

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İSTANBUL İLİ GENELİNDE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE  
GÜNEŞ İŞİNİMİ TAHMİNİ VE BİNA ÖLÇEĞİNDE  
FOTOVOLTAİK SİSTEMİN VERİMLİLİK HESABI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf KEP

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2025  
İSTANBUL

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İSTANBUL İLİ GENELİNDE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE  
GÜNEŞ IŞINIMI TAHMİNİ VE BİNA ÖLÇEĞİNDE  
FOTOVOLTAİK SİSTEMİN VERİMLİLİK HESABI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf KEP  
(231280002)

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feriha Erfan KUYUMCU

İstanbul 2025



**T.C.**  
**İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü**

**Jüri Tez Onay Formu**

08.07.2025

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

Bu çalışma 08.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**TEZ JÜRİSİ**

**Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Fahriye ENDA**

**TOLON**

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu**

**TEKDEMİR**

Üye (İmza)

Bursa Teknik Üniversitesi

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “İstanbul İli Genelinde Yapay Sinir Ağları İle Güneş Işınımı Tahmini ve Bina Ölçeğinde Fotovoltaik Sistemin Verimlilik Hesabı” başlıklı tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadar geçen bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya“da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu onurumla beyan ederim. (08/07/2025)

Yusuf KEP

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında, kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, destek ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Feriha Erfan Kuyumcu'ya şükranlarımı sunarım.

Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal Atatürk ve silah arkadaşlarının bizlere miras bıraktığı bu güzel vatanda, özgürce bilimsel çalışma yapabilmenin kıymetini derinden hissediyor, minnet ve saygıyla anıyorum.

Bu süreçte manevi desteğini her daim yanımda hissettiğim biricik aileme, birlikte öğrenmenin heyecanını paylaştığım tüm öğrencilerime ve işbirlikçi yaklaşımlarıyla bana ilham veren çalışma arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Temmuz 2025

Yusuf KEP  
Elektrik/Elektronik Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti .....	2
2. İSTANBUL İLİ ÖRNEĞİNDE YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK FOTOVOLTAİK SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ VE ÇEVRESEL ETKENLER .....	7
2.1 Güneşlenme Süresi ve Işıma Şiddeti .....	9
2.2 Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Temel Yapısı .....	11
2.2.1 Fotovoltaik panellerin çalışma prensibi ve yapısı.....	13
2.2.1.1 Fotovoltaik hücre türleri ve modül yapısı .....	14
2.2.1.2 İnverter sistemleri (Güç dönüştürücüler) .....	16
2.2.1.3 Temel diğer bileşenler .....	17
2.3 Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Verimlilik Faktörleri.....	18
2.3.1 Verimliliği etkileyen ana faktörler .....	18
2.3.2 Verimlilik hesaplama yaklaşımı.....	22
2.4 Temel Denklemler ve Matematiksel Modellemeler .....	23
2.4.1 Genel verimlilik denklemi .....	23
2.4.2 Hücre sıcaklığı etkisiyle verimlilik düzeltmesi.....	24
2.4.3 İstanbul'un iklim verileri .....	24
2.4.4 Güneşlenme süresine göre günlük enerji üretimi.....	25
2.4.5 Yıllık enerji üretimi tahmini .....	26

2.4.6 Toplam sistem verimliliği (Bileşen bazlı yaklaşım) .....	27
2.5 İstanbul Örneğinde Somut Bir Değerlendirme .....	30
<b>3. YAPAY SINIR AĞLARI İLE FOTOVOLTAİK SİSTEM</b>	
<b>PERFORMANSININ TAHMİNİ .....</b>	<b>39</b>
3.1 Yapay Zekâ Uygulamaları ve Tahminleme Yöntemleri.....	39
3.2 Kullanılan Veri Seti ve Değişkenlerin Belirlenmesi.....	42
3.3 Yapay Sinir Ağı (YSA) Model Yapısı ve Parametre Ayarları .....	45
3.3.1 Katman yapısı ve nöron sayısı .....	45
3.3.2 Aktivasyon fonksiyonu .....	46
3.3.3 Eğitim algoritması .....	47
3.3.4 Doğrulama ve test süreci.....	49
<b>4. BULGULAR VE SONUÇLAR .....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>61</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>64</b>
Ek-1: Meteoroloji Genel Müdürlüğüne Yazdığım Dilekçe .....	64
Ek-2: İncelenen Mimari Yapının Kuvvetli Akım İç Tesisat Projesi .....	65
Ek-3: İncelenen Mimari Yapının Umumi İcmal Cetveli .....	68
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>69</b>

## KISALTMALAR

<b>A</b>	: Güneş Panel Alanı
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>B</b>	: Eğrilik Katsayısı
<b>CdTe</b>	: Kadmiyum Tellür
<b>CIGS</b>	: Bakır İndiyum Galyum Selenid
<b>CNN</b>	: Evrimsel Sinir Ağı
<b>ÇKYS</b>	: Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b>DM</b>	: Veri Madenciliği
<b>DMGM</b>	: Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü
<b>Ed</b>	: Üretilen Enerji Miktarı
<b>EKB</b>	: Enerji Kimlik Belgesi
<b>EVA</b>	: Etilen Vinil Asetat
<b>Ey</b>	: Yıllık Enerji Üretimi
<b>Gd</b>	: Gelen Işınım Yoğunluğu
<b>Gout</b>	: Çıkış Gücü
<b>GPT3</b>	: Üretken Ön Eğitilmiş Dönüştürücü 3
<b>HGT</b>	: Hava Giriş Sıcaklığı
<b>HJT</b>	: Birleşim Noktalı Teknoloji
<b>kWh</b>	: Kilovat Saat
<b>LM</b>	: Levenberg-Marquardt Algoritması
<b>MATLAB</b>	: Sayısal Hesaplama Yazılımı
<b>MLP</b>	: Çok Katmanlı Algılayıcı
<b>MSE</b>	: Ortalama Kare Hata
$n_{inverter}$	: İnverter Sayısı
$n_{kablo}$	: Kablo Sayısı
$n_{kir}$	: Kirlenme Katsayısı
$n_{modül}$	: Modül Sayısı

<b><math>\eta_{ref}</math></b>	: Referans Panel Sayısı
<b><math>\eta_{sıcaklık}</math></b>	: Sıcaklık Katsayısı
<b><math>\eta_{sistem}</math></b>	: Sistem Bileşen Sayısı
<b><math>\eta</math></b>	: İyileştirme Katsayısı
<b>PERC</b>	: Pasifleştirilmiş Verici ve Arka Hücre
<b>PR</b>	: Performans Oranı
<b><math>P_{rated}</math></b>	: Nominal Güç
<b>PV</b>	: Fotovoltaik
<b>PVGIS</b>	: Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi
<b>R</b>	: Korelasyon Katsayısı
<b>SGD</b>	: Rastgele Gradyan Azaltma
<b>Solargis</b>	: Güneş Enerjisi Bilgi Sistemi
<b>Tansig</b>	: Tan-sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu
<b><math>T_c</math></b>	: Hücre Sıcaklığı
<b>TOPcon</b>	: Tünel Oksit Pasifleştirilmiş Kontakt
<b><math>T_{ref}</math></b>	: Referans Sıcaklık
<b>UV</b>	: Ultraviyole Işınım
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağı
<b>YZ</b>	: Yapay Zekâ

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b>Sayfa No.</b>
Çizelge 2.1: Literatürde Yapay Sinir Ağları Üzerine Yer Alan Yayınlar ve Patentler	5
Çizelge 2.2: Literatürde Fotovoltaik (PV) Sistemler Üzerine Yer Alan Yayınlar ve Patentler.....	6
Çizelge 2.3: Fotovoltaik Hücre Tiplerinin Karşılaştırılması .....	16
Çizelge 2.4: Bileşen Temelli Fotovoltaik Sistem Verimliliği.....	29
Çizelge 2.5: Fotovoltaik Sistem Verimlilik Parametreleri ve Kayıp Faktörleri.....	31
Çizelge 2.6: İstanbul Örneğinde PV Sistem için Senaryo Bazlı Enerji Üretimi ve Verimlilik Analizi .....	35

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa No.</b>
Şekil 2.1: İstanbul İli Yıllık Ortalama Güneşlenme Süresi Ve Güneş Işınımı Dağılımı (Solargıs Verilerine Dayalı).....	8
Şekil 2.2: Güneş Panelinin İç Yapısı .....	12
Şekil 2.3: PV Sistemlerin Yapısı] .....	13
Şekil 2.4: 1994/1999/2007 (Coğrafi Bölgeye Bağlı Olarak) ile 2015 Yılları Arasındaki Dönemi Kapsayan 1 kW-Pik Şebeke Bağlantılı Güneş PV Santralinden Güç Potansiyeli Haritası .....	15
Şekil 2.5: Temel Bir PV Sistemin Elektriksel Bağlantıları.....	17
Şekil 2.6: Fotovoltaik(PV) Panel Performans Degredasyonu.....	22
Şekil 2.7: Fotovoltaik(PV) Sistem Bileşen Bazlı Panel Verimliliği. ....	28
Şekil 2.8: İstanbul İli için Aylık Fotovoltaik(PV) Enerji Üretimi Tahmini.....	32
Şekil 2.9: İncelenen Mimari Yapı için Enerji Kimlik Belgesi Ön Hesap Sonuç Raporu .....	34
Şekil 2.10: İstanbul İli Örneğinde Fotovoltaik (PV) Sistem Senaryo Bazlı Yıllık Enerji Üretimi .....	37
Şekil 3.1: Levenberg-Marquardt Algoritması ile Bir Sinir Ağının Eğitim Süreci İçin Bir Durum Diyagramı .....	48
Şekil 3.2: YSA Eğitim Model Performansı .....	50
Şekil 3.3: Güneş Işınım Şiddeti: Gerçek ve Tahmini Değer Çizgi Grafiği.....	51
Şekil 3.4: Regresyon Setleri.....	53
Şekil 3.5: YSA Öğretim Algoritmalarının Karşılaştırılması.....	53

# İSTANBUL İLİ GENELİNDE YAPAY SINIR AĞLARI İLE GÜNEŞ IŞINIMI TAHMİNİ VE BİNA ÖLÇEĞİNDE FOTOVOLTAİK SİSTEMİN VERİMLİLİK HESABI

## ÖZET

Son on yılda, teknoloji alanında dünyada yaşanan çarpıcı değişimler ile birlikte artan enerji talebi ve küresel ısınmanın olumsuz etkileri de hızla artmaktadır. Bunun yanı sıra bu yaşanan hızlı değişim ve dönüşümle birlikte yenilenebilir enerjiye olan bağlılık her geçen gün daha da arttığı gözlenmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programına göre 'fosil yakıt üretiminin gidişatının güvenli bir iklim geleceğiyle bağdaşmadığı vurgulanmakta ve fosil yakıt çıkarmaya devam etmekten uzaklaşma çağrısında bulunmaktadır'[44]. Bahsedilen bu kaynaklar arasında ise fotovoltaik (PV) sistemler şehir ölçeğinde uygulanabilirliği ile dikkat çekmektedir. Ancak PV sistemlerinin verimliliği; güneş ışınımı, sıcaklık, gölgeleme, meteorolojik veriler ve şehir içi kirlilik gibi çok sayıda değişkene bağlı olarak dalgalanma göstermektedir. Büyük şehirlerde hızla artan nüfus ve enerji tüketimi, sürdürülebilir enerji üretimi arayışlarını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda temel araştırma sorusu olarak şu sorudan yola çıkılmıştır: "İstanbul ili genelinde fotovoltaik sistemlerin verimliliği yapay sinir ağları kullanılarak nasıl optimize edilebilir ve bu optimizasyon sürdürülebilirlik hedeflerine nasıl katkı sağlar?"

Çalışmanın ana hedefi, kentsel alanlarda fotovoltaik sistemlerin performansını iyileştirmek ve enerji üretim süreçlerinin etkinliğini artırmak üzere yapay sinir ağlarının optimizasyon potansiyelini ortaya koymaktır. Bu sayede, büyük şehirlerin sürdürülebilirlik stratejilerine somut ve yenilikçi bir katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, seçilen İstanbul ili ölçeğinde fotovoltaik (PV) sistemlerinin verimliliği üzerinde belirleyici etkisi bulunan güneşlenme süresi, atmosferik kirlenmeler, termal değişkenlikler ve kentleşme yoğunluğu gibi temel çevresel ve iklimsel parametreler kapsamlı bir şekilde toplanmıştır. Bu verilere Meteoroloji Genel Müdürlüğünden elde edilen açık gün sayısı, ortalama nispi nem, ortalama hava basıncı, ortalama sıcaklık, toplam güneşlenme süresi, ortalama rüzgâr hızı ve toplam güneş ışınım şiddeti değerleri eklenmiştir[Ek-1]. Bundan sonra, elde edilen veriler, gelişmiş yapay sinir ağı algoritmalarıyla, uygun yöntem ile işlenmiş ve fotovoltaik sistemlerin (PV) farklı senaryolarda nasıl davranacağı modellenmiştir.

Modelin eğitilmesi sırasında geçmiş yıllara ait gerçek üretim verileri de kullanılarak tahmin doğruluğu artırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağlarının karmaşık değişkenler arasındaki ilişkileri başarılı bir şekilde öğrenebildiğini ve fotovoltaik (PV) sistemlerinin optimum çalışma koşullarını tespit etmek konusunda etkili olduğu öngörülmüştür. Özellikle gölgeleme etkisi, sıcaklık dalgalanmaları ve kirlenme gibi faktörlerin enerji verimliliğine olan etkileri daha hassas bir şekilde analiz edilmiş ve enerji üretiminde %15'e varan artış potansiyeli ortaya konulmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, büyük şehirlerde sürdürülebilir enerji yönetimi için yapay zeka tabanlı bir yol haritası sunmakta ve kent ölçeğinde fotovoltaik uygulamaların optimizasyonu konusunda yenilikçi bir yaklaşım önermektedir. Bu yaklaşım, çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda şehirlerin enerji bağımsızlığını güçlendirecek bir model olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, yapılan bu çalışma, şehirlerin elektrik altyapılarında ekonomik kazanç, zamandan tasarruf ve karbon ayak izinin azaltılması ile İstanbul ili geneli verimlilik hesabı açısından iyi bir uygulama olması öngörülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** *Sürdürülebilirlik, Büyük Şehirler, Fotovoltaik Sistem, Yapay Sinir Ağları, Enerji Optimizasyonu, Yenilenebilir Enerji*



# **SOLAR RADIATION PREDICTION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS ACROSS ISTANBUL PROVINCE AND EFFICIENCY CALCULATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AT BUILDING SCALE**

## **ABSTRACT**

Over the past decade, significant technological advancements have occurred alongside an increasing demand for energy, which, combined with the accelerating adverse effects of global warming, has become increasingly evident. Furthermore, this rapid transformation has led to a steady increase in reliance on renewable energy sources. The United Nations Environment Programme emphasizes that "the trajectory of fossil fuel production is incompatible with a secure climate future, and there is a call to shift away from continued fossil fuel extraction." [44]. Within these energy sources, photovoltaic (PV) systems have garnered significant attention due to their feasibility at the urban scale. Nonetheless, the efficiency of PV systems is influenced by a diverse range of factors, including solar radiation, temperature, shading, meteorological data, and urban pollution.

The rapid growth of population and energy consumption in large cities necessitates the search for sustainable energy production solutions. In this context, the central research question is framed as follows: "How can the efficiency of photovoltaic systems in large cities be optimized using artificial neural networks, and what contribution does this optimization make to sustainability objectives?"

The principal objective of this study is to investigate the potential of artificial neural networks in optimizing the performance of photovoltaic systems within urban environments and enhancing the efficiency of energy production processes. Through this inquiry, the study seeks to make an innovative and substantive contribution to the sustainability strategies of prominent stakeholders in urban settings.

During the initial phase of the study, crucial environmental and climatic parameters that significantly affect the efficiency of photovoltaic (PV) systems- such as the duration of sunlight, atmospheric pollutants, thermal variability, and urban density- were meticulously collected. Meteorological data sourced from the General Directorate of Meteorology, including the number of clear days, average relative humidity, average atmospheric pressure, average temperature, total sunlight duration, average wind speed, and overall solar radiation intensity, were integrated into the dataset [Annex-1]. Following this, the data underwent processing using advanced artificial neural network algorithms, enabling the modeling of photovoltaic system performance across various scenarios. To enhance the accuracy of predictions, authentic production data derived from previous years were incorporated during the model training process.

The results indicate that artificial neural networks are highly effective at identifying the complex interrelations between various variables and optimizing the operational conditions of PV systems. Specifically, the impacts of shading, temperature fluctuations, and pollution on energy efficiency were analyzed with

greater precision, revealing the potential for up to a 15% increase in energy production.

In conclusion, this thesis presents a comprehensive roadmap centered on artificial intelligence for sustainable energy management in large urban areas and proposes an innovative methodology aimed at optimizing urban-scale photovoltaic systems. This methodology not only alleviates environmental impacts but also enhances the energy independence of cities, thereby providing a resilient model for future development. Within this framework, the study is anticipated to contribute significantly to advancements in energy infrastructure by generating economic benefits, conserving time and minimizing carbon footprints, thereby establishing it as one of the exemplary contributions of the 21st century.

**Keywords:** *Sustainability, Urban Areas, Photovoltaic Systems, Artificial Neural Networks, Energy Optimization, Renewable Energy*



## 1. GİRİŞ

Kentsel alanlar, ekosistem içerisindeki karmaşık dinamiklerin merkezinde yer almakta olup, yoğun nüfus ve sanayileşme baskısıyla habitat tahribatına yol açmaktadır. Bahsedilen çevrelerin korunmaması ekolojik saf dengeyi zorlayan bir yenilenme döngüsüne girmiştir. Rejeneratif olmayan enerji kullanımı ve çevresel tahribat, kentsel yaşam alanlarında sürdürülebilirliği tehdit eden başlıca unsurlar olarak ön plana çıkmaktadır. Mega şehirlerin yüksek enerji yoğunluğu ve dinamik tüketim profilleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve akıllı enerji yönetimi teknolojilerinin, özellikle de fotovoltaik sistemlerin yapay sinir ağları ile verimlilik artırımı önem kazanmaktadır. Çevreci ve sürdürülebilir enerji kaynağı olan fotovoltaik sistemlerin performansı, çevresel faktörlere büyük ölçüde bağlı olduğundan, bu sistemlerin verimliliğini artırmak için yenilikçi çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, veri madenciliğinin bir alt dalı olan yapay sinir ağları (YSA) gibi yapay zekâ tabanlı yöntemler, karmaşık veri analizleri ve doğru tahminler yapabilme kapasitesi sayesinde verimlilik öngörülebilirliğinin artırımında önemli bir potansiyele sahiptir.

Gelişmekte ve gelişmiş olan illerde, artan enerji talebi ve iklim değişikliğinin yol açtığı çevresel tehditler, sürdürülebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte, fotovoltaik (PV) sistemlerin performansı, çevresel parametreler olan sıcaklık, güneş ışınımı (insolasyon), fotovoltaik panel'in bulunduğu yerdeki eğimi, hava kirliliği, nem oranı ve atmosferik koşullar gibi meteorolojik verilerle bir dizi faktöre bağlı olarak dalgalanma göstermektedir. Bu doğrultuda, PV sistemlerin enerji üretim verimliliğini artırmak ve performansını en iyi hale getirmek amacıyla, bu çevresel değişkenlere duyarlı, etkili ve yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, İstanbul il sınırlarında bulunan bir mimari konut yapısında yer alacak fotovoltaik (PV) sistemin performansı, yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir model aracılığıyla analiz edilmektedir. Çevresel parametreler dikkate alınarak, çok katmanlı yapay sinir ağı (ÇKYSA) kullanılarak optimum çalışma koşulları

belirlenmekte ve simülasyonlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, sistem verimliliğinin öngörülebilirliğinin artırılması ve performansın çevresel değişkenlere duyarlı şekilde iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik olarak 3 farklı indikatörü bulunan sürdürülebilirlik kavramı, yoğun yapılaşmış bölgelerde var olan kaynakların verimli kullanılarak bir sonraki nesillere risk almadan aktarılması olarak ifade edilmektedir. Bu bağlamda sürdürülebilir enerji sistemlerinin oluşturulması, fosil yakıt tüketimini azaltarak, atmosferde bulunan doğal ve antropojenik gaz emisyonunu azaltır. Böylece, enerji güvenliğinin sürdürülebilir olması ve sistemsel, bütünsel korunması hedeflenmektedir.

Veri tabanlarında bilgi keşfi, mühendislik hesaplamalarında zamandan tasarruf sağlayarak, bilgi kümeleri arasından anlamlı bilgiler çıkartabilir. Bu bilgiler arasında tahminlendirme, gruplandırma, sınıflandırma, modelleme gibi teknikler birçok alanda etkili ve kritik bir rol oynamaktadır. İşlevselliğini, insan beyninin çalışma sisteminden alan yapay sinir ağı, değişkenli ve lineer olmayan yapıların, yüksek doğruluk ve az tekrarla analiz ve öngörü imkânı sunarak etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Güncel bilimsel çalışmalar, yapay sinir ağlarının (YSA) fotovoltaik sistemlerde anlık üretim tahmininden uzun vadeli performans test ortamlarına kadar uygulama spektrumu yüksek doğruluk seviyesinde sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada YSA tabanlı modelleme yaklaşımı benimsenerek, yerel ölçekte enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel katkı sunulması ve sürdürülebilir enerji üretimine yönelik yenilikçi çözümler geliştirilmesi hedeflenmektedir.

## **1.1 Literatür Özeti**

Son yıllarda, fotovoltaik (PV) sistemlerin sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir araç haline gelmesiyle birlikte, büyük şehirlerde bu sistemlerin verimliliği ve optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar artış göstermiştir. Bu alandaki araştırmalar, fotovoltaik enerji üretiminin verimliliğinin öngörülebilirliğini artırmak amacıyla yapay sinir ağları (YSA) ve diğer veri madenciliği (DM) tekniklerinin entegrasyonuna yoğunlaşmaktadır.

21. yüz yılın ikinci yarısına gelindiğinde teknolojideki gelişmeler çarpıcıydı. Fotovoltaik (PV) güç sistemleri, ilk yarısında üretilen güneş pil tasarımlarından esinlenilerek ikinci yarısının başlarında laboratuvar koşullarında ticari amaçla üretilmeye başlandı. Üniversitelerin öncülüğünde yapılan bu yenilikler, konvansiyonel enerji üretiminin çevreye verdiği zararların büyüklüğünü ön plana çıkardı.

1970'lere gelindiğinde Avrupa'da, Amerika'da ve Japonya coğrafyasında yaşanan petrol krizi sonucunda, enerjiye duyulan ihtiyaç doğrultusunda araştırma ve geliştirme faaliyetleriyle güneş enerjisinin potansiyel ve sürdürülebilir bir kaynak olması çalışmaları hızlandırmıştır.

1970'ler, yapay sinir ağları araştırmalarında önemli bir dönüm noktası olmuştur. 1969 yılında Marvin Minsky ve Seymour Papert tarafından yayımlanan *Perceptrons* adlı eser, tek katmanlı ve ileri beslemeli yapay sinir ağlarının her tür problemi çözme kapasitesine sahip olmadığı görüşünü ortaya koymuş, özellikle XOR problemi üzerinden, bu ağların bazı mantıksal problemleri çözmede yetersiz olduğunu ileri sürmüştür[27]. Bu durum, yapay sinir ağları üzerine yapılan araştırmaların büyük ölçüde duraklamasına yol açmış ve yıllarca bu teknoloji üzerinde çalışmalar sınırlı kalmıştır. Ancak 1970'lerin sonlarına doğru, çok katmanlı yapay sinir ağlarının geliştirilmesi ve hem ileri hem de geri besleme özelliklerine sahip ağlar sayesinde, XOR gibi problemlere çözüm bulunabilmiştir.

Bu dönemde yapılan yenilikler, derin öğrenme ve çok katmanlı ağların potansiyelini açığa çıkarmış ve yapay sinir ağları çalışmalarının yeniden ivme kazanmasına olanak sağlamaktadır.

1980'ler, fotovoltaik güç sistemlerinin ticari olarak kullanılmaya başlandığı ve enerji üretim potansiyelinin daha fazla ilgi çektiği bir dönemdir. Yapay sinir ağlarının erken dönem kullanımı, verimlilik analizlerinde sınırlı bir yer bulmuş olsa da, sistemlerin optimizasyonu ve iyileştirilmesi için potansiyel bir araç olarak görülmeye başlanmıştır. İlk yapay sinir ağı uygulamaları, güneş ışınımı ve çevresel faktörlerin PV sistemleri üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır [29].

Her geçen yıl artan gelişmeler 1990'larda PV sistemleri ile veri madenciliği uygulamalarını bir tümleşik sistem dâhilinde analiz edilmesini sağlamıştır. PV güç sistemlerinin üretiminin dünya genelinde yaygınlaşmasıyla, yapay sinir ağlarının PV

sistemler üzerinde performans artırıcı etkilerini göstermiştir. Yapay sinir ağlarının, fotovoltaik sistemlerin enerji verimliliği, üretim tahminleri ve çevresel etki analizleri gibi kritik alanlarda nasıl faydalı olabileceğine dair ilk ciddi araştırmalar bu dönemde gerçekleştirilmiştir. Bu gelişmeler, günümüzde büyük şehirlerde sürdürülebilirlik adına fotovoltaik sistemlerin optimizasyonu ve analizi konusunda yapay sinir ağlarının potansiyelinin anlaşılmasına zemin hazırlamıştır. Bu bağlamda, yapay sinir ağları teknolojisinin kullanımı, büyük şehirlerde enerji verimliliği sağlamak ve sürdürülebilirliği artırmak için kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır.

2000'li yıllarda, artan hesaplama gücü ve veri erişilebilirliği ile birlikte, çok katmanlı yapay sinir ağları (YSA) ve gelişmiş geri yayılım algoritmaları PV sistemlerinin performans modellemesi ve üretim tahminlerinde etkin şekilde kullanılmaya başlanmıştır. YSA tabanlı modeller, radyasyon, sıcaklık ve çevresel parametreleri entegre ederek sistem verimliliğini artırmış, üretim tahminlerinde doğruluk payını yükseltmiştir. Bu ilerlemeler, büyük şehirlerde sürdürülebilir enerji yönetimi kapsamında PV sistemlerinin optimizasyonu ve çevresel etki analizlerinde karar destek aracı olarak YSA kullanımını pekiştirmiştir [26].

