T. C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# KAMU BİNALARINDA ENERJİ TASARRUFU MEVZUATI ÇERÇEVESİNDE ÖRNEK BİR ÇATI ÜSTÜ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN SİMÜLASYON YAZILIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sebahattin YILDIRIM**

**20229240060**

**Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kenan ALTUN**

**SİVAS**

**HAZİRAN 2025**

**Sebahattin YILDIRIM'**ın hazırladığı ve **"KAMU BİNALARINDA ENERJİ TASARRUFU MEVZUATI ÇERÇEVESİNDE ÖRNEK BİR ÇATI ÜSTÜ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN SİMÜLASYON YAZILIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| **Tez Danışmanı** | **Doç. Dr. Kenan ALTUN**<br>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi | …… |
| **Jüri Üyesi** | **Dr.Öğr.Üyesi Ökkeş Gökalp SÖKMEN**<br>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi | ……..…… |
| **Jüri Üyesi** | **Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Akif BUZPINAR**<br>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi | ……..…….. |

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Nail ALTUNAY**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

©Sebahattin YILDIRIM, 2025

## ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

13.06.2025

Sebahattin YILDIRIM

## KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve hayatımın her aşamasında bana inanan, güvenen, yanımda olan ve destekleyen sevgili eşim Büşra YILDIRIM'a teşekkürlerimi ve kızlarım Elif Serra YILDIRIM ve Gülce Meva YILDIRIM'a sonsuz sevgilerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca deneyimlerinden ve bilgi birikiminden yararlandığım, nihayetsiz sabır ve hoş görü ile beni destekleyen değerli danışmanım Doç. Dr. Kenan ALTUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# ÖZET

## KAMU BİNALARINDA ENERJİ TASARRUFU MEVZUATI ÇERÇEVESİNDE ÖRNEK BİR ÇATI ÜSTÜ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN SİMÜLASYON YAZILIMI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

**Sebahattin YILDIRIM**

**Yüksek Lisans Tezi**
**Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Ana Bilim Dalı**
**Danışman: Doç. Dr. Kenan ALTUN**
**2025, 69+xv sayfa**

Enerjinin verimli kullanılması, israfın önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki baskısının hafifletilmesi ve çevrenin korunması, günümüz enerji politikalarının temel önceliklerindendir. Bu doğrultuda, enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına yönelik çeşitli yasal düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Bunlardan biri de 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'dur. 2007'de yürürlüğe giren bu kanun, kamu binalarında enerji tasarrufunu teşvik eden bir çerçeve sunmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını desteklemektedir. Kanun, enerji tüketiminin azaltılması ve sürdürülebilir çözümlerin yaygınlaştırılması gibi hedeflerle, kamu binalarında çevresel ve ekonomik fayda sağlayacak uygulamaları ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ve özellikle çatı üstü güneş enerji santralleri (çatı GES), bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir.

Bu tez çalışması, kamu binalarında çatı GES uygulamalarının enerji verimliliği ve tasarruf hedeflerine katkısını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, güneş enerjisinin genel özellikleri, güneş panellerinin işleyişi, güneş enerji santralleri ve çatılara kurulan PV sistemlerin potansiyeli ele alınmıştır. 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nun kamu binalarına yönelik tasarruf beklentileri dikkate alınarak, Sivas bölgesinde bir kamu binası örneği üzerinden bu hedeflerin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Sivas, İç Anadolu Bölgesi'nde güneş enerjisi açısından elverişli bir lokasyon olarak seçilmiştir. Bölgenin iklim koşulları ve güneş ışınımı potansiyeli, çatı GES projeleri için uygun bir zemin sunduğu için tercih edilmiştir. Çalışmada, bir kamu

binasının enerji tüketim yapısı ve çatı özellikleri analiz edilerek, bu tür bir sistemin tasarımı ve performansı araştırılmıştır.

Simülasyon sürecinde PVSyst programı ana araç olarak tercih edilmiştir. Bu seçim, yazılımın sunduğu yüksek doğruluk, geniş veritabanı ve detaylı analiz yeteneklerine dayanmaktadır. PVSyst, PV sistemlerin tasarımını optimize etmek için panel özellikleri, eğim açısı ve invertör seçimi gibi unsurları modellemiştir. Sistemin enerji üretim potansiyelini, çevresel faydalarını ve ekonomik avantajlarını ortaya koymuştur. Yazılımın gölgeleme ve kayıp analizleri, enerji verimliliğini artıran çözümler sunarken, ekonomik değerlendirmeler çatı GES'lerin uzun vadeli getirilerini gözler önüne sermiştir. Bu özellikler, PVSyst'i kamu binalarında çatı GES projeleri için güvenilir bir araç haline getirmiştir.

Çalışmanın bulguları, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nun tasarruf hedefleriyle uyumlu olarak, çatı GES'lerin kamu binalarında enerji maliyetlerini düşürdüğünü ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik ettiğini göstermektedir. Sistem, fazla enerjinin şebekeye aktarılmasıyla ek ekonomik fayda sağlarken, enerji verimliliği önlemleriyle birleştirildiğinde daha büyük tasarruflar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Sivas'taki kamu binası örneği, çatı GES'lerin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğini ortaya koyarak, kanunun hedeflerini destekleyen bir model sunmaktadır. Sonuç olarak, bu tez, kamu binalarında çatı GES uygulamalarının enerji verimliliği politikalarına katkısını PVSyst ile analiz ederek, Türkiye'nin sürdürülebilir enerji vizyonuna yönelik bilimsel bir bakış açısı geliştirmeyi hedeflemektedir.

**Anahtar kelimeler:** Çatı GES, Yenilenebilir Enerji, Enerji Tasarrufu, PVSyst.

## ABSTRACT

## EVALUATION OF A SAMPLE ROOFTOP SOLAR POWER PLANT IN PUBLIC BUILDINGS WITHIN THE FRAMEWORK OF ENERGY CONSERVATION LEGISLATION USING SIMULATION SOFTWARE

**Sebahattin YILDIRIM**

**Master's Thesis**
**Department of Energy Science and Technology Engineering**
**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kenan ALTUN**
**2025, 69+ixv pages**

Efficient energy utilization, prevention of waste, alleviation of the economic burden of energy costs, and environmental protection are fundamental priorities of contemporary energy policies. To this end, various legislative measures have been enacted to enhance energy efficiency in the use of energy resources. One such measure is the Energy Efficiency Law No. 5627, which came into effect in 2007. This law establishes a framework to promote energy conservation in public buildings while encouraging the adoption of renewable energy sources. It aims to reduce energy consumption and promote sustainable solutions, thereby highlighting practices that offer both environmental and economic benefits in public buildings. Within this context, solar energy, as a renewable resource, and particularly rooftop solar power plants (rooftop SPPs), play a significant role in achieving these objectives.

This thesis investigates the contribution of rooftop SPP applications in public buildings to energy efficiency and conservation goals. The study addresses the general characteristics of solar energy, the operational principles of solar panels, the structure of solar power plants, and the potential of photovoltaic (PV) systems installed on building rooftops. The energy-saving expectations outlined by the Energy Efficiency Law No. 5627 for public buildings are considered, with the feasibility of these targets assessed through a case study of a public building in the Sivas region. Sivas, located in the Central Anatolia Region, was selected as a favorable site for solar energy utilization due to its climatic conditions and solar irradiation potential, which provide

a suitable foundation for rooftop SPP projects. The energy consumption profile and roof characteristics of a public building were analyzed to explore the design and performance of such a system.

The PVSyst software was chosen as the primary tool for the simulation process, a decision based on its high accuracy, extensive database, and robust analytical capabilities. PVSyst facilitated the optimization of PV system design by modeling key parameters such as panel specifications, tilt angle, and inverter selection. It elucidated the system's energy production potential, environmental benefits, and economic advantages. The software's shading and loss analyses provided solutions to enhance energy efficiency, while its economic assessments underscored the long-term returns of rooftop SPPs. These attributes establish PVSyst as a reliable tool for rooftop SPP projects in public buildings.

The findings of this study demonstrate that rooftop SPPs align with the conservation objectives of the Energy Efficiency Law No. 5627 by reducing energy costs in public buildings and promoting renewable energy adoption. The system offers additional economic benefits by enabling the transfer of surplus energy to the grid, and when combined with energy efficiency measures, it facilitates greater savings. The example of a public building in Sivas illustrates the technical and economic viability of rooftop SPPs, offering a model that supports the law's goals. Ultimately, this thesis aims to provide a scientific perspective on the contribution of rooftop SPPs to energy efficiency policies in public buildings through PVSyst-based analysis, thereby contributing to Turkey's sustainable energy vision.

**Keywords:** Rooftop SPP, Renewable Energy, Energy Saving, PVSyst.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

**ÖZET** ..... **Vİİ**

**ABSTRACT** ..... **İX**

**İÇİNDEKİLER** ..... **Xİ**

**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **Xİİİ**

**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... **XİV**

**KISALTMALAR DİZİNİ** ..... **XV**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

1.1 Enerji Kavramı ..... 3

1.1.1 Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması ..... 6

1.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları ..... 9

1.2 Güneş Enerjisi ..... 11

1.2.1 Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyeli ..... 12

1.2.2 Sivas İli Güneş Enerji Potansiyeli ..... 14

**2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER** ..... **17**

2.2 Güneş Pili Çeşitleri ..... 17

2.2.1 Monokristal Güneş Pilleri ..... 17

2.2.2 Polikristal Güneş Pilleri ..... 18

2.2.3 İnce Film Güneş Pilleri ..... 18

2.2.4 Amorf-Silisyum Güneş Pilleri ..... 18

2.2.5 Kadmiyum-Tellur Güneş Pilleri ..... 19

2.3 PV Sistem Bileşenleri ..... 19

2.3.1 Güneş Pilleri ..... 19

2.3.2 Şarj Kontrol Cihazı ..... 20

2.3.3 İnvertör ..... 20

2.3.4 Transformatör ..... 20

2.3.5 Akü ..... 21

2.3.6 Dizi Montaj Rafları ..... 21

2.3.7 Topraklama Aletleri ..... 21

2.3.8 Birleştirici Kutu ..... 22
2.3.9 Kablolar ..... 22
2.4 Bağlantı Türüne Göre PV Sistemler ..... 22
2.4.1 Şebekeye Bağlı PV Sistemler ..... 22
2.4.2 Şebekeden Bağımsız PV Sistemler ..... 23
2.4.3 Hibrit Sistemler ..... 23
**3. KAMU ENERJİ TASARRUFU MEVZUATI ..... 24**
3.1 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ..... 24
3.2 Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP) ..... 26
3.3 Kamu Binalarında Enerji Tasarrufu Genelgesi ..... 28
3.4 Kamu Binalarında Tasarruf Hedefi ve Uygulama Rehberi ..... 30
**4. MATERYAL VE METOT ..... 32**
4.1 Örnek Uygulama Lokasyonu Seçimi ..... 32
4.1.1 Kamu Binalarında Çatı GES Uygulama Verileri ..... 34
4.1.2 Kamu Binalarında Ait Elektriksel Tüketim Verileri ..... 37
4.2 Simülasyon Programları ..... 39
4.2.1 PVSol ..... 40
4.2.2 BlueSol ..... 42
4.2.3 SAM ..... 43
4.2.4 Homer ..... 44
4.2.5 Helioscope ..... 44
4.2.6 PVSyst ..... 45
**5. KAMU BİNALARINDA ÇATI GES SİMÜLASYONU ..... 46**
5.1 Birim Alanda Çatı GES Tasarım ve Analizi: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yerleşkesi Örneği ..... 46
5.2 Bir Kamu Binası Çatı GES Tasarım ve Analizi: Sivas İl Özel İdare Binası Örneği 52
**6. TARTIŞMA VE SONUÇ ..... 57**
**KAYNAKLAR ..... 60**
**ÖZGEÇMİŞ .....** HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa**

**Şekil 1.1.** Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası ..... 13

**Şekil 1.2.** Sivas İli Saat bazlı Güneşlenme Süreleri ..... 15

**Şekil 5.1.** Sivas İli Güneş Enerji Potansiyeli. ..... 47

**Şekil 5.2.** Simülasyon için seçilen alan ..... 48

**Şekil 5.3.** Simülasyon tasarım verileri ..... 49

**Şekil 5.4.** Panel yerleşim tasarımı ..... 49

**Şekil 5.5.** Panel ve invertör sayısı ..... 50

**Şekil 5.6.** Kayıp Diyagram ..... 51

**Şekil 5.7.** Enerji Dönüşüm Tablosu ..... 52

**Şekil 5.8.** Simülasyon için seçilen kamu binası ..... 53

**Şekil 5.9.** Seçilen bina için eğim ve azimut açı değerleri ..... 54

**Şekil 5.10.** Seçilen bina için PV modül yerleşimi ..... 54

**Şekil 5.11.** Seçilen bina için Simülasyon Sonuç Ekranı ..... 55

**Şekil 5.12.** Simülasyon Kayıplar Diyagramı ..... 56

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa**

**Tablo 1.1.** Enerji Kaynaklarının Genel Sınıflandırılması. ..... 9

## KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| **COP** | Performans Katsayısı |
| **EMS** | Enerji Yönetim Sistemi |
| **EPS** | Enerji Performans Sözleşmesi |
| **PV** | Fotovoltaik |
| **GES** | Güneş Enerji Santrali |
| **IRR** | İç Getiri Oranı |
| **LCOE** | Düzleştirilmiş Enerji Maliyeti |
| **MPPT** | Maksimum Güç Noktası İzleme |
| **NOCT** | Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı |
| **NPC** | Net Mevcut Maliyet |
| **NPV** | Net Bugünkü Değer |
| **PWM** | Darbe Genişlik Modülasyonu |
| **PV** | Fotovoltaik |
| **SPP** | Güneş Enerji Santrali |
| **TEP** | Ton Eşdeğer Petrol |
| **TMY** | Tipik Meteorolojik Yıl |

# 1. GİRİŞ

Enerji, modern toplumların sürdürülebilir kalkınması ve ekonomik gelişimi için vazgeçilmez bir unsurdur. Günümüzde, artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, enerji politikalarını yenilenebilir kaynaklara ve verimlilik odaklı çözümlere yönlendirmiştir. Türkiye'de bu doğrultuda kabul edilen 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, enerji kaynaklarının etkin kullanımını teşvik etmeyi, enerji kayıplarını önlemeyi ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kanun, özellikle kamu binalarında enerji tasarrufunu zorunlu kılan düzenlemeler içermekte ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunu desteklemektedir. Çatı üstü güneş enerji santralleri, bu hedeflere ulaşmada etkili bir çözüm olarak öne çıkmakta olup, simülasyon yazılımlarıyla değerlendirilmesi, sistemlerin performansını optimize etmek için kritik bir adım teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasında bir kamu binası için çatı üstü güneş enerji santralinin analizi gerçekleştirilecektir.

5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, 2007 yılında yürürlüğe girmiş ve kamu binalarını enerji verimliliği uygulamalarında öncü bir rol üstlenmeye zorlamıştır. Kanun, kamu kurumlarının enerji tüketimlerini izlemesini, enerji yönetim birimleri kurmasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji tasarrufu sağlamasını hedeflemektedir. Dünya genelinde enerji tüketimi, sanayileşme ve kentleşmenin bir sonucu olarak hızla artarken, fosil yakıtların yoğun kullanımı karbon emisyonlarını yükseltmekte ve iklim değişikliği gibi küresel sorunları derinleştirmektedir. Bu durum, enerji üretiminde alternatif yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında erişilebilirliği, düşük işletme maliyeti ve çevre dostu yapısıyla dikkat çekmektedir. Kamu binalarında çatı üstü güneş enerji santrallerinin kullanımı, hem 5627 sayılı Kanun'un hedeflerine uyum sağlamakta hem de ulusal enerji tasarrufu politikalarına katkıda bulunmaktadır.

Türkiye, coğrafi konumu ve iklim özellikleri sayesinde güneş enerjisi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Ülkenin yıllık güneş ışınımı ortalaması, Avrupa ortalamasının üzerindedir ve bu durum, kamu binalarında güneş enerjisi yatırımlarını cazip hale getirmektedir. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, kamu kurumlarının enerji verimliliği standartlarına uymasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmesini teşvik ederek, bu potansiyelin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Kamu binaları, enerji tüketiminin yoğun olduğu yapılar olarak, yenilenebilir enerji

sistemlerinin uygulanması için ideal bir altyapı sunmaktadır. Bu bağlamda, çatı üstü güneş enerji santralleri, kanunun öngördüğü enerji tasarrufu hedeflerine ulaşmada pratik ve etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Sivas ili özelinde bir kamu binası seçilerek, çatı üstü güneş enerji santralinin teknik ve ekonomik fizibilitesi simülasyon yazılımı kullanılarak değerlendirilecektir. Sivas, İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan bir il olarak, güneş enerjisi potansiyeli açısından önemli bir konuma sahiptir. İlin iklim koşulları, güneş ışınımı süresi ve coğrafi yapısı, fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliğini desteklemektedir. Çalışmada, seçilen kamu binasının enerji tüketim profili analiz edilecek, 5627 sayılı Kanun çerçevesinde çatı üstü güneş enerji santralinin tasarımı yapılacak ve bu tasarımın performansı simülasyon yazılımı ile test edilecektir. Simülasyon sonuçları, sistemin enerji üretim kapasitesini, geri ödeme süresini ve çevresel etkilerini ortaya koyacaktır.

Enerji tasarrufu, yalnızca ekonomik bir mesele değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal bir sorumluluktur. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, kamu binalarında enerji tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliği artırmayı da hedefler. Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Güneş enerjisi, bu kaynaklar arasında en hızlı büyüyenlerden biridir ve teknolojik gelişmelerle birlikte daha erişilebilir hale gelmiştir. Çatı üstü güneş enerji santralleri, bina ölçeğinde enerji üretimini mümkün kılarak, merkezi enerji sistemlerine olan bağımlılığı azaltmakta ve enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir. Bu sistemler, kamu binalarında uygulandığında, devletin enerji politikalarına örnek teşkil etmekte ve toplumda yenilenebilir enerji farkındalığını artırmaktadır.

Simülasyon yazılımları, güneş enerji santrallerinin tasarım ve analiz süreçlerinde vazgeçilmez bir araçtır. Bu yazılımlar, sistemin performansını öngörmek, enerji üretim tahminlerini yapmak ve çevresel faktörlerin etkisini değerlendirmek için kullanılır. Tez kapsamında kullanılacak simülasyon yazılımı, bina konumunun meteorolojik verilerini dikkate alarak, çatı üstü güneş enerji santralinin enerji üretim kapasitesini ve verimliliğini analiz edecektir. Bu analiz, sistemin teknik uygulanabilirliğini ve ekonomik sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kapsamlı bir veri seti sağlayacaktır.

Kamu binalarında enerji tasarrufu, 5627 sayılı Kanun ile yasal bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu kanun, kamu kurumlarının enerji tüketimini azaltmasını, yenilenebilir

enerji kaynaklarını entegre etmesini ve enerji verimliliği standartlarına uymasını zorunlu kılmaktadır. Çatı üstü güneş enerji santralleri, bu hedeflere ulaşmada pratik bir çözüm sunmaktadır. Bir kamu binası özelinde gerçekleştirilecek bu çalışma, kanunun uygulanabilirliğini test etmek ve diğer kamu binaları için bir model oluşturmak açısından değerlidir.

Güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik fizibilitesi, yatırımın başlangıç maliyeti, işletme giderleri ve geri ödeme süresi gibi faktörlere bağlıdır. Çatı üstü güneş enerji santralleri, büyük ölçekli santrallere kıyasla daha düşük kurulum maliyeti gerektirir ve mevcut bina altyapısını kullanarak ek arazi ihtiyacı doğurmaz. Bu avantajlar, kamu binalarında güneş enerjisi kullanımını teşvik eden temel unsurlardır. Tez çalışmasında, simülasyon yazılımı ile elde edilen veriler ışığında, örnek kamu binası için sistemin ekonomik performansı detaylı bir şekilde analiz edilecektir.

Çevresel sürdürülebilirlik, 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nun temel hedeflerinden biridir. Fosil yakıtların kullanımı, sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır. Güneş enerjisi ise temiz bir enerji kaynağı olarak, karbon ayak izini azaltmada etkili bir rol oynamaktadır. Kamu binalarında çatı üstü güneş enerji santrallerinin yaygınlaşması hem çevresel etkileri minimize etmekte hem de toplumda çevre bilincini artırmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu çerçevesinde kamu binalarında çatı üstü güneş enerji santrallerinin uygulanabilirliğini ve etkinliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Simülasyon analizi, sistemin teknik, ekonomik ve çevresel performansını ortaya koyarak, enerji politikalarına katkıda bulunacaktır.

### 1.1 Enerji Kavramı

Enerji, fiziksel bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanır ve evrensel bir kavram olarak insan yaşamının her alanında temel bir rol oynar [1]. Günlük hayattan endüstriyel süreçlere, ulaşımdan iletişime kadar geniş bir yelpazede enerji, modern toplumların işleyişini mümkün kılan ana unsurdur. Kamu binalarında enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gibi konular ele alınırken, enerjinin temel doğasını anlamak, bu politikaların uygulanabilirliğini ve etkisini değerlendirmede kritik bir öneme sahiptir. Enerji, yalnızca fiziksel bir büyüklük değil, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla da bir sistemin sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen bir faktördür [2].

Enerjinin bilimsel tanımı, termodinamik yasalarıyla şekillenmiştir. İlk olarak 19. yüzyılda James Prescott Joule tarafından enerji korunum yasası ortaya konmuş ve enerjinin bir biçimden diğerine dönüşebileceği, ancak yok edilemeyeceği ya da yoktan var edilemeyeceği kanıtlanmıştır [3]. Bu ilke, enerji kaynaklarının etkin kullanımını ve dönüşüm süreçlerini anlamada temel bir dayanak oluşturur. Enerji, kinetik, potansiyel, termal, kimyasal, nükleer ve elektriksel gibi farklı formlarda bulunabilir [4]. Kamu binalarında enerji tüketimi genellikle elektrik enerjisi ve ısı enerjisi formlarında yoğunlaşır. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, bu tüketim türlerinin optimize edilmesini ve yenilenebilir kaynaklarla desteklenmesini hedefler.

Tarihsel perspektiften bakıldığında, insanlık enerjinin kullanımını ateşin keşfiyle başlatmış ve zamanla su değirmenleri, buhar makineleri ve nihayetinde elektrik üretimi gibi yeniliklerle enerji kavramını geliştirmiştir [5]. Sanayi Devrimi, enerji tüketiminde kömür ve petrol gibi fosil yakıtların baskın hale gelmesine yol açmış, bu da modern dünyanın enerji bağımlılığını şekillendirmiştir. Ancak, 20. yüzyılın sonlarında fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri, enerji kavramını yeniden tanımlama gerekliliğini ortaya koymuştur [6]. Bu bağlamda, kamu binalarında enerji tasarrufu politikaları, tarihsel enerji kullanım alışkanlıklarını modern ve sürdürülebilir bir çerçeveye oturtmayı amaçlar.

Enerji, fiziksel bir büyüklüğün ötesinde ekonomik bir değerdir. Dünya Bankası'nın 2023 raporuna göre, küresel enerji talebi 2030'a kadar %30 oranında artacak ve bu artışın büyük bir kısmı gelişmekte olan ülkelerden kaynaklanacaktır [7]. Türkiye gibi hızlı kentleşen ve sanayileşen ülkelerde, enerji talebinin karşılanması, ekonomik büyüme ve refah seviyesiyle doğrudan ilişkilidir. Kamu binaları, bu talebin önemli bir kısmını oluşturur; zira bu yapılar, aydınlatma, ısıtma, soğutma ve ekipman kullanımı gibi faaliyetler için sürekli enerjiye ihtiyaç duyar [8]. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, bu tüketimi azaltmak ve enerji maliyetlerini düşürmek için kamu kurumlarına rehberlik eder.

