

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KAMPÜS BİNALARINDA ÇATI ÜZERİ FOTOVOLTAİK
SİSTEMLERİN ENERJİ VE EKONOMİK ANALİZİ**

SEVDA KARTALCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Nadir İLTEN
Doç. Dr. Asiye ASLAN**

BALIKESİR, TEMMUZ – 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan **“Kampüs Binalarında Çatı Üzeri Fotovoltaik Sistemlerin Enerji Ve Ekonomik Analizi”** başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sevda KARTALCI

ÖZET

**KAMPÜS BİNALARINDA ÇATI ÜZERİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN
ENERJİ VE EKONOMİK ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SEVDA KARTALCI
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ TUĞRUL AKYOL)
BALIKESİR, TEMMUZ – 2026**

Üniversite kampüslerinde artan elektrik tüketimi, enerji maliyetlerinin yükselmesi ve sürdürülebilir enerji hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımına duyulan ihtiyaç, çatı üzeri fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesini önemli hale getirmiştir. Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan Rektörlük Binası örnek uygulama alanı olarak seçilmiş ve çatı üzerine kurulması planlanan şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin enerji ve ekonomik performansı incelenmiştir. Fotovoltaik sistemin bina enerji ihtiyacını karşılama düzeyinin belirlenebilmesi amacıyla binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçları İZODER TS 825 Hesap Programı ile hesaplanmış, fotovoltaik sistem ise PVsyst 8.1.4 yazılımında modellenmiştir. Ayrıca ortak orta gerilim aboneliğine ait elektrik tüketim verileri analiz edilerek sistemin enerji katkısı ve ekonomik uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre sistemde 418 adet monokristal fotovoltaik modül ve iki adet string invertör kullanılmış, yaklaşık 245 kWp kurulu güç için yıllık 332.673 kWh elektrik üretimi ve %81,4 performans oranı elde edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda sistemin Rektörlük Binasının elektrik tüketiminin önemli bir bölümünü ve soğutma amaçlı elektrik tüketiminin büyük kısmını karşılayabileceği belirlenmiştir. Ekonomik analiz sonuçları, yatırımın yaklaşık 5,8 yıllık geri ödeme süresine sahip olduğunu ve uzun vadede ekonomik açıdan kârlı bir yatırım olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca sistemin işletme ömrü boyunca karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayacağı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, çatı üzeri fotovoltaik sistemlerin üniversite kampüslerinde enerji maliyetlerinin azaltılması, çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi ve yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması açısından uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Ekonomik analiz, enerji analizi, fotovoltaik sistem, güneş enerjisi, pvsyst, ts 825, üniversite kampüsü

ABSTRACT

ENERGY AND ECONOMIC ANALYSIS OF ROOFTOP PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN CAMPUS BUILDINGS

MSC THESIS

SEVDA KARTALCI

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. TUĞRUL AKYOL)

BALIKESIR, TEMMUZ – 2026

The increasing electricity demand on university campuses, rising energy costs, and the need to utilize renewable energy resources effectively in accordance with sustainable energy goals have emphasized the importance of assessing the feasibility of rooftop photovoltaic (PV) systems. In this study, the Rectorate Building at Balıkesir University's Çağış Campus was selected as a case study, and the energy and economic performance of a proposed grid-connected rooftop PV system was investigated. To determine the extent to which the PV system could meet the building's energy demand, the building's annual heating and cooling energy requirements were calculated using the İZODER TS 825 Calculation Program, while the PV system was modeled using PVsyst 8.1.4. In addition, electricity consumption data from the shared medium-voltage subscription were analyzed to assess the proposed system's contribution to meeting electricity demand and its economic feasibility.

According to the simulation results, the proposed system consists of 418 monocrystalline PV modules and two string inverters, with a total installed capacity of approximately 245 kWp. The system is estimated to generate 332,673 kWh of electricity annually, with a performance ratio of 81.4%. The results indicate that the proposed system could meet a significant portion of the Rectorate Building's electricity demand, including a substantial share of the electricity consumed for cooling. The economic analysis revealed an estimated payback period of approximately 5.8 years, demonstrating the long-term profitability of the investment. Furthermore, the system is expected to contribute to reducing carbon emissions over its operational lifetime. Overall, the findings demonstrate that rooftop PV systems offer a technically, economically, and environmentally viable solution for reducing energy costs, supporting sustainable campus development, and increasing the use of renewable energy on university campuses.

KEYWORDS: Economic analysis, energy analysis, , photovoltaic system, solar energy, pvsyst, ts 825, university campus

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1 Fotovoltaik Sistemler Üzerine Yapılan Çalışmalar	4
2.1.1 Panel teknolojileri ve verimlilik karşılaştırmaları	5
2.1.2 Güneş takip sistemleri (sun-tracking) ve enerji kazancı	6
2.1.3 Çevresel faktörlerin performans üzerindeki etkileri	7
2.1.4 Açık ve konumlandırma optimizasyonu	9
2.2 PVsyst Yazılımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	10
2.3 Üniversite Kampüslerinde GES Uygulamaları	12
2.4 Enerji Yönetimi ve Ekonomik Analiz Çalışmaları	14
3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	16
3.1 Güneş Enerjisi Radyasyonu ve Balıkesir İlinin Potansiyeli	16
3.1.1 Güneş radyasyonu bileşenleri"	16
3.1.2 Radyasyon ölçüm ve tahmin yöntemleri	17
3.1.3 Açık kavramları ve geometrik ilişkiler	17
3.1.3.1 Deklinasyon açısı (δ)	18
3.1.3.2 Saat açısı (ω)	18
3.1.3.3 Zenit (θ_z) ve güneş yükseklik açısı (α)	18
3.1.3.4 Enlem açısı (ϕ)	19
3.1.3.5 Eğim (tilt) açısı (β) ve azimut açıları (γ ve γ_s)	19
3.2 Fotovoltaik Hücrenin Yapısı ve Çalışma Mekanizması	22
3.2.1 Yarı iletken yapı ve p-n eklemi	22
3.2.2 Enerji dönüşüm mekanizması (fotovoltaik etki)	23
3.2.3 Fotovoltaik karakteristik ve performans parametreleri	24
3.3 PV Teknolojileri	25
3.3.1 Birinci nesil: kristal silikon (c-si) teknolojileri	25
3.3.2 İkinci nesil: ince film teknolojileri (TFS)	27
3.3.3 Üçüncü nesil: yeni nesil teknolojiler	27
3.3.4 Dördüncü nesil: İnorganik-Organik Hibrit Teknolojiler	28
3.4 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri	28
3.4.1 FV modüller ve verimlilik parametreleri	29
3.4.2 İnvertörler ve mppt teknolojisi	30
3.4.3 Taşıyıcı konstrüksiyon ve montaj sistemleri	31
3.4.3.1 Güneş takip sistemleri (tracker)	32
3.4.4 Enerji depolama ve batarya sistemleri	34
3.5 Fotovoltaik Sistem Tipleri	36
3.5.1 Şebekeden bağımsız (off-grid / stand-alone) sistemler	36
3.5.2 Şebekeye bağlı (on-grid / grid-tied) sistemler	36
3.5.3 Hibrit fotovoltaik sistemler	37

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

3.6 Fotovoltaik Sistemlerin Ekonomik Performans Göstergeleri	37
3.6.1 Yatırım Maliyetleri (CAPEX) ve İşletme Giderleri (OPEX).....	36
3.6.2 Net Bugünkü Değer (NBD).....	36
3.6.3 İç Kârlılık Oranı (İKO)	37
3.6.4 Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE).....	36
3.6.5 Geri Ödeme Süresi (GÖS).....	37
4. MATERYAL VE METOD	39
4.1 Çalışma Alanının Tanıtımı.....	39
4.2 Elektrik Tüketim Verilerinin Analizi.....	40
4.2.1 Ortak Elektrik Tüketiminin Bina Bazında Tahmini Dağılımı.....	42
4.3 Konumsal ve Geometrik Analiz	44
4.3.1 Çalışma alanının koordinat ve rakım bilgileri.....	44
4.3.2 Fotovoltaik sistem kurulacak çatı alanlarının belirlenmesi.....	45
4.4 Bina Enerji İhtiyacının Belirlenmesi	47
4.4.1 İZODER TS 825 yazılımının tanıtımı.....	47
4.4.2 Rektörlük binasının TS 825 modelinin oluşturulması ve enerji ihtiyacının hesaplanması	48
4.5 Fotovoltaik Santralin Enerji ve Ekonomik Modellemesi.....	52
4.5.1 Modelleme yazılımının tanıtımı.....	52
4.5.2 Simülasyon modelinin oluşturulması.....	53
4.5.2.1 Fotovoltaik modülün seçimi ve tanımlanması.....	54
4.5.2.2 İnverter seçimi ve tanımlanması.....	57
4.5.2.3 Taşıyıcı konstrüksiyon ve montaj sisteminin tanımlanması.....	58
4.5.2.4 Sistem kayıplarının ve çalışma parametrelerinin tanımlanması.....	59
4.6 Ekonomik Analiz Yöntemi.....	62
4.6.1 Yatırım ve İşletme Maliyetleri ile Elektrik Gideri Tasarrufunun Hesaplanması	62
4.6.2 Finansal Performans Göstergeleri ve Hesaplama Yöntemleri.....	53
4.7 Karbon Emisyonu Azaltımının Belirlenmesi.....	65
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	61
5.1 İZODER TS 825 Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	66
5.2 PVsyst Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	69
5.3 PVsyst Kayıplar Diyagramının Değerlendirilmesi	73
5.4 Fotovoltaik Sistemin Enerji Karşılama Potansiyelinin Değerlendirilmesi	77
5.5 Ekonomik Analiz	79
5.5.1 Yıllık Elektrik Gideri Tasarrufunun Hesaplanması	79
5.5.2 Yatırım ve İşletme Maliyetleri.....	81
5.5.3 Finansal Performans Göstergelerinin Değerlendirilmesi.....	82
5.6 Karbon Emisyonu Azaltımının Değerlendirilmesi.....	86
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	88
6.1 Sonuçlar.....	88
6.2 Öneriler.....	90
7. KAYNAKLAR.....	93
EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: 2024 yılı küresel fotovoltaik kurulu gücü ve yıllık kapasite artışı.	1
Şekil 2.1: 2014–2024 yılları arasında yıllık fotovoltaik kurulum, modül üretimi ve modül üretim kapasitesinin değişimi.....	4
Şekil 3.1: Güneş ışınlarının doğrudan, yayılı ve yansıyan radyasyonları.	17
Şekil 3.2: Güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açıları	20
Şekil 3.3: Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA)	20
Şekil 3.4: Balıkesir İli güneş potansiyeli ve toplam güneş radyasyonu (GEPA).....	21
Şekil 3.5(a): Balıkesir global radyasyon değerleri (kWh/m ² -Gün).....	21
Şekil 3.5(b): Balıkesir güneşlenme süreleri (Saat).....	21
Şekil 3.6: Çeşitli kalınlıklarda güneş hücreleri	22
Şekil 3.7: Valans ve iletkenlik bandı.....	23
Şekil 3.8: PV hücrenin çalışma ilkesi	24
Şekil 3.9: Güneş hücresinin tipik akım-gerilim (I-V) karakteristiği	25
Şekil 3.10: Çeşitli güneş hücreleri	26
Şekil 3.11: İnce film hücre	27
Şekil 3.12: Sistem bileşenleri şematik diyagramı (Shirzadi vd., 2020).	29
Şekil 3.13: Fotovoltaik hücrelerin bağlanması	29
Şekil 3.14: Çelik taşıyıcı konstrüksiyon	32
Şekil 3.15: Farklı türde takip sistemleri	34
Şekil 4.1: Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü.....	39
Şekil 4.2: Çalışma alanının toplam elektrik tüketimindeki payı	41
Şekil 4.3: Çalışma alanına ait konum, koordinat ve rakım bilgileri (Google Earth, 2026) ..	45
Şekil 4.4: Rektörlük çatı alanının sınırlarının Google Earth yazılımındaki görüntüsü.....	46
Şekil 4.5: Rektörlük Binası Çatısı Mimari Çizimi	46
Şekil 4.6: PVsyst yazılımında izlenen simülasyon süreci	53
Şekil 4.7: PVsyst’te oluşturulan üç boyutlu bina modeli ve fotovoltaik modül yerleşimi..	61
Şekil 5.1: Model Parametreleri ile gerçekleştirilen fotovoltaik modülün temel akım-gerilim (I-V) karakteristiği ve matematiksel model uyumu	71
Şekil 5.2: JinkoSolar JKM585N-72HL4-V fotovoltaik modülünün farklı ışınım seviyelerindeki akım-gerilim (I-V) karakteristik eğrileri (PVsyst Yazılımı).....	71
Şekil 5.3: PVsyst yazılımında oluşturulan fotovoltaik sistemin dizi gerilimi, inverter güç boyutlandırması ve inverter çıkış güç dağılımı analizi	72
Şekil 5.4: Kayıplar Diyagramı	74
Şekil 5.5: Kayıp bileşenlerinin PV dizi davranışı üzerindeki etkisi	75
Şekil 5.6: İz o gölgelenme eğrileri	76
Şekil 5.7: Fotovoltaik sisteme ait yatırım ve işletme maliyetleri.....	81
Şekil 5.8: PVsyst ekonomik analiz sonuçları	83
Şekil 5.9: PVsyst ayrıntılı ekonomik analiz sonuçları	84
Şekil 5.10: Yıllık net ekonomik fayda ve birikmiş nakit akışı.....	85
Şekil 5.11: Fotovoltaik sistemin CO ₂ emisyon bilançosu.....	86

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: Rektörlük ve Mühendislik Fakültesi OG aboneliği 5 yıllık tüketim ortalaması	41
Tablo 4.2: Binaların yıllık simülasyon elektrik tüketimleri ve tahmini tüketim payları	46
Tablo 4.3: Rektörlük binası çatı alanı ölçüm sonuçları	48
Tablo 4.4: TS 825 hesaplamalarında kullanılan temel bina parametreleri	49
Tablo 4.5: Rektörlük binası dış duvar yapı elemanı katmanları	50
Tablo 4.6: Dış duvar alanlarının yönlerine göre dağılımı.....	50
Tablo 4.7: Teras çatı yapı elemanı katmanları.....	50
Tablo 4.8: Toprağa temas eden taban döşemesi katmanları	51
Tablo 4.9: Dış ortama bakan pencere ve kapı alanlarının yönlerine göre dağılımı	56
Tablo 4.10: Seçilen fotovoltaik modülün teknik özellikleri	56
Tablo 4.11: Seçilen inverterin teknik özellikleri	72
Tablo 4.12: Ekonomik analizde kullanılan EPDK çok zamanlı OG kamu tarifesi.....	62
Tablo 5.1: Rektörlük TS 825 U değerleri	66
Tablo 5.2: Rektörlük TS 825 enerji ihtiyacı sonuçları ve soğutma elektrik eşdeğeri.....	66
Tablo 5.3: PVSyst simülasyon sonuçları.....	69
Tablo 5.4: Tek diyotlu model parametreleri	70
Tablo 5.5: Farklı ışınlama seviyelerinde maksimum güç noktası değerleri.....	72
Tablo 5.6: Fotovoltaik sistemin enerji karşılama oranları.....	78
Tablo 5.7: Pvsyst yazılımında E_Grid için aylık saatlik toplam (kWh).....	79
Tablo 5.8: PV üretiminin zaman dilimlerine göre dağılımı.....	80

SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
AC	: Alternatif Akım
CO₂	: Karbondioksit
COP	: Performans Katsayısı
DC	: Doğru Akım
FV	: Fotovoltaik
GW	: Gigawatt
kg	: Kilogram
kg/m³	: Yoğunluk
kWh	: Kilowatt-saat
kWh/m²	: Birim Alan Başına Enerji
kWp	: Kilowatt Tepe Gücü
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
mV/°C	: Milivolt/Santigrat Derece
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt-saat
MWp	: Megawatt Tepe Gücü
Na	: Nanoamper
OG	: Orta Gerilim
Ω	: Ohm (Direnç)
PDC	: Doğru Akım Kurulu Gücü
PR	: Performans Oranı
PVPS	: Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı
V	: Volt
W	: Watt
W/m²	: Işınım Şiddeti
W/m²K	: Isıl Geçirgenlik Katsayısı
W/mK	: Isıl İletkenlik Katsayısı

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan Rektörlük Binası çatısında fotovoltaiik sistem uygulanabilirliğinin enerji ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma süreci boyunca yenilenebilir enerji sistemleri, bina enerji performansı ve fotovoltaiik sistemlerin teknik ve ekonomik değerlendirilmesi konularında edinilen bilgi ve deneyimler, bu tezin ortaya çıkmasında önemli bir yere sahip olmuştur.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve değerli görüşleriyle bana yol gösteren, çalışmanın her aşamasında katkı ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Tuğrul AKYOL’a teşekkür ederim.

Ayrıca, “enerji dolu” bu eğitim basamağına çıkmama vesile olan, bu süreçte bilgi ve deneyimleriyle katkı sağlayan eş danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Ayşe ÖZDOĞAN DÖLÇEK’e gönülden teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, üniversite kampüslerinde güneş enerjisinden yararlanılmasına yönelik yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

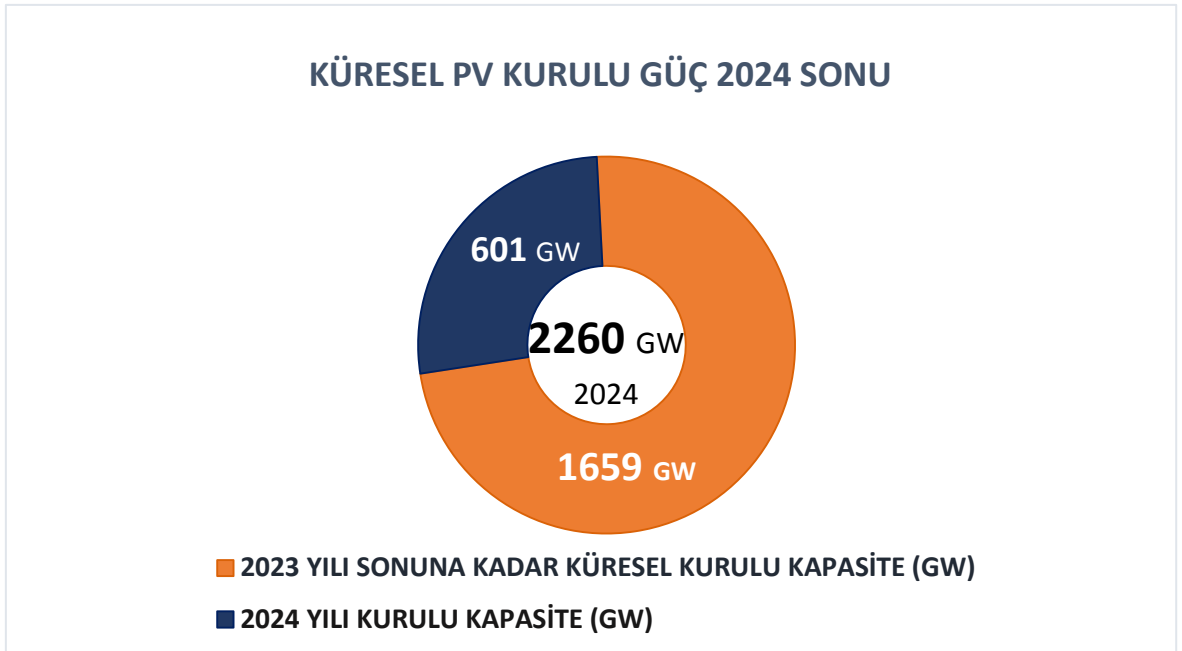
Balıkesir, 2026

Sevda KARTALCI

1. GİRİŞ

Enerji, ülkelerin ekonomik ve toplumsal gelişmişlik düzeyini etkileyen temel unsurlardan biridir. Nüfus artışı, kentleşme, teknolojik gelişmeler ve yaşam standartlarındaki yükselme elektrik enerjisi talebini sürekli artırmaktadır. Buna karşılık, enerji üretiminde fosil yakıtlara bağımlılık; kaynakların tükenme riski, enerji maliyetlerindeki dalgalanmalar, sera gazı emisyonları ve iklim değişikliği gibi çevresel ve ekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle enerji arzının güvenilir, düşük maliyetli ve çevresel açıdan sürdürülebilir kaynaklara dayandırılması önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi; yaygın erişilebilirliği, işletme sürecindeki düşük emisyon düzeyi, modüler yapısı ve bina çatılarına uygulanabilmesi nedeniyle öne çıkmaktadır.

Küresel ölçekte fotovoltaik teknolojilerdeki gelişmeler ve kurulum maliyetlerindeki düşüş, güneş enerjisinden elektrik üretiminin dünya genelinde hızla yaygınlaşmasını sağlamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı IEA'nın yayınladığı IEA PVPS (2025) verilerine göre 2024 yılında yaklaşık 601 GW yeni fotovoltaik kapasite kurulmuş ve toplam kurulu güç 2260 GW seviyesine ulaşmıştır Şekil 1.1. Bu durum, fotovoltaik teknolojilerin enerji dönüşümündeki öneminin giderek arttığını göstermektedir.



Şekil 1.1: 2024 yılı küresel fotovoltaik kurulu gücü ve yıllık kapasite artışı.

Kaynak: IEA PVPS (2025)'ten uyarlanmıştır.

Türkiye, coğrafi konumu ve güneşlenme koşulları bakımından fotovoltaik enerji üretimi için önemli bir potansiyele sahiptir. Ülkenin farklı bölgelerinde güneş enerjisi yatırımları yaygınlaşırken, Marmara Bölgesi'nde yer alan Balıkesir de çatı üzeri fotovoltaik uygulamalar açısından elverişli koşullar sunmaktadır. Balıkesir için yıllık ortalama güneşlenme süresinin 2690 saat, toplam güneş ışıınının ise 1421 kWh/m²-yıl olduğu bildirilmektedir (Emikönel ve Bilhan, 2022). Bu değerler, Balıkesir'de bulunan kamu yapılarının kullanılabilir çatı alanlarının yerinde elektrik üretimi amacıyla değerlendirilmesini desteklemektedir.

Üniversite kampüsleri, içerisinde barındırdığı on binlerce öğrenci, çok sayıda akademik ve idari personel, laboratuvarlar, sağlık hizmeti veren birimleri ve çeşitli sosyal alanları ile adeta küçük birer şehir gibi çalışmaktadır. Bu kadar yoğun bir nüfusun ve teknik ekipmanın bulunduğu kampüslerde enerji tüketimi de oldukça yüksektir. Geniş çatı alanlarının fotovoltaik sistemlerle değerlendirilmesi, şebekeden satın alınan elektrik miktarını ve enerji giderlerini azaltırken kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sağlayabilir. Üniversitelerin kendi enerjilerini üretmesi, sadece ekonomik bir kazanç sağlamakla kalmayarak, aynı zamanda "Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi" vizyonu doğrultusunda kamu kurumlarında yenilenebilir enerji kullanımının artırılması bakımından da önem taşımaktadır.

Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi'nde akademik ve idari faaliyetlerin sürdürülebilmesi için önemli miktarda elektrik enerjisi tüketilmektedir. Yerleşkenin 2025 yılı elektrik tüketim verileri incelendiğinde, ortak orta gerilim aboneliğine bağlı Rektörlük ve Mühendislik-Mimarlık Fakültesi binalarının kampüsün başlıca tüketim merkezleri arasında yer aldığı görülmüştür. Bu binaların enerji ihtiyacının tamamen şebekeden karşılanması işletme giderlerini artırmakta ve mevcut yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmeden kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, kullanılabilir bina çatı alanlarının öz tüketime yönelik fotovoltaik sistemler açısından incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi'nde bulunan Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin enerji üretim performansını ve ekonomik katkısını belirlemektir. Fotovoltaik üretimin, Rektörlük Binası ile aynı orta gerilim aboneliğine bağlı Mühendislik-Mimarlık Fakültesi binalarının ortak

elektrik tüketimini karşılama oranı değerlendirilmiştir. Ayrıca sistem üretiminin Rektörlük Binasının teorik iklimlendirme enerji ihtiyacına ve özellikle chiller sisteminin elektrik tüketimine sağlayabileceği katkı incelenmiştir. Böylece çatı üzeri fotovoltaik uygulamanın kampüs ölçeğindeki öz tüketim potansiyelinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

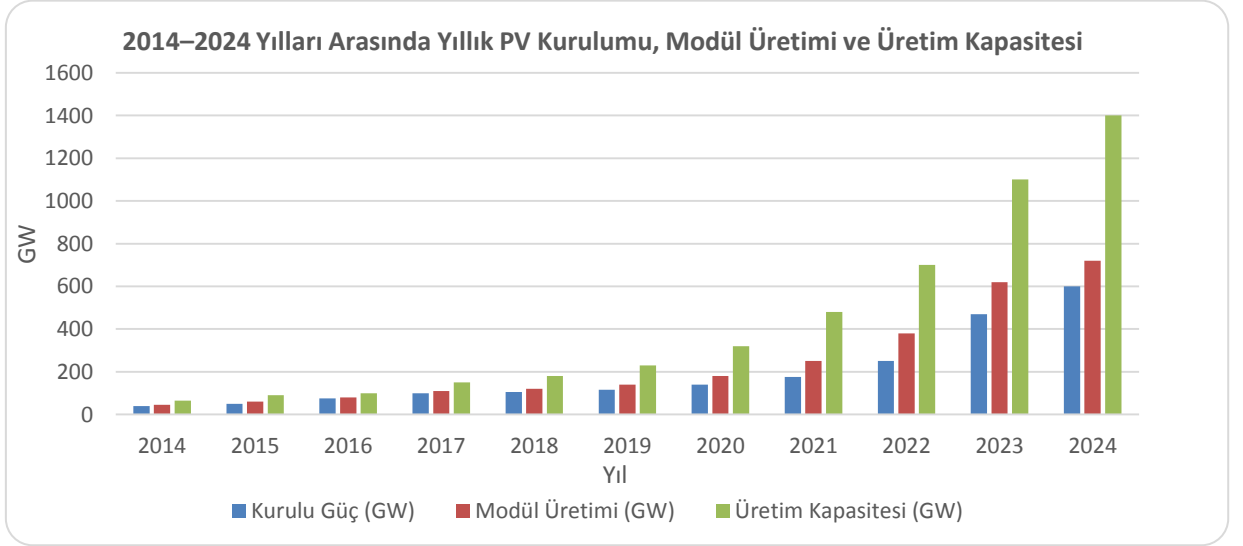
Çalışma, fotovoltaik sistemin yalnızca Rektörlük Binası çatı alanında kurulması ve üretilen elektriğin ortak abonelik kapsamındaki yüklerde değerlendirilmesiyle sınırlandırılmıştır. İncelenen sistem şebekeye bağlı ve bataryasız olarak ele alınmış; şebekeden bağımsız, enerji depolamalı ve hibrit sistemler kapsam dışında bırakılmıştır. Enerji ve ekonomik değerlendirmelerde 2025 yılı elektrik tüketim verileri ile öz tüketim yaklaşımı esas alınmıştır.

Çalışma kapsamında Rektörlük Binasının teorik ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı belirlenmiş, çatıya kurulabilecek fotovoltaik sistem modellenmiş ve yıllık elektrik üretimi hesaplanmıştır. Elde edilen üretim değerleri ortak aboneliğin elektrik tüketimi, binanın iklimlendirme enerji ihtiyacı ve geçerli elektrik tarifesiyile karşılaştırılarak sistemin enerji ve ekonomik katkısı değerlendirilmiştir. Kullanılan veriler, yazılımlar, sistem bileşenleri ve hesaplama adımları Materyal ve Metot bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Çalışmadan elde edilen bulguların, Balıkesir Üniversitesi'nde gelecekte planlanabilecek çatı üzeri fotovoltaik yatırımlarına teknik ve ekonomik bir temel oluşturması; benzer tüketim profiline sahip üniversite kampüsleri ve kamu yapıları için yol gösterici olması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

IEA'nın yayınladığı PVPS 2025 raporuna göre Fotovoltaik teknolojilerin gelişimi Şekil 2.1'de görüldüğü üzere son on yılda hızlı bir aşama kaydetmiştir. Artan enerji talebi, yenilenebilir enerji politikaları ve fotovoltaik modül maliyetlerindeki düşüşler, küresel çapta PV kurulumlarının hızla yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 2.1: 2014–2024 yılları arasında yıllık fotovoltaik kurulum, modül üretimi ve modül üretim kapasitesinin değişimi.

Kaynak: IEA PVPS (2025) verileri kullanılarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

Güneş enerjisi sistemleri, fosil yakıtlara olan gereksinimi azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği güvence altına almak amacıyla dünya genelinde en çok araştırılan konular arasında yer almaktadır. Literatürdeki çalışmalar; simülasyon yazılımlarının doğruluğu, sistemlerin teknik verimliliği ve kampüs ölçeğindeki faaliyetlerin ekonomik geri dönüşleri üzerinde yoğunlaşmaktadır.

2.1 Fotovoltaik Sistemler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatürde fotovoltaik sistemlerin performansını artırmaya, verimlilik kayıplarını azaltmaya ve sahaya özgü en uygun teknolojiyi belirlemeye yönelik akademik çalışmalar oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Yapılan çalışmalar yaygın olarak panel teknolojileri, güneş takip sistemleri, çevresel değişkenlerin (kirlilik, sıcaklık, gölgeleme) etkileri ve açı optimizasyonları kapsamında yoğunlaşmaktadır.

2.1.1 Panel teknolojileri ve verimlilik karşılaştırmaları

Literatürde fotovoltaik panel teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar; monokristal, polikristal ve amorf silikon gibi alternatif tiplerin verimlilik ve performans oranlarını (PR) bölge bazlı verileri kullanarak ortaya koymaktadır. FV panel seçiminde verimlilik ve performans oranı en kritik parametrelerdir.

Özdemir ve Özmen (2023), Düzce’de gerçekleştirdikleri çalışmada 2014–2019 yılları arasındaki yaz aylarını kapsayan analizler sonucunda monokristal (m-Si) panellerin %12,29 ortalama verim ve %84,0 performans oranı ile en başarılı teknoloji olduğunu belirlemiştir. Polikristal (p-Si) panellerde ortalama verim %10,9, performans oranı %78,0; amorf silisyum (a-Si) panellerde ise verim %4,8, performans oranı %75,9 olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar, elde edilen sonuçlara göre Düzce gibi nemli ve yağışlı iklim koşullarında enerji üretim potansiyeli en yüksek seçeneğin monokristal paneller olduğunu ortaya koymuştur.

Arslan (2018), Tekirdağ şartlarında 150 W gücündeki monokristal ve polikristal panelleri analiz ederek kıyas yapmışlardır. Analiz sonucunda monokristal verimi %15, polikristal verimi ise %14,9 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada monokristal panellerin üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgilerdeki ($\pm$ %5)’lik tolerans değerlerine %50 oranında uyum sağladığı, polikristal verilerinin ise tamamen bu sınırların dışında kalarak etiket değerlerinden saptığı tespit edilmiştir. Yaz aylarındaki yüksek sıcaklıklarda (30°C ile 36°C) yapılan bu bulgular sonucunda bölgedeki yatırım kayıplarını önlemek adına monokristal teknolojisinin daha öngörülebilir ve güvenilir bir performans sunduğunu sonucuna varılmıştır.

Karaağaç vd. (2021), Sinop ilinde yaptıkları deneysel analizde bölgeye gelen ışınmı maksimize etmek amacıyla optimum panel eğim açısını 38° olarak belirlemiş; bu açıya istinaden yapılan ölçümlerle panel verimleri monokristal için %16,2, polikristal için ise %13,9 olarak hesaplamışlardır. Analiz sonucunda, monokristal paneller saatlik ölçümler ile daha yüksek güç çıkışı sağlamıştır. Ayrıca çalışma, doğru panel seçiminin yatırım kayıplarını önlemede kritik rolünü ortaya koymuştur.

Gençgönül vd. (2024) tarafından Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (ISUBÜ) kampüsü için yapılan analizde, farklı panel teknolojilerini karşılaştırarak, monokristal

panellerin polikristal sistemlere göre yıllık 0,9 MWh daha fazla üretim sağladığını ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, çalışmanın ilerleyen süreçlerinde hücre yapısının verimliliğe etkisini inceleyerek, monokristal half-cut panellerin yıllık 183.610 kWh üretim değerine ulaştığını, standart monokristal panellerin ise yıllık 181.590 kWh üretim düzeyinde kaldığını saptamışlardır. Aradaki 2,02 MWh'lik bu verimlilik farkın, half-cut teknolojisinin iç direncinin düşük olmasından ve yüksek hücre sayısından (120 hücre) kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Sarı ve Özyiğit (2020), Sivas Cumhuriyet Üniversitesi yerleşkesi için PVsyst simülasyonu ile monokristal ve polikristal panel teknolojilerinin verimlilik performanslarını karşılaştırmıştır. Analiz sonucunda monokristal panellerin STC altındaki verimi %16,14, polikristal panellerin ise %15,98 olarak belirlenmiştir. Bu fark yıllık enerji üretimine yansımış; yaklaşık 1 MW kurulu güce sahip sistemlerde monokristal panellerin 1.553 MWh, polikristal panellerin ise 1.542 MWh enerji üreteceği hesaplanmıştır. Araştırmacılar, monokristal panellerin yüksek verim avantajı sayesinde kurulum maliyetindeki farkı telafi ederek 30 yıllık işletme süresinde 29.800 \$ daha fazla net kazanç sağladığını ve üniversite projeleri için daha uygun bir seçenek olduğunu belirtmiştir.

2.1.2 Güneş takip sistemleri (sun-tracking) ve enerji kazancı

Takip sistemleri, panellerin güneş ışınlarını sürekli dik almasını sağlayarak sabit sistemlere oranla önemli ölçüde üretim artışı sağlamaktadır.

Kadir (2024), Balıkesir'in Bigadiç ilçesindeki 1,17 MWp gücündeki GES üzerinde yaptığı PVsyst simülasyonlarında; mevcut sabit eğimli sistem yerine çift eksenli güneş takip sistemi kullanılması sonucunda yıllık elektrik üretiminin %36,01 oranında artacağını tespit etmiştir. Bu çalışmada, yatay Kuzey-Güney eksenli tek eksenli takip sisteminin ise üretimi %22,69 oranında artırdığı gözlemlenerek en iyi ikinci alternatif olarak rapor edilmiştir.

Aktaş ve Kocaman (2024) tarafından Bitlis ilinde yürütülen benzer bir çalışmada, sabit sistemlere göre tek eksenli takipte %25, çift eksenli takipte ise %42 daha fazla olduğu, bunun net üretime sırasıyla %25 ve %41 oranında yansiyarak çift eksen takipçi düzlemli sistemlerin referans enerji miktarını sabit sistemlere göre %42 oranında artırdığını tespit etmişlerdir.

Eke ve Şentürk (2012), Muğla Üniversitesi yerleşkesinde yaptıkları deneysel çalışmada, iki eksenli güneş takip sisteminin 28° sabit açılı sisteme oranla %30,79 daha fazla elektrik ürettiğini tespit etmişlerdir.

Nuhoğlu (2017), Konya’da yaptığı çalışmada, tek eksenli takip sisteminin sabit sisteme oranla %23 daha fazla verim sağladığını saptamıştır.

Girgin (2011) ise Karaman’da yaptığı analizde 5 MW’lık bir santral tasarımı düzenleyerek, tek eksenli sistemlerin üretimi %24’e kadar, çift eksenli sistemlerin ise %35’e kadar artırdığını saptamıştır.

Kayri (2023), Deneysel verilerle bu artışı destekleyen çalışmasıyla Batman Üniversitesi’nde kurduğu tek eksenli güneş takip sisteminin yıllık bazda %30,84 verim artışı sağladığını raporlamıştır.

Çınaroğlu (2021) tarafından yapılan karşılaştırmalı analizlerde de, çift eksenli takip sistemlerinin yalnızca en yüksek enerji üretimini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda panel ve sistem verimliliğindeki kayıpları da en düşük seviyeye indirdiği vurgulanmıştır.

2.1.3 Çevresel faktörlerin performans üzerindeki etkileri

Dış ortam koşullarına tam bağımlı olarak faaliyet gösteren Güneş enerjisinden elektrik üretim süreci, çeşitli çevresel etkiler sebebiyle kayıplara maruz kalmaktadır. Literatürde, fotovoltaik sistemlerin performansını etkileyen belli başlı çevresel etkenlerin sıcaklık, kirlenme, gölgeleme, rüzgar hızı ve nem olduğu ortaya konmuştur.

Keskin vd. (2021), Samsun’da yaptığı çalışmada, bir transformatör binasının sebep olduğu gölgelemenin 30 kW’lık bir dizi üzerindeki etkisini 12 ay boyunca takibini yaparak analiz etmiştir. Analiz sonucunda, gölgeleme nedeniyle toplam güç kaybının yıllık 307 kWh (%0,66) olduğu sonucuna varılmış olup, bu tip kayıpların 30 yıllık işletme ömründe MW ölçeğinde enerji kaybına yol açabileceği tespit edilmiştir.

Akyürek vd. (2021), laboratuvar ortamında uyguladıkları deneysel çalışmada, paneldeki hücrelerin 1/36 ve 2/36 oranında gölgelenmesinin panel karakteristiğine olan etkisini analiz

etmiştir. Çalışmada, kısmi gölgeleme halinde elde edilen maksimum güçte %33,69 ile %48,84 arasında değişen oranlarda ciddi kayıplar yaşandığı kanıtlanmıştır.