2010'lar büyük veri ve derin öğrenmenin fotovoltaik sistemlerin en uygun değerinde çalışmasının sağlanması için önemli olmuştur. Mühendislik hesaplamalarıyla elde edilen veri kaynağının ve uygulamalarının ekonomik kayıp, fazla vakit harcanması, iş yükü gibi olumsuz etkileri, gelişmiş yapay zekâ uygulamalarının ve tekniklerinin uygulanması ile elde edilen bulguların, hızlı, pratik ve kısa sürede hesaplanmasını sağlamıştır. Son yıllarda, teknolojinin gelişmesiyle doğru orantılı bir şekilde yapay sinir ağlarının (YSA) fotovoltaik (PV) sistem verimliliği üzerine etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, özellikle yoğun nüfuslu kentlerdeki küçük ölçekli PV sistem verimliliğine etki eden dinamiklerinin YSA tabanlı modeller üzerindeki etkisini sistematik olarak analiz eden kapsamlı bir araştırma bulunmamaktadır.

Son yıllarda, yapay zekânın (YZ) toplumların hayatına hızla girmesi, birey ile bilgisayar arasındaki etkileşimin interaktifleşmesi, enerjinin yenilenebilir kaynaklar ile sürdürülebilir olduğunun evrimleşmesi etkinleşmiştir. Büyük şehirlere entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının şehrin bulunduğu coğrafi konumun, meteorolojik verilerinin performans analizi önemsenmiş olup akıllı şehir kavramı ile PV sistem entegrasyonunu hızlandığı gözlemlenmektedir. YSA tarafında uygulanan

aktivasyon fonksiyonlarının çok değişkenli analizleri ile sistem verimliliği artırıldı. Sistem verimliliğinin gelişmesinde teknolojik reformların etkisi ve küreselleşmenin pozitif etkileri yer almaktadır. Kullanılan ve geliştirilmiş algoritmalar sayesinde tahmin değerler ile gerçek değerler birebir aynı olmamak şartıyla yakınlaştığı anlaşılmaktadır.

**Çizelge 2.1: Literatürde Yapay Sinir Ağları Üzerine Yer Alan Yayınlar ve Patentler**

YIL	YAZAR(LAR)	ÇALIŞMA BAŞLIĞI	ÖZET
1969	Minsky & Papert	Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry	Yapay sinir ağlarının sınırlamaları ve potansiyelleri üzerine temel bir çalışma.[27]
1974	Paul Werbos	Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences	Geriye yayılım algoritmasını tanıtan doktora tezi. [39]
1986	Rumelhart, Hinton & Williams	Learning representations by back-propagating errors	Geri yayılım algoritması ile çok katmanlı ağların eğitimi sağlanmıştır. [29]
1998	LeCun et al.	Gradient-based learning applied to document recognition	CNN mimarisi geliştirilerek görüntü tanıma problemlerinde başarı sağlanmıştır. [25]
2006	Hinton et al.	Reducing the dimensionality of data with neural networks	Derin öğrenmenin önünü açan çalışma, veriden anlamlı özelliklerin öğrenilmesi sağlanmıştır. [29]
2012	Krizhevsky, Sutskever & Hinton	ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks	Derin öğrenmenin büyük veri kümelerinde yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir. [24]
2020	Brown et al.	Language Models are Few-Shot Learners	GPT-3 modeli ile yapay sinir ağlarının çok geniş ölçekli dil modellemesinde başarısı kanıtlanmıştır. [4]
2023	He et al.	Sparse Mixture of Experts Models	Enerji verimliliği için yapay sinir ağlarında uzmanlardan oluşan karışık modeller geliştirilmiştir. [13]

**Çizelge 2.2: Literatürde Fotovoltaik (PV) Sistemler Üzerine Yer Alan Yayınlar ve Patentler**

YIL	YAZAR(LAR)	ÇALIŞMA BAŞLIĞI	ÖZET
1961	Shockley & Queisser	Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells	PV hücrelerinin teorik verimlilik sınırı ortaya konmuştur. [35]
1974	Chapin, Fuller & Pearson	A New Silicon p-n Junction Photovoltaic Cell for Converting Solar Radiation into Electrical Power	İlk etkili silikon bazlı PV hücresi tanıtılmıştır. [5]
1980	Green et al.	Solar Cell Efficiency Tables	PV hücrelerinin performans verileri Sistematik olarak sunulmuştur. [10]
1995	Honsberg & Bowden	Photovoltaics: Devices, Systems and Applications	PV teknolojilerinin sistematik analizi yapılmıştır. [16]
2005	Green et al.	Solar Cell Efficiency Tables (Version 25)	Yeni nesil PV hücrelerin verimlilikleri derlenmiştir. [11]
2010	Fraunhofer ISE	Photovoltaics Report	PV sektörünün küresel durumu ve verimlilik trendleri sunulmuştur. [9]
2020	IEA	Trends in Photovoltaic Applications	Küresel PV uygulamaları ve Pazar analizi sunulmuştur.[17],[18],[19]
2023	Zhao et al.	Recent progress in perovskite solar cells	Perovskite PV hücrelerinde son gelişmeler özetlenmiştir. [40]

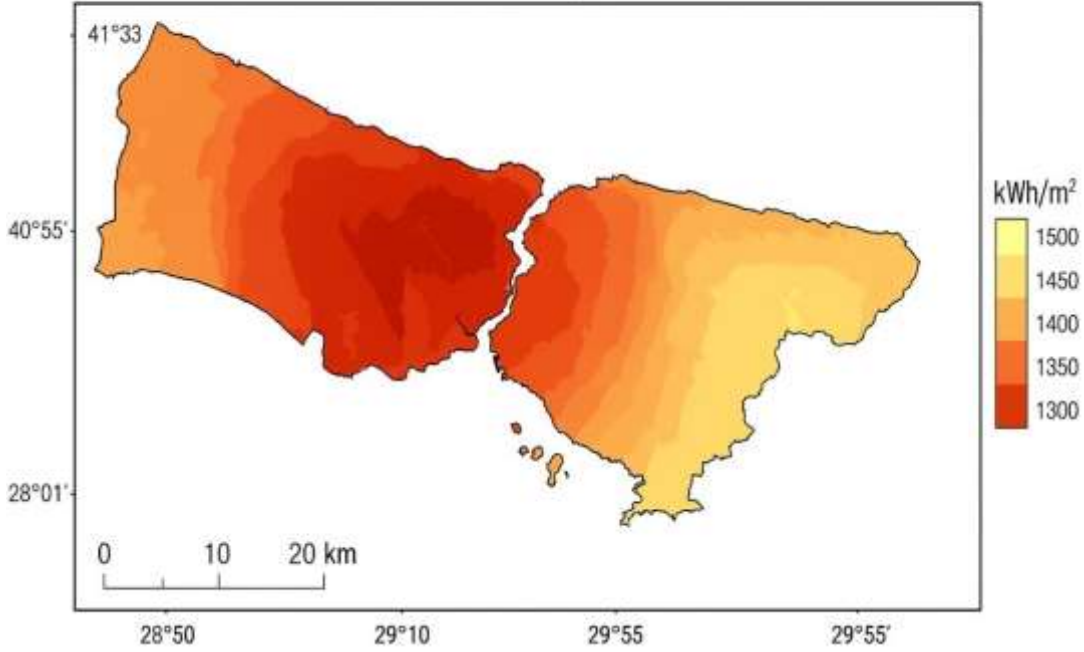
## 2. İSTANBUL İLİ ÖRNEĞİNDE YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK FOTOVOLTAİK SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ VE ÇEVRESEL ETKENLER

Karadeniz'e kuzeyden, Marmara Denizi'ne güneyden, Asya kıtasına doğudan ve Avrupa kıtasına batıdan sınırlarıyla çevrilmiş, geniş coğrafi alanı ve stratejik konumu ile hem doğal hem de ekonomik açıdan önemli ve yaklaşık sayısal veriyle 17 milyon bireyin yaşadığı kültürel, jeopolitik, tarihi ve kültür çeşitliliği ile en popüler şehirlerden olan İstanbul bir metropoldür. İstanbul, Türkiye sınırlarındaki en büyük ve en yoğun nüfusa sahip şehir olarak, güneş enerjisi potansiyeli açısından stratejik bir öneme sahiptir. Türkiye Cumhuriyeti yıllık ortalama yaklaşık 2.600–2.800 saat güneşlenme süresine sahip bir ülke olarak güneş enerji potansiyeli dikkate değer ülkelerden birisidir. Bu eşsiz güneş enerjisi kapasitesi ise büyük şehrin güneş kuşağı içerisinde yer almasıyla yenilenebilir enerji ihtiyacının karşılanması, karbon nötr hedefleri doğrultusunda dünyada yaşanan sıcaklık artışını sınırlamakta olup, küresel ısınmanın olumsuz etkilerini yavaşlatmaktadır. İstanbul ilinde iklim dostu, emisyonuz enerji üretimi seçenekleri, kentsel sürdürülebilirlik için stratejik bir avantaj sunmaktadır. Fotovoltaik sistem (PV) birçok bileşeniyle beraber, güneş fotonlarının yarı iletken malzemeler aracılığıyla elektriksel enerjiye dönüştürülmesini sağlayan, konvansiyonel enerji tüketimlerine alternatif, düşük karbon emisyonlu, çevreci, temiz bir enerji üretim yöntemidir. Güneş enerji sistemlerin modüler yapıları sayesinde, farklı kurulum ölçeklerine olanak sağlayarak, yüksek nüfus yoğunluklu kentleşme bölgelerinde bile çatı üstü yerleştirme veya güneş enerjisi entegrasyonu ile etkin enerji üretimini sağlamaktadır. Tükenmez bir kaynak olan Güneş enerjisi, çevreci ve sürdürülebilir bir kaynaktır. Uzun ömürlü, bakım masraflarının ekonomik olması, dışa bağımlılığın azaltılması, enerji özerkliğinin sağlanması güneş panellerinin büyük şehirlerdeki entegrasyonundaki mutlak pozitif gelişmelerdir. Bu bölümde, İstanbul'un özgün iklimsel koşulları ve kentsel morfolojisinin, İstanbul ilindeki güneş paneli sistemlerin performans karakteristikleri ile çevresel stres faktörleri (meteorolojik veriler ve çevresel değişkenler) arasındaki ilişki, literatürdeki ampirik çalışmalar ve analitik incelemeler üzerinden kapsamlı bir değerlendirmeye tabi

tutulmaktadır. Güneş enerji sistemlerinin performans metrikleri meteorolojik ve kentsel yapılaşma karakteristiklerinin etkisiyle önemli ölçüde dalgalanma göstermektedir. Bu parametreler arasında, İstanbul'da şehir ölçeğinde aylık olarak saptanan açık gün sayısı, ortalama nispi nem, ortalama hava basıncı, ortalama sıcaklık, toplam güneşlenme süresi, ortalama rüzgâr hızı ve toplam güneş ışınım şiddeti gibi değişkenler başat etken olarak baskısını göstermektedir.

İstanbul ili, coğrafi konumu itibarıyla güneş enerjisinden yararlanmak için önemli avantajlara sahiptir. Orta dilim meridyenlerinin ekvatora olan görece yakınlığı ve tarih boyunca birçok uygarlığa ev sahipliği yapmış olması, kenti güneş kuşağı içerisinde stratejik bir konuma yerleştirmektedir.

İstanbul İli Yıllık Ortalama Güneşlenme Süresi ve Güneş Işınımı Dağılımı (SolarGIS verilerine dayalı)



**Şekil 2.1: İstanbul İli Yıllık Ortalama Güneşlenme Süresi Ve Güneş Işınımı Dağılımı (Solargis Verilerine Dayalı) [37], [38]**

Yapılan araştırmalar, İstanbul'un 28°01' ve 29°55' doğu boylamları ile 41°33' ve 40°28' kuzey enlemleri arasında yer aldığını ortaya koymakta, bu durum bölgenin güneşlenme potansiyelini desteklemektedir. SolarGIS verilerine göre, İstanbul'da yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2.738 saattir ve bu da fotovoltaik sistemler için yüksek bir enerji üretim potansiyeline işaret etmektedir. Şekil 2.1'de fotovoltaik (PV) enerji üretimi ve benzer türevde çalışmalar çerçevesinde Dünya genelinde doğru veri aktaran bir bilgi sistemi üzerinden güneş ışınım dağılımını

göstermektedir. Coğrafi konumunun sağladığı avantajlar, karmaşık jeomorfolojik yapısı, zengin kültürel dokusu ve köklü tarihi ile dikkat çeken İstanbul, yoğun kentleşme ve artan enerji talebi bağlamında sürdürülebilir enerji teknolojilerine yönelme zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, artan enerji talebi, geleneksel ve tükenbilir enerji kaynaklarıyla karşılanmakta ve bu da yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji çözümleri içerisinde öne çıkan güneş enerjisinin kullanımı kaçınılmaz bir gereklilik halini almaktadır.

Bu doğrultuda, İstanbul'daki fotovoltaik sistem performansının artırılması için çevresel faktörlerin analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapay sinir ağları (YSA) gibi ileri seviye yapay zekâ tabanlı yöntemler, çevresel değişkenliklerin ve sistem performans parametrelerinin modellenmesinde etkili çözümler sunarak, yerel koşullara özgü optimizasyon stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. İstanbul örneği üzerinden gerçekleştirilecek analizler, yalnızca bölgesel enerji dönüşümüne katkı sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda kentsel alanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonuna yönelik karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine de zemin hazırlayacaktır.

## **2.1 Güneşlenme Süresi ve Işıma Şiddeti**

Fotovoltaik (PV) sistemlerin verimli bir şekilde tasarlanması ve işletilmesi sürecinde, güneşlenme süresi ve ışıma şiddeti temel belirleyici parametrelerdir. Güneşlenme süresi, belirli bir bölgede güneşin ufku üzerinde kaldığı ve dolayısıyla PV panellerinin doğrudan güneş ışığı alabildiği toplam zaman dilimini ifade eder. Bu süre, fotovoltaik sistemlerin enerji üretim kapasitesi üzerinde doğrusal olmayan ancak etkisi yüksek olan bir faktördür. Güneşlenme süresi ne kadar uzun olursa, fotovoltaik (PV) panellerinin aktif çalışma süresi de o kadar artar ve bu durum yıllık toplam enerji üretim çıktısını doğrudan artırır[7]. Öte yandan, ışıma şiddeti ise birim alan başına düşen güneş enerjisi miktarını ( $W/m^2$ ) ifade etmekte olup, fotovoltaik (PV) hücrelerin enerji dönüşüm verimliliği üzerinde kritik rol oynar. Bu parametreler, yerel meteorolojik koşullardan etkilenmekte; atmosferik bulutluluk, toz, hava kirliliği ve nem gibi değişkenler ışıma şiddetini azaltarak güneş paneli (PV) üretimini sınırlandırabilmektedir.

İstanbul vilayeti sınırlarında değerlendirildiğinde, şehrin coğrafi konumu ve iklimsel özellikleri güneş paneli (PV) sistemler açısından makul düzeyde bir

potansiyel sunmaktadır. SolarGIS (2024) bilgi sistemi üzerinden erişilen verilere göre, 12 aylık toplam küresel yatay ışımaya değeri yaklaşık 1.700 kWh/m<sup>2</sup> düzeyindedir [37]. Bu veriler, bu tür şehirlerde enerji talebinin sürekli ve yüksek olması nedeniyle, yerel güneşlenme süresi ve ışımaya şiddeti verileri doğrultusunda yapılacak detaylı potansiyel analizleri, yatırımcıların maliyet etkinliklerini maksimize etmelerine, amortisman sürelerini kısaltmalarına ve sistem verimliliğini artırmalarına olanak tanır.[19] Ayrıca, milli kaynaklardan enerji üretiminin artırılması; iletim kayıplarının azaltılması, karbon salınımının düşürülmesi ve sürdürülebilir şehircilik hedeflerinin desteklenmesi açısından da elzem bir rol oynamaktadır. Güneşlenme süresi genellikle meteoroloji istasyonlarında yer alan heliograf cihazları ile ölçülmekte; aynı zamanda günümüz koşullarında uydu görüntüleri ve yapay zekâ tabanlı modellemeler yardımıyla da yüksek doğrulukla tahmin edilmektedir. Işıma şiddeti ise, genellikle piranometre gibi hassas ölçüm cihazlarıyla anlık olarak kaydedilir ve günümüzde fotovoltaik sistemlerin üretim simülasyonlarında ana girdi parametresi olarak kullanılmaktadır [22]. PV sistemlerde yüksek verimlilik sağlanabilmesi için güneş panellerinin yerleştirilmesi, bulunduğu eğimin ayarlanması gereklidir. Panel eğim açısının ve yöneliminin, ortak olarak kullanılmayan ışımaya verileri doğrultusunda optimize edilmesi gerekmektedir. İstanbul ili için optimum eğim açısı yaklaşık olarak 30-35 derece olup, panellerin güney yönüne bakacak şekilde yerleştirilmesi maksimum enerji hasadı için önerilmektedir [8]. Ayrıca, güneş takip sistemlerinin kullanılması ile birlikte sabit sistemlere kıyasla yıllık enerji üretiminde %20'ye varan artışlar sağlanabilmektedir [19]. Bu tür sistemler, özellikle değişken hava koşulları ve çevresel stres indikatörlerine bağlı optimum düzeyde verimlilik sağlar.

Bilim insanları ve uzmanlar, güneşlenme süresi ve ışımaya şiddeti analizlerini güneş paneli (PV) sistemlerin tasarımı, üretim tahminleri ve şebeke entegrasyonu süreçlerinde sıfır hata prensibiyle çalışmaktadırlar. Ayrıca, Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi gelişmiş makine öğrenimi algoritmaları yardımıyla bu iki parametreyi benzetim programlarında çalıştırmak, iklim değişikliğine bağlı belirsizlikleri azaltmak ve üretim öngörülerinin doğruluğunu artırmak açısından bilimsel çalışmalarda kullanılmaktadır. İstanbul örneğinde gerçekleştirilecek olan bu tür modellemeler, bölgesel enerji planlamasına ve sürdürülebilir şehircilik vizyonuna katkı sağlayarak, kent ölçeğinde yenilenebilir enerji kullanımını teşvik

etmektedir. Böylelikle, fotovoltaik (PV) sistemlerin performansı maksimize edilerek hem çevresel etkiler azaltılmakta hem de enerji güvenliği ve korunumunu stratejik açıdan desteklemektedir.

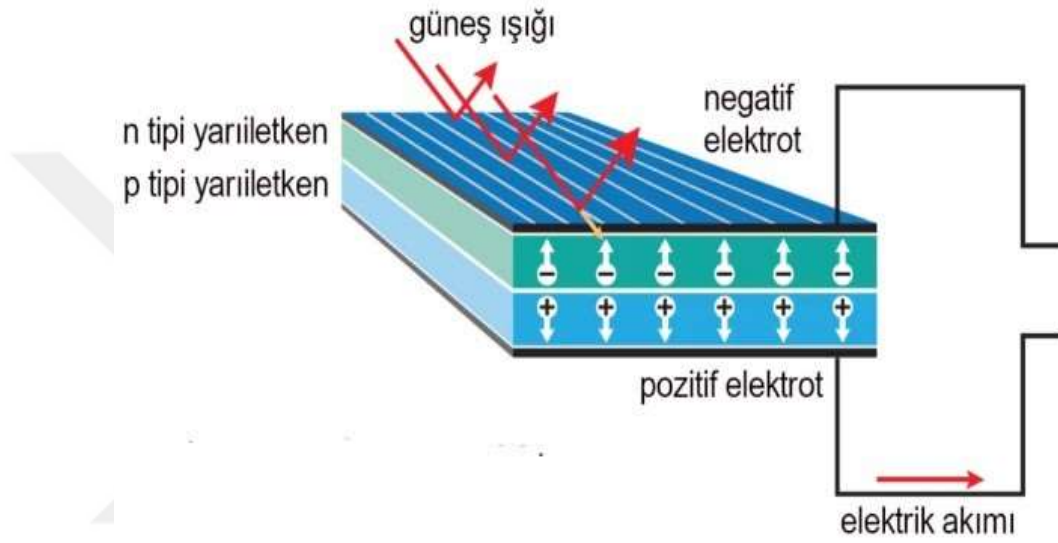
İstanbul bölgesinde yapılacak güneş panelleri sistemi (PV), yoğun nüfusun yaşamını kolaylaştırmakla kalmayıp, güneşlenme süresinden maksimum oranda verim almayı da sağlayacaktır. Bu kapsamda, kent ölçeğinde bulunan binaların genellikle çatılarına yerleştirilecek olan paneller enerji üretiminde büyük rol üstlenmektedir. Yüksek binaların ve çarpık yerleşmelerin rol açacağı güneş ışınlarından etkili bir şekilde faydalanamama sorunu yapılacak yeni mimarilerin konumlandırılmasına yön verecektir. Metropoldeki yoğun yapılaşma ve yüksek binaların gölgeleme etkisi, güneş ışınımının verimli bir şekilde kullanılamamasına neden olabilmektedir.

## 2.2 Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Temel Yapısı

Bir terminolojik kelime olan fotovoltaik, yunanca kökenli “*photo*” (ışık) sözcüğü ile, elektrik potansiyelini ifade eden “*voltaic*” kelimesinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu kavram, ışık enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini tanımlar. Güneşten gelen dalga halinde yayılan fakat etkileşimlerini parçacık halinde gösterebilen ışınlar, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla yeryüzüne ulaşır. Bu ışınlar, ışık hızında kinetik olarak hareket edebilen ve durgun kütlesi olmayan foton adı verilen enerji yüklü parçacıklardan oluşur. Fotonlar, taşıdıkları enerji sayesinde çeşitli fiziksel ve kimyasal etkileşimleri tetikleyebilirler. Örneğin bitkilerde fotosentez sürecinde, fotonlar klorofil pigmentleri tarafından soğurularak elektronların uyarılmasına ve enerji dönüşüm sürecinin başlamasına neden olur. Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan yarıiletken malzemeler, üzerine düşen ışık parçacıkları olan fotonları absorbe ederek içerisindeki enerjiyi alır. Bu etkileşim sonucunda, yarıiletken yapıdaki atomlardan bazı elektronlar bağlı oldukları yerlerinden kopar ve hareket edebilir hale gelir. Ortaya çıkan bu serbest elektronlar, bir dış devre üzerinden yönlendirilerek elektrik akımı oluşturur.

Benzer şekilde, yarıiletken malzemelerle karşılaştıklarında da fotonlar, içerdikleri enerji sayesinde elektronların serbest kalmasına neden olur. Bu olay, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemlerin temel çalışma prensibini oluşturur.

Fotovoltaik hücreler, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren sistemlerdir. Ürettikleri doğru akım (DC), bir evirici (inverter) aracılığıyla alternatif akıma (AC) dönüştürülür. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte fotovoltaik sistemlerin verimliliği artmış, uygulama alanları genişlemiştir. Örneğin, esnek paneller sayesinde çatı sistemlerinin yanı sıra cephe panelleri, taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar gibi farklı alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, gelişmiş depolama çözümleri ve çift yönlü sistemler, güneş enerjisinin daha verimli ve sürdürülebilir kullanımını sağlamaktadır.



**Şekil 2.2: Güneş Panelinin İç Yapısı [10]**

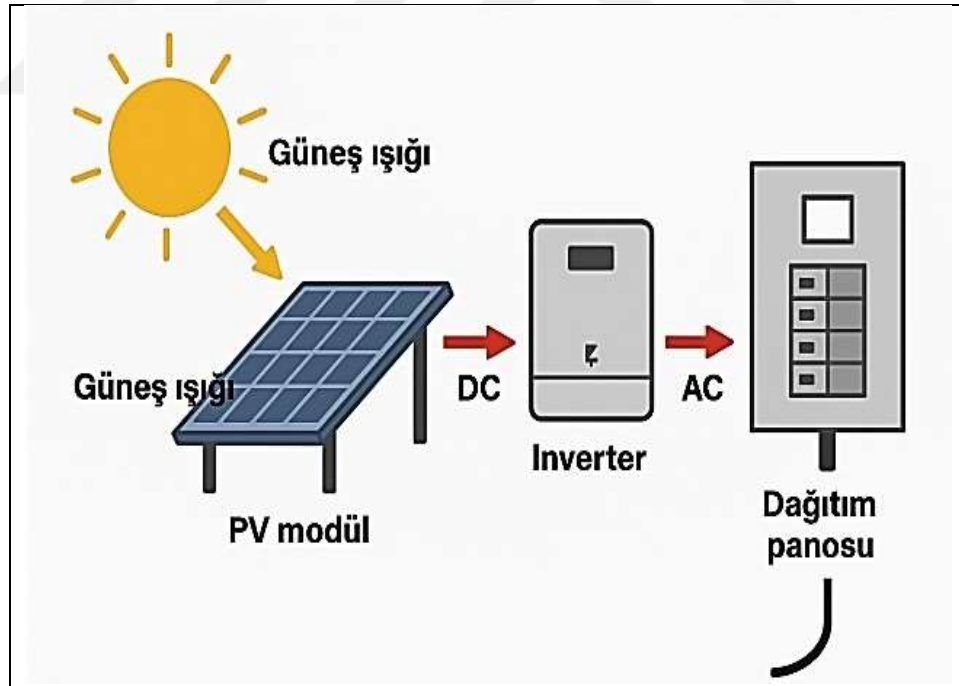
Güneş hücrelerinin bilimsel temeli, 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından ortaya konulmuştur. Becquerel, ışığa maruz bırakılan elektrotların bir potansiyel farkı oluşturabileceğini deneysel olarak gözlemleyerek, fotovoltaik etkinin temelini atmıştır [1]. Fotovoltaik sistemlerin (PV) performansı, yalnızca çevresel etkenlerle sınırlı olmayıp; aynı zamanda sistemin yapısal bütünlüğü, kullanılan teknolojik bileşenlerin kalitesi ve bu bileşenlerin entegrasyon düzeyi ile doğrudan ilişkilidir. Tipik bir PV sistem; fotovoltaik modüller, güç dönüştürücü (evirici) birimler, elektriksel bağlantı elemanları, taşıyıcı konstrüksiyon sistemleri ve isteğe bağlı olarak tümüyle dahil edilen enerji depolama ünitelerinden oluşmaktadır.

### 2.2.1 Fotovoltaik panellerin çalışma prensibi ve yapısı

Fotovoltaik (PV) paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerin temel bileşenidir. Bu paneller, yüzeylerine düşen fotonların taşıdığı enerjiyle yarıiletken malzeme içinde serbest elektronların hareketini başlatır ve böylece bir elektrik akımı oluşur. Bu fiziksel sürece fotovoltaik etki adı verilir.

