösterebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak simülasyonlar sahadaki gerçek koşulların tam yansıması olmayabilir. Yatırım ve tasarım kararlarında saha verilerinin, bölgesel koşulların, bakım durumlarının ve elektrik kesintilerinin göz önünde bulundurulması, daha sağlıklı performans ve ekonomik analizlere olanak sağlayacaktır.

7.6. Literatürle Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Simülasyon Yazılımlarının Yatırımcılar ve Tasarım Sürecindeki Rolü

Bu çalışmada kullanılan santral verimlilik analizleri, benzer koşullarda yapılan akademik çalışmalarla karşılaştırıldığında anlamlı bazı benzerlikler ve farklılıklar göstermektedir. He vd. (2021) yaptıkları çalışmada 1.8 MW'lık GES karşılaştırması, 1000 V ve 1500 V DC sistemlerin farklı iklim profillerindeki performans farklarını açık bir şekilde ortaya koymaktadır. 1500 V'luk sistemlerin sıcak iklimlerde daha az enerji kaybı ile çalıştığı, soğuk iklimlerde ise AC tarafındaki gerilim seviyesinin enerji verimini etkilediği belirtilmiştir. Sicilya'daki gölgelenme ve panel açısı sabit tutulan saha çalışmalarında mikro evirici sistemlerinin dizi evirici sistemlerine göre daha yüksek performans oranları sunduğunu ifade etmektedir (Famoso vd., 2015). Ancak gölge etkisinin az olduğu bölgelerde dizi evirici sistemlerinin yatırım maliyetine göre daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Umar ve arkadaşları (2018) ise PVSOL ve benzeri simülasyon yazılımlarının saha verileriyle yüksek tutarlılıkta sonuçlar verdiğini ve yıllık performans oranlarının %77 civarında olduğunu raporlamıştır. Bu tez çalışmasında da benzer doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Bu da kullanılan analiz yöntemlerinin geçerliliğini desteklemektedir. Yatırım planlamasında ise evirici tipi seçimi, teknik performans kadar ekonomik verimlilik açısından da kritik öneme sahiptir. Shrestha ve Shrestha (2014) Nepal'de gerçekleştirdikleri 1 MW'lık santral analizinde PVSOL simülasyonlarıyla yatırımın net bugünkü değerinin pozitif olduğunu ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğini göstermiştir. Shakeel ve Mokheimer (2022) tarafından yapılan Suudi Arabistan analizinde ise FV sistemlerin batarya depolama ile birlikte maliyet analizleri

yapılmış ve sıcak bölgelerde bu sistemlerin avantajları vurgulanmıştır. Desai ve arkadaşları (2020) Hindistan'daki saha çalışmalarında dizi eviricili sistemlerin daha yüksek elektrik üretimi sağlasa da yatırım maliyetlerinin yüksek olduğunu, ancak bakım kolaylığı ve modüler yapısı sayesinde uzun vadede ekonomik avantaj sunduğunu ortaya koymuştur. Simülasyon yazılımları yatırımcı ve tasarımcılar için sadece performans tahmini değil, aynı zamanda sistem tasarımında doğru yönlendirme sağlayan kritik araçlardır. Bu yazılımlar;

- **Doğru Evirici ve Panel Seçimi:** Farklı evirici türlerinin performans ve verimlilik karşılaştırmasını yaparak projenin saha koşullarına en uygun cihazların seçilmesini sağlar.

- **Panel Dizilim ve Dizi Yapılarının Optimizasyonu:** Panellerin konumu, açıları, gölgelenme analizleri ve arazi yapısına göre en uygun düzenlemeleri belirler.

- **Ekipman Listesi ve Sistem Tasarımı:** Tüm bileşenlerin ayrıntılı planlamasını yaparak yatırım bütçesinin gerçekçi hesaplanmasına yardımcı olur.

- **Performans ve Verimlilik Tahminleri:** Yıllık enerji üretimi, PO ve sistem kayıpları gibi kritik parametreleri öngörür.

- **Fiyatlandırma ve Finansal Planlama:** Sistem maliyetleri, bakım giderleri ve gelir tahminlerini entegre ederek YGDS ve ekonomik karlılığı destekler.

