

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BİNAYA ENTEGRE SABİT FOTOVOLTAİK GÖLGELEME SİSTEMİNİN BİNA
ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

Mustafa Hatem Mosa MOSA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAZİRAN 2025
ANTALYA**

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BİNAYA ENTEGRE SABİT FOTOVOLTAİK GÖLGELEME SİSTEMİNİN BİNA
ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

Mustafa Hatem Mosa MOSA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNAYA ENTEGRE SABİT FOTOVOLTAİK GÖLGELEME SİSTEMİNİN BİNA
ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

Mustafa Hatem Mosa MOSA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNAYA ENTEGRE SABİT FOTOVOLTAİK GÖLGELEME SİSTEMİNİN BİNA
ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

Mustafa Hatem Mosa MOSA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 27/06/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR (Danışman)

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Ahmet COŞKUN

ÖZET

BİNAYA ENTEGRE SABİT FOTOVOLTAİK GÖLGELEME SİSTEMİNİN BİNA ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ

Mustafa Hatem Mosa MOSA

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

Haziran 2025; 84 sayfa

Günümüzde artan enerji ihtiyacı, fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi ve iklim değişikliğine bağlı çevresel kaygılar, binalarda enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji entegrasyonu konularını ön plana çıkarmıştır. Bu çalışma, Antalya Kepez ilçesinde yer alan çok katlı bir konut yapısında, binaya entegre edilen sabit fotovoltaik (PV) gölgeleme sisteminin bina enerji performansına ve iç mekân enerji tüketimine etkisini kapsamlı bir biçimde incelemektedir.

Çalışmada, yapı cephesine sabit olarak entegre edilen ve her pencerenin üstüne yerleştirilen yüksek verimli PV panellerin; hem pasif gölgeleme sağlayarak bina iç ortamının termal ve görsel konforunu artırma, hem de aktif olarak elektrik enerjisi üretme potansiyeli detaylı şekilde araştırılmıştır. Panel yerleşimi ve boyutları, literatürde tanımlı optimum eğim açıları, yönelimi ve cephe koşulları dikkate alınarak optimize edilmiştir. Özellikle panelin en uygun boyutunun ve pencere üzerinde oluşturduğu gölge uzunluğunun elde edilmesinde, matematiksel algoritmalar ve parametrik analizler geliştirilmiştir. Böylece panel boyu ve konumunun binanın toplam enerji kazancına en fazla katkı sağlayacak şekilde belirlenmesi sağlanmıştır.

Analizler kapsamında, MATLAB tabanlı hesaplama algoritmaları ve Autodesk Ecotect Analysis simülasyonları kullanılarak, her ayı temsil eden gün için panelin oluşturduğu gölgeleme etkisi, pencereye gelen toplam ışıınım ve iç mekân enerji tüketimi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Panel eğim açılarının belirlenmesinde ise hem maksimum elektrik üretimini sağlayacak hem de gölgeleme verimini en üst düzeye çıkaracak optimum açı değerleri, aylık ve mevsimsel olarak karşılaştırmalı şekilde hesaplanmıştır. PVGIS veri tabanından elde edilen aylık güneş ışıınımı değerleri temel alınarak, sistemin aylık ve yıllık elektrik üretim kapasitesi belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sabit PV gölgeleme panellerinin yalnızca elektrik üretimi ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda iç mekânın ısıtma ve soğutma yüklerinde anlamlı azalma sağladığını, toplam enerji tüketiminde ve karbon emisyonunda dikkate değer bir iyileşme oluşturduğunu göstermiştir. Güney, doğu ve batı cephelerinde uygulanan bu sistem sayesinde, konvansiyonel sabit güneş kırıcıların ötesine geçilerek, pasif ve aktif enerji kazanımlarının bütünleşik ve yenilikçi bir modelle elde edildiği ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; panel boyutunun, gölge uzunluğunun ve eğim açısının algoritmik olarak optimize edilmesinin, sıcak iklim kuşağındaki binalarda enerji

verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından yüksek fayda sağladığını göstermektedir. Literatürdeki benzerlerinden farklı olarak hem kapsamlı analiz yaklaşımı hem de uygulama ölçeğiyle örnek teşkil eden özgün bir katkı sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Binaya entegre PV (BIPV), Isıtma/Soğutma yükü, Neredeyse sıfır enerjili binalar, Optimum eğim, PV gölgeleme, Yenilenebilir enerji destekli sürdürülebilir binalar

JÜRİ: Doç. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Ahmet COŞKUN



ABSTRACT

THE EFFECT OF BUILDING INTEGRATED FIXED PHOTOVOLTAIC SHADING SYSTEM ON BUILDING ENERGY PERFORMANCE

Mustafa Hatem Mosa MOSA

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

June 2025; 84 pages

The ever-increasing global demand for energy, the rapid depletion of fossil fuel resources, and rising environmental concerns due to climate change have brought energy efficiency and renewable energy integration in buildings to the forefront. This study comprehensively investigates the impact of a building-integrated fixed photovoltaic (PV) shading system on the energy performance and indoor energy consumption of a multi-story residential building located in the Kepez district of Antalya, Turkey.

Within the scope of the research, high-efficiency PV panels fixed above each window on the building façade were evaluated in terms of their dual function: providing passive shading to enhance indoor thermal and visual comfort, and actively generating electricity. The placement and dimensions of the panels were optimized considering literature-based optimum tilt angles, façade orientation, and building envelope conditions. Notably, mathematical algorithms and parametric analyses were developed to determine the optimum panel size and the resulting shadow length above the windows, ensuring the system achieves maximum energy savings for the building.

The analyses utilized MATLAB-based calculation algorithms and Autodesk Ecotect Analysis simulations to evaluate, The shading effect created by the panel, the total radiation coming to the window and the effects on indoor energy consumption were evaluated in detail for the average day of each month. For tilt angle determination, monthly and seasonal comparisons were performed to identify values that maximize both electricity production and shading efficiency. Based on monthly solar irradiation data obtained from the PVGIS database, the monthly and annual electricity generation capacities of the system were determined.

The results demonstrate that fixed PV shading panels not only produce significant amounts of electricity but also meaningfully reduce heating and cooling loads, leading to a marked improvement in total energy consumption and carbon emissions. The implementation of this system on the south, east, and west façades of the building surpassed the performance of conventional fixed sun-shading devices by providing both passive and active energy benefits within an innovative, integrated model.

In conclusion, this thesis proves that the algorithmic optimization of panel size, shadow length, and tilt angle yields substantial benefits in energy efficiency and sustainability for buildings located in hot climate zones. Distinct from similar works in the literature, this study presents an original contribution with its comprehensive analytical approach and application scale, offering a model example for future building-integrated PV shading designs.

KEYWORDS: Building-integrated PV (BIPV), Heating/Cooling load, Nearly zero-energy buildings, Optimum tilt, PV shading, Renewable energy-supported sustainable buildings.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ÇAĞLAR

Prof. Dr. İbrahim ATMACA

Prof. Dr. Ahmet COŞKUN



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, binalarda sabit fotovoltaik gölgeleme sistemlerinin enerji performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmanın konusu, sürdürülebilir enerji ve bina verimliliği alanındaki güncel gelişmelerden etkilenecek seçilmiştir. Tez süreci boyunca gerek akademik gerekse kişisel olarak birçok yeni bilgi ve deneyim kazanma fırsatı buldum.

Çalışmanın her aşamasında bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Ahmet Çağlar'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, araştırmalarım sırasında desteğini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bu tez, ileride benzer çalışmalara temel oluşturmak ve geliştirilmeye açık alanlara katkı sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda gerçek uygulama örneklerinin ve deneysel verilerin eklenmesinin literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın hazırlanmasında doğrudan veya dolaylı olarak emeği geçen tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerjinin Önemi ve Artan İhtiyaç	1
1.2. Güneş Enerjisi	3
1.3. Fotovoltaik Güneş Panelleri	5
1.4. Gölgeleme Sistemleri	9
1.5. Çalışmanın Amacı	10
2. KAYNAK TARAMASI	11
3. MATERYAL VE METOT	20
3.1. Kepez Bölgesinde Güneş Işınımı ve Fotovoltaik Enerji Potansiyeli	20
3.2. Güneş Paneli Yüzeyine Işınım Etkinliği İçin Açı Analizi	22
3.2.1. Deklinasyon açısı (δ)	22
3.2.2. Saat açısı (ω)	24
3.2.3. Enlem açısı (ϕ)	24
3.2.4. Boylam açısı (λ)	25
3.3. PV Panel Tasarımı İçin Hesaplanan Güneş Açıları	26
3.3.1. Zenit açısı (θ_z)	26
3.3.2. Güneş yükseklik açısı (α)	26
3.3.3. Azimut açısı (γ)	27
3.3.4. Panel eğim açısı (β)	27
3.4. Güneş Zamanı	28
3.4.1. Yerel standart zaman meridyeni	28
3.4.2. Zaman eşitlik denklemi	29
3.4.3. Zaman düzeltme faktörü	29
3.4.4. Güneş doğuş ve batış zamanı	30

3.5. Güneş Işınımı Hesaplama Yöntemi	30
3.5.1. Eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışınımı	30
3.5.2. Doğrudan güneş ışınımı (direkt bileşen)	31
3.5.3. Yansıyan güneş ışınımı (reflekt bileşen)	31
3.5.4. Difüz güneş ışınımı (dağılmış bileşen)	32
3.6. Örnek Bina Modeli ve Hesaplama Kabulleri	33
4. BULGULAR	35
4.1. Saçak Boyutunun Belirlenmesi	35
4.1.1. Maksimum güneş yüksekliğine göre saçak boyu hesaplaması (aylık optimum uzunluk)	36
4.1.2. SLF yöntemiyle saçak boyu analizi (yıllık optimum uzunluk)	40
4.1.3. Sabit saçak gölgeleme simülasyonları	41
4.2. Güneş Paneli Açısı ve Yüzey Alanı Hesaplaması	45
4.2.1. Saçak üstü panel eğimi	45
4.2.2. Panel yüzey alanı belirlenmesi	48
4.3. Saçağın Gölgeleme Etkisi	49
4.3.1. Pencereye düşen gölge oranı	51
4.3.2. Gölgeleme durumunda pencereden gelen aylık güneş kazancı	59
4.4. Güneş Paneli Enerji Üretimi	62
4.4.1. Yönlere göre panel üzerine düşen ışınım	64
4.4.2. Yönlere göre panelin elektrik üretim potansiyeli	66
5. TARTIŞMA	68
5.1. Optimum Saçak Boyu Seçim Enerji Verimine Etkisi	68
5.2. Optimum Güneş Panelinin Açısı Ve Alan Seçiminin Enerji Verimine Etkisi	69
6. SONUÇLAR	71
7. KAYNAKLAR	73
8. EKLER	78
EK-1 Güneş Yüksekliği ve Panel Uzunluğu Hesaplama Kodu	78
EK-2 Panel Uzunluğu ve Güneş Açısı MATLAB Kodu	80
EK-3 Yönlere Göre Panel Işınımı Kodu	82
EK-4 HW Optimum Eğim ve PVGIS Işınım Kodu	84
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “BİNAYA ENTEGRE SABİT FOTOVOLTAİK GÖLGELEME SİSTEMİNİN BİNA ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27/06/2025

Mustafa Hatem Mosa MOSA



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Yüzey alanı (m^2)
E	: Enerji üretimi (Wh, kWh)
G	: Güneş ışıınımı (W/m^2)
G_d	: Yayılı ışıınım (W/m^2)
G_b	: Doğrudan ışıınım (W/m^2)
G_r	: Yansıyan ışıınım (W/m^2)
G_t	: Eğik yüzeye gelen toplam ışıınım (W/m^2)
H	: Günlük toplam ışıınım ($Wh/m^2 \cdot day$)
H_b	: Günlük doğrudan ışıınım ($Wh/m^2 \cdot day$)
H_d	: Günlük yayılı ışıınım ($Wh/m^2 \cdot day$)
H_g	: Yatay yüzeye gelen toplam ışıınım ($Wh/m^2 \cdot day$)
P	: Güç (W)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
n	: Panel verimliliği (%)
β	: Panelin eğim açısı ($^{\circ}$)
γ	: Panelin azimut açısı ($^{\circ}$)
δ	: Deklinasyon açısı ($^{\circ}$)
η	: Verimlilik (%)
θ	: Güneş ışıınım açısı ($^{\circ}$)
ρ	: Albedo, yansıtma oranı
ω	: Saat açısı ($^{\circ}$)
ϕ	: Enlem ($^{\circ}$)

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
aSHGCw	: Ağırlıklı Güneş Isı Kazancı Katsayısı (Adjusted Solar Heat Gain Coefficient of Window)
BIPV	: Bina Entegre Fotovoltaik Sistem (Building Integrated Photovoltaic)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)

DNI	: Doğrudan Normal Işınım (Direct Normal Irradiance)
Ecotect	: Bina Enerji Modelleme Aracı (Autodesk Ecotect Analysis)
G	: Güneş Işınımı (Solar Irradiance)
HGC	: Güneş Kazancı Katsayısı (Heat Gain Coefficient)
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)
MATLAB	: Matematiksel İşlem Laboratuvarı (Matrix Laboratory)
PV	: Fotovoltaik (Photovoltaic)
PVGIS	: Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (Photovoltaic Geographical Information System)
PVsyst	: PV Sistem Simülasyon Yazılımı (Photovoltaic System Simulation Software)
RH	: Rölatif Nem (Relative Humidity)
SC	: Gölgeleme Katsayısı (Shading Coefficient)
SHGC	: Güneş Isı Kazancı Katsayısı (Solar Heat Gain Coefficient)
STC	: Standart Test Koşulları (Standard Test Conditions)
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları (Renewable Energy Sources)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı kıta ülkelerine göre enerji üretim seviyesi ve birincil enerji tüketimindeki yıllık değişimi (Production 2021)	1
Şekil 1.2. Yenilenebilir enerjiden küresel elektrik üretimi, 2020 ve 2021 yıllarında (IEA, 2020)	2
Şekil 1.3. IEA toplam pv kurulumlarının (2000–2017) yıllara göre gelişimi (iea, 2018).....	6
Şekil 1.4. Türkiye’de pv kurulu gücü ve üretim payının gelişimi (2014–2020) (orun ve demirgil, 2021)	7
Şekil 1.5. Fotovoltaik güneş panellerinin üretimi enerji gereksinimleri (Peng vd. 2013)	8
Şekil 2.1. Wünnenberg'deki metallbau rüso binası fotovoltaik panellerin kullanımı (haas vd., 2002)	13
Şekil 2.2. Giebelstadt belediye binası fotovoltaik panellerin uygulaması (haas vd., 2002).....	13
Şekil 2.3. De zonnegolven'deki fotovoltaik panellerin kullanımı (prasad ve snow, 2014).....	14
Şekil 2.4. Klinik moleküler biyoloji araştırma merkezi fotovoltaik panelleri (chen vd., 2022; prasad ve snow, 2014).....	15
Şekil 2.5. AMAG merkezi’nde fotovoltaik panellerin kullanımı (prasad ve snow, 2014)	16
Şekil 2.6. Hollanda'nın dordrecht şehrinde evlerin genel görünüşü (taşaltın vd., 2022b)	16
Şekil 2.7. Cephede Pv uygulaması (fur Sonnenenergie 2009).....	17
Şekil 2.8. Cephede Pv uygulaması (Reijenga ve Architecten 2001).....	18
Şekil 2.9. Cephede fotovoltaik kullanımı (thomas, 2003)	18
Şekil 2. 10. Northumberland binası binanın genel görünüşü	19
Şekil 3.1. Ortalama saatlik profiller doğrudan normal ışıınım [Wh/m^2] (global solar atlas, 2024)	21
Şekil 3.2. Deklinasyon açısının ekinokslara göre değişimi (Bakirci 2012)	23
Şekil 3.3. Deklinasyon açısı formüllerinin karşılaştırılması (Bakirci 2012).....	23
Şekil 3.4. Enlem açısı (ϕ) (De Carli, De Giuli, ve Zecchin 2008b)	25
Şekil 3.5. Boylam açısı (De Carli vd. 2008b)	25
Şekil 3.6. Zenith ile yükseklik açısının karşılaştırılması (Duffie John ve Beckman William 1991)	26

Şekil 3.7. Güneş yükseklik açısı ve mevsimlere göre değişimi (Öztürk 2008)	27
Şekil 3.8. Azimuth açısının kuzeydoğu yönünde örneklenmesi (Kurumu 2019)	27
Şekil 3.9. Panel eğim açısı β	28
Şekil 3.10. EoT denkleminin günlere göre olan değişimi (Anonim, 2019)	29
Şekil 3.11. 3D Model bina tasarımı	34
Şekil 4.1. Gölgeleme saçağı yerleşimi	35
Şekil 4.2. Güney cephe için önerilen saçak boyları	38
Şekil 4.3. Doğu ve batı cephe için önerilen saçak boyları	40
Şekil 4.4. Kış aylarında sabit saçaklı güney, doğu ve batı cephelerde güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – Ecotect simülasyonu.....	42
Şekil 4.5. Yaz aylarında sabit saçaklı binada güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – ecotect simülasyonu	43
Şekil 4.6. İlkbahar dönemlerinde sabit saçaklı cephelerde güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – ecotect simülasyonları	44
Şekil 4.7. Sonbahar dönemlerinde sabit saçaklı cephelerde güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – ecotect simülasyonları	44
Şekil 4.8. Antalya için yıllık, mevsimsel ve aylık optimum panel eğim açısı değişimi.....	48
Şekil 4.9. Panel açısı ve gölgeleme uzunluğu	48
Şekil 4.10. Saçak gölgeleme uzunluklarının aylara göre değişimi (güney, doğu ve batı cepheler)	51
Şekil 4.11. Pencereye düşen gölge oranlarının aylara göre değişimi	52
Şekil 4.12. Aralık ayı için ecotect solar tools stereografik diyagram sabit saçak gölgelemesinin yıl içindeki etkileri	53
Şekil 4.13. Ecotect solar tools “tabulated daily solar data” aralık güney cephede saatlik gölgeleme oranları.....	54
Şekil 4.14. Haziran ayı için ecotect solar tools stereografik diyagramda sabit saçak gölge yıllık etkisi.....	55
Şekil 4.15. Ecotect solar tools “tabulated daily solar data” haziran ayı, güney cephede saatlik gölgeleme oranları.....	55

Şekil 4.16. Mart ayı ecotect solar tools elde edilen stereografik diyagramda sabit saçak gölgelemesinin yıllık etkileri.....	56
Şekil 4.17. Ecotect solar tools “tabulated daily solar data”, mart ayı güney cephede saatlik gölgeleme oranları.....	57
Şekil 4.18. Aylık ortalama gölgeleme katsayılarının (sc) yıllık dağılımı	57
Şekil 4.19. Farklı saçak boylarında elde edilen yıllık efektif gölgeleme oranları ve ecotect solar tools simülasyon sonuçları	58
Şekil 4.20. Aylara göre güney ve doğu/batı cephelerinde net güneş kazancı eğrileri	61
Şekil 4.21. Güney cepheye bakan panel üzerine düşen aylık güneş ışıınımı bileşenleri.....	65
Şekil 4.22. Doğu ve batı cepheye bakan panel üzerine düşen güneş ışıınımı (aylık)	66



ÇİZELGELER DİZİNİ

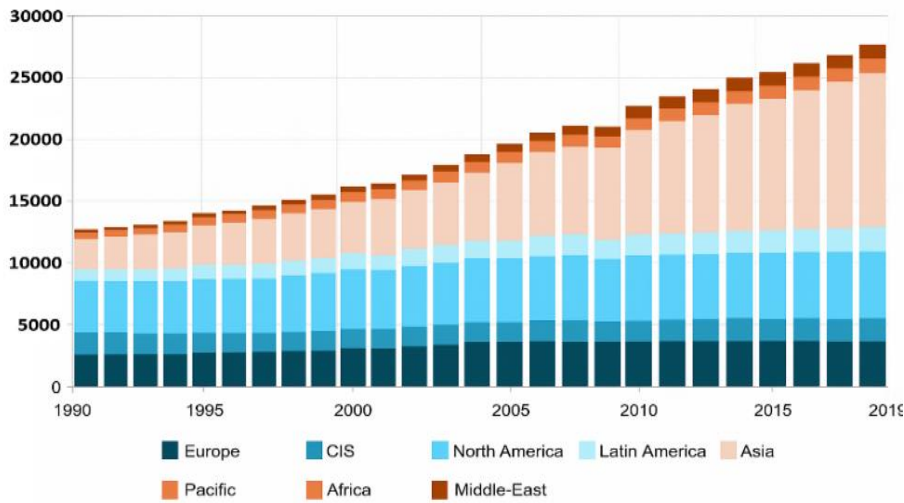
Çizelge 1.1. Dünya enerji tüketimi (2009-2018) (IEA, 2020)	2
Çizelge 1.2. Ocak 2021'de kullanılan dünya küresel enerjisi (IEA 2020b)	3
Çizelge 1.3. Doğal yüzeylerin albedo değerleri (lal, 2006)	5
Çizelge 3.1. Aylık yatay, direkt ve optimum açıda küresel güneş ışıınımı değerleri (geller, 2010)	21
Çizelge 3.2. Örnek bina pencere ve cephe özellikleri	34
Çizelge 4.1. Her ayı temsil eden gün ve tarih (Yiğit ve Atmaca 2010)	36
Çizelge 4.2. Güney cephe için önerilen saçak boyları	37
Çizelge 4.3. Doğu ve batı cephe için önerilen saçak boyları	39
Çizelge 4.4. Gölgeleme uzunluk faktörü SLF (shade line factor) değerleri (Watson 2013).....	40
Çizelge 4.5. Aylara göre optimum güneş paneli açısı.....	46
Çizelge 4.6. Mevsimsel optimum panel eğim açıları	47
Çizelge 4.7. Sabit saçak için aylara göre gölgeleme uzunlukları (cm)	51
Çizelge 4.8. Sabit saçak ile pencereye düşen aylık gölgeleme oranları (%)	52
Çizelge 4.9. Aylık dikey yüzeye düşen Güneş Işıınımı Verileri (Geller 2010)	59
Çizelge 4.10. Gölgeleme oranı ve pencereden giren net güneş kazancı (KWh/ay)	61
Çizelge 4.11. PV panelin temel teknik özellikleri.....	62
Çizelge 4.12. Yönlere göre panel üzerine düşen aylık toplam güneş ışıınımı	66
Çizelge 4.13. Panel yönüne göre aylık elektrik üretimi (kWh/ay).....	67
Çizelge 6.1. Cephelere Göre Entegre PV Panel Sisteminin Yıllık Performans Özeti.....	71

1. GİRİŞ

1.1. Enerjinin Önemi ve Artan İhtiyaç

Enerji, günümüzde tüm dünyanın en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve yaşam konforundaki artış gibi pek çok faktör, enerji talebinin gün geçtikçe artmasına sebep olmakta ve üretim ile tüketim arasındaki farkı büyötmektedir. Bu durum, enerji sorununu her ülkenin kendi içinde yaşadığı bir problem olmaktan çıkararak küresel bir sorun haline getirmiştir. Halen devam eden savaşlar ve işgaller de bu küresel enerji krizinin insanlara olan yansımalarından biridir. Enerji, artık sadece insanların temel ihtiyaçlarını karşılayan bir unsur değil, uluslararası politikaları etkileyen stratejik bir güç haline gelmiştir.

İnsanlık, tarih boyunca ilerleme kaydetmek ve temel ihtiyaçlarını karşılamak için enerjiye bağımlı olmuştur. Enerji, farklı biçimlerde mevcut olup, günümüzde fosil yakıtlar, hidroelektrik, rüzgâr ve güneş gibi kaynaklardan büyük miktarlarda üretilmektedir. Teknolojik gelişmeler sayesinde bu kaynakların kullanımı geniş çapta mümkün hale gelmiş ve enerji üretimi, modern toplumların temel bir çalışma alanı olmayı sürdürmektedir. Enerjiye olan ihtiyaç yalnızca teknik düzeyde değil, aynı zamanda politik, ekonomik ve sosyal düzeyde de önem arz etmektedir. Maddi dünyadaki birçok özelliğin arasında enerji, en kritik bileşenlerden biri olarak kabul edilir. Nitekim enerji hem siyasal hem de ekonomik gücün şekillenmesinde büyük bir role sahiptir (Edenhofer vd. 2011). Enerji sistemleri, sanayi devriminden bu yana köklü değişimlere uğramıştır. Küresel enerji arzındaki bu dönüşüm, Şekil 1.1'de detaylı olarak gösterilmektedir. Toplam enerji tüketimi incelendiğinde, ülkeler arasındaki farklılıkların büyük ölçüde nüfus büyüklüklerine dayandığı görölmektedir; daha büyük nüfuslara sahip ülkeler, kaçınılmaz olarak daha küçük ülkelerden daha fazla enerji tüketmektedir. Ancak, en zengin ve en yoksul ülkeler arasındaki enerji tüketimi farkı, nüfusa dayalı bu farkın ötesinde daha da büyüktür. Dünyanın en yoksul ülkeleri, genellikle ticari enerji kaynaklarına oldukça sınırlı erişime sahiptir ve bu da enerji tüketiminde belirgin bir dengesizliğe yol açmaktadır.



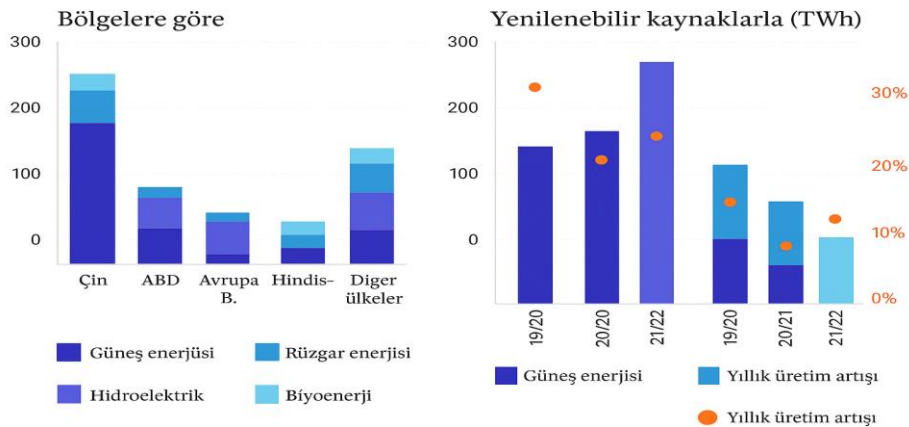
Şekil 1.1. Farklı kıta ölkelerine göre enerji üretim seviyesi ve birincil enerji tüketimindeki yıllık değişimi (Production 2021)

2009-2018 yılları arasındaki enerji tüketimi dünya enerji tüketimi tablo 1.1’de görülmektedir. IEA’nın bulunduğu tahminde, 2021 yılında dünya genelindeki petrol tüketimi 2018 seviyesine kıyasla %7,2 artış göstermiştir. Doğalgaz tüketiminde ise %3,2, küresel elektrik tüketiminde ise %4,5 oranında bir artış beklenmektedir (IEA, 2020). Teknolojik gelişmelere rağmen, genel enerji kullanımı incelendiğinde, fosil yakıtların üretimi ve kullanımının 2021 yılının başında zirve noktasına ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 1.1. Dünya enerji tüketimi (2009-2018) (IEA, 2020)

Enerji kaynağı	Toplam enerji tüketimi (%)	Toplam enerji miktarı (TWh)
Petrol	34,3	509 800
Kömür	29,2	434 300
Gaz	22,8	339 300
Su gücü	6,7	99 200
Nükleer	4,6	68 800
Rüzgar	1,3	18 700
Jeotermal/Biokütle/Başka	0,9	12 700
Güneş	0,4	5 700
Toplam	100,0	1 389 300

IEA’nın raporunda sunulan veriler, yenilenebilir enerji kaynaklarının sektörlerdeki (ısı üretimi, elektrik üretimi, ulaşım, sanayi) kullanım oranlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 1.2’de görüldüğü üzere, IEA’ya göre özellikle rüzgâr ve güneş fotovoltaik üretiminde, 2021 yılında önceki yıllara kıyasla yaklaşık %17 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Ayrıca, 2020 yılında küresel enerji talebinin %4 oranında azaldığı, 2021 yılında ise enerji kullanımının COVID-19 öncesi seviyesinin %0,5 üzerine çıkmasının beklendiği belirtilmiştir. 2021 yılında nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen toplam küresel enerji miktarı ise, Enerdata’ya göre 1.550.257 MWh olarak kaydedilmiştir (IEA 2020a).



Şekil 1.2. Yenilenebilir enerjiden küresel elektrik üretimi, 2020 ve 2021 yıllarında (IEA, 2020)

Çizelge 1.2. Ocak 2021'de kullanılan dünya küresel enerjisi (IEA 2020b)

Kaynaklar	Miktar
Yenilenemeyen kaynaklardan (MWh)	1 319 666
Yenilenebilir kaynaklardan (MWh)	233 455
Dünyaya yansıyan güneş enerjisi (MWh)	9 713 984 760
Bugün pompalanan petrol (Variller)	317 957
Kalan petrol (variller)	1 485 068 788 724
Kalan doğalgaz (Varil petrol eşdeğeri)	1 091 223 944 720
Kalan kömür (Varil petrol eşdeğeri)	4 309 432 933 754

Hızla gelişen teknoloji ve yaşam standartlarındaki değişimler, enerji talebini her geçen gün artırmaktadır. Artan nüfusla birlikte, barınma ihtiyacını karşılayabilmek için yeni yerleşim alanları planlanmakta ve mevcut şehirler genişlemektedir. Türkiye'de küresel iklim değişikliğine katkıda bulunan sera gazı salınımının, bazı kaynaklarda %30, bazı kaynaklardaysa %50'sinin binalardan kaynaklandığı belirtilmektedir (Seymen Aksu 2020). Dünya genelinde ise bu oran yaklaşık %50 olarak ifade edilmektedir. Türkiye'de konutlarda kullanılan enerjinin %80'i, iklimatik konfor koşullarının sağlanmasına yönelik harcanmakta olup, bu durum binaların yüksek enerji tüketiminin ve dolayısıyla sera gazı salınımlarının temel nedeni olarak kabul edilmektedir.

1.2. Güneş Enerjisi

Hızla artan dünya nüfusu ve modern toplumların tüketim alışkanlıkları, her yıl enerji talebinin hızla yükselmesine neden olmaktadır. Ancak, uzun yıllardır bağımlı olduğumuz fosil yakıtlarla vedalaşma zamanı gelmiştir çünkü bu enerji tüketimi, çevresel ve iklimsel anlamda büyük yıkımlara yol açmaktadır. Bu noktada, yenilenebilir enerji kaynakları oldukça umut verici bir çözüm olarak öne çıkmakta ve güneş enerjisi bu kaynaklar arasında en dikkat çekici olanlardan biridir. Güneş enerjisi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir seçenek olarak, artan enerji ihtiyacını karşılarken fosil yakıt tüketiminin neden olduğu zararlı etkileri azaltma potansiyeli ile öne çıkmaktadır.

Evren, güneş ve etrafındaki gezegenlerden oluşan güneş sisteminin bir parçasıdır. Dünya için bu sistemin en önemli unsuru güneştir. Güneş, dünyanın temel ısı ve ışık kaynağıdır. Güneşin olmadığı bir ortamda yeryüzü sıcaklığı -273°C olacaktır (Erol 2004). Bu nedenle, güneş, yeryüzünü yaşanabilir bir sıcaklık seviyesine getiren ve hayati önem taşıyan bir enerji kaynağıdır.

Güneş enerjisi üç farklı ışıınımdan oluşur: toplam güneş enerjisinin %7'si mor ötesi ışıını (ultraviyole), %47'si görünür ışıını ve %46'sı kızıl ötesi ışıınımdan meydana gelir (Jayakumar 2009). Güneş ışıınları, yaklaşık 150 milyon kilometre uzaklıktan, yaklaşık sekiz dakika içinde dünyaya ulaşır (IEA, 2020). Yeryüzüne ulaşan ışıınların miktarı, kalitesi ve doğrultusu atmosferdeki yayılma ve soğurma özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Güneşten gelen ışıınların bir kısmı atmosferden geçerken yeryüzündeki gazlar ve toz parçacıkları tarafından soğurulur (absorbe edilir). Yer kürenin yaklaşık 25 km yüksekliğinde, ışıınımların mor ötesi kısmını kesen bir bölge bulunur ve bu bölge ozon tabakası olarak adlandırılır. Ozon tabakasında küçük dalga boylarına sahip mor ötesi ışıınlar soğurulur. Bu soğurma olayı, özellikle canlılar için büyük önem taşır, çünkü mor

ötesi ışınlar yüksek enerjiye sahiptir ve canlıların sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, ozon tabakasındaki mor ötesi ışınımın soğurulması, yeryüzündeki yaşamın devamı açısından kritik öneme sahiptir (Ozturk vd. 2015).

Görünür bölgedeki ve kırmızı altı bölgedeki ışınlar, havada bulunan gaz molekülleri ve toz parçacıklarıyla etkileşim sonucu saçılmaya uğrarlar. Bu saçılmalar her yöne ve farklı dalga boylarında gerçekleşir. Mavi renge karşılık gelen dalga boyları, kırmızı renge karşılık gelenlerden daha fazla saçılma eğilimindedir. Bu nedenle, yeryüzünden bakıldığında gökyüzü mavi renkte görünmektedir (Ozturk vd. 2015).

Özetle, gelen güneş ışınlarının atmosfere girdikten sonra uğradığı değişimler şu şekilde sıralanabilir (Peker ve Yalçın 2019):

- 1) Işınların %25'i atmosferdeki zerrelere ve bulutlara çarparak kırılır ve tekrar uzaya yansır. Bu olay kırılma/yansıma ya da refleksiyon olarak adlandırılır.
- 2) Işınların %25'i atmosfer içinde yayılır, bu olaya difüzyon denir.
- 3) Işınların %15'i atmosfer tarafından soğurulur ve atmosfer ısınır, bu olaya absorpsiyon (soğurma) denir.
- 4) Işınların %8'i atmosferi geçtikten sonra yeryüzüne çarpar ve tekrar uzaya yansır.
- 5) Işınların geri kalan %27'si yeryüzünü doğrudan ısıtır.

Gelen ışınların %67'si atmosferde ve yeryüzünde aydınlatıcı ya da ısıtıcı bir etki yaratır. Kalan kısa dalga boylu ışınlar tekrar yansıtılır. Atmosferden yansıyan %25 ve yeryüzüne çarpıp tekrar yansıyan %8, yani toplamda %33 oranındaki enerji, hiçbir değişime uğramadan kısa dalga boylu ışınlar olarak uzaya geri dönmektedir. Bu ışınların atmosfer ya da yeryüzü üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. Yerden, bulutlardan ve atmosferden yansıyan bu ışınlar, albedo olarak adlandırılır (Erol 2004). Latince "beyazlık" anlamına gelen albedo, gelen güneş ışınımının yüzey tarafından yansıtılan ışınım oranını ifade eder (Coakley 2003). Albedo, yer yüzeyinin yapısına ve türüne bağlı olarak farklı değerler almaktadır ve bu değerler 0-1 aralığında değişir (Dai vd. 2019). Farklı doğal yüzey türlerinin albedo değerlerine Tablo 1.2'de ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Çizelge 1.3'ten anlaşılacağı üzere, toprak türleri, bitkiler ve yüzeylerin renklerine göre albedo değerleri farklılık göstermektedir. Kara cismin (black body) albedosu sıfırdır, yani bu durum hiçbir ışını yansıtmayan ve geçirmeyen bir cisim olduğu anlamına gelir. Tam beyaz yüzeyin albedo değeri ise 1'dir; bu, cismin gelen güneş ışığının tamamını yansıttığını ifade eder. Su yüzeyi ise, güneş ışınlarının gelme açısına bağlı olarak 0.1 ile 1 arasında değişen bir albedo değeri almaktadır. Sonuç olarak, tabloda belirtilen değerlere göre, açık renkli yüzeylerin, koyu renkli yüzeylere göre daha yüksek albedo değerlerine sahip olduğu, yani ışınları yansıtmada daha etkili oldukları görülmektedir.