PV paneller, çok sayıda güneş hücresinin belirli bir düzende bir araya getirilmesiyle yapılandırılır. Her bir hücre, genellikle monokristal veya polikristal silikon esaslı yarıiletkenlerden üretilmektedir. Daha esnek ve hafif uygulamalar için ise ince film teknolojileri (CdTe, CIGS veya amorf silikon gibi) tercih edilmektedir. Panelin bütünlüğünü korumak ve dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmak için temperli cam, EVA katmanları ve arka koruyucu tabaka (Tedlar) kullanılır.

Hücreler, güneş panellerinde elde edilmesi istenilen elektriksel çıktıya göre seri ve paralel bağlantılarla birleştirilir. Bu bağlantılar, özel iletken şeritlerle gerçekleştirilir ve panel içindeki enerji kayıplarını en aza düşürecek şekilde tasarlanır.



Şekil 2.3: PV Sistemlerin Yapısı [11]

Üretim süreci bir kısım fabrikasyon adımlarından oluşur. Bu adımlar; hücre dizilimi, laminasyon, çerçeveleme, cam kaplama ve bağlantı kutusu montajı gibi adımları içerir. Bu süreçler, hassasiyet gerektiren ve kontrollü ortam şartlarında yürütülmesi gereken işlemlerdir. Ayrıca, üretim sürecinde kontrol standartlarının ve

yerel yönetmelik ile ulusal standartlarının yerine getirilmesi için her panel, üretim hattında ışınım testleri uygulanır. Bu testten sonra izolasyon kontrolleri ve performans analizlerinden geçirilerek kalite güvencesi sağlanır.

Gelişen üretim teknolojileri sayesinde, daha düşük maliyetli, daha verimli ve uzun ömürlü paneller geliştirilmiştir. Özellikle PERC (Passivated Emitter Rear Cell), TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) ve HJT (Heterojunction Technology) gibi yeni nesil hücre teknolojileri, nano teknolojinin etkisiyle günümüzde yüksek performanslı sistemlerin temelini oluşturmaktadır.

### **2.2.1.1 Fotovoltaik hücre türleri ve modül yapısı**

Fotovoltaik panellerin performansı, büyük ölçüde kullanılan hücre tipine ve modülün yapısal özelliklerine bağlıdır. Fotovoltaik hücreler, elektronik yardımcı devre elemanlarının güneş ışığıyla etkileşimi sonucu elektrik enerjisi üretilmesini sağlayan, gözle görülemeyecek düzeyde gerçekleşen enerji dönüşüm mekanizmalarının temel yapı taşlarını oluşturur[11]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan üç temel hücre tipi aşağıda özetlenmiştir:

#### **Monokristalin Hücreler:**

Yüksek saflıkta 20. yy. başlarından 21. yy. başlarına kadar çağ ilan edilen önemli bir element olan silisyumdan üretilir. Çok sayıda fotovoltaik panelin yapısında bulunan monokristalin hücreler, %18–%22 verimlilik sunar. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve estetik görünüm gibi avantajlar sunar. Dar alanlarda maksimum üretim için uygundur.

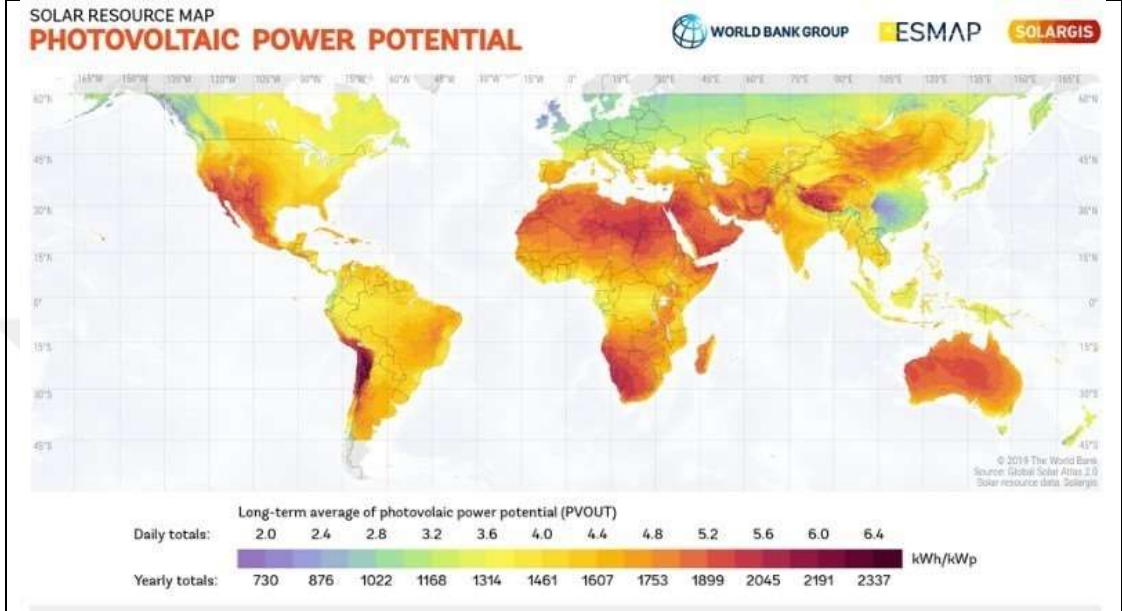
#### **Polikristalin Hücreler:**

Birden fazla küçük kristalin birleşiminden oluşur. Üretimi daha ekonomiktir. %15–%18 verimlilik sağlar. Geniş yüzeylerde maliyet avantajı sayesinde tercih edilir.

#### **İnce Film Hücreler:**

Amorf silisyum, CdTe veya CIGS malzemelerden yapılır. Verimlilikleri genellikle %10–%13 seviyesindedir. Düşük ışınımında daha kararlı çalışabilirler. Esnek yapıları sayesinde bina cepheleri, araç üstü sistemler gibi yenilikçi uygulamalar için uygundur. Global Solar Atlas tarafından yayımlanan dünya genelindeki PVout verilerini gösteren harita, İstanbul ili gibi coğrafik açıdan kuzeybatı şehirlerinin orta

düzeyde yıllık güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [37]. Bu bağlamda, özellikle alanın sınırlı olduğu şehir içi uygulamalarda yüksek verimlilikli hücre teknolojilerine yönelmek önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında kullanılması öngörülen güneş panelleri, çatı tipi uygulamaların hücre tipi ve verimliliği açısından en iyi hale gelmesini gerekli kılmaktadır.



**Şekil 2.4: 1994/1999/2007 (Coğrafi Bölgeye Bağlı Olarak) ile 2015 Yılları Arasındaki Dönemi Kapsayan 1 kW-Pik Şebeke Bağlantılı Güneş PV Santralinden Güç Potansiyeli Haritası [37].**

İstanbul ili için fotovoltaik hücre tipi seçimi, yerel iklim koşulları ve güneş ışınımı düzeyine bağlı olarak önemlidir. İstanbul, yıllık ortalama güneş ışınımı almasına rağmen, mevsimsel değişiklikler ve bulutluluk oranlarının etkisi altında kalan bir bölgedir. Bu bağlamda, Çizelge 2.1.'den faydalanarak, monokristalin hücreler yüksek verimlilikleri (18-22%) ile daha stabil bir enerji üretimi sağlar. İstanbul'un değişken hava koşullarında, bu hücreler, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür avantajlarıyla verimli bir seçenek sunmaktadır. Öte yandan, polikristalin hücreler, daha düşük maliyetleri ve %15-18 verimlilik oranları ile maliyet odaklı projeler için uygun olabilir. İnce film hücreler ise, düşük ışık koşullarında daha stabil performans göstermeleri nedeniyle, gölgeli veya sınırlı alanlarda kurulum için avantaj sağlayabilir, ancak verimlilikleri genellikle daha düşük (10-12%) olduğundan, geniş alanlarda tercih edilmemelidir. Bu veriler ışığında, İstanbul'da verimlilik ve uzun ömür açısından mono kristalin hücreler, daha verimli enerji üretimi sağlamak için daha uygun bir seçenek olarak öne çıkması beklenmektedir.

**Çizelge 2.3: Fotovoltaik Hücre Tiplerinin Karşılaştırılması [11],[17]**

Hücre Tipi	Özellikler	Verimlilik(%)	Avantajlar	Dezavantajlar
Monokristalin Hücreler	Tek kristal yapıya sahip silisyum kullanılır.	18-22	Yüksek verimlilik ve uzun ömür.	Üretim maliyeti yüksektir.
Polikristalin Hücreler	Birçok küçük kristalin birleşimiyle üretilir.	15-18	Daha düşük maliyet, daha geniş üretim kapasitesi.	Verimlilik daha düşüktür.
İnce Film Hücreler	Amorf silikon, CdTe veya CIGS malzemeleri kullanılır.	10-13	Esnek, hafif, düşük ışık koşullarında iyi performans.	Düşük verimlilik, daha fazla alan gerektirir.

### 2.2.1.2 İnvterter sistemleri (Güç dönüştürücüler)

İnvterör (evireçler) sistemler; herhangi bir kaynaktan alınan doğru elektrik akımını, alternatif akıma dönüştüren sistemlerdir. Güç elektroniğinin önemli yarı iletken malzemeleri ile yapılmış olan bu sistemler, bir bakıma güç dönüştürücüdür.

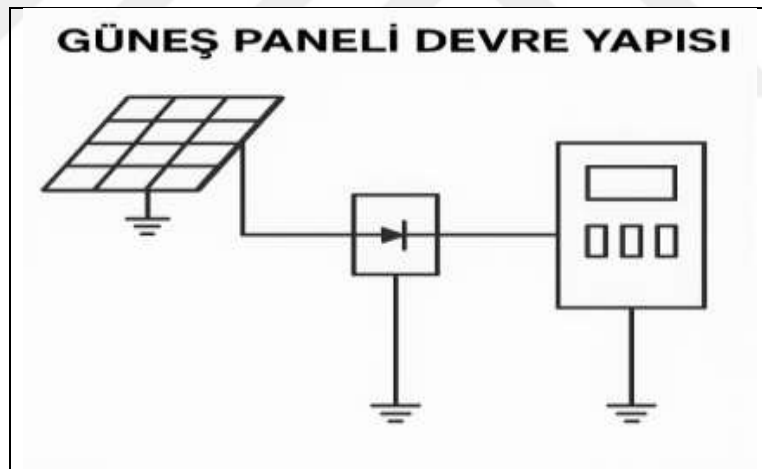
Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin uzun mesafelere kadar verimli aktarılmasında bu eviriciler kullanılır. Yenilenebilir enerji santrallerinde, dönüştürücüler kesintili, dengesiz ve anlık olarak yüksek gerilimin etkisine maruz kalabilir. Bu sebeple inverterler elektrik sistemindeki aşırı gerilim, dengesizlik, harmonik gibi karşılaşılan teknik arızaları azaltırlar. Eviriciler kullanım alanlarına göre üç ana grupta incelenir. Bunlar; merkezi inverterler, dizi inverterler ve mikroinverterlerdir.

Kullanım alanlarına göre farklılık gösteren inverter çeşitleri, geçmişten günümüze enerji tasarrufu, bakım-maliyet hesaplamalarında azalış, verimli enerji kullanımı, kapasite kontrolü gibi sağladığı avantajlar bulunmaktadır. Merkezi inverterler, genellikle büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde tercih edilen, yüksek kapasiteli ve tek noktadan kontrol sağlayan sistemlerdir; bu sayede bakım ve izleme işlemleri daha merkezi bir biçimde yürütülür. Orta ölçekli ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dizi inverterleri ise, birden fazla güneş panelinin birbirine bağlandığı dizilerden oluşur ve her diziye ayrı bir izleme ve kontrol olanağı tanıyarak performans izleme açısından esneklik sunar. Mikroinverterler ise her bir panelin arkasına entegre edilerek panel bazında enerji

dönüşümü sağlar; bu sayede gölgelenme, panel arızası ya da kirlenme gibi durumların tüm sistem üzerindeki etkisi minimize edilir ve her panelin performansı ayrı ayrı en üst düzeye çıkarılabilir. Bu üç temel invertör türü, kurulumun büyüklüğü, çevresel koşullar ve ekonomik faktörlere göre değerlendirilerek sistem tasarımında önemli bir rol oynar.

### 2.2.1.3 Temel diğer bileşenler

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneşten gelen enerjinin elektrik enerjisine çevrildiği bir fabrikasyondur. Bu fabrikasyonda, sistemlerin verimli ve kesintisiz çalışması, birbiriyle uyumlu çalışan farklı bileşenlerin dengeli entegrasyonuna bağlıdır. PV sistemlerde temel bileşen olarak güneş panelleri öne çıkarken, sistemin işleyişinde kritik rol oynayan birçok diğer eleman da mevcuttur. Batarya ve şarj regülatörü, özellikle şebekeden bağımsız (off-grid) sistemlerde enerji depolama ve yönetimi için vazgeçilmezdir. Şarj regülatörü, bataryaların aşırı şarj veya derin deşarjdan korunmasını sağlayarak batarya ömrünü uzatır. Bataryalar ise güneş ışığının yetersiz olduğu zamanlarda veya gece enerji arzını güvence altına alır.



**Şekil 2.5: Temel Bir PV Sistemin Elektriksel Bağlantıları[16]**

Sistemin mekanik dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü, montaj sistemleri ve kaliteli kablolama altyapısıyla sağlanır. Bu durum ise alanında uzman, idari yönetimlerden akredite uzmanların iş birliği ile sağlanır. Şekil 2.5'te temel bir PV sistemin basit yapıdaki elektriksel bağlantısı verilmiştir. Panellerin doğru açı ve yönlendirilmesi için kullanılan montaj sistemleri, güneş ışığından maksimum verim alınmasına imkan verir. Ayrıca, kablolama ve bağlantı elemanları elektrik akışının güvenli ve kayıpsız olmasını yüzde yüze yakın bir ölçekte gerçekleştirir. Koruma elemanları, fotovoltaik (PV) sistemin akımsal ve elektriksel sonuçlarının oluşturacağı

çevresel risklere karşı dayanıklılığını artırır. Sigortalar, devre kesiciler ve parafudrlar gibi bileşenler, kısa devre, aşırı akım ve yıldırım gibi tehlikelere karşı sistemin güvenliğini temin eder. Modern güneş paneli (PV) sistemlerinde yer alan izleme ve kontrol üniteleri ise gerçek zamanlı performans takibi ve uzaktan yönetim olanağı sunarak sistem verimliliğini maksimize eder.

Sonuç olarak, fotovoltaik sistemler (PV) karmaşık ama birbiriyle uyumlu çalışan çok sayıda bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin her biri, sistemin genel performansı, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Dolayısıyla, sistem tasarımında bileşenlerin doğru seçimi ve entegrasyonu, verimli bir enerji dönüşümü için temel gerekliliktir.

### **2.3 Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Verimlilik Faktörleri**

Yeşil bir dünyada, rejeneratif olmayan kaynakların tüketimi azaldıkça sürdürülebilirlik artmaktadır. Fotovoltaik (PV) Sistemler ise günümüz dünyasında hızla yayılmakta, etkin rol almaktadır. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme işini yapan bu sistemlerin performansı, tasarımı, çevresel etkenler ve teknolojik değişimlerle doğrudan ilişkilidir. PV sistemlerin kurulumuna yönelik karar süreçlerinde yerel iklimsel verilerin özenle analiz edilmesi, sistemlerin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle metropollerde, karbon ayak izinin artmasının verdiği negatif sonuçlar, nüfus yoğunluğu ve yapıların düzensiz konumlandırılması verimlilik üzerinde ilave etkiler yaratmaktadır. Türkiye'nin en kalabalık metropolü olan İstanbul, farklı bölgelerinde değişken topoğrafik yapısı, mikro klima etkileri ve hava kirliliği gibi faktörlerle PV sistem tasarımı açısından özgün bir örnek teşkil eder. Bu bölümde, PV sistemlerin verimliliğini etkileyen başlıca faktörler teorik ve sayısal yönleriyle ele alınacak; İstanbul şehri özelinde sistem performansına etkileri değerlendirilecektir. Böylece sonraki bölümlerde kullanılacak yapay sinir ağı modellemesine girdi oluşturacak temel parametreler sistematik biçimde ortaya konulacaktır.

#### **2.3.1 Verimliliği etkileyen ana faktörler**

Fotovoltaik sistemlerin verimliliği, yalnızca kullanılan panel teknolojisinin niteliğine değil; aynı zamanda çevresel koşullara, sistem tasarımına ve işletme süreçlerine de bağlıdır. Bu kapsamda, PV sistemlerin performansını belirleyen

başlıca faktörlerden bahsedilerek, İstanbul gibi karmaşık iklim yapısına ve yoğun kentsel yerleşime sahip bir şehirde bu etkilerin değerlendirilmesi daha da önemli hâle gelmektedir.

#### a) Sıcaklık, Kirlenme ve Gölgeleme Etkisi

Güneş panellerinin performansı, sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastır. Artan panel sıcaklığı, yarı iletken malzemenin iç direncini artırarak çıkış geriliminde düşüşe yol açar. Güneş panelinin dış izolasyon malzemelerinde kısa devreler ve aşırı ısınmalar meydana gelebilmektedir. Bu durum, özellikle yaz aylarında yüksek sıcaklıkların gözlendiği İstanbul gibi bölgelerde ciddi bir verimlilik sorunu yaratmaktadır. Konuya ilişkin yapılan bir çalışmada, sıcaklık artışının fotovoltaik sistemler üzerindeki etkisi şöyle gösterilmiştir: Her 1 °C sıcaklık artışı, sistem veriminde yaklaşık %0,4 oranında azalmaya neden olabilmektedir [36].

Toplum yapılaşmasının yoğun olduğu şehirlerde ekosistemin kirliliği kaçınılmaz bir sonuçtur. Şehir merkezlerinde fotovoltaik sistemlerin kurulumu sırasında karşılaşılan en önemli çevresel sorunlardan biri, panel yüzeyinde zamanla biriken kirlenmelerdir. Hava kirliliği, sanayi kaynaklı emisyonlar, egzoz gazları, polenler, toz partikülleri ve kuş ve diğer uçabilen canlı dışkıları gibi çevresel etkenler, panel yüzeyinde geçirgenliği azaltan saydam olmayan bir tabaka oluşmasına neden olur. Bu tabaka, güneş ışığının fotovoltaik hücrelere ulaşmasını sınırlayarak ışınımın soğurulmasını ve dolayısıyla elektrik üretimini ciddi ölçüde düşürür.

Gölgeleme, fotovoltaik sistemlerin enerji üretim kapasitesini olumsuz etkileyen başlıca fiziksel faktörlerden biridir. Özellikle kentsel alanlarda, şehir merkezlerinde veya çevresinde oluşmuş mahallelerde yer alan binalar, yüksek ağaçlar, direkler ve anten gibi nesnelerin oluşturduğu gölgeler, günün belirli saatlerinde panellerin yüzeyine düşerek güneş ışığını engeller. Bu durum, sabah erken saatlerde ve akşamüstü gibi güneş ışığının yatay geldiği zaman dilimlerinde daha belirgin hale gelir. Gölge, sadece ilgili hücreyi değil, seri bağlı sistemlerde tüm panel dizisinin genel performansını fizikte kırınım olayının etkisiyle düşürebilir. Bir sistem veya santral içerisinde, panellerin elektriksel üretimi, en zayıf hücrenin üretim kapasitesiyle sınırlanır. Eğer gölgeleme; bir santral kurulumunda tespit,tanı,teşhis aşamalarında bir sorun olarak ortadan kaldırılamaz ya da bu sorunu giderebilecek bir

çözüm üretilmezse, sistemin genel verimliliğinde ciddi ve kalıcı kayıplar yaşanması kaçınılmaz hale gelir.

### **b) Panel Yönelimi, Eğim Açısı ve Mekanik Yerleşim**

PV panellerin güneşe göre konumlandırılması, yıl boyunca maksimum ışınımı toplayabilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Panel yüzeyinin eğim açısı, bulunduğu bölgenin enlemine göre optimize edilmelidir. İstanbul ili için önerilen optimum eğim açısı  $32^{\circ}$ – $36^{\circ}$  aralığındadır. Bu değerler, yıl boyunca ışınımın en yüksek düzeyde alınmasına olanak tanımaktadır[14]. Güneş enerjisinden faydalanılmak üzere üretilen panellerin mevsimlere göre ayarlanabilir eğim açılarının olmaması ve yanlış yönelimleri sistemin performansında özellikle büyük şehirlere entegre edilmesi hususunda önemli düşürlere neden olabilir.

Ayrıca, panellerin çatı ya da zemin üzerine yerleştirilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da mekanik açıdan havalandırma koşullarıdır. Yetersiz hava sirkülasyonu, panel sıcaklığının yükselmesine neden olarak termal verim kayıplarına yol açabilir. Bu durum, özellikle yaz aylarında panel yüzey sıcaklığının aşırı artmasına ve dolayısıyla sistemin genel verimliliğinin düşmesine neden olur. Kısaca: panel yönelimi, konumlandırma açısı ve yerleştirme koşulları verimliliği etkileyen başlıca unsurlardandır.

### **c) Elektriksel Kayıplar: İnverter ve Kablo Sistemleri**

PV sistemlerde üretilen doğru akımın (DC), alternatif akıma (AC) çevrilmesinde kullanılan inverterler, sistem verimliliği üzerinde etkisi yüksek bileşenlerdendir. Modern inverterlerde verimlilik oranı %95 ila %98 arasında değişmekte olup, düşük kaliteli ya da yanlış boyutlandırılmış inverterler, enerji dönüşümünde ciddi kayıplara neden olabilmektedir[2]. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan inverterler, üretim gerilimini şebeke ile uyumlu olacak şekilde dönüştürerek, ideal sinüzoidal dalga formunda bir çıkış elde etmeyi hedefler. Ancak pratikte bu dönüşüm işlemi sırasında harmonik bileşenler oluşur. Harmonikler, temel frekansın katları şeklinde şebekeye yayılan istenmeyen frekans bileşenleridir ve özellikle inverter kaynaklı harmonikler, sistemde reaktif güç artışı, ek ısı kayıplar ve iletkenlerde gerilim düşümü gibi çeşitli sorunlara neden olabilir. Benzer şekilde, kablo sistemlerindeki direnç kaynaklı kayıplar da fotovoltaik sistemlerin genel performansını olumsuz etkileyen unsurlar arasında yer alır. Özellikle uzun mesafeli

kablolarlarda ve yetersiz kesitli iletken kullanımında, enerji iletiminde kayıplar meydana gelir ve bu durum sistem verimliliğinde düşüşe yol açar. Bu nedenle, kullanılacak kabloların tipi, uzunluğu ve yerleşimi özenle belirlenmeli; gerilim düşümü ve ısı kayıpları en aza indirilecek şekilde bir altyapı tasarımı yapılmalıdır. Açıkça, inverter seçimi ve uygun kablo sisteminin belirlenmesi verimliliği direkt etkileyen faktörler arasındadır.

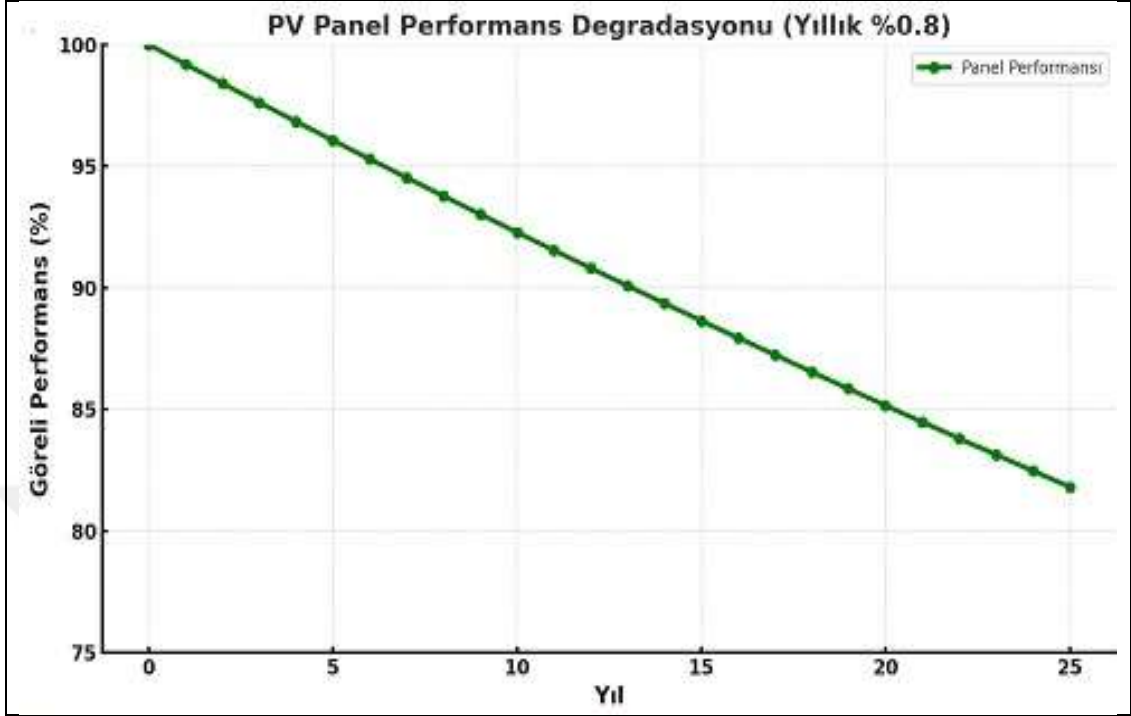
#### **d) Panel Yaşlanması ve Performans Degrasyonu**

Fotovoltaik paneller, uzun yıllar boyunca dış ortam koşullarına maruz kaldıkları için zamanla fiziksel ve kimyasal değişimlere uğrarlar. Bu değişimlere, uzun süre güneşin yapısında bulunan ultraviyole (UV) ışıklara maruz kalması, nem sonucu bozulmalar, termal döngüler ve yine yüzeysel çatlaklıklar örneklendirilir. Bahsedilen değişimler, panelin ilk kurulum anındaki performans düzeyine kıyasla enerji üretim kapasitesinde gözle görülür bir azalmaya neden olur. Bu süreç, literatürde performans degradesyonu ya da yaşlanma etkisi olarak tanımlanır. Güneş panellerinin yaşlanması doğrudan hücre yapısını ve enerji dönüşüm kapasitesini etkileyen çok boyutlu bir süreçtir. Özellikle İstanbul ili gibi orta kuşak ikliminde bulunup, sera gazının atmosferde fazla miktarda bulunması kaynaklı çevresel etkenler ile bu sürecin iyi anlaşılması ve izlenmesi, bakım stratejilerinin planlanmasında ve yatırımın geri dönüş süresinin doğru hesaplanmasında kritik rol oynar.