Akhan vd. (2025), Edirne iklim koşullarında PV verimini etkileyen parametreleri analiz etmiş; güneş ışınımının artışı ile gücün arttığını, ancak hücredeki sıcaklığın her artışının güç üretimini azalttığını vurgulamıştır. Analizde ayrıca, gölgeleme etkeninin üretimdeki gücü yaklaşık 6 kat düşürdüğü ve tozlanma etkeninin panelin ışık geçirgenliğini ciddi ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Karaağaç vd. (2021), Sinop ili özelinde yaptığı çalışmalarda fotovoltaik panellerin performansının güneş ışınımı ve sıcaklığa ek olarak rüzgâr ve nemden de doğrudan etkilendiğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, bu etkenlerin doğru analiz edilmesi gerekçesinin bölgeye özgü panel seçimi ve verim kayıplarının önlenmesi bakımından hayati önem taşıdığını vurgulamışlardır.

Güven (2022), Denizli ilinde çalıştığı analizde panel sıcaklığının her 1 °C'lik artışı ile verimin %0,5 düştüğünü, 5 °C'lik bir artışı ise toplamda %0,3'lük bir genel verim kaybına yol açtığını raporlamıştır.

Yazdani ve Yaghoubi (2022), toz birikiminin PV paneller üzerindeki etkisini inceleyerek, günlük ortalama güç kaybının kısa devre akım kaybına kıyasla yaklaşık %9 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, toz yoğunluğunda meydana gelen artışla birlikte güç düşüşünde meydana gelen azalmanın doğrusal olmayan biçimde hız kazandığı ortaya konmuştur.

Demiryürek vd. (2020), gerçekleştirdikleri bir güneş santrali simülasyonunda çevresel kaynaklı kayıplar ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, panel sıcaklık kaybı %8,7, tozlanma ve karlanma kaybı %3, panel yansıma kaybı ise %2 olarak hesaplanmış; böylece çevresel koşulların sistemin nihai enerji üretimi üzerindeki toplam etkisi ortaya konmuştur.

Kaldellis ve Fragos (2011), panel yüzeyinde toz birikiminin 0,4 mg/cm² seviyesine ulaşması durumunda enerji değerinde yaklaşık %30 oranında düşüş meydana geldiği

belirlemiştir. Kirlenme kaynaklı bu performans kaybının, verimlilik bazında saatlik yaklaşık %1,5'lik bir azalmaya karşılık geldiği rapor etmiştir (Akhan vd., 2025).

2.1.4 Açı ve konumlandırma optimizasyonu

Fotovoltaik sistemlerden elde edilecek enerji miktarı, panellerin konumlandırıldığı eğim açısı ve yönelim (azimut) değerlerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Yaygın olarak kabul gören bir yaklaşıma göre, kuzey yarımkürede yer alan sistemlerin en yüksek ışıınım seviyeden faydalanabilmesi amacıyla doğrudan güneye (azimut = 0°) yönlendirilmesi ve eğim açısının bölgenin enlem değerine yakın olacak şekilde belirlenmesi tavsiye edilmektedir.

Maksimum ışıınım seviyesinden yararlanabilmek için panel eğim açısının (tilt) uygun şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Dal (2021) tarafından Kayseri ilinde gerçekleştirilen çalışmada, PVGIS kullanarak, sabit bir yıllık eğim açısı (29,5°) yerine açıların aylık olarak değiştirilmesinin verimi %4,11, mevsimsel olarak değiştirilmesinin %3,25 oranında artırdığını belirlemiştir. Ayrıca, altı aylık (yılda iki kez) değişimlerin %2,99 oranında iyileşme sağladığı saptanmıştır. Araştırmacı, uygulama kolaylığı ve verim ve işçilik dengesi açısından değerlendirdiğinde, panellerin yılda iki kez optimize edilmesinin en uygun yöntem olduğunu vurgulamıştır.

Kallioğlu (2023), güneş potansiyeli yüksek olan Van ilinde gerçekleştirdiği çalışmada, yıllık optimum panel eğim açısı değerini 30,54° olarak belirlemiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, açıların aylık olarak optimize edilmesi durumunda yıllık veriminin yatay düzleme kıyasla %14 oranına kadar artırılabilceği ortaya konmuştur Bunun yanı sıra araştırmacı, bölgenin enlemine özgü optimum açı değerinin tahmin edilmesi amacıyla, güvenilirlik katsayısı yüksek (R^2 : 0,90-0,99) 8 farklı matematiksel regresyon modeli tasarlamıştır.

Güner (2023), Iğdır ili kapsamında yürütülen çalışmada, aylık optimum eğim açılarının Haziran ayında 0° olduğu, Ocak ve Aralık aylarında ise 58° seviyelerine ulaştığını ortaya konmuştur. Panellerin sadece enlem açısına göre konumlandırılması yerine aylık optimum açılar dikkate alınarak yerleştirilmesinin, Mayıs-Temmuz döneminde enerji üretiminde yaklaşık %13,35 ile %20,89 oranında artış sağladığı ifade edilmiştir.

Geliş vd. (2020) tarafından laboratuvar ortamında 120 W gücündeki bir panel ile gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, ışık kaynağı ile panel arasındaki açı değişiminin (0° , 20° ve 40°) güç üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, açı değerinin artmasıyla birlikte güç üretim performansında önemli düzeyde artış meydana geldiğini göstermiştir. Araştırmacılar, panel açısındaki her sapmanın amortisman süresini uzattığını ve proje tasarım sürecinde açılardırmanın, konum seçiminden daha kritik bir unsur olduğunu vurgulamışlardır.

Diğer bölgesel çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Karaağaç vd. (2021), Sinop ili için yaptıkları analizde optimum panel açısını 38° olarak rapor ederken; Ulgen (2006) İzmir İli için yıllık optimumu $30,3^\circ$, Kacira vd. (2004) ise Şanlıurfa için aylık optimum açıların 13° ile 61° arasında değiştiğini saptamışlardır.

Ayrıca Morad vd. (2018), Bağdat çevresindeki şehirler için yıllık sabit ideal açının 31° olduğunu ve bu açı değerinden sapmalar yaşandığında doğrudan toplam çıktı kaybına sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

2.2 PVsyst Yazılımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Dünya çapında "endüstri standardı" olarak kabul edilen PVsyst yazılımı, Güneş enerjisi santrallerinin (GES) tasarım ve performans analizinin yapılması gerektiği çalışmalarda, fotovoltaik sistemlerin simülasyonu ve veri analizi kabiliyeti bakımından en güvenilir yazılım araçlarından biridir. Literatürde yer alan çok sayıda çalışma, yazılımın ürettiği tahminlerin gerçek saha verileriyle son derece düşük hata payları ile uyum sağladığını ve yatırım öncesi fizibilite raporları için güvenilir sonuçlar sunduğunu kanıtlamaktadır. Literatürdeki sahada yapılan çalışmalarda, PVsyst yazılımının gerçek üretim değerlerini %0,5 ile %5 arasında değişen hassasiyetle hesapladığı ortaya konulmuştur.

Demiryürek vd. (2020), Siirt ilinde bulunan 200 kWp gücündeki santral baz alınarak PVsyst yazılımı ile yaptıkları analizde, simülasyon sonucunda elde edilen değerler ile bir yıllık gerçek üretim verileri arasında sadece %0,56 gibi son derece düşük bir fark olduğunu tespit etmişlerdir.

Kadir (2024), Balıkesir’de yer alan 1,17 MWp gücündeki bir santral baz alınarak PVsyst simülasyonu ile yapmış olduğu analiz sonuçlarını bir yıllık gerçek üretim verileri ile

kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda yazılımın yıllık DC üretim değerini %2,8, AC üretim değerini ise %2,3 hata payı ile yüksek doğruluk sergileyerek tahmin edebildiği saptanmıştır. Bu doğruluk sebebinin, sahada ölçülen gerçek ışıınım verilerinin simülasyonda kullanılmasından kaynaklı olduğu vurgulanmıştır.

Şahin (2024), Kahramanmaraş'ta 1 MW gücündeki bir tesisi inceleyerek gerçek üretim verileri ile simülasyon öngörülerindeki sapmayı %3,33 olarak hesaplamış ve yazılımın enerji üretim tahminlerinde etkin bir araç olduğunu vurgulamıştır.

Çınaroğlu (2021) ise Kilis özelinde üç farklı santrali baz alarak yaptığı analiz çalışması sonucunda, gerçek veriler ile simülasyondan elde edilen veriler arasındaki farkın %10'un altında kaldığını ortaya koymuştur.

PVsyst simülasyonunun tahmin başarısı, modele girilen meteorolojik verilerin kalitesi ile doğrudan ilişkilidir.

Tanış (2023), Elazığ'da 1,036 MWp'lik GES analizinde, standart Meteonorm verileri yerine sahada ölçülen gerçek hava verilerini kullandığında, yazılımın hata oranının %4,73'ten %0,63'e düştüğünü ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, söz konusu yazılımın standart veri tabanlarıyla isabetli sonuçlar üreterek, yerel iklim koşulları titizlikle belirlendiğinde ise tahmin yeteneğinin neredeyse hatasız seviyeye ulaştığını göstermiştir. Bu veriler, PVsyst'in kampüs ölçeğindeki santraller için de oldukça tutarlı sonuçlar verebileceğinin kanıtıdır.

Literatürde PVsyst, diğer simülasyon yazılımları ile de sıklıkla kıyaslanmaktadır.

Arslan (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, PVsyst, PVGIS ve PVSOL araçlarını kıyaslayarak en düşük hata oranını %3,83 ile PVsyst'in sunduğu kanıtlanmıştır.

Yıldırım ve Düzkaya (2025), Kırıkkale'de yaptıkları çalışmada, 15 MW'lık GES analizinin, PVsyst yazılımının PVGIS yazılımına göre %30,6 daha yüksek ve gerçeğe daha yakın tahminlerde bulunduğunu; nedeninin ise PVsyst'in kirlenme, gölgeleme ve termal kayıpları, çok daha detaylı modelleyebilmesi olduğunu tespit etmişlerdir. (aktaran Ay ve Pamuk, 2023)

Sancar ve Yakut (2023), Antalya'daki çalışmada, bir çatı GES projesinin PVsyst ve SAM yazılımlarını kıyaslamıştır. Yıllık toplamda SAM daha az sapma gösterirken, aylık bazdaki ölçümlerde gerçek üretim verilerine en yakın sonuçları PVsyst'in verdiğini saptamışlardır.

Öte yandan Üründü (2025), Konya İlindeki bir santral için kıyaslama yaparak PVSOL'un %1,83 sapma değeri ile %5,43 sapma gösteren PVsyst'ten kısmen daha doğru sonuçlar verdiğini kaydetmiştir.

Literatür; PVsyst'in sistem ekipmanlarını ve kayıp mekanizmalarını (ohmik, termal, uyumsuzluk vb.) detaylı olarak analiz edebilme yetkinliği sayesinde, fotovoltaik santral projelerin teknik başarısını hesaplamada birincil güvenilir araç olduğunu kanıtlamaktadır.

2.3 Üniversite Kampüslerinde GES Uygulamaları

Üniversite kampüsleri, "yeşil kampüs" ve "sürdürülebilirlik" hedefleri doğrultusunda GES yatırımları için tüketim düzeylerinin oldukça yüksek olduğu en ideal alanlardır. Bu yerleşkeler, hem enerji maliyetlerini düşürmekte hem de yenilenebilir enerji teknolojileri alanında öğrencilere yerinde uygulama imkânı sunarak ve toplumda farkındalık oluşturarak adeta "mikro şebekeler" olarak nitelendirilmektedir.

Gençgönül vd. (2024), Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (ISUBÜ) Batı yerleşkesinde yer alan 32 binanın çatısını kapsayan 6,2 MWp gücündeki büyük ölçekli GES projesini analiz etmişlerdir; çalışma sonucunda, bu devasa sistemin yıllık yaklaşık 8.257 MWh enerji üretimi ile kampüs elektrik ihtiyacının %67'sini karşılayacağı saptanarak yatırımın amortisman sürecinin 6 yıl içinde olacağı raporlanmıştır.

Ay ve Pamuk (2023), Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi (ZBEÜ) Farabi yerleşkesindeki 14 binanın çatısı için 1,9 MWp kurulu güce sahip GES projesi tasarlamışlardır. Araştırmada sistemin yıllık 2.354.885 kWh elektrik üretimi yapabileceğini ve bölgenin düşük güneş potansiyeline sahip olmasına rağmen projenin teknik anlamda uygulanabilir olduğunu raporlamışlardır.

Güneş (2024), Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerini temsil eden beş farklı üniversiteyi (ZBEÜ, Dicle, Osmaniye Korkut Ata, Dokuz Eylül ve Marmara) 100 kWp'lik standart bir sistem üzerinden karşılaştırmıştır. Yapılan değerlendirmede, yüksek radyasyon değerleri

nedeniyle Dokuz Eylül Üniversitesi yerleşkesinin yıllık 156.080 kWh ile en verimli bölge olduğu; ZBEÜ yerleşkesinin ise yıllık 133.829 kWh ile güneşlenme süresinin yetersiz kalması nedeniyle en düşük üretim değerine sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Yüzer (2025), Hakkâri Üniversitesi Zeynelbey Yerleşkesi'nde 1 MWp kurulu güçte planladığı santralden yıllık 1.877,9 MWh enerji üretimi gerçekleştireceğini öngörerek performans oranı analizinde (PR) %80,15 gibi yüksek bir seviyede olacağını raporlamıştır.

Köker (2022), Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Ankara yerleşkesinde yer alan birçok binanın çatı alanlarını ve beraberinde merkezi bir enerji depolama sistemini barındıran hibrit bir yapıyı PVsyst yazılımı ile tasarlamıştır. Araştırma sonucunda, söz konusu binaların üzerine kurulacak olan çatı üstü GES potansiyelinin yıllık 8.419,2 MWh elektrik üretimini mümkün kıldığını tespit ederek bu üretimin kampüsün toplam enerji talebinin %30,7'sini tek başına karşılayabileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca simülasyonda, entegre edilen Lityum-iyon batarya sistemleri de değerlendirilerek sistemin performans oranı (PR) 0,887 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda Projenin hayata geçirilmesi durumunda yıllık 1.826,23 ton CO₂ emisyonunun engellenebileceği kaydedilmiştir.

Çınaroğlu (2021), Kilis 7 Aralık Üniversitesi için 1 MW kurulu gücündeki GES projesini tasarladığında kampüsün yıllık elektrik ihtiyacının yarısından fazlasını (%57,59) karşılayabileceğini hesaplamıştır. Ayrıca arazi maliyeti olmadığı için yatırımın kendini yaklaşık 7 yılda amorti edeceğini tespit etmiştir.

Tozlu (2004), Muğla Üniversitesi için yaptığı çalışmada, 2003 yılında kurulan 25,6 kWp kapasiteli Türkiye'nin ilk bina entegre fotovoltaiik (BIPV) sisteminin performansını analiz etmiştir. Analiz sonucunda sistemin şebekeye yılda yaklaşık 35.640 kWh (35,6 MWh) enerji aktardığı ve günlük ortalama üretiminin 97,64 kWh olduğu saptanmıştır. Sistemin performans oranı (PR) yıllara göre 0,79 ile 0,81 arasında, verimliliği ise %8,5 ile %11 arasında değişim göstermiştir. Çalışma kampüste kurulan sistemin temiz enerji farkındalığı oluşturmadaki öncü rolüne işaret etmiştir.

Oral (2020), Karabük Üniversitesi yerleşkesinde 1 MW kapasiteli proje çalışmasında, kampüsün toplam elektrik ihtiyacının yaklaşık %40'ını sistemden karşıladığını tespit etmiştir.

Aksangör (2019), Ankara'da yer alan bir eğitim kampüsünde elektrik ihtiyacını karşılamak için PVsyst yazılımı ile 604,8 kWp kurulu gücündeki sistemi tasarlamıştır. Sistemin performans oranını %84,12 değerinde hesaplayarak simülasyon sonuçlarının gerçek üretim verileriyle uyumunun yüksek olduğunu belirtmiştir.

2.4 Enerji Yönetimi ve Ekonomik Analiz Çalışmaları

Bir yatırımın rasyonelliğini belirleyen en kritik evre, kurulumu öncesinde yapılan ekonomik analizlerdir. Bu analizler, Güneş enerjisi santralleri için genellikle literatürde Net Bugünkü Değer (NBD), İç Karlılık Oranı (İKO), Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) ve Geri Ödeme Süresi (GÖS) gibi temel finansal unsurlar vasıtası ile takip edilmektedir.

Yalılı (2021), Van ilinde 1 MW gücündeki lisanslı bir GES yatırımı planlamasını farklı finansman senaryoları şeklinde analiz etmiştir; Çalışmada yatırımın öz sermaye ile faaliyete geçmesi durumunda amorti süresinin 4 yıl, banka kredisi (TurSEFF) kullanılması durumunda ise 9 yıl olacağı saptanmıştır. Bu durumda öz sermaye kullanımının %22,35'lik bir iç karlılık oranı ile kredi kullanımına göre oldukça avantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

Özcu (2025), Bursa ili özelinde GES projeleri üzerinden yaptığı analiz çalışmasında, fotovoltaik teknolojilerdeki küresel maliyet düşüşünü vurgulamıştır. IRENA verilerini baz alarak, güneş enerjisinden elektrik üretimi maliyetlerinin 2010-2022 yılları arasında %89 oranında azaldığını ortaya koymuştur. Aynı zamanda güncel piyasa koşullarını hesaba kattığında yatırımın geri dönüş süresinin 3 ila 4 yıl gibi kısa bir zamana düştüğünü ifade etmiştir.

Gençgönül vd. (2024), ISUBÜ kampüsü için modellenen 6,2 MWp kapasiteli sistemin ekonomik analizini yaptığında, Kampüsün yıllık elektrik giderlerinde sağlayacağı tasarruf sonucu projenin geri dönüş süresinin yaklaşık 6 yıl olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca 25 yıllık ömrü boyunca 218 milyon TL'yi aşan bir ekonomik kazanç sağlayacağı raporlanmıştır.

Sarı ve Özyiğit (2020), Sivas Cumhuriyet Üniversitesi yerleşkesi ve Sivas'ın ilçelerindeki GES potansiyelini PVsyst yazılımı ile analiz etmiştir. Yerleşkede yapılan çalışmada monokristal panellerin kurulum maliyeti polikristal panellerinkinden 20.398\$ fazla olmasına rağmen, verimlerinin yüksek olması sayesinde 30 yıl sonunda 29.800\$ daha fazla net kârı olduğu hesaplanmıştır. İlçelerde yapılan 10 MW'lık kurulum gücü sağlayan simülasyonda; polikristal panellerin düşük maliyetle hızlı geri dönüş sağladığı, ancak monokristal modüllerin uzun vadede alan verimliliği ve toplam kârlılık yönünden daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Girgin (2011), Karaman bölgesinde 36 farklı sistem varyasyonu üzerinde yaptığı detaylı araştırmada, güvenilir bir ekonomik analiz için Geri Ödeme Süresi ile İKO yöntemlerinin birlikte kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Yapılan çalışmada geri ödeme sürelerinin 3 ila 6 yıl (ortalama 4 yıl) arasında değiştiği ve güneş takip sistemlerinin enerji artışı sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak hareketli parçalar nedeniyle bakım-onarım maliyetlerinin finansal olarak yüksek olması fizibiliteyi doğrudan etkileyen bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır.

Biçen ve Vardar (2022), Bursa'da yer alan küçük ve orta ölçekli işletmeler için analiz yaparak, ekonomik sürdürülebilirlik üzerindeki etkenlerden devlet teşviklerinin rolüne değinmişlerdir. Teşviksiz bir senaryoda geri ödeme süresi 15,8 yıla kadar çıkarken, %75 devlet desteği içeren senaryolarda 1,5 yıla kadar gerileyebildiğini raporlamışlardır.

Sonuç olarak literatür; GES projelerinde yerli ekipman teşvikleri, arazi maliyetinin bulunmaması ve güneşlenme potansiyelinin yüksek olması gibi faktörlerin bir araya gelmesi ile, yatırımların finansal başarısının ve enerji yönetimindeki etkinliğinin optimum düzeye çıktığını göstermektedir.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

3.1 Güneş Enerjisi Radyasyonu ve Balıkesir İlinin Potansiyeli

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen hidrojen gazının helyuma dönüşme (füzyon) süreci sonucunda açığa çıkan devasa bir ısıma enerjisidir (Duffie and Beckman, 2013; Özcü'den, 2025).

Güneş, dünyadan yaklaşık 150 milyon kilometre uzakta olmasına rağmen, yaydığı enerjinin çok küçük bir kısmı bile dünya için muazzam ölçüde bir kaynak teşkil etmektedir. (Arslan, 2018; Oral, 2020) Atmosferin dış sınırına ulaşan güneş ışıınım şiddeti yaklaşık 1370 W/m² sabit değerindedir. Bu değer, atmosferden geçerken yansımaya ve soğurulma gibi etkilere maruz kalarak yeryüzüne ulaştığında 0-1100 W/m² arasında değişkenlik gösterir.

Yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi miktarı; mevsime, coğrafi konuma ve yerel iklim koşullarına doğrudan bağlıdır (Oral, 2020). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) verilerine göre, güneş ışıınının yaklaşık %30'u atmosferden geri yansırken (albedo etkisi), %20'si atmosfer ve bulutlar tarafından emilmekte; yalnızca %50'lik bir kısım yeryüzüne ulaşarak yüzeyi ısıtmaktadır (EİGM, 2018; Oral, 2020).

Öte yandan, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından raporlandığı üzere, güneşten dünyaya sadece 90 dakikada ulaşan toplam enerji miktarı, küresel yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasitededir (IEA, 2014; Kılıç, 2015). Literatürdeki performans çalışmaları ışığında, bu tezin temel odak noktasını oluşturan panel yönlendirmesi ve bölgenin güneşlenme süresi, sistem verimliliğini belirleyen en temel değişkenler olarak kabul edilmiştir.

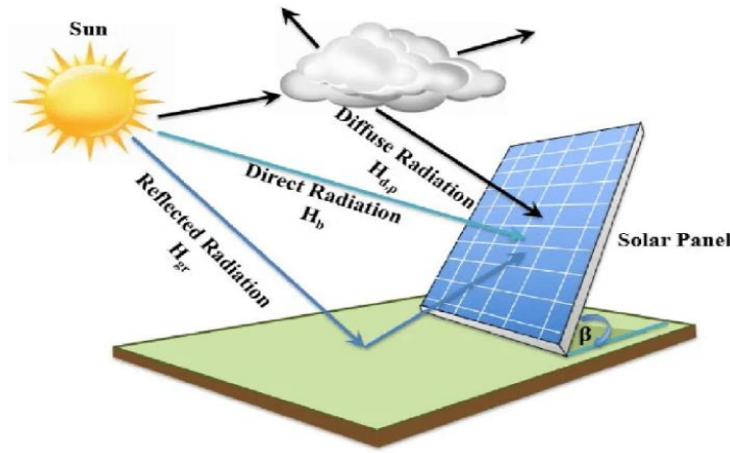
3.1.1 Güneş radyasyonu bileşenleri

Atmosferde gerçekleşen saçılma ve yansımaya olayları sonucunda yeryüzüne ulaşan toplam güneş radyasyonu (küresel ışıınım), direkt (doğrudan), yayılı (difüz) ve yansıyan (albedo) ışıınım olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Şekil 3.1'de bu bileşenlerin güneş paneli yüzeyine ulaşma yolları şematik olarak gösterilmektedir:

Direkt (Doğrudan) ışınım, atmosferdeki parçacıklara veya bulutlara çarpmadan bir ışık demeti halinde doğrudan yeryüzüne veya panel yüzeyine ulaşan ışıdır (Kadir, 2024; Öztürk, 2026).

Yayılı (Difüz) ışınım, güneş ışınlarının atmosferdeki bulut ve toz parçacıkları tarafından her yöne dağıtılması sonucu yeryüzüne ulaşan ışıdır. (Öztürk, 2026; Güner, 2023).

Yansıyan (Albedo) ışınım, binalardan, civardaki zeminden veya doğal örtüden yansıyarak panel yüzeyine gelen bileşendir (Yüzer, 2025; Kadir, 2024).



Şekil 3.1: Güneş ışınlarının doğrudan, yayılı ve yansıyan radyasyonları. (Ourraoui ve Ahaitouf, 2022)

3.1.2 Radyasyon ölçüm ve tahmin yöntemleri

Güneş santrallerinin projelendirilmesinde kullanılan meteorolojik veriler yerinde ölçüm ve sentetik veri tabanları olarak iki ana yöntemle elde edilmektedir. Literatürde, simülasyon doğruluğunun artırılması için bu verilerin ölçülen meteorolojik verilerle kalibre edilmesi önerilmektedir (Demiryürek, 2020).

Yerinde ölçüm yönteminde, piranometreler ve santral sahalarına uygulanan meteoroloji istasyonları vasıtasıyla anlık global ve yayılı ışınım verileri toplanabilmektedir (Kadir, 2024).

Sentetik veri tabanları yönteminde PVsyst, PVGIS ve SAM gibi simülasyon araçları, Meteororm, NASA-SSE ve Solargis veri tabanlarından uzun yıllara ait sentetik meteorolojik veriler sağlamaktadır (Yüzer, 2025; Kadir, 2024).

3.1.3 Açı kavramları ve geometrik ilişkiler

Fotovoltaik modüllerin verimliliği, güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açısıyla (kosinüs yasası) doğrudan ilişkilidir (Kayri, 2023). Güneş ışınları panele ne kadar dik (90°) açıyla gelirse, birim alandan elde edilen enerji miktarı o ölçüde optimum düzeye getirilir (Akhan ve ark., 2025). Panelin uygun şekilde konumlandırılmasında ve güneşin gökyüzündeki konumunun belirlenmesine yönelik hesaplamalarda kullanılan temel parametreler alt başlıklarda anlamları belirtilen δ , ω , θ_z , α , ϕ , β , γ ve γ_s gibi matematiksel eşitliklerle ortaya konulmaktadır (Duffie & Beckman, 2020):

3.1.3.1 Deklinasyon açısı (δ)

Güneş ışınlarının ekvator düzlemiyle yapmış olduğu ve dünyanın eksen eğikliği nedeniyle yıl boyunca yaklaşık olarak $-23,45^\circ$ ile $+23,45^\circ$ arasında değişen açıdır. Cooper Eşitliği olarak bilinen bu değer, (3.1) eşitliğinde yılın gün sayısını (n) esas alarak şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right] \quad (3.1)$$

Burada n , 1 Ocak'tan itibaren geçen gün sayısını ifade eder.

3.1.3.2 Saat açısı (ω)

Güneşin yerel meridyenden itibaren açısal uzaklığını ifade eden parametredir. Dünya saatte 15° döndüğü için saat açısı, (3.2) eşitliği ile yerel güneş zamanına (t_s) göre hesaplanır:

$$\omega = 15 \cdot (t_s - 12) \quad (3.2)$$

Güneş öğle vaktinde iken (saat 12.00) $\omega = 0$ olup, sabah saatleri negatif, öğleden sonraki saatler pozitif değer alır.

3.1.3.3 Zenit (θ_z) ve güneş yükseklik açısı (α)

Güneşin gökyüzündeki konumu ile dikey eksen arasındaki açı olan zenit açısı (θ_z), bölgenin enlemi (ϕ), deklinasyon (δ) ve saat açısına (ω) bağlı olarak şu formülle hesaplanır. Eşitlik (3.3):

$$\cos \theta_z = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (3.3)$$

Güneşin yatay düzlem ile yaptığı yükseklik açısı (α) ise zenit açısının tümleri olup şu şekilde ifade edilir. Eşitlik (3.4):

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (3.4)$$

3.1.3.4 Enlem açısı (ϕ)

Bir noktanın ekvatora göre kuzey veya güney yönündeki açısal konumunu ifade eder. Kuzey yarımkürede pozitif, güney yarımkürede negatif değer alır. Eşitlik (3.5):

Balıkesir İli için yaklaşık:

$$\Phi = 39.65^\circ \quad (3.5)$$

3.1.3.5 Eğim (tilt) açısı (β) ve azimut açıları (γ ve γ_s)

Eğim açısı, Fotovoltaik modül yüzeyinin yatay zemin düzlemiyle yaptığı açıdır ve panel yüzeyine gelen güneş ışınımını artırmak için bu açının yerel enleme ve iklime göre en verimli değerde seçilmesi kilit bir öneme sahiptir. Optimum eğim açısını belirlemek için aşağıdaki matematiksel yaklaşım olarak Hottel & Woertz (HW) Metodu kullanılır (Dal, 2021). Sistemin kurulacağı yerin enlemi (ϕ) ve güneşin deklinasyon açısı (δ), Eşitlik (3.6):

$$\beta = \phi - \delta \quad (3.6)$$

Türkiye için optimum sabit eğim açısı genellikle 30° - 35° aralığında belirlenmektedir (Atılım ve ark., 2019; Akhan ve ark., 2025).

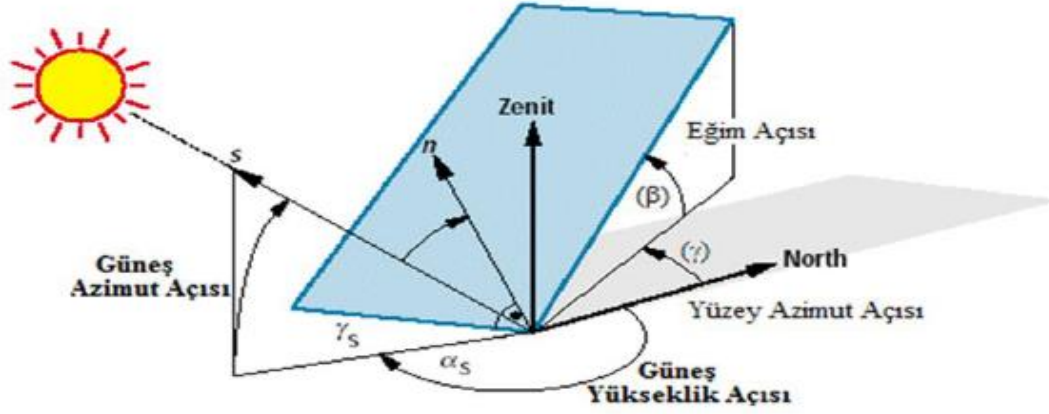
Azimut Açısı (γ), panelin bakış yönünün tam güneyden (0°) olan sapmasını ifade eder; Panellerden verimin maksimum alınması için genellikle tam güneye bakması istenir. Güney yarım kürede ise tam kuzeye bakmalıdır (Akhan ve ark., 2025; Kadir, 2024). Eşitlik (3.7):

$$\gamma = 0^\circ \quad (3.7)$$

Güneşin gökyüzündeki konumu ise Güneş Azimut Açısı (γ_s) ile belirlenir: Eşitlik (3.8):

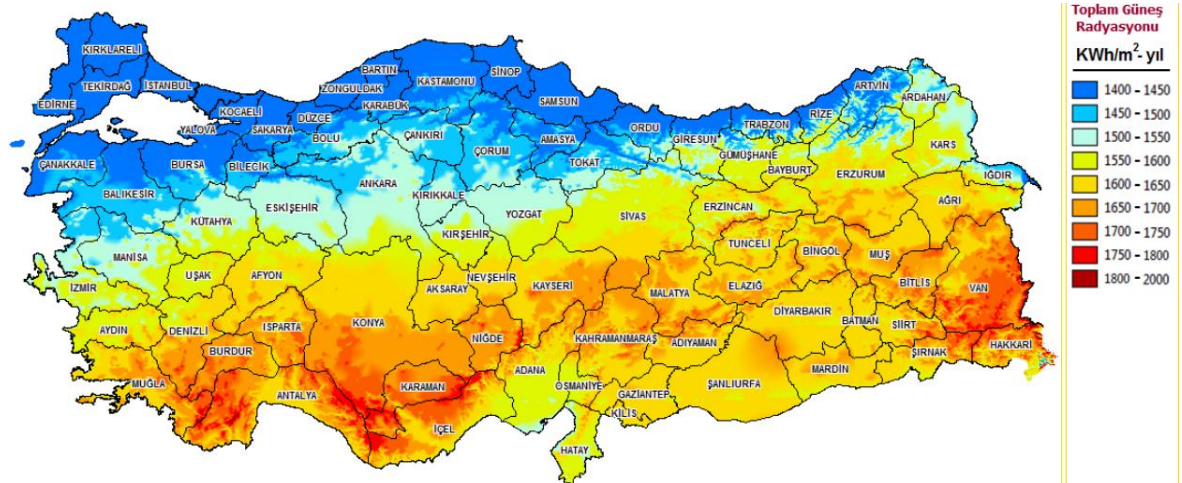
$$\gamma_s = \sin^{-1} \left(\frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha} \right) \quad (3.8)$$

Şekil 3.2’de güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açıları görülmektedir. (Yılmaz vd., 2015)



Şekil 3.2: Güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açıları

Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla 36°-42° kuzey enlemleri arasında yer alarak "güneş kuşağı" adı verilen bir bölge olması nedeniyle son derece avantajlı bir ülkedir. (Emikönel ve Bilhan, 2022; Akcan vd., 2020) Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verilerine göre, Türkiye yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi 2741 saat (günlük 7,5 saat) ve metrekareye düşen ortalama yıllık toplam ışınlam şiddeti 1527 kWh/m² olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.3). Araştırmacılar, bu yüksek potansiyelin Türkiye'yi güneşten elektrik üretimi konusunda Avrupa'da İspanya'dan sonra ikinci sıraya taşıdığını ifade etmektedirler (Oral, 2020 ve Yalılı, 2021).

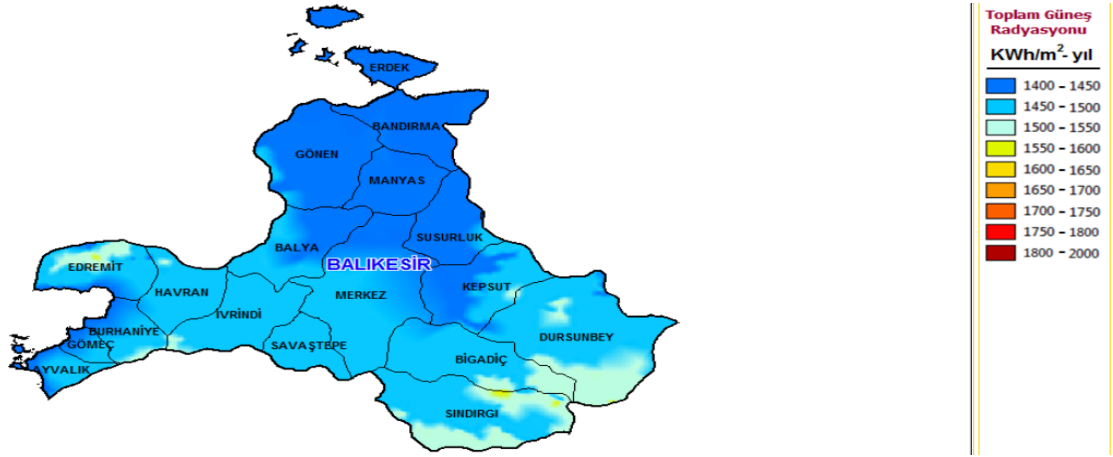


Şekil 3.3: Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA)

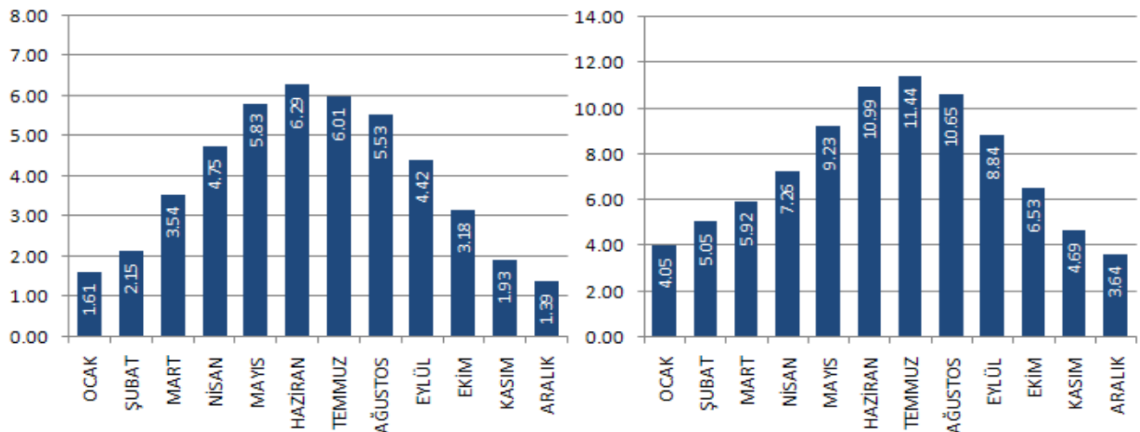
Çalışmanın uygulama alanı olan Balıkesir ili, Marmara Bölgesinde güneş enerjisi yatırımları için verimlilik anlamında en elverişli lokasyonlardan biridir. Marmara

Bölgesi'nin genel ortalama güneşlenme süresi 2409 saat/yıl ve radyasyon değeri 1168 kWh/m²-yıl iken; Balıkesir bu değerlerin kayda değer ölçüde üzerindedir. (Emikönel ve Bilhan, 2022) Şekil 3.4'te Balıkesir İli güneş potansiyeli ve toplam güneş radyasyonu görülmektedir.