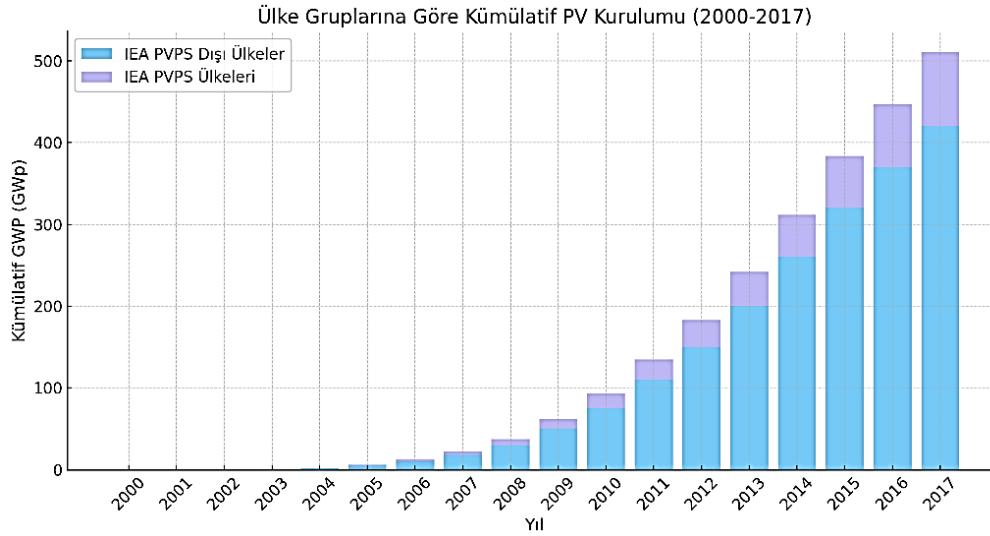
Çizelge 1.3. Doğal yüzeylerin albedo değerleri (Ial, 2006)

Doğal yüzey türleri	Yaklaşık albedo aralık değerleri
Kara cisim	0
Ormanlar	0,05–0,2
Mera/Çayır ve ekili arazi	0,1–0,25
Koyu renkli toprak yüzeyler	0,1–0,2
Kuru kumlu toprak	0,25–0,45
Kuru çamurlu/Killi toprak	0,15–0,35
Kum	0,2–0,4
Yeryüzünün ortalama albedosu	0,36
Granit/Taş	0,3–0,35
Buzul buz (Glacial Ice)	0,3–0,4
Açık renkli toprak yüzeyler	0,4–0,5
Kuru tuz örtüsü	0,5
Temiz/Taze, derin kar	0,9
Su	0,1–1
Tam beyaz yüzey	1

1.3. Fotovoltaik Güneş Panelleri

Modern güneş panellerinin günümüzdeki versiyonunun ortaya çıkışı, geçtiğimiz yüzyılın ortalarına dayanmasına rağmen, fotovoltaik endüstrisi asıl büyük atılımını 2000'li yıllardan sonra dünya genelinde gerçekleştirmiştir. Küresel olarak kurulu güneş fotovoltaik gücü 2016 yılında 310 GW'a, 2020 yılında ise neredeyse 700 GW'a ulaşmıştır. 2050 yılına yönelik projeksiyonlara baktığımızda, bu miktarın 4500 GW'a ulaşacağına dair güçlü öngörüler bulunmaktadır (Sica vd. 2018).

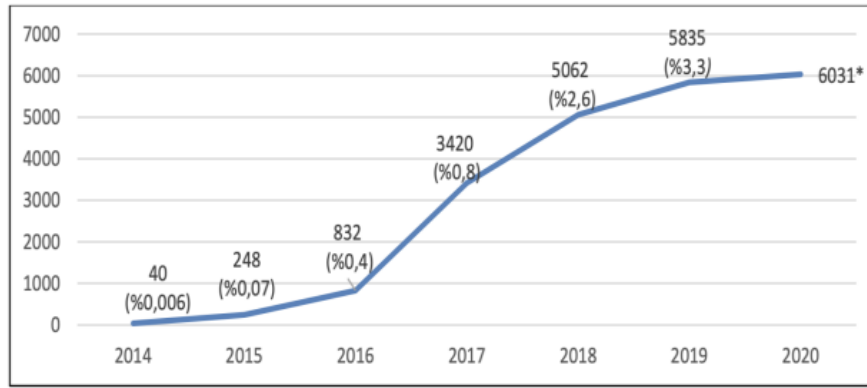
Küresel güneş fotovoltaik (PV) teknolojileri pazarı son yıllarda etkileyici büyüme oranları göstermektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2018 Küresel Fotovoltaik Pazarlar Raporu'na göre, 2017 yılı sonu itibarıyla fotovoltaik güneş paneli sistem kapasitesi, şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız kurulumlar da dahil olmak üzere dünya genelinde 402,5 GW'a ulaşmıştır (Şekil 1.3). 1990'lardan bu yana güneş enerjisi, yılda yaklaşık %37 oranında istikrarlı bir büyüme göstermiş olup, günümüzde en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynağı olarak sıralanmaktadır (Deng vd. 2019). Küresel PV pazarı, 2005'ten 2017'ye kadar sürekli bir genişleme göstermiştir ve bu da doğal olarak PV sistem kullanımında olumlu bir trende yol açmıştır. Şekil 1.3'te, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı (PVPS) üyesi olan ve olmayan ülkelerde 2000–2017 yılları arasında gerçekleştirilen toplam fotovoltaik (PV) kurulum kapasitesi gösterilmektedir. Grafik, PV sistemlerinin küresel düzeyde ivmelenen yayılımını ortaya koymakta olup, özellikle 2010 sonrası dönemde hem IEA PVPS ülkelerinde hem de bu gruba dahil olmayan ülkelerde ciddi bir büyüme yaşandığını göstermektedir. Bu artış, güneş enerjisi teknolojilerinin küresel düzeyde yaygınlaştığını ve yenilenebilir enerji yatırımlarının hızlandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 1.3. IEA toplam pv kurulumlarının (2000–2017) yıllara göre gelişimi (iea, 2018)

Dünya pazarında güneş enerjisinden elektrik üretmek için en yaygın kullanılan yöntem, silikon bazlı panellerdir. Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü'nün 2018 tarihli Fotovoltaik Raporu'na göre, silikon güneş hücreleri, küresel fotovoltaik pazarının %90'ını oluşturmaktadır. Monokristal silikon (mono-Si) ve polikristal silikon (multi-Si) için en yüksek dönüşüm verimlilikleri sırasıyla %41,7 ve %22,3'tür. 1800'lü yılların ilk çeyreğinde keşfedilen ve gezegendeki en bol yarı iletken olan silikon, kararlı yapısı sayesinde fotovoltaik güneş paneli teknolojilerinin üretiminde en geniş payı almaktadır.

Coğrafi konumu nedeniyle Türkiye, yüksek bir güneş enerjisi üretim potansiyeline sahip bir ülkedir. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji potansiyelini değerlendirmek amacıyla 2005 yılında yürürlüğe giren "Elektrik Enerjisi Üretimi Amacıyla Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımına İlişkin Kanun" kapsamında oluşturulan YEK Destekleme Mekanizması, önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu tarihten itibaren, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimine verilen teşvikler sayesinde, Türkiye'nin enerji üretiminde hidrolik enerji dışındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı artmaya başlamıştır. Türkiye'de kurulu güneş enerjisi (PV) gücünün gelişimi ve yıllar içinde elektrik üretiminde güneş enerjisinin payındaki değişim Şekil 1.4'te sunulmaktadır (Orun ve Demirgil 2021). Şekil 1.4'te, Türkiye'de 2014–2020 yılları arasında güneş enerjisine dayalı fotovoltaik (PV) kurulu güç miktarındaki artış ve aynı yıllarda güneş enerjisinin toplam elektrik üretimindeki yüzdesel payı gösterilmektedir. 2014 yılında sadece 40 MW olan PV kurulu gücü, 2020 yılına gelindiğinde 6031 MW'a ulaşmış; bu artışla birlikte güneş enerjisinin üretimdeki payı da %0,006'dan %3,3 seviyesine çıkmıştır. Bu eğilim, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirme yolunda hızlı bir ivme kazandığını ve yenilenebilir kaynaklara olan yönelimin güçlendiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1.4. Türkiye’de pv kurulu gücü ve üretim payının gelişimi (2014–2020) (orun ve demirgil, 2021)

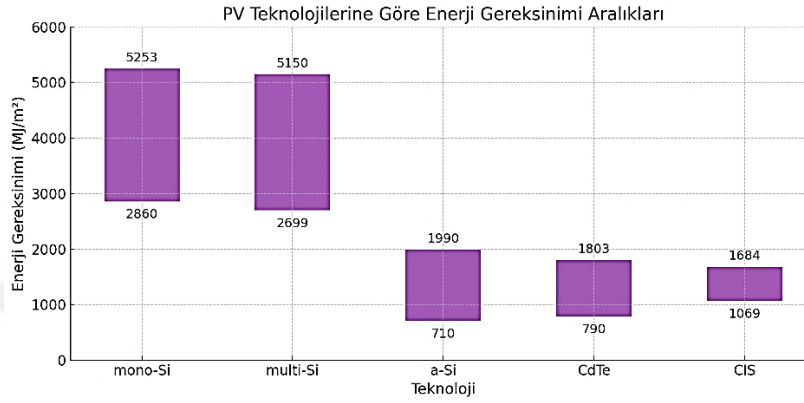
Türkiye, Avrupa Birliği mevzuatına uyum sürecinde bu düzenlemeye uygun hareket etmiş ve bu kapsamda, AB direktiflerine paralel olarak 2012 yılında Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği yayımlanmıştır. Benzer şekilde, bu yönetmelik, üreticilere "kirlenen öder" prensibiyle atık elektronik ürünleri toplama, geri kazanma ve geri dönüştürme yükümlülüğü getirmektedir. Bu görev, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yetkilendirilen kuruluşlar aracılığıyla yerine getirilebilir. Türkiye’deki elektronik atık yönetmeliğinde geri kazanım ve geri dönüşüm süreçleri için zorunlu bir asgari oran bulunmamasıyla birlikte, dünya genelinde elektronik atıkların geri dönüşüm oranı ortalama %12 iken, bu oran Türkiye’de yaklaşık %5 seviyesindedir. Güneş enerjisi yatırımlarını hızla artıran Türkiye’nin, elektronik atık kapsamına giren PV panellerinin toplanması ve uygun şekilde geri dönüştürülmesi için sürdürülebilir bir yol haritası belirlemesi gerekecektir.

Avrupa Yeşil Mutabakatı’na uyum süreci kapsamında, Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı tarafından hazırlanan “Türkiye’nin Yeşil Mutabakat Eylem Planı” 16 Temmuz 2021 tarihinde yayımlanmıştır. Yeşil Mutabakat Eylem Planı, temel olarak şu hedefleri belirlemektedir: yeşil finansman yoluyla yeşil yatırımları teşvik etmek, 2027 yılına kadar güneş ve rüzgar enerjisine dayalı üretim için yılda 1 GW kapasite tahsis etmek, daha temiz bir enerji tedarik modeli kullanmak, uluslararası rekabetçi, sürdürülebilir, verimli ve teknolojik bir tarım politikasına geçiş yapmak ve AB çevre düzenlemelerine uyum sağlamak. Bu eylem planı çerçevesinde, özellikle üretim, tüketim, sanayi ve enerji sektörlerindeki tüm paydaşlar için dönüşüm kaçınılmazdır.

Çeşitli güneş paneli türleri bulunmaktadır; bunlar arasında monokristal (mono-Si), polikristal (multi-Si), amorf (a-Si), kadmiyum tellürid (CdTe) ince film, CIS ince film, heterojen güneş hücreleri ve boya duyarlı güneş hücreleri sayılabilir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan panel türleri, silikon bazlı veya kristal silikon olarak da adlandırılan monokristal ve polikristal güneş panelleridir.

Şekil 1.5’te gösterildiği gibi, ince film fotovoltaik güneş panellerinin üretimi için gereken enerji, kristal silikon fotovoltaik panellerden çok daha azdır (Peng, Lu, ve Yang 2013). Fotovoltaik güneş panellerinin sürdürülebilirliğini ve çevresel performansını değerlendirmek için en yaygın kullanılan iki çevresel parametre, Enerji Geri Dönüş Süresi (EPBT) ve sera gazı emisyon oranıdır. Hammaddenin fotovoltaik güneş paneli sisteminin,

hammadenin çıkarılmasından panel üretimine, taşımadan panel montajı ve geri dönüşüme kadar tüm yaşam döngüsü boyunca tüketilen enerjiyi telafi etmek için gereken yıl sayısı olarak tanımlanabilir. Mono-Si PV sistemleri için yaşam döngüsü EPBT değeri 1,7 ile 2,7 yıl arasında değişirken, multi-Si paneller için bu süre 1,5-2,6 yıl arasında değişmektedir. İnce film PV sistemleri olan a-Si, CdTe ve CIS'in yaşam döngüsü EPBT değerleri ise sırasıyla 1,8-3,5 yıl, 0,75-2,1 yıl ve 1,45-2,2 yıl arasında değişmektedir (Peng vd. 2013).



Şekil 1.5. Fotovoltaik güneş panellerinin üretimi enerji gereksinimleri (Peng vd. 2013)

1. CdTe (Kadmiyum tellürid) ince film güneş panelleri: CdTe ince film güneş panelleri, kadmiyum tellürid yarı iletken malzemesi kullanarak güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu tür paneller, düşük maliyetli üretim süreçleri ve nispeten kısa enerji geri dönüş süreleri (EPBT) ile bilinir. Çevresel etkinliği yüksek olmasına rağmen, kadmiyum gibi toksik malzemeler içerdiğinden geri dönüşüm ve atık yönetimi önem taşır.

2. CI(G)S İnce film güneş panelleri: CIGS (Bakır-İndiyum-Galyum-Selenid) ince film güneş panelleri, yüksek verimlilik ve esneklik sunan bir başka panel türüdür. CIGS panelleri, geniş bir ışık spektrumunda çalışabilen yapıları sayesinde düşük ışık koşullarında bile iyi performans gösterir. Ayrıca ince ve hafif yapıları sayesinde farklı yüzeylerde kullanılabilirler.

3. Amorf (a-Si) ince film güneş panelleri: Amorf silikon (a-Si) ince film paneller, silikonun kristal formda olmadığı bir yapıya sahiptir. Diğer ince film türlerine göre daha düşük maliyetli bir üretim sürecine sahiptir, ancak verimlilik oranı daha düşüktür. a-Si paneller, genellikle büyük yüzey alanlarında veya düşük maliyetin öncelikli olduğu projelerde tercih edilir.

4. Monokristal (Mono-Si) pv güneş panelleri: Monokristal silikon (mono-Si) paneller, tek bir silikon kristalinden yapılmış en verimli fotovoltaik panel türlerinden biridir. Verimlilik oranları %20'nin üzerine çıkabilen bu paneller, yüksek performans ve uzun ömür sunar. Mono-Si paneller, dar alanlarda en yüksek enerji üretimini sağlamak için idealdir.

5. Polikristal (Multi-Si) pv güneş panelleri: Polikristal silikon (multi-Si) paneller, birden fazla silikon kristalinin birleşmesiyle oluşturulur. Mono-Si panellere göre

daha düşük maliyetlidir, ancak verimlilikleri de biraz daha düşüktür. Genellikle %15-17 verimlilik oranına sahiptir ve geniş alan uygulamaları için ekonomik bir seçenek sunar.

1.4. Gölgeleme Sistemleri

Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji verimliliği, hava kirliliği, iklim değişikliği ve enerji krizlerine karşı en etkili ve kalıcı çözümler arasındadır (Omer 2008). Bir binanın enerji verimliliğini belirleyen önemli faktörlerden biri, bina cephesinin tasarımıdır (Sadineni vd,2011). Yüksek verimlilikteki bir cephe sistemi, hava sızıntısı, ısı yalıtımı ve güneş enerjisi kazanımı gibi konularda etkili bir düzenleme sağlamalıdır. Ancak, yalnızca cephe yapısı bu düzeyde bir enerji verimliliği sağlamak için yeterli değildir. Açıklıkların boyutu ve camlama, iç mekân kalitesi, doğal aydınlatma gibi diğer unsurlar da enerji verimliliğini etkiler.

Güneş ışınımının binaya ve insan vücuduna olan etkisi, hem enerji verimliliğini hem de görsel konforu doğrudan etkiler (De Carli vd, 2008). Özellikle otel ve ticari yapılarda uygulanan gölgeleme elemanları, yapının yıllık güneş enerjisi kazancını ve iç mekân aydınlatma seviyelerini düzenleyerek enerji verimliliğini artırır (Dubois 1997). Bu gölgeleme elemanları, gün boyunca HVAC sistemleri için gereken enerji ihtiyacını azaltmaya ve çalışma saatlerinde konforlu aydınlatma sağlamaya yardımcı olur. Otelde ise bu sistemler, misafir konforunu artırarak daha iyi bir iç mekân kalitesi sunar.

Bir binanın öncelikli amacı, kullanıcıları soğuk, sıcak hava, rüzgar, yağmur gibi olumsuz dış koşullardan korumaktır. Binanın tasarımı sırasında dikkate alınması gereken ilk unsur, yapının konforlu bir yaşam alanı oluşturması gerektiğidir. Işık miktarı, özellikle ofis çalışanları için büyük önem taşır. Akdeniz ikliminde yaşayan ofis çalışanları için ise iklim, iç mekân konfor düzeyini doğrudan etkiler. Hava dolaşımının kontrolü, iç mekân kalitesini doğrudan etkileyen bir unsurdur.

Yapılardaki cam yüzeyler, enerjinin önemli kayıp kaynaklarından biri olup, aşırı enerji tüketimine yol açar. Cam özellikleri, aydınlatma, ısı transferi ve enerji kaybı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Termal ve görsel konfor, camın özellikleriyle doğrudan ilişkilidir (Da Silva,2012). Bir binanın enerji kaybını analiz ederken dikkate alınması gereken çeşitli faktörler vardır. Örneğin, binanın yönlendirmesi, cephenin aldığı güneş ışığı ve radyasyonu belirlediği için ısı akışı ve termal konfor üzerinde doğrudan etkili olur. İkinci önemli faktör ise iklim koşullarıdır. Sıcak veya soğuk iklimlerde camların boyutu ve miktarı, ısı kaybı ve kazancını belirler. Ayrıca, camın türü ve değeri de tasarım sürecinde önemli rol oynar. Cam özelliklerinin yanı sıra, binanın yapısal özellikleri de önemli bir etkiye sahiptir. Yaşayan yük ve ölü yük gibi faktörler de binanın enerji verimliliği açısından kritik olarak değerlendirilir.

Günümüz binaları, enerji tasarrufu sağlamak adına büyük bir potansiyele sahiptir ve enerji verimliliğini artırmanın en bilinen yolları evlerde ve iş yerlerinde bulunmaktadır (Ihara vd. 2015). Güneş radyasyonundan kaynaklanan ısı kazanımını ayarlayarak camlı cepheler, yıl boyunca enerji dengesine katkıda bulunabilir. Öte yandan, cam cepheli binalar, İzmir gibi sıcak iklime sahip bölgelerde soğutma talebini artırmaktadır (Eskin ve Türkmen, 2008).

Aydınlatma açısından, gölgeleme elemanları gün ışığını kontrol ederek göz kamaşmasını önler. Aynı zamanda gölgeleme elemanları enerji tasarrufu ve soğutma işlemlerinde önemli bir rol oynar. Tasarruf stratejilerinden biri, binanın cephe yönelimine uygun bir gölgeleme elemanının kullanılmasıdır (Sadeghipour R.,2013).

1.5. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, çağdaş yapı sektöründe enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, sabit fotovoltaik (PV) panellerin pencere üstü gölgeleme elemanı olarak binaya entegre edilmesinin bina enerji performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde araştırmaktır. Çalışmada, geleneksel pasif gölgeleme yaklaşımlarının ötesine geçilerek, aktif elektrik üretimi ile pasif enerji kazanımının tek bir mimari çözümde bütünleştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, Antalya'nın Kepez ilçesinde yer alan çok katlı bir konut binası referans alınarak, güney, doğu ve batı cephelerine sabit eğimli ve optimum boyutlandırılmış PV panellerin yerleştirilmesiyle;

- Elektrik üretimi potansiyeli (aylık ve yıllık bazda),
- Saçak etkisinin bina iç ortamındaki ısıtma ve soğutma enerji tüketimine etkisi,
- Saçağın oluşturduğu gölge boyu ile optimum panel eğim açısı ve boyutlarının hesaplanması,

Çalışmanın bir diğer amacı ise, farklı cephe yönelimleri ve güneş panel açıları için PV panellerin enerji üretimi sağladığı toplam enerji kazançlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek; böylece yapı ölçeğinde en yüksek verimi sağlayacak optimum panel yerleşimi ve açı parametrelerini belirlemektir. Bu amaçla, uluslararası veri tabanları (ör. PVGIS) ile gelişmiş sayısal modelleme ve simülasyon araçları (MATLAB, Ecotect Analysis) entegre olarak kullanılmıştır.

Tez kapsamında elde edilen veriler ışığında;

- Panel eğim açısı, gölgeleme uzunluğu ve panel boyutunun enerji verimliliği üzerindeki etkisi,
- İç mekân enerji tüketiminde ve karbon salımında sağlanan iyileşmeler,

2. KAYNAK TARAMASI

Bu çalışmada, bina cephelerine entegre edilen sabit eğimli güneş panellerinin enerji üretimi ve tüketimi üzerindeki etkileri incelenmektedir.

Cephe entegrasyonlu BIPV (Bina Entegreli Fotovoltaik) sistemleri, yeni inşa edilen veya güçlendirme ihtiyacı olan binalara aktif ve pasif faydalar sağlamak amacıyla geliştirilen yenilikçi çözümler arasında yer almaktadır (Norton vd. 2011). Bu sistemler, temelde binalara birçok avantaj sunmakta olup, özellikle elektrik üretiminde meydana gelebilecek kayıpların önlenmesine katkıda bulunmaktadır. BIPV camlarının tasarımında yapılan değişiklikler sayesinde, yaklaşık %15 ila %35 arasında enerji tasarrufu sağlanarak ısıl örtü performansı artırılabilir. Aydınlatma gereksinimlerine bağlı olarak, yarı saydam veya geçirgen PV cam sistemleri kullanılarak doğrudan güneş ışığının bina içerisine alınması mümkün hale gelmektedir. Bu sistemlerin akustik performansı ise, geleneksel cephe sistemleri ile benzerlik göstererek yapı uygulamalarındaki ilgili standartları karşılamaktadır. Havalandırılabilir cepheler ve çift cidarlı sistemler, silikon teknolojisine sunduğu görsel özellikler sayesinde bina estetiğine katkı sağlamaktadır. Montaj işlemleri oldukça basit olup, yalnızca alüminyum zımbalar, braketler ve profillerden oluşan bir montaj sistemi kullanılmasını gerektirmektedir (Chatzipanagi, Frontini, ve Virtuani 2016). Cephe konfigürasyonlarında kullanılan teknolojilerin yaklaşık %34'ü kristal yapılı, %44'ü ince film temelli olup, kalan kısmı ise montaj sistemleri oluşturmaktadır.

Artan enerji maliyetleri ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri, bina sektöründe enerji verimliliğini öncelikli bir konu haline getirmiştir. Bu bağlamda, Bina Entegrasyonlu Fotovoltaik (BIPV) sistemler, yapıların cephelerine entegre edilerek hem estetik hem de enerji üretimi açısından avantaj sağlamaktadır. BIPV sistemleri, geleneksel yapı malzemelerinin yerine geçerek, binanın dış yüzeylerinde elektrik üretimi sağlayan fotovoltaik malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulur. Bu sistemler, çatı, cephe, ışıklık ve kanopi gibi yapı elemanlarına entegre edilerek, binanın enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayabilir (Sur 2020).

Yapılan çalışmalar, BIPV sistemlerinin doğru tasarlandığında binaların enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayabileceğini göstermektedir. Özellikle cephe yönelimi ve panel eğim açısı, enerji üretim verimliliği üzerinde belirleyici faktörlerdir. BIPV sistemlerinin uygulanabilirliği, binanın coğrafi konumu, iklim koşulları ve çevresel faktörler gibi etmenlere bağlıdır. Bu nedenle, BIPV sistemlerinin tasarımı ve entegrasyonu, detaylı bir analiz ve planlama süreci gerektirir.

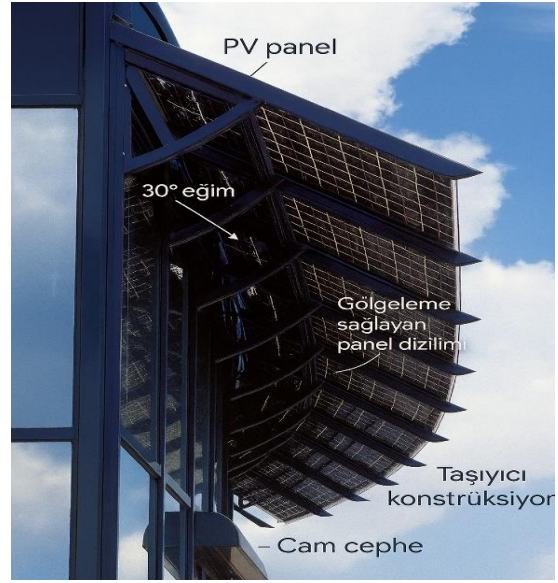
BIPV sistemlerinin avantajları arasında, enerji üretimi ile yapı estetiğini koruma, bina kabuğunun işlevselliğini artırma ve karbon salınımını azaltma gibi unsurlar bulunmaktadır. Ayrıca, BIPV sistemleri, binanın enerji performansını artırarak, enerji maliyetlerini düşürmekte ve sürdürülebilir bina tasarımına katkı sağlamaktadır (Demir vd. 2020).

DesignBuilder yazılımı kullanılarak yapılan enerji performansı analizinde, binanın enerji ihtiyacı ve CO₂ salınımı hesaplanmış ve Türkiye'deki durumlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın ana hedefi, binanın enerji gereksinimlerini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu değerlendirmektir. Modelde yenilenebilir enerji kaynakları eklenmiş, bu kaynakların enerji verimliliğine katkısı kapsamlı bir analizle incelenmiştir; ayrıca, yapısal iyileştirmelerle enerji performansını artırmaya yönelik analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlara dayalı öneriler geliştirilmiştir (Kirişçi ve Arslan, 2016).

Khantawang (2020) tarafından yürütülen çalışmada, yapı entegrasyonlu fotovoltaik sistemlerin (BIPV) geleneksel uygulamalı fotovoltaik sistemlere (BAPV) kıyasla kapsamlı bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Tezde BIPV ve geleneksel PV sistemleri; uygulanabilirlik, verimlilik, dayanıklılık, bakım süreçleri, birim maliyet ve optimal yönlendirme açıları bakımından eleştirel bir yaklaşımla karşılaştırılmıştır (Khantawang 2020). Araştırmada, BIPV panellerinin bina cephesi veya bina zarfı işlevi görürken aynı zamanda enerji üretimi sağlayabilmesi önemli bir avantaj olarak belirtilmiştir. Buna karşılık, geleneksel sistemlerin daha yüksek verimlilik ve daha düşük maliyet gibi üstünlükleri olduğu vurgulanmıştır (Khantawang 2020). Çalışmanın sonuç kısmında ise, BIPV teknolojilerinin bina uygulamalarında kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla bir çerçeve sunulmuş ve bu sistemlerin mevcut fotovoltaik alternatiflere göre avantajları ve dezavantajları ayrıntılı şekilde ortaya konulmuştur (Khantawang 2020).

Hosseini (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ticari binalarda enerji etkin tasarım amacıyla binaya entegre fotovoltaik (BIPV) sistemlerin kullanımı incelenmiştir. Tezde, fotovoltaik panellerin yapı malzemesi olarak entegrasyonu ile hem estetik kaygıların hem de enerji üretiminin birlikte ele alındığı belirtilmiştir (Hosseini, 2020). Araştırmada, BIPV teknolojisinin bina tasarımında sunduğu çift işlevlilik – hem cephe malzemesi olarak kullanılması hem de enerji üretimi sağlaması – avantaj olarak vurgulanırken, geleneksel PV sistemlere kıyasla verimlilik ve maliyet gibi zorlukların da dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca, BIPV pazarının 2019–2025 yılları arasında %18,8'lik bir bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) göstermesinin beklendiği ve bu büyümenin uygun düzenlemeler ile teşviklerin entegrasyonu yoluyla desteklenebileceği belirtilmiştir (Hosseini 2020). Bu doğrultuda tez, BIPV sistemlerinin ticari bina cephelerine entegrasyonunu geliştirmeye yönelik bilimsel araştırmalar sunmaktadır.

Almanya'nın Wünnenberg şehrinde bulunan Metallbau RÜSO binası, fotovoltaik panellerin modern bina tasarımına entegrasyonuna dair önemli bir örnek sunmaktadır. Binada Schüco tarafından üretilen Schüco Top Sky 1 panelleri kullanılmıştır. Bu paneller, 30°'lik sabit bir açıyla binanın çatısına yerleştirilmiştir ve bu açı, binanın bulunduğu 51.52°K ve 8.70°D koordinatları için en uygun enerji üretimini sağlamayı hedeflemiştir. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi, PV panellerin bina cephesiyle bütünleşik olarak ve 30° eğimle yerleştirilmesi hem mimari estetiği korumakta hem de güneş ışığından maksimum düzeyde enerji üretimi sağlamaktadır. Panellerin tasarımında hem enerji verimliliği hem de estetik açıdan en iyi sonuca ulaşmak için modern mühendislik tekniklerinden yararlanılmıştır. Ayrıca çatı alanının optimum şekilde kullanılması ve çevredeki gölgeleme risklerinin analiz edilmesi sayesinde, sistemin yıl boyunca yüksek verimlilikte çalışması sağlanmıştır. Bu projede kullanılan teknolojik tasarım, panellerin bina ile uyum içinde işlevsel olmasını sağlarken çevresel faktörler de göz önünde bulundurularak ideal performans elde edilmiştir. Böylece, Wünnenberg'deki Metallbau RÜSO binası, yenilikçi enerji çözümlerinin ve bu çözümlerin modern yapılara entegrasyonunun başarılı bir örneği olarak öne çıkmaktadır (Haas vd. 2002).



Şekil 2.1. Wünnenberg'deki metallbau rüso binası fotovoltaiik panellerin kullanımı (haas vd., 2002)

Giebelstadt kasabesindeki belediye binası, fotovoltaiik panellerin yenilikçi ve mimari açıdan bütünleşik uygulamalarına güzel bir örnek oluşturmaktadır. Binada Schüco tarafından geliştirilen Schüco Top Sky 2 panelleri kullanılmış ve bu paneller, yapının $49,65^\circ\text{K}$ ve $9,95^\circ\text{D}$ koordinatlarında yer almasına uygun şekilde özel olarak optimize edilmiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, paneller pencere üstü yatay saçak olarak yerleştirilmiş ve eğimi 10° ile 45° arasında ayarlanabilir şekilde tasarlanmıştır. Bu esnek eğim açısı, yerel güneş ışınımı koşullarına göre panellerin maksimum enerji üretimini sağlamasına olanak tanırken, aynı zamanda binanın mimari estetiğini de korumaktadır. Schüco Top Sky 2 panellerinin gelişmiş enerji dönüşüm kapasitesi sayesinde hem enerji verimliliği artırılmış hem de binanın görsel bütünlüğü ve estetik değeri korunmuştur. Tasarım sürecinde, mevcut yapısal ve estetik koşullara uygun olarak entegre edilen bu fotovoltaiik sistem, Giebelstadt belediye binasını örnek bir sürdürülebilir yapı haline getirmiştir (Haas vd. 2002).



Şekil 2.2. Giebelstadt belediye binası fotovoltaiik panellerin uygulaması (haas vd., 2002)

Kaplama sistemleri, opak, tamamen veya kısmen camla kaplı, havalandırmasız ve sürekli dış cephe sistemlerinden oluşan, bir alt taşıyıcı yapı tarafından desteklenen panel sistemleridir. Bu sistemler, bir dış bina kabuğu görevi görmekte olup, kendi ağırlığı dışında herhangi bir taşıyıcı yük üstlenmemektedir. Bir kaplama duvarı, dış ve iç ortamları ayırarak hava ve su sızıntısını önlemek amacıyla tasarlanmakta olup, genellikle cam dolgulu ekstrüde alüminyum çerçeveler (bazı durumlarda çelik, ahşap vb. malzemeler) kullanılarak üretilmektedir (A. Passera a 2016).

Hollanda'nın Boxtel şehrinde yer alan De Zonnegolven projesi, fotovoltaik panellerin konut projelerine entegrasyonuna dair dikkat çekici bir örnek sunmaktadır. Projede, 36 adet konutun tasarımında eğimli fotovoltaik paneller kullanılmış ve bu paneller, $51,59^\circ\text{K}$ ve 5.34°D koordinatlarındaki yerleşime özel olarak uyarlanmıştır. Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi, fotovoltaik gölgelik elemanlarının kırmızı tuğla cephelye uyumlu şekilde düzenlenmesi sayesinde, yapının mimarisine hem estetik hem de işlevsel bir katkı sağlanmıştır. Ayrıca bu düzenleme, gün ışığının bina içine kontrollü olarak girmesine ve farklı ışıklandırma efektlerinin oluşmasına imkân tanımaktadır. Fotovoltaik paneller, yalnızca elektrik üretimiyle kalmayıp, gölgeleme işleviyle de konutların enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artıran bir rol üstlenmiştir. Gölgeliklerin optimum yerleşimi ile güneş ışığından en verimli şekilde yararlanılması amaçlanmış ve böylece hem enerji üretimi hem de kullanıcı konforu ön planda tutulmuştur. De Zonnegolven projesi, bu yaklaşımla enerji verimliliği ve sürdürülebilir mimari çözümlerinin bütünlük olarak uygulanmasına başarılı bir örnek teşkil etmektedir (Prasad ve Snow 2014).



Şekil 2.3. De zonnegolven'deki fotovoltaik panellerin kullanımı (prasad ve snow, 2014)

Erlangen'de 1998 yılında inşa edilen Klinik Moleküler Biyoloji Araştırma Merkezi, enerji verimliliği ve sürdürülebilir bina tasarımı açısından örnek bir yapıdır. Araştırma merkezinin cephesinde, eğimli ve hareketli fotovoltaik panellerden oluşan yenilikçi bir sistem kullanılmıştır. Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere, bu paneller hem enerji üretimi hem de gölgeleme işlevi görerek iç mekanların aydınlatma ve termal konforunu optimize etmektedir. Panellerin hareketli ve ayarlanabilir yapısı, farklı iklim koşulları ve aydınlatma ihtiyaçlarına uyum sağlayacak şekilde 0° ile 90° arasında konumlandırılabilir. Gündüz saatlerinde güneşin konumuna göre tek eksenli hareket eden bu paneller, enerji üretimi ve gölgeleme performansını artırırken; gece ve fırtına gibi sert hava koşullarında

yatay konuma alınarak rüzgâr yükünü azaltmakta, kar yağışı sırasında ise dikey konuma getirilerek kar birikimini en aza indirmektedir. Bu sistem yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmamış, bina kullanıcılarının konforunu da iyileştirmiştir. Fotovoltaik panellerin bu şekilde dinamik olarak kullanılması, enerji tasarrufu ve iç mekân sıcaklıklarının düzenlenmesi açısından önemli katkılar sunmuştur. Ayrıca cephe tasarımı, laboratuvar odalarının aydınlatma ve gölgeleme ihtiyaçlarını karşılayarak binanın işlevselliğini artırmıştır. Klinik Moleküler Biyoloji Araştırma Merkezi, biyomimetik prensiplere dayalı ve çevresel değişimlere yanıt verebilen bu dinamik cephe sistemiyle sürdürülebilir mimari için yenilikçi bir örnek oluşturmaktadır (chen vd., 2022; prasad ve snow, 2014).



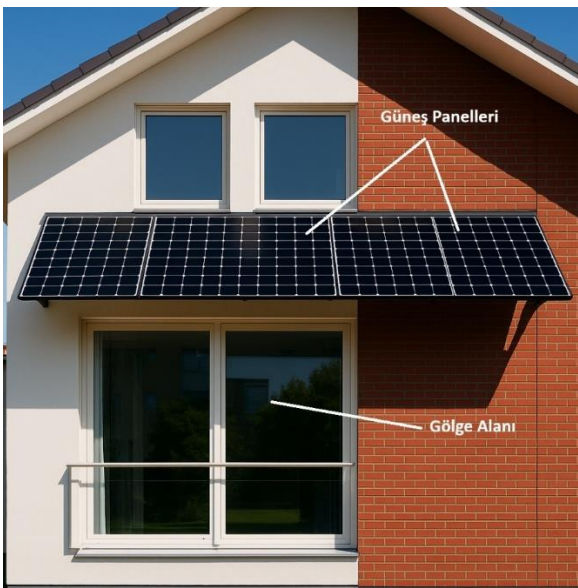
Şekil 2.4. Klinik moleküler biyoloji araştırma merkezi fotovoltaik panelleri (chen vd., 2022; prasad ve snow, 2014)

İsviçre'nin Lozan kentinde bulunan AMAG Merkezi, fotovoltaik panellerin bina tasarımına entegre edildiği dikkat çekici projelerden biridir. Merkezde, eğimli ve çoklu fotovoltaik panellerin kullanımıyla hem enerji verimliliği sağlanmış hem de mimari estetik korunmuştur. Yapının konumu $46,52^{\circ}\text{K}$ ve $6,63^{\circ}\text{D}$ koordinatlarında yer almakta olup, yerel iklim koşullarına uygun tasarım stratejileri benimsenmiştir. Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere, paneller binanın çatısına ve cephesine eğimli şekilde yerleştirilmiş; böylece hem enerji üretimi hem de gölgeleme işlevleri aynı anda sağlanmıştır. Fotovoltaik sistem, güneş ışığından maksimum verimi almak üzere optimize edilmiş bir düzene sahip olup, bu düzenleme yalnızca enerji üretimini artırmakla kalmamış, aynı zamanda iç mekanlarda doğal aydınlatmayı desteklemiş ve ısıtma-soğutma maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamıştır. Tasarımda, panellerin çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek amacıyla yenilikçi mühendislik çözümleri uygulanmıştır. Tüm bu özellikleriyle AMAG Merkezi, enerji verimliliği ve yenilikçi mimari çözümler açısından örnek bir yapı olarak öne çıkmaktadır (Prasad ve Snow 2014).



