



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ÇATI ÜZERİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ İÇİN TEKNİK EKONOMİK VE
ÇEVRESEL DEĞERLENDİRME

SEDA ERGENÇ

EYLÜL 2024

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇATI ÜZERİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ İÇİN TEKNİK EKONOMİK VE
ÇEVRESEL DEĞERLENDİRME

SEDA ERGENÇ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK

Eylül 2024

Seda ERGENÇ tarafından **Prof. Dr. Murat GÖKÇEK** danışmanlığında hazırlanan “**Çatı Üzeri Güneş Enerjisi Santralleri için Teknik Ekonomik ve Çevresel Değerlendirme**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr., Murat Gökçek
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr., Fuat Kaya
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi, Cihangir Kale
Fırat Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Seda ERGENÇ

ÖZET

ÇATI ÜZERİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ İÇİN TEKNİK EKONOMİK VE ÇEVRESEL DEĞERLENDİRME

ERGENÇ, Seda

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Prof. Dr. Murat GÖKÇEK

Eylül 2024, 93 sayfa

Bu çalışmada, Türkiye'nin yedi farklı coğrafi bölgesinden farklı şehirler (İstanbul, Trabzon, İzmir, Adana, Niğde, Malatya, Mardin) seçilerek, bu şehirlerde kurulması planlanan çatı üzeri güneş enerjisi santrallerinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilmesi analiz edilmiştir. Çalışmada konuma özgü veriler (güneş radyasyonu, sıcaklık vb.) incelenmiş, analizlerde PVsyst programı kullanılmıştır. Araştırmanın amacı, Türkiye'deki güneş enerjisi potansiyelini özellikle çatı üstü güneş enerji santralleri açısından incelemek ve bu sistemlerin uygulanabilirliğini çeşitli yönleriyle ortaya koymaktır. Çalışmada ele alınan santrallerin ülke genelindeki fizibilitesi detaylandırılmıştır. Tez çalışması kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda, çatı üstü güneş enerjisi santrallerinin Türkiye genelinde yaygın olarak kullanılması halinde, ülkenin ekonomik kalkınmasına önemli katkılar sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu santrallerin enerji üretimi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik faydalar açısından büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüş, bu potansiyelin doğru bir şekilde değerlendirildiğinde ülkenin enerji bağımsızlığına ve sürdürülebilir kalkınmasına önemli katkılarda bulunabileceği öngörülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Güneş enerjisi, çatı üzeri güneş enerji santralleri, ekonomik analiz, çevresel analiz, PVsyst

SUMMARY

TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FOR ROOFTOP SOLAR POWER PLANTS

ERGENÇ, Seda

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Murat GÖKÇEK

September 2024, 93 pages

In this study, different cities (İstanbul, Trabzon, İzmir, Adana, Niğde, Malatya, Mardin) from seven different geographical regions of Turkey were selected and the technical, economic and environmental evaluation of rooftop solar power plants planned to be established in these cities were analysed. Location-specific data (solar radiation, temperature, etc.) were analysed and PVsyst software was used in the analyses. The aim of the study is to analyse the solar energy potential in Turkey, especially in terms of rooftop solar power plants and to reveal the applicability of these systems in various aspects. The feasibility of the plants considered in the study is detailed throughout the country. In line with the data obtained within the scope of the thesis study, it has been concluded that if rooftop solar power plants are widely used throughout Turkey, they can make significant contributions to the economic development of the country. It has been seen that these plants have a great potential in terms of energy production, environmental sustainability and economic benefits, and it is predicted that when this potential is utilized correctly, it can make significant contributions to the energy independence and sustainable development of the country.

Keywords: Solar power, rooftop solar power plants, economic analysis, environmental analysis, PVsyst

ÖN SÖZ

Bu çalışmada, Türkiye’de yedi farklı bölgeden seçilen şehirler için PVsyst programı ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Referans bir konum seçimi yapılmış, konumdaki meteorolojik veriler dışında sistem ortak tanımlanmıştır. Bina yapısı, yüksekliği, çatı özelliği, azimut, PV modül ve inverter gibi veriler ortak seçilerek Türkiye’deki yedi farklı bölge için konuma bağlı enerji üretiminin teknik, ekonomik ve çevresel değerlendirilmesi yapılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında çalışmalarına yön veren, bilgi ve tecrübeleriyle yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen danışmanım, Sayın Prof. Dr. Murat Gökçek’e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında bana sağladıkları tüm imkanlar ve desteklerinden dolayı annem Nursel Ergenç’e, babam Aykan Ergenç’e, kardeşim Sema Ergenç’e, tüm aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Güneş Enerjisi.....	3
1.2 Küresel Elektrikteki Eğilimler ve Temiz Enerjiye Duyulan İhtiyaç.....	4
1.3 Türkiye’de Güneş Enerjisi ve Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	6
1.4 Çevresel Değerlendirme	10
1.5 Literatür Araştırması.....	11
BÖLÜM II	17
2.1 Güneş Enerji Santrali Proje Tipleri ve Çalışma Prensipleri	17
2.1.1 Şebekeye Bağlı GES.....	17
2.1.2 Şebekeden Bağımsız GES	18
2.1.3 Çatı Üzeri GES	18
2.1.4 Arazi Tipi GES	19
2.1.5 Yüzer GES	19
2.2 Güneş Enerjisi Santrali Ekipmanları.....	19
2.2.1 PV Modül.....	19
2.2.2 İnverter.....	20
2.2.3 Konstrüksiyon.....	20
2.2.4 Diğer Ekipmanlar.....	20
2.3 GES Proje Paftaları	21
2.3.1 Genel Yerleşim Planı	21
2.3.2 Tek Hat Şeması.....	21

2.3.3 Topraklama Planı.....	21
2.3.4 Statik, Mekanik Proje	21
2.4 GES Yerinde İnceleme ve Keşif.....	22
2.5 Tasarım Kriterleri ve Yatırım Alanının Belirlenmesi.....	22
2.6 Sistem Kayıpları	22
2.7 GES Yasal Mevzuatı.....	23
BÖLÜM III.....	26
3.1 Türkiye'de Farklı Bölgelerden Şehirlerin Seçimi, Güneş Enerjisi Potansiyelleri ve Konum Bilgileri.....	26
3.1.1 Marmara Bölgesi	26
3.1.2 Karadeniz Bölgesi.....	28
3.1.3 Ege Bölgesi.....	30
3.1.4 Akdeniz Bölgesi.....	33
3.1.5 İç Anadolu Bölgesi	35
3.1.6 Doğu Anadolu Bölgesi	37
3.1.7 Güneydoğu Anadolu Bölgesi.....	39
3.2 PVsyst Programında Gerçekleştirilen Analiz Verilerinin İncelenmesi	42
3.2.1 Sistem Tanımı, Özellikleri ve Tek Hat Şeması	53
BÖLÜM IV.....	56
BULGULAR.....	56
4.1 Işınım, Çevre Sıcaklığı, Kolektöre Yansıyan Küresel Işınım ve Şebekeye Verilen Enerji.....	56
4.2 Performans Oranı ve Kayıplar	61
4.3 Ekonomik Değerlendirme.....	74
4.4 Çevresel Değerlendirme	83
BÖLÜM V	85
SONUÇ.....	85
KAYNAKLAR	88
ÖZ GEÇMİŞ	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kaynağa göre küresel elektrik üretiminin payı (Jones, 2022)	5
Çizelge 1.2. Türkiye'nin kaynaklara göre elektrik enerjisi kurulu gücü (MW) (ETKB, 2023).....	7
Çizelge 1.3. Türkiye'nin kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi (GWs) (ETKB, 2023)	7
Çizelge 1.4. Türkiye yıllara göre güneş enerjisinin kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı	8
Çizelge 1.5. Türkiye küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün)	10
Çizelge 1.6. Türkiye güneşlenme süreleri (saat).....	10
Çizelge 3.1. İstanbul küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün)	27
Çizelge 3.2. İstanbul günlük güneşlenme süreleri (saat)	27
Çizelge 3.3. Trabzon küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün).....	29
Çizelge 3.4. Trabzon günlük güneşlenme süreleri (saat).....	30
Çizelge 3.5. İzmir küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün)	32
Çizelge 3.6. İzmir günlük güneşlenme süreleri (saat)	32
Çizelge 3.7. Adana küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün).....	34
Çizelge 3.8. Adana günlük güneşlenme süreleri (saat).....	34
Çizelge 3.9. Niğde küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün)	36
Çizelge 3.10. Niğde günlük güneşlenme süreleri (saat)	37
Çizelge 3.11. Malatya küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün)	38
Çizelge 3.12. Malatya günlük güneşlenme süreleri (saat)	39
Çizelge 3.13. Mardin küresel radyasyon değerleri (kWs/m ² -gün)	41
Çizelge 3.14. Mardin günlük güneşlenme süreleri (saat)	41
Çizelge 3.15. Panel bilgileri.....	47
Çizelge 3.16. İnverter bilgileri	47
Çizelge 3.17. Sistem çalışma bilgileri	48
Çizelge 4.1. Şehirlere ait Yf, Yr ve PR değerleri	62
Çizelge 4.2. Maliyet tablosu	75
Çizelge 4.3. Kazanç tablosu.....	79

Çizelge 4.4. Sera gazı azaltımı.....	83
--------------------------------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Güneş PV ve rüzgâr için küresel seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, 2010-2018 (IRENA, 2020).....	4
Şekil 1.2. Türkiye 2023 yılı (şubat) elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı (MW)	8
Şekil 1.3. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (EİGM, 2022).....	9
Şekil 2.1. Şebekeye bağlı GES şeması (Anonim, Mart 2023).....	17
Şekil 2.2. Şebekeden bağımsız GES şeması (Anonim, Mart 2023)	18
Şekil 3.1. İstanbul yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m ² -yıl).....	27
Şekil 3.2. İstanbul’da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü.....	28
Şekil 3.3. Trabzon yıllık toplam güneş radyasyonu(kWs/m ² -yıl)	29
Şekil 3.4. Trabzon’da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü	30
Şekil 3.5. İzmir yıllık toplam güneş radyasyonu(kWs/m ² -yıl)	31
Şekil 3.6. İzmir’de seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü	33
Şekil 3.7. Adana yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m ² -yıl)	34
Şekil 3.8. Adana’da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü	35
Şekil 3.9. Niğde yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m ² -yıl).....	36
Şekil 3.10. Niğde’de seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü	37
Şekil 3.11. Malatya yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m ² -yıl).....	38
Şekil 3.12. Malatya’da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü.....	39
Şekil 3.13. Mardin yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m ² -yıl).....	40
Şekil 3.14. Mardin’de seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü	42
Şekil 3.15. PVsyst ana ekranı	43
Şekil 3.16. Şebekeye bağlı sistem tasarımı için PVsyst ekran görüntüsü.....	44
Şekil 3.17. İstanbul’da seçilen konuma ait coğrafi konum parametrelerinin PVsyst programına girişi	44
Şekil 3.18. PVsyst programı üzerinden meteonorm 8.1 verilerinin seçimi	45
Şekil 3.19. PVsyst programı üzerinden aylık hava durumu verilerinin seçimi	45
Şekil 3.20. Google Earth yön değerinin okunması	46
Şekil 3.21. PVsyst programında yönlendirme değerlerinin tanımlanması	46

Şekil 3.22. Şebekeye bağlı sistem tanımlaması	51
Şekil 3.23. Gerçekleştirilen çalışmaya ait üç boyutlu tasarım	52
Şekil 3.24. İstanbul, Trabzon, İzmir, Adana, Niğde, Malatya, Mardin'e ait sistem özeti	53
Şekil 3.25. PV modüle ait verim değerleri.....	54
Şekil 3.26. Sistem özellikleri	54
Şekil 3.27. Tek hat şeması	55
Şekil 4.1. Işınım (kWs/m^2)	58
Şekil 4.2. Çevre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	58
Şekil 4.3. Kolektöre yansıyan küresel ışıınım (kWs/m^2).....	59
Şekil 4.4. Şebekeye verilen enerji (kWs).....	59
Şekil 4.5. Yıllık toplam ışıınım (kWs/m^2)	60
Şekil 4.6. Yıllık ortalama çevre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	60
Şekil 4.7. Yıllık toplam şebekeye verilen enerji (kWs)	61
Şekil 4.8. İstanbul performans oranı	65
Şekil 4.9. Trabzon performans oranı	66
Şekil 4.10. İzmir performans oranı	66
Şekil 4.11. Adana performans oranı	66
Şekil 4.12. Niğde performans oranı	67
Şekil 4.13. Malatya performans oranı.....	67
Şekil 4.14. Mardin performans oranı	67
Şekil 4.15. İstanbul kayıplar diyagramı	68
Şekil 4.16. Trabzon kayıplar diyagramı.....	69
Şekil 4.17. İzmir kayıplar diyagramı	70
Şekil 4.18. Adana kayıplar diyagramı	71
Şekil 4.19. Niğde kayıplar diyagramı	72
Şekil 4.20. Malatya kayıplar diyagramı	73
Şekil 4.21. Mardin kayıplar diyagramı	74
Şekil 4.22. İstanbul panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü.....	75
Şekil 4.23. Trabzon panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü	76
Şekil 4.24. İzmir panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü.....	76
Şekil 4.25. Adana panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü	77
Şekil 4.26. Niğde panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü.....	77
Şekil 4.27. Malatya panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü	78

Şekil 4.28. Mardin panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü.....	78
Şekil 4.29. İstanbul sistem geri dönüşüm grafiği.....	79
Şekil 4.30. Trabzon sistem geri dönüşüm grafiği	80
Şekil 4.31. İzmir sistem geri dönüşüm grafiği.....	80
Şekil 4.32. Adana sistem geri dönüşüm grafiği	81
Şekil 4.33. Niğde sistem geri dönüşüm grafiği.....	81
Şekil 4.34. Malatya sistem geri dönüşüm grafiği	82
Şekil 4.35. Mardin sistem geri dönüşüm grafiği.....	82



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
GW	Gigawatt
W/m ²	Işınım şiddeti
MW	Megawatt
CO ₂	Karbondioksit
g	Gram
kWs	Kilowatt saat
TWs	Terawatt saat
kWs/m ² -yıl	Yıllık toplam ışıınım şiddeti
kWs/m ² -gün	Günlük toplam ışıınım şiddeti
GWs	Gigawatt saat
CH ₄	Metan
N ₂ O	Azot oksit
km ²	Kilometrekare
Mt	Metrik ton
\$/kWs	Dolar/ kilowatt saat
kWp	Kilowatt peak
Wp	Watt peak
MWe	Megawatt elektrik
kWs/m ²	Kilowatt saat/ metrekare
Pa	Pascal
A	Amper
V	Volt
°C	Santigrat derece
TL/kWs	Türk Lirası/ kilowatt saat
km	Kilometre
As	Ampersaat