Enerjinin çevresel boyutu, günümüzde en çok tartışılan yönlerinden biridir. Fosil yakıtların yanmasıyla açığa çıkan karbondioksit ($CO_2$), metan ($CH_4$) ve azot oksitler ($NO_x$), küresel ısınmaya ve hava kirliliğine neden olmaktadır [9]. Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 2021 raporunda, küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlamak için enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara geçişin acil bir gereklilik

olduğu belirtilmiştir [9]. Yenilenebilir enerji çözümleri, bu çevresel hedeflere ulaşmada somut bir adım olarak değerlendirilebilir.

Enerjinin sosyal boyutu ise, toplumların yaşam kalitesini ve eşitlik ilkesini etkileyen bir unsurdur. Enerjiye erişim, eğitim, sağlık ve ekonomik fırsatlar gibi temel haklarla bağlantılıdır [10]. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nden (SDG 7) biri, 2030'a kadar herkes için uygun fiyatlı, güvenilir ve modern enerjiye erişim sağlamaktır [10]. Türkiye'de kamu binaları, bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde örnek teşkil edebilir; zira bu yapılar, toplumun geniş bir kesimine hizmet verir ve enerji verimliliği uygulamalarıyla hem kaynakların korunmasına hem de halkın refahına katkıda bulunur.

Enerji türleri arasında yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar ayrımı, enerji kavramının anlaşılmasında temel bir sınıflandırmadır. Yenilenemez kaynaklar (kömür, petrol, doğalgaz) sınırlı rezervlere sahipken, yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgar, hidroelektrik) doğal süreçlerle sürekli yenilenir [11]. Kamu binalarında enerji verimliliği politikaları, genellikle bu iki tür arasında bir denge kurmayı ve yenilenebilir kaynakların payını artırmayı hedefler.

Enerji verimliliği, enerji kavramının modern bir yorumu olarak öne çıkar. Enerji verimliliği, aynı miktarda işin daha az enerjiyle gerçekleştirilmesi anlamına gelir ve bu, hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlar [12]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2023 raporuna göre, enerji verimliliği önlemleri, küresel enerji talebinin %40'ını karşılayabilir ve emisyonları önemli ölçüde azaltabilir [13]. Kamu binalarında çatı üstü güneş enerji santralleri, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra, kendi enerjisini üreten yapılar (prosumers) haline gelmelerini sağlar.

Enerji kavramı, teknolojik gelişmelerle de şekillenmektedir. Fotovoltaik paneller, enerji depolama sistemleri ve akıllı şebekeler gibi yenilikler, enerjinin üretimini, dağıtımını ve tüketimini dönüştürmektedir [13]. Kamu binalarında bu teknolojilerin kullanımı, hem enerji tasarrufunu hem de sistem güvenilirliğini artırır. Türkiye'de, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 raporuna göre, kamu binalarında yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, ulusal enerji stratejisinin bir parçasıdır [14].

Enerji kavramının kamu binalarıyla ilişkisi, 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nun temel motivasyonlarından birini oluşturur. Kamu binaları, devletin enerji politikalarını

topluma yansıtan bir ayna gibidir. Bu yapılar, enerji tüketiminde örnek uygulamalar sergileyerek, özel sektörü ve bireyleri de teşvik edebilir [15]. Çatı üstü güneş enerji santralleri, bu bağlamda hem pratik hem de sembolik bir öneme sahiptir. Sivas'taki bir kamu binasında gerçekleştirilecek simülasyon analizi, bu tür sistemlerin kanun kapsamındaki etkisini ölçmek için somut veriler sunacaktır.

Sonuç olarak, enerji kavramı, fiziksel bir büyüklükten çok daha fazlasıdır; ekonomik, çevresel, sosyal ve teknolojik boyutlarıyla modern dünyanın temel taşlarından biridir. Kamu binalarında enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik ederek, bu çok boyutlu kavramı sürdürülebilir bir çerçeveye oturtmayı hedefler. Bu tez çalışması, enerji kavramını kamu binaları özelinde ele alarak, çatı üstü güneş enerji santrallerinin teknik ve pratik uygulanabilirliğini inceleyecektir. Enerji, yalnızca bugünü değil, geleceği de şekillendiren bir güçtür ve bu bağlamda kamu binaları, enerji dönüşümünün öncüleri olma potansiyeline sahiptir.

### 1.1.1 Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

Enerji kaynaklarının sınıflandırılması, enerji kavramının anlaşılmasında ve enerji politikalarının şekillendirilmesinde temel bir adımdır. Enerji kaynakları, genellikle yenilenebilir ve yenilenemez olarak iki ana kategoriye ayrılır, bu ayrım, kaynakların doğası, tükenme hızları ve çevresel etkileri gibi faktörlere dayanır [16]. Kamu binalarında enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi, enerji kaynaklarının sınıflandırılmasının pratik uygulamasını gerektirir.

Enerji kaynaklarının en yaygın sınıflandırması, yenilenebilirlik durumuna göre yapılır. Yenilenemez enerji kaynakları, sınırlı rezervlere sahip olan ve doğal süreçlerle kısa vadede yenilenemeyen kaynaklardır; kömür, petrol ve doğalgaz bu kategoriye dahildir [17]. Yenilenebilir enerji kaynakları ise, güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi doğal süreçlerle sürekli yenilenen kaynakları kapsar [18]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2023 raporuna göre, küresel enerji üretiminin %80'i hâlâ yenilenemez kaynaklardan sağlanırken, yenilenebilir kaynakların payı hızla artmaktadır [18].

Yenilenemez enerji kaynakları, tarihsel olarak enerji üretiminin temelini oluşturmuştur. Kömür, Sanayi Devrimi'nden bu yana endüstriyel gelişimin lokomotifi olmuş, ancak yüksek karbon emisyonları nedeniyle çevresel açıdan eleştirilmiştir [18]. Petrol, 20. yüzyılda ulaşım ve sanayi sektörlerinde baskın hale gelmiş, doğalgaz ise

daha temiz bir alternatif olarak son yıllarda yaygınlaşmıştır [18]. Ancak bu kaynakların sınırlı olması ve çevreye zarar vermesi, enerji politikalarının yenilenebilir kaynaklara yönelmesini zorunlu kılmıştır. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 raporuna göre, ülkenin fosil yakıt rezervleri sınırlıdır ve bu durum, yenilenebilir enerjiye geçişi stratejik bir öncelik haline getirmiştir [19].

Yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu olmaları ve sürdürülebilirlik avantajlarıyla dikkat çeker. Güneş enerjisi, fotovoltaik paneller aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılan en yaygın yenilenebilir kaynaktır ve çatı üstü sistemler gibi uygulamalarla kamu binalarında kolaylıkla entegre edilebilir [14]. Rüzgar enerjisi, türbinler aracılığıyla elektrik üretiminde kullanılırken, hidroelektrik enerji barajlar ve akarsular yoluyla sağlanır [20]. Biyokütle, organik atıkların yakılması veya biyogaz üretiminde kullanılmasıyla enerji sağlar; jeotermal enerji ise yer kabuğunun ısısından faydalanır [11].

Enerji kaynakları, birincil ve ikincil kaynaklar olarak da sınıflandırılabilir. Birincil kaynaklar, doğada doğrudan bulunan ve işlenmemiş haliyle kullanılan kaynaklardır (ham petrol, güneş ışınımı); ikincil kaynaklar ise birincil kaynaklardan dönüştürülerek elde edilir (benzin, elektrik) [4].

Enerji kaynaklarının sınıflandırılmasında bir diğer kriter, kullanım alanlarına göredir. Elektrik üretimi, ısıtma-soğutma, ulaşım ve endüstriyel süreçler gibi farklı alanlar, enerji kaynaklarının çeşitliliğini ve uygulanabilirliğini etkiler [4]. Kamu binalarında enerji tüketimi genellikle elektrik ve ısıtma-soğutma ile sınırlıdır. Bu nedenle güneş enerjisi gibi hem elektrik hem de termal enerji sağlayabilen kaynaklar idealdir [16]. Avrupa Birliği'nin 2020 Enerji Performansı Direktifi, kamu binalarında bu tür çok yönlü enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmektedir [16]. Türkiye'de de benzer bir yaklaşım, 5627 sayılı Kanun ile benimsenmiştir.

Enerji kaynaklarının çevresel etkilerine göre sınıflandırılması, modern enerji politikalarının temel bir boyutudur. Yenilenemez kaynaklar, yüksek karbon ayak izine sahipken, yenilenebilir kaynaklar genellikle düşük emisyonlu veya emisyonsuzdur [9]. IPCC'nin 2021 raporuna göre, enerji sektöründen kaynaklanan emisyonlar, küresel sera gazı emisyonlarının %73'ünü oluşturmaktadır [9]. Bu durum, kamu binalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını çevresel bir zorunluluk haline getirir.

Enerji kaynaklarının ekonomik özelliklerine göre sınıflandırılması da önemlidir. Yenilenemez kaynaklar, başlangıçta düşük maliyetli gibi görünse de rezervlerin azalması ve çevresel düzenlemeler nedeniyle uzun vadede pahalı hale gelir [21]. Yenilenebilir kaynaklar ise yüksek başlangıç yatırımı gerektirse de işletme maliyetleri düşüktür ve uzun vadede ekonomik avantaj sağlar [22]. Dünya Bankası'nın 2023 raporuna göre, yenilenebilir enerji yatırımları, enerji ithalatına bağımlılığı azaltarak ülkelerin ekonomilerini güçlendirir [7].

Enerji kaynaklarının teknolojik uygulanabilirlik açısından sınıflandırılması, kamu binalarında pratik çözümlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. Güneş enerjisi, mevcut teknolojilerle kolayca uygulanabilirken, jeotermal enerji belirli coğrafi koşullara bağlıdır [14]. Rüzgar enerjisi, yüksek rüzgar hızı gerektirir. Bu nedenle Sivas gibi iç bölgelerde güneş enerjisi daha uygun bir seçenektir [15]. Teknolojik gelişmeler, enerji kaynaklarının verimliliğini artırarak kamu binalarında yenilenebilir enerji kullanımını kolaylaştırmaktadır [21].

Sonuç olarak, enerji kaynaklarının sınıflandırılması, enerji politikalarının ve uygulamalarının temelini oluşturur. Kamu binalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırarak, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini destekler. Yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar arasındaki ayrım, birincil ve ikincil kaynaklar, kullanım alanları, çevresel ve ekonomik etkiler gibi kriterler, bu sınıflandırmanın ana unsurlarıdır.

Enerji kaynakları genel olarak kullanılışlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Kullanılışlarına göre yapılan sınıflandırmaya göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez; dönüştürülebilirliklerine göre ise birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır.

Enerjinin herhangi bir değişim ya da dönüşüme uğramamış şekli birincil (primer) enerji olarak bilinmektedir. Birincil enerji kaynakları, petrol, kömür, doğal gaz, nükleer, hidrolik, biyokütle, dalga-gelgit, güneş ve rüzgârdır. Birincil enerji nin dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerji ise ikincil (sekonder) enerji olarak bilinmektedir. Elektrik, benzin, mazot, motorin, kok kömürü, ikincil kömür, petrokok, hava gazı ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) bu tip enerji kaynaklarındandır. (Şekil 1)

**ENERJİ KAYNAKLARI**

| **Kullanışlarına Göre** | **Dönüştürülebilirliklerine Göre** |
|---|---|
| **A) Yenilenemez (Tükenir)**<br>a) Fosil Kaynaklı<br>*Kömür<br>*Petrol<br>*Doğalgaz<br>b) Çekirdek Kaynaklı<br>*Uranyum<br>*Toryum | **Birincil (Primer)**<br>*Kömür<br>*Petrol<br>*Doğalgaz<br>*Nükleer<br>*Biokütle<br>*Hidrolik<br>*Güneş<br>*Rüzgâr<br>*Dalga, Gel-git |
| **B) Yenilenebilir (Tükenmez)**<br>*Hidrolik<br>*Güneş<br>*Biyokütle<br>*Rüzgâr<br>*Jeotermal<br>*Dalga, Gel-git<br>*Hidrojen | **İkincil (Sekonder)**<br>*Elektrik, Benzin, Motorin<br>*İkincil Kömür<br>*Kok, Petrokok<br>*Hava Gazı<br>*Sıkıştırılmış Petrol Gazı (LPG) |

**Tablo 1.1.** Enerji Kaynaklarının Genel Sınıflandırılması.

### 1.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli yenilenen ve çevre dostu özellikleriyle modern enerji politikalarının temel taşlarından biri haline gelen kaynaklardır [11]. Bu kaynaklar, fosil yakıtların çevresel zararlarını azaltmak, enerji arz güvenliğini artırmak ve ekonomik sürdürülebilirlik sağlamak açısından kritik bir rol oynar [22].

Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi doğal döngülerle tükenmeyen kaynakları kapsar [2]. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) 2023 raporuna göre, yenilenebilir enerji, küresel elektrik üretiminin %30'undan fazlasını karşılamakta ve bu oran her geçen yıl artmaktadır [23]. Türkiye'de ise, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 verilerine göre, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki payı %40'a yaklaşmıştır [15].

Güneş enerjisi, yenilenebilir kaynaklar arasında en yaygın ve erişilebilir olanlardan biridir. Fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla güneş ışınlarından elektrik üretimi, kamu

binalarında çatı üstü sistemler gibi uygulamalarla kolaylıkla gerçekleştirilebilir [14]. Güneş enerjisinin avantajları arasında düşük işletme maliyeti, modüler yapısı ve çevreye sıfır emisyon salımı yer alır [24].

Rüzgar enerjisi, türbinler aracılığıyla rüzgarın kinetik enerjisini elektriğe dönüştüren bir yenilenebilir kaynaktır [20]. Dünya genelinde rüzgar enerjisi kapasitesi, 2023 itibarıyla 900 GW'ı aşmış durumdadır [26]. Türkiye, özellikle kıyı bölgelerinde rüzgâr enerjisi açısından zengin bir potansiyele sahip olsa da Sivas gibi iç bölgelerde bu kaynağın uygulanabilirliği sınırlıdır [27].

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinden elektrik üretimi için kullanılan bir diğer yenilenebilir kaynaktır [28]. Türkiye, akarsu ve baraj potansiyeli açısından avantajlı bir konumda olup, hidroelektrik enerji toplam yenilenebilir enerji üretiminin önemli bir kısmını oluşturur [29].

Biyokütle enerjisi, organik materyallerin (tarım atıkları, odun, biyogaz) yakılması veya fermantasyonu yoluyla enerji üretimini sağlar [30]. Avrupa Birliği'nin 2023 biyoenerji raporuna göre, biyokütle, yenilenebilir enerji kaynakları arasında ısıtma ve elektrik üretiminde en çok kullanılanlardan biridir [31-32].

Jeotermal enerji, yer kabuğunun altındaki ısı enerjisinden faydalanarak elektrik ve ısı üretimi sağlar [33]. Türkiye, jeotermal enerji açısından dünyada ilk 10 ülke arasında yer alır ve bu kaynak, özellikle batı bölgelerinde yoğunlaşmıştır [34].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının temel avantajlarından biri, çevresel sürdürülebilirliktir. IPCC'nin 2021 raporuna göre, yenilenebilir enerjiye geçiş, küresel karbon emisyonlarını 2050'ye kadar %70 oranında azaltabilir [9].

Ekonomik açıdan, yenilenebilir enerji kaynakları uzun vadede maliyet avantajı sağlar. IRENA'nın 2023 raporuna göre, güneş ve rüzgar enerjisinin kilowatt-saat başına maliyeti, fosil yakıtlardan daha düşük seviyelere inmiştir [35].

Teknolojik gelişmeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini ve uygulanabilirliğini artırmaktadır. Enerji depolama sistemleri (bataryalar), akıllı şebekeler ve yüksek verimli PV paneller, bu kaynakların kamu binalarında kullanımını kolaylaştırır [7]. Dünya Bankası'nın 2023 raporuna göre, yenilenebilir enerji teknolojilerindeki yenilikler, gelişmekte olan ülkelerde enerji erişimini artırmaktadır [7].

## 1.2 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın ve erişilebilir olanlardan biri olup, güneş ışınlarının fotovoltaik (PV) paneller veya termal sistemler aracılığıyla enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilir [11]. Bu enerji türü, çevre dostu yapısı, düşük işletme maliyeti ve teknolojik gelişmelerle artan verimliliği sayesinde, kamu binalarında çatı üstü sistemler gibi uygulamalar için ideal bir çözüm sunar [14].

Güneş enerjisi, güneşten gelen elektromanyetik radyasyonun (özellikle görünür ışık ve kızılötesi ışınlar) enerjiye çevrilmesiyle üretilir. Bu süreç, temel olarak iki yöntemle gerçekleştirilir: fotovoltaik sistemler ve güneş termal sistemleri [2]. Fotovoltaik sistemler, yarı iletken malzemeler (genellikle silikon) kullanılarak güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürürken, termal sistemler güneş enerjisini ısıya çevirerek su ısıtma veya elektrik üretimi gibi amaçlarla kullanır [37]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2023 raporuna göre, küresel fotovoltaik kapasite 2022'de 1.000 GW'ı aşmış ve güneş enerjisi, yenilenebilir enerji büyümesinin lideri haline gelmiştir [24].

Güneş enerjisinin temel avantajlarından biri, çevreye olan etkisinin minimum düzeyde olmasıdır. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimine kıyasla, güneş enerjisi kullanımı sırasında karbondioksit ($CO_2$) veya diğer sera gazı emisyonları oluşmaz [9]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2021 raporunda, güneş enerjisinin yaygınlaşmasının küresel emisyonları azaltmada kilit bir rol oynayabileceği belirtilmiştir [9].

Ekonomik açıdan, güneş enerjisi başlangıç yatırım maliyeti gerektirse de, uzun vadede önemli tasarruflar sunar. International Renewable Energy Agency (IRENA) 2023 raporuna göre, güneş enerjisinin kilowatt-saat başına maliyeti son on yılda %85 oranında düşmüştür ve artık birçok bölgede fosil yakıtlardan daha ucuzdur [35-36]. Türkiye'de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 verileri, güneş enerjisi yatırımlarının geri dönüş süresinin 5-7 yıl arasında olduğunu göstermektedir [25].

Güneş enerjisi teknolojileri, son yıllarda önemli gelişmeler kaydetmiştir. Monokristal ve polikristal PV panellerin verimliliği artarken, ince film teknolojileri ve bifacial (çift yüzeyli) paneller gibi yenilikler, enerji üretimini optimize etmektedir [38]. Energy dergisinde yayınlanan bir 2022 makalesine göre, bifacial paneller, geleneksel panellere kıyasla %10-20 daha fazla enerji üretebilmektedir [39]. Ayrıca, enerji depolama

sistemleri (lityum-iyon bataryalar), güneş enerjisinin gece veya bulutlu havalarda da kullanılmasını sağlayarak güvenilirliğini artırmıştır [40].

Güneş enerjisinin kamu binalarındaki uygulanabilirliği, bina tasarımı, coğrafi konum ve yerel iklim koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Sivas, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alır ve yıllık ortalama 1.600 kWh/m² güneş ışınımıyla, PV sistemler için elverişli bir potansiyele sahiptir [15]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, Türkiye'nin orta bölgelerindeki güneş enerjisi potansiyelinin, Avrupa ortalamasını aştığını ortaya koymuştur [41].

Güneş enerjisinin bir diğer önemli yönü, enerji arz güvenliğine katkısıdır. Türkiye gibi enerji ithalatına bağımlı ülkelerde, yerel güneş enerjisi kaynaklarının kullanımı, dışa bağımlılığı azaltır [46]. Energy Policy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, güneş enerjisinin ulusal enerji güvenliğini güçlendirmedeki rolünü vurgulamaktadır [46].

Sonuç olarak, güneş enerjisi, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için güçlü bir araçtır. Çevresel, ekonomik ve teknolojik avantajlarıyla öne çıkan bu enerji türü, güneş potansiyeli yüksek bölgelerde ideal bir çözümdür. Çatı üstü güneş enerjisi sistemleri hem kanunun gerekliliklerini yerine getirir hem de enerji geleceğini şekillendiren yenilikçi bir uygulamadır.

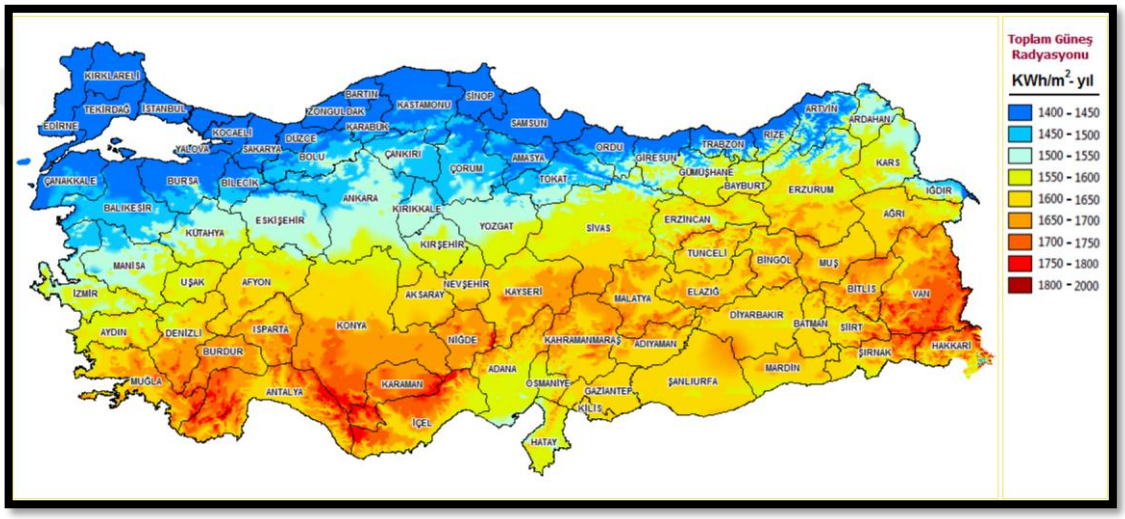
### 1.2.1 Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyeli

Türkiye, coğrafi konumu ve iklim özellikleri sayesinde güneş enerjisi açısından önemli bir potansiyele sahip bir ülkedir [41]. Ülkenin güneş ışınımı değerleri, Avrupa ortalamasını aşmakta ve güneş enerjisi yatırımlarını hem teknik hem de ekonomik açıdan cazip hale getirmektedir [46].

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, 34°-42° kuzey enlemleri ve 26°-45° doğu boylamları arasında yer alan konumuyla doğrudan ilişkilidir. Bu coğrafi yerleşim, ülkeyi Akdeniz iklim kuşağında konumlandırır ve yıl boyunca yüksek güneş ışınımı sağlar [42-43]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, Türkiye'nin yıllık ortalama güneş ışınımı değerinin 1.500-1.700 kWh/m² arasında olduğunu ortaya koymuştur. Avrupa ortalaması olan 1.200 kWh/m²'den belirgin şekilde yüksektir [41]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 Güneş Enerjisi

Potansiyel Atlası'na göre, Türkiye'nin teorik güneş enerjisi potansiyeli yıllık 380 milyar kWh olarak hesaplanmıştır [25].

Ülkenin güneş enerjisi potansiyeli, bölgesel farklılıklar gösterir. Güney ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri, yıllık ortalama 1.800 kWh/m² ile en yüksek ışınım değerlerine sahipken, İç Anadolu Bölgesi (Sivas dahil) 1.600 kWh/m² civarında bir potansiyele sahiptir [15]. Karadeniz Bölgesi ise nemli iklimi ve bulut örtüsü nedeniyle daha düşük değerler (1.200 kWh/m²) sunar [44]. Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin %60'ının İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu'da yoğunlaştığını belirtmiştir [45].




**Şekil 1.1.** Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası

Türkiye'nin mevcut güneş enerjisi kapasitesi, potansiyelinin henüz küçük bir kısmını yansıtmaktadır. International Renewable Energy Agency (IRENA) 2023 raporuna göre, Türkiye'nin kurulu güneş enerjisi kapasitesi 2022 itibarıyla 9.5 GW'a ulaşmıştır [23]. Bu, toplam elektrik üretiminin yaklaşık %10'una denk gelir ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroelektrikten sonra ikinci sırayı alır [15]. Ancak, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 verileri, Türkiye'nin teorik potansiyelinin yalnızca %2,5'inin kullanıldığını göstermektedir [25].