Literatürdeki verilere göre Balıkesir'in yıllık toplam güneşlenme süresi 2690 saat, yıllık toplam radyasyon şiddeti ise 1421 kWh/m²-yıl seviyesindedir. Şekil 3.5 (a) ve (b)' ye göre İldeki güneş radyasyonu aylık bazda incelendiğinde, en yüksek değerlere 6,29 kWh/m²-gün ile Haziran ayında ulaşılırken, en düşük değerlere ise 1,39 kWh/m²-gün ile Aralık ayında görülmektedir. Benzer bir yönelimle güneşlenme süresi Temmuz ayında maksimuma ulaşırken, Aralık ayında minimuma indiği gözlemlenmektedir (GEPA).



Şekil 3.4: Balıkesir İli güneş potansiyeli ve toplam güneş radyasyonu (GEPA)



Şekil 3.5(a): Balıkesir global radyasyon değerleri (kWh/m²-Gün)

Şekil 3.5(b): Balıkesir güneşlenme süreleri (Saat)

Balıkesir ikliminin yarı kurak olması ve genel olarak Akdeniz iklimi etkisi altında bulunması nedeniyle özellikle yaz aylarını daha az bulutlu geçirerek fotovoltaik sistemlerde verim artışını mümkün kılmaktadır. Bu yüksek potansiyel, Balıkesir'i hem arazi tipi hem de çatı tipi GES projeleri için Marmara Bölgesi'ndeki en cazip merkezlerden biri haline getirmektedir.

3.2 Fotovoltaik Hücresinin Yapısı ve Çalışma Mekanizması

Fotovoltaik hücreler, güneş ışığını farklı iki yarı iletken malzeme kullanarak doğrudan doğru akım (DC) elektriğine dönüştüren enerji dönüşüm araçlarıdır. Hücrelerin işlevsel biçimde çalışabilmesi için hem belirli bir fiziksel yapıya hem de fotovoltaik adı verilen aktif bir sürece ihtiyaç vardır.

3.2.1 Yarı iletken yapı ve p-n eklemi

Fotovoltaik hücreler genellikle 0,1 mm ile 0,4 mm arasında değişen kalınlıklara sahip ince levhalar şeklinde tasarlanmaktadır. Şekil 3.6'da çeşitli levhalar görülmektedir.



Şekil 3.6: Çeşitli kalınlıklarda güneş hücreleri

Hücrelerin üretiminde temel malzeme olarak, doğada bol miktarda bulunan silisyum elementi kullanılmaktadır. Saf silisyumun iletkenliğini kontrol etmek amacıyla "katkılama" (doping) işlemi uygulanarak iki farklı katman oluşturulur (Çelik ve Koç, 2020; Demiryürek, 2018)

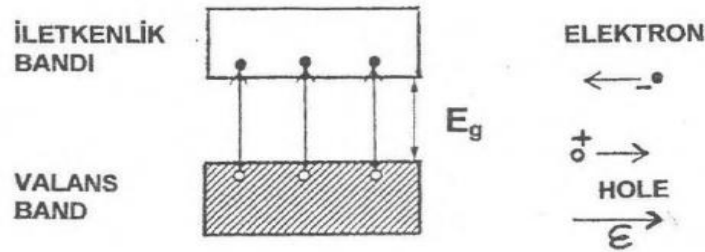
N-Tipi Katman (Negatif): Silisyum yapısına, elektron fazlalığı oluşturmak için fosfor gibi 5A grubu elementleri eklenerek oluşturulur (Çelik ve Koç, 2020).

P-Tipi Katman (Pozitif): Silisyum elementine, elektron eksikliği (boşluk/oyuk fazlalığı) oluşturmak amacıyla bor veya alüminyum gibi 3A grubu elementleri ilave edilir (Çelik ve Koç, 2020).

Bu iki katman bir araya getirildiğinde temas yüzeyinde p-n eklemi meydana gelir. Yüklerin yer değiştirmesi sonucunda ara yüzeyde bir "boşaltılmış bölge" (depletion region) ve iç elektrik alanı oluşur (Çelik ve Koç; 2020 Tozlu, 2004). Bu yapı, hücrenin enerji dönüşümü için gerekli olan içsel potansiyeli ve dengeyi sağlar (Tozlu, 2004).

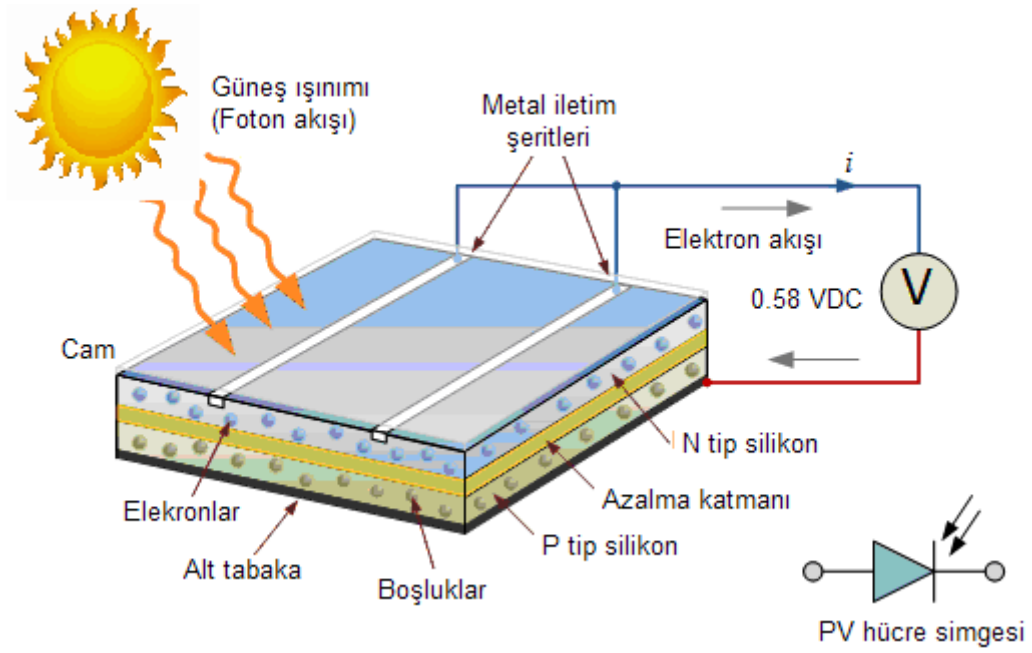
3.2.2 Enerji dönüşüm mekanizması (fotovoltaik etki)

Hücrenin serüveni, 1839 yılında Becquerel tarafından keşfedilen fotovoltaik etki prensibine dayanmaktadır (Demiryürek ve ark., 2020; Bayyigit, 2023). Güneş pili üzerine düşen fotonların enerjisi (E_{foton}), yarı iletken malzemenin yasak enerji bandı aralığından (E_g) büyükse, bu fotonlar valans elektronlarını uyararak onları serbest hale getirir (Tozlu, 2004; Öztürk, 2026). Şekil 3.7’de Valans ve İletkenlik Bandı aralıkları görülmektedir (Özek, 2000)



Şekil 3.7: Valans ve iletkenlik bandı

P-N ekleminde yer alan dahili elektrik alanı, serbest kalan negatif elektronları n-tipi bölgeye, pozitif boşlukları ise p-tipi bölgeye sürükler ve bu şekilde yüklerin ayrışmaya uğrar. Hücrenin yüzeylerine metalik kontaklar yerleştirilerek yüklerin dış devreye nakli ile doğru akım (DC) elektriği elde edilir (Tozlu, 2004; Duffie ve ark., 2020). Şekil 3.8’de PV hücrenin çalışma ilkesi görseli bulunmaktadır (Öztürk, 2017).



Şekil 3.8: PV hücrenin çalışma ilkesi

3.2.3 Fotovoltaik karakteristik ve performans parametreleri

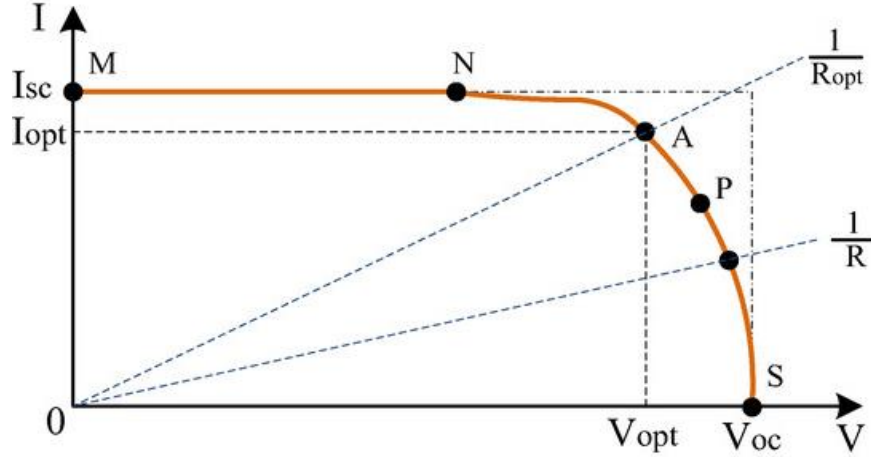
Bir güneş hücresinin elektriksel başarımı; Standart Test Koşulları (STC: 1000 W/m² ışınlım, 25°C hücre sıcaklığı ve AM (Air Mass) 1.5 spektrumu) altında belirlenen Akım-Gerilim (I-V) eğrisi ve şu temel parametreler kullanılarak tanımlanır:

Açık devre gerilimi (V_{oc}); Modül uçlarından akım geçmediği ($I=0$) andaki maksimum gerilim değeridir. V_{oc} , hücre sıcaklığı arttıkça en çok etkilenen parametredir; sıcaklık arttıkça yarı iletkenin iç direnci değiştiği için gerilim değeri bariz bir düşüş sergiler (Akhan vd., 2025; Tanış, 2011). Şekil 3.9’da sabit sıcaklık ve ışınlım koşullarında fotovoltaik panelin I–V karakteristik eğrisi gösterilmektedir (Dursun ve Görgün, 2026).

Kısa devre akımı (I_{sc}); Modül uçlarındaki gerilim sıfır olduğunda ($V=0$) geçen maksimum akımdır. I_{sc} , doğrudan panel yüzeyine düşen ışınlım şiddetiyle doğru orantılıdır; ışınlım miktarı arttıkça üretilen serbest taşıyıcı sayısı artar (Güneş, 2024; Tozlu, 2004).

Maksimum güç noktası (P_{mp} veya MPP); Modülün, I-V eğrisi üzerinde en yüksek elektriksel gücü ürettiği ideal çalışma noktasıdır. Bu değer, maksimum güçteki gerilim (V_{mp}) ve akımın (I_{mp}) parametrelerinin çarpımı ile belirlenir ($P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp}$) (Güneş, 2024; Tozlu, 2004).

Dolum faktörü (FF); Üretilen maksimum gücün, V_{oc} ve I_{sc} değerlerinin çarpımına (teorik maksimum güç) oranıdır. P-N eklemi kalitesini ve iç direnç kayıplarını yansıtır. 1'e yakın olması modülün yüksek kaliteli olduğunun göstergesidir. İyi bir hücre için bu oran genellikle 0,7 ile 0,8 arasındadır (Özyiğit, 2019).



Şekil 3.9: Güneş hücresinin tipik akım-gerilim (I-V) karakteristiği

Modül verimliliği (η); Panel yüzeyine gelen güneş enerjisinin ne kadarının elektrik enerjisine dönüştürülebildiğini tanımlar. Ticari silisyum hücrelerin verimlilikleri, günümüz şartlarında kullanılan teknolojiye bağlı olarak genellikle %17 ile %24 arasında değişmektedir (Akhan ve ark. 2025; Kayri, 2023).

3.3 PV Teknolojileri

Fotovoltaik hücre teknolojileri, kullanılan yarı iletken malzemenin türüne, kristal yapısına ve üretim yöntemlerine göre genellikle üç esas jenerasyonda sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte inorganik-organik hibrit yapıları kapsayan dördüncü bir jenerasyon da güncel literatürde yerini almıştır (Pastuszak ve Węgierek, 2022). Günümüzde silikon tabanlı birinci nesil teknolojiler ticari pazarın büyük çoğunluğunu domine etmektedir. Son zamanlarda ince film ve yeni nesil hibrit hücreler üzerine yapılan akademik ve endüstriyel çalışmalar hız kazanmıştır.

3.3.1 Birinci nesil: kristal silikon (c-si) teknolojileri

IEA PVPS 2024 raporuna göre günümüzde kristal silikon (c-Si) teknolojileri toplam fotovoltaik hücre üretiminin %98'den fazlasını sağlamaktadır. Özellikle yüksek verim sağlayan monokristal silikon hücreler, küresel pazarda öne çıkan teknoloji durumuna

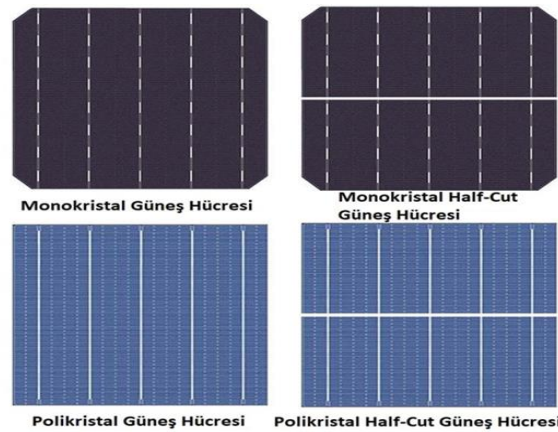
gelmiştir (IEA, 2024). Temel ham maddesi olan ve doğada bol miktarda bulunan silisyumun performansı saflık derecesine göre değişmektedir.

Monokristal silikon (m-Si); Tek bir kristal yapıdan üretilen bu hücreler, homojen malzeme özellikleri sayesinde yüksek performans göstermektedirler. Ticari modüllerde verimlilikleri genellikle %20-25 aralığında seyretmektedir. Silikon fotovoltaik modül pazarı neredeyse tamamen bu hücrelerden oluşmaktadır (IEA, 2024). Birim alanda yüksek güç çıktıları üreterek alanın kısıtlı olduğu uygulamalarda ilk sıralarda tercih edilirler.

Polikristal (çok kristalli) silikon paneller; Tek bir kristal yerine birden fazla kristalin eritilerek kalıplara dökülmesiyle elde edilmektedir. Kristal yapısındaki düzensiz dizilimler sebebiyle monokristal panellere göre daha düşük verimliliğe sahiptir. Modül verimlilikleri tipik olarak %13 ile %17 (bazı kaynaklara göre %14-17) aralığında rapor edilmiştir (Akhan ve ark., 2025; Bayyigit, 2023). Bununla birlikte, üretiminin daha kolay olması ve maliyetlerinin daha düşük olması nedeniyle, ekonomik açıdan büyük ölçekli projelerde sıklıkla kullanılmaktadır (Çelik ve Koç, 2020; Sarı ve Özyigit, 2020).

Half-Cut (yarım kesim) teknolojisi; Standart güneş hücrelerinin lazerle hassas bir şekilde ikiye kesilmesiyle oluşturulurlar. Bu modüller akımı yarıya indirerek iç direnç kayıplarını azaltır ve bu şekilde verimliliği artırır. Ayrıca, panelin bir yarısı gölgelendiğinde diğer yarısı tam kapasite çalışarak gölge toleransı sağlar (Öztürk, 2026; Gençgönül ve ark., 2024).

Şekil 3.10'da Monokristal, Polikristal ve Half-Cut teknolojisiyle üretilen hücreler görülmektedir.



Şekil 3.10: Çeşitli güneş hücreleri

3.3.2 İkinci nesil: ince film teknolojileri (TFS)

İnce film hücreler, cam, metal veya plastik gibi bir alt tabaka üzerine fotovoltaiik malzemeler kullanılarak üretilir. Standart panellere kıyasla daha hafif, esnek ve yarı iletken daha az malzeme kullanımı gerektirir. TFS teknolojinin verimlilikleri genellikle %7-13 civarındadır (Akhan vd., 2025).

En önemli türleri; verimleri düşük ışık koşullarında yüksek olan amorf silikon (a-Si), ince film teknolojisinde en yaygın kullanılan kadmiyum tellür (CdTe) ve soğurma katsayısı yüksek olan bakır indiyum galyum selenid (CIGS) hücrelerdir., kristal silikon hücelere göre yaklaşık 50-60 kat daha az yarı iletken malzeme kullanır. Panellerin üretiminde harcanan enerji miktarı da yaklaşık yarı yarıya daha düşüktür (Girgin, 2010).

İnce film hücreler, kalınlıkları 1 ile 2 μm (mikrometre) arasında değiştiiğinden teknolojiye yüksek esneklik ve düşük ağırlık avantajı kazandırır. Ayrıca yüksek ortam sıcaklığından diğerk kristal yapılara göre daha az etkilenmeleri çalışma süreci için bir avantaj sunmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: İnce film hücre

3.3.3 Üçüncü nesil: yeni nesil teknolojiler

Üçüncü nesil teknolojiler, hem geleneksel PV modül verimlilik limitlerini zorlar hem de üretim maliyetlerini düşürmeyi hedefler (Pastuszak ve Węgierek, 2022).

Bu jenerasyonun dikkat çeken çok eklemli (multi-junction) hüceleri, farklı ışık spektrumlarını absorbe ederek %40'ın üzerinde verimlilik sağlar (Çelik ve Koç, 2020).

Ayrıca, düşük maliyetli üretim imkanları ve silikon ile birleştirilen "tandem" yapılarda %29'un üzerine çıkan verim artışı ile perovskit hüceler son yıllarda dikkatleri üzerine çekmektedir (Öztürk, 2026).

3.3.4 Dördüncü nesil: inorganik-organik hibrit teknolojiler

Bu teknolojiler, modern kompozit teknolojiler olarak ifade edilirler. İnorganik nanoyapıların organik bir matris içerisine yerleştirilerek meydana gelirler (Pastuszak ve Węgierek, 2022). Bu jenerasyonun temel amacı, Organik malzemelerin esneklik kabiliyeti ile inorganik malzemelerin güçlü kararlılıklarını birleştirerek hibrit bir yeni nesil teknoloji amaçlanmaktadır. Günümüzde dikkat çeken hibrit oluşumlar şunlardır:

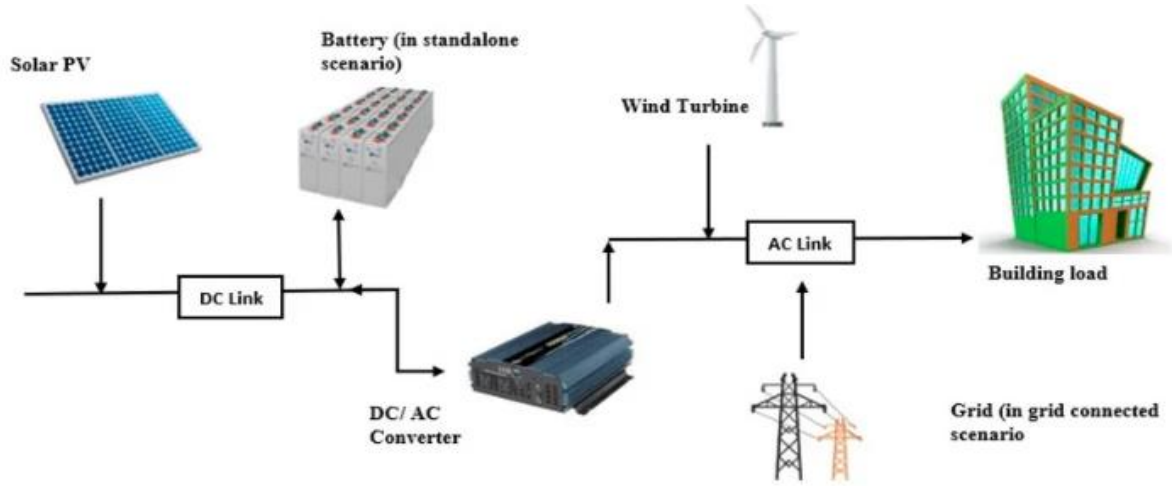
Çift Yüzeyli (Bifacial) Modüller; Hem ön yüzeylerine hem de arka yüzeyinden zemin yansımalarına (albedo etkisi) bağlı olarak gelen güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştüren bu sistemler, standart modüllere göre %12-36 arasında ek enerji kazanımı sunabilirler (Bayyigit, 2023).

Fotovoltaik Termal (PV/T) Sistemler; PV modüllerin arka yüzeyine yerleştirilen ısı toplayıcılar ile hem elektrik hem de sıcak su/hava üretilen hibrit sistemlerdir. Bu teknoloji, paneli soğutarak elektriksel verimi düzenler ve atık ısıyı geri kazandırarak faydalı enerjiye dönüştür. PV/T sistemler toplam sistem verimliliğini %33 ile %59 arasına çıkarabilmektedir (Altınkök, 2024).

3.4 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Bir fotovoltaik sistem, güneşten gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştürerek, bu enerjiyi ihtiyaca göre depolayan veya güvenli bir şekilde şebekeye aktaran bir dizi teknolojik donanımdan oluşmaktadır. Sistem teknik yapısına göre şebekeye bağlı (on-grid), şebekeden bağımsız (off-grid) veya her iki sistemin avantajlarını bir arada kullanan hibrit yapılar olarak modellenenmektedirler.

Şebekeye bağlı sistemlerde temel bileşenler olarak FV modüller, invertörler, taşıyıcı konstrüksiyon elamanları ve izleme sistemleri kullanılırken, şebekeden bağımsız sistemlerde bunlara ek olarak enerjinin devamlılığı için bataryalar ve şarj kontrol cihazları yer almaktadır. Şekil 3.12, her iki sistem türü için varsayılan bileşenlerin şematik gösterimini vermektedir.



Şekil 3.12: Sistem bileşenleri şematik diyagramı (Shirzadi vd., 2020).

3.4.1 FV modüller ve verimlilik parametreleri

Tekil hücrelerin seri veya paralel bağlanmasıyla modüller, modüllerin birleşmesiyle paneller, panellerin birbiri ile bağlanması ile de hedeflenen güç çıktılarını sağlayan fotovoltaik diziler oluşturulur. Böylece, elde edilen güç optimize edilir. Şekil 3.13’de PV hücrenin bağlantı süreçleri gösterilmektedir:



Şekil 3.13: Fotovoltaik hücrelerin bağlanması

Ticari silisyum hücrelerin verimlilikleri, günümüz şartlarında kullanılan teknolojiye bağlı olarak genellikle %17 ile %24 arasında değişmektedir (Akhan ve ark. 2025; Kayri, 2023).

Modül verimliliği (η) açısından laboratuvar ve fabrika verileri Standart Test Koşullarının (STC) temel performans ölçümü olarak kullanılırken, saha uygulamalarda verimlilik; ortam sıcaklığı, ışıınım yoğunluğu, gölgelenme ve kirlenme (kirlenme) gibi dış faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Karaağaç vd., 2021; Akhan vd., 2025).

Sıcaklık etkisi; STC koşullarına göre 25°C üzerindeki her 1°C'lik sıcaklık artışı ile modülün tepe gücünde yaklaşık %0,3 ile %0,4 oranında bir miktar azalma meydana gelmektedir (Tozlu, 2004). Sıcaklıkların yüksek olması hücrelerin iç direncini artırarak gerilim (voltaj) değerinde ciddi düşüşlere yol açmaktadır. Böylece hücrelerde toplam verim kaybına neden olmaktadır.

Işınım şiddeti; Elektrik üretimi, panel yüzeyine gelen küresel güneş radyasyonu miktarı ile doğrusal olarak ilişkilidir (Öztürk, 2026; Garip, 2021). Işınım şiddeti arttıkça panelden elde edilen akım ve güç çıktısı doğru orantılı olarak artmaktadır.

Tozlanma ve kirlenme; Modül yüzeyinde biriken toz, kir veya kar katmanları ışığın geçirgenliğini azaltır. Bu nedenle bu katmanlar ışığın cam yüzeyde uniform olmayan dağılmalara neden olarak enerji kaybına yol açmaktadır. Yapılan saha çalışmalarında, yüzeyinde herhangi bir toz, kir vb. katman olmayan güneş modülünün çıkış gücünün, toz birikmiş bir modüle göre en az %5 oranında daha fazla olduğu rapor edilmiştir (Kadir, 2024).

Gölgeleme; Çevredeki bina, ağaç ve bulutlardan kaynaklanan kısmi gölgelenmeler, güneş panellerinde ciddi performans kayıplarına yol açabilir. Bu gölgeler hücrelerin bir direnç gibi davranmasına bağlı olarak sıcak nokta (hot spot) etkisiyle aşırı ısınmaya ve böylece verimi dramatik şekilde düşürmeye neden olur. Araştırmalar, gölgelenme etkisi altındaki bir panelde üretilen gücün, gölgesiz duruma kıyasla 6 katına kadar azaldığını göstermektedir (Kadir, 2024; Ahkan, 2025).

Yaşlanma ve bozulma; Fotovoltaik hücrelerde zamanla UV ışınları, nem ve sıcaklık değişimleri gibi çevresel etkilerle kimyasal ve fiziksel bozulmalar (degradasyon) meydana gelir. Buna bağlı olarak panellerdeki verimlilik her yıl ortalama %0,5 ile %1 arasında azalarak 25-30 yıllık işletme ömrü sonunda nominal gücü yaklaşık %80'e düşmektedir (Çınaroğlu, 2021; Şahin, 2024).

3.4.2 İnvvertörler ve mppt teknolojisi

İnvvertörler (eviriciler), fotovoltaik modüllerin ürettiği doğru akım (DC) enerjisini, evsel cihazların kullanımında veya şebekeye aktarımda kullanmak üzere uygun olan alternatif akım (AC) enerjisine dönüştüren sistemin en önemli birimidir. Sistemin "beyni" olarak da

tanımlanan bu bileşenler, enerji dönüşümü sağlamakla birlikte, sistemin güvenliğini ve verimliliğini de yönetirler (Nasimi ve Chander, 2021).

Fotovoltaik sistemlerde invertörler, uygulamanın büyüklüğüne göre dizi (string), merkezi veya mikro invertör olarak seçilmektedir. Dizi invertörler esnek yapıları sayesinde orta ölçekli sistemlerde yaygın olarak tercih edilirken merkezi invertörler genellikle büyük ölçekli GES projelerinde kullanılmaktadır. Mikro invertörler ise her bir panele ayrı ayrı monte edilerek panel bazında performans takibi sağlamaktadır (Nasimi ve Chander, 2021). Günümüzde modern invertörlerin dönüşüm verimliliği %95–99 aralığına ulaşmaktadır (Girgin, 2011; Aksangör, 2019; Üründü, 2025).

Fotovoltaik dizinin akım-gerilim (I–V) karakteristiği, gün içerisinde ışınım şiddeti ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak sürekli değişmektedir (Çelik ve Koç, 2020). Maksimum güç noktası izleme (MPPT) teknolojisi, invertörde kullanılan gelişmiş algoritmalar aracılığıyla panellerin en yüksek güç ürettikleri maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayarak sistem verimini artırmaktadır. Bu teknoloji, özellikle bulut geçişleri gibi kısmi gölgelenme koşullarında meydana gelebilecek enerji kayıplarının azaltılması açısından önem taşımaktadır (Akyürek vd., 2020).

Invertörler ayrıca şebeke ile senkronize biçimde çalışmakta, aşırı akım ve aşırı gerilim koruması sağlamaktadır. Sistemde oluşabilecek hataları tespit ederek gerektiğinde sistemi devre dışı bırakmakta ve ada çalışma koruması gibi temel güvenlik görevlerini yerine getirmektedir.

3.4.3 Taşıyıcı konstrüksiyon ve montaj sistemleri

Fotovoltaik sistemlerde mekanik taşıyıcı sistemler, güneş panellerinin güvenli bir şekilde montajını ve optimum açıda konumlandırılmasını sağlar. Bu yapılar, rüzgar, kar ve deprem gibi doğal yükler altında uzun vadeli bütünlüğü koruyabilecek statik analizlerle tasarlanır. Taşıyıcılar genellikle alüminyum veya galvanizli çelikten üretilir (Şekil 3.14). Bazı özel uygulamalarda ise ahşap veya kompozit malzemelerin kullanıldığı da kaynaklarda belirtilmektedir (Girgin, 2011).



Şekil 3.14: Çelik taşıyıcı konstrüksiyon

Fotovoltaik taşıyıcı sistemler, montajın gerçekleştirildiği alana ve sistemin performans gereksinimlerine bağlı olarak farklı türlerde tasarlanmaktadır. Bu sistemler genel olarak zemin montajlı ve çatı montajlı sistemler olmak üzere iki ana grupta ele alınmaktadır.

Zemin montajlı sistemler genellikle büyük ölçekli arazi tipi GES projelerinde tercih edilmektedir. Taşıyıcı yapının zemine sabitlenmesinde beton blok, zemin vidası veya doğrudan zemine çakma yöntemleri kullanılmaktadır.

Çatı montajlı sistemler ise konutlarda, ticari işletmelerde ve kamu binalarında elektrik ihtiyacının yerinde karşılanması amacıyla uygulanmaktadır. Bu sistemler çatının mimari özelliklerine göre düz çatı veya eğimli çatı sistemleri şeklinde tasarlanabilmektedir. Ayrıca fotovoltaik modüllerin çatı örtüsü ya da cephe kaplaması gibi doğrudan yapı elemanı olarak kullanıldığı bina ile bütünleşik fotovoltaik (BIPV) sistemler de bu kapsamda değerlendirilmektedir. Çatı sistemleri, üzerinde bulundukları yapının statik özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğundan ilgili yapı mevzuatına ve yerel yönetmeliklere uygun biçimde tasarlanmalıdır.

3.4.3.1 Güneş takip sistemleri (tracker)

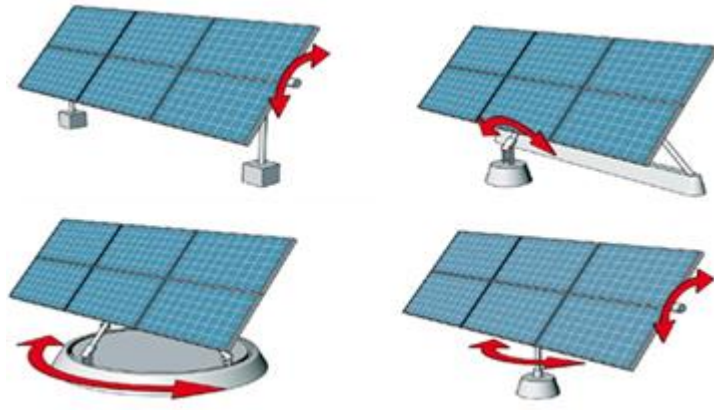
Güneş takip sistemleri (GTS), fotovoltaik panellerin güneş ışınlarını gün boyunca ve yıl genelinde mümkün olan en dik açıyla (90°) almasını sağlamak amacıyla tasarlanmış mekanik ve elektriksel sistemlerdir. Fotovoltaik modüllerin yüzeyine gelen ışınım miktarı, güneşin geliş açısı ile modül yüzeyinin normali arasındaki açıya bağlı olarak (kosinüs yasası) belirlendiği için, bu açının mümkün olduğunca düşürülmesi yani sıfıra yaklaştırılması enerji verimini en üst seviyeye çıkarır (Kayri, 2023).

Güneş takip sistemlerinin çalışma prensipleri ve kontrol mekanizmaları incelendiğinde, sistemlerin güneşi izleme yöntemlerine göre sensörlü ve koordinat bazlı olmak üzere iki gruba ayrıldığı görülmektedir. Sensörlü veya kapalı döngü sistemlerde, panel kenarlarına yerleştirilen ışığa bağımlı direnç (LDR) gibi fotosensörler aracılığıyla ışık yoğunluğu ölçülmekte ve panel, ışık yoğunluğunun en yüksek olduğu yöne çevrilmektedir. Ancak bu sistemlerde sensörler, çok bulutlu veya kapalı hava koşullarında kararsızlık gösterebilmektedir (Güneş, 2024).

Koordinat bazlı veya açık döngü sistemlerde ise sistemin kurulduğu konuma ait coğrafi koordinatlar ile tarih ve saat bilgileri kullanılarak güneşin astronomik konumu hesaplanmakta ve panellerin hareketi otomatik olarak kontrol edilmektedir. Güneş takip sistemleri, hareket mekanizmalarına göre de pasif ve aktif sistemler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Pasif sistemler elektronik bileşen içermezken aktif sistemlerde hareket, motor ve mikroişlemci yardımıyla gerçekleştirilmektedir (Güneş, 2024).

Güneş takip sistemleri eksen sayısına göre sınıflandırıldığında, tek eksenli ve çift eksenli sistemler olmak üzere iki farklı sistem türü ortaya çıkmaktadır. Tek eksenli takip sistemleri genellikle doğu-batı doğrultusunda azimut açısını veya kuzey-güney doğrultusunda eğim açısını takip edecek şekilde hareket etmektedir. Bu sistemler, sabit açılı sistemlere göre yıllık enerji üretimini yaklaşık %20–30,84 oranında artırabilmektedir (Kadir, 2024; Kayrı, 2023). Kurulumlarının daha basit olması nedeniyle özellikle geniş arazilerde etkili bir çözüm sunmaktadır.

Çift eksenli takip sistemleri ise hem azimut açısını hem de güneşin yükseklik açısını eş zamanlı olarak takip etmektedir. Bu sistemler, sabit sistemlere göre yıllık enerji üretiminde %32–47 oranında artış sağlayabilmektedir (Aktaş ve Kocaman, 2024). Bitlis ili Güroymak ilçesinde kurulu bir sistem için PVsyst kullanılarak gerçekleştirilen analizde, çift eksenli takip sisteminin sabit eğimli sisteme göre yıllık enerji üretimini %41 oranında artırdığı belirlenmiştir. Aynı çalışmada tek eksenli takip sistemi için bu artış oranı %25 olarak hesaplanmıştır (Demiryürek vd., 2024). Çeşitli güneş takip sistemi türleri Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Farklı türde takip sistemleri

Güneş takip sistemleri enerji üretiminde önemli artışlar sağlamakla birlikte bazı kritik dezavantajlara sahiptir. Yatırım ve bakım maliyetleri açısından değerlendirildiğinde, hareketli parçalar, motorlar ve sensörler nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinin sabit sistemlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca hareketli bileşenlerin düzenli bakım gerektirmesi, yıllık bakım ve onarım giderlerini de artırmaktadır.

Arazi gereksinimi bakımından, panellerin birbirleri üzerinde yakın gölgelenme oluşturmaması için taşıyıcı sistemler arasında daha fazla mesafe bırakılması gerekmektedir. Bu durum, sabit sistemlere kıyasla daha geniş bir kurulum alanına ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Dayanıklılık açısından ise hareketli mekanizmalar rüzgâr ve kar yüklerine karşı sabit sistemlere göre daha hassas olabilmektedir. Bu nedenle sistem tasarımında mekanik dayanım ve statik analizlere önem verilmesi gerekmektedir.

Takip sistemleri, enerji üretimini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan projelerde tercih edilmekle birlikte yüksek yatırım ve işletme maliyetleri nedeniyle yatırımın geri dönüş süresi ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir.

3.4.4 Enerji depolama ve batarya sistemleri

Güneş enerjisi sistemlerinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, güneş ışığının bulunmadığı gece saatlerinde veya yetersiz olduğu bulutlu hava koşullarında enerji sürekliliğinin nasıl sağlanacağıdır. Bu noktada enerji depolama sistemleri devreye girmektedir. Fotovoltaik sistemlerde üretilen elektrik enerjisinin anlık olarak tüketilemediği veya şebekeye

aktarılamadığı durumlarda, enerjiyi daha sonra kullanılmak üzere depolayan birimler batarya veya akü olarak adlandırılmaktadır. Bataryalar, panellerden elde edilen elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolamakta ve ihtiyaç duyulduğunda bu enerjiyi yeniden elektrik enerjisine çevirerek sisteme aktarmaktadır. Böylece özellikle gece saatlerinde ve bulutlu hava koşullarında enerji sürekliliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

Güneş enerjisi sistemlerinde farklı teknolojik özelliklere sahip akü ve batarya türleri kullanılmaktadır. Kurşun-asit aküler, uygun maliyetleri nedeniyle fotovoltaik sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu grupta yer alan jel aküler, sıvı elektrolit yerine jel kıvamında bir elektrolit içermeleri nedeniyle sarsıntılara karşı daha dayanıklı olmakta ve daha yüksek deşarj derinliği sunmaktadır (Bayyigit vd., 2023). Standart sulu akülerde kapasitenin yaklaşık %50'si kullanılabilirken jel akülerde bu oran %80'e kadar ulaşabilmektedir (Akhan vd., 2025).