- **Proje Yönetimi:** Tasarımdan kurulum ve işletmeye kadar tüm aşamalarda karar verme süreçlerine rehberlik eder.

Sonuç olarak bu çalışma kapsamında analiz edilen dizi eviricili ve merkezi eviricili GES'lerin performans ve yatırım değerlendirmeleri, literatürdeki benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir. Ancak saha koşullarındaki bakım aksaklıkları, elektrik kesintileri ve panel kirliliği gibi faktörlerin simülasyon sonuçlarında sapmaya neden olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Sistem tasarımı ve yatırım kararlarında bu değişkenlerin dikkate alınması, projenin ekonomik ve teknik başarısını artıracaktır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Tez Bulgularının Özeti

Bu tez çalışmasında dizi ve merkezi eviricili GES'lerin performansları simülasyon sonuçları ve saha verileri karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Simülasyon yazılımlarından PVSOL'un, sistem tasarımında ve yatırım kararlarında güvenilir ve yol gösterici çıktılar sağladığı görülmüştür. Evirici tipi, sistem gerilim seviyesi ve iklim koşullarının enerji verimliliği üzerinde belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca saha koşullarından kaynaklanan panel kirliliği, bakım eksiklikleri ve elektrik kesintileri gibi faktörlerin simülasyon sonuçlarında sapmalara neden olduğu ve bu faktörlerin sistem tasarımında mutlaka dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur. Literatürle uyumlu olarak dizi eviricili sistemlerin uzun vadede bakım ve performans açısından avantajlı olduğu, ancak yatırım maliyetlerinin merkezi sistemlere göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

8.2. Bölgesel Güneş Enerjisi Stratejilerine Katkılar

Bu çalışma özellikle Türkiye gibi tozlanma ve saha bakım koşullarının performansı etkilediği bölgelerde GES'lerin daha etkin planlanmasına katkı sağlamaktadır. Bölgesel güneş enerjisi stratejilerinin oluşturulmasında, sistem tasarımı ve yatırım kararlarında simülasyon sonuçlarının referans alınması önem arz etmektedir. Böylelikle bölgeye özgü iklim ve arazi koşulları göz önünde bulundurularak daha verimli, ekonomik ve sürdürülebilir GES projeleri gerçekleştirilebilir. Bölgesel planlama ve teşvik politikalarının, saha bakımının iyileştirilmesi ve simülasyon tabanlı tasarımın desteklenmesi yönünde geliştirilmesi önerilmektedir.

8.3. Uygulayıcılara ve Yatırımcılara Yönelik Öneriler

FV sistemlerin tasarım, yatırım ve işletme süreçlerinde simülasyon yazılımlarının etkin kullanımı hayati önemdedir. Bu yazılımlar sadece performans tahmini yapmakla kalmaz, aynı zamanda maliyet analizi, ekipman seçimi ve sistem optimizasyonu için de kritik bilgiler sunar. Uygulayıcılar ve yatırımcılar için öneriler şunlardır:

- **Simülasyon Sonuçlarını Rehber Almak:** Proje planlama aşamasında simülasyon sonuçları mutlaka değerlendirilmelidir. Doğru evirici ve panel seçimi, panel dizilimlerinin optimize edilmesi ve ekipman listesinin oluşturulmasında karar vericilere yol gösterir.

- **Bakım ve Temizlik Planlarının Oluşturulması:** Performans kayıplarını minimize etmek için saha koşullarına uygun bakım ve temizlik programları uygulanmalıdır.

- **Enerji Kesintileri ve Arıza Yönetimi:** Şebeke kesintileri ve arızaların etkisini azaltmak için izleme sistemleri kurularak hızlı müdahale sağlanmalıdır.

- **Ekonomik Analizlerin Düzenli Güncellenmesi:** YGDS ve ekonomik verimlilik saha verileri ışığında periyodik olarak yeniden değerlendirilmelidir.