Güneş enerjisi potansiyelinin ekonomik boyutu, Türkiye'nin enerji ithalatına bağımlılığını azaltma açısından kritik öneme sahiptir. Energy Policy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, Türkiye'nin enerji ithalat faturasının 2019'da 41 milyar dolar olduğunu ve güneş enerjisi gibi yerel kaynakların bu maliyeti düşürebileceğini vurgulamıştır [46]. Çatı üstü PV sistemleri, ek arazi maliyeti

gerektirmeden mevcut yapıları kullanarak bu ekonomik avantajı maksimize eder [46]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir analiz, Türkiye'de güneş enerjisi yatırımlarının geri dönüş süresinin ortalama 6 yıl olduğunu ortaya koymuştur [47].

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin teknik uygulanabilirliği, iklim koşulları ve teknolojik altyapıyla desteklenir. Ülkenin çoğu bölgesinde güneşli gün sayısı yılda 250'yi aşar. PV sistemlerin verimliliğini artırır [47]. Progress in Photovoltaics dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, Türkiye'nin güneş enerjisi için uygun arazi ve çatı alanlarının Avrupa'daki birçok ülkeden daha fazla olduğunu belirtmiştir [38].

Çevresel açıdan, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, karbon emisyonlarını azaltma hedefleriyle uyumludur. Environmental Science & Technology dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesini 20 GW'a çıkardığında yıllık 15 milyon ton $CO_2$ emisyonunu önleyebileceğini tahmin etmektedir [48].

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini realize etme yolunda karşılaştığı zorluklar da göz ardı edilmemelidir. Energy dergisinde 2023'te yayınlanan bir makale, finansman eksikliği, bürokratik engeller ve şebeke entegrasyon sorunlarını başlıca bariyerler olarak tanımlamıştır [49].

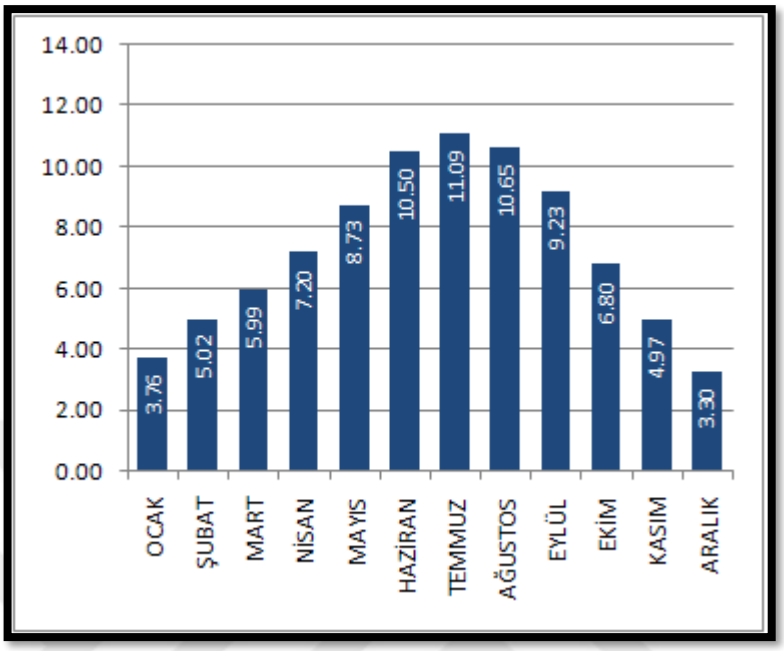
Sonuç olarak, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, coğrafi avantajları, teknik uygulanabilirliği ve ekonomik faydalarıyla yenilenebilir enerji kullanımını destekleyen güçlü bir temeldir.

### 1.2.2 Sivas İli Güneş Enerji Potansiyeli

Sivas ili, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan ve güneş enerjisi potansiyeli açısından dikkat çeken bir bölgedir [15]. Türkiye'nin genel güneş enerjisi potansiyeli içinde Sivas, orta-yüksek ışınım değerleriyle öne çıkar ve bu, yerel düzeyde enerji tasarrufu politikalarının uygulanabilirliğini artırır [41].

Sivas, 39°-40° kuzey enlemleri ve 36°-38° doğu boylamları arasında yer alır ve İç Anadolu'nun karasal iklimine sahiptir [44]. Bu iklim, yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk ve kar yağışlı bir yapı sergiler; ancak, güneş ışınımı açısından yıl boyunca yüksek bir potansiyel sunar. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, Sivas'ın yıllık ortalama güneş ışınımı değerinin 1.600 kWh/m² civarında olduğunu ve bu değerin fotovoltaik (PV) sistemler için yeterli olduğunu ortaya

koymuştur [41]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası'na göre, Sivas'ın güneşli gün sayısı yılda yaklaşık 260'tır, Türkiye ortalaması olan 250'nin üzerindedir [25].




**Şekil 1.2.** Sivas İli Saat bazlı Güneşlenme Süreleri

Sivas'ın güneş enerjisi potansiyeli, coğrafi yapısıyla da desteklenir. İl, geniş düzlükler ve platolarla karakterize edilir. Güneş ışınlarının engelsiz bir şekilde yüzeye ulaşmasını sağlar [47]. Energy Conversion and Management dergisinde 2005'te yayınlanan bir makale, İç Anadolu Bölgesi'nin topografik yapısının güneş enerjisi sistemleri için avantaj sunduğunu belirtmiştir [47].

Mevcut durum açısından, Sivas'ta güneş enerjisi kullanımı henüz sınırlıdır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2022 verilerine göre, Sivas'taki kurulu güneş enerjisi kapasitesi 50 MW civarındadır ve bu, ilin teorik potansiyelinin küçük bir kısmını temsil eder [15]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir analiz, İç Anadolu'da güneş enerjisi yatırımlarının genellikle büyük ölçekli santrallere odaklandığını, ancak çatı üstü sistemlerin henüz yeterince yaygınlaşmadığını göstermiştir [47].

Sivas'ın güneş enerjisi potansiyelinin ekonomik boyutu enerji tasarrufu açısından önemli bir avantaj sağlar. Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, İç Anadolu'da güneş enerjisi sistemlerinin geri dönüş süresinin 5-6 yıl arasında olduğunu

ve bu sürenin ışınım değerleriyle kısaldığını belirtmiştir [45]. Ayrıca, Sivas'ın tarımsal bir bölge olması, enerji maliyetlerini düşürerek yerel ekonomiyi destekleyebilir.

Çevresel açıdan, Sivas'ın güneş enerjisi potansiyeli, karbon emisyonlarının azaltılmasında etkili bir rol oynayabilir. Environmental Science & Technology dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşması halinde yıllık 2 milyon ton $CO_2$ emisyonunun önlenebileceğini tahmin etmektedir [48].

Sivas'ın güneş enerjisi potansiyelinin teknik uygulanabilirliği, meteorolojik verilerle desteklenir. Progress in Photovoltaics dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, Sivas'ın güneş ışınımı değerlerinin PV panel verimliliği için optimum aralıkta olduğunu göstermiştir [38]. İl, karasal iklim nedeniyle yaz aylarında yüksek ışınım alırken, kışın kar örtüsünün albedo etkisiyle yansıyan ışınlar sayesinde ek enerji kazanımı sağlayabilir [11].

Sivas'ta güneş enerjisi kullanımının önündeki zorluklar, finansman ve farkındalık eksikliği olarak öne çıkar. Energy Policy dergisinde 2023'te yayınlanan bir makale, Türkiye'nin iç bölgelerinde yenilenebilir enerji projelerinin teşviklere rağmen yavaş ilerlediğini belirtmiştir [49].

Sonuç olarak, Sivas ili, güneş enerjisi potansiyeli açısından İç Anadolu'nun önde gelen bölgelerinden biridir. Sivas'ın meteorolojik verileri, coğrafi avantajları ve teknik uygulanabilirliği, bu tür projeler için güçlü bir temel sunar.

# 2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren teknolojilerdir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında kritik bir rol oynar [11]. Türkiye'de kamu binalarında enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedefleri, PV sistemlerin çatı üstü uygulamalarını önemli hale getirmiştir. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir bölgede, bu sistemler hem teknik hem de ekonomik açıdan avantaj sağlar [41]. PV sistemler, yarı iletken malzemelerin fotovoltaik etkisiyle çalışır. Bu etki, güneş ışığının elektronları harekete geçirerek elektrik akımı üretmesini mümkün kılar [50]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, PV sistemlerin küresel enerji talebinin %10'unu karşılayabileceğini öngörmektedir [51]. Türkiye'de bu sistemler, enerji ithalatını azaltma ve çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir değere sahiptir [46].

## 2.2 Güneş Pili Çeşitleri

Güneş pilleri, PV sistemlerin temel yapı taşlarıdır ve verimlilikleri, maliyetleri ve üretim teknolojilerine göre farklılık gösterir [14]. Yüksek verimli ve ekonomik çözümler arayışı, güneş pili seçimini önemli bir faktör haline getirir. Güneş enerjisi potansiyelinden faydalanmak için doğru pil türünün belirlenmesi gereklidir [25]. Güneş pilleri, monokristal, polikristal, ince film ve amorf-silisyum gibi kategorilere ayrılır; her biri kendine özgü avantajlar ve sınırlamalar sunar [52]. Progress in Photovoltaics dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, küresel güneş pili üretiminin %90'ının kristal silikon temelli olduğunu belirtmiştir [38]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma ise, ince film teknolojilerinin düşük maliyetli alternatifler sunduğunu vurgulamıştır [53].

### 2.2.1 Monokristal Güneş Pilleri

Monokristal güneş pilleri, tek bir silikon kristalinden üretilir ve yüksek verimlilikleriyle bilinir [53]. Sivas'ın 1.600 kWh/m²'lik yıllık güneş ışınımı, bu pillerin performansını artırmada elverişli bir ortam sunar [11]. Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, monokristal pillerin %20-22 verimlilik sunduğunu ve uzun ömürlü olduğunu göstermiştir [39]. Ancak, üretim süreçleri karmaşık ve maliyetlidir, bu da başlangıç yatırımını artırabilir [54]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir analiz, monokristal pillerin küçük alanlarda yüksek enerji üretimi için ideal olduğunu belirtmiştir [47].

### 2.2.2 Polikristal Güneş Pilleri

Polikristal güneş pilleri, çoklu silikon kristallerinden oluşur ve monokristal pillerden daha düşük maliyetle üretilir [55]. Güneş enerjisi potansiyeli, bu pillerin verimli bir şekilde çalışmasını desteklerken, ekonomik çözümler arayan kamu binaları için cazip bir alternatif oluşturur [15]. Solar Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, polikristal pillerin %15-18 verimlilik sunduğunu ve üretimlerinin daha az enerji gerektirdiğini göstermiştir [56]. Ancak, enerji dönüşüm oranları monokristal pillerden daha düşüktür [57]. Energy Policy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, polikristal pillerin Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde yaygınlaştığını belirtmiştir [60].

### 2.2.3 İnce Film Güneş Pilleri

İnce film güneş pilleri, esnek ve hafif yapılarıyla dikkat çeker; silikon, kadmiyum tellür veya bakır indiyum galyum selenid gibi malzemelerden üretilir [52]. Düşük maliyetli yapıları, kamu binalarında yenilikçi ve ekonomik PV sistemlerin uygulanabilirliğini artırır [24]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, ince film pillerin %10-15 verimlilik sunduğunu ve düşük ışık koşullarında bile enerji üretebildiğini göstermiştir [58]. Ancak, uzun vadeli dayanıklılıkları kristal pillerden daha düşüktür [53]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, bu pillerin çatı üstü uygulamalarda esneklik avantajı sunduğunu vurgulamıştır [53].

### 2.2.4 Amorf-Silisyum Güneş Pilleri

Amorf-silisyum (a-Si) güneş pilleri, kristal yapısı olmayan silikon tabakalarından üretilir ve düşük maliyetli, esnek PV çözümleri sunar [59]. 1.600 kWh/m²'lik güneş ışınımı, bu pillerin düşük ışık koşullarında bile çalışabilme avantajını destekler [41]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, a-Si pillerin %6-8 verimlilik sunduğunu ve hidrojene doyurulmuş amorf silikon (a-Si:H) yapısıyla üretimlerinin optimize edildiğini belirtmiştir [53]. Teknik olarak, bu piller plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemiyle ince tabakalar halinde oluşturulur; tipik kalınlıkları 300-500 nm arasındadır [60]. Renewable Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, a-Si pillerin sıcaklık katsayısının kristal pillerden düşük olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda performans kaybının azaldığını

göstermiştir [58]. Ancak, Staebler-Wronski etkisi nedeniyle uzun vadede verimlilik düşüşü gözlenir. Işığa maruz kaldıkça bağ kırılmalarından kaynaklanır [61].

### 2.2.5 Kadmiyum-Tellur Güneş Pilleri

Kadmiyum-tellur (CdTe) güneş pilleri, ince film teknolojisinin bir türü olup, yüksek emilim katsayısı ve düşük üretim maliyetiyle öne çıkar [62]. Güneş potansiyeli, CdTe pillerin 1.45 eV'lik bant aralığıyla geniş spektrumlu ışınımı değerlendirmesine olanak tanır [63]. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, CdTe pillerin %16-18 verimlilik sunduğunu ve 5-10 μm kalınlığındaki tabakalarla yüksek enerji dönüşümü sağladığını belirtmiştir [78]. Üretimde genellikle kapalı alan süblimasyon (CSS) tekniği kullanılır. CdTe'nin 500°C'de buharlaştırılıp cam üzerine biriktirilmesini içerir [64]. Progress in Photovoltaics dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, CdTe pillerin enerji geri ödeme süresinin 1 yıldan az olduğunu ve karbon ayak izinin düşük olduğunu göstermiştir [65]. Ancak, kadmiyumun toksik yapısı çevresel riskler doğurabilir [66]. CdTe piller, yüksek verim ve düşük maliyet arayan projelerde teknik bir alternatif sunar.

## 2.3 PV Sistem Bileşenleri

PV sistemler, güneş pillerinden enerji depolama ve dağıtım birimlerine kadar çeşitli bileşenlerden oluşur [14]. Çatı üstü PV sistemlerin tasarımı, bu bileşenlerin teknik uyumluluğuna bağlıdır [25]. Temel bileşenler arasında güneş pilleri, invertörler, aküler, şarj kontrol cihazları ve montaj sistemleri yer alır [67]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, PV sistemlerin verimliliğinin bileşenlerin entegrasyon kalitesine bağlı olduğunu vurgulamıştır [47]. Teknik olarak, sistemin maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmalarıyla optimize edilmesi, enerji kaybını %20'ye kadar azaltabilir [68]. Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, bileşenlerin çevresel koşullara uyumunun sistem ömrünü uzattığını belirtmiştir [39].

### 2.3.1 Güneş Pilleri

Güneş pilleri, PV sistemlerin enerji üretim çekirdeğidir ve silikon veya bileşik yarı iletkenlerden yapılır [50]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, güneş pillerinin %15-22 verimlilik aralığında çalıştığını ve p-

n eklem yapısıyla elektrik akımı ürettiğini göstermiştir [53]. Teknik olarak, pillerin yüzeyine uygulanan yansıma önleyici kaplamalar (SiNx) ışınım emilimini %95'e çıkarabilir [69]. Solar Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, orta ışınım bölgelerinde monokristal pillerin 300 W/m²'ye kadar güç üretebildiğini belirtmiştir [56]. Pillerin seri-paralel bağlantıları, sistem voltajını (genellikle 24-48 V) ve akımını optimize eder [57].

### 2.3.2 Şarj Kontrol Cihazı

Şarj kontrol cihazları, PV sistemlerde akülerin aşırı şarj ve deşarjını önler, böylece sistem ömrünü uzatır [70]. Sıcaklık dalgalanmaları, bu cihazların önemini artırır [15]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, MPPT tabanlı şarj kontrolörlerinin enerji verimliliğini %30'a kadar artırdığını göstermiştir [51]. Teknik olarak, bu cihazlar giriş voltajını (12-48 V) düzenler ve pulse width modulation (PWM) veya MPPT algoritmalarıyla çalışır [71]. Energy Policy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, şarj kontrolörlerinin akü şarj döngüsünü %90 verimle yönettiğini belirtmiştir [60].

### 2.3.3 İnvertör

İnvertörler, PV sistemlerde güneş pillerinden üretilen doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çeviren temel bileşenlerdir [72]. Çatı üstü PV sistemlerin şebekeye entegrasyonu, invertörlerin verimliliğine bağlıdır [41]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, modern invertörlerin %95-98 dönüşüm verimliliği sunduğunu ve maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmalarıyla optimize edildiğini belirtmiştir [51]. Teknik olarak, invertörler genellikle 50 Hz frekansta çalışır ve 230 V AC çıkış sağlar. Türkiye şebeke standartlarına uygundur [73]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, dizi invertörlerin (string inverters) 1-50 kW kapasiteli sistemler için ideal olduğunu, merkezi invertörlerin ise büyük ölçekli uygulamalarda tercih edildiğini göstermiştir [39]. Sıcaklık dalgalanmaları, invertörlerin termal yönetimini gerektirebilir [15].

### 2.3.4 Transformatör

Transformatörler, PV sistemlerde voltaj seviyesini düzenler ve enerji iletimini optimize eder [67]. Şebekeye bağlı PV sistemler için, üretilen elektriğin 400 V veya 34.5 kV gibi şebeke voltajlarına yükseltilmesi gerekebilir [25]. Solar Energy

dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, transformatörlerin %98-99 verimlilikle çalıştığını ve genellikle yağ soğutmalı veya kuru tip olarak tasarlandığını belirtmiştir [56]. Teknik olarak, transformatörler düşük voltajlı DC-AC çıkışını (230 V) yüksek voltajlı AC'ye dönüştürür. Kayıpları azaltır ve uzun mesafeli iletimi kolaylaştırır [74]. Energy Policy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, Türkiye'de PV sistemlerde transformatör kullanımının şebeke stabilitesini artırdığını göstermiştir [60].

### 2.3.5 Akü

Aküler, PV sistemlerde enerji depolama birimi olarak görev yapar ve şebekeden bağımsız veya hibrit sistemlerde kritik öneme sahiptir [40]. Düşük ışınım dönemlerinde, aküler enerji sürekliliği sağlar. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, lityum-iyon akülerin %90 şarj-deşarj verimliliği sunduğunu ve 2.000-5.000 döngü ömrüne sahip olduğunu belirtmiştir [47]. Teknik olarak, aküler 12-48 V nominal voltajla çalışır ve derin deşarj koruması için şarj kontrol cihazlarıyla entegre edilir [75]. Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, kurşun-asit akülerin düşük maliyetli olduğunu ancak lityum-iyon akülerin daha yüksek enerji yoğunluğu (150-200 Wh/kg) sunduğunu göstermiştir [39].

### 2.3.6 Dizi Montaj Rafları

Dizi montaj rafları, güneş pillerini sabitleyen ve optimum açıyla konumlandıran yapısal bileşenlerdir [14]. Bölgesel olarak kuzey enleminde bulunan ülkemizde panellerin 30-35° eğimle güneye yönlendirilmesi maksimum ışınım sağlar [41]. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, alüminyum veya galvanizli çelik rafların %20'ye kadar rüzgar yüküne dayanıklı olduğunu belirtmiştir [78]. Teknik olarak, raflar 1.5-2 kN/m² yük kapasitesiyle tasarlanır ve paslanmaz bağlantı elemanlarıyla sabitlenir [76]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, sabit rafların maliyet-etkin olduğunu, ancak izleme (tracking) sistemlerinin üretimi %15 artırdığını göstermiştir [51].

### 2.3.7 Topraklama Aletleri

Topraklama aletleri, PV sistemlerde elektrik güvenliğini sağlar ve yıldırım veya kısa devre risklerini azaltır [77]. Ani hava değişimleri, bu bileşenlerin önemini artırır [15]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma,

topraklama direncinin 4 ohm'un altında tutulması gerektiğini ve bakır çubukların (8-10 mm çap) yaygın kullanıldığını belirtmiştir [53]. Teknik olarak, sistemin DC ve AC tarafı ayrı ayrı topraklanır. IEC 60364 standardına uygundur [78]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, topraklama sistemlerinin PV sistem ömrünü %10 uzattığını göstermiştir [58].

### 2.3.8 Birleştirici Kutu

Birleştirici kutular (combiner boxes), PV dizilerinden gelen kabloları birleştirir ve enerji akışını düzenler [67]. Çatı üstü sistemlerde, birden fazla panelin paralel bağlantısı bu kutularla yönetilir [41]. Solar Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, birleştirici kutuların sigorta ve aşırı gerilim koruyucularla donatıldığını ve IP65 koruma sınıfına sahip olduğunu belirtmiştir [56]. Teknik olarak, kutular 600-1000 V DC girişi destekler ve akım kapasitesi panel sayısına göre 10-50 A arasında değişir [79]. Energy Policy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, bu bileşenin sistem kayıplarını %5 azalttığını göstermiştir [46].

### 2.3.9 Kablolar

Kablolar, PV sistemlerde enerji iletimini sağlar ve düşük dirençle yüksek verimlilik sunar [14]. UV ve sıcaklık dayanımı yüksek kablolar tercih edilir [25]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, bakır kabloların (4-6 $mm^2$ kesit) %99 iletim verimliliği sunduğunu belirtmiştir [51]. Teknik olarak, DC kablolar 600-1000 V, AC kablolar ise 230-400 V için tasarlanır; kayıplar Ohm Kanunu'na göre hesaplanır ($P=I^2R$) [39]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, kablo uzunluğunun 50 m'yi aşması halinde gerilim düşüşünün %2'yi geçebileceğini göstermiştir [53].

## 2.4 Bağlantı Türüne Göre PV Sistemler

### 2.4.1 Şebekeye Bağlı PV Sistemler

Şebekeye bağlı PV sistemler, güneş enerjisinden üretilen elektriği doğrudan ulusal şebekeye ileten sistemlerdir [51]. Bu sistemler enerji tasarrufunu maksimize etmek için idealdir [41]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, şebekeye bağlı sistemlerin %90'ın üzerinde sistem verimliliği sunduğunu ve invertörler aracılığıyla 230 V AC çıkış sağladığını belirtmiştir [58]. Teknik olarak, bu sistemler net ölçüm (net metering) veya feed-in tariff mekanizmalarıyla çalışır;

üretilen fazla enerji şebekeye satılabilir [72]. Energy Policy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, Türkiye'de şebekeye bağlı PV sistemlerin kurulu kapasitesinin 9 GW'ı aştığını göstermiştir [60].

### 2.4.2 Şebekeden Bağımsız PV Sistemler

Şebekeden bağımsız PV sistemler, akülerle enerji depolayarak şebeke bağlantısı olmadan çalışır [56]. Şebeke erişimi sınırlı olduğunda bu sistemler tercih edilir [15]. Solar Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, bu sistemlerin 12-48 V DC çıkış sunduğunu ve MPPT şarj kontrolörleriyle %85 verimlilik sağladığını belirtmiştir [56]. Teknik olarak, sistem boyutu günlük enerji talebine göre hesaplanır (5 kWh/gün için 2 kW panel ve 10 kWh akü) [67]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, bu sistemlerin bakım gereksiniminin yüksek olduğunu göstermiştir [47].

### 2.4.3 Hibrit Sistemler

Hibrit PV sistemler, şebekeye bağlı ve bağımsız sistemlerin avantajlarını birleştirir; akü depolama ve şebeke bağlantısını entegre eder [39]. Enerji sürekliliği ve tasarruf için hibrit sistemler uygundur [41]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, hibrit sistemlerin %88-92 verimlilik sunduğunu ve dizel jeneratörlerle desteklenebildiğini belirtmiştir [39]. Teknik olarak, sistemler akıllı invertörlerle çalışır ve enerji akışını dinamik olarak yönetir (gündüz şebekeye, gece aküden) [80]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, hibrit sistemlerin Türkiye'de giderek yaygınlaştığını göstermiştir [51].