Enerji depolama teknolojileri arasında yer alan lityum-iyon bataryalar ise geleneksel kurşun-asit bataryalara göre daha uzun işletme ömrü ve daha yüksek alan verimliliği sunmaktadır. Bu bataryalar, aynı enerji depolama kapasitesi için kurşun-asit sistemlere kıyasla yaklaşık %40 daha az fiziksel alana ihtiyaç duymaktadır. Bu özellik, kurulum alanının sınırlı olduğu uygulamalarda ve alan kullanımının önem taşıdığı projelerde lityum-iyon bataryaların tercih edilmesinde etkili olmaktadır (Köker, 2022).

Bir batarya sisteminin verimli çalışması ve uzun ömürlü olması için bazı teknik kriterlerin karşılanması gerekir. Bataryaların kendi kendine boşalma (öz-deşarj) oranının düşük olması, derin deşarjdan sonra tekrar şarj edilebilmesi ve yüksek döngü ömrüne sahip olması sistem kalitesini belirleyen unsurlardır (Üründü, 2025). Ayrıca bataryaların aşırı sıcak ortamlardan korunması ve tamamen boşalmasına (derin deşarj) izin verilmemesi, cihazın ömrünü uzatan kritik önlemlerdir.

Batarya sağlığını korumak için sistemde şarj kontrol cihazları kullanılır. Güneş panellerinden gelen voltajın dengesiz olması bataryalara zarar verebileceği için, bu cihazlar voltajı düzenleyerek akülerin güvenli bir şekilde dolmasını sağlar (Aksangör, 2019; Akcan vd., 2020). Şarj kontrol ünitesi, batarya tam dolduğunda enerji akışını keserek aşırı şarjı

önler; aynı zamanda enerji seviyesi kritik bir eşiğin altına indiğinde de deşarj işlemini durdurarak bataryanın fiziksel olarak zarar görmesini engeller (Üründü, 2025).

3.5 Fotovoltaik Sistem Tipleri

Fotovoltaik sistemler, üretilen elektrik enerjisinin nasıl yönetildiğine, nerede tüketildiğine ve yerel elektrik şebekesi ile olan bağlantı durumuna göre sınıflandırılırlar. 3.4 Fotovoltaik Sistem Bileşenleri başlığı altında belirtildiği üzere, bu sistemler temel olarak şebekeden bağımsız (off-grid), şebekeye bağlı (on-grid) ve her iki yapıyı birleştiren hibrit sistemler olarak üç ana başlık altında incelenmektedir.

3.5.1 Şebekeden bağımsız (off-grid / stand-alone) sistemler

Şebekeden bağımsız sistemler, merkezi elektrik şebekesinin ulaşamadığı veya şebeke bağlantısının ekonomik olmadığı kırsal alanlarda, yaylalarda, dağ evlerinde ve teknelerde tercih edilen bağımsız yapılardır.

Çalışma Mantığı; Güneş panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi, anlık tüketimden fazla olduğunda akülerde (bataryalarda) depolanır. Güneşin olmadığı gece saatlerinde veya kapalı havalarda ihtiyaç duyulan enerji bu akülerden karşılanır.

Temel olarak fotovoltaik paneller, şarj kontrol cihazı, akü grubu ve DC enerjiyi AC'ye çeviren bir invertörden oluşur.

Enerji bağımsızlığı sağlaması en büyük avantajı olmasına rağmen batarya maliyetlerinin yüksek olması ve bataryaların belirli aralıklarla bakım/yenileme gerektirmesi bu sistemlerin maliyetini ciddi oranda artırmaktadır.

3.5.2 Şebekeye bağlı (on-grid / grid-tied) sistemler

Günümüzde en yaygın kullanılan şebekeye bağlı sistemler, yerel elektrik dağıtım şebekesiyle senkronize bir şekilde faaliyet gösterirler. Bu sistemlerde elektrik şebekesi adeta devasa ve ücretsiz bir "depo" görevi görür. Panellerden üretilen fazla enerji şebekeye gönderilir; üretimin yetersiz olduğu anlarda ise enerji şebekeden çekilir.

Şebekeye bağlı invertörler ve enerji alışverişini takip eden çift yönlü sayaçlar sistemin temelini oluşturur; genellikle batarya kullanılmaz. Kullanıcılar ürettikleri fazla enerjiyi

dağıtım şirketine satabilir veya mahsuplaşma yöntemiyle faturalarını önemli ölçüde düşürebilirler.

3.5.3 Hibrit fotovoltaik sistemler

Hibrit sistemler, hem şebekeye bağlı çalışabilen hem de içerisinde batarya barındıran, on-grid ve off-grid sistemlerin avantajlarını bir araya getiren gelişmiş yapılardır. Şebeke enerjisinin kesilmesi durumunda, sistemdeki bataryalar devreye girerek kritik yüklerin (aydınlatma, buzdolabı vb.) kesintisiz çalışması sağlanır.

Bazı hibrit tasarımlarda güneş enerjisinin yanı sıra rüzgar türbini veya dizel jeneratörler de sisteme dahil edilerek enerji güvenliği en üst seviyeye çıkarılır (Demiryürek, 2018).

3.6 Fotovoltaik Sistemlerin Ekonomik Performans Göstergeleri

Fotovoltaik sistemlerin değerlendirilmesinde teknik performansın yanı sıra yatırımın ekonomik açıdan uygulanabilirliğinin belirlenmesi de önem taşımaktadır. Fotovoltaik sistemlerin yüksek ilk yatırım maliyetlerine karşılık uzun işletme ömürleri ve düşük işletme giderlerine sahip olması, ekonomik değerlendirmelerin uzun dönemli bir yaklaşımla yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda yatırım ve işletme maliyetlerinin yanı sıra Net Bugünkü Değer (NBD), İç Kârlılık Oranı (İKO), Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) ve Geri Ödeme Süresi (GÖS) gibi finansal göstergeler kullanılmaktadır (Yalılı, 2021; Bayyigit, 2023)

3.6.1 Yatırım Maliyetleri (CAPEX) ve İşletme Giderleri (OPEX)

Yatırım maliyetleri (CAPEX), fotovoltaik sistemin kurulumu ve işletmeye alınmasına kadar gerçekleştirilen başlangıç harcamalarını ifade etmektedir. Bu maliyetler genel olarak fotovoltaik modüller, invertörler, taşıyıcı sistemler, elektriksel ekipmanlar, mühendislik ve montaj gibi kurulumla ilişkili giderlerden oluşmaktadır. İşletme giderleri (OPEX) ise sistemin işletme süresince bakım, onarım, temizlik, sigorta ve gerektiğinde ekipman yenileme gibi faaliyetlerden kaynaklanan giderleri kapsamaktadır. CAPEX ve OPEX değerleri, fotovoltaik yatırımların ekonomik performansının belirlenmesinde kullanılan temel maliyet bileşenlerini oluşturmaktadır (Serat vd., 2023; Yalılı, 2021).

3.6.2 Net Bugünkü Değer (NBD)

Net Bugünkü Değer, bir yatırımın ekonomik ömrü boyunca oluşması beklenen net nakit akışlarının belirli bir iskonto oranı kullanılarak bugünkü değere indirgenmesi esasına dayanan dinamik bir ekonomik değerlendirme göstergesidir. NBD'nin pozitif olması, yatırımın dikkate alınan iskonto oranı altında ekonomik değer oluşturduğunu; negatif olması ise yatırımın bu koşullar altında ekonomik açıdan yeterli getiri sağlayamadığını göstermektedir (Bayyigit, 2023; Ramadana and Elistratov, 2019).

3.6.3 İç Kârlılık Oranı (İKO)

İç Kârlılık Oranı, bir yatırımın Net Bugünkü Değerini sifıra eşitleyen iskonto oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu gösterge, yatırımın kendi nakit akışlarından kaynaklanan getiri oranının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Hesaplanan İKO değerinin yatırım için kabul edilen iskonto oranından yüksek olması, projenin finansal açıdan uygulanabilirliğini destekleyen bir gösterge olarak değerlendirilmektedir (Ramadana and Elistratov, 2019).

3.6.4 Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE)

Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti, bir enerji üretim sisteminin ekonomik ömrü boyunca oluşan yatırım ve işletme maliyetleri ile aynı dönemde üretilen elektrik enerjisi dikkate alınarak hesaplanan ortalama birim enerji üretim maliyetidir. LCOE, farklı enerji üretim teknolojilerinin veya alternatif sistem tasarımlarının ekonomik açıdan karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan göstergelerden biridir (Bayyigit, 2023).

3.6.5 Geri Ödeme Süresi (GÖS)

Geri Ödeme Süresi, bir yatırım için gerçekleştirilen başlangıç harcamasının yatırım sonucunda sağlanan ekonomik faydalarla geri kazanılması için gereken süreyi ifade etmektedir. Basit geri ödeme süresi hesaplamasında paranın zaman değeri dikkate alınmadığından statik bir ekonomik değerlendirme göstergesi olarak kabul edilmektedir. Geri ödeme süresinin kısa olması, başlangıç yatırım maliyetinin daha kısa sürede geri kazanıldığını göstermektedir (Özcü, 2025; Özyigit, 2019).

4. MATERİYAL VE METOD

Bu bölümde, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü lokasyonu esas alınarak tasarlanan fotovoltaik sistemin kurulum alanı, meteorolojik veri kaynakları ve simülasyon sürecinde izlenen metodolojik aşamalar detaylandırılmaktadır.

4.1 Çalışma Alanının Tanıtımı

Bu çalışmanın uygulama alanı olarak, Balıkesir il merkezine yaklaşık 17 km mesafede, Balıkesir-Bigadiç karayolu üzerinde yer alan Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi seçilmiştir. Çağış Yerleşkesi, 1992 yılında Çağış ve Paşaköy mahalleleri sınırları içerisinde 23 parsel üzerinde yaklaşık 5.017.164,11 m² alan üzerine kurulmuştur. Yerleşke; Rektörlük, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Tıp Fakültesi Hastanesi ve diğer akademik birimler ile idari yapılar, sosyal tesisler ve öğrenci yurtlarını bünyesinde barındıran geniş bir kampüs alanına sahiptir. Balıkesir Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı tarafından yayımlanan 2024 yılı faaliyet raporuna göre kampüs, devam eden yatırımlarla birlikte yaklaşık 365.000 m² kapalı alana ulaşmıştır.

Çalışma kapsamında fotovoltaik sistem uygulama alanı olarak kampüsün idari merkezi olan Rektörlük Binası seçilmiştir (Şekil 4.1). Rektörlük Binası, 1996 yılında inşa edilmiş olup bodrum ve zemin katlar dâhil toplam sekiz kattan oluşmaktadır. Bina, kampüsün ortak orta gerilim aboneliği kapsamında yer alması, yüksek elektrik tüketimine sahip olması ve düz teras çatı yapısının fotovoltaik sistem kurulumu açısından uygun bir potansiyel sunması nedeniyle çalışma alanı olarak tercih edilmiştir.



Şekil 4.1: Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü

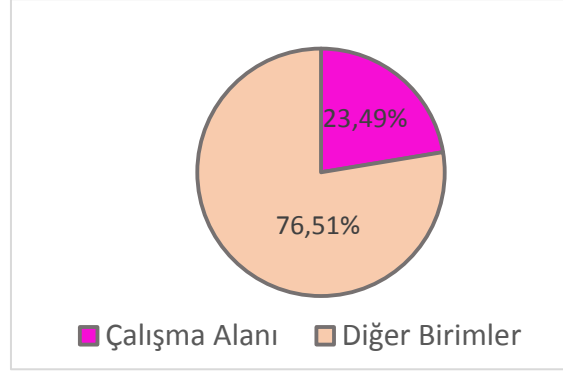
Balıkesir İli, Marmara Bölgesi içerisinde güneş enerjisi yatırımları açısından yüksek potansiyele sahip bölgelerden biridir. Bölgenin yıllık güneşlenme süresi ve toplam güneş radyasyonu değerleri, çatı tipi fotovoltaik sistem uygulamalarının teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu özellikleriyle Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi, fotovoltaik enerji sistemlerinin enerji üretim performansının ve ekonomik uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi açısından uygun bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Bu kapsamda, Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan fotovoltaik sistemin ortak orta gerilim aboneliğine sağlayacağı katkı ve enerji karşılama potansiyeli, çalışmanın temel araştırma konusunu oluşturmaktadır.

4.2 Elektrik Tüketim Verilerinin Analizi

Fotovoltaik sistemlerin doğru boyutlandırılabilmesi ve üretilecek elektrik enerjisinin mevcut tüketim yapısı üzerindeki etkisinin değerlendirilebilmesi için çalışma alanına ait elektrik tüketim verilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda analizlerde, Balıkesir Üniversitesi İdari ve Mali İşler Daire Başkanlığından temin edilen, Çağış Yerleşkesindeki orta gerilim aboneliklerine ait 2021–2025 yılları arasındaki aylık elektrik tüketim verileri esas alınmıştır. Yıllar arasındaki değişimlerin etkisini azaltmak ve daha temsili bir tüketim profili oluşturmak amacıyla 2021–2025 dönemine ait beş yıllık aylık ortalama tüketim değerleri kullanılmıştır.

Balıkesir Üniversitesi Sağlık Uygulama ve Araştırma Hastanesi, yıllık yaklaşık 7 milyon kWh düzeyindeki elektrik tüketimi ile çalışma kapsamına dâhil edilmemiştir. Bu nedenle çalışmada kullanılan “Çağış Yerleşkesi toplam elektrik tüketimi” ifadesi, hastane hariç olmak üzere EK B.1’de yer alan 17 kampüs birimini ifade etmektedir. Bu birimlerin 2021–2025 dönemine ait beş yıllık ortalama yıllık toplam elektrik tüketimi 6.268.064,06 kWh olarak hesaplanmıştır.

EK B.1’de sunulan tüketim değerlerinin incelenmesi sonucunda, Rektörlük Binası ile Mühendislik-Mimarlık Fakültesi binalarını kapsayan ortak orta gerilim aboneliğinin, 1.472.596,62 kWh/yıl beş yıllık ortalama elektrik tüketimiyle çalışma kapsamındaki birimler arasında en yüksek tüketimli abonelik olduğu belirlenmiştir. Söz konusu ortak abonelik, çalışma kapsamındaki toplam elektrik tüketiminin %23,49’unu oluştururken diğer kampüs birimlerinin payı %76,51 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2: Çalışma alanının toplam elektrik tüketimindeki payı

Bu oranlar, çalışma alanının yerleşke elektrik tüketimindeki önemli payını ortaya koymakta ve fotovoltaik sistemin sağlayacağı katkının değerlendirilmesine temel oluşturmaktadır. Tüketim payları Şekil 4.2’de dairesel grafikte gösterilmektedir.

Tablo 4.1’de, Rektörlük–Mühendislik Fakültesi ortak orta gerilim aboneliğinin 2021–2025 dönemine ait aylık elektrik tüketimleri ile beş yıllık aylık ortalamaları sunulmaktadır. Beş yıllık ortalamalara göre tüketim 85.530,33–195.942,06 kWh arasında değişmekte; en düşük değer mayıs, en yüksek değer ise ağustos ayında gerçekleşmektedir. Yaz aylarında artan tüketim, soğutma yüklerinin elektrik talebini artırdığını göstermektedir.

Tablo 4.1: Rektörlük ve Mühendislik Fakültesi OG aboneliği 5 yıllık tüketim ortalaması

Ay	2021 (kWh)	2022 (kWh)	2023 (kWh)	2024 (kWh)	2025 (kWh)	5 Yıllık Ortalama (kWh)
<i>Ocak</i>	89.782,80	123.047,70	121.433,10	123.930,90	111.797,25	113.998,35
<i>Şubat</i>	81.696,00	107.005,20	92.318,55	109.009,65	114.139,80	100.833,84
<i>Mart</i>	102.223,50	119.715,00	93.660,60	110.717,40	108.254,10	106.914,12
<i>Nisan</i>	85.094,25	90.120,90	86.001,60	79.781,25	96.703,50	87.540,30
<i>Mayıs</i>	67.281,90	81.575,25	74.809,80	94.574,85	109.409,85	85.530,33
<i>Haziran</i>	100.132,80	150.558,00	88.771,95	172.869,15	150.978,90	132.662,16
<i>Temmuz</i>	146.766,45	140.280,45	208.866,45	218.357,4	211.971,45	185.248,44
<i>Ağustos</i>	182.594,70	183.208,80	205.233,60	212.281,95	196.391,25	195.942,06
<i>Eylül</i>	9.735,90	125.969,85	154.604,85	172.251,60	157.102,65	123.932,97
<i>Ekim</i>	94.623,15	107.336,40	104.231,40	123.575,55	108.274,80	107.608,26
<i>Kasım</i>	109.923,90	113.377,35	114.816,00	102.471,90	108.526,65	109.823,16
<i>Aralık</i>	122.433,60	119.490,75	120.974,25	116.858,40	133.056,15	122.562,63
Yıllık toplam	1.192.288,95	1.461.685,65	1.465.722,15	1.636.680	1.606.606,35	1.472.596,62

Beş yıllık ortalama elektrik tüketim verileri ortak OG aboneliğine ait olduğundan, fotovoltaik sistemin Rektörlük Binası ölçeğinde değerlendirilebilmesi amacıyla ortak tüketimin bina bazında tahmini olarak dağıtılması gerekmektedir.

4.2.1 Ortak Elektrik Tüketiminin Bina Bazında Tahmini Dağılımı

Rektörlük Binası ile Mühendislik–Mimarlık Fakültesi aynı OG aboneliği üzerinden beslendiğinden, mevcut sayaç verilerinden binaların elektrik tüketimlerinin ayrı ayrı belirlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle ortak aboneliğe ait elektrik tüketiminin bina bazındaki tahmini dağılımının belirlenmesinde Koçyiğit (2019) tarafından oluşturulan bina enerji modellerinin simülasyon sonuçlarından yararlanılmıştır.

Koçyiğit (2019), Rektörlük Binası ile Mühendislik–Mimarlık Fakültesini DesignBuilder yazılımında ayrı ayrı modellemiş ve elde ettiği sonuçları 2017 yılına ait ortak sayaç verileriyle karşılaştırmıştır. Bu çalışmada ise söz konusu simülasyon sonuçlarından elde edilen bina bazındaki tüketim oranları, ortak OG aboneliğine ait 2025 yılı elektrik tüketim verilerinin tahmini olarak bina bazında dağıtılmasında kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada aylık olarak sunulan simülasyon sonuçlarından hareketle her iki binanın yıllık simülasyon elektrik tüketimleri hesaplanmış ve toplam yıllık simülasyon tüketimi Eşitlik (4.1) ile belirlenmiştir.

$$E_T = E_R + E_M \quad (4.1)$$

Burada E_R , Rektörlük Binasının yıllık simülasyon elektrik tüketimini; E_M , Mühendislik–Mimarlık Fakültesinin yıllık simülasyon elektrik tüketimini; E_T ise iki binanın toplam yıllık simülasyon elektrik tüketimini ifade etmektedir.

Her bir binanın toplam simülasyon tüketimi içerisindeki payı Eşitlik (4.2) ve Eşitlik (4.3) kullanılarak belirlenmiştir.

$$P_R = \frac{E_R}{E_T} \times 100 \quad (4.2)$$

$$P_M = \frac{E_M}{E_T} \times 100 \quad (4.3)$$

Burada P_R Rektörlük Binasının; P_M ise Mühendislik–Mimarlık Fakültesinin toplam simülasyon elektrik tüketimi içerisindeki yüzdelik payını göstermektedir. Binaların yıllık simülasyon elektrik tüketimleri ile toplam tüketim içerisindeki tahmini payları Tablo 4.4’te sunulmaktadır.

Tablo 4.2: Binaların yıllık simülasyon elektrik tüketimleri ve tahmini tüketim payları

<i>Bina</i>	<i>Yıllık simülasyon tüketimi (kWh/yıl)</i>	<i>Hesaplanan pay (%)</i>
<i>Rektörlük Binası</i>	925.424,77	59,21
<i>Mühendislik–Mimarlık Fakültesi</i>	637.603,83	40,79
<i>Toplam</i>	1.563.028,60	100,00

Tablo 4.2’deki değerler, ölçülmüş bina bazlı tüketimleri değil, enerji simülasyonuna dayalı tahmini tüketimleri ve bunlardan hesaplanan dağılım oranlarını göstermektedir.

Ortak OG aboneliğine ait yıllık elektrik tüketiminin bina bazındaki tahmini dağılımının belirlenmesinde, son beş yıllık elektrik tüketimlerinin ortalaması esas alınmıştır. Rektörlük Binası ile Mühendislik–Mimarlık Fakültesine ait tahmini yıllık elektrik tüketimleri Eşitlik (4.4) ve Eşitlik (4.5) kullanılarak belirlenmiştir.

$$E_{R,tah} = E_{ort} \times \frac{P_R}{100} \quad (4.4)$$

$$E_{M,tah} = E_{ort} \times \frac{P_M}{100} \quad (4.5)$$

Burada E_{ort} ortak OG aboneliğinin son beş yıllık ortalama elektrik tüketimini; $E_{R,tah}$ ve $E_{M,tah}$ ise sırasıyla Rektörlük Binası ile Mühendislik–Mimarlık Fakültesinin tahmini yıllık elektrik tüketimlerini ifade etmektedir. Ortak OG aboneliğinden elde edilen sayaç verileri iki binanın toplam elektrik tüketimini göstermektedir. Bununla birlikte çalışmanın bina ölçeğindeki uygulama alanı Rektörlük Binası olduğundan, TS 825 kapsamında gerçekleştirilen ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı hesaplamaları yalnızca bu bina için yapılmış; Mühendislik–Mimarlık Fakültesinin ısı yükleri çalışma kapsamına alınmamıştır. Bu bölümde gerçekleştirilen dağılım gerçek bir sayaç ayrımını değil, bina bazındaki karşılaştırmalarda kullanılmak üzere yapılan tahmini bir paylaşımı ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen ortak OG aboneliğinin güncel tüketim verilerine bu oranların uygulanmasıyla elde edilen bina bazındaki tahmini tüketim miktarları ile fotovoltaik sistem üretimine ilişkin karşılaştırmalar Bölüm 5’te sunulmaktadır.

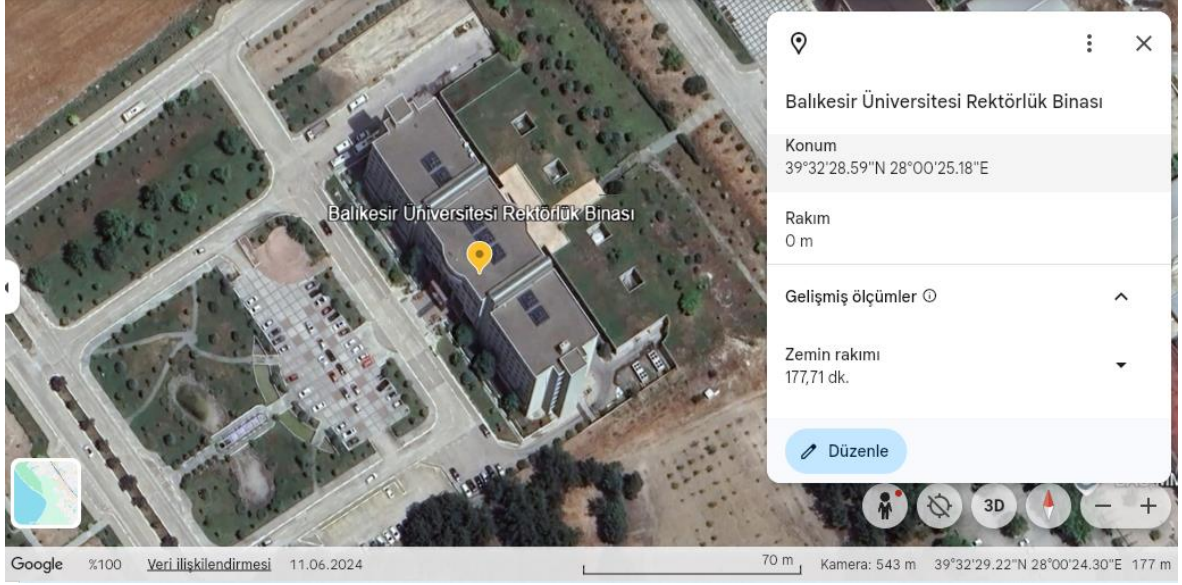
4.3 Konumsal ve Geometrik Analiz

Fotovoltaik sistemlerin tasarımında çalışma alanına ait coğrafi ve geometrik verilerin doğru olarak belirlenmesi, sistem modellemesinin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binasının konumu ve coğrafi koordinatları Google Earth yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Çatının geometrik özelliklerinin ve toplam alanının belirlenmesinde ise binaya ait mimari proje esas alınmış; mimari çatı planındaki ölçüler ve çatı sınırları incelenerek fotovoltaik sistem kurulabilecek alan değerlendirilmiştir. Elde edilen konumsal ve geometrik veriler, sistem modellemesi ve panel yerleşimi için altlık olarak kullanılmıştır.

4.3.1 Çalışma alanının koordinat ve rakım bilgileri

Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binasının coğrafi konumu Google Earth yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre çalışma alanı, 39°32’28,59” Kuzey (N) enlemi ile 28°00’25,18” Doğu (E) boylamında yer almaktadır. Google Earth’ün zemin yüksekliği verisine göre çalışma alanının deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 178 m olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen koordinat ve rakım bilgileri, PVsyst yazılımında çalışma alanının tanımlanması ve konuma uygun meteorolojik verilerin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Rektörlük Binasının konumu ile koordinat ve zemin rakımı bilgileri Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



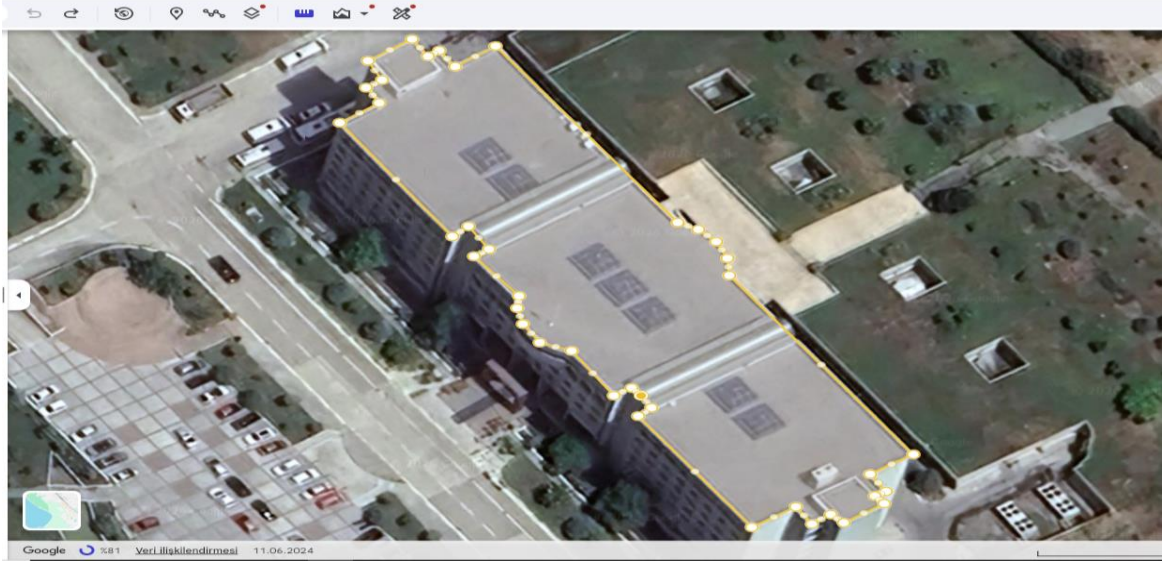
Şekil 4.3: Çalışma alanına ait konum, koordinat ve rakım bilgileri (Google Earth, 2026)

4.3.2 Fotovoltaik sistem kurulacak çatı alanın belirlenmesi

Fotovoltaik sistemin kurulu gücü ve panel yerleşim planı, çatının geometrik özelliklerine ve kullanılabilir alanına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle Rektörlük Binasına ait mimari proje incelenmiş; planda yer alan ölçüler, bina dış sınırları, blokların geometrik yapısı ve çatı düzlemine karşılık gelen alanlar değerlendirilmiştir.

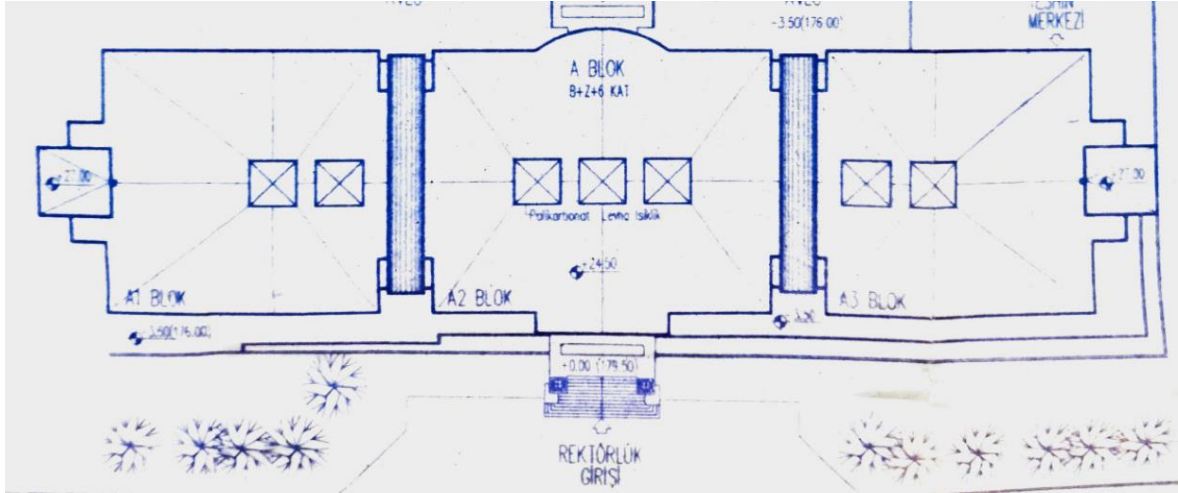
Mimari proje üzerinden yapılan inceleme sonucunda Rektörlük Binasının toplam çatı alanı 2.231 m² olarak belirlenmiştir. Bu değer, fotovoltaik sistem tasarımında kullanılan temel geometrik veri olarak kabul edilmiştir.

Çatının yerleşke içerisindeki konumunun, genel geometrisinin ve dış sınırlarının görsel olarak gösterilmesi amacıyla Google Earth görüntüsünden yararlanılmıştır. Şekil 4.4'te sarı çizgiyle gösterilen sınırlar, fotovoltaik sistem kurulması planlan Rektörlük Binası çatı alanının genel çevresini göstermektedir.



Şekil 4.4: Rektörlük çatı alanının sınırlarının Google Earth yazılımındaki görüntüsü

Google Earth görüntüsü yalnızca çatının konumunu ve genel dış sınırlarını göstermek amacıyla kullanılmıştır. Çatı alanının belirlenmesinde ve çatı üzerindeki yapısal ayrıntıların değerlendirilmesinde ise Şekil 4.5'te verilen mimari plan esas alınmıştır.



Şekil 4.5: Rektörlük Binası Çatısı Mimari Çizimi

Mimari planın incelenmesi sonucunda binanın üç ana bloktan oluştuğu; çatı üzerinde ışıklık adı verilen aydınlatma fenerleri, bloklar arasındaki bağlantı hollerine ait çatı bölümleri, merdiven-asansör çekirdekleri, tesisat ve havalandırma şaftları ile çatı çevresindeki parapetlerin bulunduğu görülmüştür. Fotovoltaik panel yerleşimi oluşturulurken çatı geometrisinin yanı sıra söz konusu yapı elemanları, bakım ve erişim için bırakılması gereken geçiş alanları ile panel sıraları arasındaki mesafeler dikkate alınmıştır. PVsyst yazılımındaki sistem modellemesi ve panel yerleşimi, mimari projeden

elde edilen bu geometrik veriler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.3'te, fotovoltaik sistem tasarımında kullanılan Rektörlük Binasına ait temel çatı ve konum bilgileri sunulmaktadır.

Tablo 4.3: Rektörlük binası çatı alanı ölçüm sonuçları

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Veri Kaynağı</i>	Mimari Proje
<i>Konum ve rakım veri kaynağı</i>	Google Earth Yazılımı
<i>Çatı tipi</i>	Teras çatı
<i>Toplam çatı alanı</i>	2.231 m ²
<i>Ortalama rakım</i>	178 m
<i>Koordinatlar</i>	39°32'28,59" K - 28°00'25,18" D

4.4 Bina Enerji İhtiyacının Belirlenmesi

Fotovoltaik sistemin bina enerji ihtiyacını karşılama potansiyelinin değerlendirilebilmesi için Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binasının yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları belirlenmiştir. Bu amaçla binanın mimari özellikleri, yapı kabuğuna ait teknik veriler ve kullanım koşulları İZODER TS 825 Hesap Programına tanımlanarak bina enerji modeli oluşturulmuştur. Programdan elde edilen sonuçlar, çalışmanın bulgular bölümünde PVsyst yazılımıyla hesaplanan fotovoltaik enerji üretimiyle karşılaştırılmaktadır.

4.4.1 İZODER TS 825 yazılımının tanıtımı

Binaların enerji performansının değerlendirilmesinde, yapı kabuğunun ısıl özelliklerinin doğru biçimde belirlenmesi önem taşımaktadır. Türkiye'de bu alandaki hesaplamalar, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı esas alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu standart kapsamında geliştirilen İZODER TS 825 Hesap Programı, binaların yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan yazılımlardan biridir.

Yazılımda dış duvar, çatı, döşeme, pencere ve kapı gibi yapı kabuğunu oluşturan elemanların ısıl özellikleri; binanın bulunduğu iklim bölgesi, kullanım koşulları ve geometrik özellikleriyle birlikte değerlendirilmektedir. Bu veriler kullanılarak yapı

elemanlarının ısı geçiş özellikleri ile binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları hesaplanabilmektedir.

4.4.2 Rektörlük binasının TS 825 enerji modelinin oluşturulması ve enerji ihtiyacının hesaplanması

Rektörlük Binasının İZODER TS 825 enerji modelinin oluşturulmasında binaya ait mimari özellikler, yapı kabuğunu oluşturan yapı elemanları ve literatürden elde edilen teknik veriler birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda bina geometrisi ve şartlandırılan alanın belirlenmesinde Koçyiğit'in (2019), yapı kabuğunu oluşturan elemanların katman ve malzeme özelliklerinin tanımlanmasında ise Kon'un (2014) alışmasından yararlanılmıştır. Modelleme çalışmasının ilk aşamasında binanın kullanım amacı, kat adedi, konumu ve proje tanımlama bilgileri yazılıma girilmiştir.

Modelde kullanılan şartlandırılan alanın belirlenmesinde, Koçyiğit (2019) tarafından aynı bina için oluşturulan enerji modelinden yararlanılmıştır. Söz konusu çalışmada binanın toplam alanı 15.202,34 m², ısıtılan ve soğutulan alanın toplam alana oranı ise yaklaşık %85,50 olarak verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda şartlandırılan alan yaklaşık 12.998 m² olarak hesaplanarak programa tanımlanmıştır.

$$V_{\text{şart}} = A_f \times h \quad (4.6)$$

şartlandırılmış Hacim $V_{\text{şart}}$ (m³)

şartlandırılmış Döşeme Alanı A_f (m²)

Ortalama kat yüksekliği h (m)

Kat yüksekliğinin 3,50 m alınmasıyla şartlandırılan brüt hacim Eşitlik (4.6) ile 45.493 m³ olarak belirlenmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan temel bina parametreleri Tablo 4.4'te, programa girilen proje bilgileri ise Ek A.1'de verilmiştir.

Tablo 4.4: TS 825 hesaplamalarında kullanılan temel bina parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Bina</i>	Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binası
<i>Yapım yılı</i>	1996
<i>Toplam alan</i>	15.202,34 m ²
<i>Şartlandırılan alan</i>	12.998 m ²
<i>Çatı alanı</i>	2.231 m ²
<i>Çatı tipi</i>	Düz (Teras) çatı
<i>Dış duvar malzemesi</i>	Gaz beton
<i>Kat yüksekliği</i>	3,50 m
<i>Kat Sayısı</i>	8
<i>Hesaplama yazılımı</i>	İZODER TS 825 Hesap Programı
<i>Geometrik veri kaynağı</i>	Mimari proje

Tablo 4.4’de verilen genel bina bilgilerinin ardından yapı kabuğunu oluşturan dış duvar, teras çatı, taban döşemesi, pencere ve kapılar programa ayrı ayrı tanımlanmıştır. Yapı elemanlarının katmanlaşma özelliklerinin belirlenmesinde mevcut bina bilgileri ile ilgili literatürden yararlanılmış; dış duvarlar gazbeton yapı elemanı, çatı sistemi ise teras çatı olarak modellenmiştir.

Proje bilgilerinin oluşturulması aşamasında binanın kullanım amacı “Ofis, Büro vb. İş Yerleri”, bina konumu ise Balıkesir ili merkez ilçesi olarak tanımlanmıştır. Bu bilgilere bağlı olarak kış tasarım sıcaklığı 20 °C, yaz tasarım sıcaklığı 26 °C ve hava değişim katsayısı 0,70h⁻¹ değerleri TS 825 İZODER Hesap Programı tarafından otomatik olarak atanmıştır.