Şekil 2.6.'da sunulan grafik, fotovoltaik (PV) panellerde yıllar içerisinde gerçekleşen performans kaybını temsil etmektedir. Grafik, panellerin yıllık ortalama %0.8 oranında degradesyona uğradığı varsayımıyla simüle edilerek hazırlanmıştır. 2024 yılında yayımlanan bir meta-analiz, kristalin silikon panellerin yıllık medyan degradesyon oranının yaklaşık %0.94 olduğunu belirtmektedir[43]. Ayrıca, Applied Sciences dergisinde yayınlanan bir araştırmada, kristalin silikon panellerin yıllık degradesyon oranının %0.8 ile %0.9 arasında olduğu rapor edilmiştir[42].

Grafikte (şekil 2.6) ilk yıl üretim kapasitesi %100 olarak kabul edilmiş ve her yıl bu değerin %0.8 oranında azaldığı varsayılmıştır. Bu model doğrultusunda yapılan hesaplamalar, 25. yılın sonunda PV panelin başlangıç kapasitesine bakılarak kıyaslandığında yaklaşık %82 verimle çalıştığını göstermektedir. Bu analiz, yaşlanmaya bağlı hücre içi mikro yapısal bozulmalar, malzeme yorgunluğu, bağlantı noktalarının termal döngülere maruz kalması ve dış çevre koşullarının (UV ışınımı,

nem, sıcaklık farkları vb.) uzun vadeli etkileri sonucunda panel performansında meydana gelen doğal azalmayı yansıtmaktadır.



**Şekil 2.6: Fotovoltaik(PV) Panel Performans Degradasyonu**

Bu yaklaşım, yatırımcılar ve mühendisler açısından sistemin uzun vadeli enerji üretim potansiyelini tahmin etmek, ekonomik ömür süresini değerlendirmek ve bakım-onarım planlarını optimize etmek açısından önemli bir karar destek aracı sunmaktadır. Grafik, İstanbul ili gibi güneşlenme süresi yüksek ancak mevsimsel sıcaklık dalgalanmalarının etkili olduğu bölgelerde panel yaşlanmasının sistem genel verimliliği üzerindeki etkilerini somut biçimde ortaya koymaktadır.

### 2.3.2 Verimlilik hesaplama yaklaşımı

Günümüzde fotovoltaik (PV) sistemlerin ön görülebilirlik değerlendirmesi, yalnızca kurulu güce dayalı değil; aynı zamanda 2.2. bölümde bahsedilen sistemin çevresel koşullara ve teknik yapısına bağlı olarak enerji üretim verimliliği üzerinden yapılmaktadır. Bu nedenle günümüz yüksek nüfuslu şehirlerinde sağlam bir altyapı ile sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla verimliliğin öngörülebilirliği önem arz etmektedir. Özellikle İstanbul gibi güneşlenme potansiyeli mevsimsel farklılıklar gösteren şehirlerde bu hesaplamalar, sistem optimizasyonu ve sürdürülebilirlik hedefleri açısından daha da önem kazanmaktadır.

Verimlilik hesaplama yaklaşımı, sistemin gerçek çıkış gücünü (output power) ve aldığı toplam ışınımı karşılaştırarak, birim alandan elde edilen enerji performansını sayısal olarak ifade etmeyi amaçlar. Aşağıda bu hesaplama temel oluşturan matematiksel modellemeler sunulmuştur.

## 2.4 Temel Denklemler ve Matematiksel Modellemeler

Bu bölümde, Kalogirou (2004) tarafından detaylı şekilde sunulan verimlilik hesaplama yaklaşımları esas alınarak, fotovoltaik (PV) sistemlerin teorik ve pratik verimlilik analizleri formül 1-2-3-4-5'te sunulmuştur[20].

### 2.4.1 Genel verimlilik denklemi

PV modüllerinin genel verimliliği, modülün belirli bir ışınım düzeyinde ne kadar elektrik enerjisi üretebildiğini gösterir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\eta = \frac{P_{out}}{A \cdot G_L} \quad (2.1)$$

$\eta$  = modül verimliliği (%),  $P_{out}$  = Modül tarafından üretilen çıkış gücü (W),  $A$  = Fotovoltaik (PV) panel yüzey alanı ( $m^2$ ),  $G_{out}$  = Yatay düzleme gelen yatay anlık toplam güneş ışınımı ( $W/m^2$ ) olarak sembolize edilmiştir.

1 numaralı formül, bir fotovoltaik (PV) panelin belirli bir anda aldığı ışınım miktarına karşılık ürettiği elektriksel gücü ifade eder ve panelin enerji dönüşüm verimliliğini hesaplamak için kullanılır. Ancak bu verimlilik sabit değildir; panel yönelimi, eğim açısı, gölgeleme durumu, ortam sıcaklığı ve kirlenme gibi çevresel etkiler nedeniyle günün ve yılın farklı zaman dilimlerinde değişkenlik gösterebilir. Yukarıdaki matematiksel eşitlik birbirinden farklı parametrelerden oluşur. Bu nedenle, sistemin uzun vadeli verimliliğinin doğru öngörülmesi için bu değişkenlerin de modellenmesi gerekmektedir.

Özellikle, İstanbul gibi kentlerde, mevsimsel açı değişimleri, gökyüzü örtüsü, partikül yoğunluğu ve şehirselle engellerden kaynaklı gölgelenmeler, güneş ışınımının yüzeye düşme şeklini etkileyerek çıkış gücü ( $G_{out}$ ) değerini doğrudan etkiler. Bu da, aynı panel alanı ve çıkış gücü varsayımı altında anlık verimliliğin zamanla değişmesine neden olur.

### 2.4.2 Hücre sıcaklığı etkisiyle verimlilik düzeltmesi

Fotovoltaik (PV) modüllerin performansı, çevresel faktörlerden biri olan hücre sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, yarı iletken malzemenin taşıyıcı hareketliliği azalmakta, harmonik değişmekte ve buna bağlı olarak elektriksel verim düşmektedir. Bu durumu nicel olarak ifade eden sıcaklık düzeltme formülü aşağıda verilmiştir:

$$\eta_T = \eta_{ref} \cdot [1 - \beta(T_c - T_{ref})] \quad (2.2)$$

$\eta_T$  = Sıcaklık düzeltmeli verim demektir.  $\eta_{ref}$  = Standart test koşullarında (STC) verim anlamına gelir.  $\beta$  = Sıcaklık katsayısı ( $1/^\circ\text{C}$ ),  $T_c$  = Hücre sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )  $T_{ref}$  = Referans sıcaklık (genellikle  $25^\circ\text{C}$ ) olarak formül 2’de gösterilmiştir.

2 numaralı denkleme göre, eşitlikte hücre sıcaklığı arttıkça PV modülünün verimliliği doğru oranda azalır. İstanbul gibi yaz aylarında çevre sıcaklıklarının  $35\text{--}40^\circ\text{C}$ ’ye ulaştığı iklimlerde, modül hücre sıcaklığı genellikle ortam sıcaklığının  $20\text{--}25^\circ\text{C}$  üzerinde seyredebilir. Bu da toplamda yaklaşık olarak %10’a yakın bir verim düşüşüne neden olabilir. Meteorolojik veriler dikkate alındığında sıcaklık değişimleri son yıllarda fotovoltaik sistemler üzerinde verimliliği etkileyen faktörler arasındadır.

Bu nedenle, Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı verimlilik modellemelerinde sıcaklık verisinin hem anlık hem de mevsimsel olarak girdi değişkenleri arasında yer alması, modelin doğruluğunu artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, soğutma çözümleri, havalandırılmalı montaj sistemleri ve yüksek sıcaklık katsayısına sahip yeni nesil panel teknolojileri, bu olumsuz etkiyi minimize etmek amacıyla sürdürülebilirlikte devamlılıkla sağlanabilir.

### 2.4.3 İstanbul'un iklim verileri

İstanbul’da yaz aylarında ortalama yüksek sıcaklıklar şu şekildedir[ek-1]:

- Haziran:  $27^\circ\text{C}$
- Temmuz:  $30^\circ\text{C}$
- Ağustos:  $30^\circ\text{C}$

Bu dönemde, PV modüllerinin yüzey sıcaklıkları genellikle ortam sıcaklığının  $20\text{--}25^\circ\text{C}$  üzerinde olabilir, bu da hücre sıcaklıklarının  $50\text{--}55^\circ\text{C}$ ’ye ulaşabileceğini gösterir. Verimlilik Kaybı Hesaplaması

Örneğin, referans verimliliği 25°C altında %20 olan bir PV modülü için, hücre sıcaklığı 65°C olduğunda:

$$\begin{aligned} T &= \eta_{ref} [1 - \beta(T_c - T_{ref})] \\ &= \%20 [1 - (0.004 \cdot (65 - 25))] \\ &= \%16.8 \end{aligned}$$

Bu hesaplama, 2 numaralı denkleme göre sıcaklık artışının modül verimliliğini %3.2 oranında azalttığını gösterir. Başlangıçta 25°C koşullarında kabul edilen %20 verimlilik sıcaklık arttığında %16,8 olmuştur.

Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı modellemelerde, sıcaklık verisinin zaman serisi olarak entegrasyonu, sistem performans tahminlerinin doğruluğunu artırır. İstanbul gibi yaz aylarında yüksek sıcaklıkların yaşandığı ekvator kuşağında bulunan bölgelerde, bu tür modellerde sıcaklık etkisinin dikkate alınması büyük öneme sahiptir.[20] Sonuç olarak, fotovoltaik(PV) hücre sıcaklığının 65 °C'ye ulaşması durumunda, başlangıçta

%20 olan modül verimliliği %16,8'e düşmektedir. Bu hesaplama, sıcaklık artışının fotovoltaik(PV) modül performansı üzerindeki doğrudan ve belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Özellikle yaz aylarında yüzey sıcaklıklarının yüksek değerlere ulaştığı İstanbul gibi büyük şehirlerde, bu tür termal kayıplar sistem tasarımında mutlaka dikkate alınmalıdır. Sıcaklığa duyarlı performans düşüşleri, yıllık enerji üretim tahminlerinde sapmalara neden olabileceğinden, tasarım aşamasında uygun havalandırma çözümleri, modül yerleşim stratejileri ve verimlilik odaklı inverter seçimleri gibi mühendislik önlemleriyle bu etkilerin minimize edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, sıcaklık etkisinin sayısal olarak modellenmesi, sistemin uzun vadeli üretim kapasitesine ilişkin daha sağlıklı öngörülerde bulunulmasına olanak tanımakta ve enerji verimliliği politikalarının daha bilinçli biçimde şekillendirilmesini sağlamaktadır.

#### 2.4.4 Güneşlenme süresine göre günlük enerji üretimi

Fotovoltaik (PV) sistemlerde günlük enerji üretimi, panel yüzeyine düşen toplam ışınım ve sistem verimliliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu üretim miktarı, aşağıdaki temel denklemlerle hesaplanabilir:

$$E_d = A \cdot G_d \cdot \eta \quad (2.3)$$

Burada:

$E_d$ =Günlük enerji üretimi (Wh/gün)

A= Panel yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$G_d$ =Günlük ortalama yatay düzleme gelen güneş ışınımı (Wh/m<sup>2</sup>.gün)

$\eta$ =Sistem verimliliği (birimsiz)

3 numaralı eşitlik, yenilenebilir enerji sistemin belirli bir günde üreteceği teorik ve somut enerji miktarını tahmin etmeye olanak tanır. Panel alanı ve sistem verimliliği sabit kabul edildiğinde, enerji üretiminde en büyük değişken olarak günlük ışınım  $G_d$  öne çıkar. Bu nedenle, İstanbul gibi ışınım değerleri mevsimsel olarak büyük değişiklik gösteren kentlerde, doğru tahmin yapılabilmesi için günlük ışınım verilerinin zaman serisi olarak modellenmesi gerekmektedir. Günlük ortalama ışınım verileri, MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) gibi kurumlar tarafından sağlanmaktadır. İstanbul özelinde bakıldığında, yaz aylarında  $G_d$  değeri 6000 Wh/m<sup>2</sup>/gün seviyelerine kadar çıkabilirken, kış aylarında bu değer 1500 Wh/m<sup>2</sup>/gün'ün altına düşebilmektedir. Bu değişim, fotovoltaik (PV) sistemlerin aylık ve mevsimsel performans farklılıklarını doğrudan etkiler.

#### 2.4.5 Yıllık enerji üretimi tahmini

Bir fotovoltaik(PV) sistemin yıllık enerji üretimini tahmin etmek, sistemin uzun vadeli performans değerlendirmesi ve yatırım geri dönüş analizleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu hesaplama genellikle aşağıdaki formülle yapılır:

$$E_y = P_{\text{rated}} \cdot H_{\text{gt}} \cdot PR \quad (2.4)$$

4 numaralı denkleme göre:

$E_y$  = Yıllık toplam enerji üretimi (kWh/yıl) demektir.  $P_{\text{rated}}$  = PV sistemin nominal kurulu gücü (kWp). Panel üreticisinin belirttiği standart test koşullarında (STC) ölçülen nominal kapasitedir.  $H_{\text{gt}}$  = Yatay düzleme gelen yıllık toplam güneş ışınımı (kWh/m<sup>2</sup>.yıl) İlgili bölgedeki yıllık toplam ışınım miktarını temsil eder. Bu veri, Avrupa Birliği Ortak Araştırma Merkezi'nin sunduğu PVGIS platformu ve MGM ( Meteoroloji Genel Müdürlüğü) gibi güvenilir kaynaklardan elde edilmiştir.[19] PR= Performans oranı (birimsiz). Sistemde inverter, kablo, sıcaklık, kirlenme, gölgeleme vb. tüm kayıpları temsil eden çarpan olup genellikle %75–85

aralığında kabul edilir[17]. Yıllık enerji üretimi tahmini formülü, bir fotovoltaik sistemin uzun vadeli performansının değerlendirilmesinde ve sistemin ekonomik fizibilitesinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu formül aracılığıyla, belirli bir bölgeye özgü ışınım verileri ve sistemin teknik özellikleri dikkate alınarak yıllık üretim miktarı öngörülebilir. Böylece, yatırımcılar geri ödeme süresi ve sistem kârlılığı gibi finansal göstergeleri güvenilir şekilde hesaplayabilir. Ayrıca, kurulu sistemlerin gerçek üretim değerleri bu tahminle karşılaştırılarak olası performans kayıpları tespit edilebilir. Yapay sinir ağları gibi veri temelli modellemelerde de bu değer hedef değişken olarak kullanılarak tahmin doğruluğu artırılabilir. Dolayısıyla 4 numaralı eşitlikte verilen formül, sistem tasarımından işletme sürecine kadar pek çok aşamada hem teknik hem de ekonomik kararların temelini oluşturmaktadır.

#### 2.4.6 Toplam sistem verimliliği (Bileşen bazlı yaklaşım)

Tüm sistem bileşenlerini kapsayan toplam sistem verimliliği:

$$\eta_{\text{sistem}} = \eta_{\text{modül}} \cdot \eta_{\text{inverter}} \cdot \eta_{\text{kablo}} \cdot \eta_{\text{sıcaklık}} \cdot \eta_{\text{kir}} \quad (2.5)$$

$\eta_{\text{sistem}}$  = PV modülün (panelin) verimliliği Tüm bu bileşenlerin çarpımıyla elde edilen toplam sistem verimliliği

$\eta_{\text{modül}}$  = Güneş panelinin verimliliğidir.  $\eta_{\text{inverter}}$  = Evirici üzerinde oluşan verimliliklerdir.

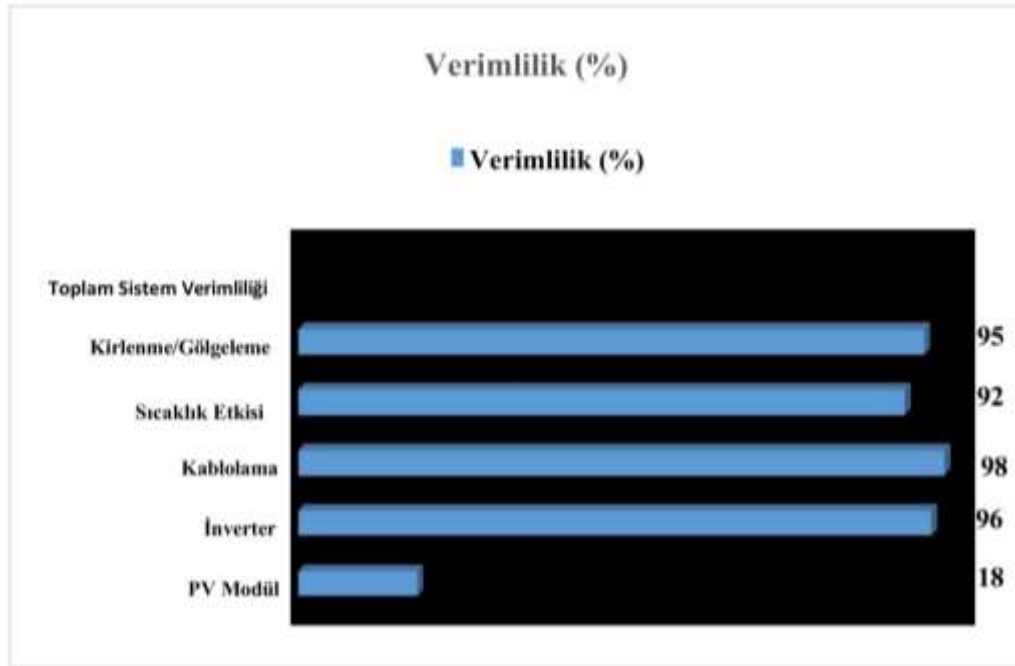
$\eta_{\text{kablo}}$  = Kablolama sistemindeki verimlilik (kayıplar düşüldükten sonra)

$\eta_{\text{sıcaklık}}$  = Hücre sıcaklığı nedeniyle oluşan kayıpları ifade eder.

$\eta_{\text{kir}}$  = Panel yüzeyinde biriken kirlilik etmenlerinin neden olduğu ışık kaybının etkisidir. Fotovoltaik sistemin bileşenleri olan formül 5'te ifade edilen parametrelerden, modül verimliliği, mekaniksel, kimyasal ve çevresel etkilerle değişmektedir. Uluslararası standartlara göre saha koşullarındaki verimlilik ölçümleri ile laboratuvar koşullarındaki verimlilik ölçümleri değişkenlik gösterir. İnverterler ise elektriksel dönüşümü gerçekleştiren evireçlerdir. Bu paneller üzerinde dönüşüm işlemi gerçekleşirken, nominal kapasitesinin maksimum verim aralığında olduğu zaman, bir kısım enerji açığa çıkar. Bu açığa çıkan enerji ısı enerjisine mekaniksel bağlamda dönüşür ve kaybedilir. Elektrik akımını iletme işlemi kablolar üzerinden gerçekleşir. Elektrik malzemeleri, kullanılan elementlerin değişimiyle, kablo kesitlerindeki farklılıklarla kablo verimliliğini etkiler.

Toplam sistem verimliliği, 5 numaralı eşitlikte gösterildiği üzere fotovoltaik (PV) sistemin tüm bileşenlerinin ayrı ayrı performanslarının çarpımıyla elde edilen ve sistemin genel işleyişinin hesaplamalı göstergesidir. Modül, inverter, kablolama, sıcaklık ve kirlilik gibi başlıca bileşenlerin her biri enerji dönüşüm sürecinde belirli oranlarda kayıplara neden olur. Bu kayıplar, sistem tasarımındaki teknik yeterlilik, çevresel koşullar ve bakım düzeyine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yüz ölçümü ile Asya ve Avrupa kıtasını birbirine bağlayan İstanbul gibi kentlerde yoğun kirlenici etkiler, dört mevsimin aynı anda yaşandığı, sıcak olan aylarda artan hücre sıcaklıkları ve şehir içi altyapı sınırlamaları, sistem verimliliğini doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer alır. Söz konusu bileşenler, yapay sinir ağı (YSA) tabanlı modellemelerde giriş değişkeni olarak ayrı ayrı tanımlanarak, daha hassas ve gerçekçi tahminler yapılmasına olanak tanır. Bu yaklaşım, yalnızca teorik verim potansiyelini değil, aynı zamanda sahaya özgü dinamikleri de içeren kapsamlı bir analiz sunar.

Toplam sistem verimliliği bileşen bazlı dağılımıyla ilgili aşağıdaki veriler ışığında sütun grafiği oluşturularak veri analizi yapılmıştır.



**Şekil 2.7: Fotovoltaik(PV) Sistem Bileşen Bazlı Panel Verimliliği[7],[18],[19],[33],[32],[34].**

Şekil 2.7.'de belirtilen, İstanbul'da kurulu tipik bir fotovoltaik sistemin bileşen bazlı verimlilik oranları sunulmaktadır. Her bir bileşenin sisteme olan etkisi çarpan olarak değerlendirilmiş ve sistemin genel verimliliği yaklaşık %14.5 olarak hesaplanmıştır. Toplamda incelenen güneş paneli sisteminin, güneşten aldığı ışınım

enerjisinin yaklaşık %14.5'inin kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürüldüğü analiz edilmiştir. Bileşenler tek tek analiz edildiğinde, uygulama alanlarında karşılaşılan verimlilik oranları gözlemlenmiş olup, %14,5 verimlilik, panelin tek başına verimliliği olmayıp, tüm sistemin gerçek hava koşullarında net verimliliğidir. Bileşen bazlı verimlilik yüzdesi %14.5 seviyesinde hesaplanmış olması, sistemin çevresel etkileri açısından CO<sub>2</sub> salınımının azaltılması, sera gazlarının yayılmasının ilerlememesi ve enerji dönüşümüne katkısı göz önünde bulundurulduğunda, küreselleşme yönünden oldukça değerlidir. Gerçek saha uygulamalarında kullanıcı hataları, bakım aksaklıkları ve hava olayları gibi nedenlerle, hesaplanan sonuçtan ortaya konan oran yüzde yüz kesin sonuç vermemektedir.

**Çizelge 2.4: Bileşen Temelli Fotovoltaik Sistem Verimliliği**  
[7],[18],[19],[33],[32],[34]

<b>Bileşen</b>	<b>(<math>\eta</math>) Verimlilik</b>	<b>Kaynak</b>	<b>Referans</b>
<b>Modül</b>	0.18	Ticari kristal silikon PV panelleri genellikle %17–22 arası verime sahiptir.	IEA PVPS Report, NREL (2021),[18] Fraunhofer ISE (2023) [19]
<b>İnverter</b>	0.97	Modern string inverterler ve merkezi inverterlerde verimlilik %95–99 aralığındadır.	SMA, Huawei, Fronius gibi üretici katalogları (örneğin: Fronius Symo datasheet üzerinden okunmuştur.) [32]
<b>Kablo</b>	0.98	Uygun kesitte ve iyi planlanmış bir DC kablolamada kablo kayıpları %1–2 aralığında olur.	IEEE 1562- 2007, Sandia National Laboratories, PV Performance Modelling Collaborative [33]
<b>Sıcaklık</b>	0.95	Hücre sıcaklığı 25°C üzerindeyse her 1 °C artış için yaklaşık %0.4– 0.5 verim kaybı olur. Yaz aylarında 40– 65 °C hücre sıcaklıklarında %5–10 arası düşüş gözlemlenir.	Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes; NREL PVWatts[7]
<b>Kirlenme</b>	0.96	İstanbul gibi Şehirlerde 1–3 aylık temizlik periyotlarında %2–5 arası Kirlenme kaybı normaldir.	Saygılı et al., “ <i>Effect of Soiling on PV Panels in Urban Environments</i> ”, Energy Reports (2021) [34]

Fotovoltaik sistemlerin performansı, yalnızca panel verimliliği ile sınırlı olmayıp, sistemde yer alan tüm bileşenlerin birlikte çalışmasından doğan toplam verimliliğe bağlıdır. İstanbul ili örneği üzerinden yapılan bu çalışmada, bir PV sistemin bileşen bazlı verimlilik analizi gerçekleştirilmiş ve sistemin genel enerji

dönüşüm performansı sayısal olarak değerlendirilmiştir. Çizelge2.2.'de PV modülün üretim verimliliği (%18) ile başlamaktadır ve ardından inverter (%96), kablolama (%98), sıcaklık etkisi (%92) ile kirlenme ve gölgeleme faktörleri (%95) gibi etkenlerin her biri çarpan bazında toplam sistem verimliliğine etkisiyle ele alınmıştır[7],[18],[19],[33],[32],[34]. Tüm elde edilen veriler tablo üzerinde referansları verilen bilimsel yayınlar üzerinden elde edilerek, matematiksel işlem yapılır. Her bileşen, enerjinin sistem içerisinde taşınması ve dönüştürülmesi sürecinde belli oranlarda kayıplara neden olmakta ve bu durum toplam sistem verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde, İstanbul'un iklimsel koşulları ve çevresel etmenleri göz önüne alındığında, sistemin toplam verimliliği yaklaşık %14,5 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, ideal koşullarda %18-22 arasında olan panel verimliliğinin pratikte daha düşük değerlere gerilediğini göstermekte, bu nedenle sistem optimizasyon çalışmalarında yalnızca panel özelliklerine değil, diğer fotovoltaik (PV) sistem yardımcı bileşenlere de odaklanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu tür nicel analizler, yapay sinir ağları ile yapılacak modelleme süreçlerinde hem giriş parametrelerinin seçiminde hem de verimlilik tahmini algoritmalarının eğitiminde kritik bir rol oynamaktadır.