8.4. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tezde elde edilen bulgular ışığında GES'lerin performans analizleri ve yatırım planlamalarında daha kapsamlı ve ileri düzey çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekte yapılacak araştırmaların temel hedefi simülasyonların doğruluğunu artırmak, saha koşullarını daha iyi modellemek ve ekonomik değerlendirmeleri derinleştirmektir. Buna yönelik öneriler şunlardır:

- **Uzun Dönem ve Mevsimsel Performans İzleme:** Yıllar içindeki değişiklikleri içeren saha verileri toplanarak simülasyonların tutarlılığı test edilmelidir.

- **Yeni Teknolojilerin Karşılaştırılması:** Mikro evirici, hibrit sistemler ve ileri panel teknolojilerinin saha performansları karşılaştırılmalıdır.

- **Yapay Zeka Tabanlı Optimizasyon:** Saha verileri ve simülasyon çıktıları kullanılarak yapay zeka destekli tahmin ve optimizasyon modelleri geliştirilebilir.

- **Ekonomik ve Çevresel Etki Analizleri:** Bakım maliyetleri, kirlilik ve kesintilerin ekonomik etkileri detaylandırılmalı; sürdürülebilirlik açısından çevresel etkiler de değerlendirilmelidir.

- **Bölgesel İklim ve Arazi Verilerinin Entegrasyonu:** Daha hassas meteorolojik ve coğrafi veri kullanımı ile simülasyonların gerçekçiliği artırılmalıdır.

- **Enerji Depolama ve Hibrit Sistemlerin İncelenmesi:** Güneş enerjisi sistemlerinin enerji depolama ve diğer yenilenebilir kaynaklarla entegrasyonunun performans ve ekonomi üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Akhan, H., Emiralioglu, E., Eşer, E., Seçgin, U. K., Karabıyık, K. B., & Yenici, K. B. (2025). Fotovoltaik panellerin eğitim açısının ve malzeme çeşidinin sistem performansı üzerine etkisi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 45–59.
- Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic solar cells: A review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67.
- Arca, D., ve Keskin Çıtıröğlü, H. (2022). Güneş enerjisi santral (GES) yapım yerlerinin CBS dayalı çok kriterli karar analizi ile belirlenmesi: Karabük örneği. *Geomatik*, 7(1), 17–25.
- Atasoy, B., & Tezcan, S. S. (2021, Ekim). Comparison of string and central inverter for 10 MW PV plant. 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Türkiye, 182–186.
- Balat, H. (2005). Solar energy potential in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 23(1), 61–70.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A new silicon p–n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–677.
- Desai, A., Mukhopadhyay, I., ve Ray, A. (2020). Performance analysis of string and central inverter based ideally designed utility scale solar PV plant. 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).
- de Souza, M. B., Tiepolo, G. M., ve Urbanetz Junior, J. (2019). Determination of diffused irradiation from horizontal global irradiation – Study for the city of Curitiba. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62(spe), e19190014.
- Díez-Mediavilla, M., Dieste-Velasco, M. I., Rodríguez-Amigo, M. C., García-Calderón, T., & Alonso-Tristán, C. (2014). Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system. *Energy Conversion and Management*, 86, 1128–1133.
- Dirlik, E. E., Gezegin, C., ve Mohammadi, S. A. D. (2023). Comparison of PVsyst, PVSOL and HOMER simulation software results with real production data of solar power plants in different provinces of Turkey. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 12(2), 2357–2364.

- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (t.y.). *Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)*.
<https://gepa.enerji.gov.tr>
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025, 27 Mart). *Elektrik tarifeleri ve özel besleme ücretleri* (Rapor No. 13426). <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>
- Famoso, F., Lanzafame, R., Maenza, S., ve Scandura, P. F. (2015). Performance comparison between micro-inverter and string-inverter photovoltaic systems. *Energy Procedia*, 81, 526–539.
- Hasan, R., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., & Horan, B. (2017). Grid-connected isolated PV microinverters: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1065–1080.
- He, J., Sangwongwanich, A., Yang, Y., & Iannuzzo, F. (2021). *Performance comparison of PV inverter systems considering system voltage ratings and installation sites*. In *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 2619–2625). IEEE.
- Hoffmann, W. (2006). PV solar electricity industry: Market growth and perspective. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18–19), 3285–3311.
- Kaleshwarwar, A., ve Bahadure, S. (2023). Validating the credibility of solar simulation tools using a real-world case study. *Energy and Buildings*, 301, 113697.
- Leva, S., Nespoli, A., Pretto, S., Mussetta, M., & Ogliari, E. G. C. (2020). PV Plant Power Nowcasting: A Real Case Comparative Study With an Open Access Dataset. *IEEE Access*, 8, 194 428–194 440.
- Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., ve Georghiou, G. E. (2012). Performance of photovoltaics under actual operating conditions. In *Third Generation Photovoltaics*. IntechOpen.
- Massi Pavan, A., Castellan, S., Quaia, S., Roitti, S., & Sulligoi, G. (2007). Power electronic conditioning systems for industrial photovoltaic fields: Centralized or string inverters. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*.
- Hudişteanu, S. V., Turcanu, F. E., Cherecheş, N.-C., Popovici, C.-G., Verdeş, M., Ancaş, D.-A., & Hudişteanu, I. (2022). Effect of Wind Direction and Velocity on PV Panels Cooling with Perforated Heat Sinks. *Applied Sciences*, 12(19), 9665.
- Mohammad, A., ve Mahjabeen, F. (2023). From silicon to sunlight: Exploring the evolution of solar cell materials. *JURIHUM: Jurnal Inovasi dan Humaniora*, 1(2), 316–330.

- Bayar, M. T. (2022). Fotovoltaik sistemlerde tozlanmanın panel verimi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması (Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü). Batman Üniversitesi.
- Mussard, M., & Amara, M. (2018). Performance of solar photovoltaic modules under arid climatic conditions: A review. *Solar Energy*, 174, 409–421.
- Mühendis, A. (2020). *Maksimum güç noktası izleyicili fotovoltaik sistemin LabVIEW tabanlı kontrolü ve izlenmesi* (Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi).
- Pérez-Higueras, P. J., Almonacid, F. M., Rodrigo, P. M., & Fernández, E. F. (2018). Optimum sizing of the inverter for maximizing the energy yield in state-of-the-art high-concentrator photovoltaic systems. *Solar Energy*, 171, 728–739.
- Pérez-Astudillo, D., & Bachour, D. (2014). DNI, GHI and DHI ground measurements in Doha, Qatar. *Energy Procedia*, 49, 2398–2404.
- Pregeij, A., Begovic, M., & Rohatgi, A. (2002). Impact of inverter configuration on PV system reliability and energy production. IEEE Conference Photovoltaic Specialists (PVSC)
- Rezk, H., Tyukhov, I., Al-Dhaifallah, M., & Tikhonov, A. (2017). Performance of data acquisition system for monitoring PV system parameters. *Measurement*, 104, 204–211.
- Shakeel, M. R., ve Mokheimer, E. M. A. (2022). A techno-economic evaluation of utility scale solar power generation. *Energy*, 261, 125170.
- Shrestha, U., ve Shrestha, J. N. (2014). A techno-economic analysis of utility scale photovoltaic plant: A case study of 1 MWp plant at Trishuli. *IOE Graduate Conference*.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1), 23–29.
- Sözen, A., Arcaklioğlu, E., Özalp, M., ve Çağlar, N. (2005). Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey. *Renewable Energy*, 30(7), 1075–
- Tekdamar, D. A., ve Tekdamar, K. (2024). Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı analitik hiyerarşi yöntemi kullanılarak güneş enerjisi santrali yer seçimi: Mardin ili örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 199–212.
- Tozzi, P., ve Jo, J. H. (2017). A comparative analysis of renewable energy simulation tools: Performance simulation model vs. system optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 390–398.