İZODER TS 825 programının malzeme veri tabanından, malzemelere ait birim hacim kütlesi (yoğunluk), ısıl iletkenlik katsayısı (λ), özgül ısı kapasitesi (c) ve su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) değerleri seçilerek tanımlanmıştır. Dış duvarlarda kullanılan gazbeton blok için 600 kg/m³ yoğunluk ve $\lambda=0,19$ W/mK ısıl iletkenlik katsayısı esas alınmıştır. Teras çatı ve taban döşemesinde kullanılan beton, ekstrüde polistiren köpük (XPS), kum-çakıl ve kömür cürufu gibi malzemelerin termofiziksel özellikleri de program

veri tabanından seçilmiştir. Pencere sistemi için Kon (2014) çalışmasında verilen, iki cam arası 12 mm boşluklu alüminyum doğramalı sistem esas alınarak $U=2,908 \text{ W/m}^2\text{K}$ tanımlanmıştır. Cam güneş enerjisi geçirgenlik katsayısı ise TS 825 İZODER Hesap Programı kılavuzunda renksiz yalıtım camı (çift cam) için önerilen $g=0,75$ olarak programa tanımlanmıştır (Tablo 4.5–4.9).

Tablo 4.5: Rektörlük binası dış duvar yapı elemanı katmanları

Katman	Kalınlık (mm)	Açıklama
<i>Kireç harcı / Kireç-çimento harcı</i>	20	İç sıva
<i>Çimento harcı</i>	30	Ara sıva
<i>Reçine ile uygulanan sıva</i>	10	Dış kaplama sıvası
<i>Gazbeton blok</i>	300	Yoğunluk: 600 kg/m^3 , termal iletkenlik, $\lambda = 0,19 \text{ W/m.K}$

Tablo 4.6: Dış duvar alanlarının yönlere göre dağılımı

Yön	Alan (m^2)
<i>Kuzeydoğu</i>	1946
<i>Güneydoğu</i>	980
<i>Güney</i>	10
<i>Güneybatı</i>	1856
<i>Kuzeybatı</i>	851
<i>Ayrıca dış cephede havalandırılan hava boşluğu ve dış cephe kaplaması bulunduğu kabul edilmiştir.</i>	

Tablo 4.7: Teras çatı yapı elemanı katmanları

Katman	Kalınlık (mm)
<i>Kireç harcı / Kireç-çimento harcı</i>	25
<i>Donatısız beton</i>	30
<i>Ekstrüde polistiren köpük (XPS)</i>	80
Özellik	Değer
<i>Çatı alanı</i>	2.231 m^2

Tablo 4.8: Toprağa temas eden taban döşemesi katmanları

Katman	Kalınlık (mm)
<i>Donatısız beton</i>	45
<i>Donatısız beton (Grobeton)</i>	100
<i>Ekstrüde polistiren köpük (XPS)</i>	30
<i>Kum-kum çakıl tabakası</i>	150
<i>Kömür cürufu</i>	230
Özellik	Değer
<i>Taban alanı</i>	12.998 m ²
<i>Yapı elemanı adı</i>	Rektörlük Taban Döşemesi

Tablo 4.9: Dış ortama bakan pencere ve kapı alanlarının yönlere göre dağılımı

Yön	Alan (m²)
<i>Kuzeydoğu</i>	978
<i>Güneydoğu</i>	166
<i>Güney</i>	11
<i>Güneybatı</i>	945
<i>Batı</i>	18
<i>Kuzeybatı</i>	156

Not: Doğu ve kuzey yönlerinde cam alanı bulunmadığı kabul edilmiştir.

Malzeme özelliklerine göre yapı elemanlarının toplam ısıl geçirgenlik katsayıları (U değerleri) hesaplanmış ve bu değerler ilgili yapı elemanlarının yüzey alanlarıyla birlikte değerlendirilerek binanın iletimle toplam ısı transfer katsayısı belirlenmiştir. İletimle toplam ısı transfer katsayısının hesaplanmasına ilişkin ayrıntılı program çıktısı EK A.3'te sunulmaktadır. Elde edilen yapı kabuğu verileri esas alınarak binanın yıllık ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı hesaplanmış; hesaplama sonuçları Bölüm 5'te fotovoltaik sistemden elde edilen enerji üretim değerleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

4.5 Fotovoltaik Santralin Enerji ve Ekonomik Modellemesi

4.5.1 Modelleme yazılımının tanıtımı

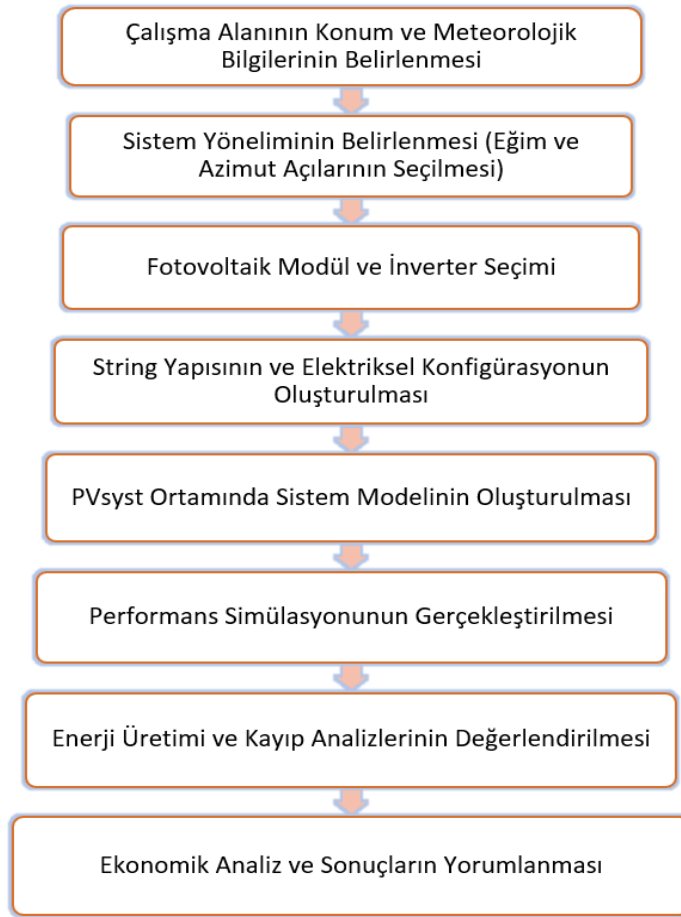
Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binası için tasarlanan fotovoltaik sistemin enerji ve ekonomik analizleri, İsviçre Cenevre Üniversitesinin 1992 yılında geliştirdiği PVsyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır. PVsyst; güneş enerjisi sistemlerinin boyutlandırılması, modellenmesi ve enerji üretim tahminlerinin yapılması için dünya çapında "endüstri standardı" olarak kabul edilen kapsamlı bir simülasyon aracıdır. Yazılım; şebekeye bağlı (on-grid), şebekeden bağımsız (off-grid) ve pompalama sistemlerinin performans analizlerini, seçilen bölgenin meteorolojik verileri ve sistem bileşenlerinin teknik özelliklerini kullanarak yüksek doğrulukla simüle edebilmektedir. Yazılım dört temel bölümden oluşmakta olup çalışmada şu işlevlerinden faydalanılmıştır:

Proje tasarımı, Yazılımın ana modülü rolünü üstlenmektedir. Meteorolojik veri seçiminden 3D gölgeleme analizine kadar tüm detaylı mühendislik hesaplamaları bu bölümde yapılır. Bir yıllık saatlik adımlarla simülasyon yaparak sistemin nihai verimini ortaya koymaktadır. Veri tabanları, yazılımın bünyesinde bulundurduğu; Meteonorm (9.0), NASA-SSE ve PVGIS gibi güvenilir veri setlerini kullanmaktadır. Bu kısımda, Balıkesir ili koordinatları girilerek bölgeye ait saatlik ışınlam ve sıcaklık değerleri sentetik olarak üretilmiştir. Ayrıca veri tabanı bünyesinde, binlerce fotovoltaik panel ve invertör modeline ait üretici katalog verilerini içermektedir.

3D modelleme ve gölgeleme analizi, çalışma alanındaki çatı geometrisinin ve çevresel engellerin modellenmesine, bunların fotovoltaik sistem üzerindeki gölgeleme etkilerinin ve üretim kayıplarının hesaplanmasına imkân sağlamaktadır.

Ekonomik değerlendirme, projenin sistemin yatırım maliyeti, geri ödeme süresi, net bugünkü değer (NBD) ve iç kârlılık oranı (İKO) gibi finansal metriklerini hesaplayarak yatırımın fizibilitesini analiz etmektedir.

Şekil 4.6 'da kurulması planlanan fotovoltaik sistemin PVsyst yazılımındaki modelleme, enerji simülasyonu ve ekonomik değerlendirme süreci gösterilmiştir.



Şekil 4.6: PVsyst yazılımında izlenen simülasyon süreci

PVsyst, güneş enerjisi üretimi modellemedeki işlevini dünya genelindeki çok sayıda saha çalışmasında kanıtlamış bir yazılım aracıdır. Literatürde, PVsyst ile elde edilen tahmin verileri ile gerçek saha ölçümleri arasındaki farkın %0,56 gibi çok düşük seviyelerde kalabildiği vurgulanmıştır. (Demiryürek, 2018). Yazılımın gerçek saha koşullarını yansıtmaya yeteneği güçlüdür. Bu durum sonuçların bilimsel güvenilirliği açısından önemlidir.

4.5.2 Simülasyon modelinin oluşturulması

Fotovoltaik sistemin enerji üretim kapasitesinin belirlenmesi amacıyla kullanılan PVsyst 8.1.4 simülasyon yazılımında modelin oluşturulması için öncelikle çalışma alanı olarak Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan Rektörlük Binasına ait coğrafi konum bilgileri yazılıma tanımlanmıştır. Modelleme sürecinde Balıkesir iline ait meteorolojik veriler kullanılmış olup, güneş ışıınımı ve ortam sıcaklığı değerleri Meteonorm veri tabanından temin edilmiştir.

Simülasyonun ilk aşamasında yeni bir şebekeye bağlı (Grid Connected) fotovoltaik sistem projesi oluşturulmuş ve sistemin kurulacağı lokasyon belirlenmiştir. Ardından panel yerleşimine esas teşkil edecek çatı geometrisi değerlendirilmiş ve Mimari Proje üzerinden elde edilen ölçümler dikkate alınarak çatı kenarı güvenlik mesafeleri, bakım ve yürüme yolları ile panel sıraları arasında bırakılması gereken boşluklar göz önünde bulundurularak kullanılabilir panel yerleşim alanı belirlenmiştir.

Rektörlük binası coğrafi güneye göre 53° batıya yönelimli olduğundan, çatı üzerindeki PV modüllerinin yüzey azimut açısı $\gamma = +53^\circ$ olarak alınmıştır. Modül eğim açısı, PVsyst ile gerçekleştirilen alternatif eğim analizlerinde yıllık enerji üretimi, gölgelenme kayıpları, sıra aralıkları ve çatı kullanım oranı birlikte değerlendirilerek $\beta = 10^\circ$ seçilmiştir.

Panel yöneliminin belirlenmesinin ardından sistem bileşenleri yazılıma tanımlanarak elektriksel konfigürasyon oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilgili alt başlıklarda teknik özellikleri verilen fotovoltaik modül ve inverter sisteme tanımlanmıştır. Böylece panel dizilerinin seri ve paralel bağlantıları oluşturularak sistemin kurulu gücü belirlenmiştir.

Simülasyon modelinde sıcaklık kaynaklı kayıplar, kablo kayıpları, modüller arası uyumsuzluk kayıpları, inverter dönüşüm kayıpları, kirlenme (soiling) kayıpları ve gölgelenme kayıpları gibi enerji üretimini etkileyen temel kayıp mekanizmaları da dikkate alınmıştır. Böylece gerçek çalışma koşullarına daha yakın sonuçlar elde edilmesini kolaylaştıracak simülasyon modeli oluşturulmuş ve performans analizleri için hazır hale getirilmiştir.

4.5.2.1 Fotovoltaik modülün seçimi ve tanımlanması

Fotovoltaik sisteminde tasarlanacak PV modülünün seçiminde, çatı alanının etkin değerlendirilmesi, sıcaklık değişimlerine karşı performans kararlılığı, yüksek enerji üretim potansiyeli ve güncel hücre teknolojileri temel kriterler olarak hesaba katılmıştır. Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binası çatısında kullanılabilir alanın sınırlı olması nedeniyle, birim alan başına daha yüksek kurulu güç sağlayabilen yüksek güç ve verim değerlerine sahip bir fotovoltaik modül tercih edilmiştir.

Fotovoltaik sistem tasarımında JinkoSolar JKM585N-72HL4-V model, N tipi monokristal TOPCon hücre teknolojisine sahip tek yüzlü fotovoltaik modül kullanılmıştır. Seçilen

modül, standart test koşullarında 585 W nominal maksimum güce ve %22,65 modül verimine sahiptir. Modülde 72 tam hücre eşdeğerine karşılık gelen toplam 144 yarım hücre bulunmaktadır. Half-cut hücre yapısı, hücrelerden geçen akımın ve buna bağlı direnç kayıplarının azaltılmasına katkı sağlamakta; kısmi gölgelenme durumunda meydana gelebilecek güç kayıplarının sınırlandırılmasına yardımcı olmaktadır. PVsyst verilerine göre modül, 600 W/m² ışınlım düzeyinde standart test koşullarındaki verimini büyük ölçüde korumakta, 200 W/m² ışınlım düzeyinde ise yaklaşık %3 nispi verim kaybı göstermektedir.

Modül 2278 × 1134 × 30 mm boyutlarında ve 27 kg ağırlığında olup 1500 V DC maksimum sistem gerilimine uygundur. Maksimum güç sıcaklık katsayısının -0,29 %/°C olması, hücre sıcaklığının artmasıyla meydana gelen güç kaybının sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında enerji üretim performansının korunması bakımından avantaj sağlamaktadır.

Fotovoltaik modülün belirlenmesinin ardından, ortak orta gerilim aboneliğinin yıllık elektrik tüketiminin karşılanması için gerekli teorik kurulu gücün belirlenmesine yönelik bir ön boyutlandırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplama tüketim esaslı teorik gereksinimi göstermek amacıyla yapılmış; uygulanabilir sistemin gerçek kurulu gücü ise kullanılabilir çatı alanına yerleştirilebilen modül sayısına göre belirlenmiştir.

Çatı geometrisi, bakım yolları ve güvenlik mesafeleri dikkate alınarak fotovoltaik sistemin boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Panel yerleşimi ve sistemin elektriksel yapılandırması sonucunda sistemde kullanılabilecek modül sayısı 418 adet olarak belirlenmiştir. Seçilen JinkoSolar JKM585N-72HL4-V model modülün fiziksel boyutlarına göre modüllerin kapladığı toplam net yüzey alanı Eşitlik (4.7) kullanılarak hesaplanmıştır. Modüllerin toplam net yüzey alanı Eşitlik (4.7) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$A_{PV} = N_{Modül} \times A_{Modül} \quad (4.7)$$

Burada A_{PV} , modüllerin kapladığı toplam net yüzey alanını (m²);

$N_{Modül}$, sistemde kullanılan toplam modül sayısını (adet);

$A_{Modül}$ ise bir fotovoltaik modülün yüzey alanını (m²) ifade etmektedir.

Buna Modüllerin kapladığı toplam net yüzey alanı 1079,694 m² olarak hesaplanmış ve bu değer yaklaşık 1080 m² olarak ifade edilmiştir. Sistemin DC kurulu gücü ise Eşitlik (4.8) kullanılarak belirlenmiştir:

$$P_{DC} = N_{\text{Modül}} \times P_{\text{Modül}} \quad (4.8)$$

Burada P_{DC} , fotovoltaik sistemin standart test koşullarındaki toplam DC kurulu gücünü (kWp);

$N_{\text{Modül}}$, toplam modül sayısını (adet);

$P_{\text{Modül}}$ ise bir modülün nominal maksimum gücünü (kWp) ifade etmektedir.

Yapılan hesaplama sonucunda fotovoltaik sistemin toplam DC kurulu gücünün ise 244,53 kWp olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen bu değer, PVsyst yazılımında gerçekleştirilecek ön boyutlandırma, inverter seçimi ve üç boyutlu çatı yerleşimi çalışmalarında başlangıç kapasitesi değeri olarak yerini almıştır.

PVsyst veri tabanından seçilen fotovoltaik modülün modellemeye kullanılan teknik özellikleri Tablo 4.10’da verilmiştir:

Tablo 4.10: Seçilen fotovoltaik modülün teknik özellikleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Üretici</i>	JinkoSolar
<i>Modül modeli</i>	JKM585N-72HL4-V
<i>Hücre teknolojisi</i>	Monokristal N tipi TOPCon
<i>Hücre sayısı</i>	144 yarım hücre (72 tam hücre eşdeğeri)
<i>Nominal maksimum güç (Pmax)</i>	585 W
<i>Modül verimi</i>	%22,65
<i>Maksimum güç gerilimi (Vmp)</i>	43,53 V
<i>Maksimum güç akımı (Imp)</i>	13,44 A
<i>Açık devre gerilimi (Voc)</i>	52,47 V
<i>Kısa devre akımı (Isc)</i>	14,07 A

<i>Maksimum sistem gerilimi</i>	1500 V DC
<i>Güç toleransı</i>	0 ~ +3 %
<i>Maksimum güç sıcaklık katsayısı (Pmax)</i>	-0,29 %/°C
<i>Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı (Voc)</i>	-0,25 %/°C
<i>Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı (Isc)</i>	+0,050 %/°C
<i>Boyutlar</i>	2278 × 1134 × 30 mm
<i>Modül yüzey alanı</i>	2,583 m ²
<i>Ağırlık</i>	27 kg
<i>Ön cam</i>	3,2 mm temperli cam
<i>Koruma sınıfı</i>	IP68
<i>Bağlantı kutusu</i>	3 bypass diyotlu
<i>Çerçeve</i>	Eloksallı alüminyum alaşım

4.5.2.2 İnverter seçimi ve tanımlanması

Bu çalışmada inverter seçiminde, PVsyst 8.1.4 yazılımının üretici veri tabanında yer alan ve büyük ölçekli şebekeye bağlı çatı tipi fotovoltaik sistemlerde yaygın olarak kullanılan modeller ele alınmıştır. Yaklaşık 245 kWp kurulu güce sahip sistem için, yüksek verimlilik, geniş MPPT çalışma gerilim aralığı, çoklu MPPT yapısı ve PVsyst yazılımı ile tam uyumluluğu nedeniyle Huawei Technologies SUN2000-100KTL-M1-400Vac model üç fazlı string inverter tercih edilmiştir.

Seçilen inverter, fotovoltaik modüllerden üretilen doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) yüksek verimle dönüştürmektedir. Çoklu MPPT özelliği sayesinde farklı string gruplarını bağımsız olarak izleyerek değişken çalışma koşullarından kaynaklanan üretim kayıplarını azaltmaktadır. Ayrıca inverterin PVsyst veri tabanında tanımlı olması, sistem modelinin üretici verilerine uygun oluşturulmasına ve simülasyon sonuçlarının güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikleriyle Huawei Technologies SUN2000-100KTL-M1-400Vac modeli, Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem için uygun bir inverter olarak değerlendirilmiştir.

İnverter seçimi ve sistemin elektriksel boyutlandırması PVsyst yazılımının ön boyutlandırma modülü ile yapılmıştır. Seçilen JinkoSolar JKM585N-72HL4-V fotovoltaik modülleri dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda sistem için 418 adet modül, her bir stringde 19 adet seri bağlı modül ve toplam 22 adet string uygun bulunmuştur.

Oluşturulan sistem konfigürasyonunda toplam DC kurulu güç 245 kWp, inverterlerin toplam AC nominal gücü ise 200 kW olarak belirlenmiştir (Tablo 4.11).

Tablo 4.11: Seçilen inverterin teknik özellikleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Üretici</i>	Huawei
<i>İnverter modeli</i>	SUN2000-100KTL-M1-400 Vac
<i>İnverter tipi</i>	Üç fazlı string inverter
<i>Nominal AC güç</i>	100 kWp
<i>Kullanılan inverter sayısı</i>	2
<i>Toplam AC çıkış gücü</i>	200 kW
<i>MPPT çalışma gerilim aralığı</i>	200-1000 V
<i>Maksimum DC giriş gerilimi</i>	1100 V
<i>Şebeke frekansı</i>	50/60 Hz
<i>Toplam DC kurulu güç</i>	245 kWp
<i>DC/AC güç oranı</i>	1,22
<i>Seri Bağlı Modül</i>	19
<i>Toplam string sayısı</i>	22

Yapılan boyutlandırma sonucunda sistemin DC/AC güç oranı yaklaşık 1,22 olarak bulunmuştur. Bu değer, büyük ölçekli çatı tipi fotovoltaik sistemlerde yaygın olarak kullanılan tasarım kriterleri ile uyumlu olup inverter kapasitesinin etkin kullanılmasına ve sistemin yüksek verimle çalışmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca PVsyst yazılımında gerçekleştirilen boyutlandırma analizinde inverter aşırı yük (overload) kayıplarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, seçilen inverter kapasitesinin fotovoltaik sistem gücü ile uyumlu olduğunu ve sistemin teknik açıdan uygun şekilde boyutlandırıldığını göstermektedir.

4.5.2.3 Taşıyıcı konstrüksiyon ve montaj sisteminin tanımlanması

Rektörlük Binası çatısı için güneye yönelimli ve 10° eğimli sabit montaj sistemi kabul edilmiştir. Panel yerleşiminde çatı alanı, bakım yolları ve güvenlik mesafeleri dikkate alınmıştır. Taşıyıcı konstrüksiyonun ayrıntılı statik hesabı ve bağlantı elemanı seçimi çalışma kapsamına alınmamış; ekonomik analizde konstrüksiyon maliyetinin yaklaşık piyasa teklifleri üzerinden değerlendirilmesi uygun görülmüştür.

Çatı tipi sabit montaj sisteminin termal davranışının simüle edilebilmesi amacıyla, PVsyst yazılımının Detaylı kayıplar (Thermal Behaviour) bölümünde Hava sirkülasyonlu serbest modüller (Free Standing Modules) seçeneği kullanılmıştır. Böylece modüllerin arka yüzeyinde serbest hava dolaşımı olduğu varsayılmış ve termal model için $U_c = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ile $U_v = 0 \text{ W/m}^2\text{K/(m/s)}$ değerleri kullanılmıştır. Burada U_c , rüzgâr hızından bağımsız toplam ısı kayıp katsayısını, U_v ise rüzgâr hızına bağlı ilave ısı kayıp katsayısını ifade etmektedir. U_v değerinin sıfır seçilmesi nedeniyle modül sıcaklığı hesabında rüzgâr hızına bağlı ek bir soğutma etkisi dikkate alınmamış, termal davranış PVsyst yazılımı tarafından çatı üstü serbest hava dolaşımına modüller için önerilen varsayılan model esas alınarak temsil edilmiştir.

4.5.2.4 Sistem kayıplarının ve çalışma parametrelerinin tanımlanması

Analizi yapılan fotovoltaik sistemin gerçek çalışma koşullarına daha yakın sonuçlar verebilmesi amacıyla PVsyst yazılımında çeşitli teknik kayıplar ve işletme parametreleri tanımlanmıştır. Simülasyon modelinde panel performansını etkileyen elektriksel, optik ve çevresel kayıplar literatürde sıklıkla kullanılan değerler ve yazılımın önerdiği varsayılan parametreler ışığında oluşturulmuştur.

Simülasyon sürecinde, sisteme ait ayrıntılı saha verilerde (kablo metrajları, kablo kesitleri vb.) PVsyst yazılımının önerdiği varsayılan (default) parametreler esas alınmıştır. Bu doğrultuda, doğru akım (DC) tarafındaki elektriksel iletim kayıpları için yazılımın varsayılan değeri olan %1,5 kullanılmıştır. Modüller arasındaki üretim farklılıklarını temsil eden dizi uyumsuzluğu (mismatch) kaybı %2,0 olarak, modül üretim toleranslarından kaynaklanan kalite kaybı ise seçilen panelin veri tabanındaki (.PAN) teknik bilgiler doğrultusunda %0,75 olarak modele yansıtılmıştır. Dizi geriliminden kaynaklanan uyumsuzluk kayıpları sistem konfigürasyonuna bağlı olarak PVsyst tarafından otomatik hesaplanmıştır. Alternatif akım (AC) tarafındaki dönüşüm ve iletim kayıpları ise seçilen inverterin verim eğrileri ve teknik karakteristikleri esas alınarak yazılım tarafından dinamik olarak hesaplanmıştır.

Çatı tipi sistemlerin zaman içerisinde maruz kaldığı toz, kir ve atmosferik etkileri temsil etmek amacıyla yıllık kirlenme kaybı %2,0 olarak kabul edilmiştir. Bu değer, PVsyst yazılımının varsayılan (default) kirlenme parametresi esas alınarak modele dahil edilmiştir. Ayrıca panel cam yüzeyinde oluşan yansıma kayıplarının (IAM) hesaplanmasında, seçilen

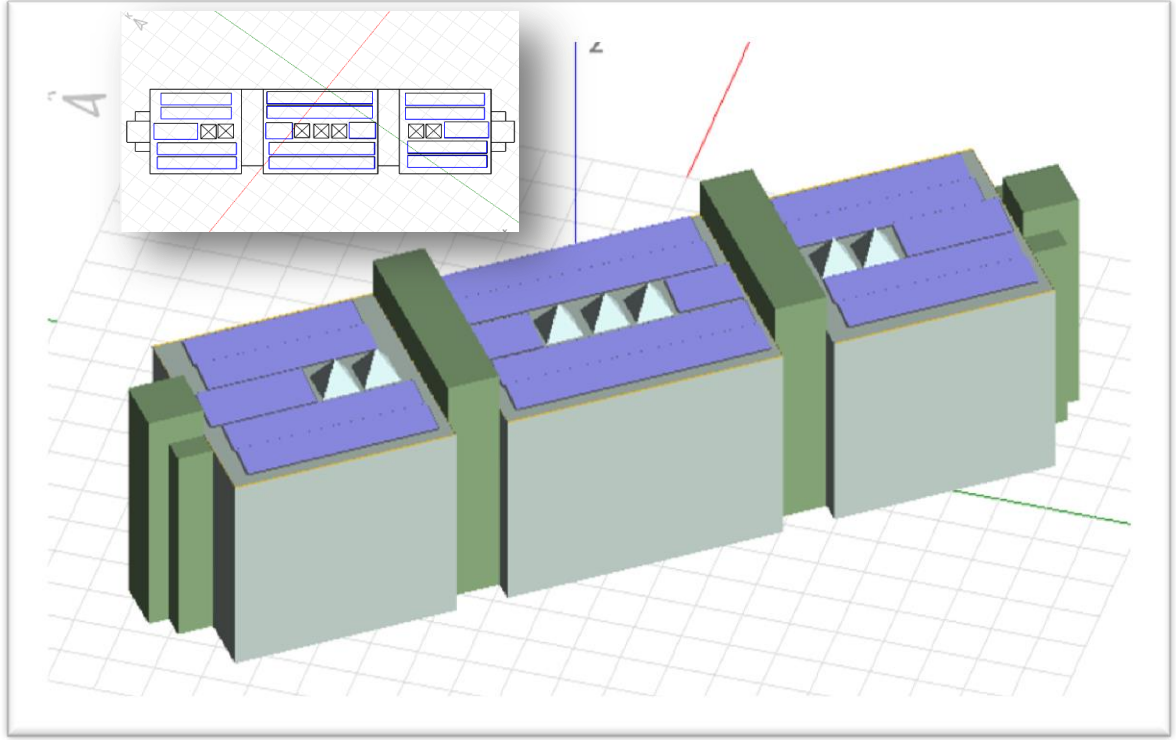
fotovoltaik modüle ait üretici verileri esas alınarak PVsyst'in optik modeli kullanılmıştır. Spektral düzeltme için ilave bir düzeltme uygulanmamış, bu hesaplamalarda yazılımın varsayılan parametreleri kullanılmıştır.

Sistemin işletme sürecinde yardımcı enerji tüketimleri, gece tüketimleri ve ilave servis yükleri için ek bir enerji kaybı tanımlanmamıştır. Benzer şekilde sistem kullanılamazlığı (arıza ve bakım kaynaklı duruş süreleri) ile modül yaşlanmasına bağlı uzun dönem performans kayıpları ilk yıl enerji üretim analizine dahil edilmemiştir.

Bu kabuller doğrultusunda oluşturulan PVsyst modeli, fotovoltaik sistemin yıllık enerji üretimi ve performans analizlerinin gerçekleştirilmesinde temel simülasyon altyapısını oluşturmuştur.

Rektörlük Binası çatısında bulunan elemanların fotovoltaik modüller üzerindeki olası gölgeleme etkilerinin simülasyona dâhil edilmesi amacıyla PVsyst yazılımında üç boyutlu yakın gölgeleme modeli oluşturulmuştur. Modelin hazırlanmasında binanın ve çatının geometrik özellikleri esas alınmış; çatı üzerinde bulunan aydınlatma kuleleri, havalandırma elemanları ve diğer mimari unsurlar üç boyutlu sahnede tanımlanmıştır.

Fotovoltaik modüller çatı geometrisine uygun olarak 10° eğim ve $+53^{\circ}$ azimut açısıyla yerleştirilmiştir. Sistem tanımındaki yönelim bilgileri ile üç boyutlu modeldeki panel yöneliminin aynı olması sağlanarak gölgeleme hesabı ile sistem modeli arasında uyum kurulmuştur.



Şekil 4.7: PVsyst’te oluşturulan üç boyutlu bina modeli ve fotovoltaik modül yerleşimi

Şekil 4.7’da gösterilen üç boyutlu modelde, çatı üzerindeki gölge oluşturabilecek elemanlar ile fotovoltaik modüller birlikte tanımlanmıştır. Yakın gölgeleme etkileri “Linear gölgelenme” seçeneği kullanılarak hesaplanmış ve model, yıllık gölgeleme kayıplarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

PVsyst yazılımında oluşturulan fotovoltaik sisteme ait proje özeti, sistem parametreleri, sistem özellikleri ve simülasyon sonuç özetini içeren rapor çıktısı Ek C.1’de sunulmaktadır. Söz konusu raporda projeye ait temel tanımlamalar, kullanılan meteorolojik veri seti, sistem bileşenleri, kurulu güç ve simülasyona ilişkin genel özet bilgiler yer almaktadır. Ayrıntılı enerji üretim, performans, kayıp ve ekonomik analiz sonuçları ise beşinci bölümde değerlendirilmektedir.

4.6 Ekonomik Analiz Yöntemi

4.6.1 Yatırım ve İşletme Maliyetleri ile Elektrik Gideri Tasarrufunun Hesaplanması

Fotovoltaik sistemin ekonomik uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla yatırım ve işletme maliyetleri ile sistemin sağlayacağı elektrik gideri tasarrufu dikkate alınmıştır. Bu kapsamda PVsyst yazılımının *Ekonomik Değerlendirme (Economic Evaluation)* modülünden yararlanılarak sistemin toplam ilk yatırım maliyeti (CAPEX) tanımlanmıştır. CAPEX; fotovoltaik modüller, invertörler, panel taşıyıcı konstrüksiyon sistemi, kablolama, mühendislik hizmetleri, montaj, sevkiyat, şebeke bağlantısı ve sigorta gibi kurulum giderlerini kapsamaktadır. Sistemin proje ömrü boyunca ortaya çıkacak bakım-onarım, panel temizliği ve ekipman yenileme giderleri ise işletme maliyetleri (OPEX) kapsamında değerlendirilmiştir.

Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde Rektörlük Binası ile Mühendislik–Mimarlık Fakültesinin aynı orta gerilim (OG) aboneliğini kullanması nedeniyle ekonomik değerlendirmede ortak aboneliğe ait tüketim verileri esas alınmıştır. Ortak aboneliğin elektrik tüketiminin fotovoltaik sistem üretiminden yüksek olması nedeniyle sistemin ekonomik katkısı, şebekeye enerji satışından ziyade fotovoltaik üretim sayesinde şebekeden satın alınması önlenen elektrik enerjisinin sağladığı gider tasarrufu üzerinden değerlendirilmiştir.

Elektrik gideri tasarrufunun belirlenmesinde, PVsyst simülasyonundan elde edilen saatlik elektrik üretim verileri ile Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan ve 04 Nisan 2026 tarihinden itibaren geçerli olan orta gerilim “Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer” tüketici grubuna ait çok zamanlı aktif enerji tarifi esas alınmıştır. Saatlik üretim değerleri, gündüz, puant ve gece zaman dilimlerine karşılık gelen elektrik birim fiyatlarıyla eşleştirilerek ekonomik değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Çalışmada esas alınan elektrik birim fiyatları Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12: Ekonomik analizde kullanılan EPDK çok zamanlı OG kamu tarifi

<i>Zaman dilimi</i>	<i>Elektrik birim fiyatı (TL/kWh)</i>
<i>Gündüz (06:00–17:00)</i>	3,307886
<i>Puant (17:00–22:00)</i>	5,672128
<i>Gece (22:00–06:00)</i>	1,424182

Çok zamanlı elektrik tarifiesi dikkate alınarak gündüz, puant ve gece zaman dilimlerinde şebekeden satın alınması önlenen elektrik enerjisinin ekonomik karşılığı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yıllık toplam elektrik gideri tasarrufu Eşitlik (4.9) kullanılarak belirlenmiştir.

$$T_{yillik} = (E_g \times B_g) + (E_p \times B_p) + (E_{ge} \times B_{ge}) \quad (4.9)$$

Burada;

T_y : yıllık elektrik gideri tasarrufu (TL/yıl),

E_g : gündüz zaman diliminde üretilen elektrik enerjisi (kWh/yıl),

E_p : puant zaman diliminde üretilen elektrik enerjisi (kWh/yıl),

B_g : gündüz zaman dilimine ait elektrik birim fiyatı (TL/kWh),

B_p : puant zaman dilimine ait elektrik birim fiyatıdır (TL/kWh),

E_{ge} : gündüz zaman diliminde üretilen elektrik enerjisi (kWh/yıl),

B_{ge} : puant zaman diliminde üretilen elektrik enerjisi (kWh/yıl)' dir.

4.6.2 Finansal Performans Göstergeleri ve Hesaplama Yöntemleri

Fotovoltaik sistem yatırımının uzun dönemli ekonomik performansının değerlendirilmesinde Net Bugünkü Değer (NBD), İç Kârlılık Oranı (İKO), Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) ve Basit Geri Ödeme Süresi (GÖS) göstergeleri kullanılmıştır. Finansal değerlendirme PVsyst yazılımının *Ekonomik Değerlendirme* modülü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yazılım tarafından oluşturulan yıllık nakit akışları üzerinden yatırımın ekonomik performansı analiz edilmiştir. Ekonomik değerlendirmede proje süresi 25 yıl ve iskonto oranı %8 olarak esas alınmış, yatırımın başlangıçta öz kaynakla karşılandığı kabul edilmiştir. Analizde sistemin ilk yatırım maliyeti, işletme giderleri ve fotovoltaik sistemin sağladığı ekonomik fayda dikkate alınmıştır.

Net Bugünkü Değer hesabında, proje ömrü boyunca sistemden sağlanan ekonomik faydalar ile işletme ve bakım giderleri arasındaki farktan oluşan net nakit akışları iskonto oranı kullanılarak bugünkü değerlerine indirgenmiştir (Ramadan and Elistratov, 2019; Yalılı, 2021). NBD, Eşitlik (4.10) ile hesaplanmıştır.

$$NBD = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{F_t - M_t}{(1+r)^t} \quad (4.10)$$

Burada

I_0 : toplam ilk yatırım maliyetini (CAPEX),

F_t : t yılındaki ekonomik faydayı,

M_t : t yılındaki işletme ve bakım giderlerini (OPEX),

r : iskonto oranını (%8) ve

T : proje süresini (25 yıl) ifade etmektedir.

İç Kârlılık Oranı, yatırımın Net Bugünkü Değerini sıfıra eşitleyen iskonto oranı esas alınarak belirlenmiştir (Ramadan and Elistratov, 2019; Yalılı, 2021). İKO, Eşitlik (4.11) ile hesaplanmıştır.

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{F_t - M_t}{(1+İKO)^t} \quad (4.11)$$

Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti hesabında, sistemin başlangıç yatırım maliyeti ile proje ömrü boyunca oluşan işletme ve bakım giderlerinin bugünkü değerleri, aynı dönemde üretilen elektrik enerjisinin bugünkü değerine oranlanmıştır (Ramadan and Elistratov, 2019; Yalılı, 2021). LCOE, Eşitlik (4.12) ile hesaplanmıştır.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4.12)$$

Burada E_t , t yılındaki elektrik üretim miktarını (kWh) ifade etmektedir. Diğer değişkenler NBD eşitliğinde tanımlandığı şekliyle kullanılmıştır.

Basit Geri Ödeme Süresi, başlangıç yatırım maliyetinin sistemden sağlanan yıllık ortalama net ekonomik fayda ile geri kazanılması için gereken sürenin belirlenmesinde

kullanılmıştır (Ramadan and Elistratov, 2019; Yalılı, 2021). GÖS, Eşitlik (4.13) ile hesaplanmıştır.

$$GÖS = \frac{I_0}{\text{Yıllık Ortalama Net Ekonomik Fayda}} \quad (4.13)$$

Yıllık net ekonomik fayda, fotovoltaik sistem üretimi sayesinde sağlanan elektrik gideri tasarrufundan yıllık işletme ve bakım giderlerinin çıkarılmasıyla belirlenmiştir. Elde edilen finansal göstergeler birlikte değerlendirilerek fotovoltaik sistem yatırımının geri ödeme performansı, uzun dönemli ekonomik uygulanabilirliği ve birim elektrik üretim maliyeti incelenmiştir.