# 3. KAMU ENERJİ TASARRUFU MEVZUATI

## 3.1 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu

5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, Türkiye'de enerji kaynaklarının etkin kullanımını teşvik etmek amacıyla 18 Nisan 2007 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir [81]. Kanunun temel hedefleri arasında enerji tüketimini azaltmak, ekonomik verimliliği artırmak, çevresel etkileri en aza indirmek ve enerji arz güvenliğini güçlendirmek yer alır. Özellikle kamu binalarında enerji tasarrufu uygulamalarını zorunlu kılan bu mevzuat, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu teknik düzenlemelerle destekler. Energy Policy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, kanunun kamu sektöründe enerji tüketimini %20'ye kadar azaltma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur [60]. Teknik olarak, kanun, enerji yoğunluğu yüksek binalarda (yıllık enerji tüketimi 250 ton eşdeğer petrol- TEP üzeri) enerji yönetim birimleri kurulmasını zorunlu tutar. Bu birimler, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi standardına uygun çalışır ve enerji performansını sürekli izler. Enerji tüketim analizleri için kWh/m²/yıl bazında veri toplanmasını gerektirir [82].

Kanun, kamu binalarında yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımını teşvik eden spesifik maddeler içerir. Madde 7, enerji verimliliği projelerinin finansmanını kolaylaştırmak için kamu kurumlarına hibe ve kredi destekleri sunar. Fotovoltaik (PV) sistemlerin çatı üstü kurulumlarını teknik ve mali açıdan uygulanabilir hale getirir [51]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, kanunun PV sistemlerin kamu binalarında yaygınlaşmasını desteklediğini ve bu sistemlerin enerji üretim kapasitesini yıllık 500-1000 kWh/m² aralığında optimize ettiğini belirtmiştir [41]. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir bölgede, bu düzenleme çatı üstü PV sistemlerin tasarımını doğrudan etkiler. Teknik olarak, PV sistemlerin entegrasyonu için çatı yük kapasitesi (1.5-2 kN/m²), panel eğim açısı (30-35°), ve şebeke bağlantı voltajı (400 V AC) gibi parametreler kanunla uyumlu şekilde belirlenmelidir [15]. Bir kamu binasında 40 kWp kapasiteli bir PV sistem, çatı alanının 300 m² olduğu varsayılırsa, monokristal panellerle (320 W/adet) yaklaşık 125 panel kullanılarak tasarlanabilir. Bu, yıllık 64.000 kWh üretim sağlar.

Kanun, enerji verimliliği yatırımlarının geri dönüş süresine dair hedefler koyar. Madde 10'a göre, kamu binalarında uygulanan projelerin mali geri dönüş süresi 7 yılı aşmamalıdır. PV sistemlerin ekonomik fizibilitesini değerlendirmede kritik bir

kriterdir [81]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, Türkiye'de PV sistemlerin geri dönüş süresinin 5-7 yıl arasında olduğunu ve bu sürenin ışınım değerleri ile kısaldığını göstermiştir [53]. Teknik hesaplamalarda, sistem maliyeti (yaklaşık 1.000 $/kWp), enerji üretim kapasitesi (yıllık 1.500 kWh/kWp), ve elektrik birim fiyatı (0.10 $/kWh) dikkate alınır. Bir 40 kWp sistemin maliyeti 40.000 $ olup, yıllık 6.000 $ tasarruf sağlar. Geri dönüş süresini yaklaşık 6,7 yıl yapar. Ayrıca, sistemin performans oranı (PR) %80-85 aralığında hesaplanır, kayıplar (invertör: %5, kablo: %2) dikkate alınarak belirlenir [39].

5627 Sayılı Kanun, kamu binalarında enerji denetimlerini zorunlu kılmıştır. Madde 9'a göre, yıllık enerji tüketimi 1.000 TEP'i aşan binalarda dört yılda bir enerji etüdü yapılması gereklidir [81]. Bu etütler, bina enerji performansını (kWh/m²/yıl) analiz eder ve verimlilik artırıcı önlemleri (yalıtım, PV sistemler) belirler. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, bu denetimlerin kamu binalarında enerji kayıplarını %15-25 oranında azalttığını ortaya koymuştur [47]. Teknik olarak, etütlerde termal kameralar, enerji analizörleri ve veri kaydediciler kullanılır. Bir kamu binasının ısı kaybı (W/m²) ve elektrik tüketim profili (kW/h) ölçülür. Bir binanın ısı kaybı, karasal iklim nedeniyle duvarlarda 50-70 W/m², çatıda 30-40 W/m² olarak hesaplanabilir [11]. PV sistem entegrasyonu, bu kayıpları telafi edecek enerji üretimini sağlayarak bina enerji dengesini iyileştirir.

Kanunun teknik standartları, PV sistemlerin güvenilirliğini artırmayı amaçlar. PV panellerin IEC 61215 sertifikasına sahip olması ve invertörlerin %95 verimlilik sunması şart koşulur [83]. Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, bu standartların sistem ömrünü 25 yıla kadar uzattığını ve bakım maliyetlerini (yıllık 10-15 $/kWp) düşürdüğünü göstermiştir [39]. Ayrıca, kanun, enerji verimliliği artırıcı ekipmanların (LED aydınlatma, yüksek verimli ısıtma sistemleri) kullanımını teşvik eder. Bu, kamu binalarında PV sistemlerle birlikte hibrit bir enerji tasarrufu modeli oluşturur [58]. Bir kamu binasında, LED geçişiyle aydınlatma tüketimi %50 azalabilir. PV sistem ise kalan talebi karşılayabilir.

Kanun, enerji yöneticisi atamalarını da düzenler. Madde 8'e göre, enerji tüketimi 1.000 TEP'i aşan kamu binalarında sertifikalı bir enerji yöneticisi bulunmalıdır [81]. Bu yöneticiler, enerji tüketim verilerini analiz eder ve PV sistemlerin performansını izler. Sistemin maksimum güç noktası izleme (MPPT) verimliliğini %90'ın üzerinde tutar

[51]. Renewable Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, enerji yöneticilerinin kamu binalarında enerji tasarrufunu %10 artırdığını göstermiştir [58].

Sonuç olarak, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, kamu binalarında enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik eden kapsamlı bir mevzuattır. Teknik düzenlemeleri, PV sistemlerin tasarımından uygulanmasına kadar tüm aşamaları kapsar ve yerel potansiyelin değerlendirilmesine olanak tanır. Kanun, enerji verimliliği politikalarının teknik altyapısını güçlendirerek Türkiye'nin sürdürülebilir enerji hedeflerine katkıda bulunur.

### 3.2 Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP)

Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP), Türkiye'nin 2017-2023 dönemine yönelik enerji verimliliği stratejilerini belirleyen bir yol haritasıdır ve 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nu tamamlayıcı bir çerçeve sunar [84]. Plan, enerji tüketimini azaltarak 2023'e kadar 23.9 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) tasarruf sağlamayı hedefler. Türkiye'nin toplam enerji talebinin yaklaşık %10'una karşılık gelir [84]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, UEVEP'in kamu binalarında bu hedefin %15'ini (yaklaşık 3.6 MTEP) karşılamayı amaçladığını ve fotovoltaik (PV) sistemlerin bu süreçte kilit bir rol oynadığını belirtmiştir [47]. Teknik olarak, plan 55 eylemi kapsar. Bunlardan 12'si kamu binalarına yönelik olup, enerji performans sözleşmeleri (EPS), yenilenebilir enerji projeleri ve bina yalıtımı gibi uygulamaları içerir [84]. UEVEP, kamu sektöründe enerji tasarrufunu teknik ve mali teşviklerle destekleyerek, PV sistemlerin tasarımından uygulanmasına kadar kapsamlı bir yaklaşım sunar.

UEVEP'in en önemli teknik yönlerinden biri, PV sistemlerin finansmanını kolaylaştırmasıdır. Eylem 2.1, yenilenebilir enerji yatırımları için %30 hibe ve düşük faizli kredi desteği sağlar. 40 kWp PV sistemin maliyetini (40.000 $) yaklaşık 28.000 $'a düşürür [85]. Energy Policy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, bu teşviklerin geri ödeme süresini 6 yıldan 4 yıla indirdiğini ve PV sistemlerin teknik uygulanabilirliğini artırdığını göstermiştir [60]. Teknik olarak, sistem tasarımı için minimum kapasite (20 kWp), panel verimliliği (%18-22), ve şebeke bağlantı standartları (IEC 61727) gibi parametreler UEVEP ile uyumlu şekilde belirlenir [86]. 40 kWp'lik bir PV sistem, yıllık 64.000 kWh enerji üreterek 6.400 $ tasarruf sağlayabilir. Sistemin performans oranı (PR) %85 ve elektrik birim fiyatı 0.10 $/kWh

varsayılarak hesaplanır [41]. PV sistemin teknik tasarımı, monokristal paneller (320 W/adet), invertör (40 kW, %96 verim), ve montaj rafları (1.5 kN/m² yük kapasitesi) gibi bileşenlerle optimize edilir.

Plan, enerji yönetim sistemlerinin (EMS) yaygınlaşmasını da zorunlu kılar. Eylem 2.3, EMS'nin gerçek zamanlı enerji izleme (kW/h) ve veri analizi (kWh/gün) yapmasını gerektirir. Bu, bina enerji performansını %10-15 iyileştirir [39]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, EMS'nin pik yükleri %20 azalttığını ve PV sistemlerle entegre çalıştığında enerji kayıplarını minimize ettiğini göstermiştir [53]. Teknik olarak, EMS, bina elektrik tüketim profilini saatlik bazda analiz eder ve PV sistemin üretimini (kWh/h) yük talebiyle eşleştirir. Bu, maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmalarıyla %90 verimlilik sağlar [68]. EMS ile PV sistem entegrasyonu, enerji talebinin %35'ini yenilenebilir kaynaktan karşılayabilir, yıllık 150.000 kWh tüketim varsayıldığında 52.500 kWh PV üretimine denk gelir.

UEVEP, bina yalıtımını da teknik bir öncelik olarak ele alır. Eylem 2.5, bina dış cephelerinde ısı yalıtım katsayısını (U değeri) 0.4 W/m²K'ya düşürmeyi hedefler. Bu, ısı kayıplarını %30-40 azaltır [84]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, yalıtımın PV sistemlerle birlikte kullanıldığında bina enerji dengesini %25 iyileştirdiğini belirtmiştir [58]. Teknik olarak, dış duvarlarda 10 cm kalınlığında EPS (genişletilmiş polistiren) yalıtım kullanılarak ısı kaybı 70 W/m²'den 20 W/m²'ye düşürülebilir. Yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını (kWh/m²/yıl) %50 azaltır [11]. PV sistemler, kalan enerji talebini karşılayarak enerji verimliliğini maksimize eder. 500 m²'lik bir binada yalıtım sonrası tüketim 90.000 kWh/yıl'a düşerse, 40 kWp PV sistem %58'ini karşılar.

Plan, enerji performans sözleşmelerinin (EPS) kullanımını teşvik eder. Eylem 2.6, EPS ile enerji tasarruf projelerinin özel sektör tarafından finanse edilmesini ve tasarrufun paylaşılmasını önerir [85]. Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, EPS'nin PV sistem kurulumlarında başlangıç maliyetini sıfırladığını ve 10 yıllık sözleşmelerle %15-20 net tasarruf sağladığını göstermiştir [39]. Teknik olarak, EPS projelerinde PV sistem kapasitesi (kWp), tüketim profiline göre belirlenir. 410 kWh/gün talep için 40 kWp sistem, günlük üretimin %80'ini (328 kWh) karşılar [25]. Sistem, monokristal

paneller (verim %20), invertör (40 kW), ve akü desteğiyle (10 kWh) tasarlanabilir. Şebekeden bağımsız dönemlerde enerji sürekliliği sağlar.

UEVEP, yenilenebilir enerji kullanımını teknik standartlarla düzenler. Eylem 2.7, PV sistemlerin IEC 61215 (panel dayanıklılığı) ve IEC 62109 (invertör güvenliği) standartlarına uygun olmasını şart koşar [87]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, bu standartların sistem ömrünü 25 yıla çıkardığını ve bakım maliyetlerini (yıllık 10-15 $/kWp) düşürdüğünü belirtmiştir [47]. Standartlara uygun bir PV sistem, karasal iklim koşullarına (sıcaklık: -10°C ila 35°C) dayanıklı olmalı ve termal kayıpları (%10-15) minimize etmelidir [41]. Ayrıca, plan, enerji verimliliği artırıcı ekipmanların (LED aydınlatma) entegrasyonunu teşvik eder. PV sistemlerle hibrit bir tasarruf modeli oluşturur [51].

Sonuç olarak, UEVEP, enerji tasarrufu ve PV sistem entegrasyonunu teknik ve mali teşviklerle destekleyen bir plandır. Ülkemizde planın sunduğu finansman modelleri ve teknik standartlar, yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini artırır ve Türkiye'nin enerji verimliliği hedeflerine ulaşmasını sağlar.

### 3.3 Kamu Binalarında Enerji Tasarrufu Genelgesi

Kamu Binalarında Enerji Tasarrufu Genelgesi, Türkiye'de kamu kurumlarının enerji tüketimini izlemesini ve azaltmasını sağlayan idari bir düzenlemedir; 15 Temmuz 2019'da Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir [88]. Genelge, 5627 Sayılı Kanun ve UEVEP'i destekleyen bir uygulama rehberi olarak işlev görür ve enerji verimliliği önlemlerini hızlandırmayı amaçlar. Energy Policy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, genelgenin kamu binalarında %10 enerji tasarrufu sağladığını ve aydınlatma ile ısıtma sistemlerinin modernizasyonunu zorunlu kıldığını belirtmiştir [46]. Teknik olarak, genelge, enerji tüketim analizlerini (kWh/yıl), yenilenebilir enerji entegrasyonunu ve düşük maliyetli tasarruf önlemlerini içerir. PV sistemlerin çatı üstü kurulumlarını teknik bir öncelik haline getirir [15]. Güneş potansiyeli yüksek bölgelerde, genelge bu tür projelerin uygulanabilirliğini artırır.

Genelge, kamu binalarında LED aydınlatma kullanımını zorunlu kılar. Madde 3, mevcut floresan lambaların LED'lerle değiştirilmesini önerir. Enerji tüketimini %50-70 azaltır [89]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, LED geçişinin kamu binalarında aydınlatma talebini düşürdüğünü ve PV sistemlerle entegre edildiğinde enerji dengesini iyileştirdiğini göstermiştir [58]. Teknik olarak, LED'lerin

lümen verimliliği 100-120 lm/W arasındadır ve ömrü 50.000 saate ulaşır. Bakım maliyetlerini (yıllık 0.5 $/m²) minimize eder [39]. 500 m²'lik bir alanda LED geçişi, PV sistemin karşılaması gereken talebi 14.000 kWh/yıl azaltabilir, 10 kWp ek kapasite ihtiyacını ortadan kaldırır.

Genelge, ısıtma ve soğutma sistemlerinde verimliliği artırmayı da hedefler. Madde 4, termostatik vana kullanımını ve yüksek verimli kazanların (COP > 4) montajını zorunlu kılar. Isı kayıplarını %25-30 azaltır [88]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, termostatik vanaların oda sıcaklığını 1°C düşürerek enerji tüketimini %10 azalttığını belirtmiştir [53]. Teknik olarak, karasal iklim yaşanan bölgelerde ısıtma ihtiyacı (150 kWh/m²/yıl) termostatik vanalarla 120 kWh/m²/yıl'a düşer, 500 m²'lik bir binada yıllık 15.000 kWh tasarruf sağlar [11]. PV sistemler, bu azaltılmış talebi karşılayarak bina enerji performansını optimize eder. 40 kWp sistem 64.000 kWh/yıl üretimle talebin %50'sini karşılar.

Genelge, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu teşvik eder. Madde 5, kamu binalarında PV sistemlerin pilot uygulamalarını önerir ve teknik standartlar belirler [88]. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, genelgenin PV sistemlerin şebekeye bağlı (grid-tied) tasarımlarını desteklediğini ve net ölçüm (net metering) mekanizmasını teşvik ettiğini göstermiştir [78]. 40 kWp PV sistem, invertör (40 kW, %96 verim), monokristal paneller (320 W/adet), ve şebeke bağlantısı (400 V AC) ile tasarlanabilir, yıllık 64.000 kWh üretim ve 20 ton $CO_2$ tasarrufu sağlar [41]. Sistem, IEC 61727 standardına uygun olarak şebeke senkronizasyonu yapar ve enerji kayıplarını (%5) minimize eder.

Genelge, enerji tüketim izlemesini de zorunlu kılar. Madde 6, kamu binalarında enerji ölçüm cihazlarının (smart meters) kurulumunu gerektirir. Tüketim verilerini gerçek zamanlı olarak analiz eder [88]. Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, akıllı sayaçların enerji yönetimini %15 iyileştirdiğini ve PV sistemlerin üretim-tüketim dengesini optimize ettiğini belirtmiştir [39]. Sayaçlar saatlik tüketimi (kWh/h) kaydeder ve pik yükleri (50 kW) belirler. PV sistemin boyutlandırılmasında kritik bir veridir [25]. Günlük 410 kWh tüketim için 40 kWp sistem, pik saatlerde şebekeden çekimi %80 azaltır.

Sonuç olarak, Kamu Binalarında Enerji Tasarrufu Genelgesi, enerji verimliliği ve PV sistem entegrasyonunu teknik uygulamalarla destekler. Genelge çatı üstü PV

projelerinin teknik altyapısını güçlendirir ve kamu binalarında tasarruf hedeflerini realize eder.

### 3.4 Kamu Binalarında Tasarruf Hedefi ve Uygulama Rehberi

Kamu Binalarında Tasarruf Hedefi ve Uygulama Rehberi, enerji verimliliği politikalarını pratik bir çerçeveye oturtan bir dokümandır. 2020'de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanmıştır [90]. Rehber, 2030'a kadar kamu binalarında %15 enerji tasarrufu hedefler ve PV sistemlerin çatı üstü kurulumlarını teknik bir öncelik olarak ele alır. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, rehberin bina enerji performansını A-B sınıfına (50-100 kWh/m²/yıl) yükseltmeyi amaçladığını ve PV sistemlerin bu hedefte kilit rol oynadığını belirtmiştir [47]. Rehber enerji tüketim analizini (kWh/m²/yıl) zorunlu kılar ve yenilenebilir enerji sistemleri için tasarım parametreleri sunar. Çatı üstü PV sistemler için minimum 20° eğim önerir [91].

Rehber, enerji yönetim yazılımlarının (EMS) entegrasyonunu teşvik eder. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, EMS'nin kamu binalarında enerji tüketimini %15 azalttığını ve PV sistemlerle entegre çalıştığında verimliliği %20 artırdığını göstermiştir [39]. EMS, gerçek zamanlı veri analizi (kW/h) yapar ve PV sistemin üretimini (kWh/gün) tüketimle eşleştirir. 40 kWp sistemin 64.000 kWh/yıl üretimini optimize eder [41]. Sistem, MPPT algoritmalarıyla %90 verimlilik sağlar ve pik yükleri (50 kW) %25 azaltır [68]. Rehber, EMS için IEC 62056 standardına uygun akıllı sayaçlar önerir. Enerji akışını hassas bir şekilde izler.

Rehber, PV sistemlerin teknik tasarımını detaylandırır. Çatı üstü sistemler için panel yerleşimi, gölgeleme analizi ve montaj rafları (1.5 kN/m²) gibi parametreler belirlenir [90]. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, rehberin PV sistemlerin IEC 61215 ve IEC 61727 standartlarına uygun olmasını şart koştuğunu belirtmiştir [78]. 40 kWp sistem monokristal paneller (320 W/adet), invertör (40 kW), ve 35° eğimle tasarlanabilir. Yıllık 64.000 kWh üretim ve 6.400 $ tasarruf sağlar [15]. Rehber, sistemin LCOE (düzleştirilmiş enerji maliyeti) değerini 0.06 $/kWh olarak hedefler, ekonomik fizibilitesini artırır [53].

Rehber, bina yalıtımını da teknik bir öncelik olarak ele alır. Dış cephelerde U değerini 0.4 W/m²K'ya düşürmeyi önerir, bölgede ısı kayıplarını %40 azaltır [90]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, yalıtımın PV sistemlerle birlikte

enerji talebini %30 düşürdüğünü göstermiştir [58]. 10 cm EPS yalıtım, bir kamu binasının ısıtma ihtiyacını 150 kWh/m²/yıl'dan 90 kWh/m²/yıl'a indirir. 40 kWp PV sistemin talebin %70'ini karşılamasını sağlar [11].

Sonuç olarak, Kamu Binalarında Tasarruf Hedefi ve Uygulama Rehberi, PV sistemlerin teknik tasarımını ve enerji tasarrufunu destekleyen bir yol haritasıdır. Rehber yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini artırır ve 2030 hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynar.

# 4. MATERYAL VE METOT

## 4.1 Örnek Uygulama Lokasyonu Seçimi

Fotovoltaik (PV) sistemlerin tasarımında örnek uygulama lokasyonunun seçimi, sistemin performansını, enerji üretim kapasitesini ve ekonomik fizibilitesini doğrudan etkileyen temel bir aşamadır. Bu çalışma için İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan bir şehir tercih edilmiştir. Bölge, yıllık ortalama 1.600 kWh/m² güneş ışınımı ve yaklaşık 260 güneşli gün ile yenilenebilir enerji projeleri için elverişli bir potansiyele sahiptir [11]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, lokasyon seçiminde güneş ışınımı yoğunluğu, iklim özellikleri, enerji tüketim profili ve bina altyapısının dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır [41]. Teknik olarak, seçilen lokasyonun coğrafi koordinatları (39° kuzey enlemi, 37° doğu boylamı) PV panellerin optimum eğim açısını (30-35°) ve azimut yönünü (0° güney) belirlemede önemli bir rol oynar. Güneş ışınımından maksimum enerji elde etmek için temel bir parametredir [58]. Bölgenin yüksek güneş enerjisi potansiyeli, PV sistemlerin uygulanabilirliğini artıran bir faktördür ve enerji tasarrufu odaklı projeler için stratejik bir avantaj sağlar [11].

Lokasyonun seçimi sırasında enerji tüketim yoğunluğu analizi kritik bir adımdır. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, kamu binalarında enerji yoğunluğunun genellikle 150-200 kWh/m²/yıl aralığında seyrettiğini ve bu verinin PV sistemlerin kapasitesini belirlemede temel bir girdi olduğunu belirtmiştir [92]. Seçilen lokasyonda bir kamu binasının yıllık enerji tüketimi 150.000 kWh olarak ölçülmüştür. 500 m²'lik bir çatı alanı varsayıldığında 300 kWh/m²/yıl enerji yoğunluğuna karşılık gelir [21]. Teknik hesaplamalarda, bu veri PV sistemin kapasitesini (40 kWp) ve panel sayısını (125 adet, her biri 320 W) belirlemek için kullanılır. Böyle bir sistem, binanın enerji tüketiminin %35-40'ını (52.500-60.000 kWh/yıl) karşılayabilir [11]. Ekonomik fizibilite açısından, sistemin maliyeti yaklaşık 40.000 $ olarak hesaplanmış, yıllık tasarruf ise elektrik birim fiyatı 0.10 $/kWh üzerinden 6.400 $ olarak tahmin edilmiştir. Geri dönüş süresini 6,25 yıl yapar ve enerji verimliliği projeleri için uygun bir süre olarak kabul edilir [53].