- Umar, N. H., Bora, B., Banerjee, C., ve Panwar, B. S. (2018). Comparison of different PV power simulation softwares: Case study on performance analysis of 1 MW grid-connected PV solar power plant. *International Journal of Engineering Science Invention*, 7(7), 11–24.
- Uludağ, A. S., ve Doğan, H. (2018). Yenilenebilir enerji alternatiflerinin değerlendirilmesi ve uygun tesis yeri seçimi: Türkiye’de bir uygulama. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 14(2), 157–180.
- URL-1, International Energy Agency. *Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. MAYIS 2021
- URL-2, <https://www.enerjiatlası.com/gunes-enerjisi-haritasi/mardin>
- URL-3, Enerji Günlüğü. (2024a, Ocak 16). Mardin’de 40 MW’lık depolamalı GES kurulacak. <https://www.enerjigunlugu.net/mardinde-40-mwlik-depolamali-ges-kurulacak-57464h.htm>. (01 OCAK 2025)
- URL-4, Enerji Günlüğü. (2024b, Şubat 12). Exen, Mardin’de depolamalı GES kuracak. <https://www.enerjigunlugu.net/exen-mardinde-depolamali-ges-kuracak-57360h.htm>. (01 OCAK 2025)
- URL-5, Enerji Günlüğü. (2024c, Mart 20). Nusaybin’de 15 MW’lık depolamalı GES planlanıyor. <https://www.enerjigunlugu.net/mardinde-15-mwlik-depolamali-ges-kurulacak-59472h.htm>. (01 OCAK 2025)
- URL-6, Enerji Günlüğü. (2024d, Nisan 10). İsdemir, öztüketim GES sayısını artırıyor. <https://www.enerjigunlugu.net/isdemir-oztuketim-ges-sayisini-arttiriyor-59557h.htm>. (01 OCAK 2025)
- URL-7, <https://tr.dsolar.com/info/half-cut-technology-for-solar-panel-design-and-34919965.html> . 05 MAYIS 2019
- URL-8, <https://www.gunesdukkani.com/gunes-paneli>. 05 NİSAN 2025
- URL-9, Sungrow. (2023). *Sungrow debuts its new power optimizer SP600S*. <https://en.sungrowpower.com/newsDetail/3774/sungrow-debuts-its-new-power-optimizer-sp600s>. 12 MAYIS 2023
- URL-10, <https://gepa.enerji.gov.tr/>. 01 NİSAN 2025
- URL-11, <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/47.aspx>. 01 NİSAN 2025
- URL-12, Zengin, A. (2025, Şubat 6). Güneş paneli soğutma teknikleri. *EElektrik*. <https://eelektrik.tr/teknik-icerikler/gunes-paneli-sogutma-teknikleri/>. 6 ŞUBAT 2025

- U.S. Department of Energy. (2022, February). *Understanding solar photovoltaic system performance*. Federal Energy Management Program.
- Wang, H., Muñoz-García, M. Á., Moreda, G. P., ve Alonso-García, M. C. (2017). Seasonal performance comparison of three grid connected photovoltaic systems based on different technologies operating under the same conditions. *Solar Energy*, 144, 798–807.
- Yılmaz, S. (2022). Fotovoltaik sistemlerde inverter seçiminin verimliliğe etkisi. *Enerji Verimliliği ve Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 12–19.



ÖZGEÇMİŞ

Ortaöğrenimimi Mardin Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümü'nde tamamladım. 2004 yılında Dicle Üniversitesi Mardin Meslek Yüksekokulu Elektrik Bölümü'nden önlisans derecesi ile mezun oldum. 2020 yılında İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi aldım.

2004 yılından bu yana aktif olarak profesyonel çalışma hayatındayım ve bu süredir elektrik ve elektronik altyapıları alanında tedarik, montaj, devreye alma ve bakım hizmetleri veren Babaoğlu Group firmasında çalışmaktayım. Bu kapsamda, hastane, okul, alışveriş merkezi, fabrika ve GES sahaları gibi çeşitli kamu ve özel sektör projelerinde kuvvetli akım ve zayıf akım altyapıları; kesintisiz güç kaynakları, jeneratörler ve GES bileşenleri gibi ürünleri kapsayan anahtar teslim projelerin geliştirilmesi, yürütülmesi ve koordinasyonu süreçlerinde aktif rol almaktayım. Projelerin başarılı tamamlanması için teknik destek sağlamak, saha yönetimini üstlenmek, ekip koordinasyonunu yönetmek ve son kullanıcıların doğru ürünü seçebilmeleri için danışmanlık hizmeti vermek gibi sorumluluklarım bulunmaktadır.