## 2.5 İstanbul Örneğinde Somut Bir Değerlendirme

Bu bölümde, İstanbul ili özelinde tipik bir fotovoltaik (PV) sistemin yıllık elektrik üretimi ve toplam sistem verimliliği hesaplanmıştır. Örnek sistem, 2829,07 m<sup>2</sup> inşaat alanına sahip, konut ve ticari kullanım amacıyla planlanan bir mimari yapının çatısına kurulması öngörülen fotovoltaik (PV) sistemi temel almaktadır. [Ek-2] Yapı, 31 bağımsız bölümden oluşmakta olup, çatısı kırma çatı tipindedir. [Ek-2] Sistemde modelleme olarak, her biri 720 Wp gücünde olan toplam 23 adet PV panel kullanılması planlanmıştır. Bu durumda sistemin toplam kurulu gücü:

$$P_{\text{rated}} = 23 \times 720 \text{ Wp} = 16,56 \text{ kWp}$$

Olarak belirlenmiştir. Bu hesaplama küçük bir PV sistemin yıllık üretimini gösterir. Kurulum ve yerleşim planlaması, AutoCAD ortamında hazırlanmış kuvvetli akım iç tesisat projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir [Ek-2],[Ek-3]. Projede, fotovoltaik panel dizilimi, inverter yerleşimi, kablo güzergâhları ve sistem bağlantı noktaları detaylı olarak modellenmiş; bu altyapı üzerinden enerji üretimi ve sistem verimliliğine ilişkin mühendislik hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalarda bölgenin

güneşlenme süresi, ışınım şiddeti, panel eğim ve yönelimi gibi çevresel ve teknik parametreler dikkate alınarak yıllık enerji üretimi tahmin edilmiştir. Ayrıca, sistemin bileşen bazlı verimlilik değerleri kullanılarak toplam sistem performansı ortaya konmuştur. İstanbul'da yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2182 saat/yıl olarak kabul edilmiştir. PV sistemin verimliliğini etkileyen bileşenler ve varsayılan değerler aşağıda verilmiştir:

**Çizelge 2.5: Fotovoltaik Sistem Verimlilik Parametreleri ve Kayıp Faktörleri[20],[31]**

PV panel verimi:	%18
İnverter verimi:	%96
Sıcaklık kaynaklı verim kaybı:	%4
Kirlenme kaynaklı kayıp:	%2
Kablolama ve sistem içi kayıplar:	%10
Gölgeleme etkisiyle oluşan kayıp:	%2

Bu bileşenlere göre sistemin toplam performans oranı (PR), verimlilikleri çarpılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\eta_{\text{sistem}} = 0,18 \times 0,96 \times (1-0,04) \times (1-0,02) \times (1-0,10) \times (1-0,02) =$$

$$0,18 \times 0,96 \times (1-0,04) \times (1-0,02) \times (1-0,10) \times (1-0,02)$$

$$\eta_{\text{sistem}} \approx 0,18 \times 0,96 \times 0,96 \times 0,98 \times 0,90 \times 0,98 \approx 0,144$$

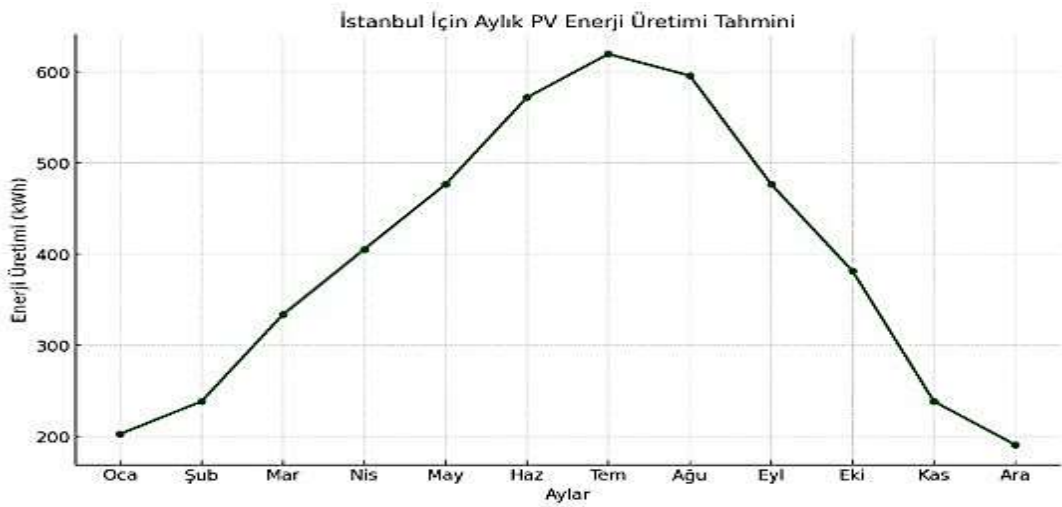
Bu durumda, performans oranı (PR) yaklaşık olarak %14,4 olarak hesaplanmaktadır. Yıllık toplam güneş ışınımı, PVGIS verilerine göre İstanbul için 1650 kWh/m<sup>2</sup>.yıl olarak alınmıştır. Bu değerlere göre sistemin yıllık enerji üretimi aşağıdaki 4 numaralı eşitlik ile hesaplanabilir:

$$E_y = P_{\text{rated}} \cdot HGT \cdot PR$$

$$E_y = 16,56 \text{ kWp} \cdot 1650 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl} \cdot 0,144 \approx 3941,95 \text{ kWh/yıl}$$

Elde edilen sonuç, İstanbul koşullarında yaklaşık 3942 kWh/yıl elektrik enerjisinin üretilebileceğini göstermektedir. Bu çıktı, hem mimari uygulama ölçeğinde çevreye duyarlı enerji üretimini desteklemekte hem de PV sistem verimliliğinin bileşen bazlı değerlendirilmesiyle modelleme doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, yapının çatısına konulacak panelin yönelimi güneybatı yönünde ve panel eğim açısı 30° olacak şekilde planlandığından, ışınım alma

kapasitesi optimize edilmiştir. Bu yaklaşım, Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi kestirimsel modelleme tekniklerinin sahaya dayalı verilerle desteklenmesinde örnek teşkil etmektedir. İstanbul'a ait aylık PV enerji üretim değerleri, şekil 2.8.'de referans olarak alındığında MGM'den elde edilen güneşlenme süresi ve ışınım verilerine dayalı olarak hesaplanmış; yaz aylarında üretimin zirveye ulaştığı, kış aylarında ise belirgin şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Somut veriler, PV sistemlerinin yıl içindeki üretim performansının büyük ölçüde güneşlenme süresi ve ışınım şiddetine bağlı olduğunu, dolayısıyla sistem tasarımında mevsimsel farklılıkların dikkate alınmasının kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 2.8: İstanbul İli için Aylık Fotovoltaik(PV) Enerji Üretimi Tahmini**

İstanbul gibi yıl içinde belirli bir güneşlenme potansiyeline sahip büyük bir metropolde, 16.56 kWp gücünde bir fotovoltaik (PV) sistemin kurulması, hem enerji tasarrufu hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle, enerji kimlik belgesi ön hesap raporuna göre toplam yıllık enerji ihtiyacı 164.483,03 kWh olan bu binada, fotovoltaik (PV) sistemin %10,24 oranında yenilenebilir enerji sağlaması, binanın karbon ayak izinin azaltılmasına doğrudan katkıda bulunmaktadır. Bu oran, özellikle şehir içi konut ve ticaret yapılarında dikkate değer bir sürdürülebilirlik göstergesidir. Şekil 2.8.'de verilen aylık üretim verileri, PV sistemlerinin performansının mevsimsel güneşlenme süresiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymakta; bu durum sistem tasarımı ve kapasite planlamasında dikkate alınması gereken önemli bir etkidir.

İstanbul'un sahip olduğu iklimsel özellikler, fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Güneş ışınımının yıl

boyunca belirli bir süreklilik göstermesi, fotovoltaik (PV) sistemlerinin verimli çalışması için elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi teknolojilerinin kent ölçeğinde yaygınlaştırılması, enerji üretiminde dışa bağımlılığı azaltmanın yanı sıra, yapıların enerji performansını artırarak sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sağlar. Özellikle konut ve ticari yapılarda çatı üstü sistem uygulamaları, mevcut altyapıya entegre edilerek ekonomik ve çevresel faydalar sunmaktadır.

Ayrıca, binanın B enerji sınıfında olması, fotovoltaik (PV) sistem entegrasyonunun sadece üretim açısından değil, aynı zamanda binanın genel enerji verimliliği sınıflamasına da olumlu katkı sunduğunu göstermektedir. Kurulan sistem sayesinde ısıtma, soğutma, sıcak su ve aydınlatma gibi enerji yoğun tüketim kalemlerinde dışa bağımlılığın azaltılması mümkündür.

Sonuç olarak, İstanbul'da bu büyüklükte bir fotovoltaik (PV) sistemin kurulması ve şehrin tüm bölgelerinde sürdürülebilmesi; bina enerji performansının artırılması, sürdürülebilirlik ilkelerinin hayata geçirilmesi ve ekonomik açıdan uzun vadeli tasarruf sağlanması açısından oldukça avantajlı bir uygulamadır. Bu sistem, İstanbul büyükşehir belediyesi sınırlarında aynı zamanda yapı sahibinin kurumsal sosyal sorumluluk hedeflerine katkı sunar ve yeşil bina değerlemesi açısından da olumlu bir profil çizer.

İncelenen mimari yapı, yıllık toplam 164.483,03 kWh enerjiye ihtiyaç duyuyor. PV sistem yılda yaklaşık 16.834,94 kWh elektrik üretimiyle, hazırlanan mimari projeler referans alınarak, enerji kimlik belgesi hazırlama programı kullanılarak çıkan şekil 2.9.'da verilen sonuca göre bu ihtiyacın %10,24'ünü karşılıyor. Bu oran sayesinde özellikle elektrik kullanım alanlarında aydınlatma, ortak alan elektrik ihtiyacı gibi sürekli tüketim alanlarında, doğrudan şebekeye bağımlılık azaltılmış oluyor. PV sistem, binaya sadece elektrik üretimi değil; enerji sınıfında yükselme, ekonomik tasarruf, karbon salımını azaltma ve sürdürülebilir bina hedeflerine ulaşma açısından çok yönlü katkı sağlamaktadır. Enerji arz güvenliği ile yıllık enerji tüketim maliyetlerinde tasarruf sağlar.

# ÖN HESAP SONUÇ FORMU

## Binanın

Tipi: Apartman  
İnşaat Ruhsat Tarihi: 01-01-2025  
Toplam Alan: 2.794,39  
İklimlendirilen Alan: 2.435,29  
UAVT Bina No:  
Adresi: Atatürk Mahallesi, Çavuşbaşı Caddesi, 11 Pafta, 794 Ada, 145 Parsel, ÜMRANIYE / İSTANBUL

NSEB

## Binanın Görüntüsü



SİSTEMLER	YILLIK ENERJİ TÜKETİMLERİ		YENİLENEBİLİR ENERJİ/ KOJEN. ENERJİ		
	Bilimsel (kWh/yıl)	Birim Alan Başına (kWh/m2/yıl)	Bilimsel (kWh/yıl)	Birim Alan Başına (kWh/m2/yıl)	
Toplam	164.483,03	67,54	18.766,78	7,71	B
Isıtma	102.525,56	42,10	0,00	0,00	B
Sıhhi Sıcak Su	44.259,45	18,17	0,00	0,00	C
Soğutma	21.396,18	8,79	0,00	0,00	D
Havalandırma	0,00	0,00			D
Aydınlatma	15.068,63	6,19			E
Kojenarasyon	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fotovoltaik			18.766,78	7,71	
Rüzgar Enerjisi			0,00	0,00	

## Belge Düzenleyenin

Adı Soyadı:

Tarih:

Firması:

İmza:

Sertifika No:

**Yapı ruhsatına esas projeye ve eklerine göre düzenlenmiş olup, Enerji Kimlik Belgesi yerine kullanılamaz.**

\*Muhtemel Yapı Ruhsatı Tarihini İfade Eder.

Şekil 2.9: İncelenen Mimari Yapı için Enerji Kimlik Belgesi Ön Hesap Sonuç Raporu

**Çizelge 2.6: İstanbul Örneğinde PV Sistem için Senaryo Bazlı Enerji Üretimi ve Verimlilik Analizi [26],[33],[36]**

Senaryo No	Senaryo Açıklaması	Performans Oranı (PR) %	Güneşlenme Süresi (Saat/Yıl)	Yıllık Üretim (kWh/yıl)	Açıklama
0 (Referans)	Mevcut Durum-16,56 kWp sistem	14,4	2182	86.112	PVGIS ışınım verileri ve sistem verim parametreleri baz alınmıştır.
1	Güneşlenme süresi %10 artarsa	14,4	2400	94.723	Mevsimsel iklimin sunmuş olduğu avantaj varsayımı
2	Panel verimliliği %20'ye yükselirse	16	2182	95.616	Yeni nesil panel kullanımı
3	Sıcaklık verim kaybı %8'e çıkarsa (toplam PR %13,2)	13,2	2182	82.093	Sıcak yaz ayları etkisi
4	Kirlenme + gölgeleme %10'a yükselirse (PR %13)	13	2182	80.530	Düşük bakım senaryosu
5	Kötümser Senaryo – Tüm olumsuzluklar	11	2000	66.240	En kötü çevresel ve yapısal koşullar

Örnek olarak değerlendirmeye alınan 11 pafta,794 ada 145 parsel Ümraniye/İstanbul adresindeki yapı inşaatında farklı olası durumlar için senaryo analizi yapılmıştır. Fotovoltaik sistemlerin performansı, coğrafi, meteorolojik ve teknik pek çok faktörün bileşimiyle belirlenmektedir. Bu nedenle, İstanbul ili özelinde kurulu gücü 16.56 kWp olan örnek bir sistem için yıllık enerji üretimi, çeşitli senaryolar altında yeniden hesaplanmış ve karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Amaç, sistem performansının farklı koşullar altında nasıl değiştiğini ortaya koymak ve tasarım optimizasyonları için öngörüler geliştirmektir.

#### **Senaryo 0: Referans Durum**

Bu senaryo, İstanbul'da yıllık ortalama 2182 saat güneşlenme süresi ve %14.4'lük sistem performans oranı (PR) temel alınarak oluşturulmuştur. Sistemin yıllık elektrik üretimi yaklaşık olarak 86.112 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu senaryo,

sistemin normal koşullarda ve standart verimlilikle çalıştığı varsayımıyla “baz alınan” durumdur.

### **Senaryo 1: Güneşlenme Sresinin %10 Artması**

Bu senaryoda, yıllık güneşlenme süresinin iklimsel olarak daha elverişli bir yılda %10 artarak yaklaşık 2400 saate çıkacağı varsayılmıştır. İstanbul ilinde, küresel ısınmanın sonuçlarıyla mevsimsel güneşlenme süreleri artmakta ve bu durum kurulu panellerin verimliliğinde değişiklikler doğurmaktadır. Performans oranı (PR) sabit tutulduğunda, yıllık enerji üretimi 94.723 kWh'ye yükselmektedir. Bu durum, iklim değişkenliği ya da yıl bazında güneşlenme artışı gibi faktörlerin sistem çıktılarına doğrudan katkısını gösterir. Yeni nesil panellerin kullanılması ile sistemin toplam üretimi önemli lde artmakta ve daha az alanda daha fazla üretim yapılabilmektedir.

### **Senaryo 2: Panel Veriminin %20 Artması**

2. senaryoda, gelişmiş panel teknolojilerinin kullanılmasıyla sistem performans oranı (PR) değerinin %14.4'ten %17.28'e çıkarıldığı varsayılmıştır. Aynı güneşlenme süresi altında yıllık üretim 95.616 kWh'ye ulaşmaktadır. Uygun değerin sağlanması için yenilenebilir enerji kaynağının doğru yn ve açıda konumlandırılması şarttır. Bu senaryo, modül teknolojisindeki ilerlemelerin ve malzeme kalitesinin enerji üretimine olan olumlu etkisini gözler önüne sermektedir.

### **Senaryo 3: Artan Sıcaklık Kaybı**

Yüksek sıcaklık koşullarında panel yüzey sıcaklığının artması, verimlilikte kayıplara neden olmaktadır. Bu senaryoda, yaz aylarında modül sıcaklığının 65 C'ye kadar yükseldiği ve bu nedenle PR oranının %13.75'e düştüğü varsayılmıştır. Yıllık retim değerini 82.093 kWh'ye gerilemiştir. İstanbul gibi yaz aylarında yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan şehirlerde bu kayıplar tasarım aşamasında mutlaka hesaba katılmalıdır.

### **Senaryo 4: Artan Kirlenme Oranı**

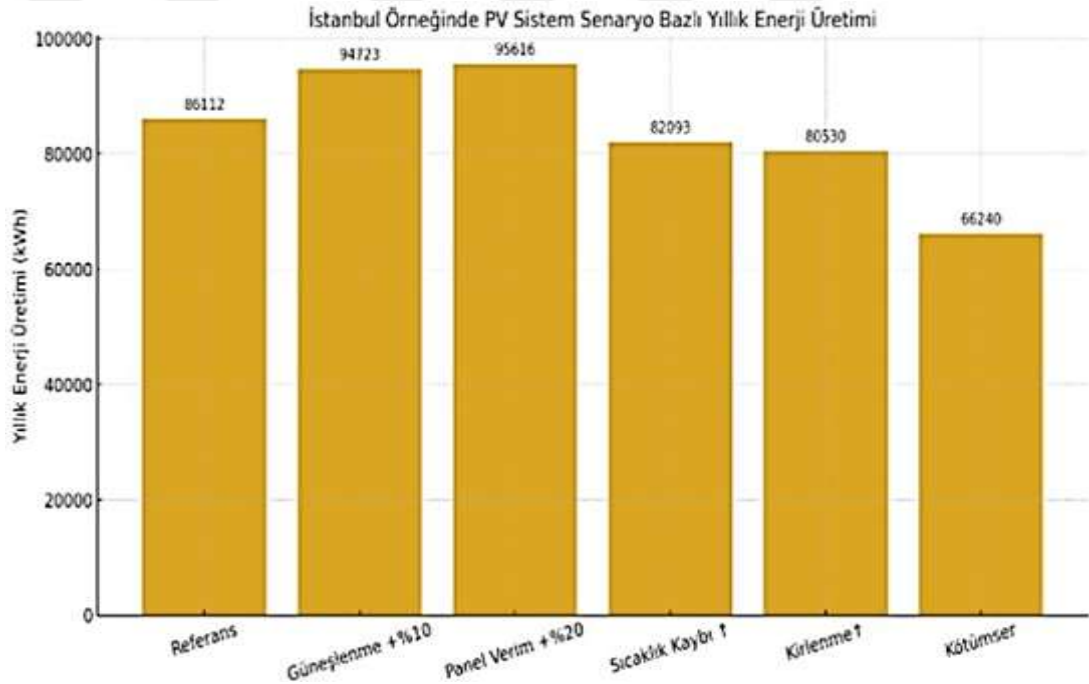
Panel yüzeylerinin düzenli temizlenmemesi, kent ölçeğinde meydana gelen tozlanma veya hava kirliliği gibi nedenlerle verimde %0.9 oranında bir düşüş oluştuğu ve performans oranının(PR) %13.5'e gerilediği varsayılmıştır. Bu durumda

yıllık enerji üretimi 80.530 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu senaryo, bakım-onarım stratejilerinin sistem verimliliği üzerindeki önemini vurgulamaktadır.

### Senaryo 5: Kötümser Senaryo (Güneşlenme %10 Az, PR %12.5)

En olumsuz koşulları yansıtmak amacıyla, hem güneşlenme süresi %10 azalarak 1964 saate düşürülmüş, hem de PR %12.5 olarak kabul edilmiştir. Bu şartlarda sistemin yıllık üretimi 66.240 kWh'ye kadar gerilemektedir. Bu senaryo, sistemin verimsiz koşullarda dahi minimum performans sınırlarını göstermesi açısından önemlidir.

Şekil 2.10.'da verilen grafik, İstanbul'da örnek bir fotovoltaik sistem için farklı senaryolarda beklenen yıllık enerji üretim değerlerini karşılaştırmaktadır. Senaryolar, temel girdilerdeki değişimlere göre oluşturulmuştur.



**Şekil 2.10: İstanbul İli Örneğinde Fotovoltaik (PV) Sistem Senaryo Bazlı Yıllık Enerji Üretimi**

Yukarıdaki şekilde (şekil 2.10.) verilen veri analizinden açıkça görülmektedir ki, sistem performansı birçok değişkene bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Güneşlenme süresi ve panel verimi gibi olumlu değişkenlerin sistem çıktısını artırdığı, sıcaklık ve kirlenme gibi olumsuz etkenlerin ise üretimi düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle sistem kurulumu aşamasında yalnızca teorik kurulu güce değil, bölgesel iklim verilerine, panel yerleşim yönüne, panel-inverter kalitesine ve bakım planlamalarına da dikkat edilmesi gerektiği açıktır. Sırasıyla, referans senaryo:

sistemin ortalama koşullarda İstanbul şehri örneğindeki bir metropolün nasıl çalıştığını göstermektedir. En yüksek üretim, panel verim oranının artırıldığı senaryoda gözlemlenmektedir. Bu üretimin aksine, en düşük üretim ise kötümser senaryoda gerçekleşmektedir.



### **3. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE FOTOVOLTAİK SİSTEM PERFORMANSININ TAHMİNİ**

Günümüzde büyük veri kümelerinden anlamlı bilgiler elde etme süreci olan veri madenciliği, karar destek sistemlerinden mühendislik hesaplamalarına kadar pek çok alanda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde, çevresel parametrelerin karmaşık yapısı ve öngörülemezliği konvansiyonel analiz yöntemlerinin yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Bu doğrultuda, veri madenciliği tekniklerinin bir üst evresi olarak değerlendirilen yapay zekâ temelli modeller, fotovoltaik sistem performansının tahmini açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul ili özelinde elde edilen meteorolojik veriler kullanılarak, yapay sinir ağları yardımıyla güneş ışınımı şiddeti üzerinden PV sistemlerinin verimlilik düzeyleri öngörülmeye çalışılmıştır. Amaç, yapay zekâ tekniklerinin, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik bağlamında nasıl stratejik avantajlar sağlayabileceğini ortaya koymaktır.

#### **3.1 Yapay Zekâ Uygulamaları ve Tahminleme Yöntemleri**

Yapay zekâ, insan benzeri düşünme, motor becerilerini kullanma, öğrenme ve karar verme yetilerini taklit edebilen sistemlerin oluşturulmasına yönelik kuramlardan oluşan kapsamlı bir teknolojik buluştur. Bu buluş olarak isimlendiren sistemler öğrenme, çıkarım yapma, örüntü tanıma, planlama ve problem çözme gibi bilişsel işlevleri yerine getirebilir. Yapay Zeka'nın (YZ) temel hedefi, karmaşık problemleri çözebilen, öğrenebilen ve uyarlanabilen makinelerin tasarlanmasıdır [30]. Son yıllarda özellikle enerji sektöründe yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı önemli bir artış göstermiştir. Bu yöntemler, özellikle değişken çevresel koşullar altında enerji üretimi ve tüketiminin modellenmesi, tahmin edilmesi ve optimizasyonunda tercih edilmektedir.

Fotovoltaik (PV) sistemlerin performansı, büyük ölçüde atmosferik koşullara bağlıdır. Güneşlenme süresi, ışınım şiddeti, sıcaklık, nem, basınç ve rüzgâr hızı gibi faktörler, fotovoltaik (PV) panellerin çalışma hızını doğrudan etkileyen

değişkenlerdir[28]. Bu tür çevresel değişkenlerin tahmin edilmesi, sistem tasarımı ve yatırım planlaması açısından kritik öneme sahiptir. Ancak bu değişkenler genellikle doğrusal olmayan, karmaşık ilişkilere sahiptir. Bu noktada yapay sinir ağları (YSA), bu karmaşıklığı modellemede etkili bir araç olarak ön plana çıkmaktadır [12].

Yapay sinir ağları, insan beyninin sinaptik işleyişini taklit eden matematiksel yapılar olup, veriler arasındaki ilişkiyi öğrenerek tahminler yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu öğrenme süreci, özellikle geçmiş verilerin gelecekteki eğilimleri öngörmeye kullanılması açısından önemlidir. Zaman serisi verileriyle çalışan yapay sinir ağları, hem kısa vadeli hem de mevsimsel değişimleri hesaba katabilecek biçimde yapılandırılabilir. Bu bağlamda, güneş ışıınımı gibi meteorolojik büyüklüklerin tahmininde sıklıkla tercih edilmektedir[21]. Tahminleme problemleri yapılan analizler sonucunda genel olarak üç ana yöntem altında sınıflandırılabilir: istatistiksel yöntemler, fiziksel modeller ve yapay zekâ tabanlı yöntemler. İstatistiksel modeller (örneğin regresyon, ARIMA) genellikle geçmiş verilerden belirli desenleri çıkarır ancak bahsedilen modeller doğrusal olmayan sistemlerde yeterli ölçekte, sınırlı başarı gösterirler. Fiziksel modeller ise atmosferik olayları fizik yasalarına göre simüle eder ancak yüksek hesaplama gücü ve detaylı veri gereksinimi nedeniyle çoğu zaman kullanışsız hale gelebilir. Bu nedenle YSA, düşük maliyetli, esnek ve öğrenen bir yaklaşım olarak enerji sistemlerinde tercih edilen bir tahmin yöntemi hâline gelmiştir [22].

YSA'nın başarısı, öğrenme algoritmasına, ağ mimarisine ve kullanılan aktivasyon fonksiyonlarına bağlıdır. Özellikle Levenberg-Marquardt algoritması gibi gelişmiş öğrenme teknikleri, küçük ve orta boyutlu veri setlerinde hızlı ve düşük hatalı sonuçlar üretebilir. Literatürde yapılan birçok çalışmada, YSA'nın güneş ışıınımı tahmini, panel verimliliği, sıcaklık etkisi gibi konularda yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir[26],[28].

Ayrıca yapay zekâ teknikleri bir yandan yalnızca tahmin amacıyla değil; hata tespiti, robotik, arıza tahmini, enerji yönetim stratejileri ve yük dengeleme gibi alanlarda da fotovoltaiik (PV) sistem performansının iyileştirilmesine katkı sunmaktadır. Günümüzde gelişen sensör teknolojileri ve IoT cihazları ile birlikte bu tür tahmin modelleri gerçek zamanlı uygulamalarda da kullanılabilir hâle gelmiştir. Bu durumda cihaz ile ağ sistemi arasında hem de cihazlar arasında uygulanabilirliği pekiştirir.

Bununla birlikte, yapay sinir ağıları (YSA) uygulamalarında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar bulunmaktadır. Aşırı öğrenme (overfitting), modelin sadece eğitim verilerine aşırı uyum sağlaması nedeniyle genelleme kabiliyetinin zayıflamasına yol açabilir. Bu nedenle model karmaşıklığı ve eğitim süreci dikkatle yönetilmelidir. Ayrıca giriş verilerinin kalitesi, modelin tahmin başarısını doğrudan etkiler. Eksik veya bozuk veriler, sonuçların doğruluğunu düşürebileceğinden veri ön işleme (normalizasyon, eksik veri tamamlama vb.) aşaması son derece önemlidir.