4.7 Karbon Emisyonu Azaltımının Belirlenmesi

Fotovoltaik sistemin çevresel etkisinin değerlendirilmesinde PVsyst yazılımının CO₂ Emisyon Bilançosu (*CO₂ Emission Balance*) modülü kullanılmıştır. Bu değerlendirmede, fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektrik enerjisinin şebekeden sağlanacak elektrik enerjisinin yerine kullanılması sonucunda önlenen CO₂ emisyonları ile sistem bileşenlerinin üretiminden kaynaklanan yaşam döngüsü emisyonları birlikte dikkate alınmıştır.

Sistemin işletme süresince sağladığı CO₂ emisyon azaltımı, fotovoltaik elektrik üretimi ve şebeke elektriğine ilişkin emisyon faktörü esas alınarak belirlenirken; fotovoltaik modüller, taşıyıcı sistem ve invertörlerin üretiminden kaynaklanan emisyonlar sistemin yaşam döngüsü emisyonları olarak değerlendirilmiştir. Böylece sistemin çevresel katkısı yalnızca elektrik üretimi sonucunda önlenen emisyonlar üzerinden değil, sistem bileşenlerinin üretiminden kaynaklanan emisyonlar da dikkate alınarak net CO₂ emisyon bilançosu üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5.6'da sunulmaktadır.

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

5.1 İZODER TS 825 Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binasının yıllık iklimlendirme enerji ihtiyacının belirlenmesi amacıyla İZODER TS 825 Hesap Programı kullanılarak yapılan hesaplamalarda binanın geometrik özellikleri, yapı kabuğunu oluşturan elemanların ısı karakteristikleri, pencere ve dış duvar alanları, çatı ve döşeme bileşenleri ile Balıkesir iline ait iklim verileri temel alınmıştır.

Rektörlük Binası için daha önce belirlenen 12.998 m² şartlandırılan alan esas alınarak gerçekleştirilen TS 825 analizinde, öncelikle bina kabuğu bileşenlerine ait ısı geçirgenlik katsayıları belirlenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1: Rektörlük TS 825 U değerleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Dış Duvar U Değeri</i>	0,543 W/m ² K
<i>Teras Çatı U Değeri</i>	0,347 W/m ² K
<i>Taban U Değeri</i>	0,429 W/m ² K
<i>Pencere ve Kapılar U Değeri</i>	2,908 W/m ² K

Tablo 5.1 incelendiğinde en yüksek ısı geçirgenlik katsayısının pencere ve kapılarda, en düşük katsayının ise teras çatıda olduğu görülmektedir. Bu değerler, yapı kabuğundan gerçekleşen ısı geçişlerinin ve buna bağlı yıllık net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarının hesaplanmasında kullanılmıştır.

Tablo 5.1’de verilen ısı geçirgenlik katsayıları ile binaya ilişkin geometrik özellikler, kullanım koşulları ve Balıkesir iline ait iklim verileri esas alınarak yıllık net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları hesaplanmıştır. TS 825 yazılımından elde edilen aylık net ısıtma ve net soğutma enerjisi hesaplama çizelgeleri sırasıyla Ek A.2 ve Ek A.4’te sunulmaktadır. Söz konusu çizelgelerde hesaplamalara esas aylık enerji ihtiyaçları ve ilgili hesaplama sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir.

Binanın toplam yıllık net iklimlendirme enerjisi ihtiyacı Eşitlik (5.1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Q_{toplam} = Q_{Isıtma} + Q_{Soğutma} \quad (5.1)$$

Rektörlük Binasının yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı 682.083 kWh/yıl, yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı ise 556.909 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Buna göre binanın toplam yıllık net iklimlendirme enerjisi ihtiyacı 1.238.992 kWh/yıl'dır.

Isıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarının toplam yıllık net iklimlendirme enerjisi ihtiyacı içerisindeki payları Eşitlik (5.2) ve Eşitlik (5.3) kullanılarak belirlenmiştir:

$$\text{Isıtma Oranı} = \frac{Q_{Isıtma}}{Q_{toplam}} \times 100 \quad (5.2)$$

$$\text{Soğutma Oranı} = \frac{Q_{Soğutma}}{Q_{toplam}} \times 100 \quad (5.3)$$

Eşitliklerde $Q_{Isıtma}$, $Q_{Soğutma}$ ve Q_{toplam} sırasıyla yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacını, yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacını ve toplam yıllık iklimlendirme enerjisi ihtiyacını ifade etmektedir.

Yapılan hesaplama göre ısıtma enerjisi ihtiyacının toplam iklimlendirme enerjisi ihtiyacı içerisindeki payı yaklaşık %55,1, soğutma enerjisi ihtiyacının payı ise yaklaşık %44,9'dur. Bu sonuçlar, binanın yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacının net soğutma enerjisi ihtiyacından daha yüksek olduğunu, ancak iki ihtiyacın birbirine yakın düzeylerde gerçekleştiğini göstermektedir.

TS 825 Hesap Programından elde edilen yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı, doğrudan elektrik enerjisi tüketimini ifade etmemekte; binadan uzaklaştırılması gereken yıllık ısı enerjisi göstermektedir. Bu nedenle soğutma sisteminin elektrik enerjisi ihtiyacının belirlenmesinde, Rektörlük Binasında kullanılan hava soğutmalı chiller grubunun performans katsayısı dikkate alınmıştır.

Soğutma sistemine ait teknik ekipman özellikleri incelendiğinde, hava soğutmalı chiller grubunun nominal COP değerinin 2,7 olduğu belirlenmiştir. Yıllık net soğutma enerjisi

ihtiyacının elektrik enerjisi eşdeğerine dönüştürülmesinde bu değer esas alınmıştır. COP ile soğutma enerjisi ve elektrik enerjisi arasındaki ilişki Eşitlik (5.4)'te verilmiştir:

$$COP = \frac{Q_{soğutma}}{E_{elektrik}} \quad (5.4)$$

Eşitliğin elektrik enerjisi ihtiyacı için düzenlenmesiyle Eşitlik (5.5) elde edilmiştir:

$$E_{elektrik} = \frac{Q_{soğutma}}{COP} \quad (5.5)$$

Burada $E_{elektrik}$, chiller grubunun yıllık elektrik enerjisi ihtiyacını ifade etmektedir. Yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı ve chiller grubunun nominal COP değeri kullanılarak yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı 206.263 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan yıllık net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları ile chiller grubuna ait elektrik enerjisi eşdeğeri Tablo 5.2'de toplu olarak sunulmaktadır.

Tablo 5.2: Rektörlük TS 825 enerji ihtiyacı sonuçları ve soğutma elektrik eşdeğeri

<i>Parametre</i>	<i>Sembol</i>	<i>Değer</i>
<i>Yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı</i>	$(Q_{ısıtma})$	682.083 kWh/yıl
<i>Yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı</i>	$(Q_{soğutma})$	556.909 kWh/yıl
<i>Yıllık Toplam iklimlendirme enerji ihtiyacı</i>	(Q_{toplam})	1.238.992 kWh/yıl
<i>Chiller COP değeri (etiket değeri)</i>	COP	2,7
<i>Chiller yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı</i>	$(E_{elektrik})$	206.263 kWh/yıl

Rektörlük Binasında ısıtma sistemi olarak doğal gaz yakıtlı çelik gövdeli kazanlar kullanılmaktadır. Isıtmanın doğal gazla sağlanması nedeniyle yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı elektrik enerjisi eşdeğerine dönüştürülmemiştir. Bu nedenle fotovoltaik sistemin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılama potansiyeli değerlendirilirken, elektrikle çalışan chiller grubunun yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı esas alınmıştır.

Chiller grubunun hesaplanan yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı, fotovoltaik sistemin yıllık elektrik üretimiyle karşılaştırılarak sistemin soğutma amaçlı elektrik ihtiyacını karşılama potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Güneş enerjisi üretimi ile soğutma ihtiyacının özellikle yaz döneminde artması arasındaki zamansal uyum, fotovoltaik sistemin bina soğutmasına sağlayabileceği katkı bakımından önem taşımaktadır. Bu karşılaştırmaya ilişkin sayısal bulgular, PVsyst simülasyonu ile belirlenen fotovoltaik sistem üretimiyle birlikte ilerleyen bölümlerde değerlendirilmektedir.

5.2 PVsyst Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin enerji üretim performansı PVsyst yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Simülasyon modelinde Balıkesir iline ait Meteonorm meteorolojik verileri, bina çatı geometrisi, panel yerleşimi, sistem kayıpları ve seçilen ekipmanların teknik özellikleri dikkate alınmıştır (Ek C.2).

Simülasyonda toplam 418 adet JinkoSolar JKM585N-72HL4-V model monokristal fotovoltaik modül ile 2 adet Huawei Technologies SUN2000-100KTL-M1-400Vac model string invertör kullanılan sistemin toplam doğru akım (DC) kurulu gücü yaklaşık 245 kWp, alternatif akım (AC) gücü ise 200 kWac olarak hesaplanmıştır.

PVsyst simülasyonundan elde edilen temel performans parametreleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3: PVsyst simülasyon sonuçları

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>Toplam DC kurulu güç</i>	245 kWp
<i>Toplam AC güç</i>	200 kWac
<i>Yıllık elektrik üretimi</i>	332.673 kWh/yıl
<i>Spesifik enerji üretimi</i>	1.360 kWh/kWp·yıl
<i>Performans oranı (PR)</i>	%81,43
<i>Normalleştirilmiş enerji üretimi</i>	3,73 kWh/kWp·gün
<i>Dizi kayıpları</i>	0,77 kWh/kWp·gün
<i>Sistem kayıpları</i>	0,08 kWh/kWp·gün

Simülasyon sonuçlarına göre sistemin yıllık elektrik üretimi 332.673 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, seçilen sistem bileşenleri ve Balıkesir ilinin güneş enerjisi potansiyeli dikkate alındığında çatı tipi fotovoltaik sistemler için uygun bir üretim seviyesini göstermektedir.

Sistemin spesifik enerji üretimi 1.360 kWh/kWp·yıl olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, kurulu her 1 kWp fotovoltaik güç başına yılda yaklaşık 1.360 kWh elektrik enerjisi üretilebileceğini göstermektedir.

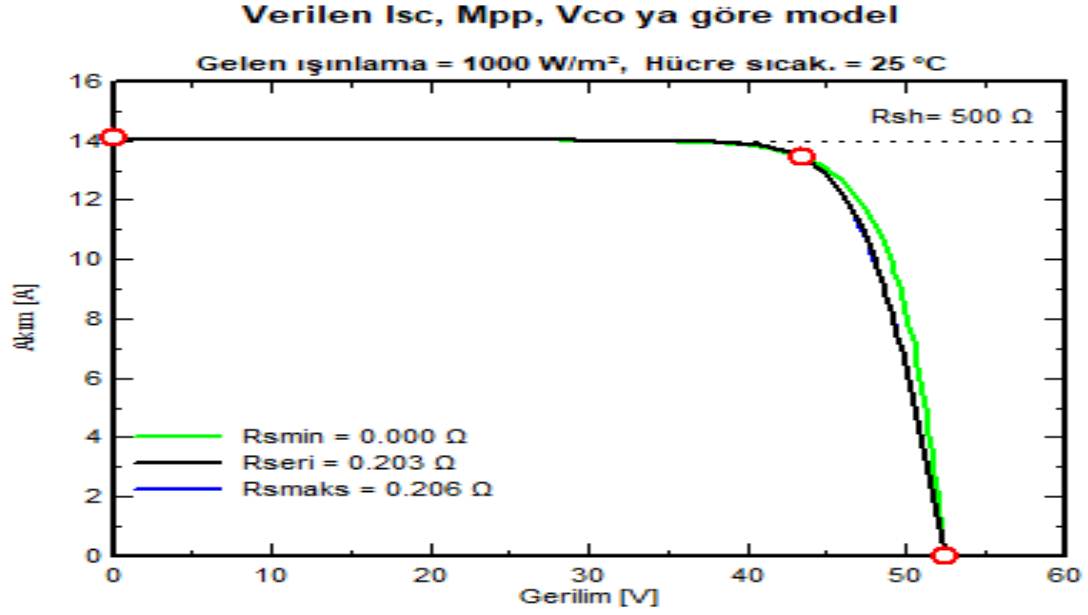
Tablo 5.3'te görüldüğü üzere normalleştirilmiş enerji üretimi 3,73 kWh/kWp·gün olarak belirlenirken, dizi kayıpları 0,77 kWh/kWp·gün, sistem kayıpları ise 0,08 kWh/kWp·gün olarak hesaplanmıştır. Kayıpların düşük düzeyde kalması, panel ve invertör seçimleri ile oluşturulan sistem tasarımının uygun ve verimli olduğunu göstermektedir

PVsyst yazılımında kullanılan modülün elektriksel modeli, üretici tarafından verilen kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası (MPP) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri esas alınarak oluşturulmuştur. Modülün tek diyotlu matematiksel modelinde kullanılan şönt direnç (R_{sh}), seri direnç (R_s), referans diyot doyma akımı (I_{oRef}), diyot kalite faktörü (γ) ve açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı (μV_{oc}) değerleri Tablo 5.4'te verilmektedir.

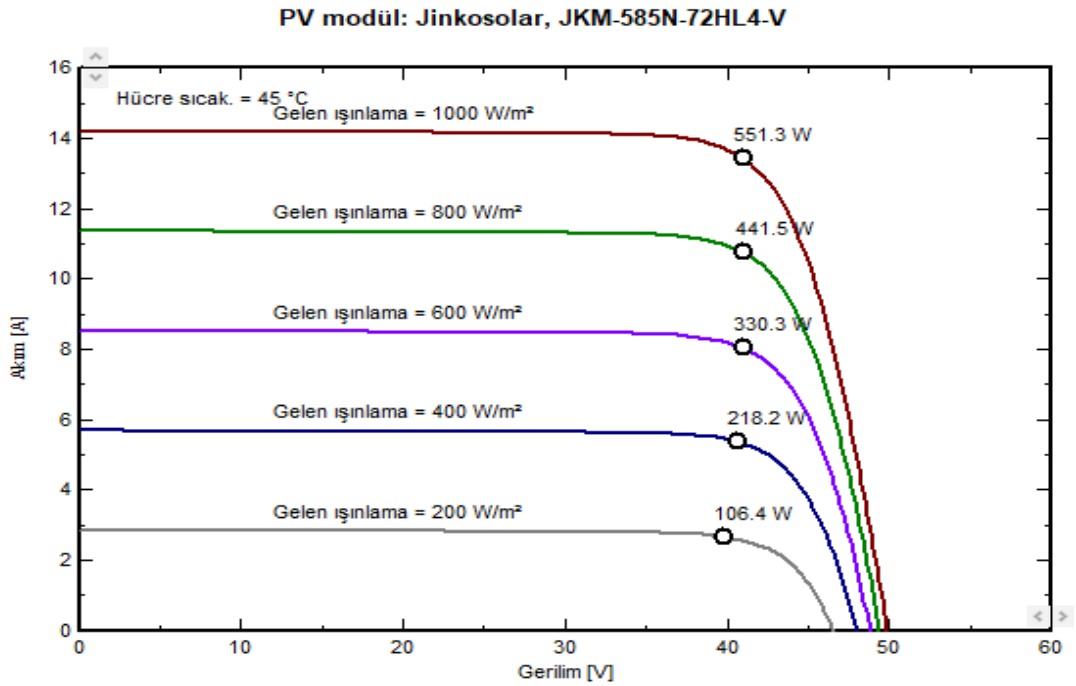
Tablo 5.4: Tek diyotlu model parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>R_{sh} (Şönt direnç)</i>	500 Ω
<i>R_s (Seri direnç)</i>	0,205 Ω
<i>I_{oRef}</i>	0,017 nA
<i>Diyot kalite faktörü Gama (γ)</i>	1,034
<i>μV_{oc}</i>	-128 mV/°C

Tablo 5.4'te verilen elektriksel parametreler kullanılarak oluşturulan matematiksel modelin I-V karakteristiği Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Model, kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası (MPP) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri ile uyumlu bir elektriksel davranış sergilemektedir. Grafik, 1000 W/m² ışınım ve 25 °C hücre sıcaklığı koşullarında elde edilmiştir. Bu koşullar fotovoltaik modüller için kabul edilen Standart Test Koşullarını (STC) temsil etmektedir.



Şekil 5.1: Model Parametreleri ile gerçekleştirilen fotovoltaik modülün temel akım-gerilim (I-V) karakteristiği ve matematiksel model uyumu



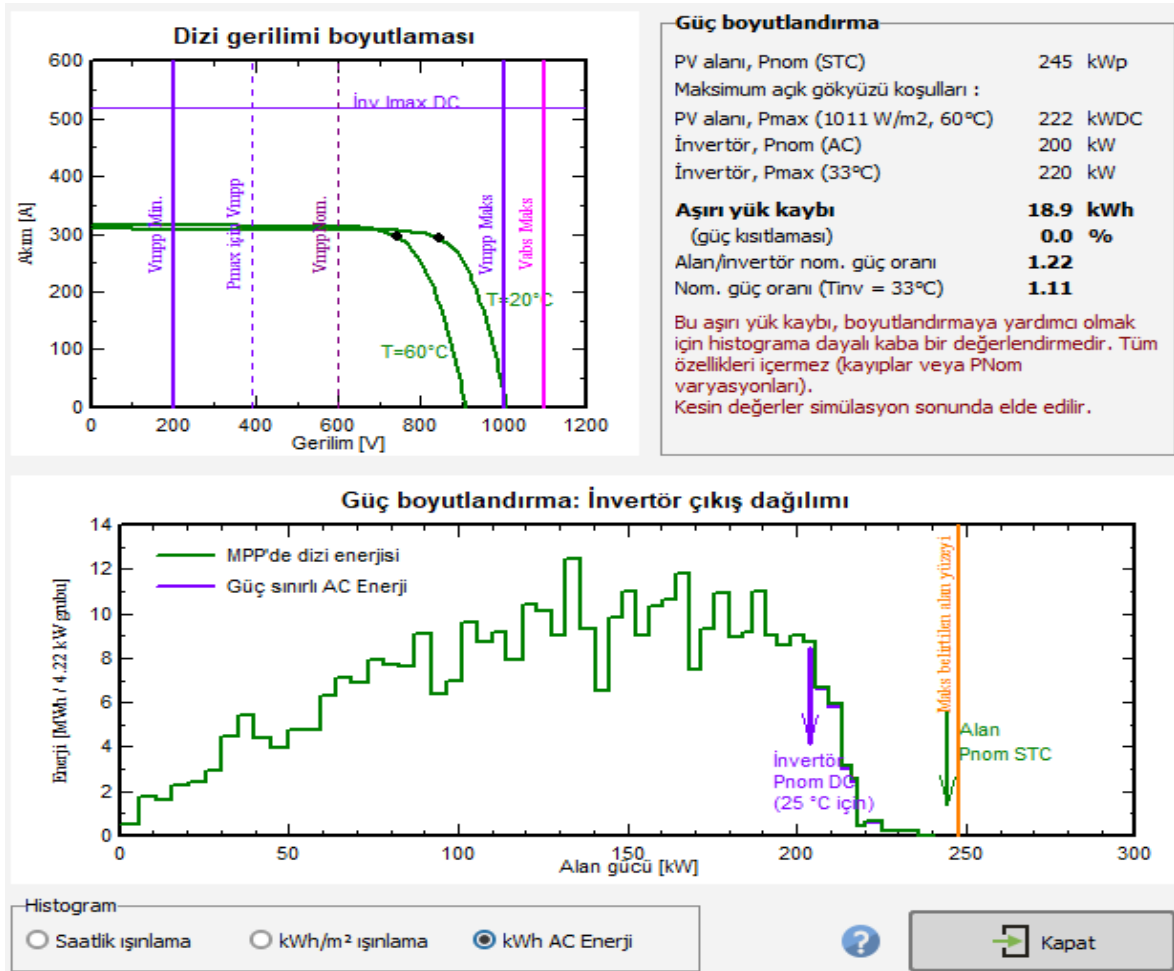
Şekil 5.2: JinkoSolar JKM585N-72HL4-V fotovoltaik modülünün farklı ışınlama seviyelerindeki akım-gerilim (I-V) karakteristik eğrileri (PVsyst Yazılımı)

Farklı ışınlama düzeylerinde elde edilen akım-gerilim eğrileri Şekil 5.2’de, bu eğrilerden belirlenen maksimum güç noktaları ise Tablo 5.5’te verilmiştir. Işınlama düzeyinin

artmasıyla modül akımı ve maksimum güç artarken, gerilimdeki değişimin daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Elde edilen eğriler, seçilen modül modelinin farklı ışınlam koşullarındaki elektriksel davranışını tanımlamak amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 5.5: Farklı ışınlam seviyelerinde maksimum güç noktası değerleri

<i>Gelen ışınlam (W/m^2)</i>	<i>Maksimum güç noktası (W)</i>
1000	511,3
800	441,5
600	330,3
400	218,2
200	106,4



Şekil 5.3: PVsyst yazılımında oluşturulan fotovoltaik sistemin dizi gerilimi, inverter güç boyutlandırması ve inverter çıkış güç dağılımı analizi

Şekil 5.3'te PVsyst yazılımında gerçekleştirilen inverter ve sistem ön boyutlandırma sonuçları gösterilmektedir. Her bir stringde 19 adet modül bulunan sistemde, farklı çalışma

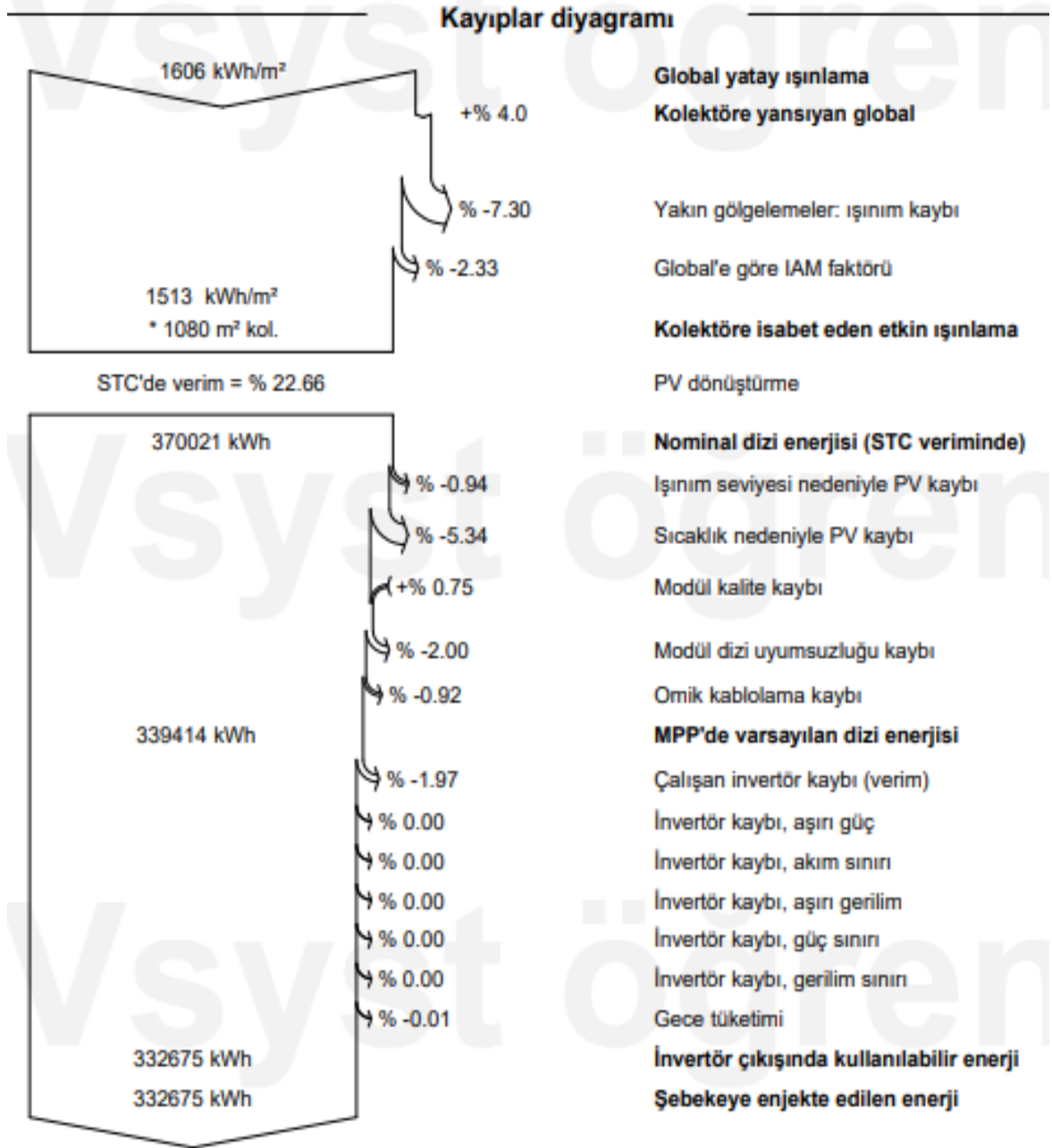
sıcaklıklarında oluşan dizi gerilimlerinin inverterin izin verilen çalışma aralığında kaldığı görülmektedir. En düşük tasarım sıcaklığı olan $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de string açık devre gerilimi 1080 V olarak hesaplanmış ve bu değerin inverterin 1100 V olan maksimum DC giriş gerilimini aşmadığı belirlenmiştir. Ayrıca maksimum güç noktası gerilimlerinin (V_{mpp}) inverterin MPPT çalışma aralığı içerisinde kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, oluşturulan dizi yapısı ile seçilen Huawei SUN2000-100KTL-M1-400Vac inverterin gerilim bakımından birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Fotovoltaik sistem performansının değerlendirilmesinde kullanılan en önemli göstergelerden biri performans oranıdır (Performance Ratio-PR). Performans oranı, sistemin teorik olarak üretebileceği enerji ile gerçek enerji üretimi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Simülasyon sonucunda elde edilen %81,4 performans oranı (PR), tasarlanan fotovoltaik sistemin kullanılabilir güneş enerjisinden yüksek verimle yararlanarak önemli bir bölümünü şebekeye aktarabildiğini göstermektedir. Bu sonuç, sistem tasarımında seçilen ekipmanların ve elektriksel konfigürasyonun birbiriyle uyumlu olduğunu ve sistemin yüksek performansla çalışacağını ortaya koymaktadır.

Bu bölümde elde edilen yıllık elektrik üretim değeri ve performans parametreleri, çalışmanın ilerleyen aşamalarında Rektörlük Binasının TS 825 kapsamında belirlenen teorik iklimlendirme enerji ihtiyacı ve Rektörlük ile Mühendislik Fakültesi binalarına ait ortak elektrik tüketim verileri ile karşılaştırılarak fotovoltaik sistemin enerji karşılama potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılacaktır.

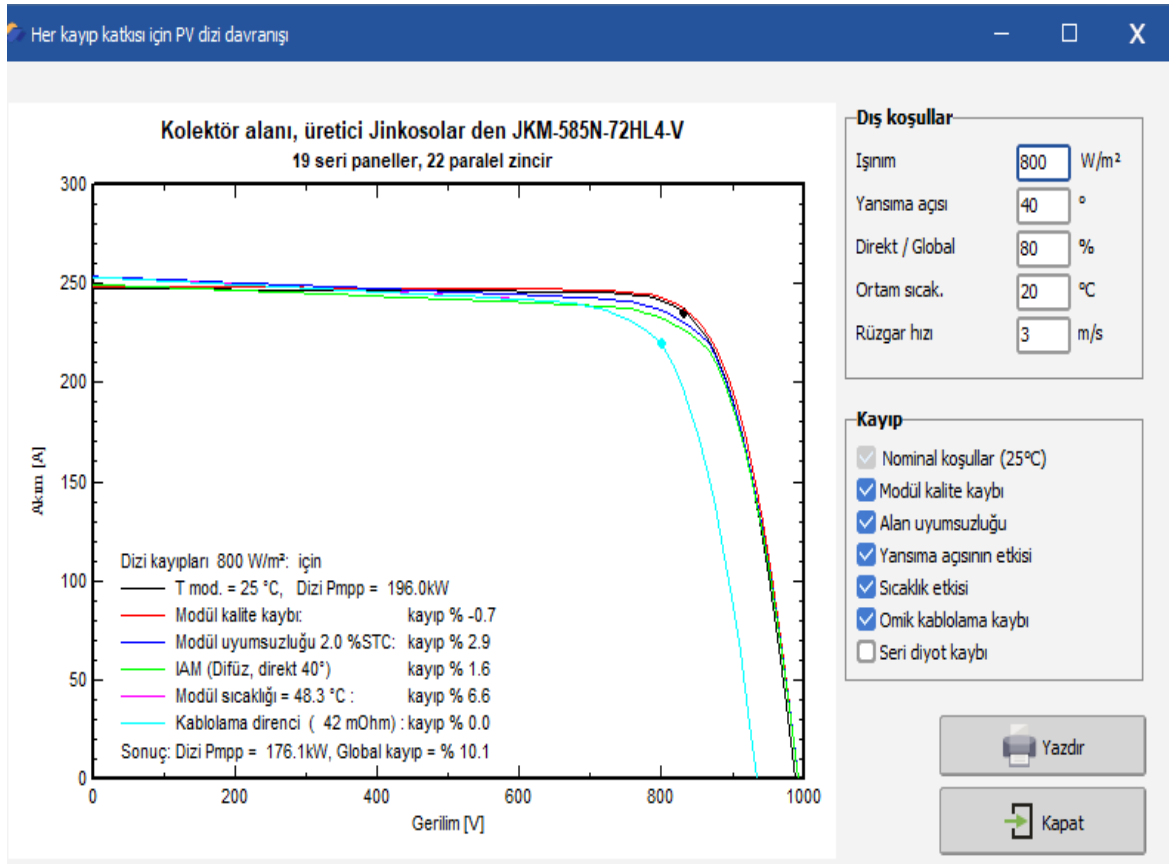
5.3 PVsyst Kayıplar Diyagramının Değerlendirilmesi

PVsyst yazılımı tarafından oluşturulan kayıplar diyagramı (Loss Diagram), fotovoltaik sistemde güneş ışınımının panel yüzeyine ulaşmasından başlayarak şebekeye verilen elektrik enerjisine kadar gerçekleşen tüm enerji dönüşümlerini ve bu süreçte meydana gelen kayıpları göstermektedir. Bu diyagram sayesinde sistem performansını etkileyen kayıp mekanizmaları ayrıntılı olarak değerlendirilebilmektedir.



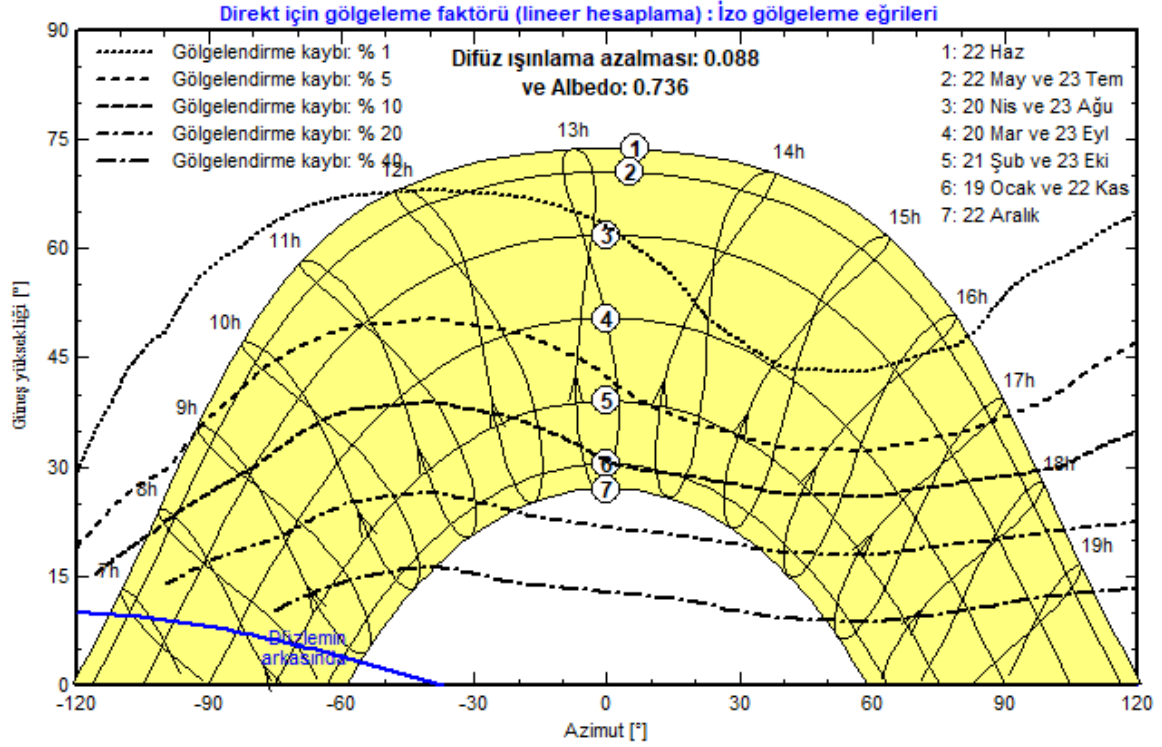
Şekil 5.4: Kayıplar Diyagramı

Şekil 5.4'te verilen kayıplar diyagramı incelendiğinde, kolektör düzlemine yıllık 1513 kWh/m² güneş ışınlamının ulaştığı ve bu ışınlımdan yararlanılarak fotovoltaiik dizi tarafından 339.414 kWh elektrik enerjisi üretildiği görülmektedir. Panel yüzeyine ulaşan ışınlamın bir kısmı ışınlamın geliş açısına bağlı optik kayıplar (IAM), modül sıcaklığı, modül kalite farklılıkları, modüller arası uyumsuzluk, omik kablolama kayıpları, invertör dönüşüm kayıpları ve alternatif akım kablolama kayıpları nedeniyle sistem içerisinde kademeli olarak azalmaktadır. Bu kayıpların ardından şebekeye aktarılan yıllık net elektrik enerjisi 332.675 kWh olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.5: Kayıp bileşenlerinin PV dizi davranışı üzerindeki etkisi

Fotovoltaik sistemde meydana gelen kayıp bileşenlerinin PV dizi davranışı üzerindeki etkisi Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde, sistemde en yüksek kaybın %6,6 ile modül sıcaklığından kaynaklandığı görülmektedir. Modül sıcaklığındaki artış, çalışma gerilimini düşürerek maksimum güç noktasında azalmaya neden olmaktadır. Bunu %2,9 ile modüller arası uyumsuzluk (mismatch) kaybı ve %1,6 ile ışınımın geliş açısına bağlı optik kayıp (IAM) izlemektedir. Modül kalite kaybının -%0,7 olarak hesaplanması, kullanılan fotovoltaik modüllerin katalog nominal güç değerlerinin üzerinde performans sergilediğini göstermektedir. Omik kablolama kaybı ise ihmal edilebilir düzeyde (%0,0) gerçekleşmiştir. Tüm bu kayıp bileşenlerinin etkisi sonucunda fotovoltaik dizide oluşan toplam kayıp %10,1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.6: İzo gölgeleme eğrileri

Yakın gölgeleme etkisinin yıl içerisindeki değişimi ise Şekil 5.6'da verilen izo gölgeleme eğrileri ile değerlendirilmiştir. Grafikte sarı bölge güneşin yıl boyunca izlediği yörüngeyi, siyah kesikli eğriler ise panel dizilerinde oluşabilecek %1, %5, %10 ve %20 seviyelerindeki gölgeleme kayıplarını göstermektedir. Simülasyon sonucunda difüz ışınlama için gölgeleme faktörü 0,088, albedo faktörü ise 0,736 olarak hesaplanmıştır. Grafik incelendiğinde gölgeleme etkisinin güneşin düşük yükseklik açılarında sahip olduğu sabah 07.00–09.00 ve akşam 17.00–19.00 saatlerinde arttığı, buna karşılık güneşin en yüksek konumda bulunduğu yaklaşık 11.00–14.00 saatleri arasında gölgeleme kayıplarının en düşük seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, panel eğimi ve sıra aralıklarının uygun şekilde seçildiğini ve yakın gölgeleme etkisinin yıllık enerji üretimi üzerinde önemli bir kayba neden olmadığını göstermektedir.

Kayıplar diyagramı genel olarak değerlendirildiğinde, sistemde meydana gelen enerji kayıplarının büyük bölümünün ışınlama geliş açısına bağlı optik kayıplar (IAM), modül sıcaklığı, modüller arası uyumsuzluk ve invertör dönüşüm kayıplarından kaynaklandığı görülmektedir. Buna karşılık doğru akım ve alternatif akım kablolama kayıplarının düşük seviyelerde gerçekleşmesi ile seçilen panel–invertör konfigürasyonunun uyumlu çalışması sistem performansını olumlu yönde etkilemiştir.