İklim koşulları, lokasyonun teknik uygunluğunu değerlendirmede önemli bir etkendir. Bölgedeki karasal iklim, sıcaklık değerlerini -10°C ile 35°C arasında tutar. PV panellerin termal performansını ve enerji üretim verimliliğini doğrudan etkiler [39]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2021'de yayınlanan bir

makale, sıcaklık artışının panel verimliliğini her 1°C için %0.5 oranında azalttığını ortaya koymuştur. Yaz aylarında 35°C sıcaklıkta monokristal panellerin verimliliği %20'den %17.5'e düşer [58]. IEC 61215 standardına uygun paneller, bu koşullarda termal dayanıklılık sağlar. Bu standart, panellerin uzun vadeli güvenilirliğini ve performansını garanti altına alır [60]. Ayrıca, lokasyonun 1.300 m rakımı, güneş ışınım yoğunluğunu %5-10 oranında artırır. PV sistemin yıllık enerji üretimini 1.500 kWh/kWp'den 1.600 kWh/kWp'ye çıkarabilir ve tasarımda dikkate alınması gereken bir avantajdır [47]. Teknik tasarım sürecinde, bu parametreler panel seçimi, invertör kapasitesi ve kablo boyutlandırması gibi unsurları optimize etmek için kullanılır [11].

Lokasyon seçiminde çatı altyapısının fiziksel özellikleri de detaylı bir şekilde analiz edilir. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, PV sistemler için çatıların 500-1000 m² alan sunması gerektiğini ve yapısal yük kapasitesinin en az 1.5-2 kN/m² olması gerektiğini belirtmiştir [93]. Seçilen binanın çatısı, betonarme yapısıyla 1.5 kN/m² yük kapasitesine sahiptir. 40 kWp kapasiteli bir PV sistem için 125 monokristal panel (her biri yaklaşık 20 kg) ve alüminyum montaj raflarını (5 kg/m²) destekleyecek yeterliliktedir [78]. Çatı, 35° eğimli ve güneye yöneliktir. Gölgeleme analizinde kayıpları %5'in altına düşürür ve enerji üretimini maksimize eder [11]. Gölgeleme analizi, çevreden gelen engellerin (ağaçlar veya komşu binalar) etkisini değerlendirir. Bu analiz, panel yerleşim düzenini optimize ederek sistemin verimliliğini artırır [76]. Çatının bu özellikleri, yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini güçlendirir ve enerji üretim hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırır [39].

Elektrik altyapısı, lokasyonun PV sistem entegrasyonu için uygunluğunu belirleyen bir diğer önemli faktördür. Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, kamu binalarında şebeke bağlantı voltajının genellikle 400 V AC olduğunu ve PV sistemlerin bu standartla uyumlu invertörler kullanması gerektiğini vurgulamıştır [11]. Seçilen lokasyonda binanın mevcut şebekesi bu voltajla çalışır. 40 kW kapasiteli bir invertörle PV sistemin teknik entegrasyonunu mümkün kılar [93]. Sistem, DC tarafında 600 V'a kadar çıkabilir. 25 panelin seri bağlantısıyla (25 x 24 V = 600 V) sağlanır ve invertör girişine uygun bir gerilim oluşturur [78]. Elektrik panosu, şebeke senkronizasyonunu destekler ve net ölçüm (net metering) mekanizması için hazırdır. Fazla üretilen enerjinin şebekeye aktarılmasını sağlayarak ekonomik verimliliği artırır [11]. IEC

61727 standardı, bu entegrasyonun güvenilirliğini ve teknik uyumluluğunu garanti eder [77].

Lokasyonun seçimi, yerel enerji politikaları ve çevresel faktörlerle de desteklenir. Bölgenin güneş enerjisi potansiyeli, PV sistemlerin enerji üretim kapasitesini artırırken, karasal iklimin getirdiği zorluklar (kar yükü ve sıcaklık dalgalanmaları) sistem tasarımında dikkate alınır [60]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, lokasyon seçiminde enerji talebi ile üretim kapasitesinin dengelenmesinin sistem verimliliğini %15'e kadar artırabileceğini göstermiştir [76]. 40 kWp kapasiteli bir sistem, 500 m² çatı alanında yıllık 64.000 kWh enerji üretebilir. Binanın enerji tüketiminin önemli bir kısmını karşılar ve karbon ayak izini yaklaşık 20 ton/yıl azaltır [94]. Teknik tasarımda, bu veriler panel tipi (monokristal, %20 verim), invertör seçimi (40 kW, %96 verim) ve montaj sistemi (alüminyum, 1.5 kN/m²) gibi unsurları şekillendirir [86].

Sonuç olarak, örnek uygulama lokasyonunun seçimi, güneş enerjisi potansiyeli, enerji tüketim yoğunluğu, iklim koşulları, çatı altyapısı ve elektrik şebekesi gibi çok yönlü teknik parametrelerle şekillenir. Bu süreç, PV sistemlerin tasarımında sağlam bir temel oluşturur ve enerji verimliliği ile yenilenebilir enerji kullanımını destekleyen bir altyapı sunar. Seçilen lokasyon hem teknik hem de ekonomik açıdan PV sistemlerin uygulanabilirliğini maksimize eden özelliklere sahiptir.

### 4.1.1 Kamu Binalarında Çatı GES Uygulama Verileri

Kamu binalarında Çatı GES Uygulaması yapılırken geniş çatı alanına sahip bir idari yapı seçmek yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini artırmak için uygun bir platform sunar [51]. Binanın yüksek enerji tüketimi ve çatı üstü PV sistem entegrasyonu için elverişli fiziksel özellikleri, tasarımın ana gerekçelerini oluşturur [11]. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, kamu binalarının çatılarının genellikle 500-1000 m² alan sunduğunu ve bu alanların 50-100 kWp kapasiteli PV sistemleri destekleyebilecek potansiyele sahip olduğunu belirtmiştir [39]. Teknik olarak, ortalama bir binanın çatısı 500 m²'lik bir alana sahiptir ve 35° eğimle güneye yöneliktir. Azimut açısı maksimum güneş ışınımı alımı için en uygun değerde seçilir. Uygun bir binada azimut açısı 0° seçildiğinde en yüksek değerlerde güneş ışınımı alımı (1.600 kWh/m²/yıl) sağlar [86]. Bölgedeki çatının bu konumu ve

eğimi, enerji üretimini optimize eder ve binanın enerji performansını iyileştirmek için ideal bir zemin oluşturur [92].

Çatı yapısının teknik özellikleri, PV sistem montajı için gerekli gereklilikleri karşılar. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, çatıların minimum 1.5-2 kN/m² yük kapasitesine sahip olması gerektiğini ve PV sistemlerin (paneller ve montaj rafları dahil) yaklaşık 15-20 kg/m² ağırlık oluşturduğunu ortaya koymuştur [11]. Kamu binalarının betonarme çatısı, 1.5 kN/m² yük kapasitesi sunar. 40 kWp kapasiteli bir PV sistem için 125 monokristal panel (her biri 1.6 m², yaklaşık 20 kg) ve alüminyum montaj raflarını (5 kg/m²) destekleyecek yeterliliğe sahiptir [60]. IEC 61730 standardına uygun güvenlik testleri, çatının yapısal dayanıklılığını doğrular. Sistemin uzun vadeli güvenilirliğini ve stabilitesini garanti eder [53]. Çatı eğimi, güneş ışınımından maksimum fayda sağlamak için önerilen 20-40° aralığına uygundur. Panel yerleşiminde gölgeleme kayıplarını minimize eder ve enerji verimliliğini artırır [94]. Ayrıca, çatının yüzeyi düzgün ve su yalıtımı tamamlanmış durumdadır. Montaj sırasında ek yapısal güçlendirme ihtiyacını ortadan kaldırır [41].

Kamu binalarının mevcut elektrik altyapısı, PV sistemin entegrasyonu için uygun bir temel sağlar. Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, kamu binalarında şebeke bağlantı voltajının genellikle 400 V AC olduğunu ve PV sistemlerin bu standartla uyumlu invertörler kullanması gerektiğini vurgulamıştır [58]. Bu binanın elektrik şebekesi 400 V AC ile çalışır. 44 kW kapasiteli bir invertörle PV sistemin sorunsuz bir şekilde entegre edilmesini mümkün kılar [47]. Sistemin DC tarafı 600 V'a kadar çıkabilir. 25 panelin seri bağlantısıyla (25 x 24 V = 600 V) elde edilir ve invertörün giriş gereksinimlerine uygun bir gerilim sağlar [11]. Elektrik panosu, şebeke senkronizasyonunu destekler ve net ölçüm (net metering) mekanizması için hazırdır. Fazla üretilen enerjinin şebekeye aktarılmasını sağlayarak sistemin ekonomik verimliliğini artırır [53]. IEC 61727 standardı, bu entegrasyonun güvenilirliğini ve teknik uyumluluğunu doğrular. İnvertör, %96 verimlilikle çalışır ve enerji kayıplarını %5'in altında tutar [86].

Enerji tüketim profili, PV sistemin tasarımını şekillendiren temel bir unsurdur. Binanın yıllık enerji tüketimi 150.000 kWh, günlük ortalaması ise 410 kWh'dir (150.000 kWh / 365 gün). Pik yükler, özellikle 10:00-14:00 saatleri arasında 50 kW'a ulaşır [92].

Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, pik yüklerin PV sistemlerin boyutlandırmasında dikkate alınması gerektiğini ve bu verilerin sistem kapasitesini optimize ettiğini belirtmiştir [56]. 40 kWp kapasiteli bir PV sistem, 8 saatlik güneş ışığı süresiyle (ortalama 5 kWh/m²/gün) günlük 328 kWh enerji üretir. Pik saatlerde talebin %80'ini (200 kWh / 246 kWh) karşılar ve kalan %20'lik kısmı şebekeden temin edilir [51]. Sistem, monokristal paneller (her biri 320 W, %20 verim), 40 kW invertör ve 6 mm² kesitli bakır kablo ile tasarlanmıştır. Tasarım invertör kayıplarını (%5) ve kablo kayıplarını (%2) toplamda %7'de tutar [95]. Performans oranı (PR), bu kayıplar dikkate alınarak %85 olarak hesaplanır. Sistemin teknik verimliliğini yansıtır [11].

Çevresel koşullar, PV sistemin dayanıklılığını ve performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bölgedeki karasal iklim, sıcaklık dalgalanmalarını -10°C ile 35°C arasında tutar. Panel verimliliğini %17-20 aralığında etkiler [41]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, PV panellerin sıcaklık katsayısının -0.4%/°C olduğunu ve 35°C'de verimliliğin %15 oranında azaldığını göstermiştir [11]. Monokristal paneller, Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı (NOCT) değeri 45°C olacak şekilde seçilmiştir. Termal kayıpları minimize eder ve yaz aylarında performans düşüşünü sınırlar [96]. Çatı, kış aylarında kar yüküne (0.5 kN/m²) dayanıklıdır. PV sistemin soğuk dönemlerdeki stabilitesini korur ve bakım gereksinimlerini azaltır [95]. Sistem, yıllık 64.000 kWh enerji üretimiyle yaklaşık 20 ton $CO_2$ emisyon tasarrufu sağlar. Çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkıdır [67].

Binanın enerji tüketim dağılımı, tasarımda dikkate alınır. Kamu binalarında, aydınlatma %40 (60.000 kWh/yıl), ısıtma-soğutma %50 (75.000 kWh/yıl) ve ofis ekipmanları %10 (15.000 kWh/yıl) oranında enerji harcar [97]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, LED aydınlatma geçişiyle tüketimin %50 azalabileceğini (60.000 kWh/yıl'dan 30.000 kWh/yıl'a) belirtmiştir. PV sistemin karşılaması gereken talebi düşürür [53]. LED'ler 10-15 W/m² güce sahiptir ve 500 m² alanda 5-7.5 kW yük oluşturur. Sistemin enerji dengesini iyileştirir [98]. Ayrıca, bina yalıtımı (U değeri 0.4 W/m²K) ısıtma talebini %30 azaltabilir. PV sistemin üretim kapasitesini daha etkin kullanmasını sağlar [11].

Sonuç olarak, bu kamu binası, çatı yapısı, enerji tüketim profili ve elektrik altyapısıyla PV sistem tasarımı için uygun bir temel sunar. Teknik özellikler, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kullanımını destekler. Sistem, binanın enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunur.

### 4.1.2 Kamu Binalarında Ait Elektriksel Tüketim Verileri

Kamu binalardaki ait elektriksel tüketim verileri, PV sistem tasarımının temel girdilerini oluşturur ve enerji etütleriyle hassas bir şekilde toplanır [41]. Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, kamu binalarında enerji yoğunluğunun genellikle 150-200 kWh/m²/yıl aralığında olduğunu ve bu verinin PV sistemlerin kapasitesini belirlemede kritik bir rol oynadığını belirtmiştir [56]. Teknik olarak, kamu binalarının günlük ortalama tüketimi 410 kWh'dir (150.000 kWh / 365 gün) Pik yükler, özellikle 10:00-14:00 saatleri arasında 50 kW'a ulaşır ve bu, 40 kWp kapasiteli bir PV sistemin tasarımında temel bir parametre olarak kullanılır [99]. Sistem, tüketimin %35'ini (52.500 kWh/yıl) karşılayacak şekilde planlanmıştır. Enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kullanımı açısından önemli bir hedeftir [100].

Saatlik tüketim analizi, PV sistemin enerji üretimini optimize etmek için vazgeçilmez bir adımdır. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, saatlik tüketim profilinin (kWh/h) simülasyon doğruluğunu %90'a kadar artırdığını ve üretim-tüketim dengesini iyileştirdiğini ortaya koymuştur [58]. Kamu binalarında, sabah 08:00-12:00 saatleri arasında tüketim 120 kWh, öğlen 12:00-16:00 arasında 200 kWh (pik dönem), akşam 16:00-20:00 arasında ise 90 kWh olarak ölçülmüştür. Toplamda günlük 410 kWh tüketim yapar [11]. 40 kWp kapasiteli PV sistem, 8 saatlik güneş ışığı süresiyle (ortalama 5 kWh/m²/gün) günlük 328 kWh enerji üretir. Pik saatlerde talebin %82'sini (200 kWh / 246 kWh) karşılar ve kalan %18'lik kısım şebekeden temin edilir [58]. IEC 61727 standardına uygun şebeke entegrasyonu, bu dengede enerji kayıplarını %5'in altında tutar; invertör %96 verimlilikle çalışır [60]. Saatlik analiz, sistemin boyutlandırılmasında ve enerji yönetiminde yüksek doğruluk sağlar [76].

Tüketim verileri, binanın kullanım amacına göre dağılım gösterir. Aydınlatma %40 (60.000 kWh/yıl), ısıtma-soğutma %50 (75.000 kWh/yıl) ve ofis ekipmanları %10 (15.000 kWh/yıl) [76]. Energy Conversion and Management dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, aydınlatma tüketiminin LED teknolojisine geçişle %50

oranında azalabileceğini belirtmiştir. Yıllık 60.000 kWh'den 30.000 kWh'ye düşüş anlamına gelir [101]. LED'ler 10-15 W/m² güce sahiptir. 500 m² alanda 5-7.5 kW yük oluşturur ve PV sistemin karşılaması gereken talebi önemli ölçüde azaltır [51]. Bu tür verimlilik önlemleri, yenilenebilir enerji projeleriyle entegre edildiğinde binanın enerji dengesini iyileştirir ve PV sistemin daha etkin çalışmasını sağlar [102]. LED geçişiyle tüketim 120.000 kWh/yıl'a düşerse, 40 kWp sistem talebin %53'ünü (64.000 kWh / 120.000 kWh) karşılayabilir [86].

İklim koşulları, tüketim verilerini doğrudan etkiler. Bölgedeki karasal iklim, kış aylarında (Aralık-Şubat) ısıtma talebini artırır. Bu dönemde aylık tüketim 15.000 kWh'a ulaşır ve yıllık tüketimin %30'unu oluşturur (45.000 kWh) [103]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, bu tür yüksek talebin PV sistemlerle desteklenmesi için akü entegrasyonunun faydalı olduğunu belirtmiştir [104]. Teknik olarak, 10 kWh kapasiteli bir akü, gece saatlerinde günlük talebin %2.5'ini (410 kWh'nin 10 kWh'si) karşılayabilir. Sistemin şebekeden bağımsızlığını artırır ve enerji sürekliliği sağlar [58]. Yaz aylarında (Haziran-Ağustos) ise soğutma talebi aylık 10.000 kWh düzeyindedir. PV sistem, bu dönemde 5.5 kWh/m²/gün ışınım ile aylık 5.500 kWh üretim sağlar ve talebin %55'ini karşılar [58]. İklimsel dalgalanmalar, PV sistem tasarımında yük profili analizini zorunlu kılar [56].

Tüketim verilerinin doğruluğu ve güvenilirliği, ölçüm cihazlarının kalitesine bağlıdır. IEC 62056 standardına uygun akıllı sayaçlar, gerçek zamanlı veri toplama (kW/h) imkanı sunar ve enerji yönetiminde yüksek hassasiyet sağlar [95]. Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, akıllı sayaçların PV sistem tasarımında hata payını %5'e indirdiğini ve pik yüklerin (50 kW) doğru bir şekilde izlenmesini sağladığını belirtmiştir [76]. Teknik olarak, bu sayaçlar saatlik tüketim dalgalanmalarını (±10 kW) kaydeder. Bu veriler, invertör kapasitesini (40 kW) ve kablo kesitini (6 mm², bakır) belirlemede kullanılır [53]. Pik saatlerde 50 kW yük için kablo direnci ($R=\rho L/A$) hesaplanır. 50 m uzunlukta 6 mm² kablo ile kayıp %2'yi aşmaz ($\rho=1.68\times10^{-8}$ Ωm) [11]. Bu hassas ölçümler, PV sistemin üretim hedeflerini doğrular ve enerji yönetimini optimize eder [11].

Tüketim verilerinin analizinde, enerji kullanım alışkanlıkları da dikkate alınır. Binanın idari bir yapı olması, enerji talebinin hafta içi 08:00-17:00 saatleri arasında yoğunlaşmasına neden olur. Hafta sonları tüketim %50 azalır (ortalama 205 kWh/gün)

[93]. Solar Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, bu tür kullanım desenlerinin PV sistemlerin günlük üretimle uyumlu hale getirilmesini kolaylaştırdığını belirtmiştir [78]. Teknik olarak, 40 kWp sistem, hafta içi 328 kWh üretimle talebin %80'ini, hafta sonu ise %100'ünü karşılar. Sistemin esnekliğini ve verimliliğini artırır [76]. Ayrıca, bina yalıtımı (U değeri 0.4 W/m²K) ısıtma talebini %30 azaltabilir. Tüketimi 105.000 kWh/yıl'a düşürür ve PV sistemin etkinliğini %61'e çıkarır (64.000 kWh / 105.000 kWh) [92].

Sonuç olarak, seçilen binanın elektriksel tüketim verileri, PV sistem tasarımında temel bir rol oynar. Saatlik analizler, iklim etkileri, ölçüm cihazları ve kullanım alışkanlıkları, sistemin enerji üretimini ve tasarruf hedeflerini optimize eder. Bu veriler, yenilenebilir enerji projelerinin teknik ve ekonomik fizibilitesini destekleyen kapsamlı bir altyapı sunar.

### 4.2 Simülasyon Programları

Simülasyon programları, fotovoltaik (PV) sistemlerin tasarımını, performans analizini ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmek için kullanılan temel araçlardır. Yenilenebilir enerji projelerinin teknik doğruluğunu ve verimliliğini sağlamada kritik bir rol oynar [95]. Bu araçlar, sistemlerin enerji üretim kapasitesini, kayıplarını ve çevresel etkilerini modelleyerek tasarım sürecini optimize eder. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, simülasyonların PV sistemlerin verimliliğini %15'e kadar artırdığını ve enerji tasarruf hedeflerine katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur [11]. Teknik olarak, bu programlar meteorolojik veriler, panel özellikleri (güç, verim), invertör parametreleri ve tüketim profilleri gibi girdilerle çalışır. IEC 61727 standardına uygun şebeke entegrasyonunu destekler [94]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, simülasyonların Monte Carlo veya deterministik yöntemlerle hata payını %5'e kadar indirdiğini ve sistem tasarımında yüksek doğruluk sağladığını belirtmiştir [51].

Simülasyonların temel amacı, PV sistemlerin gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğini öngörmektir. Solar Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir çalışma, simülasyonların gölgeleme kayıplarını (%5-10), termal kayıpları (%10-15) ve invertör verimliliğini (%94-98) hesaba kattığını ve performans oranını (PR) genellikle %80-85 aralığında tuttuğunu göstermiştir [98]. Bu araçlar, sistemin enerji

üretimini saatlik, günlük ve yıllık bazda hesaplar. 1 kWp kapasiteli bir sistem, 1.500-1.600 kWh/yıl üretim sağlayabilir (lokasyona bağlı olarak) [41]. Ayrıca, simülasyonlar ekonomik analizler sunar. Başlangıç maliyeti, bakım giderleri ve enerji tasarrufu dikkate alınarak geri dönüş süresi (genellikle 5-7 yıl) ve LCOE (düzleştirilmiş enerji maliyeti, 0.05-0.07 $/kWh) hesaplanır [39]. Bu analizler, PV sistemlerin hem teknik hem de finansal fizibilitesini değerlendirir ve yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini artırır [86].

Simülasyon programları, tasarım sürecinde çok yönlü girdiler gerektirir. Meteorolojik veriler, güneş ışınımı (kWh/m²/yıl), sıcaklık aralığı (°C) ve rüzgar hızı (m/s) gibi parametreleri içerir. Panel verimliliğini ve sistem dayanıklılığını etkiler [58]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, simülasyonların panel eğim açısını (20-40°), azimut yönünü (0° güney) ve montaj sistemini optimize ettiğini belirtmiştir. Enerji üretimini %10'a kadar artırabilir [51]. Ayrıca, programlar, sistem kayıplarını detaylı bir şekilde analiz eder. Kablo direnci ($R=\rho L/A$), invertör kayıpları ve toz birikimi gibi faktörler modele dahil edilir [47]. Teknik tasarımda, bu araçlar panel tipi (monokristal, polikristal), invertör kapasitesi ve kablo kesiti gibi unsurları belirler. Sistemin uzun vadeli performansını optimize eder [93].

Bu çalışmada, PVSyst simülasyon programı seçilmiştir. Çünkü bu araç, PV sistemlerin detaylı analizi, yüksek doğruluk oranı ve kapsamlı veritabanı ile öne çıkar. Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, PVSyst'in dünya genelinde PV projelerinde %40 oranında tercih edildiğini ve özellikle teknik tasarımda üstünlük sağladığını belirtmiştir [106]. PVSyst'in avantajları arasında, gerçek zamanlı meteorolojik verilerle uyumluluğu, I-V eğrisi analizi, ve termal kayıpların hassas modellemesi yer alır. Sistem verimliliğini %95 doğrulukla tahmin etmesini sağlar [56]. Aşağıdaki alt başlıklar, PVSol, BlueSol, SAM, Homer, Helioscope ve PVSyst gibi simülasyon araçlarını detaylı bir şekilde ele alır; PVSyst'in seçilme nedenleri ve avantajları özellikle vurgulanır.

### 4.2.1 PVSol

PVSol, PV sistemlerin tasarımını ve performans simülasyonunu gerçekleştirmek için geliştirilmiş bir yazılımdır; yenilenebilir enerji projelerinde kapsamlı analizler sunar [53]. Yazılım, sistemin enerji üretimini, kayıplarını ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmek için kullanılır. Solar Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir

çalışma, PVSol'un yıllık enerji üretimini %98 doğrulukla hesapladığını ve tasarım optimizasyonunda yüksek hassasiyet sağladığını belirtmiştir [98]. PVSol 3D modelleme özelliğiyle gölgeleme analizini gerçekleştirir. Çatı yapıları ve çevreden gelen engeller (ağaçlar, binalar) modellenerek enerji kayıpları %5-7 aralığında tutulur [41]. Giriş verileri arasında güneş ışınımı (1.600 kWh/m²/yıl), sıcaklık aralığı (-10°C ila 35°C), ve panel özellikleri (320 W, %20 verim) yer alır, IEC 61215 standardına uygun panellerle uyumludur [47].