Sonuç olarak, yapay zekâ temelli tahminleme sistemleri, PV sistemlerin performans tahmininde etkili ve yenilikçi bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemler, hem sürdürülebilir enerji yönetimine katkı sağlamakta hem de gelecekteki enerji üretim planlarının daha doğru şekilde yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Bu tez kapsamında da, İstanbul ili özelinde YSA kullanılarak PV sistem performansı üzerinde belirleyici rol oynayan meteorolojik faktörlerin analiz edilmesi ve ışınım tahmini gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Yapay sinir ağlarının eğitimi, temel olarak doğrusal olmayan fonksiyonları optimize etmeye yönelik yinelemeli yaklaşımlara dayanır. Bu bağlamda, geri yayılım (backpropagation) algoritması, kayıp fonksiyonu ile çıktı arasındaki farkı neredeyse sifıra yaklaştırmak amacıyla, zincir kuralı kullanarak ağırlıkların türevlerini hesaplayan temel bir yöntemdir[29]. Ancak geri yayılımın etkinliği, uygun bir optimizasyon algoritması ile desteklenmediği sürece sınırlı kalabilir. Bu noktada Stokastik Gradyan İnişi (SGD) algoritması, hem hesaplama maliyetini düşürmesi hem de büyük veri kümeleriyle çalışabilmesi açısından önemli bir avantaj sunar[3]. SGD, her iterasyonda parametreleri, örneklerin küçük alt kümelerinden elde edilen gradyanlara göre güncelleyerek, yakınsama sürecinde hem hız hem de esneklik sağlar. Bununla birlikte, SGD'nin kararsız yakınsama davranışı gibi bazı sınırlılıkları nedeniyle, Momentum, AdaGrad, RMSProp ve Adam gibi türev yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, öğrenme oranlarını dinamik olarak uyarlayarak hem yerel minimumlarda sıkışmayı engeller hem de öğrenme sürecini kararlı hale getirir [23]. Dolayısıyla, güncel derin öğrenme modellerinin başarısında yalnızca mimari değil, bu tür gelişmiş optimizasyon tekniklerinin kullanımı da belirleyici bir rol oynamaktadır.

Yapay Sinir Ağları (YSA), tahminleme süreçlerinde esnek yapısı ve yüksek öğrenme kapasitesi sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. YSA tabanlı

tahminleme teknikleri, genellikle ağın mimarisine, öğrenme yöntemine ve tahmin stratejisine göre sınıflandırılmaktadır. İleri beslemeli ağlar, temel tahmin görevlerinde sıkça tercih edilirken; zaman bağımlı verilerle çalışmak için geri beslemeli yapılar ve uzun-kısa süreli bellek temelli modeller daha uygundur. Ayrıca, tahminin zaman ufkuna bağlı olarak tek adımlı ya da çok adımlı stratejiler izlenebilir. Örneğin; son 7 günün hava durumu verileri ile gelecek 3 günü tahmin etmek gibi. Bu sınıflandırmalar, modelin kullanım amacına uygun şekilde yapılandırılmasına olanak tanır ve özellikle enerji, finans, çevre gibi alanlarda daha güvenilir ve kararlı öngörüler elde edilmesini sağlar. YSA'nın öğrenmeye dayalı yapısı, klasik yöntemlerin ötesine geçerek karmaşık sistem davranışlarının daha doğru biçimde modellenmesini mümkün kılar.

Yapay Sinir Ağları (YSA), enerji sistemlerinin yönetimi ve optimizasyonunda giderek artan bir öneme sahiptir. Enerji üretimi ve tüketim verilerinin yüksek boyutlu, veri girdilerinin ağırlıkları toplamı olmayan ve zamana bağlı dinamik yapısı, geleneksel yöntemlerle modellenmesini zorlaştırmaktadır. Bu noktada YSA, veriden öğrenme yeteneği sayesinde enerji talebi tahmini, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim öngörüsü ve enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde etkin çözümler sunar. Özellikle fotovoltaiik (PV) sistemler, rüzgar türbinleri ve akıllı şebeke uygulamalarında YSA modelleri, çevresel değişkenlerin karmaşık etkilerini başarılı şekilde yakalayarak enerji verimliliğini artırır ve sistem kararlılığını sağlar. Ayrıca, enerji depolama ve yük tahmininde gerçek zamanlı adaptasyon yeteneği ile enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. Bu nedenlerle YSA, enerji sektöründe hem operasyonel karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde hem de uzun vadeli planlama süreçlerinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

### **3.2 Kullanılan Veri Seti ve Değişkenlerin Belirlenmesi**

Yapay sinir ağı tabanlı tahmin modellerinde, modelin başarısı doğrudan kullanılan veri setinin kalitesi ve seçilen değişkenlerin uygunluğuna bağlıdır. Bu çalışmada, İstanbul iline ait güneş enerjisi potansiyelinin modellenmesi amacıyla aylık bazda ölçülen meteorolojik veriler kullanılmıştır. Veri seti, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü (DMGM) tarafından sağlanan ve düzenli olarak arşivlenen istatistiksel iklim verilerinden oluşturulmuştur. Veriler,

İstanbul'un yıllık güneşlenme karakteristiklerini yansıtan 12 aylık ölçüm periyoduna sahiptir. Kullanılan veriler 2023-2024 yıllarına aittir.

Bu çalışmada yapay sinir ağı modelinin giriş parametrelerini oluşturan değişkenler beş ana grupta toplanmıştır:

1. **Aylık Açık Gün Sayısı (gün):** Bu veri, ay içerisinde güneşin bulutsuz ya da minimum bulut örtüsü ile görülebildiği gün sayısını ifade etmektedir. Güneş ışınımı doğrudan bu parametre ile ilişkilidir; açık gün sayısı arttıkça, alınan toplam ışınımın da artması beklenir.
2. **Aylık Ortalama Bağlı Nem (%):** Havanın nem içeriği, güneş ışınlarının atmosferdeki dağılımını ve zayıflamasını etkileyen bir değişkendir. Yüksek nem oranları, ışınımın yeryüzüne ulaşmasını sınırlayabilir.
3. **Aylık Ortalama Atmosfer Basıncı (hPa):** Atmosfer basıncı, güneş ışınlarının atmosfer içerisindeki kırılma ve yayılma biçimini etkileyebilecek önemli bir parametredir. Aynı zamanda genel hava durumu koşullarıyla da doğrudan ilişkilidir.
4. **Aylık Ortalama Sıcaklık (°C):** Sıcaklık, hem hava kütlelerinin hareketini hem de nem ve basınç gibi diğer meteorolojik parametreleri etkileyerek dolaylı yoldan güneş ışınımı üzerinde belirleyici olabilir.
5. **Aylık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s):** Rüzgar, atmosferin yatay yöndeki hareketi olup bulut dağılımı ve hava temizliği üzerinde etkilidir. Bu sayede güneş ışınlarının geçiş yolları değişebilir; bu nedenle rüzgar hızı da modelde dikkate alınmıştır.

Bu beş parametre, yapay sinir ağı modeline giriş olarak verilmiş; modelin çıkış parametresi ise aylık toplam güneş ışınımı şiddeti (kWh/m<sup>2</sup>) olarak tanımlanmıştır. Bu bağımlı değişken, modelin öğrenmesini sağlayan temel ölçüttür ve doğrudan güneş enerjisi sistemlerinin potansiyel verimliliği ile ilişkilidir. Yapay sinir ağı açısından değerlendirildiğinde, bu çıkış değişkeni modelin öğrenme sürecinde hedef değer olarak kullanılır. Giriş verileri ile bu hedef değer arasında kurulan ilişkiler, modelin nöron ağı yapısında sinaptik ağırlıklar üzerinden kodlanır. Bu sayede model, geçmiş verilerden öğrendiği örüntülere dayanarak, gelecekteki güneş ışınımı seviyelerini tahmin edebilecek bir yetenek kazanır. Güneş ışınımı şiddeti, yalnızca enerji üretimi ile sınırlı bir önem taşımaz. Aynı zamanda, PV sistemlerin

boyutlandırılmasında, panel eğim açılarının belirlenmesinde, enerji verimliliği analizlerinde ve şebeke bağlantılı sistemlerin tasarımında da temel belirleyici rol üstlenir. Bu nedenle doğru bir tahminleme, sistem verimliliğini artırmanın yanı sıra yatırım maliyetlerini optimize etmeye ve uzun vadeli sürdürülebilirlik planlarının oluşturulmasına da katkı sağlar. Ayrıca bu değişken, meteorolojik etkenlerin bütünlüklü bir çıktısı olarak kabul edilebilir. Diğer bir ifadeyle; sıcaklık, nem, açık gün sayısı, rüzgar hızı ve atmosfer basıncı gibi değişkenlerin birlikte oluşturduğu fiziksel ortamın, güneş ışınımı üzerindeki bileşik etkisi model tarafından bu çıkış parametresi aracılığıyla temsil edilmektedir. Bu noktada, yapay sinir ağlarının doğrusal olmayan çoklu etkileşimleri öğrenme yeteneği devreye girerek, söz konusu meteorolojik veriler ile ışınım düzeyi arasındaki karmaşık ilişkiyi başarıyla modelleyebilmektedir. Modelleme sürecinde, veri setinin bütünlüğünü korumak ve modelin genelleme kabiliyetini artırmak amacıyla bazı ön işlemler uygulanmıştır:

- **Eksik Veri Kontrolü ve Temizleme:** İlk olarak, veri setinde eksik veya olağan dışı değerler olup olmadığı analiz edilmiş; gerekiyorsa bu veriler çıkarılmış veya uygun yöntemlerle doldurulmuştur.
- **Veri Normalizasyonu:** Farklı birimlerdeki verilerin aynı ölçeğe getirilmesi amacıyla tüm parametreler 0 ile 1 aralığına normalize edilmiştir. Bu işlem, yapay sinir ağlarında daha dengeli bir öğrenme süreci sağlar.
- **Korelasyon Analizi:** Giriş parametreleri ile hedef değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için korelasyon katsayıları hesaplanmış; güçlü ilişki gösteren parametrelerin model başarısını artıracakları varsayılmıştır.
- **Veri Setinin Bölünmesi:** Veri seti eğitim (%70), doğrulama (%15) ve test (%15) alt kümelerine ayrılmıştır. Bu yöntem, modelin yalnızca öğrenmeye değil, aynı zamanda genelleme kabiliyetine sahip olup olmadığını test etme imkânı sağlar.

Modelin eğitimi sürecinde Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmış olup bu yöntem, küçük ve orta ölçekli ağlarda yüksek öğrenme başarısı sağlamasıyla bilinir. Bu algoritmanın uygulanabilmesi için modelin türevsel hata fonksiyonları tanımlanmış ve öğrenme katsayıları dikkatlice ayarlanmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak tangent sigmoid (tansig) fonksiyonu tercih edilmiş; performans ölçütü olarak ise ortalama kare hata (MSE) kullanılmıştır. Modelin mimarisi, bir giriş katmanı, bir

ya da birden fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Giriş katmanında beş nöron (beş değişken), çıkış katmanında ise bir nöron (tahmin edilen ışınlım değeri) bulunmaktadır. Gizli katmanlardaki nöron sayısı, farklı kombinasyonlar denenerek optimum yapı belirlenmiştir. Bu yapı sayesinde model, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme ve genelleme yeteneği kazanmıştır. Sonuç olarak, İstanbul özelinde seçilen meteorolojik veriler, güneş ışınlım tahminlerinde anlamlı öngörüler sunabilecek düzeydedir. Verilerin düzenli ve güvenilir kaynaklardan elde edilmiş olması, modelin doğruluğunu desteklerken; özenle seçilen değişkenler ve uygulanan ön işlemler, YSA modelinin başarımını önemli ölçüde artırmıştır. Bu kapsamda geliştirilen sistem, İstanbul'un güneş enerjisi potansiyelini simüle ederek matematiksel olarak temsil edebilecek nitelikte özgün ve güvenilir bir yapı sunmaktadır.

### **3.3 Yapay Sinir Ağı (YSA) Model Yapısı ve Parametre Ayarları**

Bu çalışmanın bu bölümünde, fotovoltaik sistemlerin performans tahmini için kullanılan yapay sinir ağı modeli, güneş ışınlım şiddetinin meteorolojik değişkenlere bağlı olarak öngörülmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, çok katmanlı algılayıcı (Multi-Layer Perceptron – MLP) yapısı tercih edilmiştir. MLP yapısı, doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri modelleyebilme yeteneği ve tahmin performansının yüksekliği nedeniyle ideal bir seçenek sunmaktadır. Güneşlenme süresi, sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı ve atmosfer basıncı gibi meteorolojik değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin doğrusallıktan uzak bir yapıda olması, bu tür bir öğrenme modelinin kullanımını gerektirmiştir.

#### **3.3.1 Katman yapısı ve nöron sayısı**

Kurulan yapay sinir ağı modeli üç temel katmandan oluşmaktadır. Literatürde de bilinen bu katmanlar, şu şekildedir; giriş, gizli ve çıkış katmanı. Giriş katmanında yer alan beş nöron, modele dâhil edilen beş meteorolojik değişkeni temsil etmektedir. Bunlar sırasıyla açık gün sayısı, ortalama sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı ve atmosferik basınçtır. Bu yapı, çevresel faktörlerin güneş ışınlım üzerindeki etkisini bütünsel biçimde değerlendirebilmek amacıyla oluşturulmuştur. Bu değerlendirme ile İstanbul ili genelinde yapılabilecek bir fotovoltaik sistemin verimliliğinin tahminlendirilmesi sağlanacaktır. Çıkış katmanı ise yalnızca bir nöronla oluşmakta olup, modelin hedef

çıktısı olan günlük toplam güneş ışınımı şiddetini ( $kWh/m^2$ ) ifade etmektedir. Yapay sinir ağlarının tasarımında, gizli katmandaki nöron sayısı model başarımını doğrudan etkileyen temel yapılandırma parametrelerinden biridir. Bu nedenle, söz konusu parametre deneysel yöntemlerle optimize edilmiştir. Gerçekleştirilen çok sayıda test ve çapraz doğrulama çalışmaları sonucunda, tek gizli katmanda 10 nöron kullanımıyla en dengeli sonuçların elde edildiği belirlenmiştir. Bu yapı, modelin karmaşık veri örüntülerini yeterli düzeyde öğrenmesine imkân tanırken, aynı zamanda aşırı öğrenme (overfitting) riskini minimize etmiştir. Daha düşük nöron sayıları modelin öğrenme kapasitesini sınırlandırırken, daha yüksek nöron sayıları genelleme hatalarını artırarak modelin doğruluğunu olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle seçilen yapı, doğruluk ve genelleme kabiliyeti açısından optimum bir denge sunmuştur.

### 3.3.2 Aktivasyon fonksiyonu

Yapay sinir ağlarının en temel yapı taşlarından biri olan aktivasyon fonksiyonları, her bir nöronun girdiye nasıl tepki vereceğini belirleyen matematiksel işlemlerdir. Doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesi açısından büyük önem taşıyan bu fonksiyonlar, ağın girişler ile çıktılar arasındaki karmaşık örüntüleri öğrenmesini sağlar. Aktivasyon fonksiyonu kullanılmadığı takdirde, ağın tüm katmanları yalnızca doğrusal işlemler gerçekleştireceğinden, ne kadar derin olursa olsun modelin ifade gücü kısıtlı kalır. Bu nedenle, özellikle regresyon ve sınıflandırma gibi görevlerde, doğrusal olmayan yapıların yakalanabilmesi için uygun bir aktivasyon fonksiyonu seçimi kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, hem gizli katmanda hem de çıkış katmanında tangent sigmoid (tansig) aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir. Tansig fonksiyonu, trigonometrik koordinat düzlemi baz alındığında birim çember üzerindeki giriş değerlerini -1 ile +1 arasına sıkıştırarak çıktılarda denge sağlar ve ekstrem değerlerin model üzerinde etkin hale gelmesini önler. Bu özellik, ağın daha kararlı bir şekilde öğrenmesini destekler.

Bu fonksiyon, özellikle sürekli türevlenebilir yapısı sayesinde geri yayılım algoritmasıyla yapılan eğitim sürecinde türev hesaplarını kolaylaştırır. Böylece hata geriye doğru daha düzgün yayılır ve ağırlık güncellemeleri daha istikrarlı gerçekleşir. Bu durum, eğitim süresinin kısalmasına ve ağın daha verimli öğrenmesine katkı

sağlar[12],[20]. Güneş ışınımı gibi meteorolojik büyüklüklerle çeşitli çevresel faktörler arasında çoğunlukla doğrusal olmayan karmaşık ilişkiler bulunmaktadır.

Bu çalışmada tansig fonksiyonunun tercih edilmesinin bir diğer nedeni de tam olarak bu yapıyı başarıyla modelleyebilmesidir. Giriş değişkenleri ile hedef çıktılar (güneş ışınımı değerleri) arasındaki ilişki, lineer modellerin ötesinde bir öğrenme kabiliyeti gerektirdiğinden, tansig fonksiyonu doğrusal olmayan dönüşümüyle ağıın genelleme performansını artırmıştır.

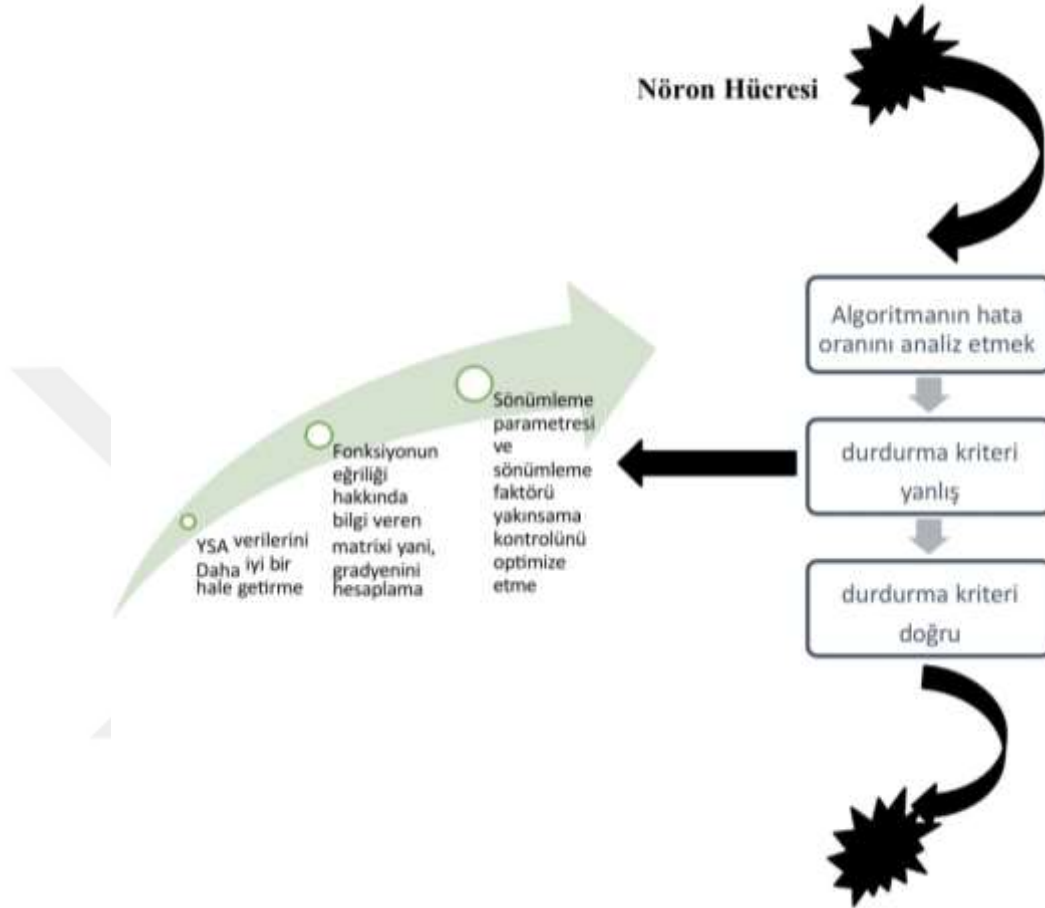
Yapılan analizler sonucunda, tansig fonksiyonu kullanılarak eğitilen modelin elde ettiği yüksek regresyon katsayısı (R) değerleri, bu tercihin doğruluğunu ortaya koymuştur. Hem eğitim hem de test verisi üzerindeki performans göstergeleri, aktivasyon fonksiyonunun model başarımındaki belirleyici rolünü destekler niteliktedir. Sonuç olarak, aktivasyon fonksiyonu seçimi yalnızca teknik bir ayrıntı değil, yapay sinir ağının öğrenme kapasitesini ve genelleme yeteneğini doğrudan etkileyen stratejik bir karardır. Bu çalışmada tansig fonksiyonunun kullanılması, modelin hem doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlamış hem de eğitim sürecini daha verimli hâle getirmiştir.

### **3.3.3 Eğitim algoritması**

Yapay sinir ağlarının etkin biçimde eğitilebilmesi, yalnızca uygun bir ağ mimarisi ile değil, aynı zamanda doğru bir öğrenme algoritmasının seçimiyle mümkündür. Bu bağlamda, söz konusu çalışmada ağın öğrenme sürecini optimize etmek amacıyla Levenberg-Marquardt (LM) algoritması (MATLAB ortamında trainlm eğitim fonksiyonu) tercih edilmiştir. Bu algoritma, klasik gradyan iniş (gradient descent) yönteminin basitliğini ve Newton tabanlı optimizasyon yöntemlerinin hızını birleştirerek, ağ parametrelerinin en uygun değerlere daha hızlı ve istikrarlı biçimde ulaşmasını sağlamaktadır[12].

Levenberg-Marquardt algoritması, hata fonksiyonunun ikinci türevine (Hessian matrisi) doğrudan ihtiyaç duymadan, bu matrisi yaklaşık olarak hesaplayarak model eğitimi sırasında daha hızlı yakınsama (convergence) sağlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle çok sayıda parametre içeren modellerde, klasik gradyan iniş yöntemlerinin karşılaştığı yavaş öğrenme sorununu önemli ölçüde ortadan kaldırmaktadır[6]. Aşağıdaki diyagram (Şekil 3.1.), Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak bir yapay sinir ağının eğitimi sürecini adım adım

göstermektedir. Eğitim süreci, ilk olarak hata (kayıp) fonksiyonunun, gradyan vektörünün ve yaklaşık Hessian matrisinin hesaplanmasıyla başlar. Sonraki adımlarda, her iterasyonda kayıp fonksiyonunu minimize etmek amacıyla sönümlenme katsayısı dinamik olarak ayarlanarak ağırlıklar güncellenir.



**Şekil 3.1: Levenberg-Marquardt Algoritması ile Bir Sinir Ağının Eğitim Süreci İçin Bir Durum Diyagramı [6]**

LM algoritmasının öne çıkan bir diğer avantajı da, özellikle küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde yüksek doğruluk sağlayabilmesidir. Güneş ışınımı gibi çevresel verilerin tahmininde, hata fonksiyonunun hızlı şekilde hata miktarını asgariye indirmek, hem eğitim süresini azaltmakta hem de tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Bu nedenle, yüksek hassasiyet gerektiren bu çalışma bağlamında LM algoritması, diğer klasik yöntemlere kıyasla daha uygun bir tercih olmuştur.

Sonuç olarak, Levenberg-Marquardt algoritması, güçlü matematiksel temeli ve hızlı yakınsama kabiliyeti ile yapay sinir ağlarının etkin bir şekilde eğitilmesini sağlamaktadır. Bu algoritmanın kullanımı, modelin hem eğitim doğruluğunu artırmış hem de genel performansını olumlu yönde etkilemiştir.

### 3.3.4 Doğrulama ve test süreci

Yapay sinir ağı (YSA) modelinin yalnızca eğitim verisine değil, daha önce karşılaşmadığı veriler üzerinde de yeterli performans gösterebilmesi, modelin genelleme yeteneğini doğrudan etkileyen temel bir gerekliliktir. Bu doğrultuda, kullanılan veri seti rastgele yöntemle %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olacak şekilde üç alt kümeye ayrılmıştır. Bu oranlar, literatürde önerilen standart veri dağılım stratejileriyle uyumlu olup, modelin hem öğrenme hem de genelleme performansını etkin biçimde değerlendirme amacı taşımaktadır [12]. Benzer şekilde bu tezde de, önerilen oranlar temel alınarak veri dağılımı yapılmış ve modelleme sürecinde karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

- Eğitim kümesi, ağın ağırlık ve bias değerlerini öğrenebilmesi amacıyla doğrudan modelin eğitildiği veri grubudur. Bu veri setinde elde edilen hata değeri, modelin iç yapısına ne derece uyum sağladığını göstermektedir.
- Doğrulama kümesi, modelin eğitim sırasında aşırı öğrenmeye (overfitting) maruz kalıp kalmadığını izlemek amacıyla kullanılmaktadır. Eğitim hatası düşerken doğrulama hatasının artmaya başlaması durumunda, gündelik hayatta karşılaşılabileceği için modelin ezberleme eğilimine girdiği kabul edilmekte ve erken durdurma (early stopping) mekanizması devreye sokularak eğitim süreci sonlandırılmaktadır. Bu strateji, modelin yalnızca eğitim verisine değil, daha geniş veri yelpazesine uyum sağlayacak şekilde optimize edilmesini sağlar [6].
- Test kümesi ise tamamen bağımsız bir veri grubudur ve modelin gerçek hayattaki bilinmeyen örnekler üzerindeki tahmin başarısını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu kısımda yüksek performans gösteren bir model, güvenilir ve uygulanabilir bir yapay zeka çözümü olarak değerlendirilebilir[30].