V_{mpp}	Nominal gerilim
I_{mpp}	Nominal akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
V_{oc}	Açık devre gerilimi
β_{mpp}	Nominal gerilim sıcaklık katsayısı
β_{oc}	Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı
Hz	Hertz
T_s	Nominal çalışma sıcaklığı
T_{max}	Maksimum çalışma sıcaklığı
T_{min}	Minimum çalışma sıcaklığı
n_{max}	Dizideki maksimum panel sayısı
n_{min}	Dizideki minimum panel sayısı
$U_{L(modül\ T_{min}^{\circ}C)}$	Modülün minimum çalışma sıcaklığındaki gerilimi
$U_{MPP(modül\ T_{max}^{\circ}C)}$	Modülün maksimum çalışma sıcaklığındaki gerilimi
N	Panel sayısı
C_t	t dönemindeki nakit akışı
C_0	İlk yatırım maliyeti
t	Sistem ömrü
r	İskonto oranı
Yf	Üretilen faydalı enerji
Yr	İdeal dizi verimi
Kısaltmalar	Açıklama
PV	Fotovoltaik
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
GHI	Küresel Yatay Işınım
COE	Enerji Maliyeti
USD	Amerikan Doları
GES	Güneş Enerjisi Sistemleri
PR	Performans Oranı
DR	Bozulma Oranı

LID	Işık Kaynaklı Bozulma Oranı
TL	Türk Lirası
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
AG	Alçak Gerilim
OG	Orta Gerilim
CCTV	Kapalı Devre Televizyon
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
MPP	Maksimum Güç Noktası
PID	Potansiyel Kaynaklı Bozulma
PR	Performans Oranı
IAM	Geliş Açısı Düzeltmesi
NPV	Net Bugünkü Değer
EPA	Çevre Koruma Ajansı

BÖLÜM I

GİRİŞ

Günümüzde yenilenebilir enerji teknolojileri, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde enerji güvenliği, çevre ve küresel iklim değişikliği ile ilgili ortaya çıkan endişeleri karşılamaya odaklanmış bir alan olarak değerlendirilmekte ve bu teknolojilerin sürdürülebilir bir enerji geleceği oluşturmada kilit rol oynaması beklenmektedir.

Son yıllarda küresel enerji tüketimi önemli ölçüde artmış ve bu artış, dünya genelindeki kritik enerji piyasaları üzerinde büyük bir baskı yaratmıştır. Bu durum, enerji fiyatlarının daha önce görülmemiş seviyelere ulaşmasına neden olurken, aynı zamanda enerji sektörünün emisyonlarında da ciddi bir artışa yol açmıştır. Enerji, modern yaşamın sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle temiz elektrik, karbonsuzlaşma sürecinin merkezinde yer almakta ve bu süreç, iklim değişikliği ile mücadele açısından hayati önem taşımaktadır. Ancak, enerji sektörü beklenen hızda bir yapısal dönüşüm gerçekleştiremezse, önümüzdeki birkaç yıl içinde enerji talebinin hızla artması, piyasalarda daha büyük istikrarsızlıklara yol açabilir. Bu durum, enerji fiyatlarının volatilitisini artırarak hem tüketiciler hem de üreticiler için zorluklar yaratabilir ve aynı zamanda yüksek emisyon seviyelerinin devam etmesine neden olabilir (Khan vd, 2023).

Enerji, ülkelerin kalkınmasında önemli bir güç olarak kabul edilmektedir. Sanayi sektörünün gelişmesi ve nüfusun artmasıyla enerji ihtiyacının arttığı bilinmektedir. Enerjiyi temin edebilme potansiyeli ve kişi başına düşen enerji tüketim miktarı ülkelerin kalkınma düzeyiyle alakalı bilgi vermektedir. Enerji ihtiyacını karşılayamayan ülkeler, enerjiyi ithal etmekte, dolayısıyla dışa bağımlı olmaktadır. Enerjide dışa bağımlılık birçok riski de beraberinde getirmektedir. Bu riskleri minimum düzeye çekebilmek adına yerli kaynak ve teknolojilerin kullanılması önem arz etmektedir. Alternatif enerji kaynakları olarak görülen yenilenebilir enerjiye yatırımın artması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir ülkedir. Bu kaynakların verimli kullanılması dışa bağımlılığı düşürecek ve ülkemizin kalkınmasına katkı sağlayacaktır. Türkiye gelişmekte olan bir ülke olup enerji ihtiyacı

artmaktadır. Bu durum ülkemizin kalkındığının bir göstergesi olmakla beraber hızla artan enerji ihtiyacının nasıl karşılanacağı sorununu ortaya çıkarmaktadır.

195 ülke tarafından 2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması, küresel ısınmayı 2 °C'nin çok altında, ideal olarak 1,5 °C'de tutmak için 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmayı amaçlamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, sanayi sektörü sırasıyla %37 ve %30 ile şu anda en fazla enerji tüketen ve karbon emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunan sektördür. Buna ek olarak, 2040 yılına kadar küresel enerji tüketiminin % 25, enerji sektöründen kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının ise %10 oranında artması beklenmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde sanayi sektörünün enerji ihtiyacı giderek artmaktadır (Senyonyi vd., 2024). Diğer taraftan, binalar ve inşaat sektörü, dünya genelinde enerji tüketiminin en büyük paydaşlarından biridir. Küresel nihai enerji tüketiminin neredeyse üçte birinden sorumlu olan bu sektörler, doğrudan CO₂ emisyonlarının da yaklaşık %15'ini oluşturmaktadır. Bu durum, bina sektörünün iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için önemli bir hedef haline gelmesini sağlamaktadır. Özellikle konut sektöründeki enerji talebinin hızlı bir şekilde artmaya devam etmesi, enerji dönüşümü ve emisyon azaltma hedeflerine ulaşmada ek zorluklar yaratmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, 2018 ile 2040 yılları arasında konut sektöründeki enerji talebinin %83 oranında artarak 6008 TWh'den 11000 TWh'ye yükselmesi beklenmektedir. Bu artış, enerji verimliliği politikalarının daha da önem kazanacağını ve enerji arzı ile ilgili yeni stratejilerin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir (World Energy Outlook, 2019).

2021 yılında Türkiye'de sektörlerin toplam nihai enerji tüketimi, 1990 yılına kıyasla %191,3, 2005 yılına göre %75,9 ve 2020 yılına göre %9 artarak 123,14 Mtep'e ulaşmıştır. Türkiye'deki nihai enerji tüketimindeki bu büyük artış, ekonomik büyümeyle ilişkilendirilebilir. Ancak, bunu bir gelişme olarak nitelendirebilmek için enerji yoğunluğunun da düşmesi gerekmektedir; bu da enerji verimliliği ile birlikte değerlendirilmelidir. Örneğin, AB-27 ülkelerinde verimlilik artışına bağlı olarak son 10 yılda nihai enerji tüketimi %9 oranında azalmıştır (2019 verilerine göre). 2021 yılı itibarıyla Türkiye'de nihai enerji tüketiminde en büyük payı %33,8 ile sanayi sektörü alırken, bunu %31 ile mesken ve hizmetler sektörü, %24,8 ile ulaştırma sektörü ve %4,2 ile tarım-hayvancılık sektörü takip etmiştir. Enerji dışı tüketimin payı ise %6,3 olarak kaydedilmiştir. Avrupa Birliği ülkeleriyle karşılaştırıldığında, 2021 yılında AB-27

ülkelerinde nihai enerji tüketiminde en büyük payı %29 ile ulaştırma sektörü almış, bunu %28 ile konut sektörü, %26 ile sanayi sektörü, %14 ile hizmetler ve %3 ile tarım-hayvancılık sektörü izlemiştir (T.C. Çevre ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

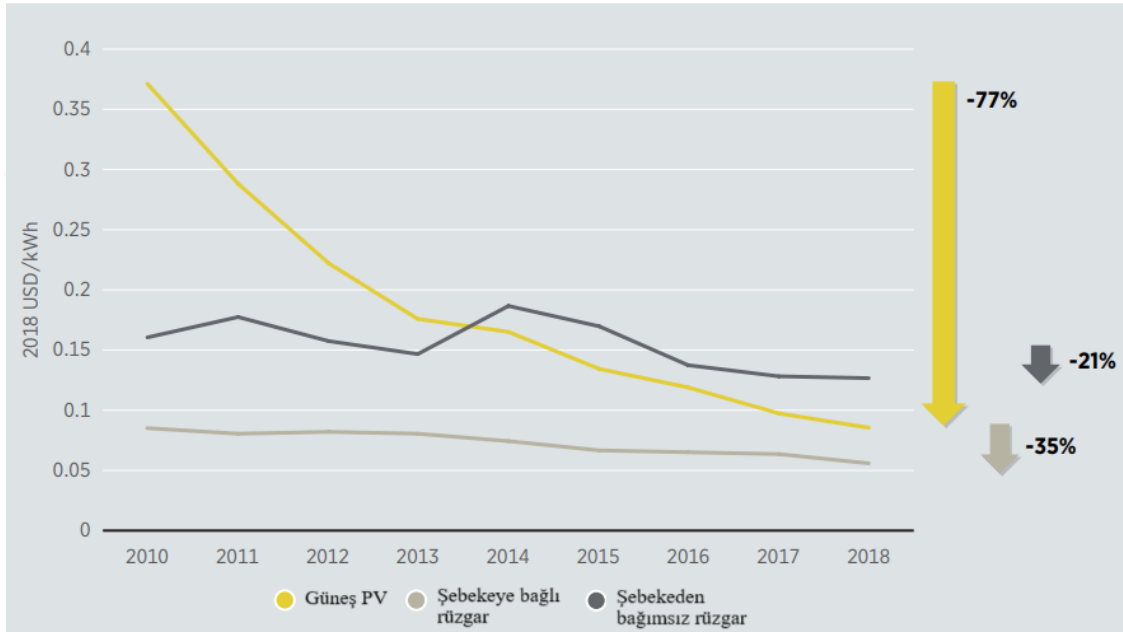
Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üreten sistemler arasında bakım ve kurulum maliyetleri daha az olan çatı üzeri güneş enerjisi santrallerinin teknik, ekonomik ve çevresel değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada, Türkiye’de güneş enerjisinin potansiyeli, önceki yıllara göre azalan ilk kurulum maliyetleri ve çevresel etkileri araştırılmıştır. Türkiye’nin yedi farklı coğrafi bölgesinden farklı şehirler (İstanbul, Trabzon, İzmir, Adana, Niğde, Malatya, Mardin) seçilerek PVsyst programı ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Farklı iklim özelliklerine, coğrafi koşullara ve enerji ihtiyacına sahip şehirler seçilmiştir. Çatı üzeri güneş enerjisi santrallerinin ekonomik değerlendirilmesinde maliyet, kazanç, sistem geri dönüşüm süresi ve net şimdiki değer hesaplamaları kullanılmıştır. Üretilen enerjiye bağlı olarak sera gazı azaltımı değerleri ve CO₂ eşdeğer verileri paylaşılmıştır.

1.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, kendisinden elektrik enerjisi dönüştüren sistemlerin kurulum ve kullanım kolaylığı olmasının yanı sıra çevreyi kirletmemesi ve zararlı atık oluşturmaması gibi özelliklere sahip bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışıma enerjisidir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m² değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı 0-1100 W/m² değerleri arasında değişim gösterir (Elüstün, 2023). Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970’lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Özellikle temiz bir enerji kaynağı olması ve santralin kurulumdan sonra düşük maliyetle çalışması güneş enerjisinin önemini arttırmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

1.2 Küresel Elektrikteki Eğilimler ve Temiz Enerjiye Duyulan İhtiyaç

Maliyetlerin yüksek olması güneş enerjisi santrallerinin kurulumunda engel teşkil etmekteydi. 2010-2018 yılları arasında küresel elektrik maliyetlerinin güneş PV için %77 azaldığı bilinmekte ve yıllar içinde azalan maliyetlerin teşvik edici olduğu görülmektedir. Şekil 1.1’de 2010-2018 yılları arasındaki güneş PV ve rüzgâr için küresel seviyelendirilmiş elektrik maliyetleri verilmiştir.



Şekil 1.1. Güneş PV ve rüzgâr için küresel seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, 2010-2018 (IRENA, 2020)

2021’de tüm temiz enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, biyoenerji vb.) dünya elektriğinin %38’ini karşılayarak kömürden (%36) daha fazla enerji üretmiştir. 2021’de küresel güneş enerjisi üretimi %23 (2018’den bu yana en yüksek) artış göstermiştir ve elektriğe talep %5 artmıştır. Dünya, 2010’dan bu yana en hızlı talep artışını göstermiştir. Gelişmiş ekonomiye sahip birçok ülke 2020’deki düşüşün ardından pandemi öncesi seviyelere geri dönmüştür. Bu talebin rüzgâr ve güneşten karşılanan kısmı %29 olmuştur. Diğer temiz enerji kaynaklarında iki yıl boyunca büyüme sağlanamamıştır ve bu nedenle kalan talep artışı fosil yakıtlarla karşılanmıştır. Rüzgâr ve güneş, 2021’de ilk kez küresel elektriğin onda birinden (%10,31) fazlasını üreterek Paris İklim Anlaşması’nın imzalandığı 2015 yılına göre (%4,6) iki kat daha fazla paya sahip

olmuştur (Jones, 2022). Tüm dünyada, güneş teknolojilerine bakıldığında 2021 yılı sonu itibari ile 843086 MW güneş PV, 6387 MW güneş ısı kurulu güce sahip olduğu görülmektedir. Küresel enerji sistemleriyle ilgili olağanüstü olaylara tanık olunmakta ve iklim değişikliği tehdidi giderek artmaktadır. Güneş enerjisinin elektrik üretim payı 2021 yılı sonu itibari ile %3,72 olmuştur ve en hızlı büyüyen temiz elektrik kaynaklarından. Bu değer (%3,72), Paris Anlaşması'nın imzalandığı 2015 yılında yalnızca %1,08'dir. Güneş enerjisi, küresel elektriğin %3,72'sini oluşturmaya rağmen kömürün yerini alması, emisyonların azalması ve küresel ısınmayı 1,5 derecede tutmak için son 10 yıldaki gibi 2030'a kadar her yıl %20 oranında büyümeyi sürdürmesi gerekmektedir (Jones, 2022).

Çizelge 1.1'e bakıldığında küresel elektrik üretim payında güneş enerjisi payının yıllar geçtikçe arttığı görülmektedir.