5.4 Fotovoltaik Sistemin Enerji Karşılama Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan fotovoltaik sistemin enerji karşılama potansiyelinin belirlenmesi amacıyla, PVsyst simülasyonundan elde edilen yıllık elektrik üretim değeri; 4.2.1 başlığı altında tahmini hesaplanan Rektörlük Binası yıllık elektrik tüketimi, ortak OG aboneliğine ait beş yıllık ortalama yıllık elektrik tüketimi ve TS 825 hesaplamaları sonucunda soğutma sistemi için belirlenen yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı ile karşılaştırılmıştır.

Fotovoltaik sistemin Rektörlük Binasının yıllık elektrik tüketimini karşılama oranı Eşitlik (5.6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KO_R = \frac{E_{PV}}{E_R} \times 100 \quad (5.6)$$

Burada;

KO_R : Rektörlük Binası elektrik tüketimini karşılama oranı (%)

E_{PV} : Fotovoltaik sistemin yıllık elektrik üretimi (332.673 kWh/yıl)

E_R : Rektörlük Binasının yıllık elektrik tüketimi (871.924,46 kWh/yıl)

Değerler yerine yazıldığında; KO_R : 38,16% olarak bulunmaktadır. Bu sonuca göre önerilen fotovoltaik sistem, Rektörlük Binasının yıllık elektrik tüketiminin yaklaşık %38,16'sını karşılayabilecek kapasitededir.

Fotovoltaik sistemin ortak OG aboneliğine ait yıllık elektrik tüketimini karşılama oranı Eşitlik (5.7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KO_{OG} = \frac{E_{PV}}{E_{OG}} \times 100 \quad (5.7)$$

Burada;

KO_{OG} : Ortak OG aboneliği elektrik tüketimini karşılama oranı (%),

E_{OG} : Ortak OG aboneliğine ait beş yıllık ortalama yıllık elektrik tüketimi (1.472.596,62 kWh/yıl).

Değerler yerine yazıldığında; KO_{OG} : 22,59% olarak bulunmaktadır.

Fotovoltaik sistemin TS 825 hesaplamaları sonucunda belirlenen yıllık net soğutma enerji ihtiyacını karşılama oranı Eşitlik (5.8) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KO_S = \frac{E_{PV}}{Q_S} \times 100 \quad (5.8)$$

Burada;

KO_S : PV yıllık elektrik üretiminin yıllık net soğutma enerji ihtiyacına oranı (%)

Q_S : TS 825 hesaplamaları sonucunda belirlenen yıllık net soğutma enerji ihtiyacı (556.909 kWh/yıl)

Değerler yerine yazıldığında; KO_S : 59,74% olarak hesaplanmıştır.

TS 825 hesaplamaları sonucunda belirlenen yıllık net soğutma enerji ihtiyacının karşılanması için hava soğutmalı chiller sisteminin ihtiyaç duyduğu yıllık elektrik enerjisi, COP değeri dikkate alınarak 206.263 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik sistemin chiller sisteminin yıllık elektrik enerjisi ihtiyacını karşılama oranı Eşitlik (5.9) ile belirlenmiştir.

$$KO_{Ch} = \frac{E_{PV}}{E_{Ch}} \times 100 \quad (5.9)$$

Burada;

KO_{Ch} : Chiller sisteminin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılama oranı (%),

E_{Ch} : Chiller sisteminin yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı (206.263 kWh/yıl).

Değerler yerine yazıldığında; KO_{Ch} : 161,29% olarak hesaplanmıştır.

Hesaplama sonuçları toplu olarak Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Fotovoltaik sistemin enerji karşılama oranları

<i>Karşılaştırma kriteri</i>	<i>Karşılama oranı (%)</i>
<i>Rektörlük Binası yıllık elektrik tüketimi</i>	38,16
<i>Ortak OG aboneliği yıllık elektrik tüketimi</i>	22,59
<i>PV üretiminin TS 825 yıllık net soğutma enerji ihtiyacına oranı</i>	59,74
<i>Chiller sisteminin yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı</i>	161,29

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan fotovoltaik sistemin, Rektörlük Binasının yıllık elektrik tüketiminin yaklaşık %38,16'sını karşılayabilecek kapasitede olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sistem, ortak OG aboneliğine ait beş yıllık ortalama yıllık elektrik tüketiminin %22,59'unu karşılayabilmektedir. S 825 hesaplamaları sonucunda belirlenen yıllık net soğutma enerji ihtiyacı ile fotovoltaik sistemin yıllık elektrik üretimi sayısal enerji büyüklükleri açısından karşılaştırıldığında, PV üretiminin net soğutma enerji ihtiyacının %59,74'üne karşılık geldiği görülmüştür. Chiller sisteminin yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı esas alındığında ise fotovoltaik sistem, bu ihtiyacın %161,29'unu karşılayabilmekte ve chiller sisteminin yıllık elektrik ihtiyacı karşılandıktan sonra 126.410 kWh/yıl ilave elektrik üretim potansiyeli sağlamaktadır.

5.5 Ekonomik Analiz

Bu bölümde, 4.6 başlığı altında açıklanan ekonomik analiz yöntemi doğrultusunda fotovoltaik sistemin sağlayacağı yıllık ekonomik kazanç ile yatırımın geri ödeme süresi değerlendirilmektedir. Hesaplamalarda Pvsyst simülasyonundan elde edilen saatlik elektrik üretim verileri ile ortak orta gerilim aboneliğine ait tüketim verileri kullanılmaktadır.

5.5.1 Yıllık Elektrik Gideri Tasarrufunun Hesaplanması

Fotovoltaik sistem tarafından şebekeye aktarılan yıllık elektrik üretiminin saatlik dağılımı, Pvsyst yazılımından elde edilen E_Grid verileri kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen saatlik üretim değerleri Tablo 5.7'de gösterilmektedir.

Tablo 5.7: Pvsyst yazılımında E_Grid için aylık saatlik toplam (kWh)

V1_418 PV paneli																								
E_Grid için aylık saatlik toplamlar [kWh]																								
	0H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
Ocak	0	0	0	0	0	0	0	0	30	309	857	1485	1958	2253	2060	1619	948	251	0	0	0	0	0	0
Şubat	0	0	0	0	0	0	0	0	100	408	1042	1737	2293	2672	2528	2210	1423	685	71	0	0	0	0	0
Mart	0	0	0	0	0	0	0	59	355	1104	2034	2689	3131	3558	3955	3533	2917	1717	500	6	0	0	0	0
Nisan	0	0	0	0	0	0	31	267	981	2100	3118	3663	4151	4121	4122	3669	2937	1839	704	88	0	0	0	0
Mayıs	0	0	0	0	0	0	151	554	1614	2754	3890	4384	4751	4916	4673	4325	3593	2440	1275	312	1	0	0	0
Haziran	0	0	0	0	0	0	174	674	1738	2881	3921	4544	4901	5197	5207	4746	3973	2830	1622	523	45	0	0	0
Temmuz	0	0	0	0	0	0	135	545	1689	2957	4044	4880	5468	5756	5641	5121	4390	3246	1789	542	39	0	0	0
Ağustos	0	0	0	0	0	0	71	295	1284	2593	3720	4453	5084	5425	5375	4840	4014	2664	1266	267	0	0	0	0
Eylül	0	0	0	0	0	0	1	168	781	1838	2918	3699	4244	4805	4441	3834	3089	1761	483	20	0	0	0	0
Ekim	0	0	0	0	0	0	0	76	401	1307	2214	2973	3481	3454	3318	2694	1642	609	31	0	0	0	0	0
Kasım	0	0	0	0	0	0	0	0	135	543	1322	1813	2338	2636	2248	1727	890	169	0	0	0	0	0	0
Aralık	0	0	0	0	0	0	0	0	41	286	751	1362	1677	1987	1867	1401	668	90	0	0	0	0	0	0
Yıl	-3	-3	-3	-3	-3	-3	562	2636	9147	19080	29833	37683	43457	46782	45435	39720	30484	18300	7741	1756	82	-3	-3	-3

Tablo 5.7 incelendiğinde fotovoltaik sistemin elektrik üretiminin ağırlıklı olarak 06.00–20.00 saatleri arasında gerçekleştiği görülmektedir. Yıllık üretimin en yüksek olduğu saat 13.00 olup bu saatte 46.782 kWh elektrik enerjisi üretilmiştir. Bunu 14.00 saatindeki 45.435 kWh ve 12.00 saatindeki 43.457 kWh üretim değerleri izlemektedir. Üretim sabah saatlerinden itibaren artmakta, öğle saatlerinde en yüksek düzeye ulaşmakta ve akşam saatlerine doğru azalmaktadır.

Saatlik üretim değerleri, Tablo 4.12’de verilen çok zamanlı tarife dönemlerine göre sınıflandırılmıştır. Buna göre 06.00–17.00 saatleri arasındaki gündüz zaman diliminde 304.819 kWh, 17.00–22.00 saatleri arasındaki puant zaman diliminde ise 27.876 kWh elektrik enerjisi üretildiği belirlenmiştir. Gece zaman diliminde PVsyst saatlik sonuçlarında toplam –24 kWh olarak hesaplanan düşük negatif değerler görülmüştür. Saatlik değerlerin zaman dilimlerine göre toplamı 332.671 kWh olup, bu değer PVsyst simülasyonunda raporlanan 332.673 kWh/yıl yıllık net üretim ile büyük ölçüde uyumludur. Aradaki 2 kWh’lik fark, saatlik sonuçların tabloda tam sayı olarak gösterilmesinden kaynaklanan yuvarlamadan ileri gelmektedir. Negatif gece değerleri fiziksel bir elektrik üretimini ve dolayısıyla elektrik gideri tasarrufunu temsil etmediğinden ekonomik hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Bu nedenle yıllık ekonomik fayda, gündüz ve puant zaman dilimlerinde gerçekleşen üretim değerleri esas alınarak hesaplanmıştır. Zaman dilimlerine göre üretim dağılımı Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8: PV üretiminin zaman dilimlerine göre dağılımı

<i>Zaman dilimi</i>	<i>Saat aralığı</i>	<i>Toplam üretim (kWh/yıl)</i>
<i>Gündüz</i>	06.00–17.00	304.819
<i>Puant</i>	17.00–22.00	27.876
<i>Gece</i>	22.00–06.00	-24
<i>Toplam</i>	—	332.671

Fotovoltaik sistemin yıllık elektrik gideri tasarrufu, Bölüm 4.6.1’de açıklanan yöntem ve Eşitlik (4.9) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda, Tablo 5.8’de belirlenen gündüz ve puant zaman dilimlerindeki elektrik üretim miktarları, Tablo 4.12’de verilen ilgili zaman dilimlerine ait elektrik birim fiyatları ile eşleştirilmiştir. Buna göre fotovoltaik sistem üretiminin ortak OG aboneliği kapsamında değerlendirilmesiyle, şebekeden satın alınacak elektrik enerjisinde yıllık yaklaşık 1.166.419 TL tutarında tasarruf sağlanabileceği

belirlenmiştir. Bu tasarrufun büyük bölümü, fotovoltaik elektrik üretiminin yoğunlaştığı gündüz zaman diliminde gerçekleşmektedir.

5.5.2 Yatırım ve İşletme Maliyetleri

Bölüm 4.6'da açıklanan ekonomik analiz yöntemi doğrultusunda fotovoltaik sisteme ait yatırım ve işletme maliyetleri PVsyst yazılımının Ekonomik Değerlendirme modülünde değerlendirilmiştir. Ekonomik analizde esas alınan yatırım ve işletme maliyetleri Şekil 5.7'de verilmiştir.

Sistem maliyeti			
Kurulum maliyetleri			
Öge	Miktar birim	Maliyet USD	Toplam USD
PV modül			
JKM-585N-72HL4-V	418	101.03	42.230.54
Panel sehpaları	418	42.94	17.948.92
Invertör			
SUN2000-100KTL-M1-400Vac	2	4.011.00	8.022.00
Diğer parçalar			
Donatılar, bağlantılar, vidalar	1	3.589.00	3.589.00
Kablolama	1	8.446.00	8.446.00
İzleme sistemi, ekran	1	1.689.00	1.689.00
Ölçüm sistemi, piranometre	1	2.533.00	2.533.00
Parafudr	1	9.289.00	9.289.00
Etüt ve analizler			
Mühendislik	1	13.302.00	13.302.00
Kurulum			
Modül başına global kurulum maliyeti	418	25.26	10.558.68
Sevkiyat	1	4.645.00	4.645.00
Şebeke bağlantısı	1	4.433.00	4.433.00
Sigorta			
Bina sigortası	1	10.557.00	10.557.00
		Toplam	137.243.14
		Amortismanına tabi	71.790.46
İşletme maliyetleri			
Öge			Toplam USD/yıl
Bakım			
Invertör değiştirme rezervi			1.604.40
Tamir			3.350.00
Temizlik			800.00
Toplam (OPEX)			5.754.40
Sistem özeti			
Toplam kurulum maliyeti		137.243.14 USD	
İşletme maliyetleri		5.754.40 USD/yıl	
Üretilen enerji		333 MWh/yıl	
Üretilen enerji maliyeti (LCOE)		0.0580 USD/kWh	

Şekil 5.7: Fotovoltaik sisteme ait yatırım ve işletme maliyetleri

Şekil 5.7 incelendiğinde fotovoltaik sistemin toplam yatırım maliyetinin (CAPEX) 137.243,14 USD olduğu görülmektedir. Bu maliyet; fotovoltaik modüller, invertörler,

panel taşıyıcı konstrüksiyon sistemi, kablolama elemanları, izleme ve ölçüm sistemi, parafudr, mühendislik hizmetleri, montaj, sevkiyat, şebeke bağlantısı ve sigorta giderlerinden oluşmaktadır.

Yatırım maliyetleri içerisinde en yüksek payı 42.230,54 USD ile fotovoltaik modüller oluşturmaktadır. Bunu 17.948,92 USD ile panel taşıyıcı konstrüksiyon sistemi ve 13.302,00 USD ile mühendislik hizmetleri izlemektedir. Modül montajı için 10.558,68 USD, bina sigortası için 10.557,00 USD, kablolama için 8.446,00 USD, invertörler için 8.022,00 USD, sevkiyat için 4.645,00 USD ve şebeke bağlantısı için 4.433,00 USD maliyet belirlenmiştir.

Sistemin yıllık işletme gideri (OPEX) 5.754,40 USD/yıl olarak belirlenmiştir. Bu tutarın 1.604,40 USD'si invertör yenileme rezervi, 3.350,00 USD'si bakım ve onarım, 800,00 USD'si ise panel temizliği giderlerinden oluşmaktadır. Söz konusu işletme giderleri, 25 yıllık proje süresince gerçekleştirilen finansal değerlendirmede yıllık maliyet olarak dikkate alınmıştır

5.5.3 Finansal Performans Göstergelerinin Değerlendirilmesi

Fotovoltaik sistemin uzun dönemli ekonomik performansı, Bölüm 4.6.2'de açıklanan yöntem doğrultusunda PVsyst yazılımının Ekonomik Değerlendirme modülü kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen temel finansal performans göstergeleri Şekil 5.8'de verilmiştir.

Finansal analiz				
Simülasyon dönemi				
Proje süresi	25 yıl	Başlangıç yılı	2027	
Zaman içinde gelir değişimi				
Enflasyon			0.00 %/yıl	
Modül bozunumu			0.45 %/yıl	
İskonto oranı			8.00 %/yıl	
Gelire bağlı giderler				
Gelir vergisi oranı			0.00 %/yıl	
Diğer gelir vergisi			0.00 %/yıl	
Temettü			0.00 %/yıl	
Amortisman tabi				
Varlık	Amortisman tipi	Amortisman süresi (yıl)	Hurda değeri (USD)	Amortisman tabi (USD)
PV modül				
JKM-585N-72HL4-V	Normal	20	0.00	42.230.54
Panel sehpaları	Normal	20	0.00	17.948.92
Invertör				
SUN2000-100KTL-M1-400Vac	Normal	20	0.00	8.022.00
Donatılar, bağlantılar, vidalar	Normal	20	0.00	3.589.00
		Toplam	0.00	71.790.46
Finansman				
Öz kaynak			137.243.14 USD	
Elektrik satışı				
Şebekeye satış tarifesı			0.11000 USD/kWh	
Tarife garantisi süresi		20 yıl		
Yıllık bağlantı vergisi			0.00 USD/yıl	
Yıllık tarife varyasyonu			0.0 %/yıl	
Tarife garantisi süresi sonunda alım fiyatı düşüşü			0.00 %	
Yatırımın geri dönüşü				
Geri ödeme süresi		5.8 yıl		
Net bugünkü değer (NBD)		177.938.96 USD		
İç kârlılık oranı (İKO)		21.80 %		
Yatırımın geri dönüşü (ROI)		129.7 %		

Şekil 5.8: PVsyst ekonomik analiz sonuçları

Şekil 5.8 incelendiğinde, fotovoltaik sistem için seviyelendirilmiş enerji maliyetinin (LCOE) 0,0580 USD/kWh olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değer, sistemin 25 yıllık proje süresi boyunca elektrik enerjisini düşük birim maliyetle üretebildiğini ve uzun dönemli işletme açısından ekonomik bir üretim maliyetine sahip olduğunu göstermektedir.

Ekonomik değerlendirme sonucunda sistemin Net Bugünkü Değeri (NBD) 177.938,96 USD olarak hesaplanmıştır. NBD'nin pozitif olması, %8 iskonto oranı dikkate alındığında yatırımın proje süresi boyunca ekonomik değer oluşturduğunu ve finansal açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Yatırımın kârlılığını ifade eden İç Kârlılık Oranı %21,80 olarak belirlenmiştir. Bu değer ekonomik analizde esas alınan %8 iskonto oranının üzerinde olması, yatırımın finansal getiri potansiyelinin olumlu olduğunu göstermektedir.

Simülasyon sonucunda sistemin basit geri ödeme süresi 5,8 yıl olarak hesaplanmıştır. Çalışmada fotovoltaik sistem ömrünün 25 yıl olarak kabul edildiği göz önüne alındığında,

yatırım maliyetinin işletme süresinin ilk yıllarında geri kazanıldığı ve sistemin geri kalan yaklaşık 19 yıl boyunca ekonomik fayda sağlamaya devam edeceği anlaşılmaktadır.

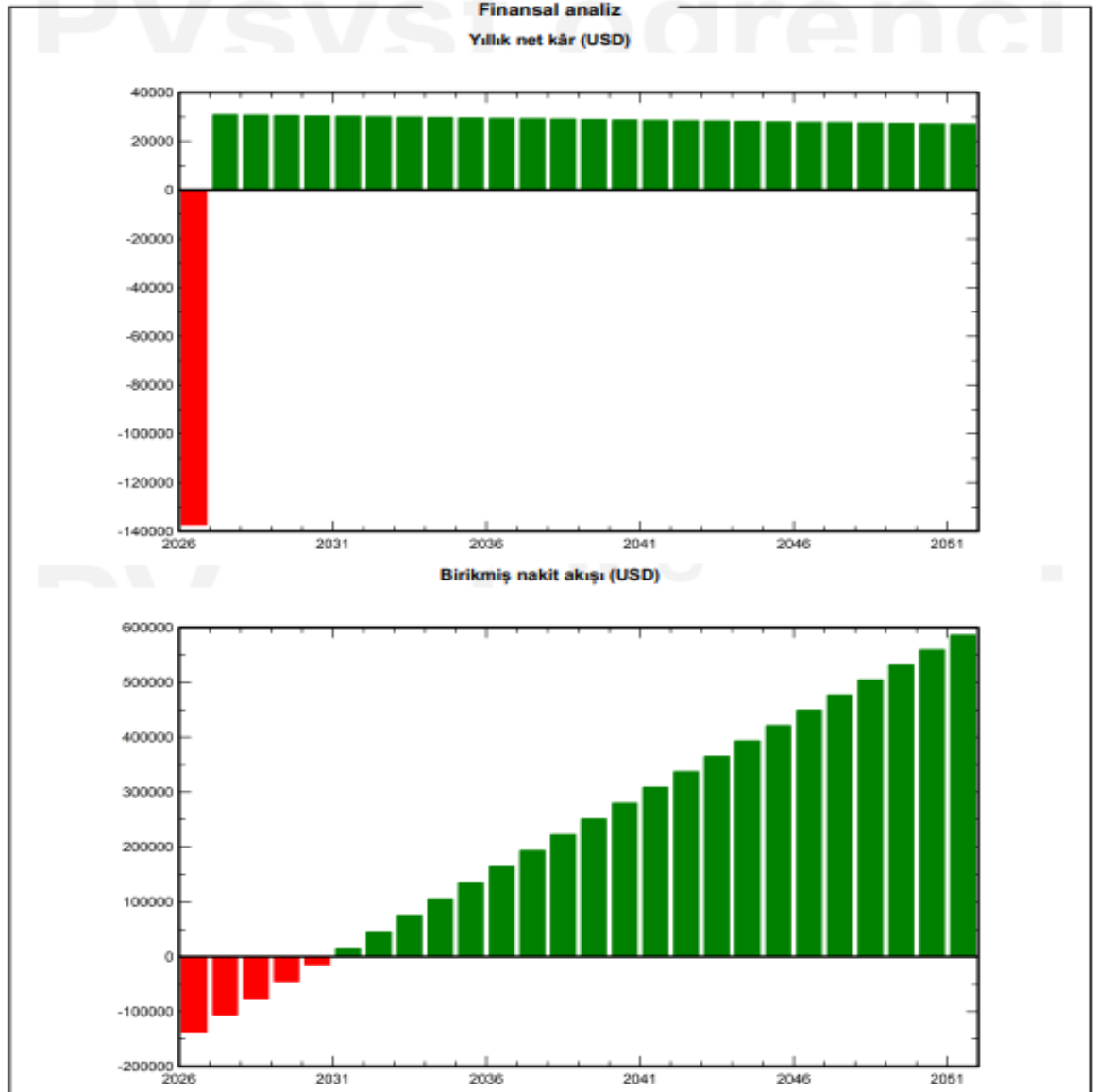
PVsyst tarafından oluşturulan proje ömrüne ilişkin ayrıntılı ekonomik analiz sonuçları Şekil 5.9'da verilmiştir.

Finansal analiz									
Detaylı ekonomik sonuçlar (USD)									
Yıl	Elektrik satışı	Öz kaynak	İşletme gider.	Amortis. payı	Vergi. tabi gelir	Vergiler	Net kâr	Birikmiş kâr	% itfa
0	0	137.243	0	0	0	0	0	-137.243	% 0.0
1	36.598	0	5.754	3.590	27.254	0	30.843	-108.685	% 20.8
2	36.433	0	5.754	3.590	27.089	0	30.678	-82.383	% 40.0
3	36.269	0	5.754	3.590	26.925	0	30.515	-58.159	% 57.6
4	36.106	0	5.754	3.590	26.762	0	30.351	-35.850	% 73.9
5	35.943	0	5.754	3.590	26.599	0	30.189	-15.304	% 88.8
6	35.781	0	5.754	3.590	26.438	0	30.027	3.618	% 102.6
7	35.620	0	5.754	3.590	26.277	0	29.866	21.044	% 115.3
8	35.460	0	5.754	3.590	26.116	0	29.706	37.093	% 127.0
9	35.301	0	5.754	3.590	25.957	0	29.546	51.874	% 137.8
10	35.142	0	5.754	3.590	25.798	0	29.387	65.486	% 147.7
11	34.984	0	5.754	3.590	25.640	0	29.229	78.022	% 156.8
12	34.826	0	5.754	3.590	25.482	0	29.072	89.567	% 165.3
13	34.669	0	5.754	3.590	25.326	0	28.915	100.199	% 173.0
14	34.513	0	5.754	3.590	25.170	0	28.759	109.990	% 180.1
15	34.358	0	5.754	3.590	25.014	0	28.604	119.007	% 186.7
16	34.204	0	5.754	3.590	24.860	0	28.449	127.311	% 192.8
17	34.050	0	5.754	3.590	24.706	0	28.295	134.958	% 198.3
18	33.896	0	5.754	3.590	24.552	0	28.142	142.001	% 203.5
19	33.744	0	5.754	3.590	24.400	0	27.989	148.486	% 208.2
20	33.592	0	5.754	3.590	24.248	0	27.838	154.459	% 212.5
21	33.441	0	5.754	0	27.686	0	27.686	159.959	% 216.6
22	33.290	0	5.754	0	27.536	0	27.536	165.024	% 220.2
23	33.141	0	5.754	0	27.386	0	27.386	169.688	% 223.6
24	32.991	0	5.754	0	27.237	0	27.237	173.984	% 226.8
25	32.843	0	5.754	0	27.089	0	27.089	177.939	% 229.7
Toplam	867.195	137.243	143.860	71.790	651.545	0	723.335	177.939	% 229.7

Şekil 5.9: PVsyst ayrıntılı ekonomik analiz sonuçları

Şekil 5.9 incelendiğinde, yatırım maliyetinin proje başlangıcında gerçekleştiği ve işletme döneminde fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektrik enerjisinin ekonomik fayda oluşturduğu görülmektedir. PVsyst ekonomik değerlendirmesine göre 25 yıllık proje süresi sonunda üretilen elektrik enerjisinin toplam ekonomik karşılığı 867.195 USD, toplam işletme gideri 143.860 USD ve bu iki değer arasındaki farkı ifade eden toplam net ekonomik fayda 723.335 USD olarak hesaplanmıştır.

Fotovoltaik sistemin yıllık net ekonomik faydası ve birikmiş nakit akışının proje süresince değişimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10: Yıllık net ekonomik fayda ve birikmiş nakit akışı

Şekil 5.10'da fotovoltaik sistemin yıllık net ekonomik faydası ile proje süresince oluşan birikmiş nakit akışı gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, proje başlangıcında yatırım maliyetinin gerçekleştirilmesi nedeniyle nakit akışının negatif olduğu görülmektedir. İşletme dönemine geçilmesiyle birlikte fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektrik enerjisinin sağladığı ekonomik fayda sayesinde her yıl pozitif net nakit akışı oluşmaktadır.

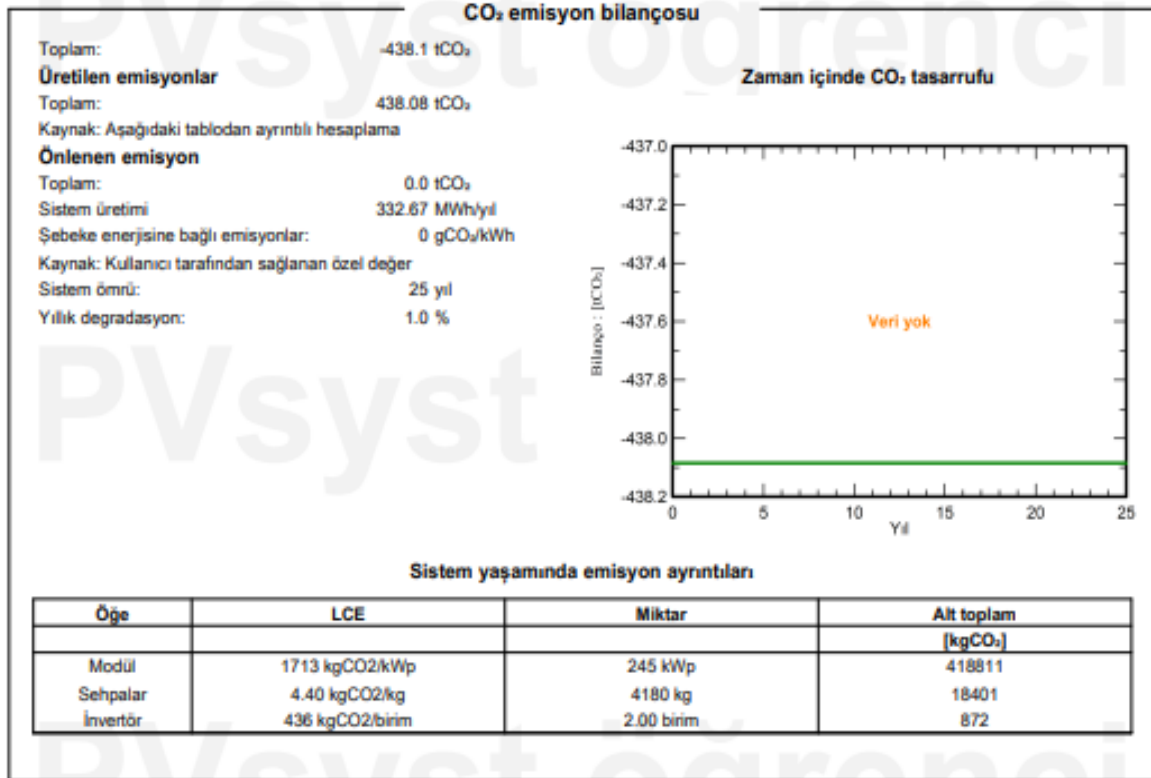
Birikmiş nakit akışı grafiği incelendiğinde yatırım maliyetinin yaklaşık 6. yılda geri kazanıldığı ve bu tarihten sonra birikmiş ekonomik faydanın düzenli olarak artış

göstermesi ile PVsyst tarafından hesaplanan 5,8 yıllık basit geri ödeme süresini desteklediği görülmektedir. Yatırımın geri kazanılmasının ardından birikmiş nakit akışı proje ömrü boyunca artmaya devam ederek 25. yıl sonunda yaklaşık 585.000 USD seviyesine ulaşmaktadır. Bu değer Şekil 5.9'da verilen 723.335 USD toplam net ekonomik faydadan daha düşük olması, birikmiş nakit akışında 137.243,14 USD tutarındaki başlangıç yatırım maliyetinin de dikkate alınmasından kaynaklanmaktadır.

Yıllık net ekonomik faydanın proje süresi boyunca büyük ölçüde kararlı bir seyir izlemesi, sistemin düzenli elektrik üretimi sağlaması ve işletme giderlerinin yatırım maliyetine kıyasla düşük düzeyde kalmasıyla açıklanabilir. Elde edilen sonuçlar, önerilen fotovoltaik sistemin uzun dönemli ekonomik uygulanabilirliğini desteklemektedir.

5.6 Karbon Emisyonu Azaltımının Değerlendirilmesi

Fotovoltaik sistemin çevresel katkısı, PVsyst yazılımının CO₂ Emisyon Bilançosu modülü kullanılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.11: Fotovoltaik sistemin CO₂ emisyon bilançosu

Şekil 5.11 incelendiğinde, fotovoltaik sistemin 25 yıllık işletme süresi boyunca 438,08 ton CO₂ emisyonunu önleyebileceği görülmektedir. Bu değer, sistemin ürettiği elektrik

enerjisinin fosil yakıt kaynaklı şebeke elektriği yerine kullanılmasından kaynaklanan çevresel kazanımı ifade etmektedir.

Raporda, sistem bileşenlerinin üretiminden kaynaklanan yaşam döngüsü emisyonları da değerlendirilmiştir. Buna göre modüller, taşıyıcı sistem ve invertörlerin üretiminden sırasıyla 41.881 kgCO₂ , 18.401 kgCO₂ ve 872 kgCO₂ emisyon oluştuğu hesaplanmıştır. Buna rağmen sistem, işletme süresi boyunca bu emisyonları telafi ederek net 438,08 ton CO₂ emisyon azaltımı sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlar, önerilen fotovoltaiik sistemin ekonomik faydalarının yanı sıra sera gazı emisyonlarının azaltılması, karbon salımının düşürülmesi ve sürdürülebilir enerji kullanımının desteklenmesi açısından da önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin enerji üretim performansı, bina ve ortak abonelik elektrik tüketimine sağlayabileceği katkı, ekonomik uygulanabilirliği ve çevresel etkileri birlikte değerlendirilmiştir. Rektörlük Binasının enerji ihtiyacı İZODER TS 825 Hesap Programı ile belirlenmiş, fotovoltaik sistem PVsyst 8.1.4 yazılımında modellenmiş ve elde edilen sonuçlar Rektörlük ile Mühendislik-Mimarlık Fakültesinin ortak orta gerilim aboneliğine ait elektrik tüketim verileriyle karşılaştırılmıştır.

TS 825 hesaplamaları sonucunda Rektörlük Binasının yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı 682.083 kWh/yıl, yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı ise 556.909 kWh/yıl olarak belirlenmiş; toplam yıllık net iklimlendirme enerjisi ihtiyacı 1.238.992 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Isıtma enerjisi ihtiyacının toplam içerisindeki payının yaklaşık %55,1, soğutma enerjisi ihtiyacının payının ise %44,9 olması, binanın yıllık net ısıtma ihtiyacının soğutma ihtiyacından daha yüksek olmakla birlikte iki ihtiyacın birbirine yakın düzeylerde gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, fotovoltaik sistemin doğrudan elektrik enerjisi üretmesi nedeniyle soğutma ihtiyacı elektrik tüketimi açısından ayrıca değerlendirilmiştir. TS 825 kapsamında hesaplanan net soğutma enerjisi ihtiyacının doğrudan elektrik tüketimini değil, binadan uzaklaştırılması gereken ısı enerjisi ifade etmesi nedeniyle, Rektörlük Binasında kullanılan hava soğutmalı chiller grubunun COP=2,7 değeri dikkate alınmış ve soğutmaya karşılık gelen yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı yaklaşık 206.263 kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Soğutma enerjisi ihtiyacının özellikle yaz aylarında artması ile fotovoltaik sistem üretiminin aynı dönemde yüksek seviyelerde gerçekleşmesi, üretim ile soğutma ihtiyacı arasında mevsimsel açıdan uyumlu bir yapı bulunduğunu göstermektedir. Böylece binanın soğutma ihtiyacı ile bu ihtiyacın karşılanması için gerekli elektrik enerjisi birbirinden ayrılarak değerlendirilmiş ve fotovoltaik sistemin soğutma kaynaklı elektrik tüketimine sağlayabileceği katkının belirlenmesi için gerekli temel oluşturulmuştur.

PVsyst simülasyonunda 418 adet 585 W gücünde monokristal fotovoltaik modül ve iki adet string invertörden oluşan yaklaşık 245 kWp kurulu güce sahip sistem modellenmiştir.

Simülasyon sonucunda sistemin yıllık elektrik üretimi 332.673 kWh, performans oranı ise %81,4 olarak belirlenmiştir. Elde edilen üretim ve performans oranı, seçilen sistem bileşenleri ile çatı alanının etkin biçimde değerlendirilebildiğini ve sistemin Balıkesir iklim koşullarında yüksek bir enerji üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Kayıp analizinde modül sıcaklığı, optik kayıplar ve elektriksel dönüşüm süreçlerinin sistem performansını etkileyen başlıca unsurlar olduğu; kablolama ve diğer sistem kayıplarının ise daha sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür. Böylece sistemin teknik açıdan uygulanabilir ve enerji üretimi bakımından yeterli bir performans gösterebileceği değerlendirilmiştir.

Fotovoltaik sistemin enerji üretiminin mevcut tüketim üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, yıllık üretimin Rektörlük Binasının tahmini yıllık elektrik tüketiminin %38,16'sına, Rektörlük ve Mühendislik-Mimarlık Fakültesinin ortak OG aboneliğine ait beş yıllık ortalama elektrik tüketiminin ise %22,59'una karşılık geldiği belirlenmiştir. TS 825 kapsamında hesaplanan yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı ile fotovoltaik sistemin yıllık elektrik üretimi sayısal enerji büyüklükleri açısından karşılaştırıldığında, sistem üretiminin net soğutma enerjisi ihtiyacının %59,74'üne karşılık geldiği belirlenmiştir. Net soğutma enerjisi ihtiyacının chiller elektrik tüketimine dönüştürülmesiyle elde edilen yıllık 206.263 kWh elektrik ihtiyacı esas alındığında ise fotovoltaik sistem üretiminin bu değer %161,29'una karşılık geldiği belirlenmiştir. Bu sonuç, fotovoltaik sistemin yıllık elektrik üretiminin chiller sisteminin hesaplanan yıllık elektrik ihtiyacından yüksek olduğunu ve özellikle soğutma kaynaklı elektrik tüketiminin azaltılmasında önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu oran yıllık toplam enerji miktarlarının karşılaştırılmasına dayanmakta olup, chiller elektrik ihtiyacının her çalışma anında tamamen fotovoltaik üretimle karşılanacağı anlamına gelmemektedir.