Şekil 2.5. AMAG merkezi'nde fotovoltaik panellerin kullanımı (prasad ve snow, 2014)

Dordrecht'te 22 Ev projesi, Hollanda'nın Dordrecht şehrinde, ılıman deniz iklimi etkisi altında bulunan bir bölgede, 1996 yılında GSS Gebaüde tarafından tasarlanmıştır (Taşaltın vd., 2022a). Ana yola yakın konumlanan bu evlerde, yol cephesinde yalnızca giriş kapısına yer verilerek gürültünün azaltılması hedeflenmiş, güney ve batı cephelerinde ise büyük pencereler ve cam kapılar gibi geniş açıklıklar tercih edilmiştir. Aşırı yaz ısını önlemek için hem sabit hem de hareketli gölgeleme elemanlarının kullanıldığı projede, geri dönüştürülebilir malzemelerden yararlanılmış ve çevre ile enerji bilinci yüksek bir tasarım anlayışı benimsenmiştir. Dordrecht Belediyesi, projenin çevreye uyumunu sağlamak amacıyla bir kontrol listesiyle süreci desteklemiştir. Şekil 2.6'da da görüldüğü üzere, evlerin genel görünümünde gölgeleme elemanlarının bir kısmı fotovoltaik panellerle donatılmış ve bu uygulama, farklı cephe tasarımlarına olanak sağlamıştır. Yaşama mekânı cephesinde ızgara biçiminde düzenlenen 1.030 W gücünde fotovoltaik modüller, enerji üretiminin yanı sıra işlevsel gölgeleme görevi üstlenmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım, gelecekteki fotovoltaik panel entegreli konut projelerine örnek teşkil etmiştir. Toplamda yılda 22.600 kWh enerji üreten sistem, çevre dostu ve enerji verimli yapıların Hollanda'da yaygınlaşması açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir (Taşaltın vd., 2022).



Şekil 2.6. Hollanda'nın dordrecht şehrinde evlerin genel görünüşü (taşaltın vd., 2022b)

Sankt Augustin şehrinde bulunan Bonn-Rhein-Sieg Uygulamalı Bilimler Üniversitesi kampüsü, fotovoltaik teknolojilerin bina tasarımına entegrasyonu açısından dikkat çekici bir örnek teşkil etmektedir. 1999 yılında tamamlanan projede, $50,77^\circ\text{K}$ ve $7,18^\circ\text{D}$ koordinatlarında yer alan yapı üzerinde eğimli tekli panel sistemleri kullanılmıştır. Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere, bu sistemlerde panel açısı ayarlanabilir şekilde tasarlanmış olup, güneş koruma sistemleri hem çevresel sıcaklık hem de gün ışığı yoğunluğuna bağlı olarak otomatik biçimde düzenlenmektedir. Gerekğinde ise manuel kontrol olanağı da bulunmaktadır. Giriş holünün çatısına entegre edilen güneş panelleri, enerji üretiminin yanı sıra güneşten korunma işlevi de üstlenmektedir. Ayrıca, güney cephesinde yer alan eğimli parapet kaplaması fotovoltaik elemanlarla kaplanmış; ancak bu bölümdeki PV panelleri gölgeleme amacı taşımamaktadır. Böylece proje, fotovoltaik uygulamaların işlevsel çeşitliliğini ve mimari uyumunu başarılı bir şekilde ortaya koymaktadır (fur Sonnenenergie 2009).



Şekil 2.7. Cephede Pv uygulaması (fur Sonnenenergie 2009)

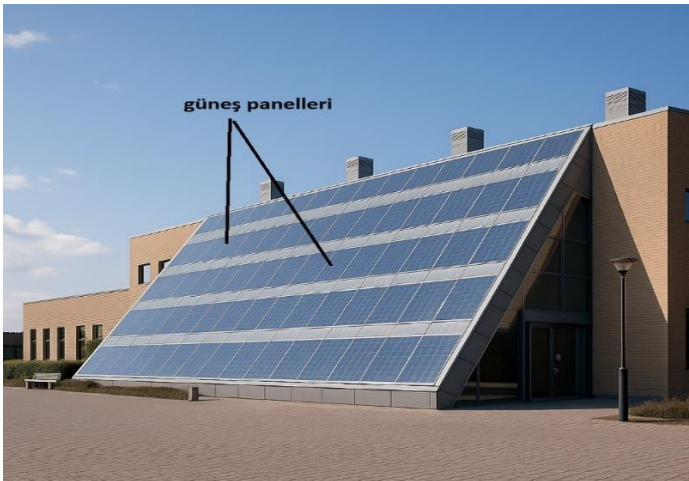
Hollanda'nın Petten kentinde yer alan Enerji Araştırma Vakfı ECN'ye (Energy Research Centre of the Netherlands) ait Laboratuvar Binası 31, fotovoltaik koruma sistemlerinin bina performansını artırmaya yönelik kullanımını gösteren önemli bir örnektir. 2001 yılında tamamlanan bu projede, $52,76^\circ\text{K}$ ve $4,67^\circ\text{D}$ koordinatlarında konumlanan bina üzerine, yatay düzleme göre 37° eğimle yerleştirilen çoklu panel sistemleri entegre edilmiştir. Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi, bina aşırı yaz sıcaklıklarına karşı koruma sağlamak amacıyla toplam 300 m^2 ’lik bir PVSD (Photovoltaic Solar Shading Device) sistemi ile donatılmıştır. Yaklaşık 36 kWp güce sahip bu sistemin, yılda yaklaşık 56.440 kWh elektrik üretmesi öngörülmüştür. Her kat seviyesinde sabit konumlandırılmış dört adet lamel bulunmakta olup, her bir lamelin genişliği 840 mm ve uzunluğu 3000 mm olarak tasarlanmıştır (Reijenga ve Architecten 2001).



Şekil 2.8. Cephede Pv uygulaması (Reijenga ve Architecten 2001)

Almanya'nın Hameln şehrinde yer alan Turist Bilgilendirme Merkezi, fotovoltaik teknolojilerin sabit gölgeleme elemanları olarak kullanımına dair dikkate değer bir uygulama örneğidir. 2000 yılında tamamlanan bu projede, 52,12°K ve 9.37°D koordinatlarında konumlanan üç katlı binanın güneye bakan cephesine, sabit açılı 54 adet yarı saydam cam-cam PV modülü entegre edilmiştir. Bu paneller, toplamda 61,66 m²'lik bir alanı kaplamakta olup, sistemin toplam kurulu gücü 5,076 kWp olarak tasarlanmıştır. Yarı saydam yapıları sayesinde hem gün ışığının iç mekâna girişine izin verilmiş hem de güneş ışınlarının doğrudan etkisiyle oluşabilecek aşırı ısınma etkili bir şekilde azaltılmıştır (Jahanara 2013).

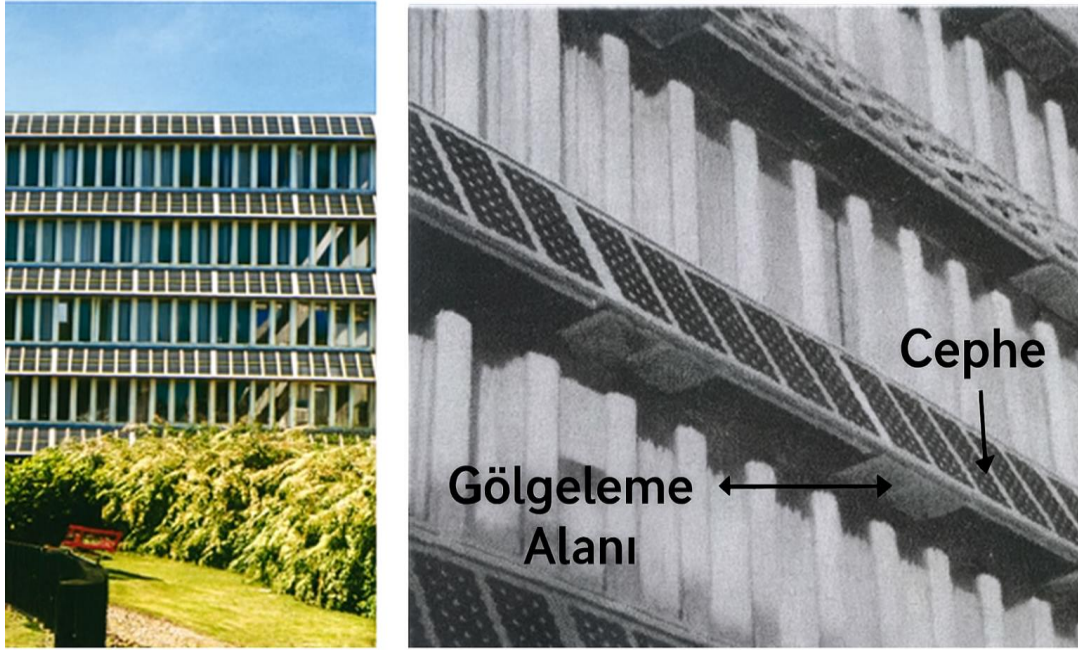
İngiltere'nin Sunderland şehrinde yer alan Doxford Güneş Ofisi ise, Avrupa'daki en geniş solar cepheye sahip ilk kuramsal ofis binası olarak öne çıkmaktadır. Şekil 2.9'da da görüldüğü üzere, 66 metre uzunluğunda ve V şeklinde tasarlanan bina, güneye yönlendirilmiş olup merkez çekirdeği V'nin zirvesinde ve ana girişi güney cephesinde yer almaktadır. Binanın güney cephesinde, toplam 73 kW kapasiteye sahip tek kristalli fotovoltaik modüller kullanılmış; 100x100 mm boyutlarındaki hücrelerden oluşan 352 panel cepheye entegre edilmiştir. Modüller genellikle bir ya da iki panel sıralı olarak düzenlenmiş, ana girişte ise üçgen forma uygun özel boyutlarda paneller kullanılmıştır. Enerji dönüşümü için iki adet 35 kW kapasiteli dönüştürücüye sahip sistem, Sunderland'in düşük ışık koşullarına uygun şekilde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yıllık yaklaşık 56.500 kWh enerji üreten bu fotovoltaik sistem, binanın çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli rol oynamaktadır (Thomas 2003).



Şekil 2.9. Cephede fotovoltaik kullanımı (thomas, 2003)

Northumberland Binası, İngiltere'de 1991 yılında IT Power Ltd. tarafından tasarlanmış ve fotovoltaik sistemle kaplanmış ilk bina olma özelliğine sahiptir. Beş katlı bu yapı, 1960'ların tipik tasarım tarzına göre inşa edilmiştir. Projede, daha önce yapılmış bir binada fotovoltaik cephenin mimari uygulama olanaklarını göstermek hedeflenmiştir. Binanın kuzey ve güney cephelerinde yağmur perdesi sistemi uygulanmıştır. Proje, yenilikçi tasarımıyla sürdürülebilir mimarlık alanında önemli bir adım olarak kabul edilmektedir (Probst ve Roecker 2011).

Fotovoltaik sistemler binanın güney cephesinde kullanılmıştır. Uygulamada, yüksek verimli kristal silikon fotovoltaik modüller tercih edilmiştir. Cepheye yerleştirilen fotovoltaik modüller, güneşin geliş açısı dikkate alınarak cepheye 25° eğimli şekilde monte edilmiştir. Her panel, 85 W kapasiteli modüllerin birleşiminden oluşmakta olup, 3 m x 1,4 m boyutlarındadır. Elektrik bağlantısı, 31 telin paralel bağlanmasıyla sağlanırken, doğrusal akımı alternatif akıma dönüştüren bir dönüştürücü sistemi kullanılmıştır. Şekil 2.10'da da görüldüğü üzere, cephede yer alan fotovoltaik sistemler binanın mimari bütünlüğünü koruyacak biçimde entegre edilmiş ve modern bir görünüm elde edilmiştir. Fotovoltaik sistemler sayesinde binadan yıllık yaklaşık 39.000 kWh enerji elde edilmektedir. Bu enerji üretimi, projeyi yalnızca yenilenebilir enerji kullanımı açısından değil, aynı zamanda mevcut binalara fotovoltaik entegrasyonu konusunda da öncü bir örnek hâline getirmiştir (Ye, Heidemann, ve Estrin 2002).



Şekil 2. 10. Northumberland binası binanın genel görünüşü

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, Antalya Kepez ilçesinde çok katlı bir konut binasında uygulanan sabit fotovoltaik (PV) gölgeleme sisteminin enerji performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla izlenen yöntem ve kullanılan materyaller ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, bölgenin yıllık ve aylık güneş ışıınımı değerleri PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) veri tabanından elde edilmiştir. PV panellerin elektrik üretim potansiyelinin ve gölgeleme etkisinin doğru analiz edilebilmesi için, ayı temsil eden gün alınarak, farklı yönlerde (güney, doğu, batı) bakan cephelerdeki radyasyon değerleri dikkate alınmıştır.

Projede, yüksek verimli (%20) monokristal PV paneller pencere üstlerine sabit olarak entegre edilmiştir. Her pencereye iki panel gelecek şekilde toplam 48 panel kullanılmıştır. Panel boyutları ve yerleşimi, Autodesk Ecotect Analysis ve MATLAB ortamında yapılan simülasyonlar ve algoritmik analizlerle optimize edilmiştir. Panelin eğim açısı, pencereye düşen gölge uzunluğu ve gölgelemenin iç mekâna etkisi, geliştirilen MATLAB kodları ile sayısal olarak değerlendirilmiştir. Böylece, panelin farklı aylarda ve cephelerde sağladığı optimum gölgeleme ve enerji üretimi miktarları belirlenmiştir.

Elektrik üretimi analizinde, PVGIS'ten alınan aylık ve yıllık toplam radyasyon verileri, panel yüzey alanı ve sistem verimliliği kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Her panelin ve sistemin toplam üretim kapasitesi, cephe bazında ve tüm bina ölçeğinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Çalışmanın bir diğer aşamasında, binanın farklı cephelerinde yer alan PV panellerin oluşturduğu gölgeleme etkisi ve iç mekâna geçen ışıınım miktarı, Autodesk Ecotect Analysis ile 3 boyutlu olarak simüle edilmiştir. Bu sayede, PV panellerinin bina enerji performansına katkısı hem elektrik üretimi hem de gölgeleme yoluyla sağlanan ısı kazancı/azalması yönünden bütüncül olarak incelenmiştir.

Tüm bu analizler, tablo ve grafiklerle desteklenerek, sistemin yıl boyunca sağladığı enerji kazançları ve iç mekân enerji tüketimindeki azalmalar somut olarak ortaya konmuştur.

3.1. Kepez Bölgesinde Güneş Işıınımı ve Fotovoltaik Enerji Potansiyeli

Kepez ilçesi, Antalya ilinin güneş ışıınımı ve toplam güneşlenme süresi açısından Türkiye'nin en avantajlı bölgelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Yüksek güneş potansiyeli, bölgede fotovoltaik sistemlerin kurulumu ve verimliliği açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Çizelge 3.1'de Antalya ili için 2005 yılına ait aylık bazda yatay düzlemde küresel güneş ışıınımı, direkt normal güneş ışıınımı ve optimum eğim açısında küresel güneş ışıınımı değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde, yıl boyunca güneş ışıınımı miktarlarının yaz aylarında maksimuma ulaştığı, kış aylarında ise minimum seviyelerde gerçekleştiği görülmektedir. Yatay düzlemde ölçülen küresel ışıınım değerleri, genellikle optimum açığa göre daha düşük olmakta, panel eğiminin optimize edilmesiyle elde edilen ışıınımda önemli bir artış gözlemlenmektedir. Özellikle Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında hem direkt normal hem de optimum açıdaki ışıınım değerleri oldukça yüksektir. Bu veriler, güneş paneli kurulumu ve enerji verimliliği açısından panel eğim açısının önemini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.1. Aylık yatay, direkt ve optimum açıda küresel güneş ışınlamı değerleri (geller, 2010)

Ay	Yatay düzlemde küresel ışınlamı (KWh/m ²)	Direkt normal ışınlamı (KWh/m ²)	Optimum açıda küresel ışınlamı (KWh/m ²)
Ocak	63,21	85,46	99,7
Şubat	91,46	115	130,1
Mart	137,28	142,61	165,23
Nisan	178,84	172,01	190,03
Mayıs	220,95	207,54	213,73
Haziran	240,38	245,16	218,88
Temmuz	242,04	252,58	225,27
Ağustos	227,44	257,17	232,83
Eylül	179,08	217,84	211,18
Ekim	134,97	183,59	187,44
Kasım	86,61	124,61	134,69
Aralık	74,24	130,32	130,71

Bu veriler, Kepez bölgesinde PV sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için önemli bilgiler sunmaktadır. Mevsimsel ışınlamı değişimleri, sıcaklık etkileri ve arazi özellikleri dikkate alınarak, enerji üretim verimliliğini artıracak stratejiler geliştirilmelidir.

Şekil 3.1'de, Antalya Kepez bölgesi için yıl boyunca saatlik ve aylık bazda ölçülen ortalama doğrudan normal ışınlamı (DNI) değerleri ısı haritası biçiminde sunulmuştur. Yatay ekseninde aylar (Ocak–Aralık), dikey ekseninde ise saat dilimleri (0–24) yer almakta olup, renk yoğunluğu artan ışınlamı değerlerini temsil etmektedir. Haziran ve Temmuz aylarında saat 11:00 ile 15:00 arasındaki zaman dilimi en yüksek ışınlamı seviyelerini göstermekte, bu da güneş enerjisi sistemleri için yılın en verimli üretim aralığını işaret etmektedir. Görsel, PV panel optimizasyonu ve enerji üretim planlaması açısından kritik zaman dilimlerinin analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Ortalama Saatlik Profiller

Doğrudan Normal Işınlamı [Wh/m²]



Şekil 3.1. Ortalama saatlik profiller doğrudan normal ışınlamı [Wh/m²] (global solar atlas, 2024)

Kepez bölgesindeki elverişli güneş ışınımı koşulları, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş için güçlü bir temel oluşturmaktadır. Global Solar Atlas'ın 2024 yılı raporunda sunulan detaylı veriler, yerel yönetimlerin ve enerji sektörü paydaşlarının bölgenin güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanmasına yönelik stratejiler geliştirmeleri için kritik öneme sahiptir. Bu veriler, Kepez'deki enerji altyapısının tasarımında ve enerji verimliliği iyileştirmelerinde temel bir referans noktası olarak hizmet edebilir.

Kepez bölgesindeki güneş ışınımı profilleri, fotovoltaik (PV) sistemlerin enerji verimliliğini artırmak ve güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanmak için önemli bilgiler sunmaktadır. Bu veriler, enerji üretimi için en uygun dönemlerin ve saatlerin belirlenmesine yardımcı olarak, PV sistemlerinin performansını optimize etmeyi mümkün kılar. Özellikle, mevsimsel ve günlük ışınım değişimlerinin analiz edilmesi, enerji üretim stratejilerinin etkin bir şekilde planlanmasına katkı sağlar. Bu nedenle, Kepez bölgesindeki güneş ışınımı verileri, PV sistemlerinin tasarımı ve işletimi için kritik bir kaynak teşkil etmektedir.

3.2. Güneş Paneli Yüzeyine Işınım Etkinliği İçin Açı Analizi

Güneş panellerine ulaşan ışınların panel yüzeyine dik açıyla yaklaşması, enerji üretim verimliliğini artıran önemli bir faktördür. Bu doğrultuda, güneş takip sistemleri ve bu çalışmada geliştirilen uygulamada, panellerin güneş ışınlarından maksimum fayda sağlayacağı açılar sürekli olarak ayarlayacak şekilde tasarlanmıştır. Amaç, güneş ışınlarının panel yüzeyine mümkün olduğunca dik veya dik açığa yakın bir şekilde düşmesini sağlamaktır.

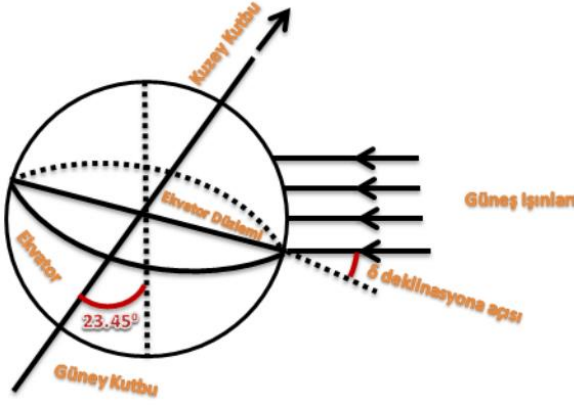
Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesi, güneş etrafındaki hareketi, eksen eğikliğinin yıl boyunca değişimi, gözlemcinin dünya üzerindeki konum farklılıkları ile tarih ve saat gibi faktörler nedeniyle güneş ışınlarının gözlemciye göre geliş açısı sürekli olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sürekli değişen açıyı hesaplayabilmek için bazı temel kavramların doğru bir şekilde tanımlanması gereklidir. Bu kavramlar, aşağıda yer alan alt başlıklarda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.1. Deklinasyon açısı (δ)

Deklinasyon açısı, Dünya'nın eksen eğikliğinden dolayı güneş ışınlarının Dünya'ya geliş açısındaki yıllık değişimi ifade eder. Bu açı, Dünya'nın ekvator düzlemi ile güneş ışınlarının yeryüzüne geliş doğrultusu arasındaki açıdır. Deklinasyon açısı, yıl boyunca $+23,45^\circ$ ile $-23,45^\circ$ arasında değişmektedir.

Ekinoks dönemlerinde (20-21 Mart ve 22-23 Eylül) deklinasyon açısı sıfırdır. Kış gündönümünde (21-22 Aralık) en düşük değer olan $-23,45^\circ$ 'ye, yaz gündönümünde (20-22 Haziran) ise en yüksek değer olan $+23,45^\circ$ 'ye ulaşır. Deklinasyon açısı, kuzey yarımküre için pozitif (+), güney yarımküre için ise negatif (-) değerler alır.

Bu açı, 21 Aralık kış gündönümünde $-23,45^\circ$ ile 21 Haziran yaz gündönümünde $+23,45^\circ$ arasında değişirken, ilkbahar (21 Mart) ve sonbahar (21 Eylül) ekinokslarında sıfır değerine sahiptir. Deklinasyon açısının ekinokslara göre değişimi, Şekil 3.2'de görsel olarak sunulmuştur (Bakirci 2012).



Şekil 3.2. Deklinasyon açısının ekinokslara göre değişimi (Bakirci 2012)

Deklinasyon açısı, aşağıda verilen Cooper denklemi (Darhmaoui ve Lahjouji 2013) kullanılarak Eşitlik 3.1 ile Eşitlik 3,3 arasında hesaplanabilir:

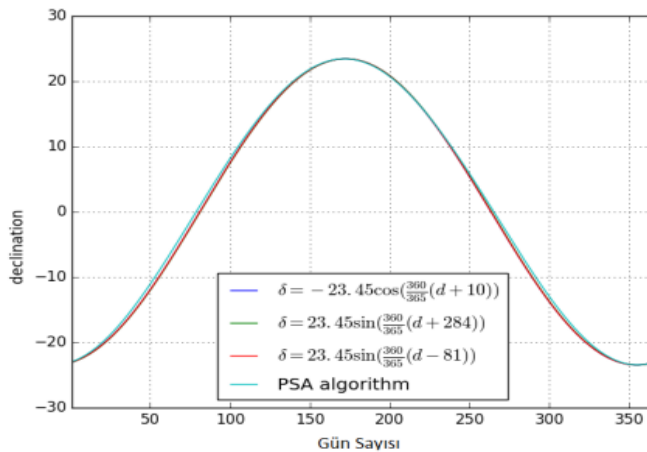
$$\delta = -23,45 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{n + 10}{365}\right) \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde n, 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır. Cooper denkleminin yanı sıra deklinasyon açısını bulmak için alternatif formüller de bulunmaktadır. Deklinasyon açısını bulmak için farklı ekinokslara odaklanmaktadır. Bunlar:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3.2)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{n - 81}{365}\right) \quad (3.3)$$

Deklinasyon açısını hesaplamak için denklem 3.1 ile denklem 3.3 dışında, Position Solar Algorithm (PSA) algoritması da yaygın olarak kullanılmaktadır (Patkó, Szeder, ve Patkó 2013).



Şekil 3.3. Deklinasyon açısı formüllerinin karşılaştırılması (Bakirci 2012)

Şekil 3.3'te görselde bu algoritma, güneşin konumunu daha hassas bir şekilde belirlemek için geliştirilmiş ve doğruluğu yüksek bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Eşitlik 3.1 ile Eşitlik 3.3 doğruluk karşılaştırılması gösterilmiştir.

3.2.2. Saat açısı (ω)

Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönüşü, günlerin oluşmasını sağlamaktadır ve bu dönüş nedeniyle saatlere göre değişen açı, saat açısı olarak adlandırılır. Saat açısı, bulunduğumuz konumun boylam açısı ile güneş ışınlarının geliş açısı arasındaki açıdır. Güneş öğlesinden önce saat açısı negatif (-), öğleden sonra ise pozitif (+) değer alır. Saat açısı, zamanı açısal bir büyüklük olarak ifade eder ve 15° 'lik bir boylam farkı, 1 saate denk gelmektedir.

Güneşin saat açısı, yerel ortalama zaman (Local Mean Time- LMT) temel alınarak hesaplanır. Yerel ortalama zaman 12:00 olduğunda güneş tam tepededir ve saat açısı 0° olur. Saat açısı genellikle " ω " sembolü ile ifade edilir. Güneş saat açısının hesaplanması için temel formül Denklem 3.4'te verilmiştir:

$$\omega = 15 \cdot (t_{LMT} - 12) \quad (3.4)$$

Burada:

- ω : Saat açısı ($^\circ$),
- t_{LMT} : Yerel ortalama zaman.

Saat açısı, yerel güneş saatinin açısal değeri olarak da ifade edilebilir. Dünya, saatte 15° döndüğü için gün boyunca saat açısı her saat başına 15° artmaktadır. Öğle vakti saat açısı 0° 'dir. Bu doğrultuda, saat açısının farklı bir hesaplama formülü Denklem 3.5'te verilmiştir:

$$\omega = 15 \cdot \left(LH + \frac{LM}{60} - 12 \right) \quad (3.5)$$

- ω : Saat açısı ($^\circ$),
- LH : Yerel saat (saat cinsinden),
- LM : Yerel dakika.

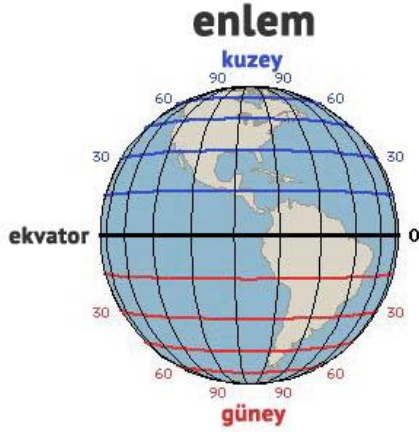
Bu denklemler, güneşin konumuna bağlı olarak saat açısını hesaplamak için temel formüller olarak kullanılmaktadır. Saat açısı, güneş enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu gibi uygulamalarda kritik bir parametredir.

3.2.3. Enlem açısı (ϕ)

Enlem açısı, bulunduğumuz noktanın Dünya üzerindeki enlem değerini derece cinsinden ifade eder. Bu açı, ekvator düzlemi ile yeryüzü koordinat sisteminde gözlemcinin bulunduğu noktayı birleştiren doğrultunun oluşturduğu açıdır. Enlem açısı, kuzey yarımkürede $+90^\circ$ 'ye kadar pozitif, güney yarımkürede ise -90° 'ye kadar negatif değerler alabilir.

Enlem açısı kuzey yarımkürede 0° ile $+90^\circ$, güney yarımkürede ise 0° ile -90° arasında değer alır. Örneğin, Antalya Kepez için bu değer yaklaşık $+36,91^\circ$ 'dir. Bu parametre genellikle " ϕ " sembolü ile gösterilir ve güneş konumlandırma hesaplamalarında temel değişkenlerden biridir.

Enlem açısı, güneş ışınlarının geliş açısı, gün uzunluğu, gölge boyu ve panel eğim açısı gibi birçok güneş enerjisi parametresinin hesaplanmasında kritik rol oynar. Şekil 3.4, enlem açısının coğrafi olarak nasıl tanımlandığını ve kuzey–güney yönlü açısal dağılımını görsel olarak göstermektedir. Şekil 3.4'te verilen. Bu şekil, enlem açısının ve diğer temel güneş açılarıyla olan ilişkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

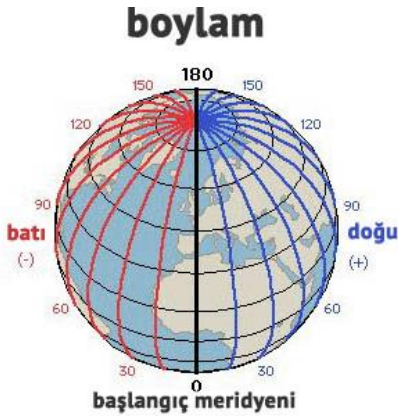


Şekil 3.4. Enlem açısı (ϕ) (De Carli, De Giuli, ve Zecchin 2008b)

3.2.4. Boylam açısı (λ)

Boylam açısı, yeryüzünde herhangi bir noktanın Greenwich (Başlangıç Meridyeni) ile olan uzaklığının açısal değeridir. Bu açı, Dünya üzerindeki konumların doğu veya batı yönündeki meridyenlerle olan ilişkisini tanımlamak için kullanılır.

Şekil 3.5'te gösterilen Boylam açısı, genellikle güneş saat açısının hesaplanmasında önemli bir parametre olarak yer alır ve modern sistemlerde GPS cihazları tarafından hassas bir şekilde ölçülmektedir. Bu hesaplama, özellikle güneş enerji sistemlerinde verimliliği artırmak için kullanılır.



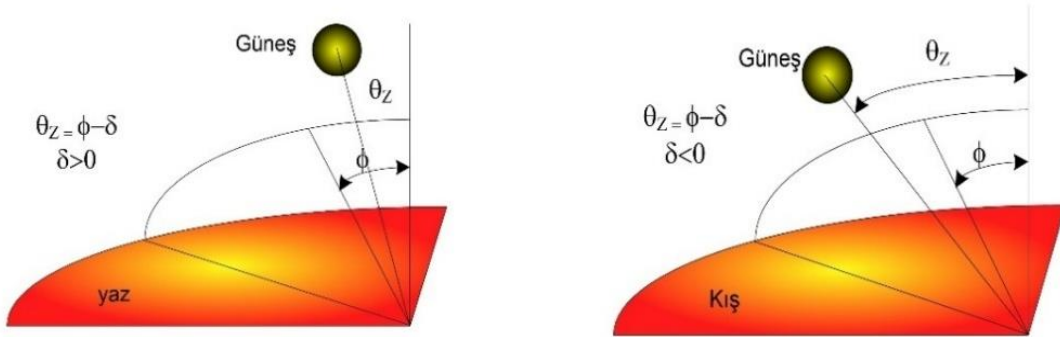
Şekil 3.5. Boylam açısı (De Carli vd. 2008b)

3.3. PV Panel Tasarımı İçin Hesaplanan Güneş Açıları

3.3.1. Zenit açısı (θ_z)

Zenit açısı, dünya üzerinde bir gözlemcinin bulunduğu düzlemin normali ile güneş ışınları arasındaki açıdır. Zenit açısı, aynı zamanda güneş yükseklik açısının tümler açısı olarak tanımlanır. Bu, zenit açısı ile güneş yükseklik açısının toplamının 90° 'ye eşit olduğu anlamına gelir.

Zenit açısı, güneş panellerinin verimleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Kurumu 2019). Bu nedenle, zenit açısının doğru bir şekilde hesaplanması enerji verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır. Zenit açısı genellikle " θ_z " sembolü ile gösterilir. Zenith açısı ile güneş yükseklik açısının karşılaştırılması Şekil 3.6.'da denklemi ise 3.6'da verilmiştir (Duffie John ve Beckman William 1991).



Şekil 3.6. Zenith ile yükseklik açısının karşılaştırılması (Duffie John ve Beckman William 1991)

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (3.6)$$

Burada α , güneş yükseklik açısını ifade eder. Bu denklem, zenit açısının hesaplanmasında temel bir bağıntıdır.

3.3.2. Güneş yükseklik açısı (α)

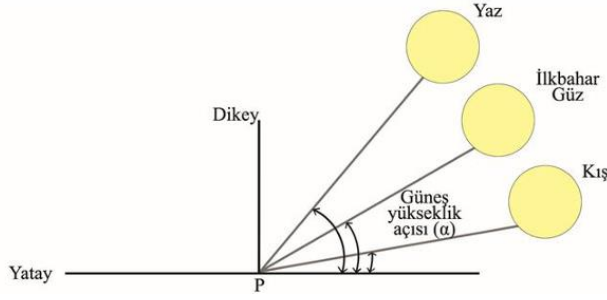
Yükseklik açısı, güneş ışınlarının gözlemcinin yeryüzü üzerinde bulunduğu düzlemle yaptığı açıyı ifade eder. Bu açı, zenit açısı ile tümler açıları oluşturur, yani yükseklik açısı ve zenit açısının toplamı 90° 'dir.

Yükseklik açısı genellikle " α " sembolü ile gösterilir. Bu açı, güneşin gökyüzündeki konumunu belirlemek için önemli bir parametredir. Yükseklik açısı denklem 3.7 ile hesaplanmaktadır (Anonim, 2019'e).

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega)] \quad (3.7)$$

Yükseklik açısının görsel bir açıklaması, Şekil 3.7'de sunulmuştur.

Denklem 3.7'den yola çıkılarak yükseklik açısı şekil 3.7'de gösterilmiştir. Eşitlikte görüldüğü gibi yükseklik açısı temel güneş açılarına bağlanmaktadır.



Şekil 3.7. Güneş yükseklik açısı ve mevsimlere göre değişimi (Öztürk 2008)

3.3.3. Azimut açısı (γ)

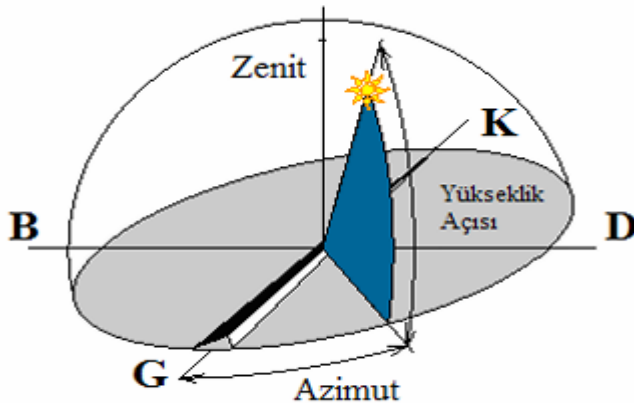
Azimut açısı, güneş ışınlarının gözlemcinin bulunduğu düzleme izdüşümü ile tam güney doğrultusunun yaptığı açıdır. Sabit eğimli güneş panellerinin verimliliği açısından önemli bir parametredir. Panellerin 0° 'den farklı bir güney azimut açısı ile konumlandırılması durumunda, enerji verimliliğinde kayıplar meydana gelebilir (Aktaş ve Çeken t.y.).

Azimut açısı genellikle “ γ ” sembolü ile ifade edilir. Ayrıca azimuth açısı, enleme (ϕ), deklinasyon açısına (δ), yükseklik açısına (α) ve saat açısına (ω) bağlıdır. Şekil 3.8'de azimuth açısının kuzeydoğu yönünde örneklenmesi verilmiştir (Anonim, 2019c).

Azimuth açısının denklemi Denklem 3.8'de verilmiştir (Anonim, 2019c).

$$\gamma = \frac{\cos^{-1}[\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\omega)]}{\cos(\alpha)} \quad (3.8)$$

Şekil 3.8'de gösterilen Azimut açısının görsel bir temsili sunulmuştur. Bu şekil, azimut açısının güneş panellerinin verimliliği üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için kullanılır.

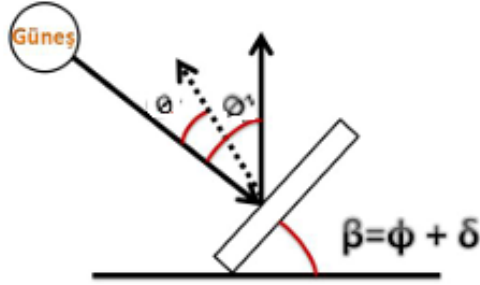


Şekil 3.8. Azimuth açısının kuzeydoğu yönünde örneklenmesi (Kurumu 2019)

3.3.4. Panel eğim açısı (β)

Panel eğim açısı, Dünya üzerindeki yatay düzlem ile güneş paneli yüzeyi arasında kalan açıyı ifade eder. Bu açı, güneş panellerinin enerji verimliliğini artırmak için belirlenmesi gereken önemli bir parametredir. Panel eğim açısı genellikle “ β ” sembolü ile gösterilir.