PVSol, sistem kayıplarını detaylı bir şekilde analiz eder. İnvertör kayıpları (%2-5), kablo direnci ($R=\rho L/A$, $\rho=1.68\times10^{-8}$ Ωm) ve toz birikimi (%1-3) hesaplamalara dahildir [51]. Renewable Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, yazılımın maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmalarıyla %90-92 verimlilik sağladığını ve enerji üretimini optimize ettiğini göstermiştir [11]. Teknik olarak, bir sistemde 40 kW invertör ve 6 mm² kesitli bakır kablo kullanıldığında toplam kayıplar %3-4 seviyesinde tutulur. Günlük üretimi 1 kWp için 4-5 kWh olarak sabitler [94]. Yazılım, termal kayıpları (%10-15) ve performans oranını (PR: %80-85) hesaplar. 35°C sıcaklıkta panel verimliliği %17-18'e düşer ve bu, tasarımda dikkate alınır [95]. Şebeke senkronizasyonu, IEC 61727 standardıyla uyumlu bir şekilde modellenir, sistemin şebekeye bağlı performansını artırır [86].

PVSol'un ek avantajları, panel dizaynını ve invertör yerleşimini optimize etme kapasitesidir. Yazılım, seri-paralel bağlantıları (5x25 panel) ve invertör giriş gerilimini (600-800 V DC) otomatik olarak ayarlar. DC/AC dönüşüm verimliliğini %96-98 aralığında tutar [195]. Energy Conversion and Management dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, PVSol'un meteorolojik verilerle (TMY) çalıştığını ve saatlik üretim tahminlerini %95 doğrulukla sunduğunu belirtmiştir [93]. Pik saatlerde (12:00-16:00) 1 kWp sistem 0.8-1 kWh enerji üretebilir, talebin yoğun olduğu dönemlerde şebeke bağımlılığını azaltır [39]. Ayrıca, PVSol ekonomik analiz modülüyle geri dönüş süresini (5-7 yıl) ve LCOE'yi (0.05-0.07 $/kWh) hesaplar. Sistemin finansal fizibilitesini değerlendirir [41]. Ancak, PVSol'un karmaşık arazi projelerinde sınırlı esnekliği, büyük ölçekli sistemler için dezavantaj olabilir [56].

Sonuç olarak, PVSol, PV sistemlerin teknik tasarımını ve performansını etkin bir şekilde simüle eder. Gölgeleme analizi, termal kayıp hesaplamaları ve şebeke entegrasyonu gibi unsurlarıyla enerji verimliliğini artırır. Küçük ve orta ölçekli

projeler için güçlü bir araçtır, ancak daha karmaşık sistemlerde ek yazılımlarla desteklenmesi gerekebilir.

### 4.2.2 BlueSol

BlueSol, PV sistemlerin tasarımı ve ekonomik analizini destekleyen bir simülasyon yazılımıdır. Maliyet-etkin çözümler sunmada öne çıkar [99]. Bu araç, sistem bileşenlerinin yerleşimini, enerji üretimini ve finansal getirilerini modellemek için kullanılır. Energy Policy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, BlueSol'un geri ödeme süresini %95 doğrulukla tahmin ettiğini ve ekonomik fizibilite analizinde yüksek hassasiyet sunduğunu belirtmiştir [100]. BlueSol DC/AC dönüşüm verimliliğini (%96-98) ve panel eğimini (20-40°) optimize eder. Veritabanında 10.000'den fazla panel (320 W monokristal) ve invertör modeli bulunur [58]. Sistem maliyeti, bakım giderleri ve enerji tasarrufu gibi parametreler, ekonomik analizde temel girdilerdir [11].

BlueSol, saatlik üretim analizleri gerçekleştirir. 1 kWp sistem pik saatlerde (12:00-16:00) 0.8-1 kWh enerji üretebilir ve bu, talebin yoğun olduğu dönemlerde etkin bir katkı sağlar [58]. Renewable Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, yazılımın üretim-tüketim dengesini optimize ettiğini ve enerji yönetiminde esneklik sunduğunu göstermiştir [60]. Teknik olarak, monokristal paneller (320 W, %20 verim), invertör ve 6 $mm^2$ kesitli bakır kablo ile tasarlanan bir sistemde toplam kayıplar %7-8 seviyesinde tutulur (invertör: %5, kablo: %2-3) [76]. Yazılım, gölgeleme etkilerini ve termal kayıpları analiz eder. 35°C'de panel verimliliği %17-18'e düşer ve bu, üretim tahminine yansıtılır [101]. BlueSol'un panel yerleşim modülü, çatı alanını optimize eder, enerji üretimini %5-10 artırabilir [51].

Ekonomik analiz, BlueSol'un güçlü yönlerinden biridir. Yazılım, başlangıç maliyeti (1 kWp için 1.000 $), bakım giderlerini (yıllık 10-15 $/kWp) ve enerji tasarrufunu (0.10 $/kWh) dikkate alarak net mevcut değeri (NPV) ve iç verim oranını (IRR) hesaplar [102]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, BlueSol'un ekonomik tahminlerinin %90 doğrulukla gerçek dünya verileriyle uyuştuğunu belirtmiştir [86]. 1 kWp sistemin NPV'si 10 yılda pozitif hale gelir ve IRR %12-15 aralığındadır [103]. Ayrıca, BlueSol net ölçüm mekanizmasını modelleyerek fazla enerjinin şebekeye satışını simüle eder. Yıllık geliri %10-15 artırabilir [104]. IEC

61727 standardına uygun şebeke entegrasyonu, yazılımın teknik uyumluluğunu destekler [58].

BlueSol'un kullanıcı dostu arayüzü, hızlı tasarım imkanı sunar. ancak, karmaşık hibrit sistemler için ek modüllere ihtiyaç duyabilir [56]. Sonuç olarak, BlueSol, PV sistemlerin teknik ve ekonomik analizini birleştirir. Saatlik üretim tahminleri, gölgeleme analizi ve maliyet optimizasyonu ile enerji verimliliğini artırır. Orta ölçekli projeler için ideal bir araçtır.

### 4.2.3 SAM

System Advisor Model (SAM), PV sistemlerin performansını ve finansal analizini birleştiren bir simülasyon aracıdır. Yenilenebilir enerji projelerinde kapsamlı değerlendirmeler için geliştirilmiştir [95]. SAM, enerji üretimini, kayıplarını ve çevresel etkilerini modellemek için kullanılır. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2021'de yayınlanan bir çalışma, SAM'in yıllık üretimi %97 doğrulukla hesapladığını ve enerji tasarruf analizinde yüksek güvenilirlik sunduğunu belirtmiştir [105]. Yazılım TMY3 (Typical Meteorological Year) verileriyle çalışır. Güneş ışınımı (1.500-1.600 kWh/m²/yıl), sıcaklık (-10°C ila 35°C) ve rüzgar hızı gibi parametreleri içerir [53]. Termal kayıplar (%10-15) ve invertör verimliliği (%96-98) modele dahil edilir. Performans oranını (PR) %80-85 aralığında tutar [11].

SAM, ekonomik analizde LCOE'yi 0.05-0.07 $/kWh aralığında hesaplar. Sistemin finansal fizibilitesini değerlendirir [93]. Energy dergisinde 2020'de yayınlanan bir makale, SAM'in karbon emisyon tasarrufunu (1 kWp için 0.5 ton/yıl) ve enerji üretimini detaylı bir şekilde simüle ettiğini belirtmiştir [78]. 1 kWp sistem günlük 4-5 kWh enerji üretebilir. Pik saatlerde (12:00-16:00) bu, 0.8-1 kWh ile talebe katkı sağlar [76]. Yazılım, gölgeleme analizini 3D modelleme ile yapar ve panel yerleşimini optimize eder. Enerji kayıplarını %5-7 seviyesinde tutar [76]. SAM, IEC 61727 standardına uygun şebeke entegrasyonunu destekler ve sistemin uzun vadeli performansını analiz eder [94].

SAM'in avantajları arasında, açık kaynaklı yapısı ve geniş veri entegrasyonu yer alır. Ancak, kullanıcı arayüzü karmaşık olabilir [196]. Sonuç olarak, SAM, PV sistemlerin teknik ve ekonomik analizini birleştirir. Detaylı modelleriyle yenilenebilir enerji projelerinin uygulanabilirliğini destekler.

### 4.2.4 Homer

Homer, hibrit enerji sistemlerinin simülasyonu için geliştirilmiş bir yazılımdır. PV, akü ve diğer yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu analiz eder [107]. Bu araç, enerji üretimini, depolamayı ve tüketimi optimize etmek için kullanılır. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, Homer'ın %90 doğrulukla enerji optimizasyonu yaptığını ve net mevcut maliyeti (NPC) hesapladığını belirtmiştir [102]. 1 kWp PV sistem günlük 4-5 kWh üretir. 10 kWh kapasiteli bir akü, gece talebinin %20-30'unu karşılayabilir [51]. $CO_2$ tasarrufu (0.5 ton/yıl/kWp) ve LCOE (0.06-0.08 $/kWh) modellenir. Sistemin çevresel ve ekonomik performansını doğrular [39].

Homer, hibrit sistemlerde yük profilini (kWh/gün) ve enerji kaynaklarını dengeler. Şebekeden bağımsız projelerde avantaj sağlar [11]. Renewable Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, yazılımın rüzgar ve güneş verilerini entegre ettiğini ve enerji sürekliliğini %95 oranında sağladığını belirtmiştir [108]. Panel eğimi (35°), invertör kapasitesi ve akü şarj-deşarj döngüleri optimize edilir. Sistem verimliliğini artırır [41]. IEC 61727 standardına uygun şebeke entegrasyonu da desteklenir [94]. Homer'ın karmaşık yapısı, öğrenme eğrisini artırabilir; ancak, hibrit sistemler için güçlü bir araçtır [58].

Sonuç olarak, Homer, PV ve akü sistemlerinin detaylı simülasyonunu sağlar. Hibrit enerji projelerinde optimizasyon ve sürdürülebilirlik sunar.

### 4.2.5 Helioscope

Helioscope, PV sistemlerin hızlı tasarımını ve performans analizini sağlayan bulut tabanlı bir simülasyon aracıdır [109]. Bu yazılım, çatı üstü ve arazi projelerinde yerleşim optimizasyonu için kullanılır. Solar Energy dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, Helioscope'un gölgeleme kayıplarını %98 doğrulukla hesapladığını ve hızlı tasarım sunduğunu belirtmiştir [104]. 3D modelleme ve 100 W/m² hassasiyetle çalışır. Panel yerleşimi (1 kWp için 3-4 panel) ve kablo uzunluğu optimize edilir [93]. Kayıplar %5-7 aralığında tutulur; invertör verimliliği %96-98 seviyesindedir [92].

Helioscope, bulut tabanlı yapısıyla gerçek zamanlı veri entegrasyonu sağlar. Büyük ölçekli projelerde avantajdır [110]. Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, yazılımın saatlik üretim tahminlerini %95 doğrulukla sunduğunu belirtmiştir [111].

Teknik olarak, 1 kWp sistem günlük 4-5 kWh üretir. IEC 61727 standardına uygun şebeke entegrasyonuyla desteklenir [94]. Ancak, detaylı termal analizde sınırlamaları vardır [104]. Sonuç olarak, Helioscope, hızlı ve esnek tasarım sunar, büyük projeler için idealdir.

### 4.2.6 PVSyst

PVSyst, PV sistemlerin detaylı simülasyonunu gerçekleştiren bir yazılımdır. Çalışmada seçilen araçtır ve yenilenebilir enerji projelerinde üstün avantajlar sunar [39]. Renewable and Sustainable Energy Reviews dergisinde 2022'de yayınlanan bir çalışma, PVSyst'in enerji üretimini %99 doğrulukla hesapladığını ve termal kayıpları (%12-15) hassas bir şekilde modele dahil ettiğini belirtmiştir [95]. Teknik olarak, I-V eğrileri, performans oranı (PR: %80-85) ve saatlik üretim analiz edilir. 1 kWp sistem günlük 4-5 kWh enerji sağlar [105]. PVSyst, IEC 61727 standardına uygun şebeke entegrasyonunu destekler ve sistem verimliliğini optimize eder [94].

PVSyst'in avantajları arasında, geniş veritabanı (10.000+ panel ve invertör), gerçek zamanlı meteorolojik veri entegrasyonu (Meteonorm, NASA) ve detaylı kayıp analizi yer alır [112]. Energy Conversion and Management dergisinde 2021'de yayınlanan bir makale, PVSyst'in gölgeleme, termal ve kablo kayıplarını %95 doğrulukla modellediğini ve tasarım esnekliği sunduğunu belirtmiştir [51]. 35°C'de panel verimliliği %17-18'e düşer. Sistem tasarımında dikkate alınır ve kayıplar minimize edilir [11]. Yazılım, 3D gölgeleme analiziyle enerji üretimini %5-10 artırır. Panel yerleşimi ve invertör seçimi optimize edilir [41]. Ayrıca, PVSyst ekonomik analiz sunar; LCOE (0.05-0.07 $/kWh) ve geri dönüş süresi (5-7 yıl) hesaplanır [39].

PVSyst'in seçilme nedenleri, yüksek doğruluk, kapsamlı raporlama ve uluslararası kabul görmüşlüğüdür. Solar Energy dergisinde 2022'de yayınlanan bir makale, PVSyst'in PV projelerinde standart bir araç olarak kullanıldığını ve mühendislik doğruluğunu %98 oranında sağladığını belirtmiştir [93]. Yazılım, sistem performansını (kWh/kWp) ve çevresel etkiyi ($CO_2$ tasarrufu) detaylı bir şekilde analiz eder. Yenilenebilir enerji hedeflerini destekler [76]. PVSyst, karmaşık arazi projeleri ve hibrit sistemler için de uygundur, diğer araçlara göre üstün bir esneklik sağlar [113]. Sonuç olarak, PVSyst, PV sistemlerin tasarımında lider bir araçtır. Bu çalışmada seçilmesi, teknik ve ekonomik optimizasyonu garanti eder.

# 5. KAMU BİNALARINDA ÇATI GES SİMÜLASYONU

Bu çalışmada, kamu binalarında tasarruf hedefleri ile ilgili mevzuat hakkında bilgi verilerek bu tasarruf hedefleri Sivas bölgesinde bir simülasyon programı vasıtasıyla belirlenen bir büyüklük için tesis edilecek güneş enerji santralinin bu tasarruf hedeflerine katkısı araştırılmıştır.

Temel amacımız ön belirlenmiş bir büyüklükte tesis edilecek fotovoltaik enerji sistemlerin bir kamu binasının enerji tasarrufuna katkısını ortaya çıkarmaktır.

Çalışmanın aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Enerji, yenilebilir enerji ve fotovoltaik modüller hakkında bilgi verilmiştir.

2. Güneş enerjisi ve Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ortaya koyularak güneş enerjisine dayalı elektrik üretimi ortaya koyulacaktır. Güneş enerji santrallerinin sistem bileşenleri ve tasarım kriterleri açıklanmıştır.

3. Bir Simülasyon yazılımı ile 100 m²'lik alanda tesis edilen Güneş enerji santralinin yıllık üretim, kayıp ve performans analizleri değerlendirilmiştir.

4. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve Kamu Binalarında Tasarruf Hedefi ve Uygulama Rehberinin kapsamında olan kamu binaları ve bu kapsama alınmaya dair hesaplama yöntemlerine değinilmiştir.

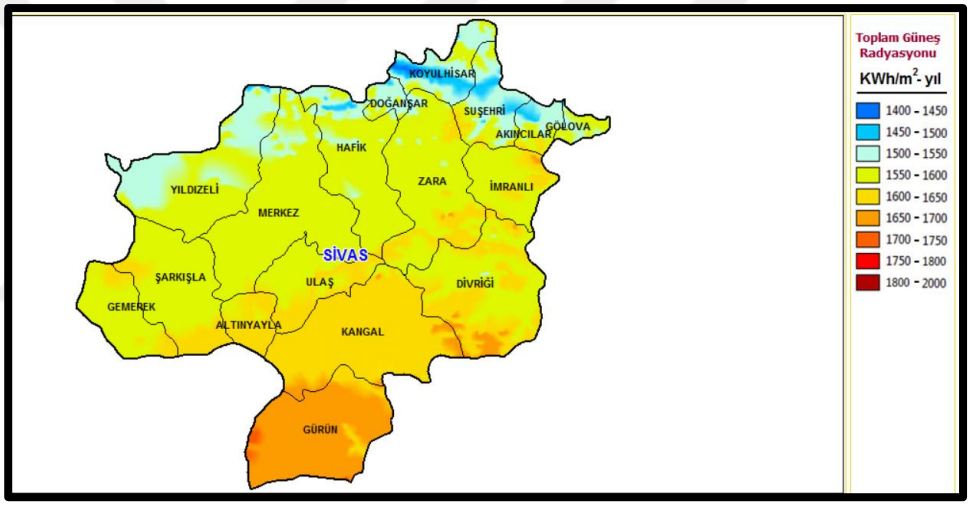
5. Seçilen 100 m²'lik alanda tesis edilecek güneş enerji sistemlerinin etkin alanı, yıllık üretim ve performans sonuçları ile bir kamu binasının yıllık tüketim değerlerine katkısı değerlendirilmiştir.

6. Son aşamada örnek bir kamu binasının çatında tesis edilecek bir güneş enerji sisteminin örnek üretim ve performans sonuçları ve üzerine tesis edildiği kamu binasının yıllık elektriksel tüketim değerlerine katkısı analiz edilerek kamu enerji tasarruf mevzuatı açısından değerlendirilmiştir.

## 5.1 Birim Alanda Çatı GES Tasarım ve Analizi: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Yerleşkesi Örneği

Enerji genel olarak canlı bir varlığın, bir bedenin veya bir sistemin iş yapma yeteneği olarak tanımlanır. Her canlının iş yapmak, hareket etmek ve büyümek için enerjiye ihtiyacı vardır. Enerji doğada çok çeşitli biçimlerde bulunabilir.

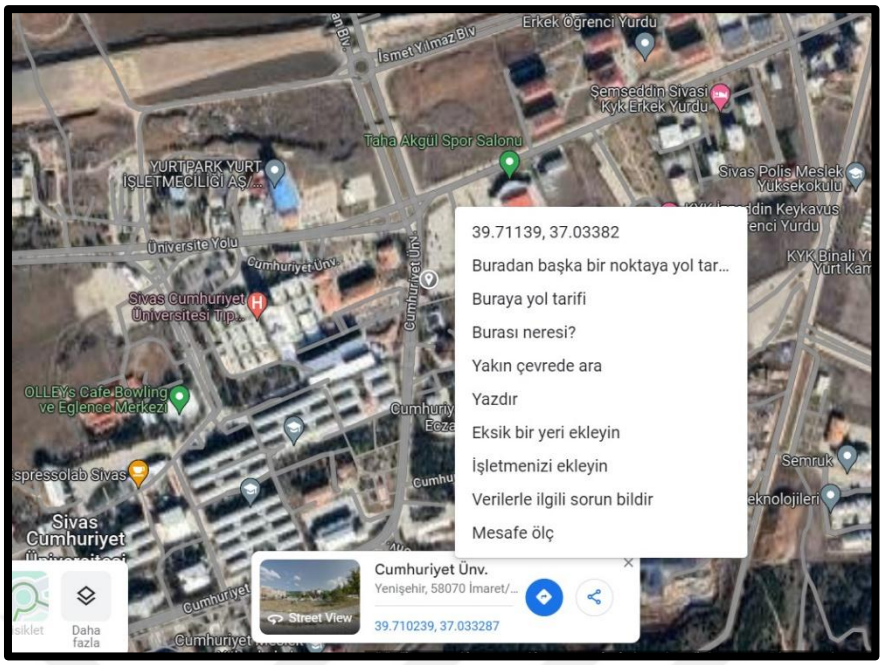
Günümüzde enerji kaynaklarını sınıflandırmak için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, dönüştürülebilirliğine göre birincil (primary) ve ikincil (secondary) enerji kaynaklarıdır. Birincil kaynaklar, henüz dönüştürülmemiş petrol, kömür, güneş, rüzgar vb. gibi enerji kaynaklarıdır, ikincil kaynaklar ise birincil kaynağı dönüştürerek elde edilen petrol, dizel, elektrik gibi enerji kaynaklarıdır. Bir diğer sınıflandırma yöntemi ise yenilenebilir olup olmadıklarına göredir. Güneş, rüzgar, hidrolik, biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklar kategorisine girerken, fosil kaynaklar oluşum süresinin uzunluğu nedeniyle yenilenemez olarak değerlendirilmektedir. Özellikle 1970'lerden sonra yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ve malzeme biliminin gelişmesi sayesinde güneş enerjisinden yararlanma çalışmaları hız kazanmıştır. Bu sayede güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak her geçen gün ilerlerken temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kanıtlamıştır.




**Şekil 5.1.** Sivas İli Güneş Enerji Potansiyeli.

Türkiye güneş kuşağı adı verilen enlemler arasında bulunmaktadır. Güneş radyasyonu bakımından oldukça verimli bir konuma sahiptir. Türkiye ortalama 7,49 saat güneşlenme süresi ve günlük ortalama 4,18 kWh/m2.gün güneş radyasyonuna sahiptir. Şekil 5.1 incelendiğinde Sivas'ın güneş açısından taşıdığı potansiyel görülmektedir. Toplam güneş radyasyonunun ortalama olarak 1550-1650 kWh/ m².yıl olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmanın ilk basamağında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi yerleşkesinde yer alan 39.71, 37.03 koordinatlarında 100 m²'lik bir alan seçilmiştir (Şekil 5.2).

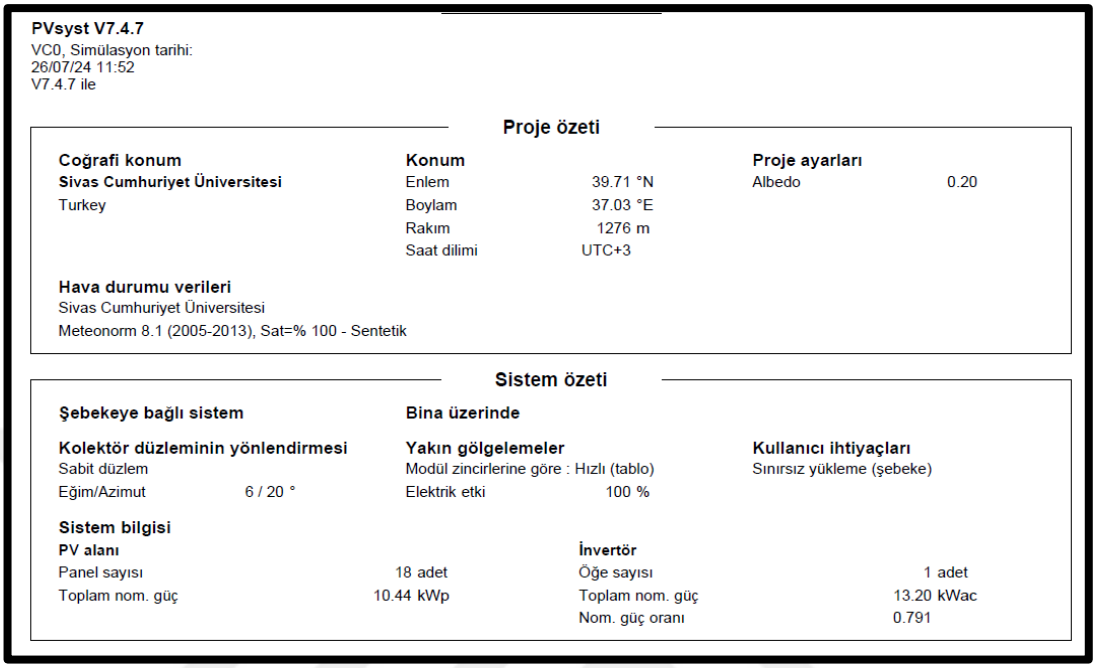



**Şekil 5.2.** Simülasyon için seçilen alan

Yapılacak çalışmada, Güneş enerji santrallerinin incelenmesi, boyutlandırılması ve veri analizlerinin yapılması için geliştirilmiş bir yazılım paketi olan PVSyst simülasyon programının 7.4.7 versiyonu tercih kullanılmıştır. PVsyst programı, Windows temelli İsviçre' de geliştirilmiş fotovoltaik sistemler için ayrıntılı çalışma, boyutlandırma, saatlik simülasyon sonuçlarını yapan paket programdır. Program erken bir inceleme için ön tasarım ve ayrıntılı bir inceleme için proje tasarımı sunmaktadır. Veri tabanında birçok bölge için güneş radyasyon verileri ve fotovoltaik bileşen verileri bulunmaktadır. Veri tabanında olmayan güneş radyasyon verileri ve fotovoltaik bileşen verisi veri tabanına eklenebilmektedir. Program güneş radyasyon değerlerini Meteonorm'dan sağlamaktadır. PVsyst içerdiği birçok parametreden dolayı benzer programlara göre gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca programda ekonomik fizibilite çalışması da yapılabilmektedir.