Çizelge 1.1. Kaynağa göre küresel elektrik üretiminin payı (Jones, 2022)

Yıl	Güneş	Rüzgâr	Biyoenerji	Nükleer	Hidroelektrik	Doğalgaz	Kömür
2000	0,01	0,21	1,00	16,73	17,53	17,97	38,15
2001	0,01	0,25	0,95	16,93	16,87	18,62	38,17
2002	0,01	0,33	1,01	16,53	16,55	19,29	28,49
2003	0,01	0,39	1,04	15,81	16,00	19,42	39,66
2004	0,02	0,50	1,09	15,70	16,38	19,91	39,15
2005	0,02	0,59	1,18	15,13	16,36	20,14	39,62
2006	0,03	0,72	1,21	14,74	16,28	20,55	40,24
2007	0,04	0,88	1,27	13,78	15,77	21,27	40,94
2008	0,06	1,12	1,33	13,52	16,45	21,48	40,31
2009	0,01	1,41	1,46	13,39	16,54	21,77	39,94
2010	0,15	1,66	1,57	12,86	16,32	22,44	39,96
2011	0,29	2,03	1,61	11,91	16,06	22,06	40,70
2012	0,43	2,39	1,71	10,88	16,48	22,69	39,96
2013	0,58	2,82	1,81	10,64	16,58	21,61	40,84
2014	0,84	3,08	1,92	10,59	16,57	21,67	40,58
2015	1,08	3,52	2,03	10,62	16,42	22,83	38,77
2016	1,36	3,97	2,03	10,47	16,53	23,25	37,97
2017	1,78	4,57	2,07	10,24	16,28	23,03	38,09
2018	2,20	4,91	2,12	10,13	16,13	22,66	38,05
2019	2,64	5,40	2,21	10,36	16,05	23,14	36,58
2020	3,20	6,08	2,34	10,10	16,52	23,05	35,30
2021	3,72	6,59	2,35	9,94	15,28	22,16	36,49

Rusya'nın Ukrayna ile savaşının ortasında sürekli yüksek gaz fiyatları, küresel 1,5 derecelik iklim hedefini tehdit etmekte ve gerçek bir kömüre dönüş riski bulundurmaktadır. %100 temiz elektriğe ne kadar çabuk geçilmesi gerektiğinin bir göstergesidir. 2021 yılında elektrik talebindeki artışın %59'u sadece kömür üretimi ile karşılanmıştır. Kömür enerjisinin 2021'de yükselmesinin nedeni olarak temiz elektrikteki benzeri görülmemiş talep artışına ayak uyduracak kadar hızlı dağıtılmaması görülmüştür.

Enerji sektörü CO₂ emisyonları, 2018'deki önceki rekorunu %3 oranında geçerek tüm zamanların rekoruna yükselmiştir ve 2021'de (778 milyon ton) %7 artmıştır. 2021'de küresel karbon yoğunluğunun kWs başına 442g CO₂ olduğu tahmin edilmektedir. IEA 1,5 derece hedefi için küresel karbon yoğunluğunun gelişmiş ekonomilerde 2035'e ve dünya çapında 2040'a kadar hızla sıfıra düşmesi gerekmektedir.

Maliyetlerdeki düşüş, yüksek elektrik talebi artışı, küresel iklim değişikliği tehdidi, enerjide dışa bağımlılık ve CO₂ emisyonlarında düşüşe ihtiyaç duyulmasından dolayı temiz enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üreten santrallerin artması gerekmektedir.

1.3 Türkiye'de Güneş Enerjisi ve Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye, tüm mevsimlerin yaşandığı jeopolitik bir konuma sahiptir. İklimsel avantajları yenilenebilir enerji yatırımlarına olanak sağlamaktadır. Ancak, bugün güneş enerjisi için hala kullanılmayan bir potansiyel vardır (Kanat, 2019). Güneş enerjisi kurulum maliyetlerinin düşmesiyle birlikte güneş enerjisinin enerji üretimindeki payının artması beklenmekte ve Türkiye verimli yerel kaynaklarını kullanarak cari açığı kapatmayı hedeflemektedir (SHURA, 2020a). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de 11,6 milyon adet bina bulunmakta olup bu binaların çatı ve cephelerine önümüzdeki yıllarda büyük miktarlarda güneş enerjisi yatırımlarının yapılabileceği öngörülmektedir (ETKB, 2023).

Türkiye'nin kaynaklara göre elektrik enerjisi kurulu gücü Çizelge 1.2'de ve elektrik enerjisi üretimi Çizelge 1.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 1.2. Türkiye'nin kaynaklara göre elektrik enerjisi kurulu gücü (MW) (ETKB, 2023)

	Birim	2010	2015	2019	2020	2021 (1)	2022 (2)
Kurulu güç	MW	49524	73147	91267	95891	100607	102423
Termik	MW	32182	41541	46500	46309	47633	47008
Yerli kömür	MW	9161	10085	11317	11336	11336	11336
İthal kömür	MW	3281	6064	8697	8987	10307	10307
Doğalgaz	MW	18213	24945	25904	25675	25733	25108
Diğer (3)	MW	1526	446	312	312	258	258
Yenilenebilir	MW	17342	31606	44767	49582	52974	55414
Hidrolik	MW	15831	25868	28503	30984	31688	32228
Rüzgâr	MW	1320	4503	7591	8832	10100	10900
Güneş	MW	0	249	5995	6667	7750	8750
Diğer (4)	MW	191	986	2678	3098	3435	3536

Çizelge 1.3. Türkiye'nin kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi (GWs) (ETKB, 2023)

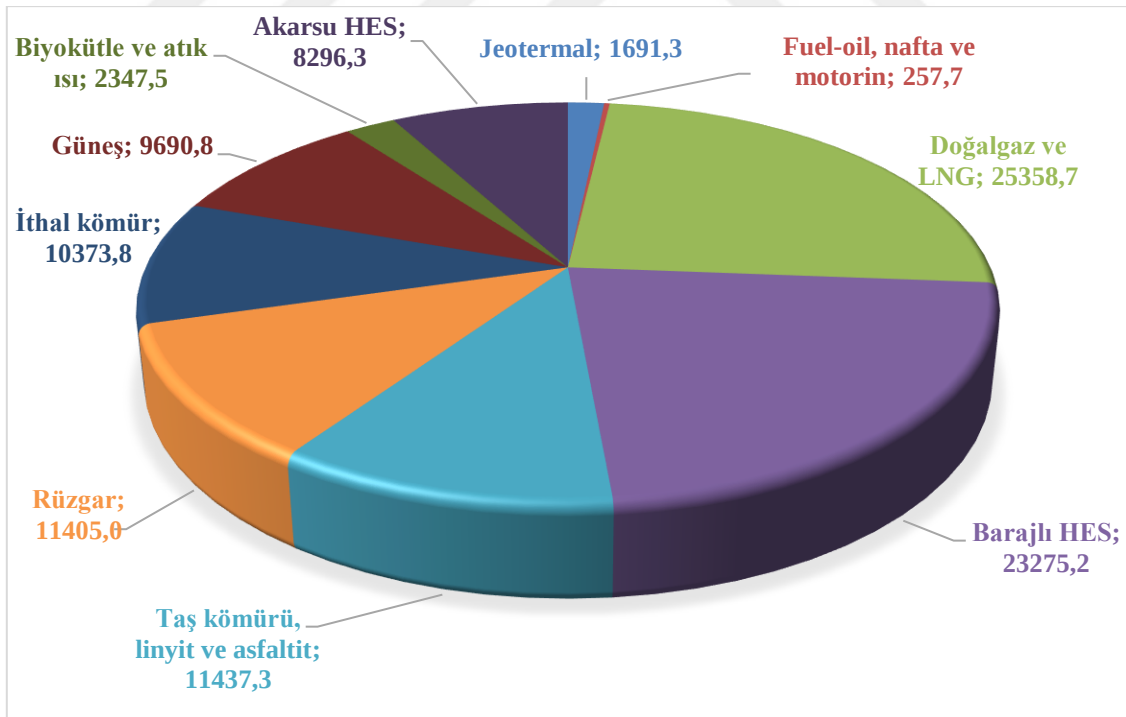
	Birim	2010	2015	2019	2020	2021 (1)	2022 (2)
Üretim	GWs	211208	261783	303898	306703	324528	334253
Termik	GWs	153370	177608	170518	177066	210990	201796
Yerli kömür	GWs	40515	36180	52499	43306	49722	50571
İthal kömür	GWs	14532	39986	60506	62506	61759	70410
Doğalgaz	GWs	98144	99219	57288	70931	99189	80451
Diğer (3)	GWs	2180	2224	336	323	320	363
Yenilenebilir	GWs	55838	84175	133379	129637	113538	132457
Hidrolik	GWs	51795	67146	88823	78094	53053	66867
Rüzgar	GWs	2916	11652	21731	24828	29137	30643
Güneş	GWs	0	194	9250	10950	13211	15680
Diğer (4)	GWs	1126	5183	13576	15764	18137	19267

Türkiye’de güneş enerjisi verileri incelendiğinde kurulu kapasitenin artan bir eğilimde olduğu görülmektedir. Çizelge 1.4’te yıllara göre güneş enerjisinin kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı verilmiştir. Türkiye 2011 yılında güneş enerjisi kurulu gücüne sahip değilken aradan geçen 10 yıl sonunda 7816 MW kurulu güce ulaşmıştır. Haziran 2022 sonu itibariyle güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 8479 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı %8,35 olmuştur (ETKB, 2023).

Çizelge 1.4. Türkiye yıllara göre güneş enerjisinin kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı

Yıl	Kurulu güç (MW)	Toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%)
2011	0	0
2012	0	0
2013	0	0
2014	40	0,06
2015	249	0,34
2016	833	1,06
2017	3421	4,01
2018	5063	5,72
2019	5995	6,57
2020	6667	6,95
2021	7816	7,83
Haz.22	8479	8,35

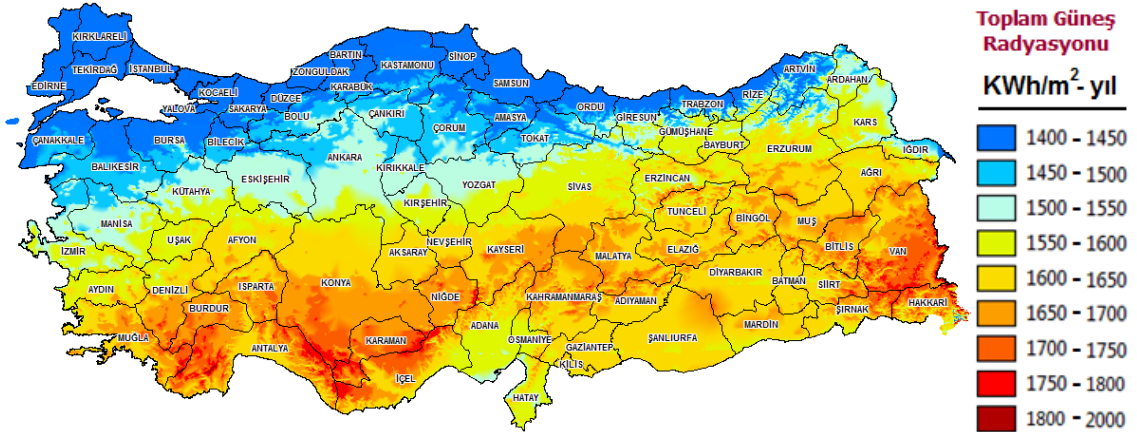
Şekil 1.2’de 2023 Şubat ayı itibariyle Türkiye’nin elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımına bakıldığında güneş enerjisinin 9690,8 MW ile %9’luk bir paya sahip olduğu görülmektedir (EMO, 2023).



Şekil 1.2. Türkiye 2023 yılı (şubat) elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı (MW)

Türkiye'nin birincil kaynaklara dayalı elektrik üretim kapasitesi 2023 Nisan ayı sonu itibarıyla 104,524 MW'a yükselmiştir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerine göre bu gücün 658 MW'lık bölümü 2023'ün ilk dört aylık döneminde devreye girmiştir. Güneş enerjisi yatırımları 445 MW ile bu dönemde devreye giren güç içinde en büyük paya sahiptir. Nisan ayı sonu itibarıyla güneş enerjisi santrallerinin gücü 9.931 MW'a yükselmiştir (Anonim, Mayıs 2023).

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nca hazırlanan, Türkiye Güneş Enerji Potansiyeli Atlası'na göre ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741,07 saat/yıl, ortalama günlük toplam güneşlenme süresi 7,5 saat/gün, ortalama yıllık toplam ışıınım şiddeti 1527,46 kWs/m²-yıl, ortalama günlük toplam ışıınım şiddeti 4,18 kWs/m²-gün olarak hesaplanmıştır. Şekil 1.3'te Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası, Çizelge 1.5'te Türkiye küresel radyasyon değerleri ve Çizelge 1.6'da Türkiye güneşlenme süreleri verilmiştir.



Şekil 1.1. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (EİGM, 2022)

Çizelge 1.5. Türkiye küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	1,79
Şubat	2,50
Mart	3,87
Nisan	4,93
Mayıs	6,14
Haziran	6,57
Temmuz	6,50
Ağustos	5,81
Eylül	4,81
Ekim	3,46
Kasım	2,14
Aralık	1,59

Çizelge 1.6. Türkiye güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	4,11
Şubat	5,22
Mart	6,27
Nisan	7,46
Mayıs	9,10
Haziran	10,81
Temmuz	11,31
Ağustos	10,70
Eylül	9,23
Ekim	6,87
Kasım	5,15
Aralık	3,75

1.4 Çevresel Değerlendirme

Türkiye’de enerji kaynaklı CO₂ emisyonu değeri 1990 yılına göre iki kattan daha fazla artmıştır, enerji talebindeki artışın paralelinde orta ve uzun vadede emisyon değerlerinde daha hızlı bir artış görülmesi beklenmektedir (Uçar, 2012). Birleşmiş milletlere sunulan sera gazı ulusal envanteri verilerine göre, 2007’de toplam sera gazı emisyonunun CO₂ eşdeğeri 373 Mt olmuştur. 2007’deki sera gazlarının %81.7’sini CO₂,

%14.6'sını CH₄, %2.6'sını N₂O ve %1.1'ini flor içeren gazlar oluşturmaktadır (IEA, 2009).

Binalar ve yerleşmelerden kaynaklanan karbon emisyonları, küresel iklim değişikliği ve çevresel sorunlar için önemli bir faktördür. Bu nedenle, ulusal elektrik şebekesinin karbon yoğunluğunun azaltılması ve dağıtık enerji ile binalara bütünleşmiş yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması, karbon emisyonlarının azaltılması ve uzun vadede sıfırlanması için önemli ve gereklidir. Dağıtık sistemlerinin yaygınlaştırılması, binaların kendi enerji ihtiyaçlarını karşılamalarını sağlar ve yeşil ekonomik fırsatlar yaratır (Bayraktar vd., 2024).