Panel eğim açısının görsel bir açıklaması Şekil 3.9'da sunulmuştur. Bu şekil, panel eğim açısının yatay düzlemle olan ilişkisini ve güneş ışınlarının panel yüzeyine düşme açısını daha iyi anlamaya yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.9. Panel eğim açısı β

Şekil 3.9'da gösterilen Geliş açısı (θ), yüzeye doğrudan gelen ışın ile o yüzeyin normali arasındaki açıdır. Geliş açısı güneş ışığına dik ise ($\theta = 0^\circ$). Öte yandan bu açı güneş ışınlarına paralel ise ($\theta = 90^\circ$). Geliş ve eğim açıları gösterilmiştir.

3.4. Güneş Zamanı

Çoğu insan, güneş tam tepedeyken öğle vakti olacak şekilde yerel güneş zamanını kullanmış ve her kasabanın kendine özgü bir zaman dilimi bulunmaktaydı. 19. yüzyıla kadar bu sistem, taşımacılığın yavaş olması nedeniyle herhangi bir sorun yaratmıyordu; kilometrelerce uzaklıktaki bir kasabanın zamanının birkaç dakika farklı olması önemli değildi.

Ancak, 19. yüzyılda demiryollarının ortaya çıkmasıyla birlikte daha kesin bir zaman standardına ihtiyaç duyulmuştur. Bu gereklilik, her bölgeyi kapsayan zaman dilimlerinin oluşturulmasına yol açmıştır (Zerubavel, 1982). Günümüzde kullanılan zaman dilimleri, politik sınırlar, enerji tasarrufu gibi çeşitli nedenlerden dolayı yerel güneş zamanıyla uyumlu olmayabilir ve bazı farklılıklar gösterebilir.

3.4.1. Yerel standart zaman meridyeni

Yerel standart zaman meridyeni (LSTM), belirli bir saat dilimi için kullanılan referans meridyenidir. Bu meridyen, bir bölgenin zaman standardını belirlemek için kullanılır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$LSTM = 15 \cdot \Delta T_{GMT} \quad (3.9)$$

Burada:

- LSTM: Yerel standart zaman meridyeni ($^\circ$),
- ΔT_{GMT} : Yerel zaman diliminin saat olarak başlangıç (Greenwich) meridyenine olan uzaklığı.

Örneğin, GMT+3 zaman dilimine sahip bir bölgenin yerel standart zaman meridyeni şu şekilde hesaplanır:

$$LSTM = 15 \cdot 3 = 45^\circ$$

Bu referans meridyen, güneş zamanı ile standart zaman arasında uyum sağlamak ve zaman dilimi hesaplamalarını kolaylaştırmak için kullanılır.

3.4.2. Zaman eşitlik denklemi

Zaman eşitlik denklemi (EoT), Dünya'nın yörünge eğimini ve dönme hızındaki farklılıkları hesaba katarak güneş zamanını dakika cinsinden düzeltir. Bu düzeltme, güneş zamanı ile standart zaman arasındaki farkları açıklamak için kullanılır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Anonim, 2019g):

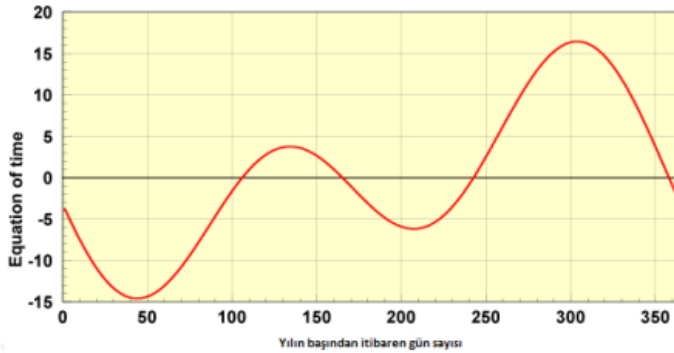
$$EoT = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \quad (3.10)$$

Burada:

- $B = \frac{360}{365} \cdot (n - 81)$: Zaman eşitlik denklemi değişkenidir,
- n : Yılın kaçınıcı günü olduğunu ifade eder.

EoT, Dünya'nın eliptik yörüngesinden ve eksen eğikliğinden kaynaklanan farkları düzeltmek amacıyla kullanılır.

Şekil 3.10'da zaman eşitlik denkleminin yıl boyunca günlere göre nasıl değiştiği görselleştirilmiştir. Bu denklem, özellikle güneş zamanı ile ilgili hesaplamalarda hassasiyet sağlamak için kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.10. EoT denkleminin günlere göre olan değişimi (Anonim, 2019)

3.4.3. Zaman düzeltme faktörü

Zaman düzeltme faktörü (TC), dakika cinsinden hesaplanarak belirli bir zaman dilimi içerisindeki yerel güneş zamanını, boylamsal değişkenlik nedeniyle düzeltir. Bu faktör, yerel güneş zamanını standart saat dilimine göre uyumlu hale getirmek için kullanılır. Zaman düzeltme faktörünün matematiksel ifadesi, aşağıdaki denklemle tanımlanır (Anonim, 2019g):

$$TC = 4 \cdot (Boylam - LSTM) + EoT \quad (3.11)$$

Burada:

- TC: Zaman düzeltme faktörü (dakika),

- Boylam: Bulunduğunuz yerin boylam değeri (°),
- LSTM: Yerel standart zaman meridyeni (°),
- EoT: Zaman eşitlik denklemi (dakika).

Bu formül, yerel güneş zamanını belirlemek için kritik bir hesaplama aracı olup, güneş enerji sistemlerinde ve astronomik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

3.4.4. Güneş doğuş ve batış zamanı

Güneş doğuş ve batış zamanı, güneş yükseklik açısının (α) 0° olduğu andaki zaman dilimini ifade eder. Bu zamanlar, güneşin ufuktan doğduğu ve battığı anları tanımlar. Güneş doğuş ve batış zamanı denklemleri sırasıyla denklem 3.11 ve denklem 3.12'de verilmiştir (Anonim, 2019e):

$$\text{Doğuş} = 12 - \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) - \frac{TC}{60} \quad (3.12)$$

$$\text{Batış} = 12 + \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) - \frac{TC}{60} \quad (3.13)$$

Burada:

- ϕ : Enlem açısı (°),
- δ : Deklinasyon açısı (°),
- TC: Zaman düzeltme faktörü (dakika).

3.5. Güneş Işınımı Hesaplama Yöntemi

Güneş enerjisinin bir yüzeye ne kadar verimli şekilde aktarılacağı, öncelikle o yüzeye ulaşan toplam güneş ışıınının bileşenlerinin ve bunların zamana, konuma ve panelin eğim-açı koşullarına göre doğru biçimde modellenmesine bağlıdır. Güneş ışıınını, doğrudan (direkt), difüz (yayılı) ve yansıyan olmak üzere üç temel bileşenden oluşur ve özellikle mimari uygulamalarda, eğimli panellerin enerji performansı analizi için her bileşenin ayrı ayrı hesaplanması kritik öneme sahiptir.

3.5.1. Eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışıınını

Bir eğimli yüzeye ulaşan toplam güneş ışıınını, aşağıdaki şekilde doğrudan, difüz ve yansıyan ışıının bileşenlerinin toplamı olarak hesaplanır:

$$G_T = G_{bT} + G_{dT} + G_{rT} \quad (3.14)$$

Burada:

- G_T : Eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışıınını (W/m^2),
- G_{bT} : Doğrudan bileşen (W/m^2),

- G_{dT} : Difüz bileşen (W/m^2),
- G_{rT} : Yansıyan bileşen (W/m^2).

Bu üç bileşenin her biri, panelin aldığı toplam enerji miktarını önemli ölçüde etkiler ve her biri ayrı ayrı hesaplanarak toplam ışıınım değeri elde edilir. Özellikle güneş panelinin veya herhangi bir yüzeyin yataydan farklı bir açıyla konumlandırılması, bu üç bileşenin büyüklüğünü değiştirir. Yani panelin eğimi arttıkça doğrudan ve difüz ışıınım bileşenlerinin oranı değişirken, yansıyan ışıınımın payı da panelin eğimine ve çevre albedosuna göre farklılık gösterir.

3.5.2. Doğrudan güneş ışıınımı (direkt bileşen)

Doğrudan güneş ışıınımı, güneşten gelen ışıık ışıınlarının herhangi bir kırınımına uğramadan doğrudan panel yüzeyine ulaşan kısmıdır. Yatay düzleme gelen doğrudan ışıınım, panelin eğim ve azimut açısı ile güneşin konumuna göre aşağıdaki şekilde eğimli yüzeye yansıtılır:

$$G_{bT} = G_b \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.15)$$

Burada:

- G_b : Yatay düzleme gelen doğrudan güneş ışıınımı (W/m^2),
- θ : Güneş ışıınlarının panel yüzeyine geliş açısı ($^\circ$),
- θ_z : Zenit açısı, yani güneş ışıığının yere göre yüksekliğini belirten açı ($^\circ$).

Bu formülün temel amacı, yatay yüzeye gelen doğrudan ışıınımı, panelin eğimine ve yönüne göre yeniden projekte ederek, gerçekte panelin yüzeyine düşen enerji miktarını hassas bir şekilde bulmaktır. Güneşin gökyüzündeki konumu; enlem, boylam, günün saati, yılın günü gibi parametreler kullanılarak matematiksel olarak belirlenebilir. Panel yüzeyinin eğim açısı ise, yüzeyin yatayla yaptığı açıyı, azimut açısı ise panelin hangi yöne baktığını gösterir (Gracia ve Huld 2013).

Güneş ışıığının panel yüzeyine geliş açısı (θ), panelin konumuna ve anlık güneş pozisyonuna göre değişir. Bu açı küçüldükçe, yani güneş ışığı panel yüzeyine dik gelmeye yaklaştıkça, panelin birim alanına düşen doğrudan ışıınım miktarı artar ve bu da maksimum enerji kazanımı anlamına gelir. Özellikle panel eğimi ve yönelimi doğru ayarlandığında, yıl boyunca veya belirli bir zaman diliminde doğrudan güneş ışıınımından en yüksek düzeyde faydalanmak mümkün olur.

3.5.3. Yansıyan güneş ışıınımı (reflekte bileşen)

Güneş ışıınımının bir kısmı, yeryüzü veya çevredeki diğer yüzeyler tarafından yansıtılarak panele ulaşır. Bu yansıyan ışıınımın büyüklüğü, yüzeyin yansıtma oranı (albedo), panelin eğim açısı ve yatay düzleme gelen toplam ışıınıma bağlıdır:

$$G_{rT} = G \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.16)$$

Burada:

- G : Yatay düzleme gelen toplam güneş ışıını (W/m²),
- ρ : Yüzeyin yansıtma oranı (albedo, genellikle 0.2 alınır),
- β : Panelin eğim açısı (°).

Panelin eğimi arttıkça, yani panel yere daha dik bir açı ile yerleştirildikçe, doğrudan yansıyan ışıının etkisi genellikle azalır; panel yere paralel konumlandığında ise, yansıyan ışıından en yüksek düzeyde faydalanılır. Bunun nedeni, yere yakın eğimlerde panelin çevredeki yansıtıcı yüzeylerden daha fazla ışıını alabilmesidir. Yansıyan ışıının payı, özellikle açık ve geniş zeminli alanlarda veya karla kaplı bölgelerde toplam güneş enerjisi kazanımında ciddi bir artışa sebep olabilir. Ayrıca, enerji verimliliği açısından gerçekçi analiz yapmak isteyen uygulamalarda, bu bileşenin ihmal edilmemesi gerekmektedir (Geller 2010).

Kırsal alanlarda toprak ve bitki örtüsü için genellikle $\rho = 0.2$, kentsel alanlarda beton veya açık renkli yüzeyler için ise 0.3–0.4 gibi daha yüksek değerler kullanılabilir. Kar örtüsü gibi özel durumlarda albedo değeri daha da yüksektir. Yansıyan ışıının büyüklüğü, günün saatine, yılın zamanına, panelin bulunduğu mikroklima koşullarına ve çevre topoğrafyasına da bağlı olarak değişiklik gösterir.

3.5.4. Difüz güneş ışıını (dağılmış bileşen)

Difüz ışıını, güneş ışıının atmosferde gaz, bulut ve toz partikülleriyle etkileşmesi sonucu farklı yönlerde dağılmasıyla oluşur. Bu bileşen, doğrudan güneş ışıı olmasa dahi, gökyüzünün tamamından panel yüzeyine ulaşan ışıını temsil eder. Difüz ışıının eğimli bir yüzeye gelen miktarı, aşağıdaki gibi çeşitli modellerle tahmin edilebilir:

$$G_{dT} = G_d \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} + k_1 \cdot \left(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \left(\frac{\sin \beta}{2} \right)^2 \right) \right] \quad (3.17)$$

Veya atmosfer durumu (ör. bulutluluk, hava açıklığı) ve güneş konumu dikkate alınarak daha karmaşık ampirik modeller kullanılabilir.

Burada:

- G_d : Yatay düzleme gelen difüz güneş ışıını (W/m²),
- k_1 : Model parametresi (atmosferik koşullara bağlı olarak değişir).

Bazı modellerde k_1 katsayısı, gökyüzünün açıklık durumu ve hava kütlesinin özelliklerine göre değiştirilir; böylece panelin farklı hava koşullarında aldığı difüz ışıını miktarı daha hassas şekilde tahmin edilir. Gökyüzünün izotropik varsayıldığı basit durumlarda, ikinci terim genellikle sıfır alınır veya ihmal edilir (Gracia ve Huld 2013).

Ancak difüz ışıının homojen dağılmadığı (anizotropik dağılım) ve atmosferin optik özelliklerinin değiştiği durumlarda, gökyüzü çeşitli bölgelere ayrılır ve her bölgeye özgü ayrı katsayılar ile ışıını miktarı belirlenir. Özellikle güneş çevresinde, gökyüzünün "parlak

nokta" bölgesinde, difüz ışınlam daha yoğundur. Bulutlu havalarda ise, panelin gökyüzünü gören kısmı ne kadar fazlaysa, o kadar fazla difüz ışınlam alır.

Eğimli yüzeylerde, gökyüzünün geometrik olarak görülen kısmı arttıkça, difüz ışınlamda da artış olur. Bu nedenle, panelin eğim açısı arttıkça, gökyüzüne dönük olan yüzey alanı da değiştiğinden, alınan difüz ışınlam miktarı değişir. Kış aylarında güneşin yükseklik açısı düşük olduğu için, paneller daha dik yerleştirildiğinde difüz ışınlamdan daha çok faydalanmak mümkündür.

3.6. Örnek Bina Modeli ve Hesaplama Kabulleri

Bu çalışmada yürütülen güneş ışınlamı ve gölgeleme analizlerinde, Antalya ili Kepez ilçesinin iklimsel koşulları dikkate alınarak tasarlanan dört katlı bir konut binasının pencere alanları ve cepheleri esas alınmıştır. Modelleme ve analizler, Autodesk Ecotect Analysis ile Ecotect Solar Tools gibi güncel simülasyon programları kullanılarak yapılmış, hesaplamalarda sadece pencere yüzeyleri, pencere oranı, cephe yönelimi ve gölgelik etkileri değerlendirmeye alınmıştır. Binanın mimari modeli dijital ortamda oluşturularak her kat ve cephedeki pencere konumları, boyutları ve oranları detaylı şekilde tanımlanmıştır.

Simülasyonlarda, güneşin yıl boyunca izlediği yörünge ve aylık ışınlam değişimi dikkate alınarak, her ayı temsil eden gün referans alınmış, böylece aylık ortalama koşullara uygun bir analiz yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yöntemle, güneş ışınlamının ve gölgelemenin yıl içindeki değişimi, her cephe ve kat için ayrı ayrı incelenmiştir. Pencerelemin güneş ışınlamı alma potansiyeli, cephe yönelimine (kuzey, güney, doğu, batı) göre modellenmiş, simülasyonlarda pencere üstü yatay gölgeliklerin farklı aylardaki performansı detaylı olarak analiz edilmiştir. Gölgeleme oranları, pencere üstü çıkmaların boyutu ve konumuna bağlı olarak hesaplanmış, özellikle yaz aylarında gölgeliklerin pencereleri aşırı güneş ışınlamından koruma etkinliği belirlenmiştir.

Enerji tüketimi analizlerinde, binada merkezi elektrikli kazan ile ısıtma ve bireysel split klima ile soğutma yapıldığı varsayılmıştır. Isıtma ve soğutma sistemlerinin toplam yıllık enerji tüketimi, modelin büyüklüğü, pencere oranı, cephe yönelimi ve Antalya'nın iklim koşulları göz önüne alınarak yaklaşık 8.500 kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Bu değer, enerji modellemesinde referans olarak kullanılmıştır ve bina kabuğu özelliklerinden ziyade pencere kaynaklı güneş kazançlarının etkisini gösterecek şekilde kabul edilmiştir.

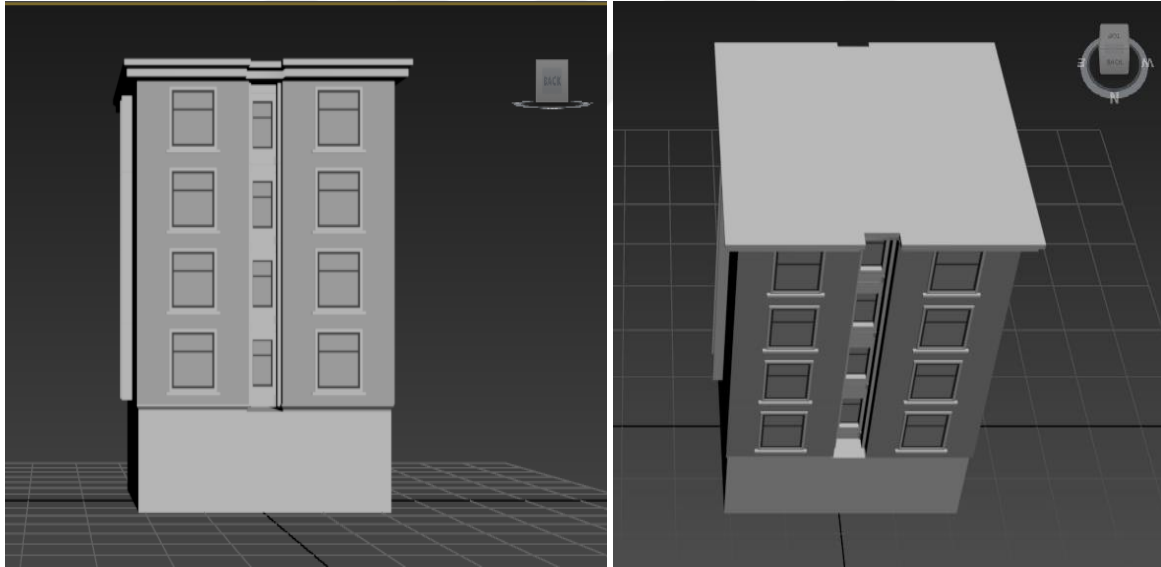
Simülasyonlarda, pencere üstü gölgeliklerin farklı aylarda ve saatlerde oluşturduğu gölgeleme, pencereye ulaşan doğrudan güneş ışınlamı ve gölgeleme süreleri yazılım ortamında diyagramlar ve 3D görseller ile analiz edilmiştir. Her cephe yönelimi için, güneşin yıl içindeki hareketine bağlı olarak pencere yüzeyinin ne kadar süreyle güneşe maruz kaldığı ve hangi zaman dilimlerinde gölgede kaldığı ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarında, pencerelerin konumuna, cephe yönelimine ve gölgelik boyutuna bağlı olarak güneşten alınan enerji ve gölgeleme performansı aylık ve saatlik bazda ayrıntılı olarak raporlanmıştır.

Çizelge 3.2'de, simülasyonlarda analiz edilen dört katlı referans konut binasına ait pencere ve cephe karakteristikleri özetlenmiştir. Kat sayısı, bina boyutları, pencere alanı, pencere tipi ve cephe yönelimleri gibi temel parametreler ile modellemede esas alınan pencere ısı geçirgenliği (U) ve güneş kazanç katsayısı (g) değerleri tablo halinde sunulmuştur. Bu özellikler, enerji ve güneş ışınlamı analizlerinde kullanılan temel girdileri oluşturmaktadır.

Çizelge 3.2. Örnek bina pencere ve cephe özellikleri

Özellik	Değer
Kat sayısı	4
Bina eni	12 m
Bina boyu	10 m
Kat yüksekliği	2,75 m
Toplam pencere alanı	140 m ²
Pencere oranı (cepheye)	%30
Tek pencere alanı	4,37 m ²
Pencere tipi	Çift camlı alüminyum doğrama
Pencere ısı geçirgenliği (U)	1,8 W/m ² K
Pencere güneş kazanç katsayısı (g)	0,6
Cephe yönelimleri	Kuzey, Güney, Doğu, Batı
Gölgelekler	Pencere üstü yatay gölgelek

Şekil 3.11’de gösterilen 3D model, Antalya ili Kepez ilçesi koşulları dikkate alınarak tasarlanan dört katlı referans konut binasına aittir. Bu modelde yalnızca pencere ve cephe karakteristikleri esas alınmış, pencere alanları, oranları ve cephe yönelimleri dijital ortamda detaylı olarak tanımlanmıştır. Model, güneş ışıınımı ve gölgeleme analizlerinde kullanılmıştır.

**Şekil 3.11.** 3D Model bina tasarımı

Çalışmada yapılan bu kapsamlı analizlerde, yalnızca pencere ve cephe karakteristikleriyle, yıl boyunca penceden geçen güneş ışıınımı, gölgeleme süreleri ve pencere kaynaklı enerji kazançları, dijital simülasyon ortamında detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Modelde, binanın diğer yapı elemanlarına veya yalıtım özelliklerine dair herhangi bir bilgi kullanılmamış; analizler tamamen pencere, gölgelek ve cephe yönelimi üzerinden yürütülmüştür.

4. BULGULAR

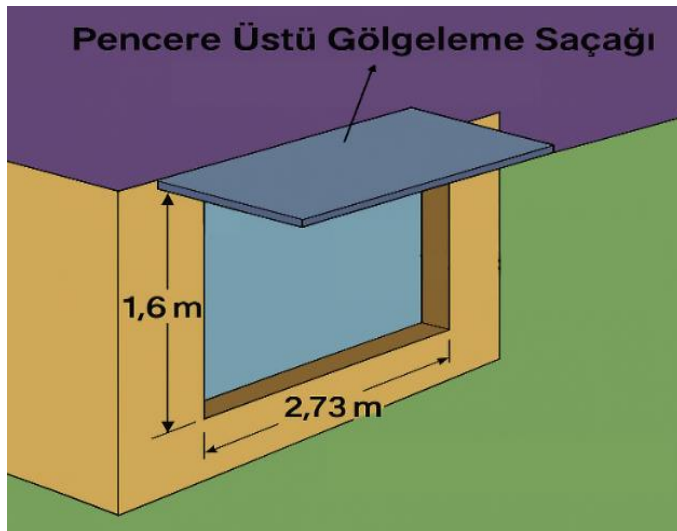
Bu bölümde, örnek olarak modellenen konut binasında yapılan simülasyonlar ve hesaplamalar sonucunda elde edilen bulgular sunulmaktadır. Analizler sırasında, pencere alanları ve cephe yönelimleri dikkate alınarak gerçekleştirilen gölgeleme ve güneş ışıınımı hesaplamaları; aylık ve saatlik düzeyde hem sayısal hem de görsel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada fotovoltaiik paneller, pencerenin doğrudan önüne değil, üst kısmına yerleştirilmiş olup, bu yerleşimle hem doğal aydınlatma korunmuş hem de kış aylarında güneş kazancı maksimize edilmiştir. Ayrıca panellerin pencereyle aynı hizada yerleştirilmesi durumunda dış manzaranın kısıtlanması ve görsel bütünlüğün bozulması gibi olumsuzlukların önüne geçilmiştir.

Bununla birlikte, simülasyonlar sonucunda elde edilen yıllık enerji tüketimi değerleri ve gölgelik tasarımının bina enerji performansına etkileri de kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Bulgular hem pencere bazında hem de tüm bina ölçeğinde, enerji verimliliği ve konfor koşulları açısından detaylı olarak tartışılmıştır.

4.1. Saçak Boyutunun Belirlenmesi

Binalarda enerji verimliliğini ve iç ortam konforunu artırmak için pencere üstü yatay gölgeleme saçığının doğru boyutlandırılması oldukça önemlidir. Gölgeleme saçığı, yaz aylarında içeri giren aşırı güneş ışıınımını engellerken, kış aylarında ise yeterli güneş kazancını sağlamalıdır. Bu dengeyi kurabilmek için hem güneşin yıl boyunca gökyüzündeki konumu hem de bina coğrafi özellikleri dikkate alınmalıdır.

Şekil 4.1’de, pencere üstüne yerleştirilen yatay gölgeleme saçığının, pencere ile olan boyut ve konum ilişkisi şematik olarak gösterilmektedir. Görselde ayrıca pencere yüksekliği ve genişliği de belirtilmiştir. Bu tür saçaklar, güneşin geliş açısına bağlı olarak pencereyi gölgeleyerek iç mekan konforunu doğrudan etkiler.



Şekil 4.1. Gölgeleme saçığı yerleşimi

Pencere üstü gölgeleme saçığı uzunluğunun belirlenmesinde iki farklı bilimsel yöntem kullanılmaktadır:

1. Güneş yüksekliği yöntemi

Bu yöntemde, yılın farklı aylarında güneşin gökyüzündeki yüksekliği dikkate alınarak, pencereyi tamamen gölgeleyebilecek minimum saçak uzunluğu hesaplanır. Her ayı temsil eden gün, saat 12:00'de elde edilen güneş yükseklik açısı ile pencere yüksekliği trigonometrik olarak oranlanır. Böylece, pencereyi aşırı güneş ışınlımından koruyacak teorik optimum saçak uzunlukları belirlenir.

2. Uzunluk faktörü SLF (Shadow Length Factor) yöntemi

Uzunluk Faktörü (SLF- Shadow Length Factor) yöntemi, yıl boyunca pratikte kullanılacak sabit bir saçak uzunluğunun belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, pencerenin yönüne ve binanın bulunduğu enleme bağlı olarak tablolardan elde edilen gölge uzunluğu faktörü (SLF) kullanılır. SLF değeri ile, tüm yıl için geçerli olacak en uygun saçak boyu kolay ve uygulanabilir bir biçimde belirlenebilir. Böylece hem yaz hem de kış dönemlerinde optimum koruma ve enerji performansı sağlanmış olur.

4.1.1. Maksimum güneş yüksekliğine göre saçak boyu hesaplaması (aylık optimum uzunluk)

Gölgeleme saçağı uzunluğunun belirlenmesinde, güneşin yıl içindeki hareketi ve pencerenin maruz kaldığı güneş ışınlımı dikkate alınır. Bunun için, her ayı temsil eden gün güneşin gökyüzündeki konumuna göre, pencereyi tamamen gölgeleyebilecek minimum saçak uzunluğu hesaplanır. Aşağıda, her ayı temsil eden gün (n) değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.1'de, her ay için güneş konumu hesaplamalarında kullanılan ayı temsil eden gün (n) ve ilgili tarihler yer almaktadır. Bu değerler, güneşin yıl içindeki konumunun hassas olarak hesaplanmasını sağlar ve hesaplama doğruluğunu artırır.

Çizelge 4.1. Her ayı temsil eden gün ve tarih (Yiğit ve Atmaca 2010)

Ay	Ortalama gün (n)	Tarih	Ay	Ortalama gün (n)	Tarih
Ocak	17	17 Ocak	Temmuz	198	17 Temmuz
Şubat	47	16 Şubat	Ağustos	228	16 Ağustos
Mart	75	16 Mart	Eylül	258	15 Eylül
Nisan	105	15 Nisan	Ekim	288	15 Ekim
Mayıs	135	15 Mayıs	Kasım	318	14 Kasım
Haziran	162	11 Haziran	Aralık	344	10 Aralık

1. Güney cephesi pencere üstü gölgeleme saçağı uzunluğu

Güney cephede yer alan pencere üstü yatay gölgeleme saçağının optimum boyutunun belirlenebilmesi için, yıl boyunca her ayı temsil eden gün değerlerinde ve saat 12:00'de pencereyi tamamen gölgeleyebilecek teorik minimum saçak uzunlukları hesaplanmıştır. Bu kapsamda, hesaplamalar üç ana adımda yürütülmektedir:

1. **Güneşin gökyüzündeki konumunun belirlenmesi:** Her ayı temsil eden yılbaşından itibaren gün numarası (n) belirlenir (Çizelge 4.1). Sonrasında deklinasyon açısı (δ),

Denklem 3.2 ile hesaplanır. Saat açısı (ω) ise saat 12:00 için Denklem 3.4'e göre sıfır alınır.

2. **Güneş yükseklik açısının hesaplanması:** Antalya ili için enlem ($\phi = 36.9^\circ$) sabit alınarak, güneş yükseklik açısı (α), Denklem 3.7 kullanılarak bulunur. Bu açı, güneş ışınlarının yatay düzlemle yaptığı açığı ifade eder ve pencere gölgelemesinde temel parametredir.
3. **Aylık optimum saçak boyunun hesaplanması:** Her ay için bulunan yükseklik açısı (α) değeriyle, pencere yüksekliği ($H = 1.6 \text{ m}$) kullanılarak, pencereyi tamamen gölgeleyebilecek minimum panel uzunluğu (L_{ay}), Denklem 4.1 ile hesaplanır.

Örnek hesaplama (Temmuz ayı, 17. Gün, saat 12:00, Antalya için):

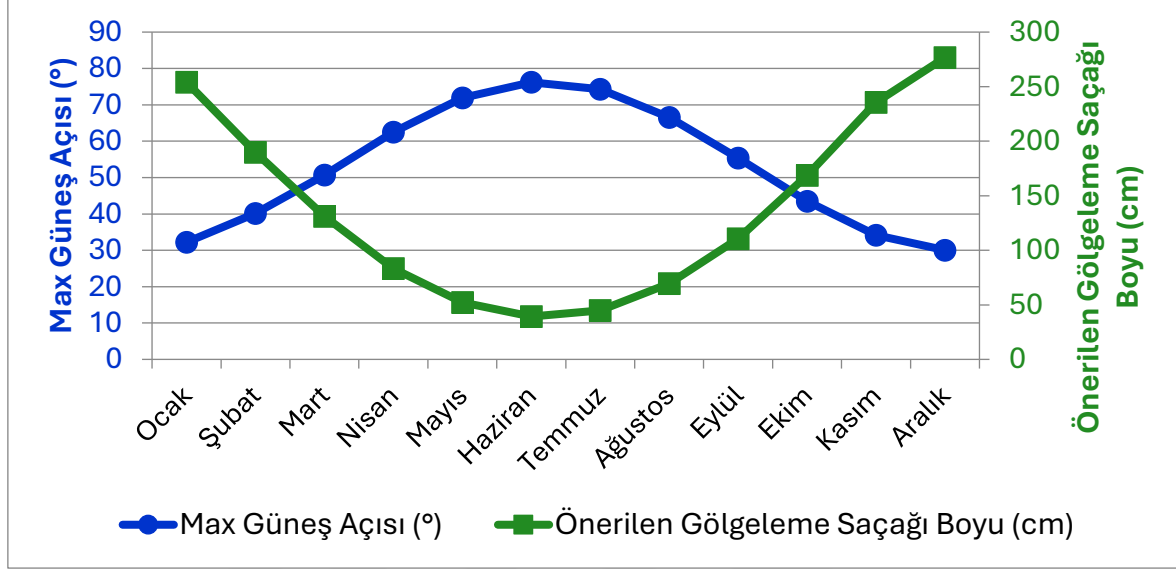
- Gün numarası: $n=198$, $H=1800 \text{ cm}$
- Deklinasyon açısı (δ), Denklem 3.2 ile: $\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+198}{365}\right)$
- Saat açısı (ω), Denklem 3.4 ile: 0°
- Güneş yükseklik açısı (α), Denklem 3.7 ile bulunur.
- Saçak boyu (L_{ay}): $L_{ay} = \frac{H}{\tan(\alpha)}$
- Temmuz ayı için hesaplanan örnek sonuç: $\alpha = 73.54^\circ$, $L_{ay} = 47.3 \text{ cm}$

Çizelge 4.2’de gösterilen, kış aylarında güneş gökyüzünde daha alçak bir konumda bulunduğu için, pencereyi tamamen gölgeleyebilmek amacıyla gereken gölgeleme saçığı boyu önemli ölçüde artmaktadır. Aralık ayında önerilen gölgeleme saçığı uzunluğu 276.6 cm, Haziran ayında ise bu değer 39.3 cm’ye düşmektedir. Yaz aylarında güneşin daha dik açıyla gelmesi, pencereyi gölgelemek için çok daha kısa saçaklar yeterli olmaktadır. Bu durum, pencere üstü gölgeleme saçaklarının hem enerji verimliliği hem de iç mekân konforu açısından mevsimsel olarak farklı işlevler üstlenmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 4.2. Güney cephe için önerilen saçak boyları

Ay	Max güneş açısı ($^\circ$)	Önerilen gölgeleme saçığı boyu (cm)
Ocak	32,18	254,2
Şubat	40,15	189,7
Mart	50,68	131,0
Nisan	62,51	83,2
Mayıs	71,89	52,3
Haziran	76,19	39,3
Temmuz	74,28	45,0
Ağustos	66,55	69,4
Eylül	55,32	110,7
Ekim	43,50	168,6
Kasım	34,19	235,5
Aralık	30,05	276,6

Şekil 4.2’de, Antalya’da güney cephede her ayı temsil eden gün ve saat 12:00’de hesaplanan güneş yükseklik açısı ile pencereyi tamamen gölgeleyebilecek önerilen gölgeleme saçağı boyunun aylara göre değişimi gösterilmektedir. Grafik, güneş yüksekliği arttıkça gölgeleme saçağı boyunun azaldığını ve kış aylarında saçak uzunluğunun maksimuma ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.2. Güney cephe için önerilen saçak boyları

Bu sonuçlar, pencere üstü gölgeleme saçağı tasarımında hem maksimum gölgeleme hem de enerji verimliliği açısından bilimsel bir temel oluşturmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan tüm temel denklemlerin açıklamaları ise ilgili tez bölümlerinde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2. Doğu ve batı pencere üstü gölgeleme saçağı uzunluğu

Doğu ve batı cephelerinde yer alan pencere üstü yatay gölgeleme saçaklarının optimum boyutunun belirlenebilmesi için, yıl boyunca her ayı temsil eden gün, sabah (09:00) ve akşam (15:00) saatlerinde pencereyi tamamen gölgeleyebilecek teorik minimum saçak uzunlukları hesaplanmıştır. Bu kapsamda hesaplamalar üç temel adımda yürütülmüştür:

1. **Güneşin gökyüzündeki konumunun belirlenmesi:** Her ayı temsil eden yılbaşından itibaren gün numarası (n) belirlenir (Çizelge 4.1). Sonrasında deklinasyon açısı (δ), Denklem 3.2 ile hesaplanır. Sabah 09:00 için saat açısı ($\omega = -45^\circ$), akşam 15:00 için ise ($\omega = +45^\circ$) olarak, Denklem 3.4'e göre kullanılır.
2. **Güneş yükseklik açısının hesaplanması:** Antalya ili için enlem ($\phi = 36.9^\circ$) sabit alınarak, güneş yükseklik açısı (α), Denklem 3.7 kullanılarak bulunur. Bu açı, güneş ışınlarının yatay düzlemle yaptığı açıdır ve pencere gölgelemesinde temel parametredir.
3. **Aylık optimum saçak boyunun hesaplanması:** Ayı temsil eden gün için bulunan yükseklik açısı (α) değeriyle, pencere yüksekliği ($H = 1.6 \text{ m}$) kullanılarak, pencereyi tamamen gölgeleyebilecek minimum panel uzunluğu (L_{ay}), Denklem 4.1 ile hesaplanır.