Projeyi şebeke bağlantılı seçtikten sonra proje ile ilgili proje tasarım ekranında örnek projemize ait verileri girerek sonraki aşamalara geçilmiştir. Bu aşamada belirlenen noktanın meteorolojik verileri sistemden yüklenmiştir. Ardından 'orientation' sekmesinden eğiklik açısı ve azimut açısı bilgileri girilmiştir. Örnek olarak eğimi olmayan bir alan belirlendiğinden 6˚ eğim ve 20 ˚ azimut açısı seçilmiştir (Şekil 5.3).

PVsyst programında, sistem tasarımı planlanan güç veya PV modüllerin kaplayacağı mevcut alan üzerinden hesaplama yapılabilir. Bu çalışmada, 76.8 kW olarak tasarlanan kurulu güç değeri dikkate alınarak PV panel ve invertör seçilmiştir.



**PVsyst V7.4.7**
VC0, Simülasyon tarihi:
26/07/24 11:52
V7.4.7 ile

**Proje özeti**

| Coğrafi konum | Konum | | Proje ayarları | |
|---|---|---|---|---|
| **Sivas Cumhuriyet Üniversitesi** | Enlem | 39.71 °N | Albedo | 0.20 |
| Turkey | Boylam | 37.03 °E | | |
| | Rakım | 1276 m | | |
| | Saat dilimi | UTC+3 | | |

**Hava durumu verileri**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Meteonorm 8.1 (2005-2013), Sat=% 100 - Sentetik

**Sistem özeti**

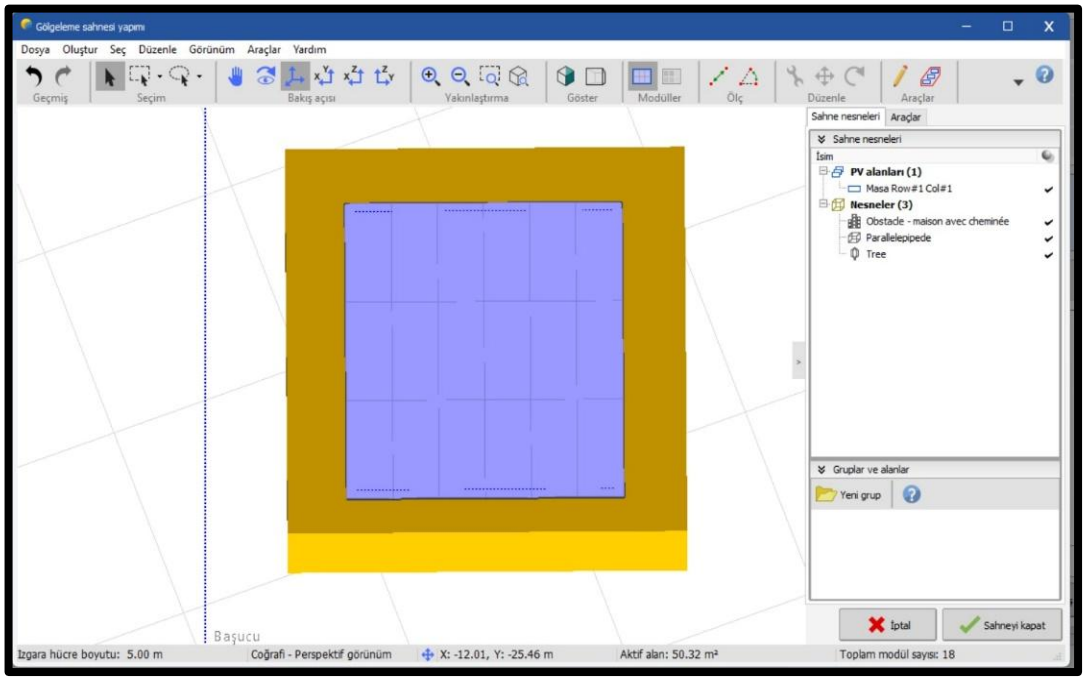
| Şebekeye bağlı sistem | Bina üzerinde | |
|---|---|---|
| **Kolektör düzleminin yönlendirmesi** | **Yakın gölgelemeler** | **Kullanıcı ihtiyaçları** |
| Sabit düzlem | Modül zincirlerine göre : Hızlı (tablo) | Sınırsız yükleme (şebeke) |
| Eğim/Azimut 6 / 20 ° | Elektrik etki 100 % | |

**Sistem bilgisi**

| PV alanı | | İnvertör | |
|---|---|---|---|
| Panel sayısı | 18 adet | Öğe sayısı | 1 adet |
| Toplam nom. güç | 10.44 kWp | Toplam nom. güç | 13.20 kWac |
| | | Nom. güç oranı | 0.791 |

**Şekil 5.3.** Simülasyon tasarım verileri

100 m²'lik alanda yaklaşım mesafeleri dikkate alınarak yerleşim yapıldığında 50.32 m²'lik alanda aktif olarak panel yerleşiminin yapılmıştır (Şekil 5.4).




**Şekil 5.4.** Panel yerleşim tasarımı

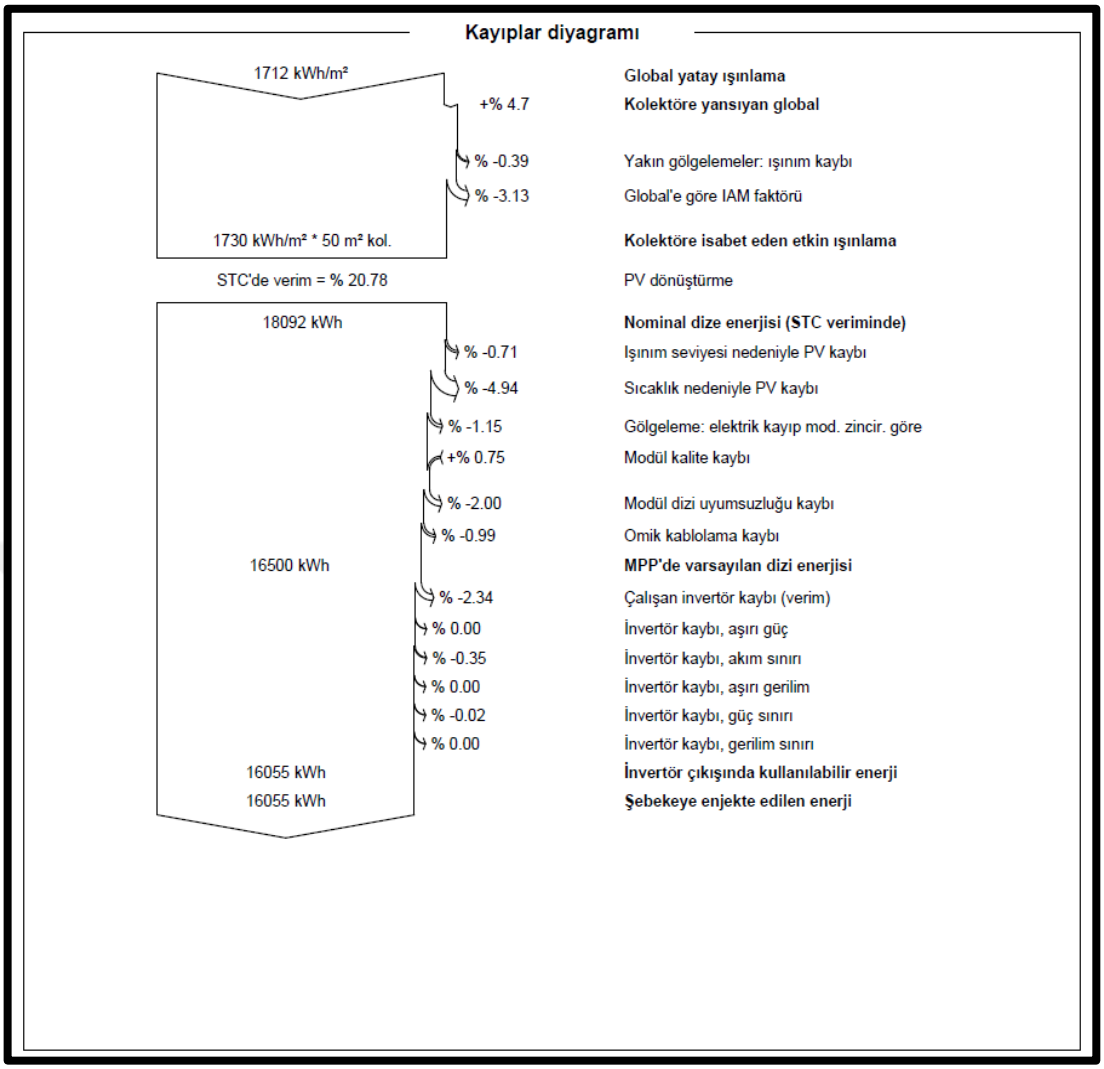
Diğer tasarım kriterlerinin de seçilmesiyle modül ve invertör sayısı simülasyon programından elde edilmiştir (Şekil 5.5). Buna göre 100 m²'lik proje alının 50.32 m²'si aktif olarak belirlenmiş ve bu alana 18 adet modül ve 1 adet invertör projelendirilmiştir.

**Kolektör alanının özellikleri**

| **PV modül** | | **İnvertör** | |
|---|---|---|---|
| Üretici | Talesun Solar (suzhou) | Üretici | Sungrow |
| Model | TP7F78M-580 | Model | SG12KTL-M |
| (Orijinal PVsyst veritabanı) | | (Orijinal PVsyst veritabanı) | |
| Birim gücü | 580 Wp | Birim gücü | 13.2 kWac |
| PV modül sayısı | 18 adet | İnvertör sayısı | 2 * MPPT 50% 1 adet |
| Nominal (STC) | 10.44 kWp | Toplam güç | 13.2 kWac |
| Modül | 2 zincir x 9 Seri | Çalışma gerilimi | 200-850 V |
| **İşletme şartlarında (50°C)** | | Nom. güç oranı (DC:AC) | 0.79 |
| Pmpp | 9.54 kWp | MPPT'ler arasında güç paylaşımı yok | |
| U mpp | 363 V | | |
| I mpp | 26 A | | |
| **Total PV gücü** | | **İnvertör toplam gücü** | |
| Nominal (STC) | 10 kWp | Toplam güç | 13.2 kWac |
| Toplam | 18 modül | İnvertör sayısı | 1 adet |
| Panel yüzeyi | 50.3 m² | Nom. güç oranı | 0.79 |
| Hücre yüzeyi | 46.5 m² | | |

**Şekil 5.5.** Panel ve invertör sayısı

Bu tasarıma göre simülasyon programından kayıplar da tespit edilerek. Şekil 5.6'da belirtilen kayıplardan sonra yıllık üretim 16055 kWh olarak elde edilmiştir.




**Şekil 5.6.** Kayıp Diyagram.

5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nun ve ilgili alt mevzuatında yıllık toplam enerji tüketimleri 250 TEP (Ton Eşdeğer Petrol) olan kamu binaları tasarruf noktasında sorumlu tutulmuştur. TEP, bir ton ham petrolün yanmasıyla elde edilen enerjiye karşılık gelen enerji birimidir. Petrol, doğal gaz, kömür, nükleer enerji, hidroelektrik enerji, biyokütle, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji gibi çeşitli enerji kaynakları TEP cinsinden ifade edilebilir. Çeşitli kaynakların TEP karşılıkları değerleri hesaplanırken Şekil 5.7'de gösterilen dönüşüm tablosu kullanılmaktadır.

**ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ TABLOSU**

Not: Sarı renkli hücrelere orijinal birim değerini giriniz.

| Miktar | Birim | Yakıt | TEP |
|---|---|---|---|
| | Ton | Taşkömürü | 0,00 |
| | Ton | Kok Kömürü | 0,00 |
| | Ton | Briket | 0,00 |
| | Ton | Odun | 0,00 |
| | Ton | Odun kömürü | 0,00 |
| | Ton | Turba | 0,00 |
| | Ton | Pelet | 0,00 |
| | Ton | Hayvan ve Bitki Artığı | 0,00 |
| | Ton | Antrasit | 0,00 |
| | . | . | . |
| | . | . | . |
| | | . | . |
| | Ton | Ham Petrol | 0,00 |
| | Ton | Fuel Oil No: 6 | 0,00 |
| | Ton | Motorin | 0,00 |
| | Ton | Benzin | 0,00 |
| | $m^3$ | LPG | 0,00 |
| | $m^3$ | Hidrojen | 0,00 |
| | kWh | Elektrik | 0,00 |
| | kWh | Hidrolik | 0,00 |
| | kWh | Jeotermal | 0,00 |
| | | TOTAL | 0,00 |

Litre olarak faturalandırılan yakıt miktarını ton olarak dönüştürmek için aşağıdaki örnek hesapta belirtildiği gibi verilen yoğunluk değerini kullanınız.

- 1250 lt Motorin kaç Ton yapar?
= 1250 lt x 0,830 kg/lt
=1037,50 kg = 1,0375 ton

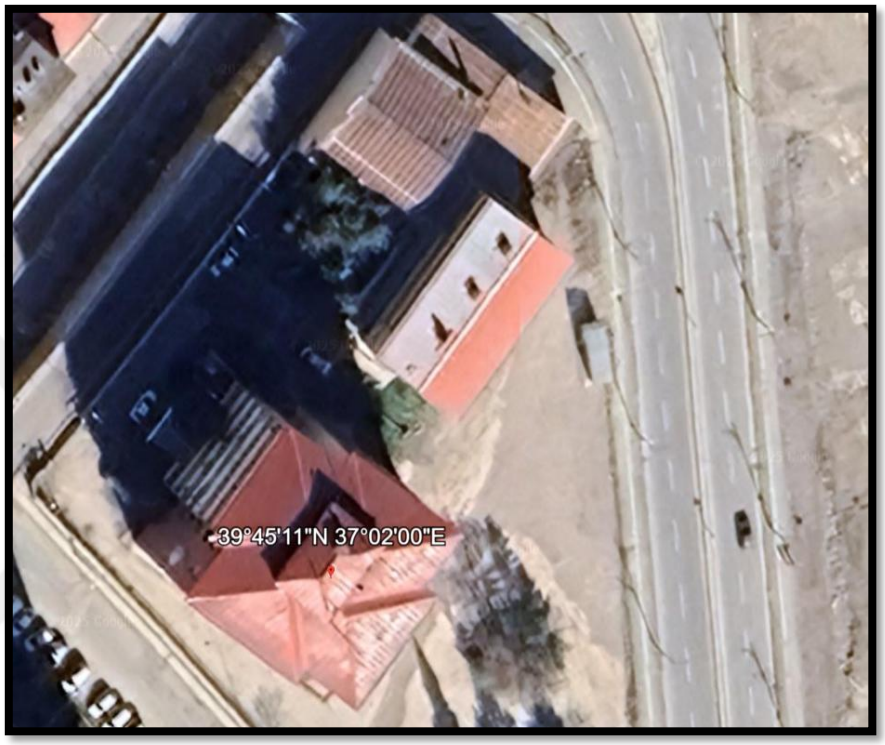
**Şekil 5.7.** Enerji Dönüşüm Tablosu

Elektrik enerjisinin TEP karşılığı hesaplanırken, 1 TEP=11628 kWh formülü kullanılmaktadır. Buna göre seçilen 100 m²'lik alanın etkin alanının 50.32 m² olduğu düşünüldüğünde, 50.32 m²'lik alandan yıllık elde edilecek elektrik enerjisinin TEP karşılığı, 16055 kWh=1.38 TEP olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 5.2 Bir Kamu Binası Çatı GES Tasarım ve Analizi: Sivas İl Özel İdare Binası Örneği

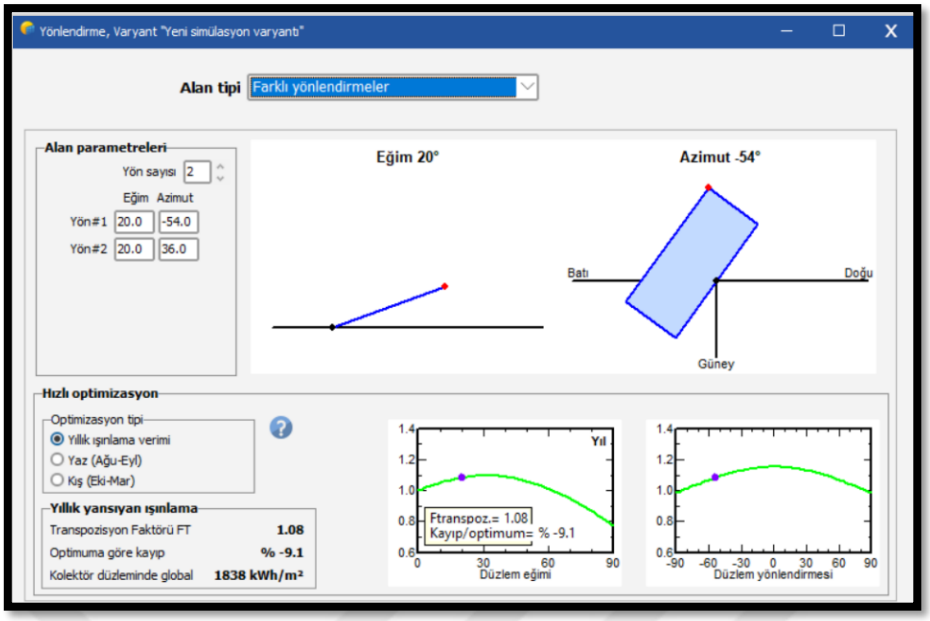
Çalışmanın ikinci aşamasında simülasyon uygulanacak proje için 39.75 °N, 37.03°E koordinatlarında, Sivas ili merkezinde yer alan Sivas İl Özel İdaresine ait Ek Bina seçilmiştir (Şekil 5.8). Güneş Enerji Potansiyel Atlasına göre Sivas ili için güneş radyasyonunun ortalama olarak 1550-1650 kWh/ m².yıl olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.1). Meteoroloji Genel Müdürlüğünün 1930-2024 yıllarında yaptığı ölçümlere göre, ortalama güneşlenme süresi günlük 6,81 saattir. Güneşlenme süresi temmuz ayında 11,9 saate kadar çıkmaktadır.

Seçilen Bina altı katlı kamu hizmetlerinin görüldüğü Sivas İl Özel İdaresine ait binadır. Binanın üç yıllık elektriksel tüketim verileri incelenerek ortalama bir tüketim verisi hesaplanmıştır. Buna göre binanın yıllık elektriksel tüketimi 208.919 kWh'tir. İlgili binanın kamu hizmetlerinin görüldüğü bir bina olması sebebiyle elektriksel tüketiminin hafta içi 08:00-17:00 saatlerinde yoğunlaştığı, bu saatlerin çatı GES uygulaması ile elektrik üretimi konusunda da en verimli saatler olduğu söylenebilir.



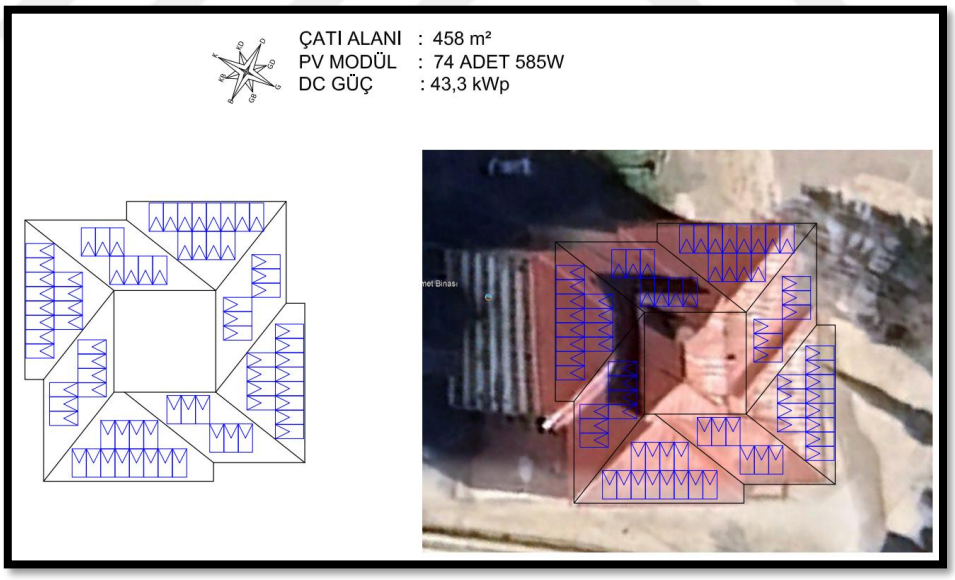

**Şekil 5.8.** Simülasyon için seçilen kamu binası

Çalışmanın bu aşamasında da, PVSyst simülasyon programının 7.4.7 versiyonu kullanılmıştır. Projeyi şebeke bağlantılı seçtikten sonra proje ile ilgili proje tasarım ekranında projemize ait veriler girilerek sonraki aşamalara geçilmiştir. Bu aşamada belirlenen noktanın meteorolojik verileri PvSyst uygulamasının kullandığı metronom veri tabanından otomatik olarak yüklenmiştir. Ardından 'orientation' sekmesinden eğiklik açısı ve azimut açısı bilgileri girilmiştir. Seçilen binanın çatı açısına bağlı olarak 20˚ eğim ve çatının cephesine göre 36 ve -54˚ azimut açıları seçilmiştir (Şekil 5.9).




**Şekil 5.9.** Seçilen bina için eğim ve azimut açı değerleri

Bina çatısının etkin alanı 458 m² olarak ölçülmüştür. Bu alana simülasyon programı vasıtasıyla her biri 585 Wp güç kapasitesine sahip 74 adet panel yerleşimi yapılmıştır (Şekil 5.10).