1.5 Literatür Araştırması

Kabir vd. (2010), çalışmalarında Bangladeş'in başkenti Dhaka'da güneş enerjisi fotovoltaik (PV) uygulamaları için uygun çatıların hesaplanması için bir yöntem sunmuşlardır. Yöntem, çatıların güneş ışığını alma potansiyelini değerlendirmek için kullanılan bir küresel yatay ışıınım (GHI) haritasına dayanmaktadır. Dhaka'nın 100 metrelik bir çözünürlükte GHI haritasını oluşturmak için Landsat ETM+ uydu verilerini kullanmışlardır. Haritayı kullanarak, Dhaka'nın 1000'den fazla çatısının güneş ışığını alma potansiyelini değerlendirmişlerdir. Dhaka'nın %73,8'inin PV kurulumları için uygun güneş ışığı aldığını bulmuşlardır. Uygun çatıların çoğu, şehrin merkezinde ve kuzeyinde yoğunlaştığını görmüşlerdir.

Gagnon vd. (2018), çalışmalarında ABD genelinde çatı üzeri güneş fotovoltaik (PV) elektrik üretiminin teknik potansiyelinin ayrıntılı bir tahminini sunmuşlardır. Ulusal düzeyde, 8,13 milyar m² uygun çatı alanı 1118 GW PV'ye ev sahipliği yapabilmektedir. Bu kapasite, yılda 1432 TWs elektrik üretmektedir. Bu, 2013 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde satılan elektriğin %38,6'sına eşittir. Ülke çapında PV kurulumu için uygun bina yüzdesinin yüksek olması dikkat çekicidir. ABD'de zayıf bir güneş kaynağına sahip bazı eyaletlerde bile, konut sektörü çatı üstü PV ile toplam elektrik tüketimini karşılama potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

Yang vd. (2020), çalışmalarında İsveç'teki çatı montajlı güneş fotovoltaik (PV) projelerinin potansiyelini, çatı alanı tahminini, potansiyel kurulu kapasiteyi ve potansiyel elektrik üretimini araştırmışlardır. Toplam 5,74 km² çatı alanı güneş panelleri için kullanılabilir bir alana dönüştürülebileceği görülmüştür. Västerås belediyesinin çatıya monte güneş enerjisi sistemleri uygulamalarının yıllık potansiyel elektrik üretimi 626 GWs- 801 GWs'tir ve bu miktar Västerås belediyesinin yıllık elektrik talebinin %55- %70'ine denk geldiği görülmüştür.

Atsu vd. (2021), çalışmalarında Macaristan'daki güneş PV'nin durumunu değerlendirmiş ve 9,6 kWp bir güneş PV sisteminin enerji üretimini, verimliliği ve performans analizini yapmışlardır. Bulgular, Macaristan'ın Avrupa güney bölgesinde kalan ülkelerin çoğuna kıyasla, yüksek bir güneş enerjisi kaynağına sahip olduğunu göstermektedir. Macaristan'da güneş enerjisi potansiyelinin tam olarak kullanılmadığı görülmüştür.

Al-Sharafi vd. (2017), çalışmalarında Suudi Arabistan'da güç üretimi ve hidrojen üretimi için güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin teknik-ekonomik analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yanbu bölgesinde 2 kW PV dizi, 1000 W kapasiteli 3 adet rüzgâr türbini, 2 kW dönüştürücü ve her biri 253 As 7 adet bataryanın entegrasyonunun en düşük enerji birim maliyeti (COE) olan 0,609 \$/kWs'e ulaştığını bulmuşlardır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin, güç üretimi için en uygun yenilenebilir enerji kaynakları olduğunu söylemişlerdir.

Ban vd. (2017), çalışmalarında üçgen çatılar için güneş enerjisi sistemlerinin (GES) optimal boyutunu belirlemek için basitleştirilmiş bir tahmin modeli sunmuşlardır. GES'in kurulum maliyetini, elektrik üretimini ve net faydasını hesaplamak için çatı alanı, güneş enerjisi yoğunluğu ve elektrik tüketimi parametrelerini kullanmışlardır. Model, çatı GES'lerin ekonomikliğini basit ve hızlı bir şekilde değerlendirmek için tasarlanmıştır. Modelin tahminleri, daha karmaşık optimizasyon modelleriyle elde edilen tahminlerle karşılaştırıldığında benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, artan enerji talebini karşılamak için uygun bir alternatif olduğunun farkına varan Hindistan hükümeti, 2022 yılına kadar 100 GW güneş enerjisi kapasitesine ulaşmayı ve bunun %40'ını merkezi olmayan çatı üstü güneş enerjisi projeleriyle gerçekleştirmeyi hedeflemiştir. Berwal vd. (2017), çalışmalarında DeenbandhuChhotu Ram Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Saraswati Kütüphanesi'nin

çatısı üzerine kurulu 50 kW kapasiteli PV tesisin teknik ve finansal uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmaya konu olan PV tesisin ayda 5200 kWh'den fazla elektrik üretmekte olduğu ve 4070 kg/ay sera gazı emisyonunu azaltmakta olduğu bulunmuştur. Geri ödeme süresinin 10,3 yıl olması projeyi finansal açıdan uygulanabilir kılmıştır.

Al-Saqlawi vd. (2018), çalışmalarında Muscat, Umman'da bağımsız elektrik şebekesine sahip ev tipi çatı üstü güneş PV sistemlerinin teknik-ekonomik yapılabilirliğine odaklanmıştır. PV/pil teknolojilerinin ev sektöründeki elektrik talebini karbonsuzlaştırmak için potansiyelini araştırmışlardır. Çalışma, farklı alt sistemlerin ayrıntılı teknik-ekonomik matematiksel bir modelini sunmaktadır. Güneş paneli verimliliği ve pil boyutu gibi çeşitli teknik parametrelerin bağımsız şebekelerin yapılabilirliği üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, incelenen sistem bağlamında Muscat'ta bağımsız PV sistemlerinin şu anda mümkün olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, pil maliyetlerinde önemli bir azalma ve yeterli yüksek bir elektrik fiyatı ile bağımsız şebekelerin ekonomik olarak sürdürülebilir hale gelebileceği gösterilmiştir.

Thebault vd. (2020), çalışmalarında kentsel çevrede fotovoltaik (PV) sistemlerin entegrasyonu için çok kriterli bir çatı sıralama yöntemi sunmuşlardır. Bu kriterler arasında güneş ışınımı, çatı eğimi, çatı yük kapasitesi, gölgeleme, çatı tipi, PV sistemi boyutu, ekonomik uygunluk ve çevresel etki yer almaktadır. Kriterler değerlendirilerek çatılar PV entegrasyonu için sıralanmıştır. Sonuçlar en uygun çatıların, yüksek güneş ışınımı, uygun çatı eğimi, yüksek çatı yük kapasitesi, gölgeleme olmaması, uygun çatı tipi, uygun PV sistemi boyutu, ekonomik olarak uygun ve çevresel etki açısından en az olan çatılar olduğunu göstermiştir. Ancak, en uygun çatılar, her bölge için farklılık gösterebilmektedir ve bu nedenle, bu sıralama yönteminin her bölge için özelleştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Ali vd. (2018), çalışmalarında Maldivler'de çatıya monte edilmiş fotovoltaik (PV) sistemlerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Ülkenin ithal edilen fosil yakıtlara olan elektrik üretimine bağımlılığını azaltma amacıyla çatı üstü PV sistemlerinden elektrik üretme potansiyelini Hulhumalé Adası üzerinde araştırmışlardır. Çatı üstü PV sistemlerinin ekonomik ve çevresel beklentileri, üretim maliyeti, enerji maliyeti, PV katkısı ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi gibi faktörler dikkate alınmıştır.

Maldivler'deki elektrik üretimi maliyeti yüksektir, özellikle dış adalarda yakıt taşıma maliyeti eklenmesiyle daha da yüksektir. Maldivler için güneş PV en umut verici yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Hulhumalé Adası'ndaki tahmini PV potansiyeli, kullanılabilir çatı alanına bağlı olarak yılda 4,8 GWs ile 8,0 GWs arasında değiştiği, PV ve enerji depolama entegrasyonu, yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını görmüşlerdir. PV ve pil depolama entegrasyonunun çevre dostu bir enerji sistemini teşvik ettiği, yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azalttığı ve enerji bağımsızlığını sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Suudi Arabistan Krallığı, hızla büyüyen bir inşaat sektörüne sahiptir. Binaların hızla artması ülke için enerji, çevre ve ekonomi açısından yük oluşturmaktadır. Bunların üstesinden gelebilmek için 2023 yılına kadar 9500 MW'lık yenilenebilir enerji projesi geliştirilmesine karar verilmiştir. Khan vd. (2017), çalışmalarında Suudi Arabistan'ın konut sektöründeki çatı güneş fotovoltaik potansiyelini araştırmışlardır. 13 büyük şehir için elektrik üretim potansiyelini hesaplamışlardır. Bu şehirlerden yılda toplam 51 TWh elektrik üretilebileceğini tespit etmişlerdir. Çalışmalarında PVsyst programını kullanarak simülasyon yapmışlardır. Suudi Arabistan'ın konut PV güç üretim kapasitesinin toplam konut elektrik talebinin %30'unu karşılayabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Kumar vd. (2019), çalışmalarında Kuzey Hindistan'da çatı üstü PV sisteminin performansını, enerji kaybını, bozulma oranını (DR) ve ışık kaynaklı bozulmasını (LID) araştırmışlardır. PVsyst simülasyon aracı enerji üretimini ve enerji kaybını tahmin etmek için kullanılmıştır. Planlanan PV sisteminden yıllık bazda 292954 kW_s enerji üretiminin mümkün olduğu gösterilmektedir. Sistemin yıllık kapasite faktörü, performans oranı ve enerji kayıpları sırasıyla %16,72, %77,27 ve %26,5 ile çalışacağı tahmin edilmektedir. PV sisteminin tahmini bozulma oranı (DR) %0,6/yıl ile %5/yıl arasında olacağı ve olası ışık kaynaklı bozulma oranı (LID) ise %2,5/yıl olacağı bulunmuştur. Son olarak, ışık kaynaklı bozulma oranı ve bozulma oranından kaynaklanan enerji kayıplarının sırasıyla 8109,99 kW_s/yıl ve 1757,724 ile 14647,7 kW_s/yıl arasında olacağı tahmin edilmiştir. Kumar vd. yaptıkları çalışmayı literatürdeki diğer PV tesisleriyle karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar diğer çalışmalarla uyumlu görünmektedir.

Akcan vd. (2020), çalışmalarında Türkiye'nin güneydoğusundaki Batman ilinde şebekeye bağlı 30 kW güneş fotovoltaiik şebekenin tam bir modellemesini ve simülasyonunu yapmışlardır. Performans oranını ve sistemde meydana gelen farklı kayıpları analiz etmek için PVsyst yazılım programını kullanmışlardır. Yapılan çalışmada PV sisteminden elektrik üretiminin Batman ili için iyi bir seçenek olduğunu görmüşlerdir.

Sancar, M.R. ve Altınkaynak, M. (2021), çalışmalarında yaygınlığı ülkemizde hızlı bir şekilde artan çatı üstü PV sistemler konusunu Isparta ili için ele almışlardır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında en düşük elektrik üretim değerinin engebeli 35° eğimde çatı üstü fotovoltaiik sistemde, en yüksek elektrik üretim değerinin düz ve 35° yönelim açısında olan çatı üstü fotovoltaiik sistemde olduğu tespit edilmiştir. Bu iki çatı arasında elektrik üretim farkının da 12415 kWh olduğu hesaplanmıştır.

Shukla vd. (2016), çalışmalarında Hindistan'da bağımsız çalışan çatı üstü güneş paneli sistemlerinin tasarımını, simülasyonunu ve ekonomik analizini yapmışlardır. 110 kWp bağımsız çalışan çatı üstü güneş paneli sisteminin yıllık enerji üretimi 1927,7 kWh, yıllık özgül verimi 931,6 kWh ve ortalama aylık enerji üretimi 160,64 kWh olarak hesaplanmıştır. Ekonomik analiz sonuçlarında, güneş enerjisi sistemlerinin geleneksel enerji kaynaklarına göre daha ekonomik olduğu görülmüştür.

Erzurum, E.N. ve Sayin, S. (2020), PVsyst 7.0.1 programı ile Sivas/Türkiye'deki bir tavuk çiftliği binasının çatısı için simülasyon yapmışlardır. Şebekeye bağlı PV sistemin yılda 111312 kWh enerji üretebileceği görülmüştür. Sistemin performans oranı %87,3 olarak bulunmuştur. En yüksek performans oranı Ocak, en düşük performans oranının ağustos ayında olduğu gözlenmiştir. Kış aylarına göre yaz aylarındaki performans oranlarının sıcaklık sebebiyle düşük olduğu değerlendirilmiştir. Çiftlik binasının yıllık ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin %100'ü çatıya yerleştirilen PV panellerle güneş enerjisinden karşılanmaktadır. Üretilen enerjinin ihtiyaç fazlası, kurulu sistem şebekeye bağımlı sistem olduğundan şebekeye satılabilmektedir. Yapılan çalışmaya ait yıllık faturadan elde edilen kazancın 13525,21 TL olduğu görülmüştür. Çalışmaya konu sistem yaklaşık 12 yıl sonra kendini amorti etmektedir. Sistemin yüksek performansa sahip olması sebebiyle PV panel kullanımının bu yapı için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Alkan, S. ve Ateş, Y. (2020), çalışmalarında doğu-batı yönelimli güneş enerji santrali kurularak mevcut alanda güney yönelimli bir santrale göre birim alanda daha fazla güneş enerjisinden faydalanılabileceğini simülasyon sonuçlarıyla ortaya koymuşlardır. Aynı güçlerdeki güney yönelimli ve doğu-batı yönelimli santrallerin simülasyonlarını yaparak üretim değerlerini karşılaştırmışlardır. Güney yönelimli sistem yerine doğu-batı yönelimli sistem tesis edilerek kurulu güçte yaklaşık %35’lik bir artış sağlandığını ve 58,5 kWp daha fazla kurulum yapılabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Ates, A.M. ve Singh, H. (2021), çalışmalarında Manisa Celal Bayar Üniversitesi Köprübaşı Meslek Yüksekokulu’nda kurulu 30 kWp gücünde bir güneş enerjisi santralının 1 yıllık performansını değerlendirmişlerdir. Tesisin ölçülen güç çıkışı simülasyon tahminleriyle karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Santralin 2018 yılında 23,5 ton CO₂ eşdeğer emisyonunu azalttığı görülmüştür.