Örnek hesaplama (Mart ayı, 75. Gün, Sabah 09:00, Antalya için):

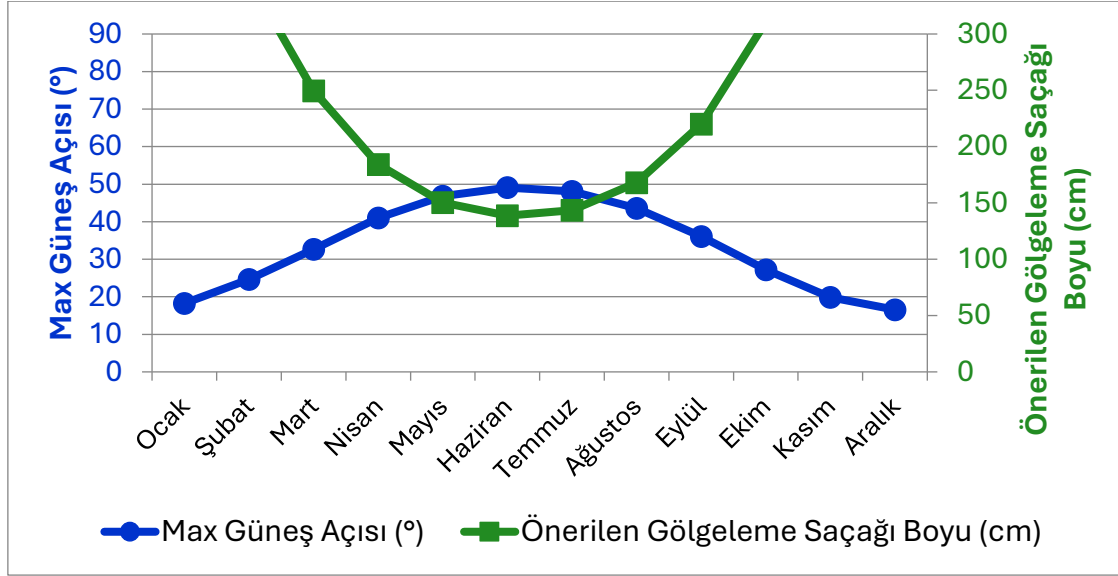
- Gün numarası: $n = 75$, Pencere yüksekliği: $H = 160 \text{ cm}$
- Deklinasyon açısı (δ), Denklem 3.2 ile: $\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+75}{365}\right)$
- Saat açısı (ω), Denklem 3.4 ile: -45° (sabah için)
- Güneş yükseklik açısı (α), Denklem 3.7 ile bulunur $\alpha = 32.66^\circ$
- Saçak boyu (L_{ay}): $L_{ay} = \frac{H}{\tan(\alpha)}$
- Mart ayı için hesaplanan örnek sonuç: $\alpha = 32.66^\circ$, $L_{ay} = 249.6 \text{ cm}$

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere, özellikle kış aylarında güneş gökyüzünde daha alçak konumda bulunduğunda, pencereyi tam olarak gölgeleyebilmek için gereken gölgeleme saçağı uzunluğu önemli ölçüde artmaktadır. Örneğin, Aralık ayında önerilen gölgeleme saçağı uzunluğu 537.6 cm'ye kadar yükselirken, Haziran ayında bu değer yalnızca 138.7 cm'ye düşmektedir. Yaz aylarında güneşin daha yüksek açıyla gelmesi sayesinde, pencereyi gölgelemek için çok daha kısa saçaklar yeterli olmaktadır. Bu bulgular, doğu ve batı cephelerde sabit bir saçak seçimi yapılırken yıl boyu değişen gölgeleme ihtiyacının dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.3. Doğu ve batı cephe için önerilen saçak boyları

Ay	Max güneş yükseklik açısı ($^\circ$)	Önerilen gölgeleme saçağı boyu (cm)
Ocak	18,29	484,1
Şubat	24,61	349,3
Mart	32,66	249,6
Nisan	41,00	184,1
Mayıs	46,78	150,4
Haziran	49,08	138,7
Temmuz	48,09	143,6
Ağustos	43,60	168,0
Eylül	36,03	219,9
Ekim	27,22	311,0
Kasım	19,90	442,1
Aralık	16,57	537,6

Şekil 4.3'te, Antalya'da doğu ve batı cephelerde ayı temsil eden gün sabah 09:00 (ve akşam 15:00) saatlerinde hesaplanan güneş yükseklik açısı ile pencereyi tamamen gölgeleyebilecek önerilen gölgeleme saçağı uzunluğunun aylara göre değişimi sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, kış aylarında gölgeleme saçağı uzunluğunun çok yüksek değerlere ulaştığı, yaz aylarında ise bu uzunluğun belirgin şekilde azaldığı açıkça görülmektedir. Bu durum, yıl boyunca güneşin geliş açısındaki değişimin gölgeleme ihtiyacına doğrudan etki ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.3. Doğu ve batı cephe için önerilen saçak boyları

Bu sonuçlar, doğu ve batı cephelerde pencere üstü gölgeleme saçağı tasarımında hem maksimum gölgeleme hem de enerji verimliliği açısından bilimsel bir temel oluşturmaktadır. Özellikle sabit bir saçak boyu seçilecekse, kış aylarında ve günün erken/akşam saatlerinde artan gölgeleme ihtiyacının dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Hesaplamalarda kullanılan temel denklemler ise ilgili tez bölümlerinde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

4.1.2. SLF yöntemiyle saçak boyu analizi (yıllık optimum uzunluk)

Sabit pencere üstü gölgeleme saçağı uzunluğunun seçilmesinde, yaygın olarak kullanılan Shade Line Factor (SLF) yöntemi esas alınmaktadır. SLF değeri, pencere cephesine ve yapının bulunduğu enleme göre belirlenmektedir. Aşağıda verilen Çizelge 4.4'te, farklı pencere yönleri ve çeşitli enlemler için önerilen SLF değerleri gösterilmektedir (Li vd. 2017a; Oliveira vd. 2023).

Çizelge 4.4. Gölgeleme uzunluk faktörü SLF (shade line factor) değerleri (Watson 2013)

Cephe	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°
Doğu	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Güneydoğu	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9
Güney	10,1	5,4	3,6	2,6	2,0	1,7	1,4
Güneybatı	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8
Batı	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Antalya'nın enlemi olan 36,9°'ye en yakın değerler 35° ve 40° satırlarında bulunmakta, aradaki SLF değeri lineer interpolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır.

SLF değeri şu denklemle bulunur:

$$SLF = SLF_{40} + \frac{40 - \phi}{40 - 35} \cdot (SLF_{35} - SLF_{40}) \quad (4.1)$$

Burada SLF_{40} ve SLF_{35} ilgili cephe için çizelgeden alınır, ϕ ise yapı enlemidir.

Gölgeleme saçağı uzunluğu ise:

$$L = \frac{H}{SLF}$$

Burada L saçağın uzunluğudur (cm), H ise pencere yüksekliğidir (cm).

Örneğin, güney cephesi için:

$$SLF_{40} = 2.6$$

$$SLF_{35} = 3.6$$

$$\phi = 36.9^\circ$$

Pencere yüksekliği: H = 160 cm alınır.

$$SLF_{güney} = 2.6 + \frac{40 - 36.9}{5} \cdot (3.6 - 2.6) = 2.6 + 0.62 = 3.22$$

$$L_{güney} = \frac{160}{3.22} \approx 50 \text{ cm}$$

Yani güney cephesi için yıl boyunca uygulanacak sabit gölgeleme saçağı uzunluğu yaklaşık 50 cm olarak belirlenmiştir.

Doğu ve batı cepheleri için ise çizelgede $SLF_{40} = SLF_{35} = 0.8$ olduğundan interpolasyona gerek kalmaz:

$$L_{doğu/batı} = \frac{160}{0.8} = 200 \text{ cm}$$

Ancak bu uzunluklar, pratikte mimari ve uygulama açısından genellikle çok büyük bulunmakta ve özellikle doğu-batı cephelerinde sabit saçak uygulaması önerilmemektedir. SLF yöntemiyle belirlenen sabit gölgeleme saçağı, yıl boyunca hem iç mekân konforunu hem de enerji verimliliğini artıran, uygulanabilir ve bilimsel olarak temellendirilmiş bir çözümdür. Hesaplamalarda kullanılan tüm temel denklemlerin detaylı açıklamaları ilgili tez bölümlerinde sunulmuştur.

4.1.3. Sabit saçak gölgeleme simülasyonları

Bu bölümde, pencere üstüne yerleştirilen 50 cm sabit saçak uzunluğunun yılın farklı aylarında ve günün çeşitli saatlerinde (09:00, 12:00, 15:00) doğu ve batı cephelerde sağladığı gölgeleme etkisi analiz edilmiştir. Simülasyonlar, Autodesk Ecotect Analysis programında, Antalya ili koşulları dikkate alınarak yapılmıştır. Analizde, yıl boyunca tipik günler seçilerek (ayı temsil eden gün için), sabah, öğle ve akşam saatlerinde saçak tarafından sağlanan gölgeleme uzunluğu ve pencere üzerindeki gölgeleme oranı değerlendirilmiştir.

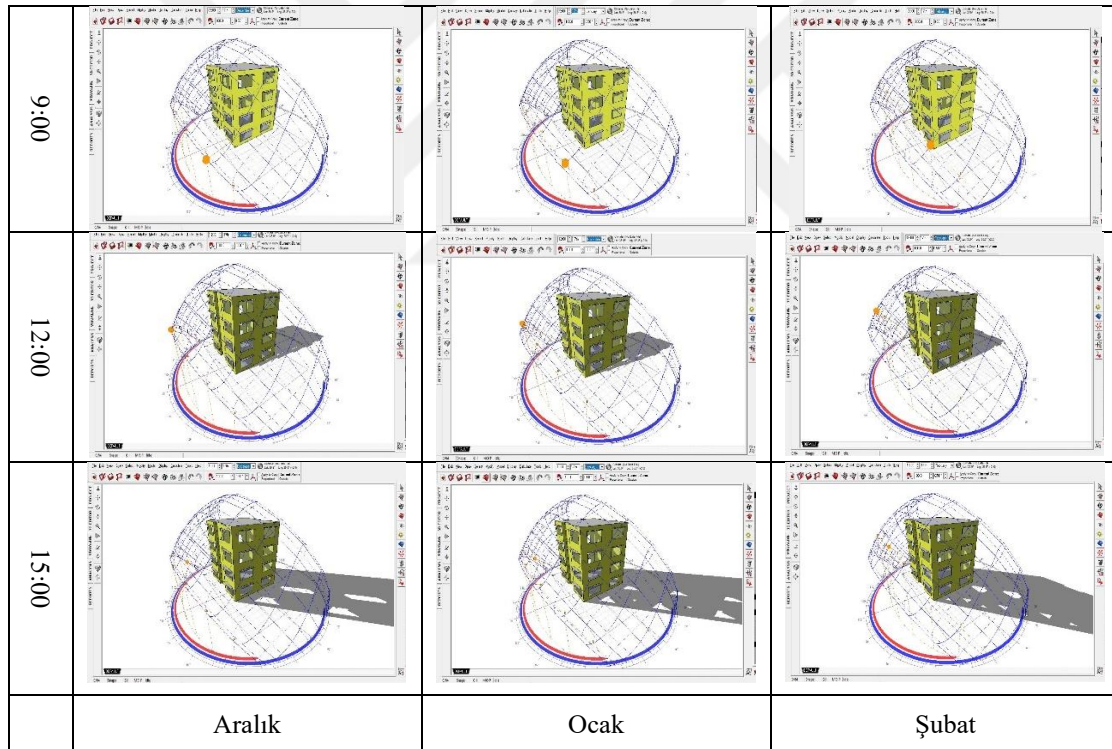
Simülasyon Yöntemi

- **Saçak uzunluğu:** 50 cm olarak sabitlenmiştir.

- **Pencere yüksekliği:** 1,6 m, genişliği 2,73 m'dir.
- **Güneş konumu:** Ayı temsil eden gün için, saat 09:00 (doğu güneşi), 12:00 (güney), 15:00 (batı güneşi) alınmıştır.

Her bir ay ve saat için, doğu ve batı cephede saçak tarafından oluşturulan gölge uzunluğu ve bu gölgenin pencere yüzeyini ne oranda örttüğü aşağıdaki gibi analiz edilmiştir:

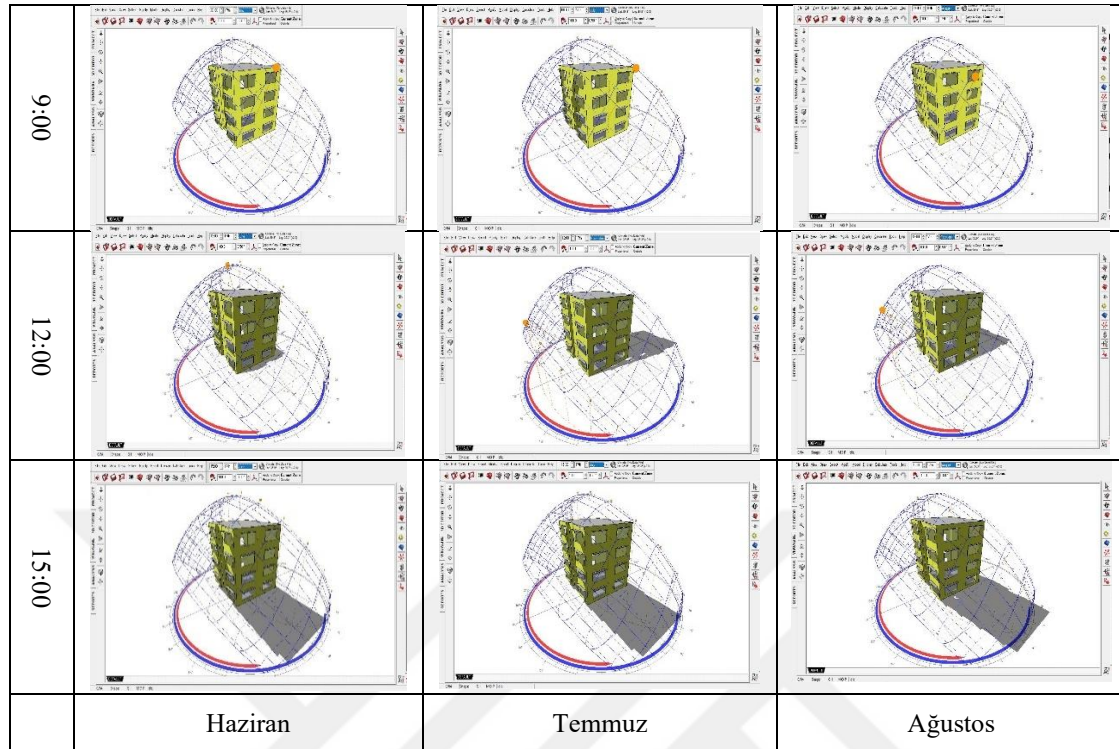
Kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat): Sabit yatay saçak uygulanan çok katlı bir binanın Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, kış aylarında güneş ışınları gökyüzünde daha düşük açıyla hareket ettiğinden, özellikle doğu ve batı cephelerinde sabah (09:00) ve akşam (15:00) saatlerinde yatay saçakların ve üst kat çıkıntılarının gölgeleme etkisi zayıflamaktadır. Bu saatlerde, pencere yüzeyinin büyük kısmı doğrudan güneş ışığı almakta, saçaklar gölge sağlamada yetersiz kalmaktadır. Öğle saatinde (12:00) ise, güneşin açısı yükseldiğinden üst kat saçaklarının gölgeleme katkısı artmakta ve pencere yüzeyi daha iyi korunmaktadır. Güney cephesinde ise, kış aylarında saçaklar kısa gölge oluşturarak güneş ışığının büyük oranda pencereye ulaşmasına olanak tanır ve böylece pasif ısı kazancı desteklenmiş olur. Özellikle kışın, iç mekânlarda ısıtma ihtiyacını azaltmak amacıyla saçakların minimum düzeyde gölgeleme sağlaması enerji verimliliği açısından avantaj sunmaktadır.



Şekil 4.4. Kış aylarında sabit saçaklı güney, doğu ve batı cephelerde güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – Ecotect simülasyonu

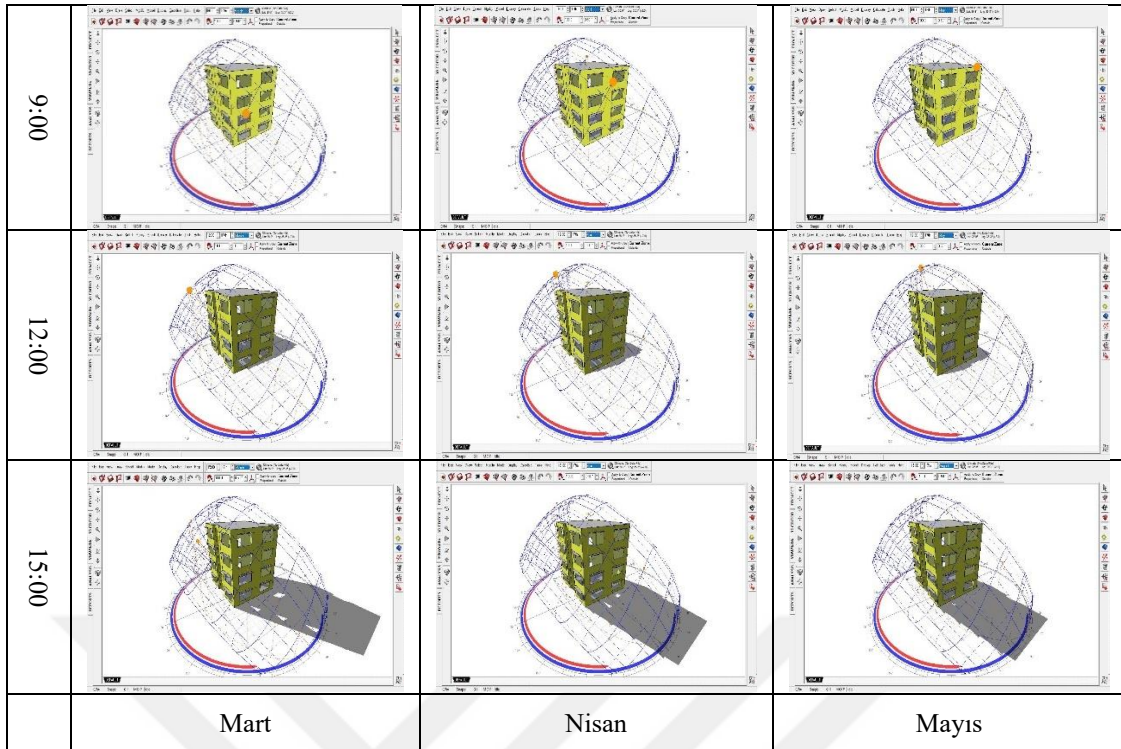
Yaz mevsiminde ise, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, güneş ışınları yüksek açıyla geldiğinden öğle saatlerinde (12:00) hem yatay saçaklar hem de üst kat döşemeleri tüm cephelerde etkili bir şekilde gölgeleme sağlamaktadır. Özellikle güney cephede saçaklar pencereyi neredeyse tamamen gölgelendirerek, iç mekânda aşırı ısınmayı önlemektedir. Doğu cephesinde sabah saatlerinde (09:00), batı cephesinde ise akşam saatlerinde (15:00) saçaklar ve üst kat çıkıntıları sayesinde, güneş ışınlarının pencereye doğrudan ulaşması azaltılmış, bu sayede iç ortamda serinlik korunmuştur. Ayrıca, yaz aylarında güneş

ışınlarının eğimi arttığı için, sabit saçakların gölgeleme etkisi daha belirgin hale gelir ve bu durum özellikle enerji tasarrufu ve kullanıcı konforu açısından önemlidir.

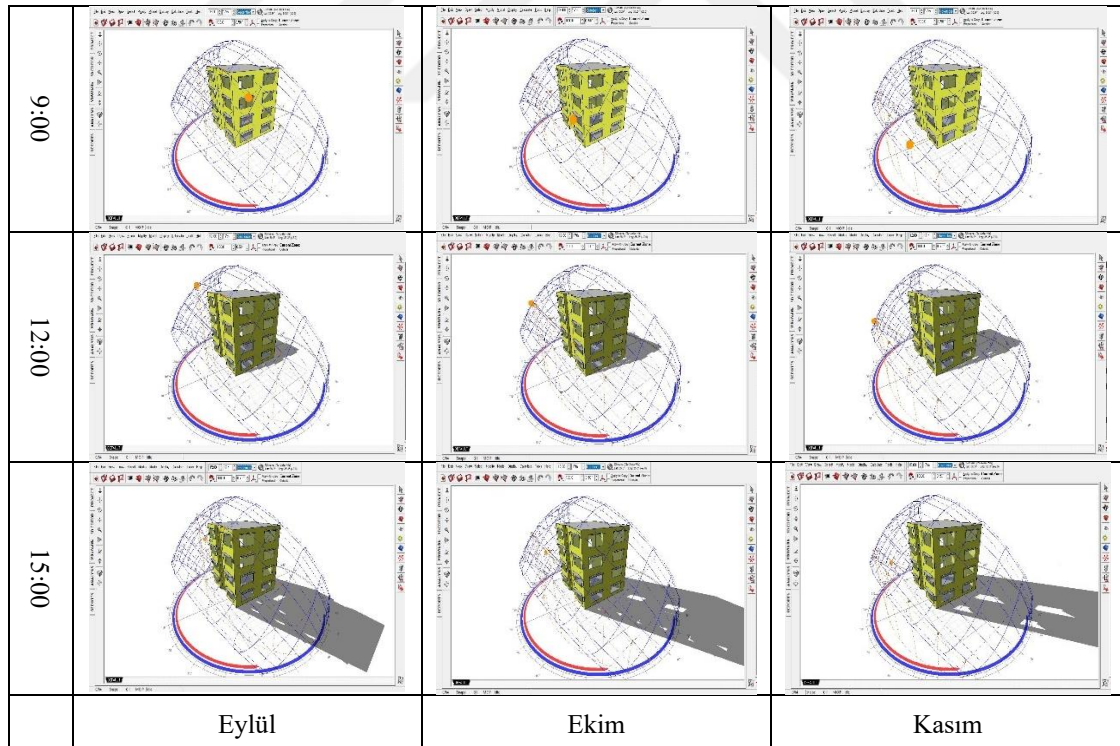


Şekil 4.5. Yaz aylarında sabit saçaklı binada güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – ecotect simülasyonu

İlkbahar (Mart, Nisan, Mayıs) ve Sonbahar (Eylül, Ekim, Kasım) Aylarında, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sunulan simülasyon sonuçlarına göre, bu geçiş dönemlerinde saçakların gölgeleme etkisi mevsimsel değişikliklere bağlı olarak artış ve azalış göstermektedir. Özellikle öğle saatlerinde (12:00) saçaklar ve üst kat döşeme çıkıntıları, doğu, güney ve batı cephelerde birlikte çalışarak pencere yüzeyinin büyük kısmını etkin şekilde gölgelendirebilmektedir. Sabah (09:00) ve akşam (15:00) saatlerinde ise, güneş ışınları daha yatay geldiği için gölge boyları uzar ve pencerenin hem üst hem de alt bölgelerinde kısmi gölgelenmeler oluşur. Bu saatlerde saçakların koruyucu etkisi devam etmekte; güneş ışınlarının zararlı ve aşırı ısıtıcı etkileri azaltılırken, iç mekânda doğal aydınlatma ve kontrollü ısı kazancı sağlanmaktadır. Özellikle bu dönemlerde saçakların gölgeleme etkisi, enerji verimliliği ve iç mekân konforunun mevsimsel olarak dengede tutulmasına katkı sunar.



Şekil 4.6. İlkbahar dönemlerinde sabit saçaklı cephelerde güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – ecotect simülasyonları



Şekil 4.7. Sonbahar dönemlerinde sabit saçaklı cephelerde güneş ve saçak gölgeleme analizi (saat 09:00, 12:00 ve 15:00) – ecotect simülasyonları

4.2. Güneş Paneli Açısı ve Yüzey Alanı Hesaplaması

Bu bölümde, pencere saçağı üstüne monte edilen sabit eğimli güneş panelinin, yılın farklı aylarında pencereyi tamamen gölgeleyebilmesi için gereken panel uzunluğu ve yüzey alanı hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda panel uzunluğu, pencere yüksekliği ($L = 50$ cm) ve panelin aylık optimum eğim açısı ($\beta_{opt,ay}$) dikkate alınarak trigonometrik yöntemle belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen panel uzunluklarına göre toplam panel yüzey alanı hesaplanmış, bu veriler mevsimsel performans değerlendirmesinde kullanılmıştır.

4.2.1. Saçak üstü panel eğimi

Bu çalışmada, panel eğim açısı ve saçak boyutunun optimizasyonu, matematiksel ve simülasyon tabanlı yöntemlerle bir arada değerlendirilmiştir. Hottel ve Woertz (HW) metodu olarak, panelin eğim açısı hem yıllık optimum enerji üretimini sağlayacak şekilde hem de saçak gölgeleme etkisini maksimize edecek biçimde belirlenmiştir (Kalogirou 2023).

4.2.1.1. Aylık optimum panel eğim açısının hesaplanması

Aylık bazda optimum eğim yöntemi, güneş panelinin her ay, güneşin gökyüzündeki konumuna göre en uygun açıyla yerleştirilmesini hedefler. Bu yaklaşımda, panelin eğim açısı (β_{ay}), ilgili ay için güneşin ortalama deklinasyon açısı (δ) dikkate alınarak belirlenir. Antalya ili için enlem ($\phi = 36,9^\circ$) esas alınmıştır (Çağlar 2018).

Aylık optimum eğim açısı aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\beta_{ay} = \phi - \delta \quad (4.2)$$

Burada,

- β_{ay} : İlgili ay için optimum panel eğim açısı ($^\circ$)
- ϕ : Bölgenin enlem derecesi (Antalya için $36,9^\circ$)
- δ : O aya ait güneşin deklinasyon açısı ($^\circ$), Denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır.

Örnek Hesaplama (Mart Ayı için):

Mart ayının ortalama gün numarası $n=75$ olarak alınmıştır. Bu değer, Denklem (3.1) ile yerine konduğunda,

$$\begin{aligned} \delta_{mart} &= -23,45 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{75 + 10}{365}\right) \\ &= -23,45 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{85}{365}\right) \\ &= -23,45 \cdot \cos(83,84^\circ) \end{aligned}$$

$$= -23,45 \cdot 0,115$$

$$= -2,70^\circ$$

Deklinasyon açısı $\delta = -2,70^\circ$ olarak bulunur. Böylece, Mart ayı için optimum panel eğim açısı:

$$\beta_{mart} = 36,9 - (-2,70) = 39,6^\circ$$

Çizelge 4.5'te, her ayı temsil eden gün hesaplanan optimum panel eğim açıları sunulmaktadır. Aylar ilerledikçe güneşin gökyüzündeki konumu değiştiği için, deklinasyon açısı ve buna bağlı olarak optimum panel eğimi de farklılık göstermektedir. Kış aylarında panel daha dik (yüksek açı), yaz aylarında ise daha yatık (düşük açı) konumda olmalıdır. Böylece yıl boyunca maksimum enerji verimi ve etkin gölgeleme sağlanır.

Çizelge 4.5. Aylara göre optimum güneş paneli açısı

Ay	Ortalama gün (n)	Deklinasyon açısı δ ($^\circ$)	Panel eğim açısı β_{ay} ($^\circ$)
Ocak	17	-20,85	57,75
Şubat	47	-13,15	50,05
Mart	75	-2,70	39,60
Nisan	105	9,25	27,65
Mayıs	135	18,93	18,00
Haziran	162	23,45	13,45
Temmuz	198	21,63	15,27
Ağustos	228	13,88	23,02
Eylül	258	2,18	34,72
Ekim	288	-9,85	46,75
Kasım	318	-18,90	55,80
Aralık	344	-23,19	60,09

4.2.1.2. Mevsimsel optimum panel eğim açısı

Mevsimsel optimum eğim yöntemi, güneş panelinin eğim açısının yıl boyunca üç ana dönem için ayarlanmasını esas alır. Bu yaklaşımda, panelin eğimi kış, yaz ve ilkbahar/sonbahar dönemlerinde, güneş ışınlarının gökyüzündeki ortalama konumuna göre optimize edilir. Böylece hem gölgeleme etkisi hem de elektrik üretim verimi mevsimsel olarak dengelenmiş olur (Kalogirou 2023).

Kalogirou'nun önerdiği mevsimsel panel eğim açıları şu şekildedir:

1. Kış dönemi (Aralık – Ocak – Şubat):
Panel eğimi, enlem değerine 15° eklenerek bulunur:
 $\beta_{kış} = \phi + 15^\circ = 36,9^\circ + 15^\circ = 51,9^\circ$
2. İlkbahar / Sonbahar (Mart – Nisan – Mayıs / Eylül – Ekim – Kasım):
Panel eğimi, enlem değerine eşit alınır:
 $\beta_{ilkbahar/sonbahar} = \phi = 36,9^\circ$
3. Yaz dönemi (Haziran – Temmuz – Ağustos):

Panel eğimi, enlem değerinden 15° çıkarılarak bulunur:

$$\beta_{yaz} = \phi - 15^\circ = 36,9^\circ - 15^\circ = 21,9^\circ$$

Bu yaklaşımda, panel açısı yılda üç kez değiştirilerek yılın her döneminde panelin gölgeleme ve enerji üretim performansı dengelenmiş olur. Kış aylarında panel daha dik konumlandırılırken, yaz aylarında daha yatay hale getirilir. Bu sayede kışın daha fazla güneş ışığı alınır, yazın ise aşırı ısınma ve parlamanın önüne geçilir. İlkbahar ve sonbahar için ise enlem açısı genellikle dengeli sonuçlar sunar.

Çizelge 4.6’da Kalogirou’ya göre Antalya ili için önerilen mevsimsel optimum panel eğim açıları gösterilmektedir. Kış aylarında panel daha dik konumlandırılırken, yaz aylarında ise panelin eğimi azaltılarak daha yatık hale getirilir. İlkbahar ve sonbahar için ise enlem açısı önerilmektedir. Böylece yıl boyunca gölgeleme ve enerji verimi dengeli şekilde sağlanmış olur.

Çizelge 4.6. Mevsimsel optimum panel eğim açıları

Dönem	Panel eğimi (β , $^\circ$)
Kış	51,9
İlkbahar/Sonbahar	36,9
Yaz	21,9

4.2.1.3. Yıllık Optimum Panel Eğim Açısı

Yıllık ortalama optimum eğim yöntemi, güneş panelinin tüm yıl boyunca sabit bir açıyla konumlandırılmasını esas alır. Bu yöntemde, panel eğim açısı ($\beta_{yıl}$), panelin yıllık toplam enerji üretimini maksimize edecek şekilde sadece enlem değerine eşit alınır: (Kalogirou 2023)

$$\beta_{yıl} = \phi \quad (4.3)$$

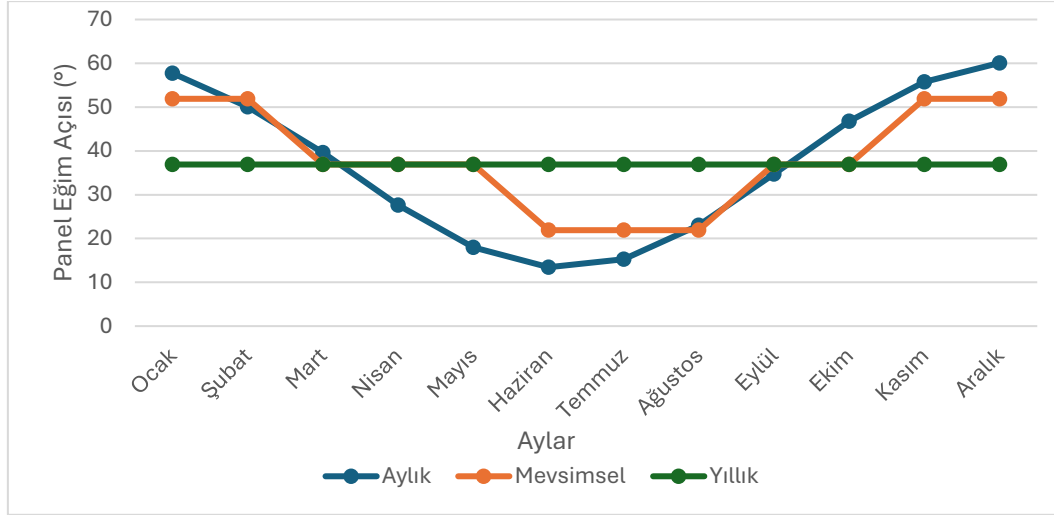
Burada,

- $\beta_{yıl}$: Yıllık optimum panel eğim açısı ($^\circ$)
- ϕ : Bölgenin enlem derecesi (Antalya için $36,9^\circ$)

$$\beta_{yıl} = 36,9^\circ$$

Bu yöntem, sabit panel sistemleri için pratik, yaygın ve uygulaması en kolay yaklaşımdır. Yıl boyunca panel eğiminin değiştirilmesi gerekmez, toplam enerji üretimi ve gölgeleme açısından uygun bir ortalama sağlar. Ancak mevsimsel ya da aylık yöntemler kadar hassas performans sunmaz.

Şekil 4.8’de, yıllık, mevsimsel ve aylık optimum eğim açılarına göre Antalya için panel eğim açısının yıl içindeki değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, panel eğiminin yıllık ortalama optimum değeri olan $36,9^\circ$ ’nin hem enerji verimi hem de uygulama kolaylığı açısından en uygun seçenek olduğu görülmüştür. Bu nedenle, sabit saçak üstüne monte edilen panelin eğim açısı olarak $36,9^\circ$ seçilmiştir.

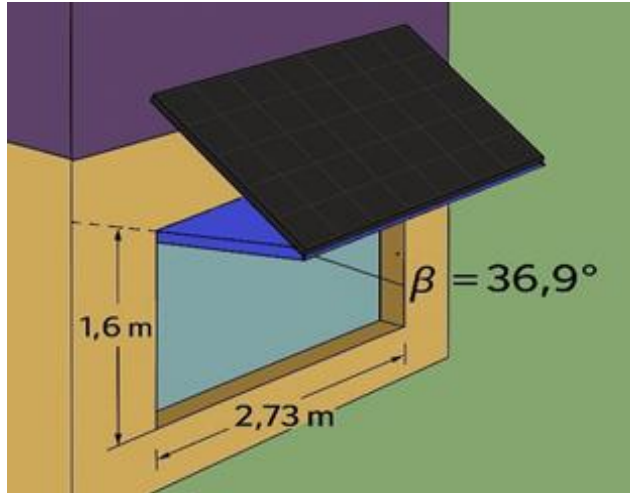


Şekil 4.8. Antalya için yıllık, mevsimsel ve aylık optimum panel eğim açısı değişimi

4.2.2. Panel yüzey alanı belirlenmesi

Sabit saçak üstüne yerleştirilecek güneş panelinin yüzey alanı, panel eğim açısı ve mimari ölçülere göre detaylı olarak hesaplanmıştır. Panelin hem gölgeleme hem de elektrik üretimi kapasitesi üzerinde belirleyici olan ana parametreler; saçak uzunluğu, pencere genişliği ve panel eğim açısıdır.

Şekil 4.9’da pencere üstüne monte edilen panelin eğim açısı ($\beta = 36,9^\circ$), saçak uzunluğu (50 cm), pencere yüksekliği (1,6 m) ve pencere genişliği (2,73 m) ile mimari konumlandırılması şematik olarak gösterilmektedir. Bu görsel, panel boyutlandırmasının ve mimari entegrasyonun anlaşılması açısından yol göstericidir.



Şekil 4.9. Panel açısı ve gölgeleme uzunluğu

Bu çalışmada, optimum enerji verimi ve etkin gölgeleme sağlayacak şekilde panel eğim açısı $\beta = 36,9^\circ$ olarak seçilmiştir. Panel boyutlandırma adımları aşağıda özetlenmiştir:

1. Panel uzunluğunun hesaplanması:

Panelin yataydan ölçülen eğim açısı β ve saçak uzunluğu (L) esas alınarak, panelin duvardan dışarı doğru olan gerçek uzunluğu (x) aşağıdaki trigonometrik formül ile belirlenir:

$$x = \frac{L}{\cos \beta}$$

Burada;

- L: Sabit saçak uzunluğu (bu çalışma için 50 cm)
- β : Panelin yatayla yaptığı eğim açısı ($36,9^\circ$)

Bu formül sayesinde, panel açısı arttıkça gerçek panel uzunluğunun da büyüdüğü görülmektedir. Örneğin $L = 50$ cm, $\beta = 36,9^\circ$ için;

$$x = \frac{50}{\cos 36,9^\circ} \approx \frac{50}{0,797} \approx 62,7 \text{ cm}$$

2. Panel yüzey alanının hesaplanması

Panelin toplam yüzey alanı, elde edilen panel uzunluğu (x) ile pencere genişliği ($G = 2,73$ m) çarpılarak elde edilir. Alan, m^2 cinsine çevrilirken panel uzunluğu santimetreden metreye çevrilir:

$$A = \left(\frac{x}{100} \right) \times G$$

$$A = \left(\frac{62,7}{100} \right) \times 2,73 \approx 1,71 \text{ m}^2$$

Bu yöntemle hesaplanan panel uzunluğu ve yüzey alanı hem pencereyi etkin biçimde gölgeleyecek hem de çatı mimarisiyle uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Sabit panel açısı olarak $36,9^\circ$ seçilmesinin nedeni, önceki analizlerde yıllık optimum enerji verimi ve uygulama kolaylığı açısından en uygun değer olmasıdır. Ayrıca, bu açıyla hem yaz hem kış aylarında pencereyi aşırı güneşlenmeye karşı koruma sağlanırken, iç mekânların doğal aydınlatması ve enerji verimliliği de artırılmış olur.