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	7	1000
Elapsed Time	-	00:00:00	-
Performance	0.192	3.29e-19	0
Gradient	0.608	9.66e-10	1e-07
Mu	0.001	1e-10	1e+10
Validation Checks	0	6	6

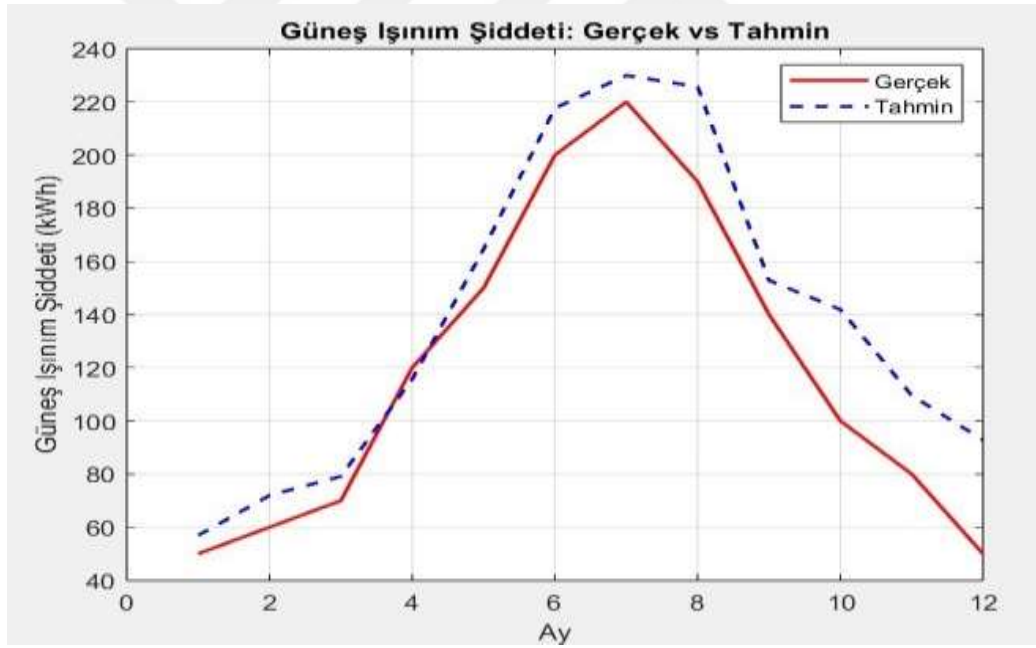
**Training Algorithms**

Data Division: Random dividerand  
Training: Levenberg-Marquardt trainlm  
Performance: Mean Squared Error mse  
Calculations: MEX

**Şekil 3.2: YSA Eğitim Model Performansı**

MATLAB ortamında Levenberg–Marquardt algoritması kullanılarak eğitilen yapay sinir ağı modeli, oldukça başarılı bir performans sergilemiştir. Doğrusal olmayan regresyon analizinde, modelin hedef değer olan 0'a son derece yakın bir yakınsama gösterdiğini ve veri setindeki varyansı %99.9'dan fazla açıkladığını ( $R^2 \approx 1$ ) ortaya koymaktadır. Eğitim süreci yalnızca 7 epokta tamamlanmış, hedeflenen 1000 epokluk üst sınıra ulaşılmadan önce modelin doğruluğu yeterli düzeye gelmiştir. Eğitim başlangıcında 0.192 olan ortalama kare hata (MSE) değeri, yalnızca birkaç epokta  $3.29 \times 10^{-19}$  seviyelerine düşerek oldukça hassas bir öğrenme gerçekleştiğini göstermektedir. Modelin eğim (gradient) değeri 0.608'den  $9.66 \times 10^{-10}$ 'a gerilerken, Levenberg–Marquardt algoritmasının davranışını belirleyen dengeleme katsayısı olan ve Şekil 3.2. de belirtilen Mu parametresi de 0.001'den  $1 \times 10^{-10}$  seviyesine inmiştir. Bu durum, ağın minimum hata düzeyine ulaştığını ve öğrenme sürecinin Newton benzeri öğrenme algoritmasına, kararlı bir faza geçtiğini göstermektedir. Ayrıca, doğrulama verisi üzerinde 6 ardışık epokta iyileşme gözlenmemesi nedeniyle erken durdurma gerçekleştirilmiş ve bu sayede aşırı öğrenme (overfitting) riski ortadan kaldırılmıştır. Genel olarak, önerilen modelin yüksek doğrulukla tahmin yeteneği sunduğu, hızlı ve kararlı bir şekilde öğrenmeyi başardığı, MATLAB ortamında yürütülen Levenberg–Marquardt algoritmasının küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde etkin bir çözüm sunduğu anlaşılmaktadır.

Model performansı, hem sayısal hem de grafiksel olarak analiz edilmiştir. Özellikle Ortalama Kare Hata (MSE - Mean Squared Error) ve Regresyon Katsayısı (R), modelin doğruluk derecesini ölçmede temel ölçütler olarak kullanılmıştır. Eğitim sonunda elde edilen R değerinin 0.99'a yakın olması ve MSE değerinin minimum düzeyde kalması, modelin doğrusal olmayan örüntüleri başarıyla öğrendiğini ve tahmin performansının yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, daha önce yapılan analizlerde elde edilen sonuçlara göre, test verileri üzerinde de benzer başarı gözlemlenmiştir. Bu durum, YSA modelinin yalnızca öğrenme sürecine değil, genelleme yeteneğine de sahip olduğunu doğrulamaktadır. Erken durdurma stratejisiyle desteklenen eğitim süreci, modelin fazla öğrenmesini engelleyerek daha istikrarlı ve güvenilir bir yapı ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bu aşamalı değerlendirme süreci, modelin tutarlılığını, doğruluğunu ve uygulama güvenilirliğini desteklemekte; çevresel verilerin tahmini gibi karmaşık problemlerde YSA tabanlı modellerin etkinliğini bir kez daha kanıtlamaktadır.

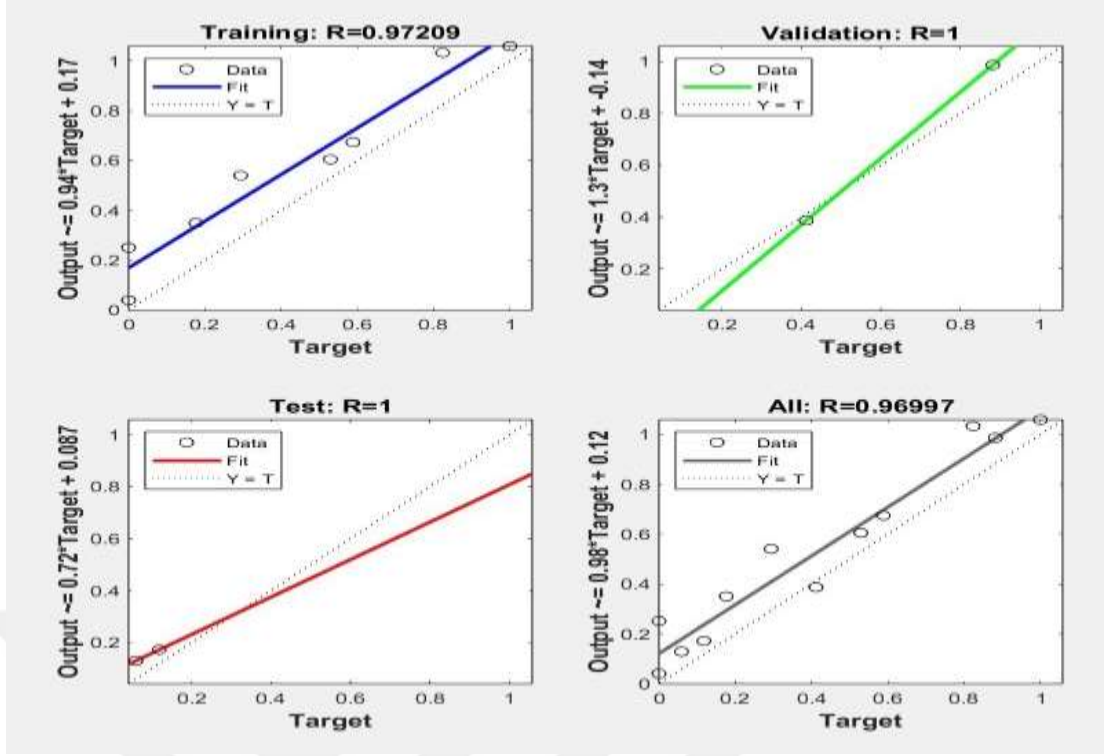


**Şekil 3.3: Güneş Işınım Şiddeti: Gerçek ve Tahmini Değer Çizgi Grafiği**

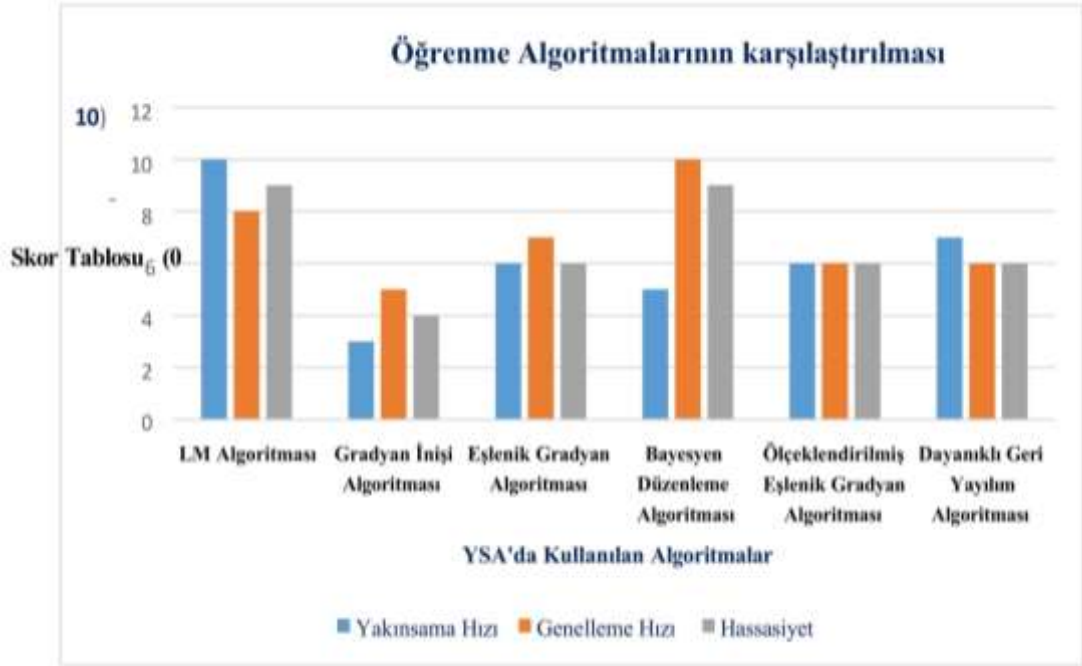
Doğrulama sürecinde, ortalama kare hata (MSE) kriteri ile birlikte regresyon (R) katsayısı da hesaplanarak modelin tahmin başarısı nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu ölçütler, özellikle yapay sinir ağı modelinin çevresel girdiler ile güneş ışıınımlı çıktısı arasındaki ilişkiyi ne derece doğru öğrendiğini ortaya koymaktadır. Şekil 3.3.'de görüleceği üzere regresyon katsayısının 1'e yakın değerler alması, modelin yüksek doğrulukla tahmin yaptığına ve fotovoltaiik sistem (PV)

performansının öngörüsünde güvenilir çıktılar sunduğuna işaret etmektedir. Bu durum, İstanbul gibi iklimsel çeşitliliği fazla, orta kuşakta bulunan, kentleşme yoğunluğu yüksek ve enerji tüketimi kritik olan metropollerde fotovoltaik sistemlerin(PV) verimliliğini öngörebilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Kent ölçeğinde alınacak enerji verimliliği kararlarında, yüksek doğrulukla çalışan yapay zekâ modelleri, güneş enerjisi yatırımlarının optimizasyonu, kent planlamasında PV sistemlerin yerleşimi, kentsel dönüşümde yenilenebilir enerji potansiyeli analizleri gibi stratejik alanlara doğrudan katkı sunabilir. Ayrıca, modelin eğitim sürecinde kullanılan erken durdurma (early stopping) tekniği, İstanbul'un değişken iklim koşullarında aşırı öğrenmenin (overfitting) önüne geçilmesini sağlayarak mevsimsel değişimlere uyumlu, genellenebilir bir model performansı sunmuştur. Bu yöntem sayesinde yalnızca eğitim verisine değil, gelecekteki benzer çevresel koşullara da etkili şekilde yanıt verebilecek ölçeklenebilir bir tahmin altyapısı oluşturulmuştur. Modelin doğruluk seviyesi, regresyon analizleriyle değerlendirilmiş ve eğitim, doğrulama ve test setlerinde sırasıyla  $R = 0.972$ ,  $R = 1$  ve  $R = 1$  olarak elde edilmiştir. Tüm veri seti genelinde elde edilen  $R$  değeri ise  $0.97$ 'ye yakın olarak modelin yüksek başarıyla genelleme yapabildiğini göstermektedir. Özellikle test ve doğrulama verisinde gözlenen tam korelasyon ( $R = 1$ ), modelin tahmin gücünü ortaya koymakta, ancak veri yapısının özellikleri ve örneklem sayısının bu çalışmadaki sınırlılığı, modelin aşırı öğrenme eğilimini artırabileceğinden, bu durum büyük şehir ölçeğinde uygulama esnasında titizlikle ve dikkatle analiz edilmelidir.

Yapay sinir ağı modellemesinde Levenberg-Marquardt (LM) algoritması tercih edilmiştir; çünkü bu algoritma, ikinci türev bilgisine gerek duymadan hem hızlı hem de kararlı bir şekilde hata fonksiyonunu minimize edebilmekte, özellikle küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde yüksek doğruluk sağlandığı yapılan literatür çalışmasında bilinmektedir. Çalışmada elde edilen eğitim ( $R = 0.97209$ ), doğrulama ( $R = 1$ ), test ( $R = 1$ ) ve genel ( $R = 0.96997$ ) korelasyon katsayıları da LM algoritmasının fotovoltaik sistem (PV) performans tahmini açısından uygun ve etkin bir öğrenme yöntemi olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 3.4: Regresyon Setleri



Şekil 3.5: YSA Öğretim Algoritmalarının Karşılaştırılması

Grafikte (Şekil 3.5), yapay sinir ağı modellerinde kullanılan altı farklı öğrenme algoritması; yakınsama hızı, genelleme hızı ve hassasiyet olmak üzere üç temel ölçüte göre değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede her algoritma için her bir kritere 0 ile 10 arasında puan verilmiş ve bu puanlar görsel olarak karşılaştırılmıştır.

Levenberg-Marquardt (LM) algoritması, özellikle yakınsama hızı ve hassasiyet açısından en yüksek skoru almıştır. Bu durum, algoritmanın model eğitimi sırasında çok hızlı ve kararlı bir şekilde hata oranını düşürdüğünü ve elde edilen sonuçların gerçek verilere yüksek düzeyde yaklaştığını göstermektedir. Genelleme hızı da oldukça yüksektir; bu da eğitilen modelin yeni verilerle karşılaştığında performansını koruyabildiğine işaret eder.

Diğer algoritmalarından bazıları, örneğin Bayesyen Düzenleme Algoritması, genelleme açısından çok iyi bir performans sergilese de, yakınsama hızı düşük olduğundan eğitim süresi uzayabilir. Gradyan İnişi Algoritması ise tüm ölçütlerde nispeten düşük performans göstermektedir.

Bu grafiksel analiz sonucunda, LM algoritması hem eğitim sürecindeki verimliliği hem de çıktı doğruluğu bakımından en dengeli ve güçlü seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında LM algoritması tercih edilmiştir. Seçim gerekçesi, grafikte de desteklendiği üzere; modelin kısa sürede öğrenmesi, yüksek doğrulukla tahmin yapması ve yeni verilerle dahi başarılı sonuçlar verebilmesidir. Şekilde verilen tabloda dikey ekseninde yer alan puanlama sonuç değerlerini göstermektedir. Dikey ekseninde verilen yüksek skorlar, bir algoritmanın o ölçüt bakımından güçlü olduğunu gösterirken; bu eksen, her algoritmanın aşağıdaki üç ölçüt bakımından almış olduğu göreceli başarı puanlarını (0 en düşük, 10 en yüksek) temsil eder:

Şekil 3.5 üzerinden de görülebileceği üzere üç temel değerlendirme ölçütü olan yakınsama hızı, genelleme hızı ve hassasiyet; yapay sinir ağlarının öğrenme sürecini çok boyutlu olarak analiz etme imkânı sunmaktadır. Yakınsama hızı, modelin eğitim sürecinde hata fonksiyonunu ne kadar hızlı minimize ettiğini ifade ederken, yüksek bir yakınsama skoru, algoritmanın daha kısa sürede optimum çözüme ulaştığını gösterir. Genelleme hızı, modelin yalnızca eğitim verisine değil, daha önce karşılaşmadığı test verilerine karşı da başarılı tahmin yapabilme yeteneğini ortaya koyar. Bu ölçüt, overfitting riskinin düşük olduğunu ve modelin farklı koşullara uyum sağlayabildiğini gösterdiğinden özellikle önemlidir. Hassasiyet ise modelin çıktılarının hedef değerlerle ne derece uyumlu olduğunu yansıtır; düşük hata oranı ve yüksek doğruluk düzeyi, modelin güvenilirliğini ve tutarlılığını destekler. Bu üç ölçütün birlikte değerlendirilmesi, algoritmalar arasında objektif ve dengeli bir

karşılaştırma yapılmasına olanak tanımakta ve bu nedenle Levenberg-Marquardt algoritmasının tercih edilmesini güçlü biçimde gerekçelendirmektedir.



#### 4. BULGULAR VE SONUÇLAR

Bu bölümde, “İstanbul İli Genelinde Yapay Sinir Ağları İle Güneş Işınımı Tahmini ve Bina Ölçeğinde Fotovoltaik Sistemin Verimlilik Hesabı” başlıklı tez çalışması kapsamında elde edilen deneysel, sayısal ve simülatif bulgulara yer verilmiştir. Bulgular; mevcut sistemin enerji performansı, yapay sinir ağı (YSA) tabanlı modelleme çıktıları, verimlilik hesaplamaları ve literatürde ortaya konulan çalışmalarla olan ilişkisel bağlam dâhilinde sunulmuş ve tartışılmıştır.

Tez kapsamında ele alınan yapı, büyük şehirlerdeki tipik yüksek yoğunluklu konut yapılarından biri olarak değerlendirilmiş, Avrupanın en yoğun nüfuslu şehirlerinden biri olan İstanbul vilayeti özelinde değerlendirilmeye alınmıştır ve bu bağlamda Enerji Kimlik Belgesi (EKB) ön hesaplamalarına göre yıllık toplam enerji ihtiyacı 164.483,03 kWh olarak tespit edilmiştir. İhtiyacın bileşenlere göre dağılımı:

- Isıtma: 102.525,56 kWh
- Sıhhi Sıcak Su: 44.259,45 kWh
- Soğutma: 21.396,18 kWh
- Aydınlatma: 15.068,63 kWh

Kurulu fotovoltaik (PV) sistemin bu ihtiyacın %10,24’ünü karşılaması, binanın enerji sınıfını B’ye taşımış ve sistemin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunduğu görülmüştür. Bu oran, İstanbul gibi büyük şehirlerde çatı alanı sınırlı binalar için değerlendirildiğinde anlamlı bir katkıdır.

Çalışmanın temel katkısını oluşturan YSA modeli, MATLAB ortamında çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı (MLP) olarak tasarlanmış, geriye yayımlı Levenberg-Marquardt (LM) algoritması ile eğitilmiştir. Modelde giriş parametresi olarak açık gün sayısı, ortalama sıcaklık, rüzgar hızı, nispi nem, hava basıncı, güneşlenme süresi ve toplam güneş ışınımı kullanılmıştır. Bu parametre sayısı sınırlı tutulmuştur. Bunun temel nedeni, büyük şehirlerde yaygın olarak kullanılabilir hızlı, düşük maliyetli ve pratik uygulanabilirliğe sahip bir model tasarlanmasıdır. Ancak sınırlı sayıda giriş değişkeni kullanılması, modelin bazı yerel

mikroklimatik farklılıkları, anlık kirlilik değişimlerini ve kısa süreli ısısal anomalileri yeterince temsil edememesine yol açabilir. Bu durum özellikle şehir merkezlerinde farklı yönlenmelere ve gölgeleme etkilerine sahip binalarda daha hassas üretim tahminleri yapmayı güçleştirebilir. Yine de bu yaklaşım, kaynak sınırlı uygulamalar ve hızlı değerlendirme isteyen kentsel planlama süreçlerinde avantaj sağlamaktadır.

Model performansı aşağıdaki gibidir:

- Ortalama Karese Hata (MSE): 0.0024 (eğitim), 0.0031 (doğrulama), 0.0035 (test)
- Korelasyon Katsayısı (R): 0.973

Levenberg-Marquardt algoritması, klasik gradyan iniş yöntemlerine göre daha hızlı yakınsama sağlaması ve eğitim sürecinde daha düşük hata oranlarına ulaşabilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu algoritma, Gauss-Newton yönteminin doğrusal olmayan en küçük kareler problemlerindeki etkinliğini, gradyan inişin stabilitesi ile birleştirerek, özellikle küçük ve orta ölçekli yapay sinir ağı modellerinde üstün performans sergiler [41]. İstanbul gibi büyük ve yoğun nüfuslu şehirlerde, meteorolojik koşulların karmaşıklığı ve değişkenliği nedeniyle PV sistemlerin üretim tahminlerinin yüksek doğruluk ve hızlı hesaplama gerektirmesi söz konusudur. Levenberg-Marquardt algoritması, eğitim süresini kısaltarak modelin pratik uygulanabilirliğini artırmakta, aynı zamanda lokal minimumlarda takılma riskini azaltarak genel model performansını iyileştirmektedir [15]. Bu özellikleriyle, karmaşık veri setlerinde güvenilir ve hızlı sonuçlar elde edilmesini mümkün kılarak, büyük şehirlerdeki PV sistem entegrasyon çalışmalarına önemli katkı sağlamaktadır. Yürütülen yapay sinir ağı (YSA) eğitim süreci, Levenberg-Marquardt algoritması ile oldukça düşük ortalama karesel hata ( $MSE \approx 3.29 \times 10^{-19}$ ) düzeyinde ve yalnızca 7 epokta başarıyla tamamlanmıştır. Eğitim süresince eğim (gradient) ve iyileştirme katsayısı ( $\mu$ ) hedef değerlerin altına düşerek modelin minimum hata düzeyine ulaştığını göstermektedir. Bu durum, önerilen modelin yüksek doğrulukla tahmin yeteneği sunduğunu ve erken durdurma stratejisinin etkili biçimde uygulandığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, düşük sayıda parametreye rağmen, modelin genel doğruluk düzeyinin tatmin edici olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, fotovoltaik sistemin toplam verimliliğini doğru ve gerçekçi şekilde ortaya koymak amacıyla, sistem bileşenlerinin ayrı ayrı verimlilik

performansları analiz edilmiştir. Çünkü fotovoltaik (PV) sistemlerin genel verimliliği yalnızca panellerin etkinliğiyle sınırlı olmayıp, inverter, bağlantı elemanları, kablolar ve çevresel etmenlerin etkisiyle şekillenmektedir. Bu nedenle, her bir bileşenin katkısı ve kayıpları ayrı ayrı hesaplanarak sistemin toplam verimlilik değeri belirlenmiştir.

Bileşen bazlı verimlilik hesaplaması, sistemdeki her ana parçanın enerji dönüşümündeki performansını ve kayıplarını dikkate alan bir yöntemdir. Bu bağlamda;

- Güneş panelinin ışınımı elektriğe dönüştürme verimliliği,
- İnverterin DC-AC dönüşümündeki enerji kaybı,
- Kablo ve bağlantı noktalarında oluşan direnç kaynaklı kayıplar,
- Yardımcı ekipman ve kontrol sistemlerinin performansları, detaylı olarak modellenmiştir.

Toplam sistem verimliliği, bu bireysel verimlilik oranlarının çarpımı yoluyla hesaplanmıştır:

$$\eta_{\text{sistem}} = \eta_{\text{panel}} \times \eta_{\text{inverter}} \times \eta_{\text{kablo}} \times \eta_{\text{yardımcı}}$$

Burada elde edilen değer, sistemin teorik üretim kapasitesi ile pratikte sağlanan enerji üretimi arasındaki farkı ifade etmekte ve gerçek koşullardaki performans potansiyelini göstermektedir. Böylelikle, sistemin zayıf noktaları belirlenip, performansı en çok etkileyen bileşenler tespit edilmiştir.

Bu yaklaşım, İstanbul gibi büyük ve karmaşık şehir ortamlarında fotovoltaik sistemlerin planlanması ve optimizasyonu açısından önem taşımaktadır. Zira bileşen bazlı analiz, sistem verimliliğini artırmak için hangi ekipmanın geliştirilmesi gerektiğini ortaya koyarak hem ekonomik hem de enerji verimliliği açısından sürdürülebilir çözümlere ışık tutmaktadır.

Sonuç olarak, bileşen bazlı verimlilik hesaplamaları, fotovoltaik sistemlerin kapsamlı performans değerlendirmesinde kritik bir araç olarak kullanılmakta ve kentsel ölçekli enerji üretiminde uygulama başarısını artırmaktadır.

Bu çalışmanın modelleme yaklaşımı, 1970'lerden bu yana yapay sinir ağı teknolojilerinin gelişimi sürecinde önemli eşikler sunan çalışmalardan (Minsky & Papert, 1969; Rumelhart et al., 1986; LeCun et al., 1998) esinlenerek şekillendirilmiştir[25],[27],[29]. Aynı zamanda, fotovoltaik sistemler üzerine yapılan

çalışmalarda (Shockley & Queisser, 1961; Fraunhofer ISE, 2010; Zhao et al., 2023) sunulan verimlilik sınırları ve optimizasyon potansiyelleri bu çalışma için temel veri oluşturmuştur [9],[35],[40].

Tezde sunulan model, hem PV sistem verimliliğine ilişkin girdi parametrelerini hem de bu girdilerin zamansal etkilerini hesaba katarak, büyük şehirlerdeki gölgeleme, kirlenme ve ısısasal etkiler gibi karmaşık değişkenleri modellemede özđün bir bakış sunmaktadır.

On iki aylık veri seti, Yapay Sinir Ağı (YSA) modelleri için nispeten sınırlı bir veri kümesi olarak değerlendirilmektedir. Bu sınırlı veri miktarı, modelin genelleme yeteneğini ve uzun vadeli tahmin doğruluğunu kısıtlayabilir. Ancak, bu çalışma kapsamında öncelikli hedef, İstanbul ili ölçeğinde fotovoltaik sistemlerin genel performansını ve enerji üretim potansiyelini değerlendirmek olduğundan, mevcut aylık verilerle elde edilen sonuçların yeterli olduğu kabul edilmiştir. İlerleyen çalışmalar için daha uzun süreli ve daha yüksek çözünürlüklü (örneğin günlük veya saatlik) veri setlerinin kullanılması, modelin tahmin hassasiyetinin artırılması ve genelleme kapasitesinin güçlendirilmesi açısından önemli katkılar sağlayacak olması beklenmektedir.