Sharma vd. (2018), çalışmalarında PVsyst programı ile bir güneş fotovoltaik sistem tasarımını sunmuşlardır. Çalışmalarında CO₂ emisyonunu da araştırmışlardır. Farklı açılar için araştırma yapılan bu çalışmada eğimin 130 derece ve azimutun 0 olduğu durum %81 performans oranıyla diğer koşullara göre uygun bulunmuştur. Bir PV panel kurulumunun yapılmasının çevre kirliliğini ortadan kaldırmaya yardımcı olacak CO₂ eşdeğer emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Çalışmaya konu analizde, kurulan PV sistemin 11482 ton CO₂ eşdeğer emisyonunu azalttığı görülmüştür. Güneş enerjisiyle elektrik üretimi gerçekleştirilen bir binaya sahip olmanın doğal kaynakları koruyacağını, hava kalitesini, biyolojik çeşitliliği ve ekosistemi iyileştireceğini kanıtlamaktadırlar.

BÖLÜM II

2.1 Güneş Enerji Santrali Proje Tipleri ve Çalışma Prensipleri

Güneş enerjisi santralleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız, çatı üzeri, arazi tipi ve yüzer GES olmak üzere 5 ana başlık altında değerlendirilmektedir.

2.1.1 Şebekeye Bağlı GES

Şebekeye bağlı GES’lerde çift yönlü sayaçlar kullanılmaktadır. Çift yönlü sayaçlar şebekeye verilen ve üretilen elektrik enerjisini kaydetmektedirler. Şebekeye bağlı GES’lerde kullanılan ana ekipmanlar; PV modüller, şebekeye bağlı inverterler ve çift yönlü sayaçlardır. Şebekeye bağlı GES’ler, PV modüllerde üretilen enerjiyi inverterler yardımıyla şebekeye aktarılır forma dönüştürmektedirler. Üretilen enerjinin durumuna göre tüketim fazlası kısım şebekeye verilir. Şekil 2.1’de şebekeye bağlı GES şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Şebekeye bağlı GES şeması (Anonim, Mart 2023)

2.1.2 Şebekeden Bağımsız GES

Şebekeden bağımsız GES’lerde PV modüllerde üretilen enerji akülerde depolanmaktadır, invertörler yardımıyla dönüştürülerek kullanıma hazır hale getirilmektedir. Şebekeden bağımsız GES’lerde kullanılan ana ekipmanlar; PV modüller, akü, şarj kontrol cihazı ve inverterdir. Şekil 2.2’de şebekeden bağımsız GES şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Şebekeden bağımsız GES şeması (Anonim, Mart 2023)

Sektörde kurulu santral tiplerine baktığımızda çatı üzeri GES, arazi tipi GES ve yüzer GES’ler karşımıza çıkmaktadır. Şebekeden bağımsız santrallerde herhangi bir şebekeye ihtiyaç olmadığı için istenilen yer ve istenilen şekilde kurulabilmektedir. Fayda maliyet incelemeleri yapılarak pozitif görülen yerlerde şebekeden bağımsız tesisler kurulabilmektedir.

2.1.3 Çatı Üzeri GES

Bir yapının çatısının üzerine kurulan santraller çatı üzeri GES olarak adlandırılmaktadır. Çatı üzeri güneş enerji santralleri, bina veya yapı sahiplerine kendi enerji ihtiyaçlarını karşılama, elektrik faturalarını azaltma ve çevresel sürdürülebilirlik sağlama imkânı

sunmaktadır. Ayrıca, fazla üretilen elektriği şebekeye satma veya depolama seçenekleri de bulunmaktadır, böylece enerji verimliliği ve ekonomik fayda artırılabilir.

2.1.4 Arazi Tipi GES

Bir arazi üzerine çeşitli konstrüksiyon yapıları kurularak oluşturulan santraller arazi tipi GES olarak adlandırılmaktadırlar. Arazi tipi GES'ler çatı üzeri GES'lere göre nispeten daha karmaşık ve büyük tesisler olmaktadır. Genellikle düz, güneşe maruz kalan araziler üzerine kurulur ve geniş alanlara yayılarak güneş ışığını maksimum düzeyde yakalayabilmektedirler. Arazi tipi güneş enerji santralleri, elektrik şebekesine bağlı olarak çalışabilir veya uzak bölgelerde elektrik ihtiyacını karşılamak için bağımsız sistemler olarak da kullanılabilir.

2.1.5 Yüzer GES

Durgun bir su kaynağının üzerine çeşitli taşıyıcı yapıların kurularak bunun üzerine güneş panellerinin yerleştirilmesiyle oluşturulan santraller yüzer GES olarak adlandırılmaktadır.

2.2 Güneş Enerjisi Santrali Ekipmanları

Güneş enerjisi santrali ekipmanları, PV modül, inverter, konstrüksiyon ve diğer ekipmanlar başlığı altında değerlendirilmiştir.

2.2.1 PV Modül

PV modüller, çerçeve, cam, üst ethylene vinyl acetate (EVA), hücreler, alt ethylene vinyl acetate (EVA), arka levha ve bağlantı kutusu kısımlarından oluşmaktadır. Farklı modül tiplerinde alt ve üst tarafı cam olan PV modüller de görülebilmektedir.

Fotovoltaik güneş teknolojilerindeki temel ilke fotovoltaik dönüşümdür. Bu dönüşüm iki aşamada oluşmaktadır. Birinci aşamada, pozitif- negatif akım taşıyıcıları olan yük çiftlerinin oluşturulması, ikinci aşamada da çiftlerin bir elektrik alanı ile birbirinden ayrılmasıdır. PN eklemi oluşturulurken içerisinde fazla elektron bulunan n-tipi yarı

iletken madde ile fazla pozitif yük bulunan p-tipi yarı iletken madde yan yana getirilir. Bu ekleme yapısal olarak oluşturulmuş bir elektriksel alan mevcuttur. Tüm enerji dönüşüm olayları bu bölgede olmaktadır. Bu ekleme gelen güneş fotonları, enerjisini bu ekleme elektronlara verir ve bu enerji ile oluşan negatif–pozitif yükler, var olan elektriksel alan ile birbirlerinden ayrılır. Böylece devrede doğru akım üretilmiş olur. Üretilen bu doğru akım istenildiğinde bir akü grubunda depolanabilmekte veya DC/AC inverterler üzerinden şebekeye verilebilmektedir.

PV güneş pilleri sıcaklıktan olumsuz yönde etkilenmektedir. Sıcaklık arttıkça PV pilin çıkış gerilimi ve gücü azalmaktadır. Karakteristiklerin gösterdiği sonuçlara göre ışık şiddeti PV pillerin temel enerji kaynağını oluşturmaktadır. Dolayısıyla soğuk ve güneşli ortamlar PV güneş pilleri için en uygun ortamlardır (Altaş, 1998).

2.2.2 İnverter

İnverterler, devredeki frekansı düzenlemekte, DC elektrik enerjisini AC elektrik enerjisine dönüştürmektedirler. İnverterler, tek veya üç fazlı çalışma sistemine sahip cihazlardır.

2.2.3 Konstrüksiyon

İnverterleri, PV modüllerini, kabloları taşıyan mekanik aksam taşıyıcılarına konstrüksiyon adı verilmektedir.

2.2.4 Diğer Ekipmanlar

PV modüllerden inverterlere kadar enerji, güneş enerjisi altında çalışmaya uygun çeşitli kesitlere sahip DC kablolar ile taşınmaktadır. İnverterden çıkan enerji yine bir kablolama yöntemi ile şebekeye bağlanılacak noktaya kadar taşınmaktadır. Bu taşıma esnasında şebeke uzaktaysa nakil hatları kurulabilmektedir. Şebeke farklı bir gerilim seviyesindeyse araya bir trafo eklenerek şebekeye bağlandığımız noktadaki gerilim seviyesine uygun bir gerilim seviyesinde enerji üretilmesi sağlanmaktadır. Şebekeye bağlanmadan önce çeşitli koruma ekipmanları kullanılması gerekmektedir. Bunlardan bazıları AG panoları, toplama panoları, OG enerji koruma mekanizmaları olarak

adlandırılan hücreler ve monoblok köşklerdir. İnverterlerden üretilen enerjiyi olası kablo hataları, inverter arızaları veya işçilik problemlerine karşı şebekeye zarar vermemek adına koruma düzenekleri şebekeye bağlanılmadan önce kurulmalıdır.

2.3 GES Proje Paftaları

GES proje paftaları genel yerleşim planı, tek hat şeması, topraklama planı, statik ve mekanik projeden oluşmaktadır.

2.3.1 Genel Yerleşim Planı

Sahada bulunan her ekipmanın yerleşimini belirten plan, genel yerleşim planı olarak adlandırılır.

2.3.2 Tek Hat Şeması

GES'lerinde PV modüllerden şebekeye bir enerji aktarımı olmaktadır. Tek hat şeması, elektrik sistemlerinin öz şekilde ifade edilmesini sağlayan bir plandır. Kullanılan elektrik ekipmanlarının özellikleri tek hat şemasında görülebilmektedir. Tek hat şemasında, kullanılan kablo kesitleri, panel ve inverter sayıları verilmektedir.

2.3.3 Topraklama Planı

Elektrik taşıyan tesisler can ve mal güvenliğini korumak için topraklama alt yapısı kurmak zorundadır. Tüm elektrik taşıyan mekanik aksamaların ana topraklama ağına bir eş potansiyel oluşturacak şekilde bağlanmış olması gerekmektedir.

2.3.4 Statik, Mekanik Proje

GES kurulumunda kullanılacak metal aksamın kesitleri, bunların birbiriyle bağlantıları, bağlantı elemanları ve bağlantı şekilleri tanımlanmaktadır. Rüzgâr, kar, deprem, sıcaklık ve santralin kendi yükünü taşıyacak katsayılar kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır.

2.4 GES Yerinde İnceleme ve Keşif

Mekanik ve statik alt yapı, elektriksel alt yapı, gölgeleme nesneleri, çatı kullanımı, yatırımcı talepleri ve çevresel ekipmanlar güneş enerjisi santrali kurulumlarında incelenmelidir.

Çatı üzeri güneş enerji santralleri için binanın statik yapısı, çatı taşıyıcı konstrüksiyonu, çatı kaplaması tipi ve kalınlığı, çatı deformasyonları incelenmelidir. Bacalar, direkler, parapetler, ağaçlar, binalar gölgelemeye sebebiyet verebileceğinden elektrik üretimini düşürmektedirler. Elektriksel alt yapı incelemeleri yapılırken, AG pano, kablo güzergahları, şaftlar, trafo, ölçü noktası, sayaç kontrolleri yapılmalıdır.

2.5 Tasarım Kriterleri ve Yatırım Alanının Belirlenmesi

Proje sahasının güneşlenme potansiyeli, PV modül açısının belirlenmesi, azimut değerleri, gölgeleme analizleri, PV modüller arası mesafe tayini, çatı açısının değerlendirilmesi, çatının GES kurulumuna uygunluğu (bakı, güneşin ışınlımı), şebeke bağlantısı GES tasarımını ve yatırım alanını belirleyen başlıca unsurlardır.

Gölgeleme analizleri panelin verimli çalışması açısından önemlidir. Gölgeleme analizi yapılırken en uzun gölge boyunun olduğu 21 Aralık tarihi seçilebilmektedir. Yaz aylarında herhangi bir gölgelemeye maruz kalmadan maksimum verimden yararlanmaya olanak tanımaktadır. 21 Aralık tarihinde panellere gölge gelmeyecek şekilde tasarım yapılması önerilmektedir.

2.6 Sistem Kayıpları

Işık kaynaklı bozulma (LID)

Panellerde güneşe maruz kaldıkları ilk an %2- 3'lük bir verim kaybı görülebilmektedir. Her marka ve modele göre LID miktarı farklılaşabilmektedir. Üreticiler ürünlerin teknik belgelerinde bu bilgiye yer vermektedirler.

Gölgeleme kayıpları

Panel üzerine düşen gölgelerin üretim düşüşüne sebep olmasına gölgeleme kaybı denilmektedir.

Yansıma kayıpları

Işınının panele ulaşana kadar zayıflamasına karşılık gelen bir kayıptır. Simülasyon programları tarafından otomatik olarak hesaplanabilmektedir.

PV modül sıcaklık kayıpları

Ortam sıcaklığından kaynaklı bir kayıptır. Yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde verimin düşük olduğu görülmektedir.

Kirlilik kayıpları

PV modülün üzerini kaplayan toz, kir, kar ve diğer tanecikler güç kaybına sebep olmaktadır.

DC kayıplar ve AC kayıplar

Kablo direnci sonucu DC kayıplar meydana gelmektedir. AC kayıplar, kablo kayıpları, AC bağlantı kayıpları ve inverter kayıplarıdır.

İnverter kayıpları

İnverterlerin çalışması esnasında meydana gelen kayıplardır. İnverterlerde verim, sıcaklık kayıpları gibi etmenler kayıpları oluşturmaktadır.

Uyumsuzluk kayıpları

Dizilerdeki modüller arasındaki elektriksel farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

2.7 GES Yasal Mevzuatı

12 Mayıs 2019 tarihinde yayımlanan elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinin amacı elektrik piyasasında, tüketicilerin elektrik ihtiyaçlarını tüketim noktasına en yakın kendi üretim tesisinden karşılaması, arz güvenliğinin sağlanmasında küçük ölçekli üretim tesislerinin ülke ekonomisine kazandırılması ve küçük ölçekli üretim kaynaklarının etkin kullanımının sağlanması ile elektrik şebekesinde meydana

gelen kayıp miktarlarının düşürülmesi amacıyla lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğü olmaksızın, elektrik enerjisi üretebilecek, gerçek veya tüzel kişilere uygulanacak usul ve esasların belirlenmesidir. Yönetmelik kapsamında üretim tesisi kuracak gerçek veya tüzel kişilerin üretim tesisleri ile tüketim tesislerinin aynı dağıtım bölgesi içerisinde olması zorunludur ve üretim tesisleri için kurulu güç üst sınırı uygulanmamaktadır (EPDK, 2019). Bu yönetmeliğin yürürlüğe girmesiyle Çatı GES başvuruları ivmelenmiştir.

9 Mayıs 2021 tarihinde yayımlanan değişikliklerle elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretim yönetmeliği kapsamında durağan hale gelen arazi GES'ler yeniden hız kazanmıştır. 9 Mayıs 2021'de yayımlanan lisanssız elektrik üretimi yönetmeliğinin 5.1.c maddesi, 5.1.ç maddesi ve 5.1.h maddesi kapsamında çatılara ve arazilere güneş enerjisi santrali kurulumu başvuruları yapılmaktadır.