4.3. Saçağın Gölgeleme Etkisi

Binalarda güneş kontrolü ve iç mekân termal konforunun sağlanmasında, özellikle Antalya/Kepez gibi sıcak iklimlerde, pencere üstüne yerleştirilen sabit saçaklar oldukça etkili pasif tasarım elemanlarıdır. Bu bölümde, 50 cm derinliğe sahip sabit saçakların farklı cephelerde (güney, doğu, batı) yıl boyunca sağladığı gölgeleme etkisi hem teorik hesaplamalar hem de Ecotect Solar Tools simülasyonları ile analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan saçak şu temel ölçülere sahiptir:

- Saçak uzunluğu (L): 50 cm (0,5 m)
- Pencere yüksekliği: 1,6 m

- Pencere genişliği: 2,73 m

Gölgeleme uzunluğu (S), ilgili saat ve gün için güneşin yükseklik açısına (α) göre aşağıdaki temel trigonometrik denklemle hesaplanır:

$$S = \frac{L}{\tan \alpha}$$

Burada:

- S: Saçak tarafından oluşturulan gölgeleme uzunluğu (m)
- L: Saçak uzunluğu (m)
- α : Güneşin o anki yükseklik açısı ($^{\circ}$)

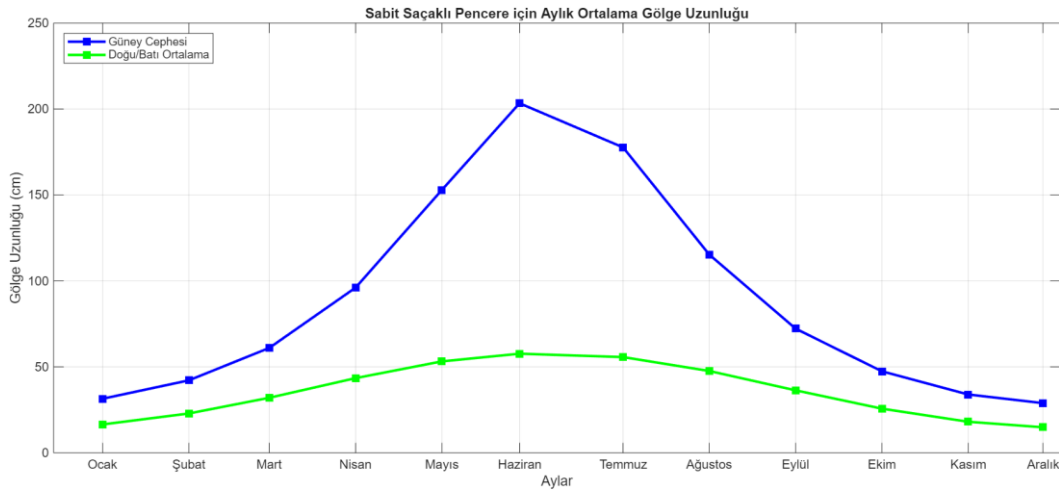
Saat Seçimleri:

- **Güney cephesi:** 12:00 (Güneş en yüksek konumda)
- **Doğu cephesi:** 09:00 (Sabah)
- **Batı cephesi:** 15:00 (Öğleden sonra)

Her ayı temsil eden gün için (n), ilgili saatlerdeki güneş yükseklik açıları PVGIS veya Ecotect Solar Tools verileri kullanılarak belirlenmiş ve bu değerlere göre gölgeleme uzunlukları MATLAB ortamında hesaplanmıştır.

Şekil 4.10'da, Antalya/Kepez'de 50 cm'lik sabit saçak kullanılması durumunda, yılın her ayında üç farklı cephede (güney – 12:00, doğu – 09:00, batı – 15:00 saatlerinde) oluşan gölge uzunluklarının değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, yaz aylarında (özellikle haziran ve temmuzda) güneş yüksekliğinin artması nedeniyle saçak tarafından oluşturulan gölge uzunluğunun azaldığı; kış aylarında ise güneş açıları düştüğünde pencere önüne düşen gölge uzunluğunun belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir.

Güney cephesi öğle saatlerinde en uzun gölgeyi kış aylarında oluştururken, doğu ve batı cephelerinde gölge uzunlukları daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu durum, sabit saçak tasarımının özellikle güney cephede yaz aylarında aşırı güneş kazanımlarını sınırlandırarak enerji verimliliği sağladığını; kış aylarında ise doğal ısı kazancı desteklediğini göstermektedir. Çalışmada, ay bazında elde edilen bu veriler, Ecotect Solar Tools simülasyon sonuçları ve teorik hesaplamalarla uyumlu şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.10. Saçak gölgeleme uzunluklarının aylara göre değişimi (güney, doğu ve batı cepheler)

Çizelge 4.7’de, Antalya/Kepez için 50 cm derinliğinde sabit saçak uygulamasında yılın her ayında güney ve doğu/batı cephelerinde elde edilen gölge uzunlukları sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, güney cephesinde gölge uzunluğunun yıl boyunca belirgin şekilde değiştiği, haziran ayında maksimum değere (203,3 cm) ulaştığı, kış aylarında ise minimum seviyelere indiği görülmektedir. Doğu ve batı cephelerinde ise gölge uzunlukları yıl boyunca daha düşük ve birbirine yakın değerlerde seyretmektedir.

Çizelge 4.7. Sabit saçak için aylara göre gölgeleme uzunlukları (cm)

Ay	Güney gölge (cm)	Doğu/Batı gölge (cm)
Ocak	31,5	16,5
Şubat	42,2	22,9
Mart	61,0	32,0
Nisan	96,1	43,5
Mayıs	152,9	53,2
Haziran	203,3	57,7
Temmuz	177,7	55,7
Ağustos	115,3	47,6
Eylül	72,3	36,4
Ekim	47,4	25,7
Kasım	34,0	18,1
Aralık	28,9	14,9

4.3.1. Pencereye düşen gölge oranı

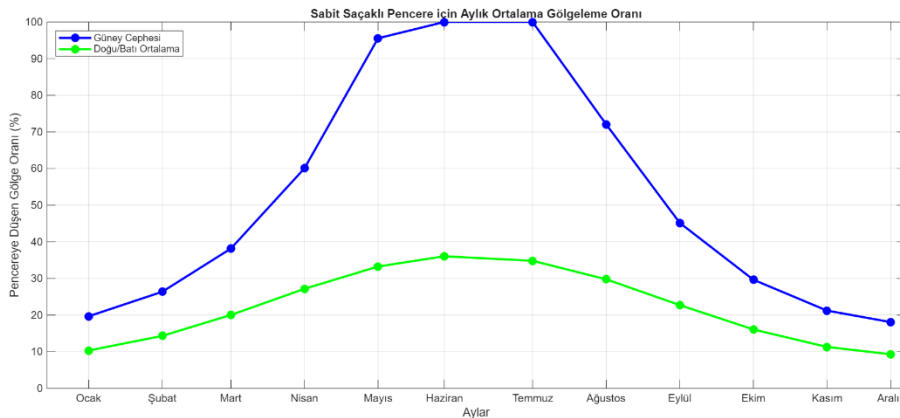
Pencere üzerine yerleştirilen sabit saçakların yıl boyunca oluşturduğu gölgeleme oranı, pencere yüzeyinin güneş ışınımından korunma düzeyini belirleyen önemli bir performans göstergesidir. Bu çalışmada, Antalya/Kepez lokasyonunda yapılan Ecotect Solar Tools simülasyonları ve MATLAB hesaplamalarıyla, yılın farklı aylarında ve cephelerde pencereye düşen gölge oranları detaylı olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.8’de Antalya/Kepez’de 50 cm derinliğinde sabit saçak uygulaması ile yılın her ayında güney ve doğu/batı cephelerinde pencereye düşen gölgeleme oranları yüzdesel olarak sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, güney cephesinde yaz aylarında gölgeleme oranının %100’e yaklaştığı, kış aylarında ise %20’nin altına düştüğü görülmektedir. Doğu ve batı cephelerinde ise gölgeleme oranları yıl boyunca daha düşük olup, en yüksek seviyelerine yaz aylarında ulaşmaktadır. Bu veriler, sabit saçakların özellikle yaz aylarında güney cephesinde güneş ışınımını etkin şekilde sınırladığını ve mevsimlere göre pencereye sağlanan gölgelemenin anlamlı derecede değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.8. Sabit saçak ile pencereye düşen aylık gölgeleme oranları (%)

Ay	Güney (%)	Doğu/Batı (%)
Ocak	19,7	10,3
Şubat	26,4	14,3
Mart	38,1	20,0
Nisan	60,1	27,2
Mayıs	95,6	33,3
Haziran	100,0	36,1
Temmuz	100,0	34,8
Ağustos	72,1	29,8
Eylül	45,2	22,7
Ekim	29,6	16,1
Kasım	21,3	11,3
Aralık	18,1	9,3

Şekil 4.11’de pencereye düşen gölge oranlarının aylara ve cephelere göre değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir. Güney cephesinde gölgeleme oranı yaz aylarında %100’e yaklaşırken, kış aylarında %20 seviyelerine kadar düşmektedir. Doğu ve batı cephelerinde ise gölgeleme oranı yıl boyunca daha düşük değerlerde seyretnmekte olup, maksimum oran yaz aylarında dahi %36’yı geçmemektedir. Bu durum, sabit saçakların özellikle güney cephesinde ve yaz aylarında güneş ışınımını etkin biçimde sınırladığını, kış aylarında ise iç mekâna doğal gün ışığı ve ısı kazanc sağladığını göstermektedir. Şekil, sabit saçakların mevsimsel ve yönelime bağlı performans farklılıklarını net biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. Pencereye düşen gölge oranlarının aylara göre değişimi

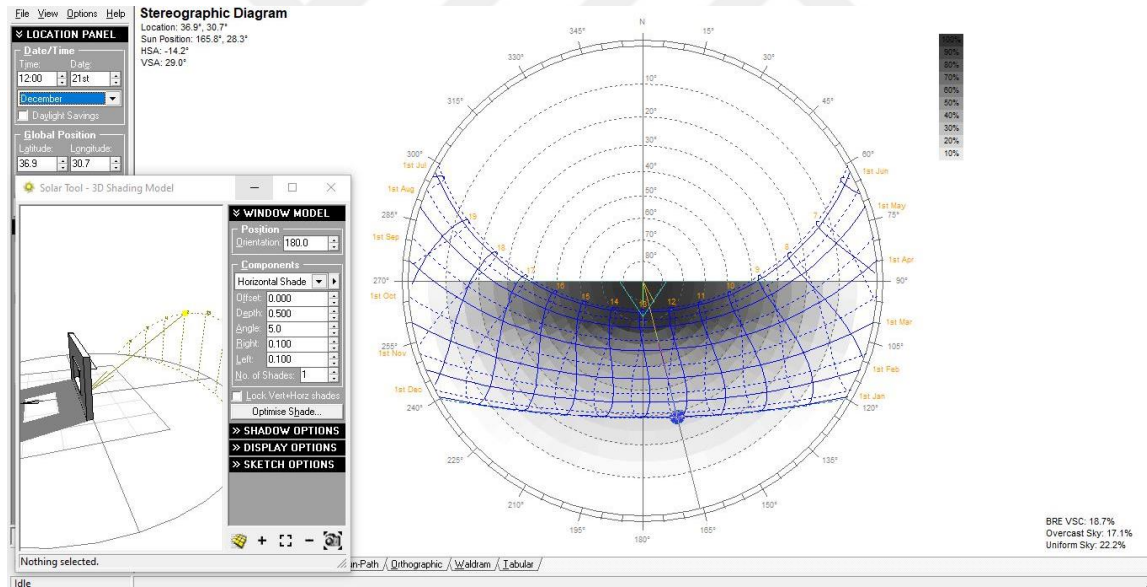
Ecotect Solar Tools yazılımından elde edilen Stereografik Diyagramlar ve Tabulated Daily Solar Data çıktıları, sabit saçak (50 cm) kullanımı ile pencerenin farklı dönemlerde ne kadarının gölgelendiğini görsel ve sayısal olarak ortaya koymaktadır. Analizlerde:

1. Kış ayları (Aralık, Ocak, Şubat):

Kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat), güneş gökyüzünde yılın en düşük açılara ulaşır. Bu durum, sabit saçakların gölgeleme etkisini önemli ölçüde değiştirir. Özellikle öğle saatlerinde dahi güneş ışınları pencereye daha eğimli gelir ve saçak gölgesi pencerenin alt kısmına kadar uzanır.

Ecotect Solar Tools simülasyonu sonuçlarına göre, Aralık ayının ortasında (21 Aralık, 12:00) güney cephede pencereye düşen gölge oranı yaklaşık %17 olarak hesaplanmıştır. "Tabulated Daily Solar Data" çıktısı da gün boyunca bu değerin genellikle %15–19 aralığında seyrettiğini göstermektedir. Sabah ve akşam saatlerinde, güneşin daha düşük açıya sahip olduğu anlarda kısa süreli olarak bu oran biraz daha artmaktadır; ancak pencerenin büyük bölümü gün boyunca doğrudan güneş ışığı almaktadır.

Şekil 4.12’de sunulan stereografik diyagram, sabit saçakla oluşan gölgelemenin yıl boyunca güneşin farklı konumlarına karşılık gelen etkilerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Burada gri tonlar gölge oranını belirtmekte olup, kış aylarında öğle saatlerinde pencere yüzeyinin yalnızca küçük bir kısmının gölgede kaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.12. Aralık ayı için ecotect solar tools stereografik diyagram sabit saçak gölgelemesinin yıl içindeki etkileri

Şekil 4.13’te ise Aralık ayına ait saatlik "Tabulated Daily Solar Data" çıktısı tablo halinde verilmiştir. Bu tabloda, saatlere göre gölgeleme oranlarının %0’dan başlayıp öğle saatlerinde %17’ye kadar çıktığı ve gün sonunda tekrar düştüğü gözlemlenmektedir.

Tabulated Daily Solar Data						
Latitude: 36.9° Longitude: 30.7° Timezone: 45.0° [+3.0hrs] Orientation: 180.0°			Date: 21st December Julian Date: 355 Sunrise: 08:11 Sunset: 17:38		Local Correction: -55.1 mins Equation of Time: 2.1 mins Declination: -23.5°	
Local	(Solar)	Azimuth	Altitude	HSA	VSA	Shading
08:30	(07:34)	122.8°	3.2°	-57.2°	5.9°	0%
09:00	(08:04)	127.6°	8.1°	-52.4°	13.1°	1%
09:30	(08:34)	132.8°	12.7°	-47.2°	18.3°	8%
10:00	(09:04)	138.5°	16.9°	-41.5°	22.1°	13%
10:30	(09:34)	144.6°	20.6°	-35.4°	24.8°	17%
11:00	(10:04)	151.1°	23.8°	-28.9°	26.7°	14%
11:30	(10:34)	158.2°	26.4°	-21.8°	28.1°	19%
12:00	(11:04)	165.6°	28.2°	-14.4°	29.0°	17%
12:30	(11:34)	173.4°	29.3°	-6.6°	29.5°	17%
13:00	(12:04)	-178.7°	29.6°	1.3°	29.6°	17%
13:30	(12:34)	-170.8°	29.1°	9.2°	29.4°	17%
14:00	(13:04)	-163.2°	27.7°	16.8°	28.8°	19%
14:30	(13:34)	-155.8°	25.6°	24.2°	27.7°	19%
15:00	(14:04)	-148.9°	22.8°	31.1°	26.2°	13%
15:30	(14:34)	-142.5°	19.5°	37.5°	24.0°	11%
16:00	(15:04)	-136.6°	15.6°	43.4°	21.0°	11%
16:30	(15:34)	-131.1°	11.2°	48.9°	16.8°	8%
17:00	(16:04)	-126.0°	6.5°	54.0°	11.0°	2%
17:30	(16:34)	-121.2°	1.5°	58.8°	3.0°	0%

Şekil 4.13. Ecotect solar tools “tabulated daily solar data” aralık güney cephede saatlik gölgeleme oranları.

MATLAB ile yapılan teorik hesaplamalarda ise Aralık, Ocak ve Şubat aylarında güney cephesindeki pencere için sırasıyla %18, %20 ve %26 oranlarında gölgeleme elde edilmiştir. Doğu ve batı cephelerinde ise bu oranlar daha düşüktür (çoğunlukla %10–15 seviyelerinde).

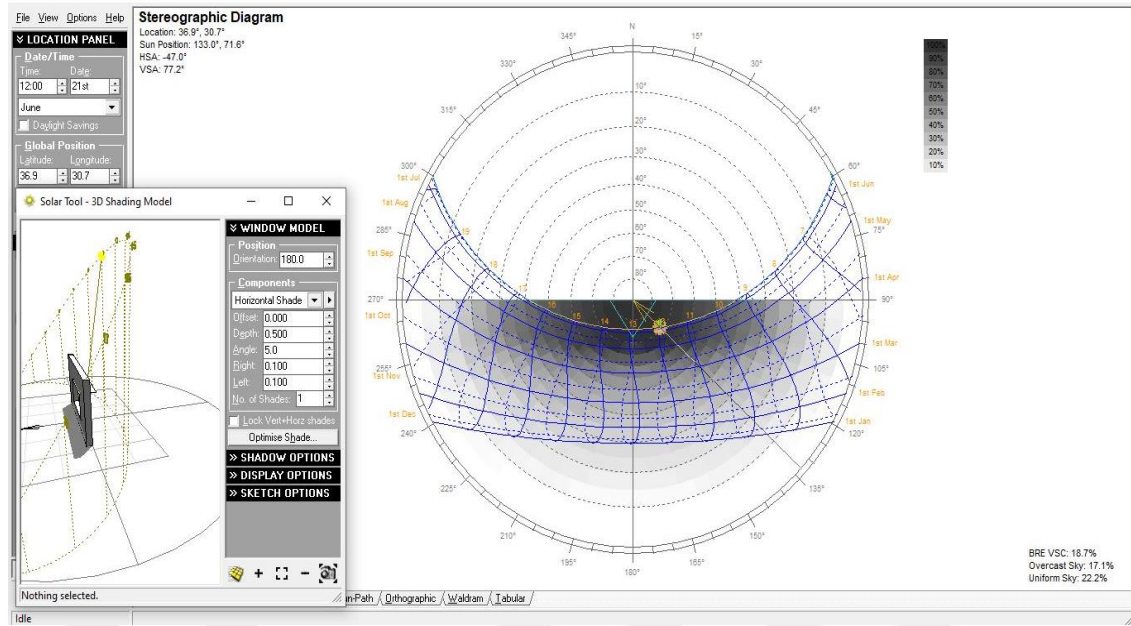
Her iki yöntemin sonuçları birbiriyle oldukça uyumludur. Hem Ecotect Solar Tools simülasyonu hem de MATLAB hesaplamaları, kış aylarında sabit saçakların pencereye tam gölge düşürmediğini; gölgelemenin genellikle %15–25 arasında değiştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Aralık ve Ocak aylarında pencerenin alt kısmında gölge oluşurken, üst kısmı çoğunlukla doğrudan güneş ışığı almaktadır.

2. Yaz ayları (haziran, temmuz, ağustos):

Yaz aylarında (Haziran, Temmuz, Ağustos), güneş gökyüzünde en yüksek konumuna ulaşır ve saçak gölgeleme davranışı kışa kıyasla önemli şekilde değişir. Güneş ışınlarının geliş açısı dikleştiğinden, sabit saçak tarafından oluşturulan gölge uzunluğu azalır; buna karşın saçak, pencerenin özellikle üst bölgesini etkin biçimde gölgeler.

Ecotect Solar Tools simülasyon sonuçlarına göre, 21 Haziran’da (yaz gündönümü) saat 12:00’de, güney cephede pencereye düşen gölge oranı %100’e ulaşmaktadır. "Tabulated Daily Solar Data" çıktısında, günün büyük bölümünde gölgeleme oranının %88 ile %100 arasında değiştiği görülmektedir. Öğle saatlerinde pencerenin tamamı gölgede kalırken, sabah ve akşam saatlerinde bu oran nispeten düşmektedir.

Şekil 4.14’te gösterilen stereografik diyagramda, yaz aylarında sabit saçak gölgelemesinin etkisi açıkça izlenebilmektedir. Grafik üzerinde, koyu gri bölgeler yüksek gölgeleme oranını ifade etmekte olup, özellikle Haziran ve Temmuz aylarında pencerenin neredeyse tamamının saçak gölgesinde kaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.14. Haziran ayı için ecotect solar tools stereografik diyagramda sabit saçak gölgele yıllık etkisi

Şekil 4.15'te ise Haziran ayına ait saatlik "Tabulated Daily Solar Data" çıktısı sunulmuştur. Tablo, pencereye düşen gölgeleme oranının sabah saatlerinde %70'lerden başlayarak öğleye doğru %100'e ulaştığını, akşam saatlerinde ise tekrar azaldığını göstermektedir.

Tabulated Daily Solar Data

Latitude: 36.9°
Longitude: 30.7°
Timezone: 45.0° [+3.0hrs]
Orientation: 180.0°

Date: 21st June
Julian Date: 172
Sunrise: 05:42
Sunset: 20:14

Local Correction: -58.8 mins
Equation of Time: -1.6 mins
Declination: 23.4°

Local	(Solar)	Azimuth	Altitude	HSA	VSA	Shading
06:00	(05:01)	62.7°	3.0°	-117.3°	173.4°	[Behind]
06:30	(05:31)	67.0°	8.4°	-113.0°	159.2°	[Behind]
07:00	(06:01)	71.0°	14.0°	-109.0°	142.4°	[Behind]
07:30	(06:31)	75.0°	19.8°	-105.0°	125.7°	[Behind]
08:00	(07:01)	79.0°	25.6°	-101.0°	111.8°	[Behind]
08:30	(07:31)	83.0°	31.5°	-97.0°	101.3°	[Behind]
09:00	(08:01)	87.1°	37.5°	-92.9°	93.8°	[Behind]
09:30	(08:31)	91.6°	43.5°	-88.4°	88.4°	73%
10:00	(09:01)	96.5°	49.5°	-83.5°	84.5°	78%
10:30	(09:31)	102.3°	55.4°	-77.7°	81.7°	88%
11:00	(10:01)	109.5°	61.2°	-70.5°	79.6°	93%
11:30	(10:31)	119.0°	66.7°	-61.0°	78.2°	97%
12:00	(11:01)	132.7°	71.5°	-47.3°	77.2°	100%
12:30	(11:31)	153.3°	75.2°	-26.7°	76.7°	100%
13:00	(12:01)	-178.8°	76.5°	1.2°	76.5°	100%
13:30	(12:31)	-151.3°	75.0°	28.7°	76.7°	100%
14:00	(13:01)	-131.4°	71.2°	48.6°	77.3°	99%
14:30	(13:31)	-118.1°	66.2°	61.9°	78.3°	95%
15:00	(14:01)	-108.8°	60.7°	71.2°	79.8°	92%
15:30	(14:31)	-101.8°	54.9°	78.2°	81.9°	84%
16:00	(15:01)	-96.1°	49.0°	83.9°	84.7°	79%
16:30	(15:31)	-91.2°	43.0°	88.8°	88.7°	73%
17:00	(16:01)	-86.8°	37.0°	93.2°	94.3°	[Behind]
17:30	(16:31)	-82.6°	31.1°	97.4°	102.0°	[Behind]
18:00	(17:01)	-78.6°	25.1°	101.4°	112.8°	[Behind]
18:30	(17:31)	-74.7°	19.3°	105.3°	127.0°	[Behind]
19:00	(18:01)	-70.7°	13.6°	109.3°	143.8°	[Behind]
19:30	(18:31)	-66.6°	8.0°	113.4°	160.5°	[Behind]
20:00	(19:01)	-62.4°	2.6°	117.6°	174.4°	[Behind]

Şekil 4.15. Ecotect solar tools "tabulated daily solar data" haziran ayı, güney cephede saatlik gölgeleme oranları

MATLAB ile yapılan teorik hesaplamalar da bu bulguları desteklemektedir. Haziran ve Temmuz aylarında güney cephesi için pencereye düşen gölge oranı %100 olarak hesaplanmıştır. Doğu ve batı cephelerinde ise gölgeleme oranları yaz boyunca daha düşük olmakla birlikte, maksimum değerler genellikle %36 seviyesini aşmamaktadır.

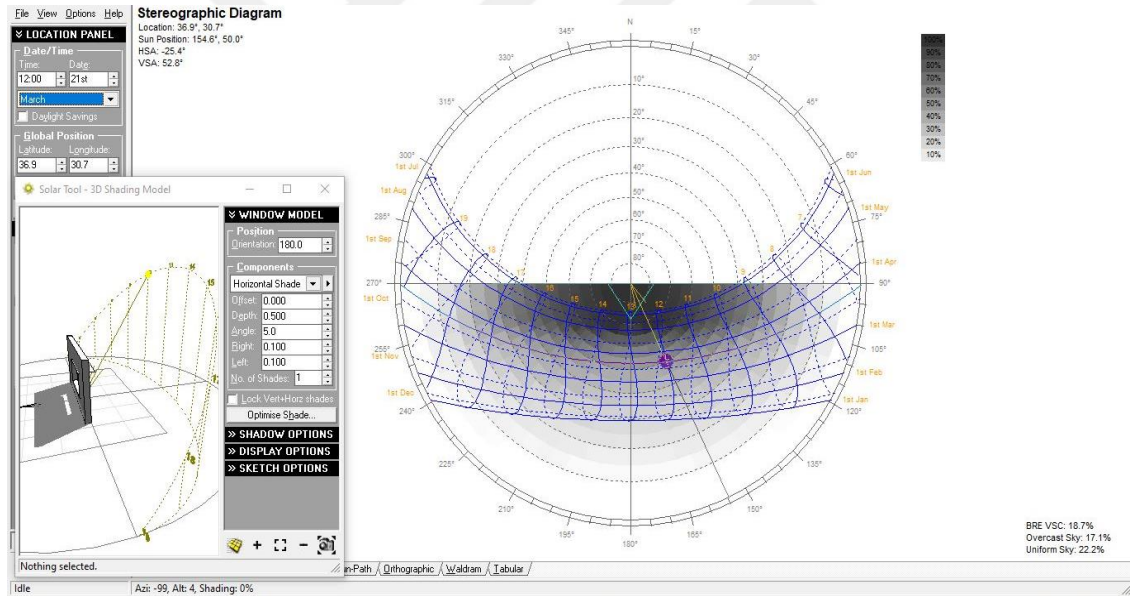
Her iki yöntemin sonuçları, yaz aylarında sabit saçakların özellikle güney cephede güneş ışınlamını neredeyse tamamen engellediğini ve iç mekânda aşırı ısınmayı önlemede son derece etkili olduğunu göstermektedir.

3. İlkbahar ve sonbahar (mart, nisan, eylül, ekim):

İlkbahar ve sonbahar aylarında, güneşin gökyüzündeki konumu kış ve yaz ayları arasında bir eğime sahiptir. Bu dönemde sabit saçak tarafından oluşturulan gölge uzunluğu ve pencereye düşen gölge oranı, yaz ve kış ayları arasında ara değerlerde gerçekleşir.

Ecotect Solar Tools simülasyonuna göre, örneğin 21 Mart'ta (ilkbahar ekinoksu) saat 12:00'de güney cephede pencereye düşen gölge oranı yaklaşık %50 civarındadır. "Tabulated Daily Solar Data" çıktısında gün boyunca gölgeleme oranının sabah saatlerinde %0'dan başlayarak öğle saatlerinde %53'e ulaştığı, akşam saatlerinde ise tekrar azaldığı görülmektedir. Bu değerler, saçak gölgelemesinin bu mevsimlerde daha dengeli bir koruma sağladığını göstermektedir.

Şekil 4.16'daki stereografik diyagramda, Mart ayı için sabit saçak gölgeleme performansının yıl boyunca ve günün farklı saatlerinde pencere üzerindeki etkisi görsel olarak sunulmaktadır. Gri tonlar, pencere yüzeyinin ne kadarının gölgede kaldığını açıkça göstermektedir.



Şekil 4.16. Mart ayı ecotect solar tools elde edilen stereografik diyagramda sabit saçak gölgelemesinin yıllık etkileri

Şekil 4.17'de ise Mart ayına ait saatlik "Tabulated Daily Solar Data" çıktısı verilmiştir. Tablo, gölgeleme oranının sabah saatlerinde düşük, öğle saatlerinde ise maksimuma ulaştığını ve akşam tekrar azaldığını göstermektedir.

Tabulated Daily Solar Data

Latitude: 36.9°
Longitude: 30.7°
Timezone: 45.0° [+3.0hrs]
Orientation: 180.0°

Date: 21st March
Julian Date: 80
Sunrise: 07:05
Sunset: 19:03

Local Correction: -64.4 mins
Equation of Time: -7.2 mins
Declination: -0.3°

Local	(Solar)	Azimuth	Altitude	HSA	VSA	Shading
07:30	(06:25)	94.1°	5.0°	-85.9°	50.8°	0%
08:00	(06:55)	98.7°	10.9°	-81.3°	52.0°	16%
08:30	(07:25)	103.4°	16.8°	-76.8°	52.4°	27%
09:00	(07:55)	108.5°	22.6°	-71.5°	52.6°	35%
09:30	(08:25)	114.1°	28.2°	-65.9°	52.7°	39%
10:00	(08:55)	120.2°	33.5°	-59.8°	52.7°	38%
10:30	(09:25)	127.2°	38.5°	-52.8°	52.8°	42%
11:00	(09:55)	135.1°	43.0°	-44.9°	52.8°	45%
11:30	(10:25)	144.1°	46.9°	-35.9°	52.8°	50%
12:00	(10:55)	154.5°	50.0°	-25.5°	52.8°	44%
12:30	(11:25)	165.9°	52.0°	-14.1°	52.8°	50%
13:00	(11:55)	178.2°	52.8°	-1.8°	52.8°	49%
13:30	(12:25)	-169.5°	52.4°	10.5°	52.8°	50%
14:00	(12:55)	-157.7°	50.7°	22.3°	52.8°	53%
14:30	(13:25)	-147.0°	47.9°	33.0°	52.8°	47%
15:00	(13:55)	-137.6°	44.2°	42.4°	52.8°	44%
15:30	(14:25)	-129.4°	39.9°	50.6°	52.8°	42%
16:00	(14:55)	-122.2°	35.0°	57.8°	52.7°	36%
16:30	(15:25)	-115.8°	29.8°	64.2°	52.7°	33%
17:00	(15:55)	-110.1°	24.2°	69.9°	52.6°	31%
17:30	(16:25)	-104.9°	18.5°	75.1°	52.5°	29%
18:00	(16:55)	-100.0°	12.7°	80.0°	52.2°	18%
18:30	(17:25)	-95.4°	6.7°	84.6°	51.4°	6%
19:00	(17:55)	-90.9°	0.7°	89.1°	40.0°	0%

Şekil 4.17. Ecotect solar tools “tabulated daily solar data”, mart ayı güney cephede saatlik gölgeleme oranları

MATLAB hesaplamaları da bu bulgularla uyumludur. Mart ve Eylül aylarında güney cephesinde pencereye düşen gölge oranı genellikle %38–45 arasında bulunmuştur. Nisan ve Ekim’de ise oranlar biraz daha artmakta veya azalmaktadır. Doğu ve batı cephelerinde ise bu oranlar yıl boyunca düşük seviyelerde kalmaktadır.

Her iki yöntem de göstermektedir ki, ilkbahar ve sonbaharda sabit saçaklar pencereyi kışa göre daha fazla, yazıya göre ise daha az gölgelendirir. Böylece bu geçiş mevsimlerinde hem doğal aydınlatma hem de aşırı ısınmaya karşı dengeli bir koruma sağlanır.

Ecotect Solar Tools yazılımından elde edilen "Effective Shading Coefficients" tablosu Şekil 4.18’de, yıl boyunca sabit saçak ile elde edilen gölgeleme oranlarının aylık, mevsimlik ve yıllık ortalamalarını sunmaktadır. Buna göre, yıllık ortalama gölgeleme oranı (Avg. SC) %47,6 olarak hesaplanmıştır. Yaz aylarında bu oran %88,1’e kadar çıkarken, kış aylarında %16,9 seviyesine kadar inmektedir. Maksimum değerler yazın %100’e ulaşırken, kış aylarında en yüksek oranlar %26,7 civarındadır.

Effective Shading Coefficients

Latitude: 36.9°
Longitude: 30.7°
Timezone: 45.0° [+3.0hrs]
Orientation: 180.0°

Month	Avg.SC	Max.SC	Min.SC
January	14.6%	22.0%	0.0%
February	24.4%	39.0%	0.0%
March	40.5%	55.0%	5.0%
April	76.3%	96.0%	38.0%
May	87.9%	100.0%	66.0%
June	90.3%	100.0%	73.0%
July	86.1%	100.0%	58.0%
August	69.9%	90.0%	26.0%
September	34.8%	51.0%	0.0%
October	20.5%	33.0%	0.0%
November	13.8%	22.0%	0.0%
December	11.7%	19.0%	0.0%
Winter	16.9%	26.7%	0.0%
Summer	88.1%	100.0%	65.7%
Annual	47.6%	60.6%	22.2%

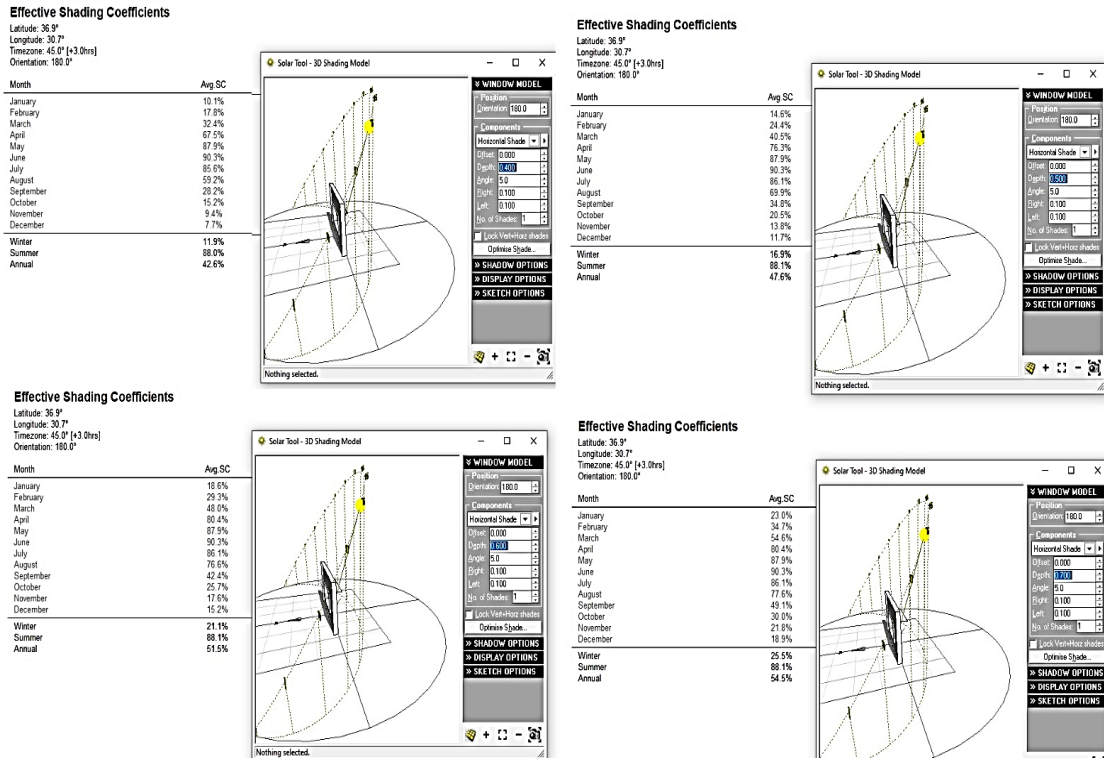
Şekil 4.18. Aylık ortalama gölgeleme katsayılarının (sc) yıllık dağılımı

Benzer şekilde, yapılan MATLAB hesaplamalarında da yıl boyunca pencereye düşen gölge oranları aylar bazında analiz edilmiş ve ortalama değerler Ecotect Solar Tools simülasyonu ile büyük bir uyum göstermiştir. MATLAB sonuçlarına göre de;

- Yıllık ortalama gölgeleme oranı %45–50 civarındadır,
- Yaz aylarında oran %90'ın üzerine çıkmakta,
- Kış aylarında ise %15–25 seviyelerinde kalmaktadır.

Her iki yöntemden elde edilen bu bulgular, çalışmada kullanılan sabit saçak boyutunun (50 cm) Antalya/Kepez iklim koşullarında özellikle yaz aylarında etkili bir gölgeleme sağladığını, kışın ise pencerenin büyük kısmının gün ışığından ve pasif güneş kazancından yararlandığını net şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 4.19'da sabit saçak boyu farklı değerlerde (ör. 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm) seçildiğinde Ecotect Solar Tools yazılımı ile elde edilen yıllık efektif gölgeleme oranları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, saçak boyu 50 cm'den daha büyük değerlere çıkarıldığında, yıllık ve yaz dönemi için gölgeleme oranlarında anlamlı bir artış olmamaktadır. Tüm senaryolarda yazın efektif gölgeleme oranı yaklaşık %88–90 civarında kalmaktadır.