Ekonomik analiz sonuçları, sistemin teknik performansının yanı sıra finansal açıdan da uygulanabilir bir yatırım olduğunu göstermektedir. PVsyst saatlik üretim verilerinin EPDK çok zamanlı elektrik tarifi ile değerlendirilmesi sonucunda, gündüz ve puant zaman dilimlerinde gerçekleşen fotovoltaik üretimin şebekeden satın alınacak elektrik enerjisini azaltmasıyla yıllık yaklaşık 1.166.419 TL elektrik gideri tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir. Sistemin toplam yatırım maliyeti 137.243,14 USD, yıllık işletme gideri ise 5.754,40 USD/yıl olarak belirlenmiştir. Finansal değerlendirme sonucunda 5,8 yıllık basit geri ödeme süresi, 177.938,96 USD Net Bugünkü Değer, %21,80 İç Kârlılık Oranı ve 0,0580 USD/kWh seviyelendirilmiş enerji maliyeti elde edilmiştir. Birikmiş nakit akışının

yaklaşık altıncı yılda pozitif değere geçmesi de hesaplanan geri ödeme süresini desteklemektedir. Proje süresinin 25 yıl olduğu dikkate alındığında, yatırım maliyetinin proje ömrünün ilk döneminde geri kazanılması ve sonrasında pozitif nakit akışı oluşturulması, sistemin uzun dönemli ekonomik uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın çevresel etkileri de PVsyst yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda önerilen fotovoltaik sistemin 25 yıllık işletme süresi boyunca yaklaşık 438 ton CO₂ emisyonunun atmosfere salınmasını önleyebileceği belirlenmiştir. Fotovoltaik modüller, taşıyıcı sistem ve invertörlerin üretiminden kaynaklanan yaşam döngüsü emisyonlarına rağmen, sistemin işletme döneminde şebekeden sağlanan elektrik enerjisini azaltması sonucunda bu emisyonların zaman içerisinde telafi edildiği görülmektedir. Bu sonuç, fotovoltaik sistemin yalnızca enerji maliyetlerinin azaltılması açısından değil, kampüs ölçeğinde çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından da önemli bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde, Rektörlük Binası çatısına kurulması planlanan fotovoltaik sistemin mevcut çatı alanının yenilenebilir enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesine olanak sağladığı, Rektörlük Binası ve ortak OG aboneliğinin elektrik tüketiminin azaltılmasına katkıda bulunduğu ve özellikle soğutma kaynaklı elektrik ihtiyacı açısından önemli bir enerji üretim potansiyeli sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Teknik performans, enerji karşılama oranları, ekonomik göstergeler ve karbon emisyonu azaltım potansiyeli birlikte ele alındığında, önerilen sistemin enerji, ekonomi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından uygulanabilir bir çözüm olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrıca üniversite kampüslerindeki uygun çatı alanlarının fotovoltaik sistemlerle değerlendirilmesinin, kampüslerin şebekeden elektrik tüketiminin ve enerji maliyetlerinin azaltılmasına yönelik önemli bir uygulama potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen teknik, enerji ve ekonomik bulgular doğrultusunda, üniversite kampüslerinde çatı üzeri fotovoltaik sistem uygulamalarının yaygınlaştırılmasına yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

Bu çalışma yalnızca Balıkesir Üniversitesi Rektörlük Binası ile sınırlandırılmıştır. Ancak benzer analizlerin kampüs içerisinde yer alan diğer fakülte, laboratuvar, sosyal tesis ve idari binalar için de gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Böylece kampüsün toplam çatı tipi fotovoltaik sistem potansiyeli belirlenebilir ve üniversitenin elektrik enerjisi ihtiyacının daha büyük bir bölümünün yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasına yönelik bütüncül bir enerji planlaması yapılabilir.

Çalışmada bina enerji ihtiyacının belirlenmesinde TS 825 standardı, fotovoltaik sistemin teknik ve ekonomik değerlendirilmesinde ise PVsyst yazılımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımın farklı iklim bölgelerinde bulunan üniversite kampüsleri ve kamu binalarına uygulanması, farklı iklim koşullarının fotovoltaik sistem performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu araştırmada fotovoltaik sistem performansı uzun yıllara ait meteorolojik veriler kullanılarak simülasyon ortamında değerlendirilmiştir. Sistemin kurulması durumunda elde edilecek gerçek üretim verilerinin uzun dönemli olarak izlenmesi ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması, model doğruluğunun değerlendirilmesine ve gelecekte yapılacak benzer çalışmaların güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Çalışma kapsamında sabit eğimli ve şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem incelenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı panel teknolojileri, panel eğim açıları, yönelim seçenekleri, invertör konfigürasyonları ve yüksek verimli yeni nesil fotovoltaik modüllerin teknik ve ekonomik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir. Bunun yanında enerji depolama sistemlerinin fotovoltaik sistemlerle birlikte kullanılması durumunda öz tüketim oranındaki değişim ve ekonomik etkiler de araştırılabilir.

Ekonomik analizde mevcut elektrik tarifeleri esas alınmıştır. İlerleyen çalışmalarda elektrik birim fiyatlarındaki değişimler, yatırım teşvikleri, finansman modelleri, karbon emisyonu azaltımına yönelik teşvik mekanizmaları ve farklı ekonomik senaryolar dikkate alınarak kapsamlı duyarlılık analizleri gerçekleştirilebilir. Böylece fotovoltaik sistem yatırımlarının değişen ekonomik koşullardaki uygulanabilirliği daha ayrıntılı olarak ortaya konulabilir.

Bu çalışmada önerilen fotovoltaik sistemin yalnızca enerji üretimi ve ekonomik fayda sağlamadığı, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılmasına da önemli katkı

sağlayabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda kampüs ölçeğinde karbon ayak izi analizlerinin gerçekleştirilmesi, fotovoltaik sistemlerin sürdürülebilir kampüs uygulamaları içerisindeki rolünün daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntem; bina enerji ihtiyacının belirlenmesi, fotovoltaik sistemin teknik olarak modellenmesi, enerji üretim performansının değerlendirilmesi ve ekonomik analizlerin birlikte ele alınmasını sağlayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yönüyle çalışmanın, üniversite kampüsleri başta olmak üzere benzer özelliklere sahip kamu binalarında gerçekleştirilecek çatı üzeri fotovoltaik sistem yatırımlarının planlanması ve uygulanması sürecinde karar vericilere ve araştırmacılara yol gösterici nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Akcan, E., Kuncan, M., ve Minaz, M.R.** (2020). PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.
- Akhan, H., Ezik, E. İ., ve Emirali, S.** (2025). Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 17-32.
- Aksangör, N. N.** (2019). Ankara Şartlarında Bir Fotovoltaik Sistemin PVsyst Programı Yardımı ile Performans Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aktaş, A. ve Kocaman, B.** (2024). Sabit ve Güneş Takipli Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırmalı Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 208-221.
- Akyürek, E. F., Geliş, K., ve Yoladı, M.** (2021). Farklı gölgeleme durumlarının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 161-168.
- Altınkök, S., ve Altınkök, A.** (2024). Photovoltaic Thermal PV/T Solar Panels and Practical Applications. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi (The Black Sea Journal of Sciences)*, 14(2), 683-699.
- Arslan, İ.** (2018). Tekirdağ Koşullarında Polikristal ve Monokristal Tip PV Güneş Panellerinin Verimlilik Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Atlım, F.** (2019). Balıkesir İlindeki PV Sistemlerin Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir
- Ay, E. ve Pamuk, N.** (2023). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Yerleşkesindeki Elektrik Enerjisi İhtiyacının Güneş Enerjisi Santralleri Kurularak Elde Edilmesi ve Ekonomik Analizi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 6(3), 173-184.
- Balıkesir Üniversitesi.** (2024). *2024 yılı faaliyet raporu*. Balıkesir Üniversitesi. <https://baunwebapi.balikesir.edu.tr/uploads/1759920910234.pdf>
- Bayyığıt, A.** (2023). Tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik panellerin performans analizi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Biçen, T. ve Vardar, A.** (2022). Technical and Economic Analysis of Electricity Production with Solar Panels: Bursa Example. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(1), 59-73.
- Çelik, A. N., ve Koç, F.** (2020). Polikristal Tür bir Fotovoltaik Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(4), 2491-2515.
- Çınaroğlu, M. S.** (2021). Kilis 7 Aralık Üniversitesinde Kurulacak Bir GES Projesinin PVsyst Aracılığı ile Tasarım ve Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kilis.
- Dal, A. R.** (2021). Güneş Enerji Panellerindeki Optimum Eğim Açısının Verime Etkisinin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 241-250.
- Demiryürek, H. K., Arifoğlu, U., ve Bolat, M.** (2020). Lebit Enerji Güneş Santralının PVsyst Programı ile Analizi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 1351-1363.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., ve Blair, N.** (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind* (5. baskı). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons
- Dursun, M., & Görgün, A.** (2026). Advanced MPPT strategy for PV microinverters: A dragonfly algorithm approach integrated with wireless sensor networks under partial shading. *Electronics*, 15(2), Article 413.
- Eke, R., & Şentürk, A.** (2012). Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Solar Energy*, 86(9), 2665–2672.
- Emikönel, S. ve Kocalmış Bilhan, A.** (2022). Türkiye'nin Farklı Bölgelerdeki Güneş Enerjisi Potansiyelinin Analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(Özel Sayı), 170-184
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK).** (2024). *Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları*. Erişim adresi: <https://www.epdk.org.tr/>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB).** (2024). *Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)*. Erişim adresi: <https://gepa.enerji.gov.tr/>. (Son Erişim Tarihi: 02 Mayıs 2026)
- Engin, A. Y. ve Pamuk, N.** (2023). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Yerleşkesindeki Elektrik Enerjisi İhtiyacının Güneş Enerjisi Santralleri Kurularak

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Elde Edilmesi ve Ekonomik Analizi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 173-184.
- Geliş, K., Akyürek, E. F., ve Yoladı, M.** (2020). Panel Konumu ve Açısının Fotovoltaik Panel Karakteristiği Üzerine Etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 1899-1908.
- Gençgönül, B. Z., Gençgönül, A. S., ve Selbaş, R.** (2024). Üniversite Kampüsünde Solar Panel Kullanımının Teknik ve Ekonomik Analizi: ISUBÜ Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(065204), 1421-1430
- Girgin, M. H.** (2011). Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralının Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW'lık Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Güner, E.** (2023). Iğdır İlinde Güneş Enerjisi Uygulamaları için Optimum Panel Eğim Açısının Belirlenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2905-2914.
- Güneş, S.** (2024). Enerji verimliliğine dayalı fotovoltaik güneş enerji santrali analizi ve tasarımı (Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Güven, Ş.** (2022). Fotovoltaik Panel Yüzey Sıcaklığının Denizli İli için Çıkış Gücü ve Verim Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 63(707), 429-442. DOI: 10.46399/muhendismakina.107239
- İklim Değişikliği Başkanlığı.** (2024). İklim değişikliği azaltım stratejisi ve eylem planı (2024–2030). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., ve Demirkol, S.** (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, 29(8), 1265–1275.
- Kadir, S.** (2024). 1,17 MWp'lık Bir Fotovoltaik Güç Santralının Deneysel ve Simülasyona Dayalı Enerji Performans Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Kallioğlu, M. A.** (2023). Optimal Güneş Paneli Eğim Açılarını Bulmak İçin Bir Regresyon Modeli. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7(2),

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karaağaç, M. O., Oğul, H., ve Bulut, F.** (2021). Sinop İli Koşullarında Monokristal ve Polikristal Fotovoltaik Panellerin Değerlendirilmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 176-181.
- Kayri, İ.** (2023). Fotovoltaik Uygulamalar İçin Kararlı Tek Eksenli Bir Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Uygulaması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2), 432-450.
- Köker, N. İ.** (2022). Modeling and simulation of a combined system of multiple rooftop PV systems and a central energy storage system for METU Ankara Campus (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yer Sistem Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Keskin, V., Khalejan, S. H. P. R., ve Çıkla, R.** (2021). Samsun/Türkiye'de Şebekeye Bağlı bir FV Tesisin Performansına Gölgeleme Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 553-563.
- Kılıç, F. Ç.** (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
- Kon, O.** (2014). Farklı amaçlarla kullanılan binaların ısıtma ve soğutma yüklerine göre optimum yalıtım kalınlıklarının teorik ve uygulamalı olarak belirlenmesi (Doktora tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Koçyiğit, M.** (2019). Üniversite binalarında enerji tasarruf potansiyelinin araştırılması: Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü örneği (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Morad, A., Al-Sayyab, A. M., ve Abdulwahid, M. A.** (2018). Optimisation of tilted angles of a photovoltaic cell to determine the maximum generated electric power: A case study of some Iraqi cities. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12, 484–488
- Nasimi, M. ve Chander, N.** (2021). Design and Economic Analysis a 3MW Grid-tied PV System Power Plant for Al-beroni University. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(9), 1625-1632
- Nuhoğlu, S.** (2017). Tek eksen güneş takipli fotovoltaik sistem tasarımı ve Konya için örnek bir uygulama (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Oral, M.** (2020). Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve PV2 Uygulamalarının Yerel Ölçekte Değerlendirilmesi: Karabük İli Örneği. *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, 42, 482-503

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ouraoui, I., & Alahtouf, A.** (2022). Investigation of the feasibility and potential use of sun tracking solutions for concentrated photovoltaic case study Fez Morocco. *Energy Reports*, 8, 1412–1425.
- Özcü, O.** (2025). Güneş enerjisi santralleri için yatırım geri dönüş sürelerinin analizi: Bursa örneği (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa.
- Özdemir, T. ve Tüzün Özmen, Ö.** (2023). Farklı Tipteki Fotovoltaik Güneş Panellerinin Düzce için 2014-2019 Yılları Arası Yaz Ayları Performans ve Verimlilik Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(1), 381-398.
- Öztürk, H. H.** (2026). Fotovoltaik Teknoloji, Akademisyen Yayınevi Kitabevi, Ankara, 1145.
- Öztürk, H. H.** (2017). “Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler”, https://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf (Erişim tarihi: 19 Haziran 2026)
- Özyiğit, O.** (2019). Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 8(12), 2486-2491.
- Özek, F.** (2000). Katıhal elektroniği, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, 85.
- Resmî Gazete.** (2019). Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği. Tarih: 12 Mayıs 2019, Sayı: 30772.
- Sancar, M. R. ve Yakut, A. K.** (2023). Comparative Analysis of SAM and PVsyst Simulations for a Rooftop Photovoltaic System. *International Journal of Engineering and Innovative Research*, 5(1), 60-76.
- Sarı, V. ve Özyiğit, F. Y.** (2020). Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yerleşkesinde Güneş Enerjisi Santralinin Ekonomik Analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22(65), 517-526.
- Şahin, M. E., & Okumuş, H. İ.** (2013). Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu. *EMO Bilimsel Dergi*, 3(5), 17-25
- Şahin, Z. R.** (2024). PVsyst ile Güneş Santrali Simülasyonu: Detaylı İnceleme ve Performans Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pastuszak, J., & Węgrzinek, P.** (2022). Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 15(15), 5542.
- Ramadana, A. and Elistratov, V.** (2019). Techno-economic evaluation of a grid-connected solar PV plant in Syria. *Applied Solar Energy*, 55(3), 174-188.
- Tanış, Z. ve Altıntaş, N.** (2023). Elazığ İlinde Şebekeye Bağlı 1036,8 kwp Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Ölçülen ve Simüle Edilen Performans Verilerinin Analizi. *EMO Bilimsel Dergi*, 13(2).
- Tozlu, C.** (2004). Muğla Üniversitesinde kurulu şebekeye bağlı fotovoltaik güç sistemlerinin performans analizi (Yüksek Lisans Tezi). Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- Uluslararası Enerji Ajansı IEA PVPS.** (2024). “Trends in photovoltaic applications 2024 (Report T1-45:2024). International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme” Erişim adresi: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/10/IEA-PVPS-Task-1-Trends-Report-2024.pdf>
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA-PVPS).** (2025). Trends in Photovoltaic Applications 2025. Erişim adresi: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/10/IEA-PVPS_Trends_2025-.pdf.
- Üründü, M. E.** (2025). Şebekeye Bağlı 1 MW Kurulu Güçteki Güneş Enerji Santralinin PVsyst ve PVsol ile Performans Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yahli Kılıç, M. ve Kurtaran, M.** (2024). Sürdürülebilir Enerji Üretimi İçin Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve PVsyst Programı İle Simülasyonu: Bursa İli Örneği. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 11(1), 239-248.
- Yazdani, H., & Yaghoubi, M.** (2022). Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: A combined experimental numerical study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101946
- Yıldırım, B., ve Düzkaya, H.** (2025). Comparative Analysis with PVGIS and PVsyst for Solar Energy Production in Bahşılı Region of Kırıkkale. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 13(3), 877-891
- Yılmaz, S., Karatutlu, A., & Kekeç, C.** (2015). Designing a PLC-Based Real-Time Sun Tracking System. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1(5), 24-31

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yüzer, E. Ö. (2025). Güneş Enerji Potansiyeli Yüksek Bir Bölgede PVsyst Yazılımı Kullanarak PV Sistemin Tasarımı ve Performans Değerlendirmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 21(1), 1-12

EKLER

EKLER

EK A.1: İZODER TS 825 Yazılımında Tanımlanan Proje Bilgileri

 İZODER İSİ SU SES ve YANGIN YALITIMCILARI DERNEĞİ	PROJE BİLGİLERİ	 tmmob makina mühendisleri odası
BİNANIN		
Sahibi : BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ	Kullanma Amacı : Ofis, Büro Vb. İş Yerleri	Kat Adedi : 8
ARSANIN		
İli : Balıkesir	İlçesi : Merkez	Açık Adresi : Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Çağış Yerleşkesi 10145, BALIKESİR
Pafta :	Ada :	Parsel :
Isı Yalıtım Projesini Yapanın		ONAY
Adı Soyadı : Sevdâ Kartalçı		
Ünvanı : Mühendis		
Sicil No :		
Kuruluşu : Balıkesir Üniversitesi		
İmza :		

EK A.2: İZODER TS 825 Yazılımı ile Elde Edilen, Yıllık Isıtma Enerjisi Hesaplama Çizelgesi



Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacı Hesaplama Çizelgesi

Aylar	Isı kaybı				Isı kazançları			Isıtma için boyutsuz ısı-denge oranı	Kazanç kullanımı faktörü	Isıtma enerjisi ihtiyacı
	Özgül ısı kaybı	Sıcaklık farkı	Özgül ısı kaybı	Sıcaklık farkı	İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen	Havalandırma yoluyla gerçekleşen	Toplam	İç ısı kazancı	Güneş enerjisi kazancı	Toplam
	$H_{\text{H/Ctr(lexl. g'f'iztcsm)}}$ (W/K)	$\theta_{\text{intcalch'zt cm}} \cdot \theta_{\text{easmi}}$ (K, °C)	$H_{\text{granztcsm}}$ (W/K)	$\theta_{\text{intcalch'zt cm}} \cdot \theta_{\text{easmi}}$ (K, °C)	$Q_{\text{H'iztcsm}}$ (kWh)	$Q_{\text{H'veztcsm}}$ (kWh)	$Q_{\text{H'iztcsm}}$ (kWh)	$Q_{\text{H'iztcsm}}$ (kWh)	$Q_{\text{H'iztcsm}}$ (kWh)	$Q_{\text{H'iztcsm}}$ (kWh)
Ocak		19,00		6,46	162,321	42,444	204,765	29,541	36,319	65,860
Şubat		18,70		6,46	144,350	37,731	182,081	26,683	43,005	69,688
Mart		16,10		6,46	138,103	35,966	174,068	29,541	43,905	73,446
Nisan		10,30		6,46	86,774	22,267	109,041	28,588	70,907	99,495
Mayıs		4,60		6,46	42,065	10,276	52,341	29,541	68,127	97,668
Haziran		-8,20		6,46	-62,738	-17,727	-80,465	28,588	94,077	122,666
Temmuz	11,224,63	-12,00	759,37	6,46	-96,564	-26,807	-123,370	29,541	109,219	138,761
Ağustos		-13,20		6,46	-106,585	-29,487	-136,072	29,541	86,871	116,413
Eylül		1,30		6,46	14,038	2,810	16,849	28,588	87,187	115,776
Ekim		7,00		6,46	62,108	15,637	77,745	29,541	50,232	79,773
Kasım		15,20		6,46	126,374	32,860	159,234	28,588	40,783	69,371
Aralık		18,72		6,46	159,983	41,818	201,801	29,541	45,188	74,729
Yıllık toplam net ısıtma enerjisi ihtiyacı $Q_{\text{H'iztcsm}} = 682,083 \text{ kWh}$										$Q_{\text{H'iztcsm}} = 682,083$
Şartlandırılan alan $A_s = 12998,00 \text{ m}^2$'dir. Şartlandırılan alan başına yıllık net ısıtma enerjisi ihtiyacı $52,48 \text{ kWh/m}^2$ bulunur. Isıtma ve soğutma için ayrı ayrı hesaplanan birim alan başına yıllık net enerji ihtiyaçları toplanır ve elde edilen toplam değeri Ek A.1'de verilen asgari net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı (Q') ile karşılaştırılarak projenin uygunluğu değerlendirilir. Ofis, Büro Vb. İş Yerleri için 3 Derece gün bölgesinde izin verilen asgari net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı 70 kWh/m^2 yıl'dır. Yıllık net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının standartta uygunluğu Yıllık Soğutma Enerjisi Çizelgesi'nde değerlendirilmektedir.										

EK A.3: İZODER TS 825 Yazılımı ile Elde Edilen, Binanın İletimle Toplam Isı Transfer Katsayısı Hesaplama Çizelgesi

 İZODER ISI SU SES ve YANGIN YALITIMCILARI DERNEĞİ	Binanın İletimle Toplam Isı Transfer Katsayısı Hesaplama Çizelgesi	 tmmob makina mühendisleri odası
--	---	---

Binadaki Yapı Elemanları		Yapı Eleman Kalınlığı d(m)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri l(W/mK)	Isıl İletkenlik Direnci R(m²K/W)	Isı Geçirgenlik Katsayısı U(W/m²K)	Isı Kaybedilen Yüzey A(m²)	Isı Kaybı A·U(W/K)
Duvar : Dış Havaya Açık Rektörlük Dış Duvar	1/a _q : Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (İç)			0,1300			
	4.1 Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,0200	1,000	0,0200			
	4.2 Çimento harcı	0,0300	1,600	0,0188			
	4.10 Reçine ile uygulanan sıva	0,0100	0,700	0,0143			
	7.3.1.6 TS EN 998-2'ye uygun ve yoğunluğu 1000 kg/m³'ün altında olan harç kullanılarak veya özel yapıştırıcısıyla yerleştirilmiş (blok uzunluğunun en az 500 mm olması şartıyla) gaz beton bloklarla yapılan duvarlar	0,3000	0,190	1,5789			
	1/a _d : Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (Dış)			0,0800			
TOPLAM				1,842	0,543	5643,00	3.064,149
Tavan : Teras Çatı Rektörlük Teras Çatı	1/a _q : Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (İç)			0,1300			
	4.1 Kireç harcı, kireç-çimento harcı	0,0250	1,000	0,0250			
	5.1.2 Donatısız	0,0300	1,650	0,0182			
	10.3.1.1 Ekstrüde polistiren köpük (XPS) levhalar- TS EN 13164'e uygun ısı iletkenlik grubu 30	0,0800	0,030	2,6667			
	1/a _d : Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (Dış)			0,0800			
	TOPLAM			2,920	0,347	2231,00	774,157
Rektörlük Dış Ortama Bakan Pencere ve Kapılar					2,908	2540,00	7.386,320
Yapı elemanlarından iletim yolu ile gerçekleşen ısı kaybı toplamı							11.224,626
Taban : Toprağa Temas Eden Rektörlük Taban Döşemesi	1/a _q : Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (İç)			0,1700			
	5.1.2 Donatısız	0,0450	1,650	0,0273			
	5.1.2 Donatısız	0,1000	1,650	0,0606			
	10.3.1.1 Ekstrüde polistiren köpük (XPS) levhalar- TS EN 13164'e uygun ısı iletkenlik grubu 30	0,0300	0,030	1,0000			
	2.1 Kum, kum-çakıl	0,1500	2,000	0,0750			
	3.4 Kömür cürufu	0,2300	0,230	1,0000			
	1/a _d : Yüzeysel Isıl İletim Katsayısı (Dış)			0,0000			
TOPLAM				2,333	0,429	1770,10	759,373
Toprakla temas eden elemanlar için iletim yoluyla gerçekleşen ısı transferi toplamı							759,373
İletimle toplam ısı transfer katsayısı (Toprak ile temas eden elemanlar hariç) :							
$\Sigma_k (H_{H/C;el;k,m}) = 11.224,626 \text{ W/K}$							
$\Sigma_k H_{tr;tb;ztc} = 0,000 \text{ W/K}$							
$H_{H/C;tr(exd,gtf)ztcm} = \Sigma_k (H_{H/C;el;k,m}) + H_{tr;tb;ztc} = 11.224,626 \text{ W/K}$							
Toprakla temas eden elemanlarının iletimle toplam ısı transfer katsayısı:							
$\Sigma_k (A \cdot U) = 759,373 \text{ W/K}$							
$\Sigma_k H_{tr;tb;g} = 0,000 \text{ W/K}$							
$H_{granztcm} = A \cdot U + P \cdot \Psi_{wt} = 759,373 \text{ W/K}$							
Binayı oluşturan tüm yapı elemanlarının ısı geçirgenlik katsayıları (U), Ek A.2'de verilen asgari ısı geçirgenlik değerinden daha büyük olduğundan "uygun değildir".							

Aylar	Isı kaybı				Isı kazançları			Soğutma için boyutsuz ısı-denge oranı	Kazanç kullanımlı faktörü	Soğutma enerjisi ihtiyacı
	Özgül ısı kaybı	Sıcaklık farkı	Özgül ısı kaybı	Sıcaklık farkı	İletim ve taşıma yoluyla gerçekleşen	Havalandırma yoluyla gerçekleşen	Toplam			
	$H_{H/Ctr}/(\eta_{H/Ctr} \cdot g_{f/ztcm})$	$\theta_{intcal/czt} - \theta_{easrm}$ (K, °C)	$H_{granztcm}$ (W/K)	$\theta_{intcal/czt} - \theta_{easrm}$ (K, °C)	$Q_{ct-trztcm}$ (kWh)	$Q_{cv-veztcm}$ (kWh)	$Q_{ch-tztcm}$ (kWh)	$Q_{c-gnztcm}$ (kWh)	$\eta_{c-gnztcm}$	$Q_{c-ndztcm}$ (kWh)
Ocak	11.224,63	25,00	759,37	12,46	215.818	55.847	271.665	29.541	0,24	0
Şubat		24,70		12,46	192.669	49.837	242.506	26.683	0,29	0
Mart		22,10		12,46	191.599	49.369	240.968	29.541	0,30	0
Nisan		16,30		12,46	138.545	35.238	173.782	28.588	0,57	18.220
Mayıs		10,60		12,46	95.561	23.679	119.241	29.541	0,82	27.357
Haziran		-2,20		12,46	-10.967	-4.756	-15.723	28.588	94.077	-7,80
Temmuz	-6,00	-7,20	-53,089	12,46	-43,067	-13,403	-56,470	29,541	-2,46	161,742
Ağustos					-16,084	-69,173	29,541	86,871	116,413	-1,68
Eylül	7,30	12,46	65,809	15,781	81,590	28,588	87,187	115,776	1,42	53,479
Ekim	13,00	12,46	115,604	29,041	144,645	29,541	50,232	79,773	0,55	13,916
Kasım	21,20	12,46	178,145	45,831	223,976	28,588	40,783	69,371	0,31	0
Aralık	24,72	12,46	213,479	55,222	268,701	29,541	45,188	74,729	0,28	0
Yıllık toplam net soğutma enerjisi ihtiyacı $Q_{C-ndztcan} = 556.909 \text{ kWh}$									$Q_{yıl} \cdot \Sigma Q_{ay} = Q_{C-ndztcan}$	556.909
Şartlandırılan alan $A_t = 12998,00 \text{ m}^2$'dir. Şartlandırılan alan başına yıllık net soğutma enerjisi ihtiyacı $42,85 \text{ kWh/m}^2$ bulunur. Isıtma ve soğutma için ayrı ayrı hesaplanan birim alan başına yıllık net enerji ihtiyaçları toplamı ve elde edilen toplam değeri Ek A.1'de verilen asgari net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı (Q') ile karşılaştırılarak projenin uygunluğu değerlendirilir. Ofis, Büro Vb. İş Yerleri için 3 Derece gün bölgesinde izin verilen asgari net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı $70 \text{ kWh/m}^2 \text{ yıl'dır}$. Projede $Q_{H/C-ndztcan} < Q' (94,00 > 70,00)$ olduğundan bu bina için hesaplanan yıllık net ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının, izin verilen değerin üstünde olduğu görülmektedir.										

İhtiyacı Hesaplama Çizelgesi

EK B.1: Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesi Birimlerine Ait 5 Yıllık Ortalama Elektrik

No	Birim Adı	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam KwYıl
1	Rektörlük + Mühendislik Fak.	113.998,35	100.833,84	108.914,12	87.540,30	85.530,33	132.862,16	185.248,44	195.942,08	123.932,97	107.808,28	109.823,16	122.562,83	1.472.596,62
2	Balıkesir MYO	53.095,09	44.919,78	38.702,78	35.608,97	36.508,18	32.615,13	28.476,99	24.787,84	24.597,19	45.412,49	54.988,84	81.021,32	480.714,38
3	Bilimsel ve Teknolojik Arş. Mrk.	12.709,38	10.491,59	11.754,91	9.265,32	8.298,63	10.180,00	13.914,10	16.582,07	9.659,45	9.732,93	9.648,68	10.034,95	132.252,01
4	Deney Hayvanları Uyg. ve Arş. Mrk.	36.935,42	32.535,72	30.682,29	21.785,50	16.954,75	14.554,13	30.114,98	25.828,94	16.428,48	19.239,41	24.011,17	29.360,05	298.408,84
5	Fen Edebiyat Fakültesi	45.672,07	41.062,18	42.446,59	36.165,38	31.896,63	33.469,83	50.808,49	59.922,77	32.727,94	38.765,30	44.556,75	48.166,42	505.658,35
6	Güzel Sanatlar Fakültesi	12.489,00	12.581,12	11.585,10	8.483,20	7.750,77	5.987,13	5.782,54	6.498,78	7.288,12	10.158,18	13.200,39	18.572,39	120.376,70
7	Kütüphane ve Dokümantasyon	31.614,42	32.833,90	41.120,90	23.835,67	24.147,58	30.838,17	33.900,74	32.002,75	24.742,36	22.540,09	32.036,70	50.039,08	379.252,36
8	SKS Kapalı Spor Salonu	3.883,82	5.755,84	5.380,13	3.471,28	2.132,93	1.571,07	1.484,42	1.279,73	1.230,74	2.393,22	4.947,98	10.163,90	43.655,06
9	SKS Yemekhane	46.464,25	37.393,86	35.658,51	24.759,62	33.527,07	58.257,73	76.441,65	84.138,60	52.992,64	50.465,58	44.122,74	53.876,23	597.998,46
10	Spor Bilimleri Fakültesi	18.104,22	17.333,90	18.617,58	11.177,17	8.336,58	7.991,03	9.283,81	10.787,86	6.386,36	11.300,54	16.934,26	25.376,54	161.609,65
11	Turizm Fakültesi	13.396,22	11.789,09	11.532,03	9.780,45	8.257,09	7.701,07	8.492,93	8.541,31	7.359,65	12.117,92	14.451,90	15.862,53	129.082,19
12	Tıp Fakültesi Dekanlık (Eski)	32.765,08	26.861,35	29.009,67	18.411,62	14.280,23	19.848,54	26.827,54	28.288,27	15.974,54	21.051,90	27.913,95	34.834,65	296.047,34
13	Tıp Fakültesi Morfoloji	50.890,12	48.055,48	47.065,59	39.083,67	41.363,57	72.507,98	98.710,43	102.720,85	73.473,41	54.789,59	45.266,76	48.929,42	722.856,83
14	Veteriner Fakültesi	24.990,42	22.863,84	23.620,77	18.803,53	16.507,58	33.099,30	59.524,57	68.475,60	42.541,60	20.800,64	23.955,08	27.287,43	382.270,34
15	Veteriner Fakültesi (Çömlekçi)	7.124,19	6.713,03	5.753,94	4.958,48	4.298,58	3.670,06	3.563,29	3.334,63	2.562,08	3.856,54	4.370,05	6.971,34	57.176,17
16	İktisadi ve İdari Bilimler Fak.	25.624,37	24.256,81	22.459,22	16.453,46	13.825,94	20.644,25	37.090,26	39.119,97	20.340,92	18.895,85	24.568,14	30.451,36	293.720,55
17	İlahiyat Fakültesi	23.192,28	22.502,28	21.466,59	15.670,59	14.581,77	9.523,38	9.491,98	10.739,16	9.020,54	13.364,44	20.549,41	24.295,69	194.388,01
5 YILLIK TOPLAM ORTALAMA		552.928,70	498.583,57	503.750,72	385.054,19	368.178,17	495.120,94	679.125,16	718.951,17	471.156,99	462.282,86	515.325,76	617.605,83	6.268.064,06

EK C.1: Pvsyst simülasyonuna ait proje özeti ve temel sistem parametreleri raporu



Proje: BAUN REKTORLUK CATI USTU PV-Final

Varyant: V1_418 PV panelli

PVsyst V8.1.4

VC0, Simülasyon tarihi:
28/07/26 20:00
V8.1.4 ile

Sevda Kartalci (Turkey)

Proje özeti

Coğrafi konum

BAUN Rektörlük Binası
Türkiye

Konum

Enlem 39.5412 °(K)
Boylam 28.0070 °(E)
Rakım 175 m
Saat dilimi UTC+3

Proje ayarları

Albedo 0.20

Hava durumu verileri

BAUN Rektörlük Binası
Meteonorm 9.0 dll, Sat=% 100 - Sentetik

Sistem özeti

Şebekeye bağlı sistem

Yönelim #1

Sabit düzlem

Eğim/Azım 10 / 53 °

Bina üzerinde dizi

Yakın gölgelemeler

Lineer gölgelemeler : Hızlı (tablo)

Kullanıcı ihtiyaçları

Sınırsız yükleme (şebeke)

Sistem bilgisi

PV alanı

Panel sayısı

418 adet

Toplam nom. güç

245 kWp

Invertör

Öge sayısı

2 adet

Toplam güç

200 kWac

Nom. güç oranı

1.22

Sonuçların özeti

Simülasyon adımı

Saatlik

Üretilen enerji

332673 kWh/yıl

Üretilbilir

1360 kWh/kWp/yıl

Perf. oranı PR

81.43 %

İçindekiler

Proje ve sonuçların özeti	2
Genel parametreler, Kolektör alanının özellikleri, Sistem kayıpları	3
Yakın gölgelemelerin tanımlanması - İzo gölgeleme diyagramı	4
Genel sonuçlar	5
Kayıplar diyagramı	6
Ön tanımlı grafikler	7
P50-P90 değerlendirilmesi	8
Tek hat şeması	9
Sistem maliyeti	10
Finansal analiz	11
CO ₂ emisyon bilançosu	14

EK C.2: PVsyst simülasyonunda oluşturulan fotovoltaik sisteme ait genel sistem özellikleri



Proje: BAUN REKTORLUK CATI USTU PV-Final

Varyant: V1_418 PV panelli

PVsyst V8.1.4

VC0, Simülasyon tarihi:
28/07/26 20:00
V8.1.4 ile

Sevda Kartalci (Turkey)

Genel parametreler

Şebekeye bağlı sistem

Simülasyon adımı
Saatlik

Yönelim #1

Sabit düzlem

Eğim/Azımut 10 / 53 °

Bina üzerinde dizi

Dizi ayarları

Dizi sayısı 16 birim

Farklı dizi. ort.

Gölgeleme açısı sınırı

Profil açısı sınırı °

Boyutlar

Dizi aralığı 4.49 m

Kolektör eni 3.58 m

Gölgeleme GCR 80.1 %

Etkisiz üst şerit 0.02 m

Etkisiz alt şerit 0.02 m

Kullanılan modeller

Transpozisyon Perez
Difüz Perez, Meteoronorm
Circumsolar ayrı

Ufuk

Ufuk tanımlanmadı

Yakın gölgelemeler

Lineer gölgelemeler : Hızlı (tablo)

Kullanıcı ihtiyaçları

Sınırsız yükleme (şebeke)

Kolektör alanının özellikleri

PV modül

Üretici Generic

Model JKM-585N-72HL4-V

(Orijinal PVsyst veritabanı)

Birim gücü 585 Wp

PV modül sayısı 418 adet

Nominal (STC) 245 kWp

Modül 22 adet x 19 Seri

İşletme şartlarında (50°C)

Pmpp 227 kWp

U mpp 766 V

I mpp 296 A

Total PV gücü

Nominal (STC) 245 kWp

Toplam 418 modül

Panel yüzeyi 1080 m²

Hücre yüzeyi 997 m²

Invertör

Üretici Generic

Model SUN2000-100KTL-M1-400Vac

(Orijinal PVsyst veritabanı)

Birim gücü 100 kWac

Invertör sayısı 2 adet

Toplam güç 200 kWac

Çalışma gerilimi 200-1000 V

Maks güç (=>33°C) 110 kWac

Nom. güç oranı (DC:AC) 1.22

Invertörde güç paylaşımı

Invertör toplam gücü

Toplam güç 200 kWac

Maks güç 220 kWac

Invertör sayısı 2 adet

Nom. güç oranı 1.22

Dizi kayıpları

Termal kayıp faktörü

Işınım göre modül sıcaklığı

Uc (sabit) 20.0 W/m²K

Uv (rüzgar) 0.0 W/m²K/m/s

DC kablolama kaybı

Global alan direnci 42 mΩ

Kayıp oranı 1.50 STC'de%

Modül kalite kaybı

Kayıp oranı -0.75 %

Modül uyumsuzluk kaybı

Kayıp oranı 2.00 MPP'de%

IAM kayıp faktörü

Yansımaya etkisi (IAM): Fresnel, yansımaya önleyici, n(cam)=1.526, n(AR)=1.290

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.963	0.892	0.814	0.679	0.438	0.000

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	
Lisans	Anadolu Üniversitesi/ İktisat	
Önlisans	Selçuk Üniversitesi Güneysınır MYO/ Bilgisayar Destekli Tasarım	