5.1.c maddesi: Kurulu gücü 1 MW veya kanunun 14. maddesi çerçevesinde cumhurbaşkanı tarafından belirlenmiş kurulu güç sınırına kadar olan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri, ön lisans ve lisans almayla şirket kurma yükümlülüğünden muaf olarak kurulabilecek üretim tesisleridir. 12 Mayıs 2019 resmi gazete ilanında lisanssız elektrik üretim üst sınırı 5 MW olarak belirlenmiştir. Lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinin 5.1.c maddesine göre başvuruda bulunan güneş enerji santralleri için tüketilen elektrik enerjisi için mahsuplaşma ve EPDK tarafından belirlenen ulusal tarife üzerinden 10 yıl boyunca satış imkânı bulunmaktadır.

5.1.ç maddesi: Ürettiği enerjinin tamamını iletim veya dağıtım sistemine vermeden kullanan, üretimi ve tüketimi aynı ölçüm noktasında olan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleridir. 5.1.ç maddesine göre başvuruda bulunan güneş enerji santralleri için tüketilen elektrik enerjisi için mahsuplaşma yapılmaktadır. Üretim fazlası enerji YEKDEM'e bedelsiz katkı olarak alınmaktadır. Sözleşme gücü sınırı bulunmamaktadır.

5.1.h maddesi: Belediyeler ve bunların bağlı olduğu kuruluşları ile sanayi tesisleri ve tarımsal sulama amaçlı tesisler tarafından bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücünün iki katı ve diğer kişiler bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücü ile sınırlı olmak kaydıyla, tüketim tesisi ile aynı ya da farklı ölçüm noktasında kurulan yenilenebilir enerji

kaynaklarına dayalı üretim tesisleridir. 5.1.h maddesine göre; başvurular dağıtım seviyesinde kısa devre akım limitine, iletim seviyesinde bağlantı kapasitesine göre değerlendirilecektir. Tüm iletim ve/veya dağıtım sistemi yatırımları ile bunlara ilişkin izin bedellerini yatırımcı karşılayacaktır. Farklı dağıtım bölgesindeki tüketim tesislerinin toplam kapasitesi kadar yine dağıtım seviyesinde üretim tesisi kurulabilecektir. 5.1.c maddesi için uygulanan mahsuplaşma hükümleri 5.1.h için de geçerlidir. Ay içinde sayaçtan geçen toplam veriş ve çekiş miktarları üzerinden aylık mahsuplaşma uygulanacaktır. İhtiyaç fazlası enerji kendi abone grubuna ait aktif enerji bedelinden satılabilecektir. İletim seviyesinden tüketim aboneliği olanlar dağıtım veya iletim seviyesinden tüketim aboneliği sözleşme gücüne kadar tesis kurabileceklerdir. İletim seviyesinde tüketimler için dağıtım seviyesinde üretim tesisi veya tesisleri kurulabilecektir. Aynı aboneliğe ait 2 veya daha fazla farklı dağıtım bölgesinde GES olması için durumunda temmuz ayından sonra mahsuplaşma yapılabilir. 11 Ağustos 2022’de yönetmelikte yapılan değişiklikle 5.1.h. maddesi kapsamında bir üretim tesisinde üretilen enerji, aynı dağıtım bölgesi içerisinde yer alma şartı aranmaksızın aynı kişiye ait tüketim tesisi ya da tesislerinde tüketilebilmektedir. Organize sanayi bölgesi içerisindeki tesisler organize sanayi bölgesi dışında da GES kurabilmektedir (EPDK, 2022).

BÖLÜM III

3.1 Türkiye'de Farklı Bölgelerden Şehirlerin Seçimi, Güneş Enerjisi Potansiyelleri ve Konum Bilgileri

Türkiye'de hızla gelişen güneş enerjisi sektörü, çatı üzeri güneş enerji santralleri ile önemli bir ivme kazanmıştır. Türkiye’de yedi farklı bölgeden toplam yedi şehir Türkiye genelinde kurulan çatı üzeri güneş enerji santrallerini farklı bölgelerdeki performans ve etkinlik açısından karşılaştırmak için seçilmiştir. Güneş enerji potansiyelinin coğrafi olarak değişken olduğu Türkiye’de, farklı iklim koşulları, güneşlenme süreleri ve diğer çevresel etkenler, çatı üzeri güneş enerji santrallerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Türkiye’de yedi farklı bölgeden seçilen şehirler; İstanbul, Trabzon, İzmir, Adana, Niğde, Malatya ve Mardin’dir.

3.1.1 Marmara Bölgesi

İstanbul, Türkiye'nin en kalabalık şehridir ve Marmara Bölgesi'nde yer almaktadır. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre İstanbul yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1400-1450 kWh/m²'dir, Şekil 3.1’de gösterilmiştir. İstanbul küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. İstanbul'un günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 3,46 saat, şubat ayı için 4,43 saat, mart ayı için 5,32 saat, nisan ayı için 6,85 saat, mayıs ayı için 8,61 saat, haziran ayı için 10,51 saat, temmuz ayı için 11,57 saat, ağustos ayı için 10,14 saat, eylül ayı için 7,83 saat, ekim ayı için 5,22 saat, kasım ayı için 3,85 saat, aralık ayı için 2,96 saattir, Çizelge 3.2’de gösterilmektedir (EİGM, 2022). Bu değerler, İstanbul'un güneş enerjisi potansiyelinin orta düzeyde olduğunu göstermektedir. Marmara bölgesine kurulması planlanan bir çatı üzeri güneş enerji santrali, bölgenin genellikle ılıman iklim koşullarına sahip olması ve güneşli gün sayısının yüksek olmasından dolayı daha yüksek verimlilikle çalışmasını sağlamaktadır. Bölgenin enerji talebinin yoğun olması, çatı üzeri güneş enerji projelerini ekonomik açıdan cazip kılabilmekte ve enerji üretimini daha yakın bir tüketici kitlesine taşıyabilmektedir. Ancak, olumsuz yönler de göz önüne alınmalıdır. Marmara bölgesindeki iklim koşulları, özellikle kış aylarında yoğun bulut örtüsü ve yağışlar nedeniyle güneş enerjisi üretimini olumsuz etkileyebilmektedir.

İstanbul için seçilen konuma ait enlem değeri 40.9951°, boylam değeri 28.666°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir.

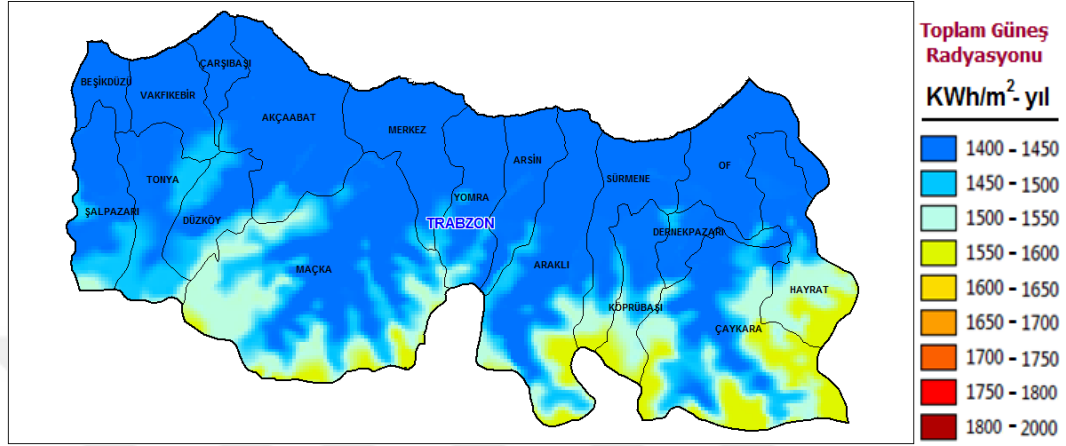


Şekil 3.2. İstanbul'da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.1.2 Karadeniz Bölgesi

Trabzon, Karadeniz Bölgesi'nde yer alan bir ildir. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre Trabzon'un yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1400-1600 kWh/m²'dir, Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Trabzon küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Trabzon'un günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 3,17 saat, şubat ayı için 4,29 saat, mart ayı için 4,88 saat, nisan ayı için 6,16 saat, mayıs ayı için 7,64 saat, haziran ayı için 8,35 saat, temmuz ayı için 7,90 saat, ağustos ayı için 7,62 saat, eylül ayı için 7,43 saat, ekim ayı için 5,42 saat, kasım ayı için 4,20 saat, aralık ayı için 2,99 saattir, Çizelge 3.4'te gösterilmektedir (EİGM, 2022). Karadeniz Bölgesi, Türkiye'nin en az güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgesidir. Karadeniz bölgesinde yoğun yağışların ve bulutlu havanın, güneş enerjisi üretimine olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu bölgede, yoğun yağışlar ve nem oranı, yapılan tesislerin dayanıklılığını ve alt yapı elemanlarının uzun ömürlülüğünü etkileyebilmektedir. Güneş enerji santralleri için gerekli olan altyapı, özellikle zemin stabilitesi, temel inşaatı ve güç iletim hatları gibi unsurlar, bölgenin topoğrafik yapısı ve iklim koşulları nedeniyle maliyetli olabilmektedir. Ancak, Karadeniz'in yüksek nem oranı, temiz enerji üretimi için uygun bir ortam sağlayabilmektedir ve bu da çatı üzeri güneş enerji santralının performansını artırabilmektedir. Çatı üzeri güneş enerji santrallerinin kurulumu sırasında doğal habitatlar zarar görebilmekte, bitki örtüsü değişebilmekte ve su kaynaklarına etkiler oluşabilmektedir. Bu etkiler, çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmeli ve projelerin çevreye en az zarar veren tasarım ve inşa süreçleriyle

hayata geçirilmesi için önlemler alınmalıdır. Alt yapı maliyetleri ve çevresel etkiler, Karadeniz bölgesinde çatı üzeri güneş enerji santralleri planlanırken dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir ve bu unsurların yönetimi, projelerin başarılı bir şekilde uygulanması için kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.3. Trabzon yıllık toplam güneş radyasyonu(kWs/m²-yıl)

Çizelge 3.3. Trabzon küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	1,43
Şubat	2,37
Mart	3,42
Nisan	4,61
Mayıs	5,84
Haziran	6,17
Temmuz	6,10
Ağustos	5,53
Eylül	4,35
Ekim	3,06
Kasım	1,73
Aralık	1,25

Çizelge 3.4. Trabzon günlük güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	3,17
Şubat	4,29
Mart	4,88
Nisan	6,16
Mayıs	7,64
Haziran	8,35
Temmuz	7,90
Ağustos	7,62
Eylül	7,43
Ekim	5,42
Kasım	4,20
Aralık	2,99

Trabzon için seçilen konuma ait enlem değeri 40.9992°, boylam değeri 39.7498°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Trabzon'da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.1.3 Ege Bölgesi

İzmir, Ege Bölgesi'nde yer alan bir ildir. Ege bölgesi genellikle güneşli ve ılıman bir iklimle karakterizedir, bu da güneş enerji sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre İzmir'in yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1450-1700 kWh/m²'dir, Şekil 3.5'te gösterilmiştir. İzmir küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. İzmir'in günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 4,86 saat, şubat ayı için 5,86 saat, mart ayı için 6,96

saat, nisan ayı için 8,03 saat, mayıs ayı için 9,77 saat, haziran ayı için 11,89 saat, temmuz ayı için 12,20 saat, ağustos ayı için 11,48 saat, eylül ayı için 9,67 saat, ekim ayı için 7,61 saat, kasım ayı için 5,55 saat, aralık ayı için 4,27 saattir, Çizelge 3.6'da gösterilmektedir (EİGM, 2022). Bu değerler, İzmir'in güneş enerjisi potansiyelinin çok yüksek olduğunu göstermektedir. Yüksek güneşlenme süreleri, çatı üzeri güneş enerji santrallerinin daha fazla elektrik üretme potansiyeli taşımasına katkı sağlamaktadır. Ege bölgesinde enerji talebi yoğundur ve bölge turistik yerlere sahiptir. Bu etmenler güneş enerji projelerini ekonomik ve stratejik olarak çekici kılmaktadır. Enerji üretimi, yerel tüketim ihtiyaçlarına daha yakın bir kaynaktan sağlandığında iletim kayıpları en aza indirilebilmekte ve enerji verimliliğini artırabilmektedir. Ancak, özellikle yaz aylarında yüksek sıcaklıklar, güneş panellerinin performansını olumsuz etkileyebilmektedir ve soğutma ihtiyacı duyulabilmektedir. Ege bölgesindeki bazı bölgelerde yoğun rüzgâr koşulları dikkate alınmalıdır, çünkü bu durum panellerin mekanik dayanıklılığını zorlayabilmekte ve zarar görmesine neden olabilmektedir. Yoğun rüzgâr, enerji üretim kapasitesini düşürebilmekte ve bakım maliyetlerini artırabilmektedir. Güneş panellerinin yapısı ve yerleşimi, yüksek rüzgâr hızlarına dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Uygun tasarım, panellerin sağlam bir şekilde tutulmasını ve rüzgârın neden olduğu titreşimlerin en aza indirilmesini sağlamaktadır. Aşırı rüzgâr hızlarından dolayı güneş panellerinin yüzeyine çarpan partiküller panelin çizilmesine veya panellerin aşınmasına neden olabilmektedir. Rüzgârın güneş panelleri üzerinde her zaman olumsuz etkileri olmamaktadır. Rüzgârın güneş panellerinin yüzeyine çarpması, panellerin temiz kalmasını sağladığından toz, kir veya diğer partiküllerin birikimini azaltarak panellerin verimliliğini artırabilmektedir.