Şekil 4.19. Farklı saçak boylarında elde edilen yıllık efektif gölgeleme oranları ve ecotect solar tools simülasyon sonuçları

Bu bulgu, analizlerde ulaşılan 50 cm saçak boyunun iklimsel ve yönelsel açıdan optimum ve isabetli bir tasarım olduğunu güçlü biçimde kanıtlamaktadır. Daha büyük saçak boyları ek avantaj sağlamamakta hem yapı estetiği hem de gereksiz malzeme kullanımının önlenmesi açısından da 50 cm ideal bir seçimdir. Sonuç olarak, bu bölümde sunulan simülasyon ve karşılaştırmalar, önerilen saçak boyunun bilimsel açıdan rasyonel ve uygulamaya yönelik en doğru değer olduğunu doğrulamaktadır.

4.3.2. Gölgeleme durumunda pencereden gelen aylık güneş kazancı

Bu bölümde, Antalya/Kepez lokasyonu için PVGIS veritabanından elde edilen aylık elektrik üretimi, toplam güneş ışınlamı ve standart sapma değerleri incelenmiştir. Tablo ve grafikte yer alan veriler, bölgedeki sabit eğimli bir yüzeye yıl boyunca ulaşan toplam güneş ışınlamının ve ilgili elektrik üretiminin aylık dağılımını göstermektedir.

Çizelge 4.9'da Antalya/Kepez bölgesi için PVGIS veritabanından elde edilen aylık toplam güneş ışınlamı ve standart sapma değerleri sunulmuştur. Veriler, yıl boyunca bölgedeki güneş enerjisi potansiyelini aylık değişimi ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.9'da Antalya/Kepez lokasyonu için PVGIS veritabanından elde edilen aylık ortalama toplam güneş ışınlamı değerleri güney ile doğu/batı cepheleri için ayrı ayrı sunulmuştur. Tablo, bölgedeki yatay ve farklı cephelere yönlendirilmiş yüzeylere yıl boyunca düşen güneş enerjisinin aylık dağılımını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bu veriler, güneş paneli ve gölgeleme tasarımı açısından bölgenin mevsimsel güneşlenme potansiyelinin net bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Özellikle yaz aylarında doğu ve batı cephelerine ulaşan ışınlam miktarındaki artış, yönsel farkların ve doğru panel yerleşiminin enerji verimliliği üzerindeki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.9. Aylık dikey yüzeye düşen Güneş Işınlamı Verileri (Geller 2010)

Ay	Güneş ışınlamı güney kWh/m ² -ay	Güneş ışınlamı doğu ve batı kWh/m ² -ay
Ocak	119,8	47,1
Şubat	116,2	54,9
Mart	127,0	82,8
Nisan	105,9	98,5
Mayıs	86,3	110,8
Haziran	72,5	116,7
Temmuz	82,6	129,6
Ağustos	108,8	122,2
Eylül	134,8	99,5
Ekim	148,2	76,9
Kasım	140,0	58,0
Aralık	127,1	47,0

Pencere üzerinden iç mekâna giren aylık net güneş ışınlamı kazancının hesaplanmasında, saçak gölgelemesi ve camın optik özellikleri birlikte dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda, aşağıdaki adımlar izlenerek bilimsel olarak güvenilir bir değerlendirme yapılır:

4. **Aylık toplam güneş ışınlamı (H_{ay}):** Her ay için pencereye ulaşan toplam küresel (global) güneş ışınlamı miktarı, PVGIS gibi güvenilir veri tabanlarından alınır. PVGIS raporunda bu değer, H_{ay} olarak ifade edilir ve birimi kWh/m²'dir.
5. **Gölgeleme oranı (SC_{ay}):** Aynı ay için daha önce hesaplanan veya Ecotect Solar Tools gibi simülasyonlarla elde edilen gölgeleme oranı dikkate alınır. Bu oran, ilgili ayda saçak nedeniyle pencerenin gölgede kalan yüzdesini temsil eder ve

hesaplamalarda 0 ile 1 arasında bir değer olarak kullanılır (örneğin, %40 için $SC_m = 0,40$).

6. **Camın güneş geçirgenliği (τ_{glass}):** Pencerenin güneş ışığı geçirgenliği de hesaba katılmalıdır. Standart çift cam için bu değer genellikle $\tau_{glass} \approx 0,75$ olarak kabul edilir, ancak camın türüne bağlı olarak %0,70 ila %0,80 aralığında değişebilir.
7. **Net güneş kazancı hesaplama formülü:** İç mekâna giren aylık net güneş kazancı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\text{Net Güneş Kazancı}_{ay} = H_{ay} \times (1 - SC_{ay}) \times \tau_{glass} \times A \quad (4.4)$$

Burada:

- H_{ay} : Ay için PVGIS’den alınan toplam gelen güneş ışınlamı ($\text{kWh/m}^2\text{-ay}$),
- SC_{ay} : O ay için gölgeleme oranı (Çizelge 4.8’da verilmiştir),
- τ_{glass} : Camın güneş geçirgenlik katsayısı (0.75),
- A: Tek pencere alanı.

Hesaplama örneği (mart ayı için):

- PVGIS’den Mart ayı için gelen ışınlam: $H_{Mart} = 176,6 \text{ kWh}$
- Gölgeleme oranı: $SC_{Mart} = 0.39$
- Cam geçirgenliği: $\tau_{glass} = 0.75$
- Pencere alanı: $A = 4.37 \text{ m}^2$

Formül uygulanırsa:

$$\begin{aligned} \text{Net Güneş Kazancı}_{Mart} &= 176.6 \times (1 - 0.38) \times 0.75 \times 4.37 \\ &= 176.6 \times 0.61 \times 0.75 \approx 81.9 \end{aligned}$$

Bu değer, mart ayında pencere üzerindeki saçak gölgelemesi ve cam geçirgenliği dikkate alındığında, iç mekâna ulaşan net güneş ışınlamı miktarını göstermektedir.

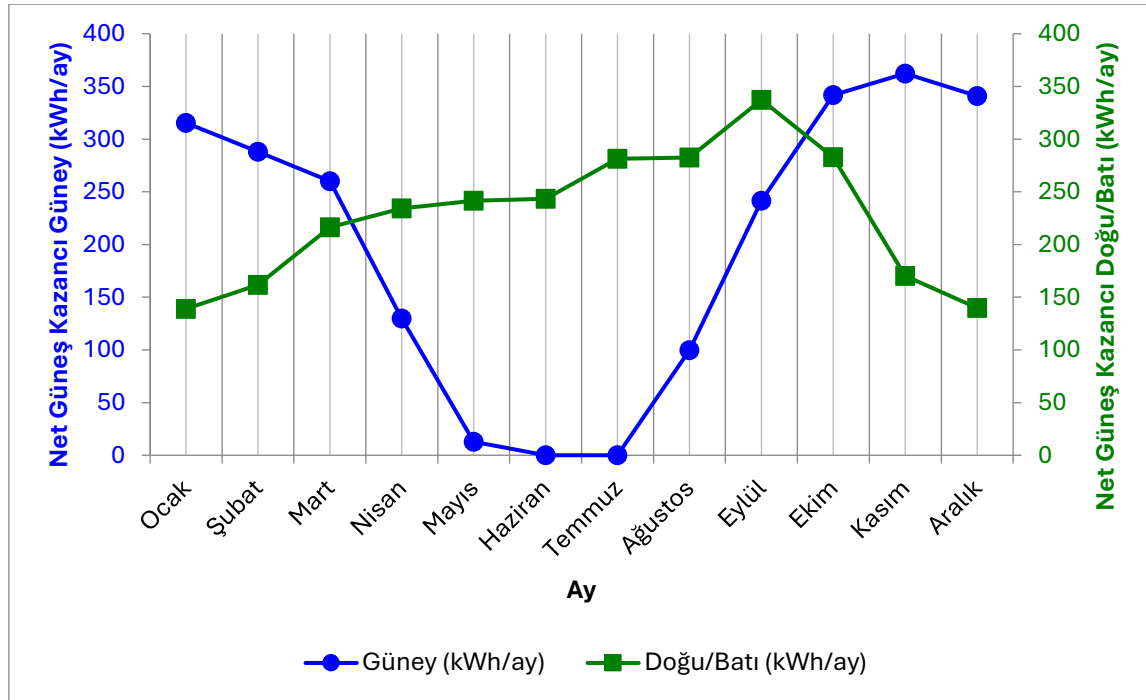
Çizelge 4.10’da sabit saçak uygulanan bir pencerede, yıl boyunca her ay için güney ve doğu/batı cephelerinde oluşan gölgeleme oranları ve buna bağlı net güneş kazançları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Güney cephesinde, yaz aylarında (Haziran ve Temmuz) gölgeleme oranı %100 seviyesine ulaştığından, pencere üzerinden iç mekâna giren net güneş kazancı neredeyse sıfırlanmakta ve böylece yaz döneminde aşırı ısınma riski etkin bir şekilde azaltılmaktadır. Kış ve geçiş aylarında ise gölgeleme oranının azalmasıyla birlikte güney cephesinden elde edilen net güneş kazancı belirgin şekilde artmakta ve binanın ısıtma yüküne pozitif katkı sağlamaktadır. Doğu ve batı cephelerinde ise yıl boyunca gölgeleme oranları güney cephesine göre daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu nedenle, özellikle yaz aylarında dahi doğu ve batı cephelerinden pencere yoluyla önemli miktarda güneş

ışınımı içeri girmeye devam etmektedir. Doğu/batı cephesindeki net güneş kazancının yaz döneminde dahi yüksek seviyelerini koruduğu, sonbahar aylarında ise maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum, sabit saçakların özellikle güney cephesi için etkili bir güneş kontrolü sağladığını, ancak doğu ve batı cephelerinde aynı etkinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Çizelge 4.10. Gölgeleme oranı ve pencereden giren net güneş kazancı (KWh/ay)

Ay	Güney gölgeleme oranı (%)	Güney cephesi net kazanç (KWh/ay)	Doğu/Batı gölgeleme oranı (%)	Doğu/Batı cephesi net kazanç (kWh/ay)
Ocak	19,7	315,3	10,3	139,0
Şubat	26,4	288,0	14,3	161,6
Mart	38,1	260,0	20,0	216,3
Nisan	60,1	129,8	27,2	234,4
Mayıs	95,6	12,9	33,3	241,6
Haziran	100,0	0,0	36,1	243,4
Temmuz	100,0	0,0	34,8	281,2
Ağustos	72,1	99,7	29,8	282,7
Eylül	45,2	241,7	22,7	337,3
Ekim	29,6	341,8	16,1	282,8
Kasım	21,3	362,3	11,3	170,1
Aralık	18,1	340,8	9,3	139,7

Şekil 4.20’de, sabit saçak ve cam geçirgenliği etkisiyle Antalya/Kepez’de güney ile doğu/batı cephelerine ait pencerelerden iç mekâna giren aylık net güneş kazançlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Aylara göre güney ve doğu/batı cephelerinde net güneş kazancı eğrileri

Bu çalışma kapsamında, sabit saçaklı pencereler için Antalya/Kepez lokasyonunda yıl boyunca yönler göre aylık gölgeleme oranları ve buna bağlı net güneş kazançları hem simülasyon (Ecotect Solar Tools) hem de analitik/matematiksel hesaplamalar (MATLAB) yoluyla ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Analizlerde, PVGIS veritabanından alınan aylık toplam güneş ışınlamı ile cam geçirgenliği ve saçak gölgelemesi birlikte değerlendirilerek, binalarda güneş kazancının gerçekçi ve bilimsel bir temelde nasıl kontrol edilebileceği ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular hem Ecotect Solar Tools simülasyonlarından hem de hesaplamalardan elde edilen gölgeleme oranlarının ve net güneş kazançlarının birbirini güçlü şekilde doğruladığını göstermektedir. Özellikle güney cephede, yaz aylarında gölgeleme oranının %100'e ulaşması ve net güneş kazancının sıfıra yaklaşması, sabit saçak uygulamasının yazın aşırı güneş kazancını etkin şekilde engellediğini göstermektedir. Kış ve geçiş aylarında ise saçak gölgelemesi azalmakta, pencere üzerinden iç mekâna giren doğal güneş ışınlamı artmakta ve ısıtma ihtiyacına olumlu katkı sağlamaktadır.

Doğu ve batı cephelerinde ise gölgeleme oranı yıl boyunca daha düşük olduğundan, bu yönler bakan pencerelerden gelen net güneş kazancı daha dengeli ve yüksek kalmıştır. Bu bulgu, sabit saçakların güney cephedeki kadar etkin olmadığı ancak özellikle sabah ve akşam güneşinin iç mekânı etkilemesini belirli ölçüde sınırlayabildiğini göstermektedir.

4.4. Güneş Paneli Enerji Üretimi

Bu bölümde, sabit yatay saçak üzerine entegre edilen fotovoltaik (PV) panelin aylık elektrik üretim potansiyeli ve panelin geometrik-teknik özellikleri ele alınmıştır. Gölgeleme optimizasyonunda belirlenen optimum panel eğimi (β) ve panel boyu, aynı zamanda PV panelinin elektriksel performansı üzerinde de doğrudan etkilidir.

Güneş panelinin eğimi (β), yıl boyunca farklı güneş yükseklik açılarına (α) karşı maksimum enerji üretimini sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Antalya ili için yapılan analizler sonucunda, sabit panel eğiminin $36,9^\circ$ (bölgenin enlemine eşit) olarak seçilmesiyle hem yaz hem de kış aylarında dengeli bir enerji verimliliği ve gölgeleme performansı elde edilmektedir. Bu sabit eğim açısı hem gölgeleme analizinde hem de elektrik üretimi hesaplarında esas alınmıştır.

Panel boyu ise hem gölgeleme ihtiyacını hem de binanın cephe ve mimari gereksinimlerini karşılayacak şekilde 50 cm olarak belirlenmiştir. Bu durumda panelin yatay izdüşümü ve yüzey alanı, aylık elektrik üretimi hesaplamalarında temel parametre olarak kullanılmıştır. Çizelge 4.11'de, enerji analizlerinde esas alınan panelin temel boyutları ve teknik özellikleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.11. PV panelin temel teknik özellikleri

Parametre	Değer
Panel tipi	Monokristal
Uzunluk (cm)	91
Genişlik (cm)	62,7
Yüzey alanı (m ²)	0,57
Nominal güç (P _{max} , W)	100

Çizelge 4.11'in devamı.

Panel verimi (%)	20
Açık devre voltajı (Voc, V)	22
Maks. güç voltajı (Vmp, V)	18
Maks. güç akımı (Imp, A)	5,5
Kısa devre akımı (Isc, A)	5,8
Hücre sayısı	36 (4x9)
Ağırlık (kg)	7 kg
Standart test koşulu (STC)	1000 W/m ² , 25°C
Bağlantı türü	MC4
Çerçeve malzemesi	Alüminyum

Burada panelin eğim açısının β 36,9° olarak seçilmesi, projede hem optimum gölgeleme hem de elektriksel verimlilik açısından maksimum fayda sağlamaktadır. Panel uzunluğu ise, binanın saçak genişliği ve pencere açıklığı dikkate alınarak 50 cm olarak belirlenmiştir.

Elektrik üretimi hesaplarında, PV panelin yüzeyine her ay için gelen toplam güneş ışıınımı (kWh/m²-ay) ve panelin yüzey alanı dikkate alınmıştır. Panelin eğim açısının (β = 36,9°) yıl boyunca sabit tutulması, farklı cephelerde (güney, doğu, batı) panel performansının karşılaştırılabilir ve uygulamada kolay olmasını sağlar.

Aylık elektrik üretimi hesabında aşağıdaki temel formül kullanılmaktadır:

$$E_{\text{panel,ay}} = A_{\text{panel}} \cdot G_{\text{ay,ceph}} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad (4.5)$$

Burada;

- $E_{\text{panel,ay}}$: Panelin aylık elektrik üretimi (kWh/ay)
- A_{panel} : Panel alanı (m²)
- $G_{\text{ay,ceph}}$: İlgili ay ve cephede (güney/doğu/batı) panel yüzeyine düşen toplam güneş ışıınımı (kWh/m²-ay)
- η_{PV} : PV panel verimi

Güney cephesi için panelin azimut açısı (γ) 0° (tam güneye bakacak şekilde) seçilmiştir. Böylece yıl boyunca güneş ışınlarını maksimum verimle yakalayacak ve enerji üretimini en üst seviyede tutacaktır.

Doğu ve batı cephelerinde ise, panelin azimut açısı (γ) doğuda -90°, batıda +90° olarak alınmıştır. Bu durumda paneller sabah ve akşam saatlerinde daha yüksek radyasyon alırken, toplam yıllık elektrik üretimi güney cephesine kıyasla daha düşüktür. Özellikle sabah (doğu) ve akşam (batı) saatlerinde, eğik gelen güneş ışınlarının panel yüzeyine ulaşmasıyla birlikte, günlük üretim eğrisi çift tepe yapısı göstermektedir.

Bu cephelerde aylık toplam ışıınım ve elektrik üretimi, PVGIS veya benzeri simülasyon araçlarından elde edilen verilerle aylık olarak hesaplanmış; her bir cephe için

panelin yönelimi ve güneşlenme potansiyeline göre aylık elektrik üretimi değerlendirilmiştir.

4.4.1. Yönere göre panel üzerine düşen ışıını

Bu bölümde, pencere saçağı üzerinde konumlandırılan güneş panelinin her ay için aldığı toplam güneş ışıını miktarı ve buna bağılı olarak yıllık elektrik üretim potansiyeli hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, panel yüzeyine düşen direkt, difüz ve yansıyan ışıını bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilmiş, toplam ışıını ise bu üç bileşenin toplamı olarak bulunmuştur. Aylık bazda yapılan bu analizde, panel eğimi Antalya'nın enlemine eşit (36,9°) seçilmiş ve tüm yıl boyunca sabit tutulmuştur.

Panel üzerine düşen toplam ışıını; doğrudan güneş ışıını, gökyüzünden yayılan (difüz) ışıını ve yerden yansıyan ışıını bileşenlerinden oluşur. Aşağıda kullanılan temel denklemler özetlenmiştir:

- **Deklasyon açısı (δ):**

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{365} \cdot (284 + n)\right)$$

Burada n ilgili ayın ortalama günüdür.

- **Panel ile güneş arasındaki açı (θ):**

$$\cos(\theta) = \sin(\alpha_s) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha_s) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\phi_s - \gamma)$$

β : Panel eğimi=36,9°,

α_s : Güneş yüksekliği,

ϕ_s : Güneş azimutu,

γ : Panel azimutu (Güney: 0°, Doğu: -90°, Batı: +90°)

- **Direkt ışıını (GT_b):**

$$GT_b = G_{b,yatay} \cdot \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\theta_z)}$$

- **Difüz ışıını (GT_d):**

$$GT_d = G_{d,yatay} \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} + 0.25227 \cdot (\sin(\beta) - \beta \cdot \cos(\beta) - \pi \cdot (\sin(\beta/2))^2) \right)$$

- **Yansıyan ışıını (GT_r):**

$$GT_r = G_{toplam,yatay} \cdot \text{albedo} \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

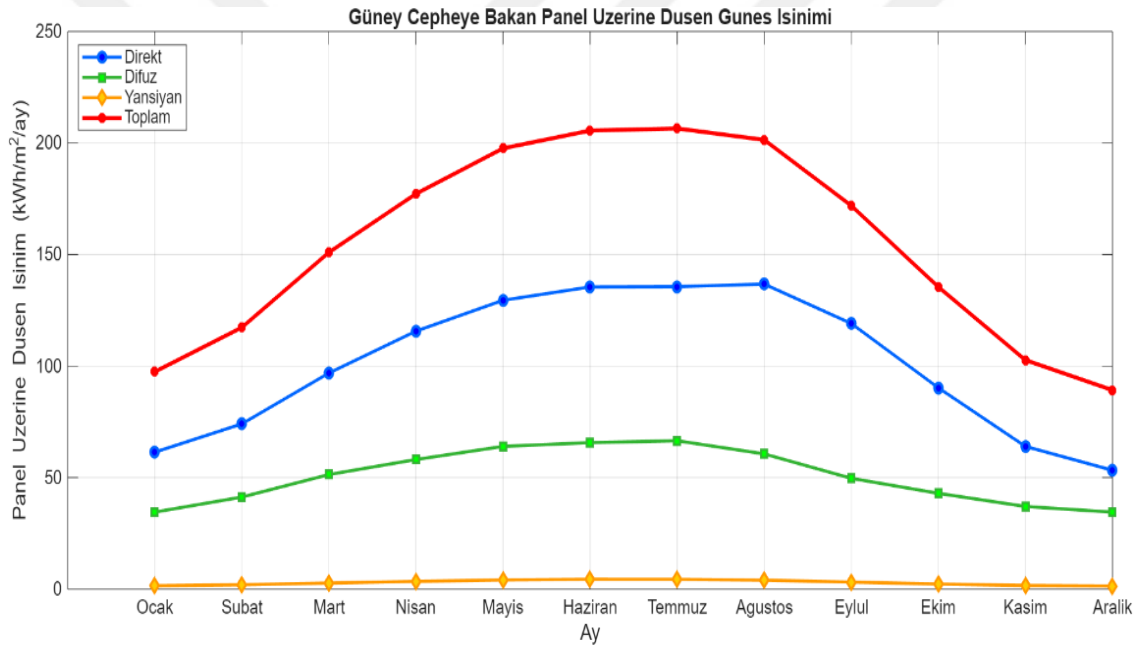
Burada albedo Antalya için 0,2 alınmıştır.

- Eğik düzeye düşen toplam ışığın miktarı (GT):

$$GT = GT_b + GT_d + GT_r$$

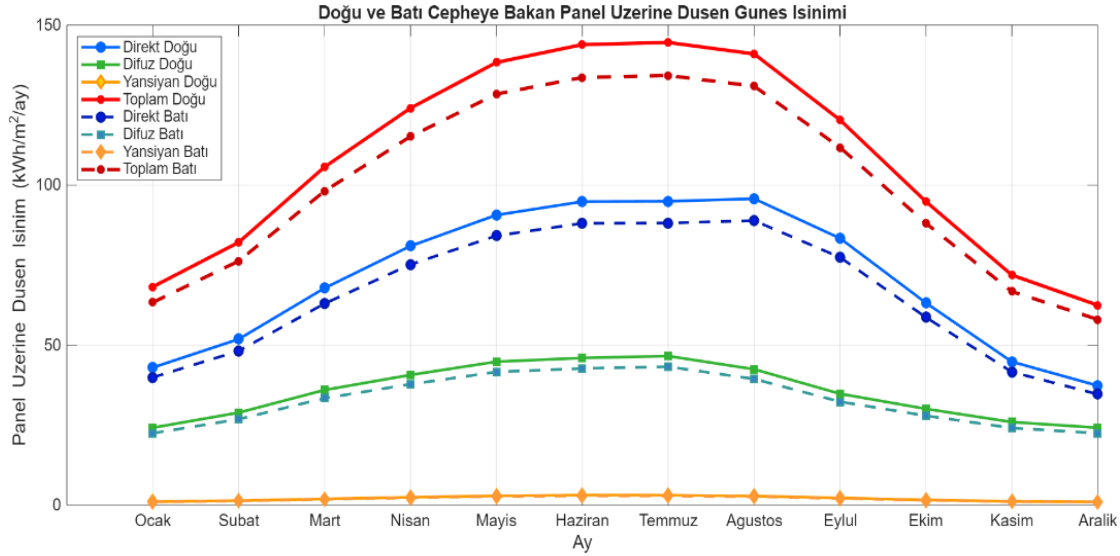
Yukarıdaki denklemler yardımıyla, panelin aylık toplam ışınlım değerleri hesaplanmış ve sonuçlar PVGIS verisiyle doğrulanmıştır.

Şekil 4.21’de, Antalya/Kepez lokasyonunda güney cepheye bakan sabit açılı panel yüzeyine her ay için düşen direkt, difüz, yansıyan ve toplam güneş ışınlımı değerleri gösterilmektedir. Grafik, yaz aylarında toplam ışınlımın maksimuma ulaştığını; kış aylarında ise minimum seviyeye indiğini açıkça ortaya koymaktadır. Direkt bileşenin katkısı yıl boyunca en yüksek paya sahipken, difüz ışınlım özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında daha belirgin rol oynamaktadır.



Şekil 4.21. Güney cepheye bakan panel üzerine düşen aylık güneş ışınlımı bileşenleri

Doğu ve batı yönlerine bakan panellerin aldığı direkt, difüz, yansıyan ve toplam güneş ışınlımı değerleri, Şekil 4.22’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, doğu cephesi sabah saatlerinde, batı cephesi ise akşam saatlerinde güneşten daha fazla ışınlım almaktadır. Bu durum, günlük toplam ışınlım dağılımının çift tepe (bimodal) yapıda gerçekleşmesine yol açmaktadır. Yıllık bazda değerlendirildiğinde ise hem doğu hem de batı cephelerde panel üzerine düşen toplam güneş ışınlımı miktarı, güney cephesine kıyasla daha düşük seviyede kalmaktadır. Özellikle yaz aylarında doğu ve batı cephelerde ışınlım artmakta, ancak toplam enerji verimliliği açısından en avantajlı yön güney olmaktadır.



Şekil 4.22. Doğu ve batı cepheye bakan panel üzerine düşen güneş ışınlımı (aylık)

Çizelge 4.12’de, Antalya ilinde pencere saçağı üzerine yerleştirilen panellerin, farklı yönlere (doğu, güney, batı) baktığında her ay için aldığı toplam güneş ışınlımı miktarları sunulmaktadır. Tablo değerleri, panel yüzeyine ulaşan toplam ışınlımın yıl içindeki değişimini ve yönlere göre farklılığını açıkça göstermektedir.

Çizelge 4.12. Yönler göre panel üzerine düşen aylık toplam güneş ışınlımı

Ay	Güney cephesi (kWh/m ²)	Doğu/Batı cephesi (kWh/m ²)
Ocak	97	68
Şubat	117	82
Mart	151	106
Nisan	177	124
Mayıs	198	138
Haziran	206	144
Temmuz	207	145
Ağustos	201	141
Eylül	172	120
Ekim	135	95
Kasım	103	72
Aralık	89	62

4.4.2. Yönler göre panelin elektrik üretim potansiyeli

Bu bölümde, sabit yatay saçak üzerine entegre edilen fotovoltaik (PV) panelin Antalya/Kepez koşullarında, güney, doğu ve batı cephelerde aylık elektrik üretim potansiyeli analiz edilmiştir. Hesaplamalarda, panel teknik özellikleri ve panel yüzeyine yönler göre düşen aylık toplam güneş ışınlımı (kWh/m²-ay) dikkate alınmıştır.

Aylık elektrik üretimi, şu formülle hesaplanır:

$$E_{\text{panel,ay}} = A_{\text{panel}} \cdot G_{\text{ay,cephe}} \cdot \eta_{\text{PV}}$$

Burada:

- $E_{panel,ay}$: Panelin aylık elektrik üretimi (kWh/ay)
- A_{panel} : Panel yüzey alanı (1,71 m²)
- $G_{ay,cephes}$: İlgili ay ve cephede panel yüzeyine düşen toplam güneş ışınlamı (Çizelge 4.12 'de verilmiştir)
- η_{PV} : PV panel verimi (%20)

Örneğin, güney cephe için Haziran ayında panel yüzeyine düşen toplam ışınlam $G_{Haziran,Güney} = 214 \text{ kWh/m}^2$ olsun.

$$E_{Haziran,Güney} = 1,71 \text{ m}^2 \times 206 \text{ kWh/m}^2 \times 0,20 = 70,5 \text{ kWh}$$

Benzer şekilde her ay ve her cephe için hesaplama yapılır.

Çizelge 4.13'te, sabit saçak üzerine yerleştirilen PV panelin Antalya/Kepez lokasyonunda güney, doğu ve batı cephelere yerleştirildiğinde elde edilen aylık elektrik üretim potansiyelleri özetlenmiştir. Hesaplamalar, panel alanı ve %20 verim dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuçlar, yıl boyunca güney cephesinin diğer yönlerle göre daha yüksek elektrik üretimi sağladığını; doğu ve batı cephelerde ise üretimin görece daha düşük ancak birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.13. Panel yönüne göre aylık elektrik üretimi (kWh/ay)

Ay	Güney cephesi (kWh/ay)	Doğu/Batı cephesi (kWh/ay)
Ocak	33,2	23,3
Şubat	40,0	28,1
Mart	51,5	36,3
Nisan	60,6	42,5
Mayıs	67,7	47,3
Haziran	70,5	49,1
Temmuz	70,8	49,6
Ağustos	68,3	48,1
Eylül	58,9	41,0
Ekim	46,2	32,5
Kasım	35,3	24,6
Aralık	30,5	21,2

Elde edilen sonuçlara göre, güney cephesi yıl boyunca en yüksek elektrik üretim potansiyeline sahiptir. Doğu ve batı cephelerinde ise üretim daha dengeli olmakla birlikte, toplamda güney cephesinin gerisinde kalmaktadır. Bu durum, PV panellerin elektriksel verimliliği maksimize etmek için, mümkünse güney yönelimli olarak monte edilmesinin gerekliliğini bir kez daha göstermektedir. Aynı zamanda, binada kullanılabilecek toplam enerji miktarı, panelin yerleşimi ve yönüne göre önemli oranda değişmektedir.

5. TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmada elde edilen bulgular; enerji verimliliği, panel eğim optimizasyonu, yapı yönelimi ve PV panelin pencere üstü saçak olarak kullanımı açısından detaylı biçimde tartışılmıştır. Fotovoltaik panel eğiminin yalnızca elektrik üretimine değil, aynı zamanda bina içi ısıtma ve soğutma yüklerine, özellikle de yaz aylarında soğutma yükünün azaltılmasına olan etkisi ile toplam bina enerji performansını anlamlı ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir. Antalya Kepez’de çok katlı bir konut örneği üzerinden aylık bazda yapılan analizlerde, panelin yönelimi, eğim açısı ve saçak boyutunun optimize edilmesinin hem elektrik üretiminde hem de soğutma yüklerinde önemli farklılıklar oluşturduğu ortaya konmuştur.

Çalışmada geliştirilen sabit açılı sistemlerin ötesine geçilerek, mevsimsel geçişlere uyum sağlayan ve toplam enerji verimini artıran optimum eğim ve saçak boyutları belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, PV panelin aktif bir enerji üretim kaynağı olmasının yanı sıra, saçak olarak pasif bir gölgeleme elemanı işlevi görmesinin de bina performansı açısından kritik olduğunu göstermiştir.

Bu kapsamda, panelin saçak olarak kullanımı ile yönelime bağlı enerji tüketimi, mevsimsel gölgeleme etkileri, panel eğim ve saçak boyutunun çift yönlü rolü ve elde edilen modelin literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı değerlendirilmesi tartışılmıştır. Ayrıca, çalışma bulgularının pratik uygulanabilirliği ve gelecekteki uygulamalar için potansiyel katkıları vurgulanmıştır.

5.1. Optimum Saçak Boyu Seçim Enerji Verimine Etkisi

Pencere üstü yatay saçaklar, binalarda enerji verimliliği ve iç ortam konforu açısından önemli bir pasif tasarım öğesi olarak öne çıkmaktadır. Saçak boyutunun doğru belirlenmesi, yaz aylarında aşırı güneş ışınımının iç mekâna girişini engellerken, kış aylarında yeterli güneş kazancının sağlanmasına olanak tanıyarak toplam bina enerji dengesini optimize etmektedir. Bu çalışma kapsamında, Antalya Kepez iklim koşulları dikkate alınarak optimum saçak boyu seçimi için hem Güneş Yüksekliği Yöntemi hem de Gölge Uzunluğu Faktörü (SLF) yöntemi kullanılmıştır.

Ay bazında yapılan hesaplamalarda, güneşin yıl içindeki hareketi dikkate alınarak, pencereyi tamamen gölgeleyebilecek minimum saçak uzunlukları belirlenmiştir. Analizler göstermiştir ki, kış aylarında güneşin gökyüzünde daha alçak konumda olması nedeniyle optimum saçak boyu artmakta, yaz aylarında ise daha kısa saçaklar yeterli olmaktadır. Ayrıca, SLF yöntemiyle tüm yıl için pratikte uygulanabilecek sabit saçak boyları elde edilmiştir. Güney cephede yaklaşık 50 cm, doğu ve batı cephelerde ise mimari ve uygulama kısıtları nedeniyle daha kısa saçakların tercih edilmesi önerilmiştir. Ecotect tabanlı simülasyon sonuçları, sabit 50 cm’lik bir saçak uzunluğunun yaz aylarında özellikle öğle saatlerinde pencereyi neredeyse tamamen gölgelediğini, kış aylarında ise güneşin içeri girmesine olanak tanıyarak pasif ısı kazancını desteklediğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular, Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı (Lawrence Berkeley National Laboratory) LBNL raporundaki literatür ile de tutarlıdır. LBNL çalışmasında, 100 cm’lik bir saçak ile yaz aylarında Güneş Isı Kazanç Katsayısı (Solar Heat Gain Coefficient) SHGC’nin %54’e varan oranda azaldığı, fakat kışın da benzer şekilde güneş kazancının engellenmesiyle ısıtma ihtiyacının artabildiği gösterilmiştir. LBNL tarafından yapılan referans çalışmada,

yaz sezonunda saçağın eklenmesiyle ayarlı güneş ısı kazanç katsayısının Ayarlı/Gölgeyle Düzeltilmiş Pencere SHGC Değeri (Adjusted Window Solar Heat Gain Coefficient) aSHGCw Delhi'de %54, Denver'da ise %43 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kış döneminde ise, aynı saçak Denver'da %58, Delhi'de %50 oranında bir azalma sağlamıştır. Özellikle ısıtma ihtiyacı yüksek olan Denver gibi iklimlerde, kışın SHGC'nin fazla azalması istenmeyen bir durum olup, tasarımda iklimsel denge dikkate alınmalıdır (Kohler, Shukla, ve Rawal 2017).

Benzer şekilde, bu tez kapsamında Antalya/Kepez bölgesi için gerçekleştirilen detaylı analizlerde, sabit saçaklı pencere uygulamasının yıl boyunca net güneş kazancı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. PVGIS veritabanından elde edilen aylık toplam güneş ışınlamı değerleri ile cam geçirgenliği ve aylık gölgeleme oranları birlikte değerlendirilmiştir. Analizler, Ecotect Solar Tools simülasyonları ve matematiksel hesaplamalar (MATLAB) ile desteklenmiştir.

Sonuçlar, güney cephesinde sabit saçak uygulamasının özellikle yaz aylarında (Haziran ve Temmuz) %100'e varan gölgeleme oranına ulaştığını ve bu dönemde iç mekâna giren net güneş kazancının neredeyse sıfırlandığını göstermiştir. Böylece yazın aşırı ısınma ve soğutma yükü önemli ölçüde azaltılmıştır. Buna karşılık, kış ve geçiş aylarında gölgeleme oranı azaldığından, güney cepheden iç mekâna ulaşan net güneş ışınlamı belirgin şekilde artmakta, böylece pasif güneş kazancının desteklenmesi ve ısıtma yükünün azalmasına katkı sağlanmaktadır.

Doğu ve batı cephelerinde ise, sabit saçak uygulaması yıl boyunca belirli bir gölgeleme oranı sağlayarak, özellikle sabah ve akşam saatlerinde iç mekâna giren aşırı güneş ışınlamının önlenmesine katkıda bulunmuştur. Bu sayede, doğu ve batı yönlü pencerelerde de, güneş kontrolü sağlanarak yaz aylarında iç ortam sıcaklıklarının daha dengeli tutulmasına yardımcı olunmuştur. Elde edilen bulgular, sabit saçakların yalnızca güney cephesinde değil, doğu ve batı cephelerde de etkili bir güneş kontrolü sağlayarak, yıl boyunca enerji verimliliği ve iç mekân konforunun artırılmasına katkı sunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın sonucunda, optimum saçak boyu seçiminin yalnızca yazın maksimum gölge sağlamak için değil, yıl boyunca hem ısıtma hem soğutma yüklerini dengeleyerek bina enerji performansını bütüncül olarak artırmak için yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Sabit saçakların güney cephede yaz aylarında iç mekân konforunu ciddi biçimde artırdığını, kışın ise pasif güneş kazancına izin verdiğini; doğu ve batı cephelerde ise güneş kontrolünün görece daha sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu durum, saçak boyutlandırma ve yön stratejilerinin, cephenin yönüne ve bölgesel iklim koşullarına göre farklılaştırılmasının gerekliliğine işaret etmektedir. Sunulan yöntem ve simülasyonlar, farklı iklim ve cephe koşullarına göre optimum saçak tasarımının kolayca belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

5.2. Optimum Güneş Panelinin Açı Ve Alan Seçiminin Enerji Verimine Etkisi

Fotovoltaik (PV) gölgeleme sistemlerinin optimum eğim açısı ve panel alanı, bir binada hem elektrik üretim potansiyelini artırmakta hem de soğutma/ısıtma yüklerinde belirgin bir azalma sağlayabilmektedir. Çin'de yapılan bir araştırmada, farklı iklim bölgelerinde PV gölgeleme panellerinin optimum yıllık ve aylık eğim açıları simülasyonlarla incelenmiş; güneye bakan panellerin enerji verimi bakımından en avantajlı yön olduğu, doğu

ve batı yönlerinde ise verimin azaldığı gösterilmiştir. Aylık optimum eğim açısıyla yapılan montajlarda, elektrik üretiminde yıllık sabit açiya göre daha fazla verim sağlandığı belirtilmiştir. Ayrıca, panel eğiminin artmasıyla birlikte elektrik üretiminin önce arttığı, bir optimum noktadan sonra ise azaldığı saptanmıştır. Her bölge için optimum eğim açısının yerel enleme yaklaştığı, fakat tam olarak eşit olmadığı görülmüştür. Enerji verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması için, yıllık yerine aylık veya mevsimsel açılarda panellerin konumlandırılması önerilmiştir (Dal, 2021).