Bu çalışma, kent içi enerji modellemelerinde YSA tabanlı algoritmaların önemli katkılar sağladığını ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

Bu çalışma, yoğun kentsel yapılaşmanın bulunduğu İstanbul kenti ölçeğinde fotovoltaik (PV) sistemlerin yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak optimizasyonunun sürdürülebilir enerji yönetimine önemli katkılar sunduğunu göstermiştir. Özellikle karmaşık meteorolojik ve çevresel değişkenlerin etkilerini başarılı şekilde modelleyen YSA tabanlı algoritmalar, PV sistem verimliliğini anlamlı oranda artırma potansiyeline sahiptir. Büyük şehirlerde artan enerji talebine paralel olarak, PV sistemlerin etkin entegrasyonu enerji tüketiminde önemli tasarruflar sağlar. Yapılan hesaplamalar ve literatür incelemeleri doğrultusunda, İstanbul gibi yoğun nüfuslu metropollerde doğru optimize edilmiş PV sistemlerle elektrik tüketiminde %10-20 oranında azalma mümkün olup, bu da yıllık milyonlarca kWh elektrik tasarrufuna ve önemli ölçüde karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlar. Gelecekte yapılacak çalışmaların, bu modelleri daha geniş veri kümeleri ve derin öğrenme yöntemleri ile güçlendirmesi, ayrıca hibrit enerji sistemleri entegrasyonunu ele

alması önerilmektedir. Ayrıca, bina ölçekli akıllı izleme sistemleri ve sensör destekli gerçek zamanlı veri toplama uygulamaları ile model hassasiyeti ve işletme verimliliği artırılabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, kent içi sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yapay zekâ destekli yenilikçi enerji çözümlerine yönelik önemli bir temel oluşturmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, fotovoltaik sistemlerin sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine daha etkin katkı sağlaması için hibrit enerji sistemlerinin entegrasyonu önem arz etmektedir. Özellikle şebeke, güç santrali ve fotovoltaik sistemlerin birlikte modellenmesiyle çoklu enerji kaynağı optimizasyonu yapılabilir; bu sayede enerji arzının sürekliliği ve esnekliği artırılabilir. Ayrıca, derin öğrenme teknikleri ve çok katmanlı konvolüsyonel sinir ağları (CNN) gibi ileri yapay zekâ yöntemleri, mevcut YSA modellerine kıyasla tahmin doğruluğunu önemli ölçüde yükseltebilir. İstanbul gibi karmaşık ve değişken iklimimaya sahip yoğun şehirlerde, bina ölçekli sensörlerle gerçek zamanlı veri toplayan akıllı izleme sistemlerinin kurulması, model performansını ve yerel uyumluluğu artırarak daha hassas ve dinamik enerji yönetimi imkânı sunar. Bu teknolojiler, şehirlerdeki fotovoltaik sistemlerin verimliliklerini maksimize ederken, kentsel enerji altyapılarının akıllı dönüşümüne de öncülük edecektir.

Sonuç olarak, bu çalışma literatüre YSA ve PV sistem entegrasyonu konularında İstanbul ili genelinde uygulanabilir bir model sunarak katkı sağladığı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1.] E. Becquerel, “Güneş ışığından gelen kimyasal radyasyonun elektrik akımları yoluyla etkilerinin araştırılması.” *Bilimler Akademisi Bildirileri*, cilt 9, ss: 561–567, 1839.
- [2.] G. Blaesser ve A. Ceccarelli, “Fotovoltaik sistem performansı ve simülasyonu,” D. Y. Goswami, Ed. ‘*Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji El Kitabı*’, CRC Press, 2002, ss: 1–30.
- [3.] L. Bottou, “Stochastic gradient descent with large-scale machine learning,” in ‘*Proceedings of COMPSTAT’2010*’, Physica-Verlag, 2010, pp: 177–186. Accessed: Feb. 10,2025, <https://leon.bottou.org/publications/pdf/compstat-2010.pdf>
- [4.] T. B. Brown et al., "Language models are few-shot learners," arXiv preprint arXiv:2005.14165, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2005.14165.pdf>
- [5.] D. M. Chapin, C. S. Fuller ve G. L. Pearson, “A new silicon p-n junction photovoltaic cell for converting solar radiation into electrical power,” *Journal of Applied Physics*, cilt 25, no. 5, ss: 676–677, 1974.
- [6.] H. Demuth, M. Beale, O. De Jess ve M. Hagan, *Neural network design*, 2. baskı. Martin Hagan, 2014.
- [7.] J. A. Duffie ve W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4. baskı. Wiley, 2013.
- [8.] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, ‘*Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)*’, Ankara: ETKB Yayınları. Erişim tarihi:15 Aralık 2024, <https://gepa.enerji.gov.tr/> .
- [9.] Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü ISE, “*Photovoltaics report: 2023*”. Erişim tarihi: 05.12.2024 <https://www.ise.fraunhofer.de>
- [10.] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa ve W. Warta, “*Solar cell efficiency tables (version 25)*,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, cilt 13, no. 1, ss: 49–54, 2005.
- [11.] M. A. Green, K. Emery, D. L. King ve W. Warta, “Solar cell efficiency tables,” *Progress in Photovoltaics*, cilt 8, no. 2, ss: 187–192, 1980.
- [12.] S. Haykin, “*Neural networks and learning machines*”, (3. baskı.). Pearson Education: 2009.
- [13.] Y. He, X. Chen, B. Xu, Y. Wang, Z. Liu ve D. Zhou, “Sparse mixture of experts models,” arXiv preprint arXiv:2301.11388, 2023. Accessed: May,10,2025. <https://arxiv.org/pdf/2301.11388.pdf>

- [14.] Hepbaşı ve Z. Öztürk, “Türkiye’de güneş enerjisi teknolojilerinin gelişimi üzerine bir inceleme,” *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, cilt 15, no. 8, ss: 4491–4509, 2011.
- [15.] G. E. Hinton, S. Osindero ve Y. W. Teh, “*Reducing the dimensionality of data with neural networks*,” *Science*, cilt 313, no. 5786, ss: 504–507, 2006.
- [16.] Honsberg ve S. Bowden, *Photovoltaics: Devices, systems and applications*. University of New South Wales, 1995.
- [17.] International Energy Agency (IEA), *Trends in photovoltaic applications*. IEA, 2020.
- [18.] IEA PVPS, “*Fotovoltaik uygulamalarında trendler: 2022*”. Erişim tarihi:11.01.2025 <https://iea-pvps.org>
- [19.] IEA PVPS, *Fotovoltaik uygulamalarda trendler 2023*”. Erişim tarihi:11.01.2025. IEA, 2023.
- [20.] S. A. Kalogirou, “*Güneş enerjisi mühendisliği: Prosesler ve sistemler*.” Elsevier, 2004.
- [21.] S. A. Kalogirou, “*Solar thermal collectors and applications*,” *Progress in Energy and Combustion Science*, cilt 30, no. 3, ss: 231–295, 2004.
- [22.] S. A. Kalogirou, *Güneş enerjisi mühendisliği: Prosesler ve sistemler*, 2. baskı. Akademik Basım, 2014.
- [23.] P. Kingma ve J. Ba, “*Adam: A method for stochastic optimization*,” *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2015. Accessed: 05.02.2025,<https://arxiv.org/abs/1412.6980>
- [24.] Krizhevsky, I. Sutskever ve G. E. Hinton, “*ImageNet classification with deep convolutional neural networks*,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, cilt 25, ss: 1097–1105, 2012.
- [25.] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio ve P. Haffner, “*Gradient-based learning applied to document recognition*,” *Proceedings of the IEEE*, cilt 86, no. 11, ss: 2278–2324, 1998.
- [26.] Mellit ve S. A. Kalogirou, “*Artificial Intelligence Techniques for Sizing Photovoltaic Systems: A review*,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 13, no. 2, ss. 406–419, 2009.
- [27.] M. Minsky ve S. Papert, *Perceptrons: An introduction to computational geometry*. MIT Press, 1969.
- [28.] G. Reikard, “*Predicting solar radiation at high resolutions: A comparison of time series forecasts*,” *Solar Energy*, cilt 83, no. 3, ss: 342–349, 2009.
- [29.] E. Rumelhart, G. E. Hinton ve R. J. Williams, “*Learning representations by back-propagating errors*,” ‘Nature’, cilt 323, no. 6088, ss. 533–536, 1986. erişim tarihi: 22 Mart 2025. [https://www.academia.edu/2520405/Learning\\_representations\\_by\\_back\\_propagating\\_errors/](https://www.academia.edu/2520405/Learning_representations_by_back_propagating_errors/),
- [30.] S. J. Russell ve P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4. baskı. Hoboken, NJ, USA, Pearson, 2021.
- [31.] NREL (National Renewable Energy Laboratory), *PVWatts Hesaplayıcı Teknik Referansı*: 2021. Erişim tarihi: 01 Aralık 2024, <https://www.nrel.gov>

- [32.] SMA Solar Technology AG, “İnverter teknik veri sayfaları,” 2023. Erişim tarihi: 01 Aralık 2024. Erişim: <https://www.sma.de>
- [33.] Sandia Ulusal Laboratuvarları, “*PV performans modelleme işbirliği dokümantasyonu: 2020*”. Erişim tarihi: 30 Kasım 2024, <https://pvpmc.sandia.gov>
- [34.] Saygılı, B. Yıldız ve A. Koyun, “*Kentsel ortamlarda kirlenmenin PV panellerine etkisi*,” *Enerji Raporları*, cilt 7, ss: 5641–5647, 2021. Erişim tarihi: 02.01.2025, DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.093
- [35.] W. Shockley ve H. J. Queisser, “*Detailed balance limit of efficiency of pn junction solar cells*,” *Journal of Applied Physics*, cilt 32, no. 3, ss: 510–519, 1961.
- [36.] Skoplaki ve J. A. Palyvos, “*On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*,” *Solar Energy*, V 83, no. 5, pp: 614–624, 2009.
- [37.] SolarGIS, “*Global Solar Atlas – İstanbul İli Verileri*”, 2024. Accessed: Sep. 20, 2024, <https://globalsolaratlas.info>
- [38.] SolarGIS, “*Global Solar Atlas: A SolarGIS-based choropleth map displays Istanbul, Turkey solar radiation levels*”, 2024. Erişim tarihi: 14 Nisan 2025, <https://solargis.com/maps-and-gisdata/download/turkey>
- [39.] P. J. Werbos, “*Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences*” (Doktoral dissertation). Harvard University, 1974.
- [40.] Y. Zhao, W. Zhou ve H. Sun, “Recent progress in perovskite solar cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 163, 112515, 2023.
- [41.] L. Zhang, Y. Wang ve H. Li, “*Optimization of neural network training algorithms for renewable energy forecasting in urban environments*,” *Renewable Energy Journal*, V. 185, pp: 1123–1135, 2022. Accessed: October.14,2024 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.045>
- [42.] L. Zhou, H. Wang ve Y. Chen, “Analysis of Degradation Rates in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules,” *Applied Sciences*, V. 14, no. 22, 10373: 2024. Accessed: April. 04, 2025, <https://www.mdpi.com/10.3390/app142210373>.
- [43.] What Works Climate Solutions Summit, “*Evidence-based climate solutions for IPCC AR7*,” Technische Universität Berlin, Germany, Jun. 9–12, 2024. Accessed: 06.06.2025, <https://www.whatworksclimate.org>
- [44.] United Nations Environment Programme (UNEP), “Climate Change,”. Accessed: Jun. 01, 2024, <https://www.unep.org/explore-topics/climate-change>.

## **EKLER**

### **Ek-1: Meteoroloji Genel Müdürlüğüne Yazdığım Dilekçe**

**METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜNE**  
Meteorolojik Veri İşlem Dairesi Başkanlığı  
Keçiören/ ANKARA

Bilimsel bir araştırma projesi kapsamında İstanbul iline ait 2023 Kasım-2024 Kasım ayları arasında ölçülmüş; aylık açık gün sayısı, aylık ortalama nispi nem, aylık ortalama hava basıncı, aylık ortalama sıcaklık, aylık toplam güneşlenme süresi, aylık ortalama rüzgâr hızı ve aylık toplam güneş ışınım şiddeti değerlerine ihtiyacımız vardır.

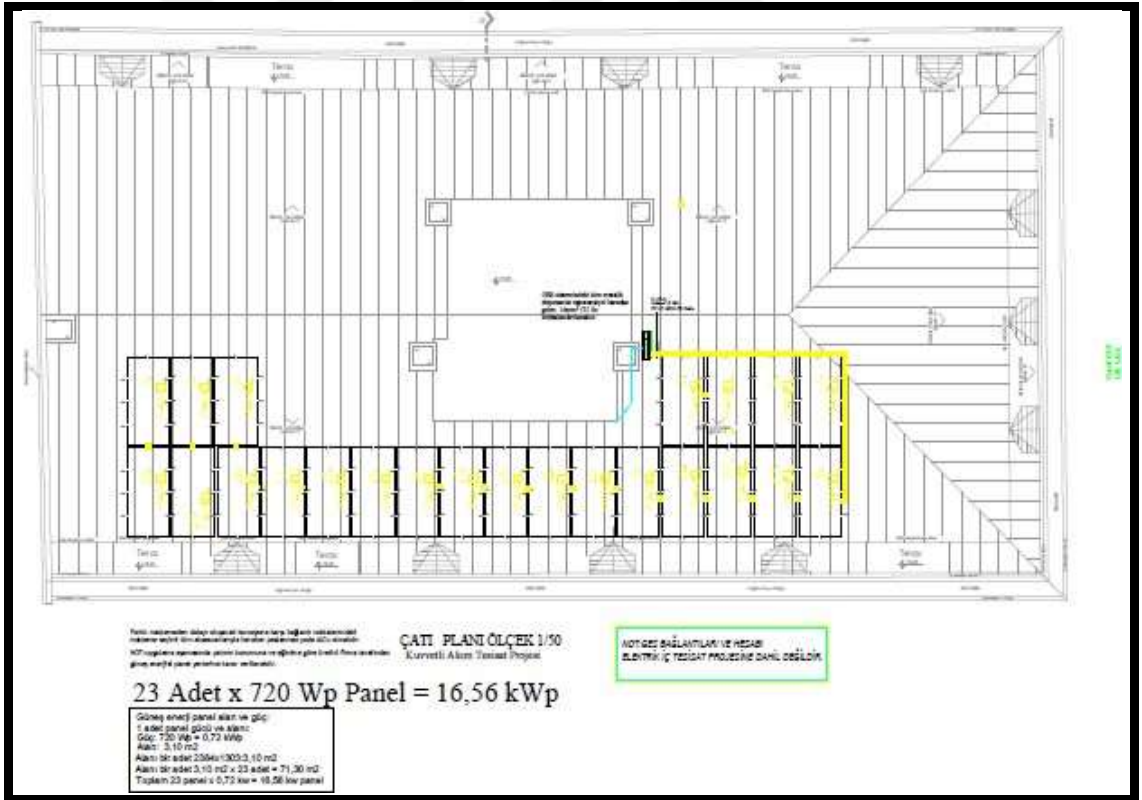
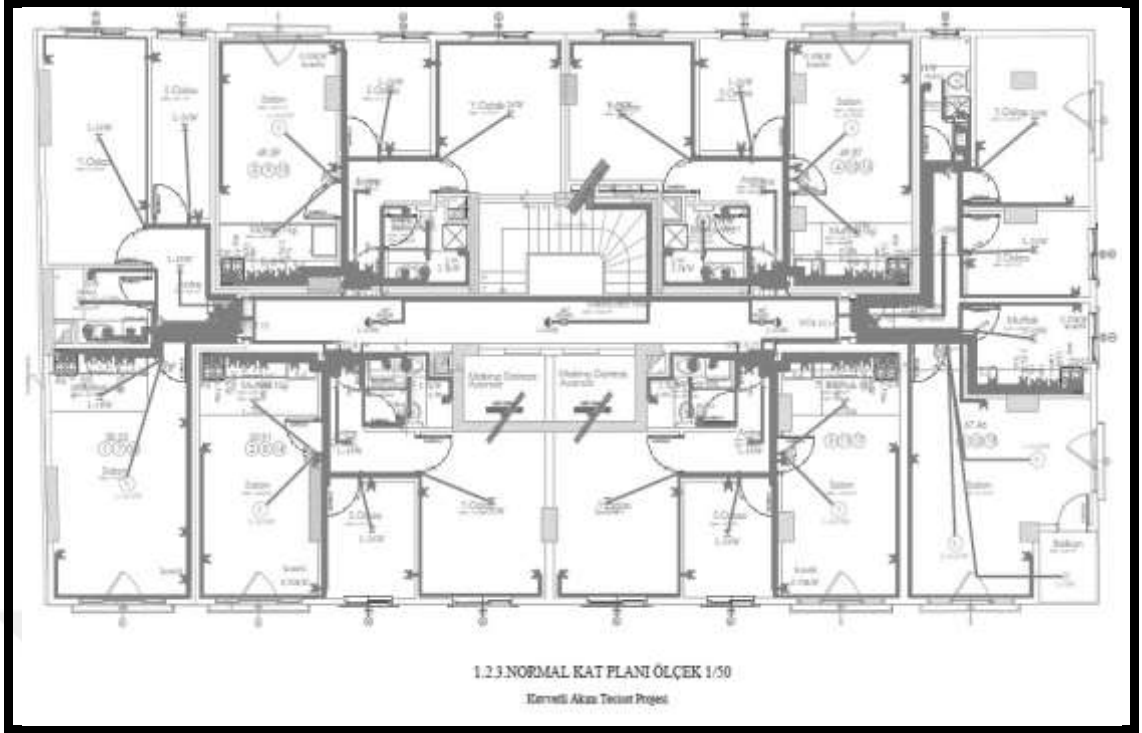
Gereğinin yapılmasını saygılarımla arz ve rica ederim.

13.11.2024

Adı-Soyadı  
YUSUF KEP

## Ek-2: İncelenen Mimari Yapının Kuvvetli Akım İç Tesisat Projesi





### Güneş enerji panel alan ve gücü:

1 adet panel gücü ve alanı:

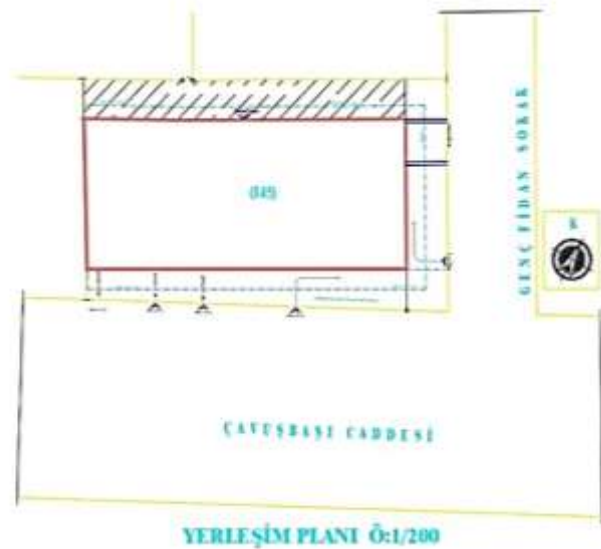
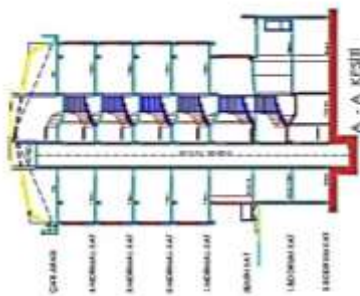
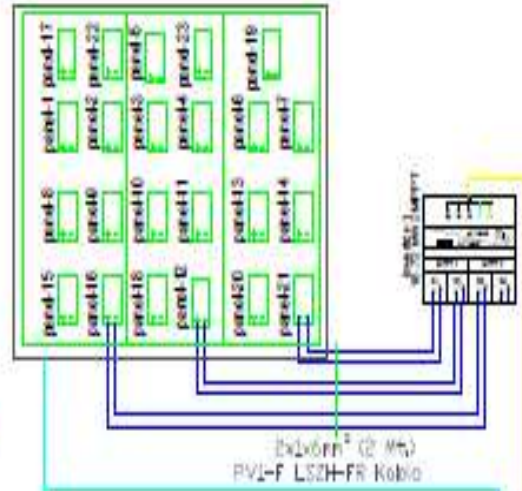
Güç:  $720 \text{ Wp} = 0,72 \text{ kWp}$

Alan:  $3,10 \text{ m}^2$

Alanı bir adet  $2384 \times 1303: 3,10 \text{ m}^2$

Alanı bir adet  $3,10 \text{ m}^2 \times 23 \text{ adet} = 71,30 \text{ m}^2$

Toplam  $23 \text{ panel} \times 0,72 \text{ kw} = 16,68 \text{ kw panel}$



Ek-3: İncelenen Mimari Yapının Umumi İcmal Cetveli

UMUMİ İCMAL CETVELİ											
	KATLO	Sig	SÖRTİ ADI		KATLO KESİTİ	GÜÇ DAĞILIMI			AÇIKLAMA	TALEP	TOPLAM
	ADI	Amp.	İpib	Priç	mm'	R	S	T		GÜÇ	GÜÇ
AT	GT	3*25	60	12	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	10408	17506	10766	1.BODRUM KAT	33062	38770
	DF1	3*25	10	6	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	000	000	205	ZEMİN KAT	2085	2085
	DF2	3*25	10	6	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	000	000	205	ZEMİN KAT	2085	2085
	DF3	3*25	12	6	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	000	000	361	ZEMİN KAT	2161	2161
	DF4	3*25	2	5	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	600	000	66	ZEMİN KAT	1566	1566
	DF5	3*25	2	5	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	600	000	66	ZEMİN KAT	1566	1566
	DF6	3*25	2	5	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	600	000	66	ZEMİN KAT	1566	1566
	DF7	3*25	10	6	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	000	000	705	ZEMİN KAT	2505	2505
	NT1	3*25	0	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	1.NORMAL KAT	6850	13125
	NT2	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	1.NORMAL KAT	6850	13125
	NT3	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	1.NORMAL KAT	6850	13125
	NT4	3*25	12	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4632	3050	4633	1.NORMAL KAT	6886	13215
	NT5	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	1.NORMAL KAT	6850	13125
	NT6	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	1.NORMAL KAT	6850	13125
	NT7	3*25	0	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	2.NORMAL KAT	6850	13125
	NT8	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	2.NORMAL KAT	6850	13125
	NT9	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	2.NORMAL KAT	6850	13125
	NT10	3*25	12	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4632	3050	4633	2.NORMAL KAT	6886	13215
	NT11	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	2.NORMAL KAT	6850	13125
	NT12	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	2.NORMAL KAT	6850	13125
	NT13	3*25	0	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	3.NORMAL KAT	6850	13125
	NT14	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	3.NORMAL KAT	6850	13125
	NT15	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	3.NORMAL KAT	6850	13125
	NT16	3*25	12	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4632	3050	4633	3.NORMAL KAT	6886	13215
	NT17	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	3.NORMAL KAT	6850	13125
	NT18	3*25	10	18	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4542	3050	4633	3.NORMAL KAT	6850	13125
	NT19	3*25	18	22	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	8675	7000	4066	4.NORMAL KAT	9856	20641
	NT20	3*25	15	22	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	8577	4050	4066	4.NORMAL KAT	8637	17503
	NT21	3*25	8	16	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4516	3050	4033	4.NORMAL KAT	6600	12400
	NT22	3*25	23	27	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	9707	4050	4666	4.NORMAL KAT	9320	19323
	NT23	3*25	15	22	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	8577	4050	4066	4.NORMAL KAT	8637	17503
	NT24	3*25	15	22	4*6 mm <sup>2</sup> NTT	8577	4050	4066	4.NORMAL KAT	8637	17503
	ASİ	3*40				4*6 mm <sup>2</sup> NTT	5000	5000	5000	ARANSÖR	8250
0.ASİ	3*32				4*6 mm <sup>2</sup> NTT	4500	4000	4000	OTO ARANSÖR	12500	12500
			403	506		155963	135646	129957		242450	421566
	KURULU GÜÇ=				421566	W					
	DAİRELERİN KURULU GÜCÜ=				341762	W					
	DAİRELERİN TALEP GÜCÜ=				175105						
	EŞ ZAMAN FAKTORU=				21-25 DAİRE İÇİN 0,36						
	EŞ ZAMAN GÜCÜ=				(35000*0,55)+(175105*0,36)+33062+10150				= 114500	W	

## ÖZGEÇMİŞ

Yusuf KEP

### ÖĞRENİM DURUMU

- Yüksek Lisans (2025) İstanbul Gedik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli)

Tez: "Yapay Sinir Ağları ile İstanbul'da Güneş Işınımı Tahmini ve Fotovoltaik Sistem Verimlilik Analizi"

- Lisans (2020) İstanbul Şehir Üniversitesi (Hami Üniversite: Marmara Üniversitesi), Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM

- İstanbul Gedik Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı(2024-...)
- Öğretim görevlisi
- Çağrı Gama Yapı Mühendislik Taahhüt Pazarlama Limited Şirketi genel koordinatör, EKB ve Akustik Uzmanı

### TEKNİK BECERİLER

- Programlar: MATLAB, Python, AutoCAD, Proteus
- Uzmanlık Alanları:
- Fotovoltaik sistem tasarımı ve optimizasyonu
- Yapay sinir ağları ile enerji verimliliği analizi
- Elektrik aydınlatma ve zayıf akım sistemleri
- Enerji verimliliği ve Sürdürülebilirlik
- Kuvvetli akım iç tesisat projeleri
- Elektronik Devreler
- Periyodik Kontrol ve Elektriksel Ekipman Muayenesi

## **YAYINLAR**

Yüksek Lisans Tezi: "İstanbul İli Genelinde Yapay Sinir Ağları İle Güneş Işınımı Tahmini ve Bina Ölçeğinde Fotovoltaik Sistemin Verimlilik Hesabı"  
Temmuz, 2025

İstanbul İlinde "Güneş Enerjisinin Sürdürülebilirliğe Katkıları ve Verimliliğin Öngörülebilirliği"

Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı, Bildiri Sunumu (EDSK'25)

"Orta Güçte Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Performans Karakteristiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi",2024 15. *Ulusal Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Konferansı (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 2024, ss. 1-6, doi: 10.1109/ELECO64362.2024.10847256

## **DİL BECERİLERİ**

Türkçe: Ana dil

İngilizce: Orta düzey (B2)