Şekil 3.5. İzmir yıllık toplam güneş radyasyonu(kWs/m²-yıl)

Çizelge 3.5. İzmir küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	1,81
Şubat	2,16
Mart	3,79
Nisan	4,99
Mayıs	5,94
Haziran	6,50
Temmuz	6,27
Ağustos	5,76
Eylül	4,63
Ekim	3,54
Kasım	2,20
Aralık	1,62

Çizelge 3.6. İzmir günlük güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	4,86
Şubat	5,86
Mart	6,96
Nisan	8,03
Mayıs	9,77
Haziran	11,89
Temmuz	12,20
Ağustos	11,48
Eylül	9,67
Ekim	7,61
Kasım	5,55
Aralık	4,27

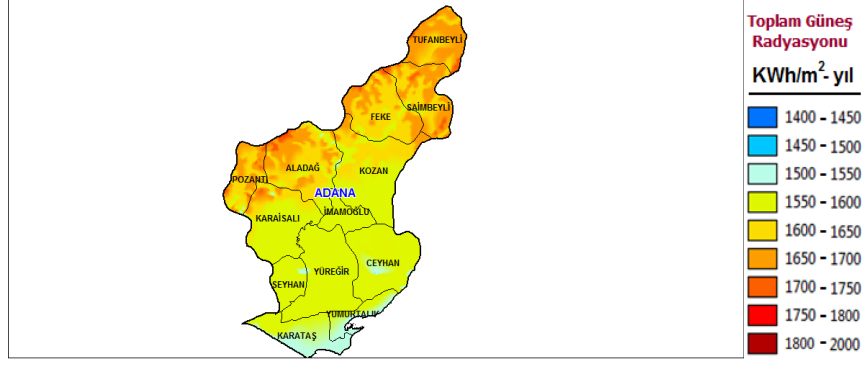
İzmir için seçilen konuma ait enlem değeri 38.4449°, boylam değeri 27.1752°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. İzmir’de seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.1.4 Akdeniz Bölgesi

Adana, Akdeniz Bölgesi’nde yer alan bir ildir. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre Adana’nın yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı $1500-1800 \text{ kWh/m}^2$ ’dir, Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Adana küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. Adana’nın günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 4,67 saat, şubat ayı için 5,65 saat, mart ayı için 6,97 saat, nisan ayı için 7,84 saat, mayıs ayı için 9,72 saat, haziran ayı için 11,29 saat, temmuz ayı için 11,77 saat, ağustos ayı için 11,22 saat, eylül ayı için 10,15 saat, ekim ayı için 7,78 saat, kasım ayı için 5,86 saat, aralık ayı için 4,21 saattir, Çizelge 3.8’de gösterilmektedir (EİGM, 2022). Akdeniz Bölgesi, Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerden biridir. Bu bölge, genellikle güneşli iklimiyle bilinmektedir, bu da güneş enerjisi üretimi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Yüksek güneşlenme süreleri ve düşük bulut örtüsü, çatı üzeri güneş enerji santrallerinin verimliliğini artırabilmektedir. Akdeniz bölgesindeki yüksek sıcaklık ve güneş radyasyonu, güneş panellerinin aşınmasına ve performanslarının azalmasına neden olabilmektedir. Su kaynakları bakımından genellikle kıt olan bu bölgede, güneş enerjisi santrallerinin su tüketimi de dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.7. Adana yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m²-yıl)

Çizelge 3.7. Adana küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	1,98
Şubat	2,42
Mart	4,12
Nisan	4,98
Mayıs	6,07
Haziran	6,68
Temmuz	6,46
Ağustos	5,91
Eylül	4,90
Ekim	3,78
Kasım	2,33
Aralık	1,81

Çizelge 3.8. Adana günlük güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	4,67
Şubat	5,65
Mart	6,97
Nisan	7,84
Mayıs	9,72
Haziran	11,29
Temmuz	11,77
Ağustos	11,22
Eylül	10,15
Ekim	7,78
Kasım	5,86
Aralık	4,21

Adana için seçilen konuma ait enlem değeri 37.0441°, boylam değeri 35.3962°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.8'de verilmiştir.

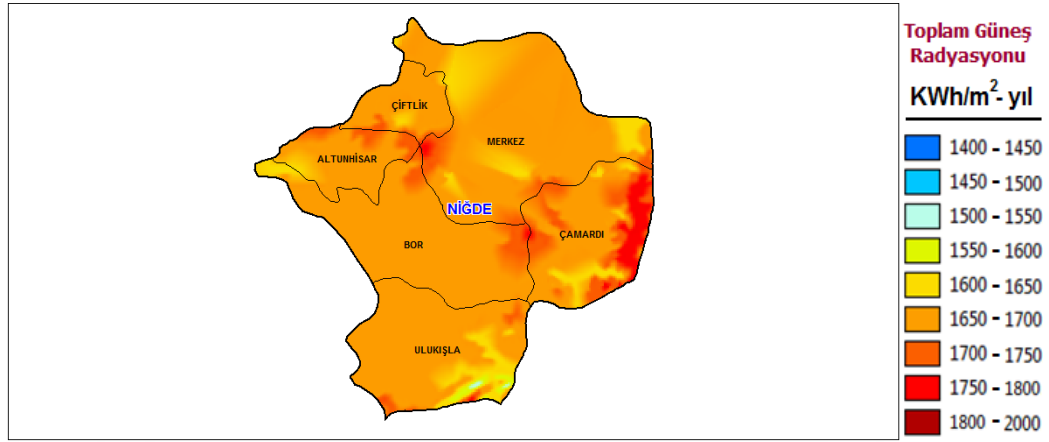


Şekil 3.8. Adana'da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.1.5 İç Anadolu Bölgesi

Niğde, İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan bir ildir. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre Niğde'nin yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1600-1800kWs/m²'dir, Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Niğde küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Niğde'nin günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 4,41 saat, şubat ayı için 5,48 saat, mart ayı için 6,74 saat, nisan ayı için 7,85 saat, mayıs ayı için 9,51 saat, haziran ayı için 11,39 saat, temmuz ayı için 12,16 saat, ağustos ayı için 11,57 saat, eylül ayı için 10,06 saat, ekim ayı için 7,61 saat, kasım ayı için 5,65 saat, aralık ayı için 3,90 saattir, Çizelge 3.10'da gösterilmektedir (EİGM, 2022). Bu değerler, Niğde'nin güneş enerjisi potansiyelinin çok yüksek olduğunu göstermektedir. İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerden biridir. Bu bölge, genellikle sıcak ve kurak bir iklimle karakterizedir ve bu durum, güneş enerji sistemlerinin yüksek verimlilikle çalışmasını destekleyebilmektedir. İç Anadolu geniş çatı alanlarına sahiptir. Bu, çatı üzeri güneş enerji santralleri için uygun yerleşim alanları sağlamaktadır ve enerji üretimi için elverişli bir ortam sunmaktadır. Bölgenin genellikle düşük nem seviyelerine sahip olması, panellerin temiz kalmasını ve daha etkili bir şekilde enerji üretmelerini desteklemektedir. İç Anadolu bölgesi, yaz aylarında yüksek sıcaklıklara ve kış aylarında soğuk hava koşullarına sahiptir. Bu durum, güneş panellerinin performansını etkilemektedir. Aşırı sıcaklıklar ve don olayları panellerin

dayanıklılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Bölgenin yüksek rakımlı bölgelerinde rüzgâr hızları da dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.9. Niğde yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m²-yıl)

Çizelge 3.9. Niğde küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	2,03
Şubat	2,65
Mart	4,23
Nisan	5,11
Mayıs	6,37
Haziran	6,84
Temmuz	6,92
Ağustos	6,06
Eylül	5,10
Ekim	3,76
Kasım	2,39
Aralık	1,81

Çizelge 3.10. Niğde günlük güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	4,41
Şubat	5,48
Mart	6,74
Nisan	7,85
Mayıs	9,51
Haziran	11,39
Temmuz	12,16
Ağustos	11,57
Eylül	10,06
Ekim	7,61
Kasım	5,65
Aralık	3,90

Niğde için seçilen konuma ait enlem değeri 37.9333°, boylam değeri 34.6163°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.10'da verilmiştir.

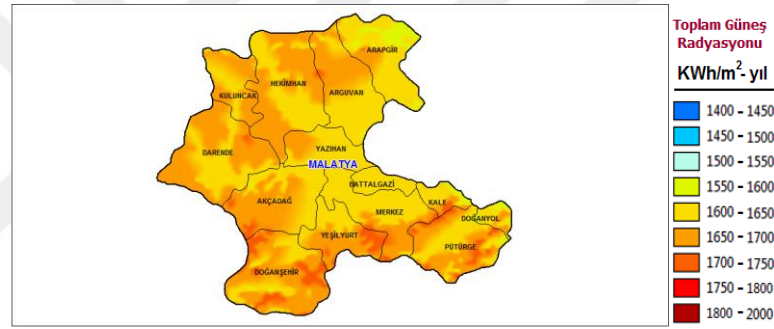


Şekil 3.10. Niğde'de seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.1.6 Doğu Anadolu Bölgesi

Malatya, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan bir ildir. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre Malatya'nın yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1550-1800 kWs/m²'dir, Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Malatya küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.11'de gösterilmiştir. Malatya'nın günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 4,23 saat, şubat ayı için 5,30 saat, mart ayı için 6,59 saat, nisan ayı için 7,86 saat, mayıs ayı için 9,41 saat, haziran ayı için 11,43 saat, temmuz ayı için 12,09 saat, ağustos ayı

için 11,44 saat, eylül ayı için 9,96 saat, ekim ayı için 7,28 saat, kasım ayı için 5,26 saat, aralık ayı için 3,64 saattir, Çizelge 3.12’de gösterilmektedir (EİGM, 2022). Bu değerler, Malatya'nın güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bölgenin yüksek rakımlı dağlık bölgelerinde güneşin daha dik açıyla gelmesi, panellerin daha yüksek verimlilikle çalışmasına katkı sağlamaktadır. Doğu Anadolu bölgesi, kış aylarında soğuk ve karlı hava koşullarına sahiptir. Kar birikimi, panellerin performansını olumsuz etkilemektedir ve düzenli temizlik gereksinimini artırmaktadır. Bölgedeki yüksek rüzgâr hızları, güneş panellerinin ve montaj sistemlerinin daha dayanıklı olmasını gerektirmektedir. Enerji ihtiyacının büyüdüğü ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan talebin arttığı bir dönemde Doğu Anadolu bölgesine kurulan çatı üzeri güneş enerji santralleri, bölge ekonomisine katkıda bulunabilir ve enerji üretimini çevresel olarak daha sürdürülebilir bir hale getirebilir.



Şekil 3.11. Malatya yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m²-yıl)

Çizelge 3.11. Malatya küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	1,88
Şubat	2,52
Mart	4,14
Nisan	5,13
Mayıs	6,36
Haziran	6,84
Temmuz	6,82
Ağustos	6,01
Eylül	5,09
Ekim	3,73
Kasım	2,33
Aralık	1,74

Çizelge 3.12. Malatya günlük güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	4,23
Şubat	5,30
Mart	6,59
Nisan	7,86
Mayıs	9,41
Haziran	11,43
Temmuz	12,09
Ağustos	11,44
Eylül	9,96
Ekim	7,28
Kasım	5,26
Aralık	3,64

Malatya için seçilen konuma ait enlem değeri 38.3283°, boylam değeri 38.2036°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.12'de verilmiştir.

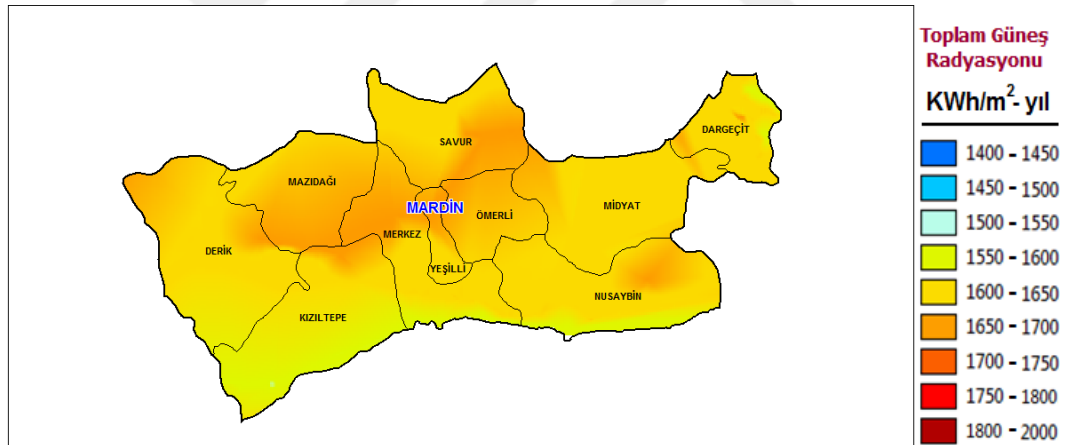


Şekil 3.12. Malatya'da seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.1.7 Güneydoğu Anadolu Bölgesi

Mardin, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan bir ildir. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına göre Mardin'in yıllık toplam güneş radyasyonu miktarı 1550-1750 kWh/m²'dir, Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Mardin küresel radyasyon değerleri Çizelge 3.13'te gösterilmiştir. Mardin'in günlük ortalama güneşlenme süresi ocak ayı için 4,36 saat, şubat ayı için 5,45 saat, mart ayı için 6,74 saat, nisan ayı için 7,90 saat, mayıs ayı için 10,01 saat, haziran ayı için 12,52 saat, temmuz ayı için 12,84 saat, ağustos ayı için

12,03 saat, eylül ayı için 10,07 saat, ekim ayı için 7,59 saat, kasım ayı için 5,83 saat, aralık ayı için 4,43 saattir, Çizelge 3.14’te gösterilmektedir (EİGM, 2022). Bu değerler, Mardin'in güneş enerjisi potansiyelinin çok yüksek olduğunu göstermektedir. Bölgenin yüksek güneşlenme süreleri, çatı üzeri güneş enerji santrallerinin daha fazla elektrik üretebilmesine olanak tanımaktadır. Güneydoğu Anadolu genellikle sıcak ve güneşli iklim koşullarına sahiptir. Bu, güneş enerji sistemlerinin daha yüksek verimlilikle çalışmasını sağlamaktadır. Bölge, enerji talebinin yüksek olduğu bir coğrafyada yer almaktadır ve bu durum çatı üzeri güneş enerji santralleri için potansiyel bir avantaj sağlamaktadır. Yerel enerji talebinin karşılanmasında çatı üzeri güneş enerji sistemleri, bölgesel enerji güvenliğini artırmakta ve enerji maliyetlerini düşürmektedir. Bölgedeki yüksek sıcaklıklar, güneş panellerinin aşırı ısınmasına ve performanslarının düşmesine neden olabilmektedir. Bölgenin kimi zaman şiddetli rüzgarlarla karşılaşması, güneş panellerinin dayanıklılığı ve montaj sistemlerinin sağlamlığı açısından da önem taşımaktadır.



Şekil 3.13. Mardin yıllık toplam güneş radyasyonu (kWs/m²-yıl)

Çizelge 3.13. Mardin küresel radyasyon değerleri (kWs/m²-gün)

Aylar	Küresel radyasyon değerleri
Ocak	1,91
Şubat	2,52
Mart	4,07
Nisan	5,08
Mayıs	6,23
Haziran	6,83
Temmuz	6,62
Ağustos	5,92
Eylül	5,04
Ekim	3,80
Kasım	2,41
Aralık	1,80

Çizelge 3.14. Mardin günlük güneşlenme süreleri (saat)

Aylar	Güneşlenme süreleri
Ocak	4,35
Şubat	5,45
Mart	6,74
Nisan	7,90
Mayıs	10,01
Haziran	12,52
Temmuz	12,84
Ağustos	12,03
Eylül	10,07
Ekim	7,59
Kasım	5,83
Aralık	4,43

Mardin için seçilen konuma ait enlem değeri 37.3075°, boylam değeri 40.7286°'dir. Seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.14'te verilmiştir.