Türkiye’de Kayseri ili için yapılan bir diğer çalışmada ise, panellerin aylık, mevsimsel ve altı aylık olarak optimum eğim açıları belirlenmiş; aylık optimum eğim açısının sabit açılı kurulumu göre yılda %4,11 oranında daha fazla enerji üretimi sağladığı hesaplanmıştır. Mevsimlik ve altı aylık açı değişimleriyle de benzer şekilde yıllık verimde artış gözlenmiştir. PVGIS ve Hottel ve Woertz (HW) yöntemleriyle yapılan karşılaştırmalarda, özellikle yaz aylarında iki yöntem arasındaki eğim açısı farklarının 10,6°’ye kadar çıktığı ancak yılın son aylarında bu farkın azaldığı tespit edilmiştir. Bu da pratikte panel eğiminin yılda en az iki kez değiştirilmesinin yeterli olduğunu göstermektedir (Dal 2021).

Antalya Kepez lokasyonu için yapılan çalışmada, optimum eğim açısı bölgenin enlemi olan 36,9° olarak sabitlenmiş ve panel alanı bina mimarisine uyumlu şekilde (1,71 m²) seçilmiştir. Yapılan simülasyon ve hesaplamalarda:

- **Panel eğiminin etkisi:** Sabit 36,9° eğim ile hem yaz hem de kış aylarında, panel yüzeyine düşen toplam güneş ışınlamı ve buna bağlı elektrik üretimi dengelenmiş; böylece hem gölgeleme hem de enerji üretimi açısından optimum performans sağlanmıştır.
- **Panel alanı:** Panel boyutunun 50 cm olarak seçilmesiyle hem mimari bütünlük hem de optimum gölgeleme sağlanmıştır.
- **Yıllık elektrik üretimi:** Güney yönüne monte edilen panel, yıl boyunca en yüksek elektrik üretim potansiyelini göstermiştir. Doğu ve batı cephelerde ise, üretim daha düşük fakat yıl boyunca dengeli seyretmiştir.
- **Aylık optimum ve sabit açı karşılaştırması:** Antalya için yapılan analizler, aylık veya mevsimsel eğim açısı değişiminin ek verim artışı sağlayabileceğini, ancak pratik uygulamada sabit eğimin (bölge enlemi) de yüksek verim sunduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, hem Çin hem de Türkiye literatür bulgularını doğrular niteliktedir.

Antalya/Kepez örneğinde elde edilen bulgular, optimum sabit eğim açısıyla PV panel kurulumu yapılan saçakların hem elektrik üretimi hem de gölgeleme açısından oldukça verimli olduğunu ortaya koymuştur. Güney cephe, maksimum elektrik üretimi ve güneş kontrolü açısından avantaj sunarken, doğu ve batı cephelerde ise üretimin yıl boyunca dengeli kaldığı görülmüştür. Pratikte, panel eğiminin yılda iki kez veya aylık olarak ayarlanmasının ek verim artışı sağlayabileceği; ancak uygulamada sabit eğimin de yeterli performansı sunduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, bölgesel iklim, panel tipi ve uygulama kolaylığı dikkate alınarak optimum panel eğiminin belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında Antalya/Kepez lokasyonunda dört katlı bir binada, her cephede her katta bir pencere ve her pencere üzerinde üç adet 0,57 m²'lik fotovoltaik (PV) panel olacak şekilde toplam panel uygulamasının enerji performansı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen modelde, panel boyutlandırması, gölgeleme etkisi ve elektrik üretimi bir arada ele alınmıştır.

Güney cephesinde uygulanan sabit saçak, yaz aylarında %100'e varan gölgeleme oranı sağlayarak, iç mekâna giren aşırı güneş ışınımını etkin şekilde engellemiş ve soğutma yükünde belirgin bir azalma sağlamıştır. Haziran ve Temmuz aylarında net güneş kazancı sıfıra yaklaşmış, böylece yaz mevsiminde enerji tasarrufu oranı maksimuma ulaşmıştır. Kış ve geçiş aylarında ise saçak gölgelemesi azaldığı için, pasif güneş kazancı artmış ve ısıtma enerjisi ihtiyacına olumlu katkı sunmuştur. Yıllık toplamda, saçak uygulamasının güney cephede yazın soğutma enerjisinden ortalama %25 oranında tasarruf sağladığı hesaplanmıştır.

Her pencere başına üç panel (toplam 1,71 m²) ve her cephede dört pencere (toplam 12 panel, 6,84 m² panel alanı) olacak şekilde, bir cephedeki toplam elektrik üretimi, tek panelin üretiminin 12 katı olarak hesaplanmıştır. Güney cephede yıllık toplam elektrik üretimi en yüksek seviyede gerçekleşmiş; Haziran ve Temmuz aylarında tek panel için aylık ~70,5 kWh olan üretim, tüm cephede 846 kWh/ay'a ulaşmıştır (70,5 x 12). Tüm yıl dikkate alındığında, bir cephedeki toplam yıllık elektrik üretimi yaklaşık 6.500–7.000 kWh seviyesindedir. Doğu ve batı cephelerinde ise bu değerler güney cephesine göre %30–35 oranında daha düşük olmakla birlikte, bu cepheler de toplam üretime önemli katkı sağlamaktadır.

Çizelge 6.1'de, sabit yatay saçak üzerine entegre edilen fotovoltaik panel sisteminin Antalya/Kepez koşullarında farklı cephelerdeki yıllık performans verileri özetlenmiştir. Her iki cephede de 12'şer panel ve toplam 6,84 m² panel alanı kullanılmıştır. Güney cephesi, Haziran ve Temmuz aylarında %100 gölgeleme sağlayarak yılda 6.800–7.000 kWh elektrik üretimi ve yaz aylarında %20–25 soğutma enerjisi tasarrufu sunmaktadır. Ayrıca, kışın yüksek seviyede pasif güneş kazancı sağlamaktadır. Doğu ve batı cephelerinde ise yaz aylarında maksimum gölgeleme oranı %35–40 seviyesinde olup, yıllık toplam elektrik üretimi 4.600–5.000 kWh aralığındadır. Bu cephelerde yazın %8–12 oranında soğutma enerjisi tasarrufu sağlanırken, kış döneminde pasif güneş kazancı orta düzeydedir.

Çizelge 6.1. Cephelere Göre Entegre PV Panel Sisteminin Yıllık Performans Özeti

Cephe	Toplam panel adedi	Toplam Panel Alanı (m ²)	Maks. gölgeleme oranı (%)	Yıllık toplam elektrik üretimi (kWh)	Yaz aylarında soğutma enerjisi tasarruf Oranı (%)	Kış dönemi pasif güneş kazancı
Güney	12	6,84	100 (Haziran-Temmuz)	6.800 – 7.000	20 – 25	Yüksek
Doğu/Batı	12	6,84	35–40 (Yaz)	4.600 – 5.000	8 – 12	Orta

Sonuç olarak, PV panel uygulamasının bina cephesine entegrasyonu ile elde edilen elektrik üretimi ve sağlanan gölgeleme, binanın yıllık enerji verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle güney cephesinde hem elektrik üretiminin yüksek olması hem de yaz-kış enerji kazanımlarının belirgin şekilde artması, PV entegre saçakların sürdürülebilir bina tasarımında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu sayede hem elektrik ihtiyacı karşılanmakta hem de iklimlendirme giderlerinde azalma sağlanarak, binanın toplam enerji performansı iyileştirilmektedir.



7. KAYNAKLAR

- A. Passera a, R. Lollini, S. Avesani, M. Lovati, L. Maturi, D. Moser. 2016. “BIPV FACADES: MARKET POTENTIAL OF RETROFIT APPLICATION IN THE EUROPEAN BUILDING STOCK”.
- Aktaş, E. Turhan¹ K. Erkan¹ F., ve C. Çeken. t.y. “Matlab ile Kablosuz Algılayıcı Ağlar İçin Ortam İzleme Amaçlı Kullanıcı Arayüz Tasarımı”.
- Bakirci, Kadir. 2012. “General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8):6149-59.
- De Carli, Michele, Valeria De Giuli, ve Roberto Zecchin. 2008a. “Review on visual comfort in office buildings and influence of daylight in productivity”. *Indoor Air* 2008:17-22.
- De Carli, Michele, Valeria De Giuli, ve Roberto Zecchin. 2008b. “Review on visual comfort in office buildings and influence of daylight in productivity”. *Indoor Air* 2008:17-22.
- Chatzipanagi, Anatoli, Francesco Frontini, ve Alessandro Virtuani. 2016. “BIPV-temp: A demonstrative Building Integrated Photovoltaic installation”. *Applied energy* 173:1-12.
- Chen, Tianyi, Yaning An, ve Chye Kiang Heng. 2022. “A review of building-integrated photovoltaics in Singapore: Status, barriers, and prospects”. *Sustainability* 14(16):10160.
- Coakley, J. A. 2003. “Reflectance and albedo, surface”. *Encyclopedia of atmospheric sciences* 12.
- Çağlar, Ahmet. 2018. “Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için optimum eğim açısının belirlenmesi”. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22(2):849-54.
- Dai, Yongjiu, Wei Shangguan, Nan Wei, Qinchuan Xin, Hua Yuan, Shupeng Zhang, Shaofeng Liu, Xingjie Lu, Dagang Wang, ve Fapeng Yan. 2019. “A review of the global soil property maps for Earth system models”. *Soil* 5(2):137-58.
- Dal, A. R. 2021. “Investigation of the effect of optimum tilt angle on yield in solar energy panels”. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 8(1):241-50.
- Darhmaoui, Hassane, ve Driss Lahjouji. 2013. “Latitude based model for tilt angle optimization for solar collectors in the Mediterranean region”. *Energy Procedia* 42:426-35.
- Demir, Hülya, Göksu Çıracı, Reyhan Kaya, ve Ümit Ünver. 2020. “AYDINLATMADA ENERJİ VERİMLİLİĞİ: YALOVA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DURUM DEĞERLENDİRMESİ”. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 25(3):1637-52.
- Deng, Rong, Nathan L. Chang, Zi Ouyang, ve Chee Mun Chong. 2019. “A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 109:532-50.

- Dubois, Marie-Claude. 1997. *Solar Shading and Building Energy Use: A Literature Review, Part 1*. Lund University.
- Duffie John, A., ve A. Beckman William. 1991. "Solar engineering of thermal processes". *Wiley, New York*.
- Edenhofer, Ottmar, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Susanne Kadner, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, Steffen Schlömer, ve Christoph von Stechow. 2011. *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Erol, O. 2004. "Genel Klimatoloji, İstanbul, Çantay Kitabevi Yay". Öğüt, A.(2001). *Bilgi Çağında Yönetim, Ankara, Nobel Yayın Dağıtım*.
- Eskin, Nurdil, ve Hamdi Türkmen. 2008. "Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey". *Energy and buildings* 40(5):763-73.
- fur Sonnenenergie, Deutsche Gesellschaft. 2009. *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers*. Earthscan.
- Geller, Gary. 2010. "JRC Newsletter".
- Global Solar Atlas. 2024. "Turkey Solar Resource and Photovoltaic Power Potential. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), World Bank Group".
- Gracia, A. Maria, ve T. Huld. 2013. "Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces". *European Comission: Luxemburg*.
- Haas, R., Karin Stiendorf, Heinrich Wilk, A. López-Polo, ve G. Faninger. 2002. "Photovoltaik in Gebäuden IEA Task 7".
- Hosseini, Mahdieh. 2020. "How to benefit from BIPV system for designing energy-efficient commercial buildings".
- IEA, Iea. 2020a. "World energy balances: overview". *IEA: Paris, France*.
- IEA, Iea. 2020b. "World energy balances: overview". *IEA: Paris, France*.
- Iea, Pvps. 2018. "Snapshot of global photovoltaic markets". *Report IEA PVPS T1-33*.
- Ihara, Takeshi, Tao Gao, Steinar Grynning, Bjørn Petter Jelle, ve Arild Gustavsen. 2015. "Aerogel granulate glazing facades and their application potential from an energy saving perspective". *Applied Energy* 142:179-91.
- Jahanara, Alireza. 2013. "Strategy Towards Solar Architecture by Photovoltaic for Building Intergration".
- Jayakumar, P. 2009. "Solar energy: Resource assessment handbook".

- Kalogirou, Soteris A. 2023. *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier.
- Khantawang, Arnon. 2020. “A Critical Assessment of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) Technologies”.
- Kirişçi, Hanife Büşra, ve Hatice Derya Arslan. t.y. “Bir Eğitim Yapısının DesignBuilder Programı İle Enerji Etkinlik Analizi”. *Ege Eğitim Teknolojileri Dergisi* 6(1):1-16.
- Kohler, Christian, Yash Shukla, ve Rajan Rawal. 2017. “Calculating the effect of external shading on the solar heat gain coefficient of windows”.
- Kurumu, Enerji Piyasası Düzenleme. 2019. “Elektrik Piyasası Sektör Raporu”. *Ankara: EPDK Yayını*.
- Lal, Rattan. 2006. *Encyclopedia of soil science*. C. 2. CRC Press.
- Li, Xue, Jinqing Peng, Nianping Li, Meng Wang, ve Chunlei Wang. 2017a. “Study on Optimum Tilt Angles of Photovoltaic Shading Systems in Different Climatic Regions of China”. *Procedia Engineering* 205:1157-64. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.185>.
- Li, Xue, Jinqing Peng, Nianping Li, Meng Wang, ve Chunlei Wang. 2017b. “Study on optimum tilt angles of photovoltaic shading systems in different climatic regions of China”. *Procedia Engineering* 205:1157-64.
- Norton, Brian, Philip C. Eames, Tapas K. Mallick, Ming Jun Huang, Sarah J. McCormack, Jayanta D. Mondol, ve Yigzaw G. Yohanis. 2011. “Enhancing the performance of building integrated photovoltaics”. *Solar Energy* 85(8):1629-64.
- Oliveira, Marta Fernandes, Paulo Mendonça, Martin Tenpierik, Pedro Santiago, José F. Silva, ve Lígia Torres Silva. 2023. “Shading calculation methods and regulation simplifications—the portuguese case”. *Buildings* 13(6):1521.
- Omer, Abdeen Mustafa. 2008. “Energy, environment and sustainable development”. *Renewable and sustainable energy reviews* 12(9):2265-2300.
- Orun, Ali Furkan, ve Bünyamin Demirgil. 2021. “TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ YATIRIMLARINA YÖNELİK TEŞVİKLER VE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN EKONOMİK ETKİLERİ”. *Uluslararası İktisadi ve İdari Akademik Araştırmalar Dergisi* 1(2):90-112.
- Ozturk, Tugba, Zeynep Pelin Ceber, Murat Türkeş, ve M. Levent Kurnaz. 2015. “Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs.” *International Journal of Climatology* 35(14).
- Öztürk, H. Hüseyin. 2008. *Güneş enerjisi ve uygulamaları*. Birsan Yayınevi.
- Patkó, István, András Szeder, ve Csilla Patkó. 2013. “Evaluation the impact tilt angle on the sun collectors”. *Energy Procedia* 32:222-31.

- Peker, Evşen Aymen, ve Mübeccel Yalçın. 2019. “8. sınıf ‘enerji kaynakları ve geri dönüşüm’ konusu öğretiminde jigsaw tekniğinin etkileri”. *The Journal of International Lingual Social and Educational Sciences* 5(1):54-74.
- Peng, Jinqing, Lin Lu, ve Hongxing Yang. 2013. “Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems”. *Renewable and sustainable energy reviews* 19:255-74.
- Prasad, Deo, ve Mark Snow. 2014. *Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics (BiPV)*. Routledge.
- Probst, Maria Cristina Munari, ve Christian Roecker. 2011. *Architectural integration and design of solar thermal systems*. EPFL Press.
- Production, Energy. 2021. “Consumption-Our World in Data”. *Disponible sur: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>*. (Consulté le: 24 Août 2021).
- Reijenga, Tjerk, ve BEAR Architecten. 2001. “PV-integration in solar shading (renovation) and PV-integration in atrium glazing (newbuilding), ECN 31 and 42-PETTEN (NL)”. içinde *Proceedings 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference/brokenurl#www.bear.nl*.
- Sadeghipour Roudsari, Mostapha, Michelle Pak, ve Anthony Viola. 2013. “Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design”. Ss. 3128-35 içinde *Building Simulation 2013*. C. 13. IBPSA.
- Sadineni, Suresh B., Srikanth Madala, ve Robert F. Boehm. 2011. “Passive building energy savings: A review of building envelope components”. *Renewable and sustainable energy reviews* 15(8):3617-31.
- Seymen Aksu, Nurçin. 2020. “Ambalaj atıkları kumbaralarının hizmet alanı analizi: İzmir Karşıyaka örneği”.
- Sica, Daniela, Ornella Malandrino, Stefania Supino, Mario Testa, ve Maria Claudia Lucchetti. 2018. “Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82:2934-45.
- Da Silva, Pedro Correia, Vítor Leal, ve Marilyne Andersen. 2012. “Influence of shading control patterns on the energy assessment of office spaces”. *Energy and Buildings* 50:35-48.
- Sur, Yeşim. 2020. “BIM ve akıllı konut teknolojilerinin konut yenileme projelerinde kullanımına sürdürülebilirlik bağlamında yaklaşım”. *Yapı Bilgi Modelleme* 2(2):66-78.
- Taşaltın, Nevin, Selcan Karakuş, ve Barbaros Akkurt. 2022a. “Facile Preparation of Carbon Nanopillar Array”. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry* 9(4):1023-28.

Taşaltın, Nevin, Selcan Karakuş, ve Barbaros Akkurt. 2022b. “Facile Preparation of Carbon Nanopillar Array”. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry* 9(4):1023-28.

Thomas, Randall. 2003. *Photovoltaics and architecture*. Taylor & Francis.

Watson, Donald. 2013. “Bioclimatic design”. Ss. 1-30 içinde *Sustainable built environments*. Springer.

Ye, Wei, John Heidemann, ve Deborah Estrin. 2002. “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”. Ss. 1567-76 içinde *Proceedings. Twenty-first annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*. C. 3. IEEE.

Yiğit, Abdulvahap, ve İbrahim Atmaca. 2010. *Güneş enerjisi*. Alfa Akademi.



8. EKLER

EK-1 Güneş Yüksekliği ve Panel Uzunluğu Hesaplama Kodu

```
clear; clc;

% Sabitler
H = 1.6; % Pencere yüksekliği (m)
enlem = 36.9; % Antalya'nın enlemi (derece)
saat = 10; % Güneş saati (saat 10:00)

% Her ayın 21. günü için hesaplama
gunler = [21, 52, 80, 111, 141, 172, 202, 233, 264, 294, 325, 355]; % Her ayın 21. günü (1 Ocak'tan itibaren)
aylar = {'Oca', 'Şub', 'Mar', 'Nis', 'May', 'Haz', 'Tem', 'Ağu', 'Eyl', 'Eki', 'Kas', 'Ara'};

% Güneş saat açısı (omega)
% Güneş 12:00'de tam güneyde olur, her saat başı 15° değişir
omega = (saat - 12) * 15; % Derece cinsinden, negatif: sabah

panel_uzunluk = zeros(1,12);
beta = zeros(1,12);

for i = 1:12
    n = gunler(i);
    % Deklinasyon açısı
    delta = 23.45 * sind(360 * (284 + n) / 365);
    % Güneş yüksekliği açısı (beta), saat 10:00 için
    % Formül: sin(beta) = sin(enlem)*sin(delta) +
    cos(enlem)*cos(delta)*cos(omega)
    beta(i) = asind(sind(enlem)*sind(delta) +
    cosd(enlem)*cosd(delta)*cosd(omega));
    % Panel uzunluğu
    panel_uzunluk(i) = H / tand(beta(i));
end

% Panel uzunluğunu cm cinsinden göster
panel_uzunluk_cm = panel_uzunluk * 100;

% Grafik
figure;
yyaxis left
plot(1:12, panel_uzunluk_cm, '-ob', 'LineWidth', 2, 'MarkerFaceColor', 'b');
ylabel('Panel Uzunluğu (cm)');
ylim([0 max(panel_uzunluk_cm)*1.2]);

yyaxis right
plot(1:12, beta, '--or', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'r');
ylabel('Güneş Yüksekliği Açısı (°)');
ylim([0 90]);

xlabel('Ay');
title('Her Ayın 21'i Saat 10:00 için Panel Uzunluğu ve Güneş Açısı (Antalya, H=1.6m)');
set(gca, 'XTick', 1:12, 'XTickLabel', aylar, 'FontSize', 12);
legend('Panel Uzunluğu', 'Güneş Yüksekliği Açısı', 'Location', 'southwest');
grid on;
```

```
% Sonuçları tablo olarak da göster
fprintf('Ay\t\tGüneş Açısı (°)\tPanel Uzunluğu (cm)\n');
fprintf('-----\n');
for i = 1:12
    fprintf('%-8s\t%6.2f\t\t\t%6.1f\n', aylar{i}, beta(i),
panel_uzunluk_cm(i));
end
```



EK-2 Panel Uzunluğu ve Güneş Açısı MATLAB Kodu

```

clear; clc; close all;

% Sabitler ve bilgiler
L = 0.5;           % Saçak uzunluğu (m)
H = 1.6;           % Pencere yüksekliği (m)
enlem = 36.9;      % Antalya enlemi (derece)
A=4.37;
aylar =
{'Ocak', 'Şubat', 'Mart', 'Nisan', 'Mayıs', 'Haziran', 'Temmuz', 'Ağustos', 'Eylül', 'Ekim', 'Kasım', 'Aralık'};
ortalamaGun = [17, 47, 75, 105, 135, 162, 198, 228, 258, 288, 318, 344]; % Her ayın ortası

% Deklinasyon açısı (delta)
delta = 23.45*sind(360*(284+ortalamaGun)/365);

% Saatler ve saat açıları (omega)
saat = [9, 12, 15]; % Doğu 9, Güney 12, Batı 15
omega = (saat - 12)*15; % Saat açısı (derece)

% Güneş yükseklik açısı (her ay ve her saat için)
gamma = zeros(12,3);
for i = 1:12
    for j = 1:3
        gamma(i,j) = asind( sind(enlem)*sind(delta(i)) + cosd(enlem)*cosd(delta(i))*cosd(omega(j)) );
    end
end

% Gölge uzunlukları (cm cinsinden)
S_guney = 100 * L * tand(gamma(:,2)); % Saat 12:00 (Güney)
S_dogu = 100 * L * tand(gamma(:,1)); % Saat 09:00 (Doğu)
S_bati = 100 * L * tand(gamma(:,3)); % Saat 15:00 (Batı)
S_dogu_bati_ort = (S_dogu + S_bati) / 2;

% Gölge oranları (%)
Oran_guney = 100 * (S_guney/100) / H;
Oran_dogu = 100 * (S_dogu/100) / H;
Oran_bati = 100 * (S_bati/100) / H;
Oran_dogu_bati = (Oran_dogu + Oran_bati) / 2;

% Oranları maksimum %100 ile sınırla
Oran_guney = min(Oran_guney, 100);
Oran_dogu_bati = min(Oran_dogu_bati, 100);

% PVGIS'den aylık toplam ışıınım (H0_m) [kWh/m²]
H0_m = [119.8 116.2 127.0 105.9 86.3 72.5 82.6 108.8 134.8 148.2 140.0 127.1];
H0_db = [47.1 54.9 82.8 98.5 110.8 116.7 129.6 122.2 99.5 76.9 58.0 47.0];
tau_glass = 0.75; % Cam geçirgenliği

% Net güneş kazancı (sadece iki seri: Güney ve Doğu/Batı ort.)
Net_Guney = H0_m .* (1 - Oran_guney/100) * tau_glass*A;
Net_DoguBatiOrt = H0_db .* (1 - Oran_dogu_bati/100) * tau_glass*A;

% ---- SONUÇ TABLOSU ----
Tablo = table(aylar, round(S_guney,1), round(S_dogu_bati_ort,1), ...
              round(Oran_guney,1), round(Oran_dogu_bati,1), ...
              round(Net_Guney,1)', round(Net_DoguBatiOrt,1)', ...

```

```
'VariableNames',{'Ay','Güney_Gölge_cm','DoğuBatı_Gölge_cm','Güney_Oran','DoğuBa
tı_Oran','NetGüney','NetDoğuBatıOrt'});
disp(Tablo);
```

```
% ---- Grafik 1: Gölge Uzunluğu (cm) ----
```

```
figure;
plot(ortalamaGun, S_guney, '-sb','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','b'); hold
on;
plot(ortalamaGun, S_dogu_bati_ort, '-sg','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','g');
grid on;
set(gca,'XTick',ortalamaGun,'XTickLabel',aylar);
xlabel('Aylar');
ylabel('Gölge Uzunluğu (cm)');
title('Sabit Saçaklı Pencere için Aylık Ortalama Gölge Uzunluğu');
legend('Güney Cephesi','Doğu/Batı Ortalama','Location','northwest');
hold off;
```

```
% ---- Grafik 2: Gölgeleme Oranı (%) ----
```

```
figure;
plot(ortalamaGun, Oran_guney, '-ob','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','b'); hold
on;
plot(ortalamaGun, Oran_dogu_bati, '-og','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','g');
grid on;
set(gca,'XTick',ortalamaGun,'XTickLabel',aylar);
xlabel('Aylar');
ylabel('Pencereye Düşen Gölge Oranı (%)');
title('Sabit Saçaklı Pencere için Aylık Ortalama Gölgeleme Oranı');
legend('Güney Cephesi','Doğu/Batı Ortalama','Location','northwest');
hold off;
```

```
% ---- Grafik 3: Net Güneş Kazancı (kWh/m2) ----
```

```
figure;
plot(ortalamaGun, Net_Guney, '-db','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','b'); hold
on;
plot(ortalamaGun, Net_DoguBatiOrt, '-dg','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','g');
grid on;
set(gca,'XTick',ortalamaGun,'XTickLabel',aylar);
xlabel('Aylar');
ylabel('Net Güneş Kazancı [kWh/m2]');
title('Sabit Saçaklı Pencere için Aylık Net Güneş Kazancı (Cam Geçirgenliği
Dahil)');
legend('Güney Cephesi','Doğu/Batı Ortalama','Location','northwest');
hold off;
```

EK-3 Yönlere Göre Panel Işınımı Kodu

```

clear; clc;

% Panel parametreleri
enlem = 36.9;
panelEgim = 36.9;
albedo = 0.2;

aylar =
{'Ocak', 'Subat', 'Mart', 'Nisan', 'Mayis', 'Haziran', 'Temmuz', 'Agustos', 'Eylul', 'Ekim', 'Kasim', 'Aralik'};
ortalamaGunler = [17, 47, 75, 105, 135, 162, 198, 228, 258, 288, 318, 344];

% Güney paneli için veriler
G_a = [76, 98, 136, 173, 206, 221, 219, 201, 157, 114, 82, 70];
Gb_a = [35, 49, 75, 104, 130, 143, 140, 129, 98, 63, 38, 29];
Gd_a = G_a - Gb_a;

Direkt_G = zeros(1,12); Difuz_G = zeros(1,12); Yansima_G = zeros(1,12);
Toplam_G = zeros(1,12);
for i = 1:12
    n = ortalamaGunler(i);
    G = G_a(i) * 1000 / 30;
    Gb = Gb_a(i) * 1000 / 30;
    Gd = Gd_a(i) * 1000 / 30;
    delta = 23.45 * sind(360*(284+n)/365);
    omega = 0;
    alpha_s = asind(sind(enlem)*sind(delta) +
cosd(enlem)*cosd(delta)*cosd(omega));
    theta_z = 90 - alpha_s;
    phi_s = 0;
    cos_xi = sind(alpha_s)*cosd(panelEgim) +
cosd(alpha_s)*sind(panelEgim)*cosd(phi_s - 0); % Güney azimut 0
    xi = acosd(cos_xi);
    GTb = Gb * (cosd(xi) / cosd(theta_z));
    GTr = G * albedo * (1 - cosd(panelEgim)) / 2;
    beta = deg2rad(panelEgim);
    GTd = Gd * ((1 + cos(beta)) / 2 + 0.25227 * (sin(beta) - beta * cos(beta) -
pi * (sin(beta/2))^2));
    GT = max(GTb, 0) + max(GTd, 0) + max(GTr, 0);

    Direkt_G(i) = GTb / 1000 * 30;
    Difuz_G(i) = GTd / 1000 * 30;
    Yansima_G(i) = GTr / 1000 * 30;
    Toplam_G(i) = GT / 1000 * 30;
end

% Doğu ve Batı cepheler için yaklaşık oran
oran_dogu = 0.70; % Doğu cephesi ışıınım oranı (örnek: %70)
oran_bati = 0.65; % Batı cephesi ışıınım oranı (örnek: %65)
Direkt_D = Direkt_G * oran_dogu;    Difuz_D = Difuz_G * oran_dogu;    Yansima_D
= Yansima_G * oran_dogu;    Toplam_D = Toplam_G * oran_dogu;
Direkt_B = Direkt_G * oran_bati;    Difuz_B = Difuz_G * oran_bati;    Yansima_B
= Yansima_G * oran_bati;    Toplam_B = Toplam_G * oran_bati;

x = 1:12;
% ----- 1. Pencere: GÜNEY CEPHE GRAFIĞİ -----
figure('Name', 'Güney Cephe', 'Color', 'w');
plot(x, Direkt_G, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerFaceColor', 'b', 'Color', [0 0.4
1]); hold on;

```

```

plot(x, Difuz_G, '-s','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor','g', 'Color',[0.2 0.7
0.2]);
plot(x, Yansima_G, '-d','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[1 0.8 0], 'Color',[1
0.6 0]);
plot(x, Toplam_G, '-*','LineWidth',2.5, 'MarkerFaceColor','r', 'Color',[1 0
0]);
grid on;
set(gca,'XTick',1:12,'XTickLabel',aylar, 'FontSize',12);
xlabel('Ay');
ylabel('Panel Uzerine Dusen Isinim (kWh/m^2/ay)');
title('Güney Cepheye Bakan Panel Uzerine Dusen Gunes Isinimi');
legend('Direkt','Difuz','Yansiyan','Toplam','Location','northwest');
hold off;

% ----- 2. Pencere: DOĞU ve BATI CEPHE GRAFİKLERİ -----
figure('Name','Dogu ve Bati Cephe','Color','w');
plot(x, Direkt_D, '-o','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[0 0.4 1], 'Color',[0
0.4 1]); hold on;
plot(x, Difuz_D, '-s','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[0.2 0.7 0.2],
'Color',[0.2 0.7 0.2]);
plot(x, Yansima_D, '-d','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[1 0.8 0], 'Color',[1
0.6 0]);
plot(x, Toplam_D, '-*','LineWidth',2.5, 'MarkerFaceColor','r', 'Color',[1 0
0]);
plot(x, Direkt_B, '--o','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[0 0.1 0.9],
'Color',[0 0.1 0.7]);
plot(x, Difuz_B, '--s','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[0.2 0.5 0.8],
'Color',[0.2 0.6 0.6]);
plot(x, Yansima_B, '--d','LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[1 0.6 0.2],
'Color',[1 0.6 0.2]);
plot(x, Toplam_B, '--*','LineWidth',2.5, 'MarkerFaceColor',[0.8 0 0],
'Color',[0.8 0 0]);
grid on;
set(gca,'XTick',1:12,'XTickLabel',aylar, 'FontSize',12);
xlabel('Ay');
ylabel('Panel Uzerine Dusen Isinim (kWh/m^2/ay)');
title('Doğu ve Batı Cepheye Bakan Panel Uzerine Dusen Gunes Isinimi');
legend({'Direkt Doğu','Difuz Doğu','Yansiyan Doğu','Toplam Doğu', ...
'Direkt Batı','Difuz Batı','Yansiyan Batı','Toplam Batı'}, ...
'Location','northwest');
hold off;

% ----- 3. Pencere: DOĞU - GÜNEY - BATI KARŞILAŞTIRMA -----
figure('Name','Dogu-Guney-Bati Karsilastirma','Color','w');
plot(x, Toplam_D, '-o', 'LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[0 0.4 1], 'Color',[0
0.4 1]); hold on;
plot(x, Toplam_G, '-*','LineWidth',2.5, 'MarkerFaceColor','r', 'Color',[1 0
0]);
plot(x, Toplam_B, '-s', 'LineWidth',2, 'MarkerFaceColor',[1 0.4 0.2],
'Color',[1 0.4 0.2]);
grid on;
set(gca,'XTick',1:12,'XTickLabel',aylar, 'FontSize',12);
xlabel('Ay');
ylabel('Panel Uzerine Dusen Toplam Isinim (kWh/m^2/ay)');
title('Dogu - Guney - Bati Cephe Panel Toplam Isinim Karsilastirma');
legend('Dogu Cephe','Guney Cephe','Bati Cephe','Location','northwest');
hold off;
Tablo = table(aylar, round(Toplam_D'), round(Toplam_G'), round(Toplam_B'), ...
'VariableNames',{'Ay','Toplam_Dogu','Toplam_Guney','Toplam_Bati'});
disp(Tablo)

```

EK-4 HW Optimum Eğim ve PVGIS Işınım Kodu

```

clear; clc;
enlem = 36.9; % Antalya enlemi
albedo = 0.2;
% PVGIS 2023 aylık verileri [kWh/m²]
G_toplam_aylik = [83.26, 114.50, 138.54, 163.71, 192.44, 215.47, 251.16,
218.28, 173.42, 137.27, 81.83, 72.85];
Gb_aylik = [135.58, 161.98, 142.26, 145.28, 162.37, 202.62, 266.45,
223.81, 198.76, 175.45, 115.32, 115.71];

gunler = [17, 48, 75, 105, 135, 162, 198, 228, 258, 288, 318, 344];
aylar = {'Ocak', 'Şubat', 'Mart', 'Nisan', 'Mayıs', 'Haziran', ...
'Temmuz', 'Ağustos', 'Eylül', 'Ekim', 'Kasım', 'Aralık'};

% Sonuçları saklamak için
HW_optimum = zeros(1,12);
PVGIS_irradiance_HW_angle = zeros(1,12);

for ay = 1:12
    n = gunler(ay);
    delta = 23.45 * sind(360*(284 + n)/365);

    % HW metodu ile optimum eğim açısı
    beta_HW = enlem - delta;
    HW_optimum(ay) = beta_HW;
    % Zenith açısı (öğle)
    cos_sigma_z = sind(enlem)*sind(delta) + cosd(enlem)*cosd(delta);
    sigma_z = acosd(cos_sigma_z);
    % Işınım bileşenleri
    Gb_horizontal = Gb_aylik(ay);
    G_total_horizontal = G_toplam_aylik(ay);
    Gd_horizontal = G_total_horizontal - Gb_horizontal;
    % Sadece HW açısında PVGIS toplam ışınlamı hesapla
    cos_xi = sind(delta)*sind(enlem-beta_HW) + cosd(delta)*cosd(enlem-beta_HW);
    xi = acosd(cos_xi);
    GbT = Gb_horizontal * cosd(xi) / cosd(sigma_z);
    GdT = Gd_horizontal * (1 + cosd(beta_HW))/2;
    GrT = G_total_horizontal * albedo * (1 - cosd(beta_HW))/2;

    PVGIS_irradiance_HW_angle(ay) = GbT + GdT + GrT;
end

% Tablo
T = table(aylar', round(HW_optimum',1), round(PVGIS_irradiance_HW_angle',2),
...
'VariableNames', {'Ay', 'HW_Eğim', 'HW_Açısında_PVGIS_Işınım'})

% Grafik
figure;
yyaxis left
plot(1:12, HW_optimum, '-o', 'LineWidth', 2);
ylabel('HW Metoduna Göre Optimum Eğim (°)')
yyaxis right
plot(1:12, PVGIS_irradiance_HW_angle, '-s', 'LineWidth', 2);
ylabel('PVGIS: HW Açısında Güneş Işınımı (kWh/m²/ay)')
set(gca, 'XTick', 1:12, 'XTickLabel', aylar)
xlabel('Ay')
title('HW Açısında PVGIS Işınımı ve Optimum Eğim')
legend('HW Eğimi', 'HW Açısında PVGIS Işınımı', 'Location', 'Best')
grid on;

```

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Hatem Mosa MOSA

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2021-2025	Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2016-2020	Kerkük Teknik Üniversitesi Yakıt ve enerji mühendisliği Bölümü, Kerkük / Irak