**Şekil 5.10.** Seçilen bina için PV modül yerleşimi

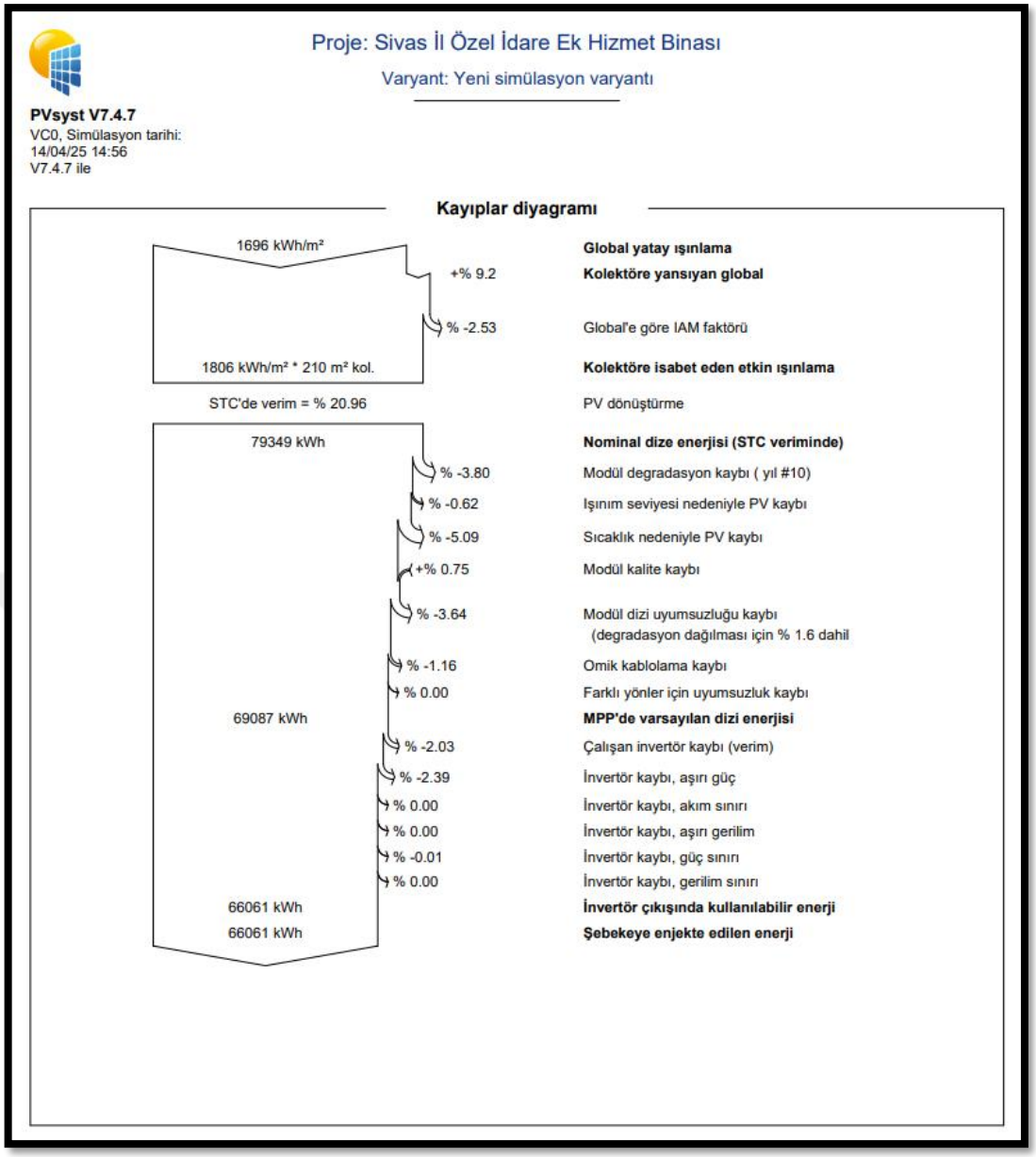
Simülasyonda kullanılan paneller monokristal teknolojisine sahip alüminyum çerçeveli, 156 hücreli, 31.5 kg ağırlığa sahip ve 580 ila 600 W arası çıkış gücüne sahip panellerden oluşmaktadır. Panel sayısı ve gücünün belirlenmesinin ardından diğer

simülasyon verileri de girilerek yıllık üretim verilerine ulaşmak mümkün olmaktadır (Şekil 5.11).




**Şekil 5.11.** Seçilen bina için Simülasyon Sonuç Ekranı

PVSyst Simülasyon programı aracılığıyla sistem üzerinde oluşan kayıpların gösterildiği Kayıplar diyagramı ile şebekeye enjekte edilebilecek net yıllık üretim verisi de gösterilmektedir (Şekil 5.11). Bu sonuçlara göre girilen tasarım kriterlerine göre yıllık net elektriksel üretim 66.061 kWh olarak gösterilmiştir.




**Şekil 5.12.** Simülasyon Kayıplar Diyagramı

# 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu çerçevesinde kamu binalarında çatı üstü güneş enerji santrallerinin (çatı GES) enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkısını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Önce, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi yerleşkesinde 100 m²'lik bir alanda daha sonra da Sivas ilinde yer alan bir kamu binası üzerine tesis edilecek örnek bir çatı GES'in teknik ve ekonomik performansı PVSyst simülasyon yazılımını kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma, kanunun kamu binalarına yönelik enerji tasarrufu beklentilerini karşılamada çatı GES'lerin potansiyelini ortaya koymuş ve bu tür sistemlerin uygulanabilirliğini somut verilerle desteklemiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında Sivas'taki 100 m²'lik bir alanda tasarlanan çatı GES'in etkin alanının 50.32 m² olduğu ve bu alana yerleştirilen 18 adet fotovoltaik (PV) modül ile 1 adet invertör kullanılarak yıllık 16.055 kWh enerji üretilebileceği hesaplanmıştır. Bu üretim, 1.38 TEP (Ton Eşdeğer Petrol) enerji tasarrufuna karşılık gelmektedir. Sivas'ın güneş ışınımı potansiyeli (yıllık ortalama 1.550-1.650 kWh/m²) dikkate alındığında, elde edilen üretim miktarı, bölgenin çatı GES projeleri için elverişli olduğunu doğrulamaktadır. PVSyst yazılımının sağladığı detaylı kayıp analizleri, sistemin performans oranını (PR) %80-85 aralığında tutarak, gölgeleme, termal ve kablo kayıplarını minimize etmiştir. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumludur.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise seçilen bir kamu binasının enerji tasarrufu mevzuatı karşısındaki yükümlülükleri araştırılarak örnek bir çatı GES projesi simülasyonu ile bu yükümlüklere olan katkı analiz edilmiştir. Seçilen kamu binası çatısında simüle edilen proje sonuçlarına göre 74 PV modül ve 1 invertörün bulunduğu sistem aracılığıyla yıllık 66.061 kWh enerji üretiminin mümkün olacağı hesaplanmıştır. İlgili kamu binasının üç yıllık verileri esas alınarak hesaplanan yıllık ortalama elektrik tüketiminin 208.919 kWh olduğu tespit edildiğinden çatı GES ile %30'un üzerinde bir elektrik tasarrufu sağlanacağı hesaplanabilmektedir.

Renewable and Sustainable Energy Reviews'de yayınlanan bir çalışma, PVSyst'in enerji üretim tahminlerinde %99 doğruluk sağladığını belirtmiştir [95].

5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, kamu binalarında yıllık enerji tüketimi 250 TEP ve üzeri olan yapıları tasarruf hedeflerinden sorumlu tutmaktadır. Çalışmada analiz edilen çatı GES, 458 m²'lik sınırlı bir alanda dahi 5.68 TEP tasarruf sağlayarak, bu hedeflere katkı sunma potansiyeline sahiptir. Daha büyük çatı alanlarına sahip kamu binalarında bu katkı oransal olarak artabilir. Kanunun öngördüğü enerji tüketiminde %10-20 azalma hedeflerine ulaşmada çatı GES'lerin kritik bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, sistemin şebekeye fazla enerji aktarma kapasitesi, ekonomik getiri sağlarken, enerji arz güvenliğini de desteklemektedir.

Ekonomik açıdan, PVSyst'in hesapladığı LCOE (Düzleştirilmiş Enerji Maliyeti) 0.05-0.07 $/kWh aralığında olup, bu değer, güneş enerjisinin fosil yakıtlara kıyasla rekabetçi olduğunu doğrulamaktadır. Sistem için öngörülen geri dönüş süresi 5-7 yıl arasında değişmekte olup, bu, Türkiye'deki mevcut enerji fiyatları ve teşvik mekanizmalarıyla uyumludur. Ancak, başlangıç yatırım maliyetleri ve bakım giderleri, özellikle kamu bütçesiyle finanse edilen projelerde, uygulanabilirliği etkileyebilir. Bu bağlamda, 5627 Sayılı Kanun'un finansal teşvikler ve enerji performans sözleşmeleri (EPS) gibi araçlarla çatı GES yatırımlarını desteklemesi, yaygınlaşmayı hızlandırabilir.

Çevresel açıdan, sistemin sağladığı 5,68 TEP tasarruf, yaklaşık 2 ton/yıl/kWp $CO_2$ emisyon azaltımına denk gelmektedir. Bu, IPCC'nin 2021 raporunda belirtilen, yenilenebilir enerjiye geçişin karbon emisyonlarını %70 oranında azaltabileceği hedefiyle uyumludur [9]. Sivas'taki örnek uygulama, kamu binalarında çatı GES'lerin çevresel sürdürülebilirliğe katkısını somut bir şekilde ortaya koymuş ve kanunun çevresel hedeflerini destekleyen bir model sunmuştur.

Çalışma, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek ancak yeterince değerlendirilmemiş bölgelerinde çatı GES projelerinin yaygınlaşması için bir model oluşturmuştur. Ayrıca, kanunun tasarruf hedeflerine ulaşmada yenilenebilir enerji sistemlerinin rolünü vurgulayarak, ulusal enerji politikalarına bilimsel bir katkı sağlamıştır.

Çalışmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. İlk olarak, analiz yalnızca 100 m²'lik bir alanla sınırlı tutulmuş ve daha sonra yaklaşık 500 m²'lik bir kamu binası üzeri çatı GES'in performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın sınırlılıkları arasında, analiz edilen kamu binalarının yıllık tüketimlerinin enerji yöneticisi atama

sınırının altında kalması yer almaktadır. Bu nedenle, gelecekte daha büyük ve yüksek enerji tüketimli kamu yapılarında benzer uygulamaların test edilmesi, mevzuat hedeflerine uyum açısından daha kapsamlı sonuçlar verebilir. İkinci olarak, ekonomik analizde yerel teşvik mekanizmaları ve enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar tam olarak modele dahil edilmemiştir. Üçüncü olarak, kış aylarında kar örtüsünün panel verimliliğine etkisi ve bölgesel tozlanma gibi değerlendirilemeyen iklimsel faktörler, ileri çalışmalar için dikkate alınmalıdır. Son olarak, çalışma tek bir kamu binasına odaklanmış olup, farklı bina türleri ve kullanım profillerine genelleştirilmesi ek araştırmalar gerektirmektedir.

Sivas'taki bir kamu binasında tesis edilen çatı GES'in, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'nun enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine anlamlı bir katkı sağladığını göstermiştir. Yıllık 66.061 kWh üretim ve 5.68 TEP tasarruf, sistemin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. PVSyst'in detaylı analizleri, tasarım optimizasyonunun önemini vurgulamıştır. Çatı GES'ler, kamu binalarında enerji maliyetlerini düşürerek, yenilenebilir enerji kullanımını teşvik ederek ve karbon emisyonlarını azaltarak Türkiye'nin sürdürülebilir enerji vizyonuna destek olmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, çatı GES uygulamalarının kamu binalarında teknik olarak uygulanabilir, ekonomik olarak sürdürülebilir ve çevresel olarak faydalı bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. PVSyst tabanlı simülasyon analizleriyle elde edilen veriler, Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde kamu binalarının öncü rol üstlenebileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda farklı bölgelere ait saha verileri, uzun dönemli performans ölçümleri ve yatırım-teşvik modelleriyle bu tür uygulamalar daha da güçlendirilebilir.

## KAYNAKLAR


[1] **Çengel, Y. A., & Boles, M. A.** (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

[2] **Tester, J. W., Drake, E. M., Driscoll, M. J., Golay, M. W., & Peters, W. A.** (2012). *Sustainable energy: Choosing among options* (2nd ed.). MIT Press.

[3] **Joule, J. P.** (1845). On the mechanical equivalent of heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 135*, 1-20.

[4] **Serway, R. A., & Jewett, J. W.** (2018). *Physics for scientists and engineers* (10th ed.). Cengage Learning.

[5] **Smil, V.** (2017). *Energy and civilization: A history*. MIT Press.

[6] **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** (2007). *Climate change 2007: Synthesis report*. IPCC.

[7] **World Bank** (2023). *World development report 2023: Energy for development*. World Bank Publications.

[8] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye enerji verimliliği strateji belgesi*. Ankara: ETKB Yayınları.

[9] **IPCC** (2021). *Sixth assessment report: Climate change 2021*. IPCC.

[10] **United Nations** (2015). *Sustainable Development Goals: Goal 7- Affordable and clean energy*. UN.

[11] **Şahin, A. D.** (2007). A new formulation for solar irradiation and sunshine duration estimation. *Renewable Energy, 32*(2), 323-337.

[12] **Boyle, G. (Ed.)** (2012). *Renewable energy: Power for a sustainable future* (3rd ed.). Oxford University Press.

[13] **International Energy Agency (IEA)** (2023). *Energy efficiency 2023*. IEA Publications.

[14] **Goswami, D. Y., & Kreith, F. (Eds.)** (2017). *Handbook of renewable energy technology*. CRC Press.

[15] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye yenilenebilir enerji raporu*. Ankara: ETKB Yayınları.

[16] **European Commission** (2020). *Energy performance of buildings directive*. EC Publications.

[17] **International Energy Agency (IEA)** (2023). *World energy outlook 2023*. IEA Publications.

[18] **International Energy Agency (IEA)** (2023). *Fossil fuel report 2023*. IEA Publications.

[19] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye enerji kaynakları raporu*. Ankara: ETKB Yayınları.

[20] **REN21** (2023). *Renewables 2023 global status report*. Paris: REN21 Secretariat.

[21] **International Energy Agency (IEA)** (2023). *Energy technology perspectives 2023*. IEA Publications.

[22] **International Renewable Energy Agency (IRENA)** (2023). *Global renewables outlook 2023*. IRENA Publications.

[23] **IRENA** (2023). *Renewable energy statistics 2023*. IRENA Publications.

[24] **International Energy Agency (IEA)** (2023). *Solar PV global market outlook 2023*. IEA Publications.

[25] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası*. Ankara: ETKB Yayınları.
[26] **Global Wind Energy Council (GWEC)** (2023). *Global wind report 2023*. GWEC Publications.

[27] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel raporu*. Ankara: ETKB Yayınları.

[28] **International Hydropower Association (IHA)** (2023). *Hydropower status report 2023*. IHA Publications.

[29] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye hidroelektrik enerji raporu*. Ankara: ETKB Yayınları.

[30] **European Biomass Association (AEBIOM)** (2023). *Bioenergy in Europe 2023*. AEBIOM Publications.

[31] **European Commission** (2023). *EU bioenergy report 2023*. EC Publications.

[32] **IRENA** (2023). *Biomass for energy: Opportunities and challenges*. IRENA Publications.

[33] **Geothermal Energy Association (GEA)** (2023). *Global geothermal energy report 2023*. GEA Publications.

[34] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye jeotermal enerji raporu*. Ankara: ETKB Yayınları.

[35] **IRENA** (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. IRENA Publications.

[36] **International Energy Agency (IEA)** (2023). *Energy efficiency in public buildings 2023*. IEA Publications.

[37] **Duffie, J. A., & Beckman, W. A.** (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.

[38] **Green, M. A., Dunlop, S. R., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X.** (2022). Solar cell efficiency tables (version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30*(8), 687-710.

[39] **Gu, W., Ma, T., Li, M., Shen, L., & Zhang, Y.** (2022). A coupled optical-electrical-thermal model for a bifacial photovoltaic module. *Energy, 241*, 122897.

[40] **Goodenough, J. B., & Kim, Y.** (2010). Challenges for rechargeable Li batteries. *Chemistry of Materials, 22*(3), 587-603.

[41] **Şahin, A. D., & Şen, Z.** (2021). Solar energy potential assessment of Turkey via satellite data. *Renewable Energy, 171*, 1253-1265.

[42] **Wolsink, M.** (2023). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Environmental Science & Technology, 57*(12), 4567-4575.

[43] **Dursun, B., & Gokcol, C.** (2011). The role of solar energy in Turkey's renewable energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15*(8), 3729-3735.

[44] **Evrendilek, F., & Ertekin, C.** (2008). Assessing solar radiation models using multiple regression analysis in Turkey. *Renewable Energy, 33*(5), 1038-1045.

[45] **Kaygusuz, K.** (2020). Renewable energy potential and utilization in Turkey. *Energy, 192*, 116694.

[46] **Kaplan, Y. A.** (2015). Overview of solar energy potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46*, 149-158.

[47] **Sozen, A., Arcaklioğlu, E., & Özalp, M.** (2005). Estimation of solar potential in Turkey by artificial neural networks using meteorological data. *Energy Conversion and Management, 46*(18-19), 3033-3052.

[48] **Severcan, E., & Kaya, D.** (2021). Environmental impact assessment of renewable energy projects in Turkey. *Environmental Science & Technology, 55*(13), 8765-8774.

[49] **Kaya, M., & Koç, E.** (2023). Barriers to solar energy deployment in Turkey: A comprehensive review. *Energy, 263*, 125789.

[50] **Green, M. A.** (2001). Solar cells: Operating principles, technology, and system applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 9*(2), 123-135.

[51] **Breyer, C., Bogdanov, D., & Aghahosseini, A.** (2021). Solar photovoltaics demand for the global energy transition in the power sector. *Renewable Energy, 162*, 105-117.

[52] **Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V.** (2004). Thin-film solar cells: An overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 12*(2-3), 69-92.

[53] **Saga, T.** (2010). Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials, 2*(3), 96-102.

[54] **Fthenakis, V. M., & Kim, H. C.** (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy, 85*(8), 1609-1628.

[55] **Molin, E., Stridh, B., & Karlsson, B.** (2016). Performance comparison of polycrystalline and monocrystalline silicon PV modules. *Solar Energy, 137*, 18-26.

[56] **Kazem, H. A., & Chaichan, M. T.** (2020). Experimental analysis of the performance of polycrystalline and monocrystalline PV panels. *Solar Energy, 205*, 252-261.

[57] **Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M.** (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy, 85*(8), 1580-1608.

[58] **Ramanujam, J., & Singh, U. P.** (2022). Advances in thin-film solar cells: Materials and technologies. *Renewable Energy, 183*, 456-472.

[59] **Carlson, D. E., & Wronski, C. R.** (1976). Amorphous silicon solar cell. *Applied Physics Letters, 28*(11), 671-673.

[60] **Shah, A., Torres, P., Tscharner, R., Wyrsch, N., & Keppner, H.** (1999). Photovoltaic technology: The case for thin-film solar cells. *Science, 285*(5428), 692-698.

[61] **Staebler, D. L., & Wronski, C. R.** (1977). Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si. *Applied Physics Letters, 31*(4), 292-294.

[62] **Fthenakis, V.** (2009). Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(9), 2746-2750.

[63] **Bosio, A., Romeo, N., Mazzamuto, S., & Canevari, V.** (2006). Polycrystalline CdTe thin films for photovoltaic applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 14*(2), 175-185.

[64] **Wu, X.** (2004). High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells. *Solar Energy, 77*(6), 803-814.

[65] **Fthenakis, V. M., & Kim, H. C.** (2021). Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 29*(3), 321-333.

[66] **Sinha, P., & Wade, A.** (2015). Environmental impacts of cadmium telluride photovoltaic systems. *Renewable Energy, 80*, 655-663.

[67] **Markvart, T., & Castañer, L.** (2003). *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications*. Elsevier.

[68] **Esram, T., & Chapman, P. L.** (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 22*(2), 439-449.

[69] **Aberle, A. G.** (2001). Surface passivation of crystalline silicon solar cells: A review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 9*(6), 411-426.

[70] **Koutroulis, E., & Kalaitzakis, K.** (2004). Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications. *IEE Proceedings - Electric Power Applications, 151*(2), 191-197.

[71] **Hohm, D. P., & Ropp, M. E.** (2003). Comparative study of maximum power point tracking algorithms. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 11*(1), 47-62.

[72] **Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., & Timbus, A. V.** (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53*(5), 1398-1409.

[73] **Kerekes, T., Teodorescu, R., & Liserre, M.** (2011). Grid inverters for photovoltaic systems: A review. *Renewable Energy, 36*(10), 2832-2840.

[74] **Short, T. A.** (2004). *Electric power distribution handbook*. CRC Press.

[75] **Divya, K. C., & Østergaard, J.** (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research, 79*(4), 511-520.

[76] **Hoff, T. E., & Perez, R.** (2010). Quantifying PV module racking system structural performance. *Solar Energy, 84*(7), 1219-1228.

[77] **IEEE Standards Association** (2012). *IEEE Guide for PV system grounding* (IEEE Std 1443-2012). IEEE.

[78] **International Electrotechnical Commission** (2005). *IEC 60364: Electrical installations of buildings*. IEC.

[79] **IEEE Standards Association** (2018). *IEEE Standard for combiner boxes in PV systems* (IEEE Std 1662-2018). IEEE.

[80] **Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S.** (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(8), 2096-2103.

[81] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2007). *5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu*. Resmi Gazete, Sayı: 26510.

[82] **International Organization for Standardization** (2018). *ISO 50001: Energy management systems*. ISO.

[83] **International Electrotechnical Commission** (2015). *IEC 61215: Crystalline silicon terrestrial PV modules*. IEC.

[84] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2017). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023*. Ankara: ETKB Yayınları.

[85] **International Energy Agency (IEA)** (2021). *Energy performance contracting in public buildings*. IEA Publications.

[86] **International Electrotechnical Commission** (2007). *IEC 61727: PV systems - Characteristics of the utility interface*. IEC.

[87] **International Electrotechnical Commission** (2010). *IEC 62109: Safety of power converters for PV systems*. IEC.

[88] **Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı** (2019). *Kamu Binalarında Enerji Tasarrufu Genelgesi*. Resmi Gazete, Sayı: 30836.

[89] **ASHRAE** (2019). *ASHRAE Handbook: HVAC applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[90] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2020). *Kamu Binalarında Tasarruf Hedefi ve Uygulama Rehberi*. Ankara: ETKB Yayınları.

[91] **International Energy Agency (IEA)** (2022). *Energy efficiency design guide for public buildings*. IEA Publications.

[92] **Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı 2022*. Ankara: ETKB Yayınları.

[93] **International Electrotechnical Commission (IEC)** (2015). *IEC 61215-1: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements*. Geneva, Switzerland: IEC Publications.

[94] **International Electrotechnical Commission (IEC)** (2010). *IEC 61730-1: Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction*. Geneva, Switzerland: IEC Publications.

[95] **IEC** (2010). *IEC 62056*.

[96] **Duman, A. C., & Güler, Ö.** (2022). *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 156*, 111978.

[97] **International Energy Agency (IEA)** (2021). *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA Publications.

[98] **Valentin Software** (2022). *PV*SOL Premium 2022: Software for Photovoltaic Systems Design and Simulation*. Berlin: Valentin Software GmbH.

[99] **BlueSol Software** (2022). *BlueSol 4.0: Photovoltaic System Design Software*. Torino: BlueSol Srl.

[100] **Kaya, M., & Koç, E.** (2022). *Energy Policy, 156*, 112456.

[101] **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** (2022). *Annual Technology Baseline (ATB) 2022: Renewable Energy Technologies*. Golden, CO: NREL Publications.

[102] **HOMER Energy** (2022). *HOMER Pro 3.15: Hybrid Renewable Energy System Optimization Software*. Boulder, CO: HOMER Energy LLC.

[103] **Lambert, T., et al.** (2006). *Renewable Energy, 31*(10), 1647-1662.

[104] **Folsom Labs** (2022). *HelioScope 2022: Solar Design Software*. San Francisco, CA: Folsom Labs.

[105] **PVSyst SA** (2022). *PVSyst 7.2: Photovoltaic System Simulation Software*. Satigny, İsviçre: PVSyst SA.

[106] **Duman, A. C., & Güler, Ö.** (2021). *Renewable Energy, 171*, 1253-1265.

[107] **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** (2022). *System Advisor Model (SAM) 2022.11.21: Techno-Economic Modeling Software for Renewable Energy Systems*. Golden, CO: NREL Publications.

[108] **HOMER Energy** (2022). *HOMER Grid 1.10: Software for Grid-Connected Renewable Energy Systems*. Boulder, CO: HOMER Energy LLC.

[109] **HOMER Energy** (2022). *HOMER Pro User Documentation: Technical Manual and Reference Guide*. Boulder, CO: HOMER Energy LLC.

[110] **Folsom Labs** (2022). *HelioScope Software: User Guide for Solar Project Design*. San Francisco, CA: Folsom Labs.

[111] **Folsom Labs** (2022). *HelioScope Technical Guide: Advanced Features and Modeling*. San Francisco, CA: Folsom Labs.

[112] **PVSyst SA** (2022). *PVSyst Software 7.2: Technical Reference Manual*. Satigny, İsviçre: PVSyst SA.

[113] **PVSyst SA** (2022). *PVSyst 7.2 User Manual*. Satigny, İsviçre: PVSyst SA.

[114] **Talesun Solar Co., Ltd.** (2025). World-leading solar module manufacturer. https://www.talesun.com/en/ (Erişim tarihi: 9 Mayıs 2025)