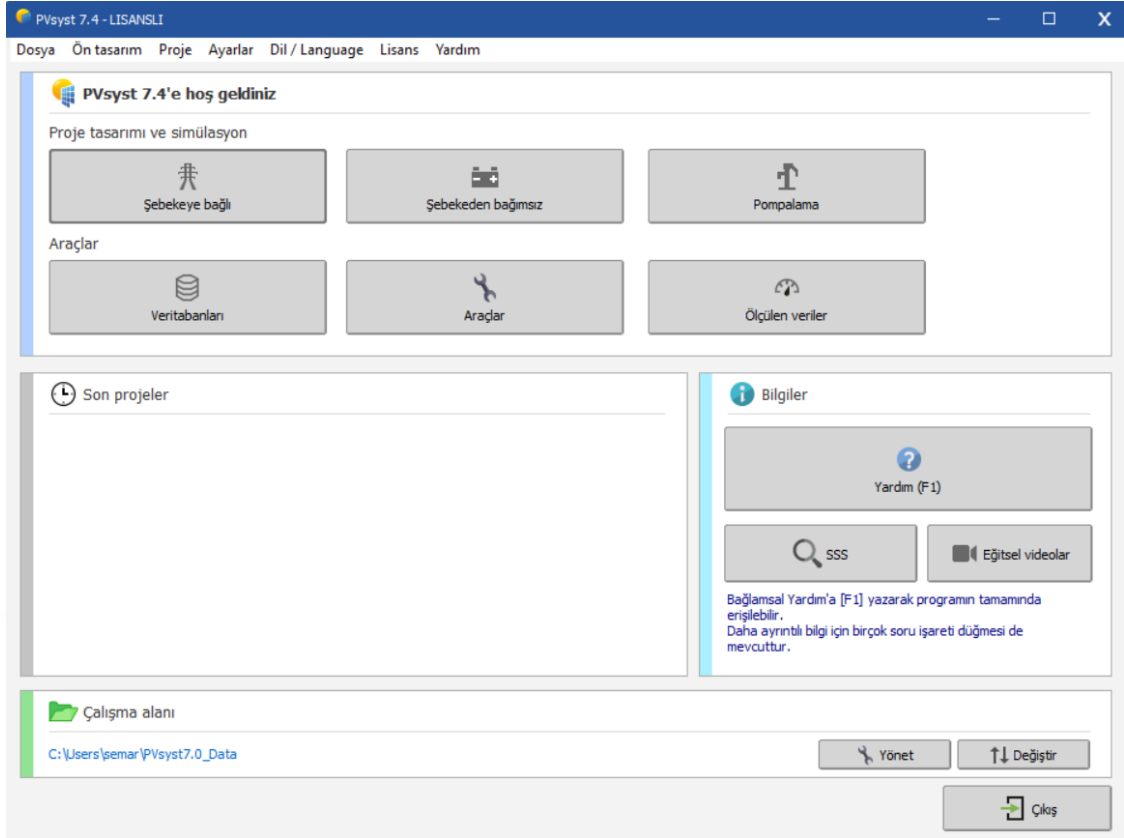


Şekil 3.14. Mardin’de seçilen konuma ait Google Earth görüntüsü

3.2 PVsyst Programında Gerçekleştirilen Analiz Verilerinin İncelenmesi

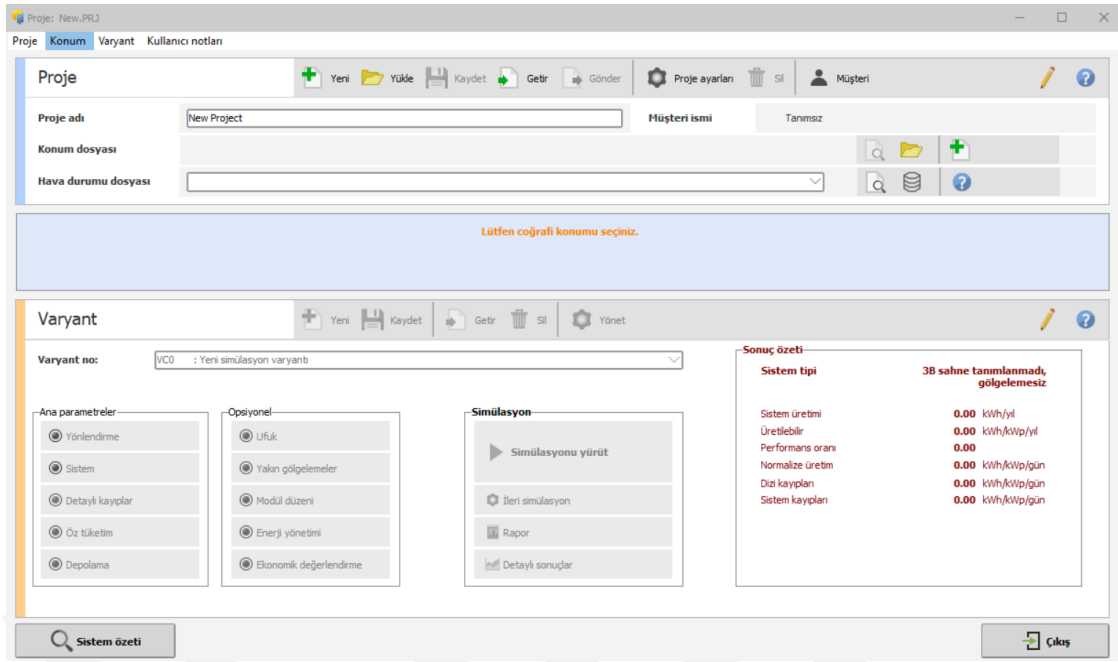
Fotovoltaik sistemlerin simülasyon ve tasarımı için birçok program kullanılmaktadır. Bu programlardan bazıları; PVsyst, PVGIS, PVsol, PVcase, Helioscope, Helios3D, Sketchup vb. programlardır. Fotovoltaik sistemlerin programlar aracılığıyla simüle edilmesi sonucunda üretilen enerji görülerek ekonomik analiz yapılabilmektedir. Bu çalışmada PVsyst programı kullanılarak Türkiye’de farklı bölgelerden seçilen şehirler için simülasyon gerçekleştirilmiştir.

PVsyst programı, PV sistemlerin tasarımında ve analizinde kullanılmaktadır. Proje tasarımı ve simülasyon, yazılımın ana parçasıdır. Program, panel yerleşimleri, programa tanımlanan veya program tarafından öngörülen gölgeleme, kirlilik, elektriksel kayıplar vb., sistem kayıpları, kullanılan ekipmanlara ilişkin güç, sayı, marka, model girdileri (panel, invertör), konum vb. girdiler ile aylık ve yıllık toplam enerji üretimi, birim enerji üretimi, sistem performans oranı, kayıpların sistem performansı üzerine etkileri gibi çıktıları sunmaktadır. PVsyst ana ekranı Şekil 3.15’te verilmektedir.

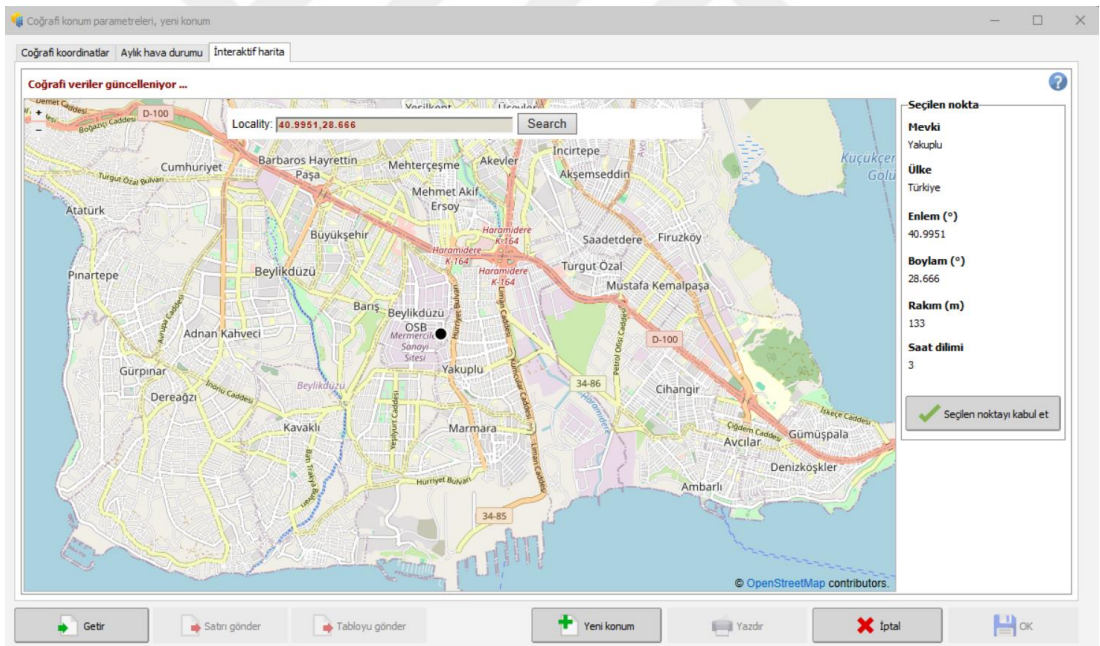


Şekil 3.15. PVsyst ana ekranı

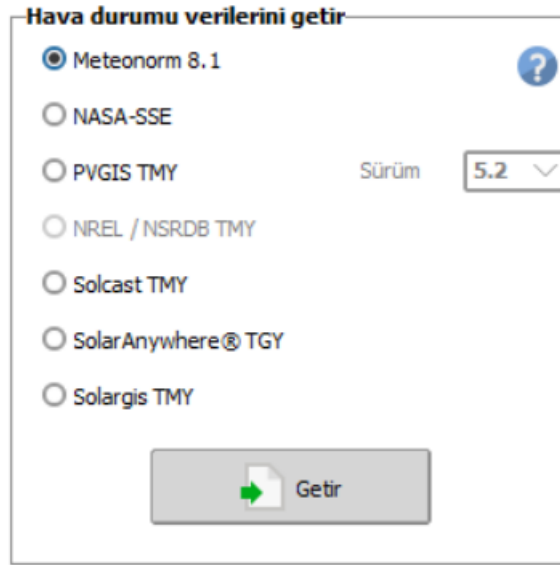
Şebekeye bağlı sistem tasarımı yapılmak istendiğinde Şekil 3.16'daki ekran görünmektedir. Proje ismi tanımlanır, simülasyonu gerçekleştirilecek konumun bilgileri manuel olarak girilebilmekte veya harita üzerinden seçilebilmektedir. Şekil 3.17'de İstanbul'da seçilen konuma ait coğrafi konum parametrelerinin PVsyst programına girişi gösterilmiştir. İnteraktif harita sekmesinden İstanbul'da seçilen konuma ait enlem ve boylam değerleri (40.9951° , 28.666°) programa girilmiştir. Simülasyonlar gerçekleştirilirken yeni proje açılarak, tüm şehirlere ait enlem ve boylam değerlerinin girişi bu şekilde yapılmıştır. Seçilen noktayı kabul et butonuna basıldıktan sonra coğrafi koordinatlar sekmesi açılmaktadır. Coğrafi koordinatlar sekmesinden hava durumu verileri alınmaktadır. Meteonorm 8.1 verileri kullanılmıştır. Şekil 3.18'de PVsyst programı üzerinden meteonorm 8.1 verilerinin seçimi gösterilmektedir. Şekil 3.19'da aylık hava durumu verileri görülebilmektedir. Sonraki adımlar için proje kaydedilmektedir.



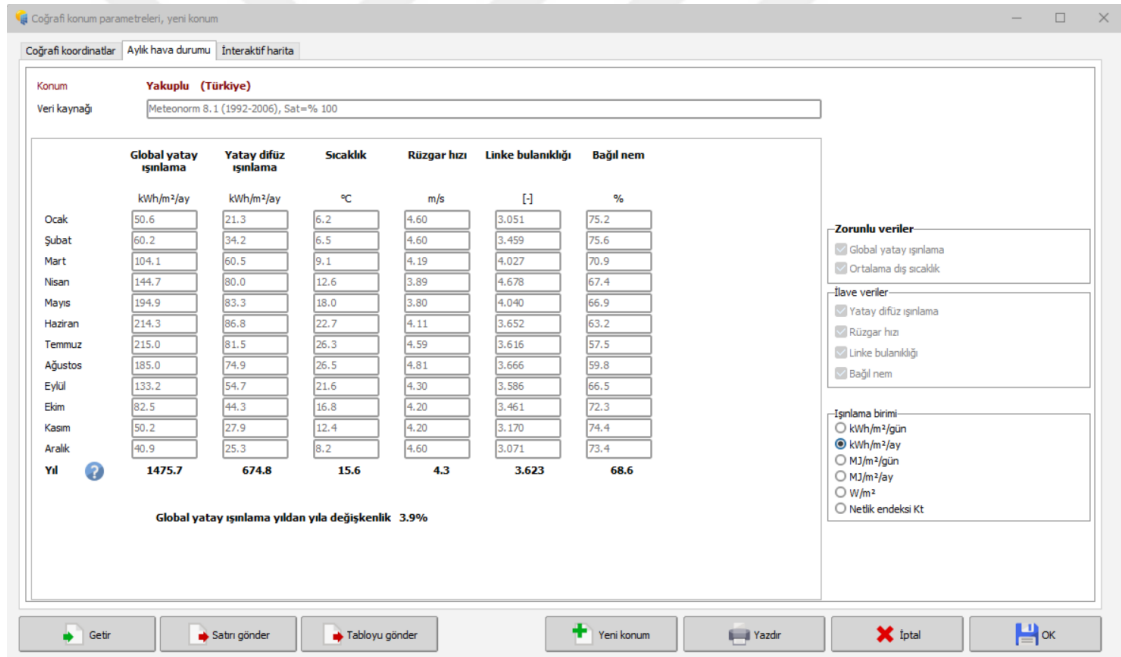
Şekil 3.16. Şebekeye bağlı sistem tasarımı için PVsyst ekran görüntüsü



Şekil 3.17. İstanbul'da seçilen konuma ait coğrafi konum parametrelerinin PVsyst programına girişi



Şekil 3.18. PVsyst programı üzerinden meteonorm 8.1 verilerinin seçimi



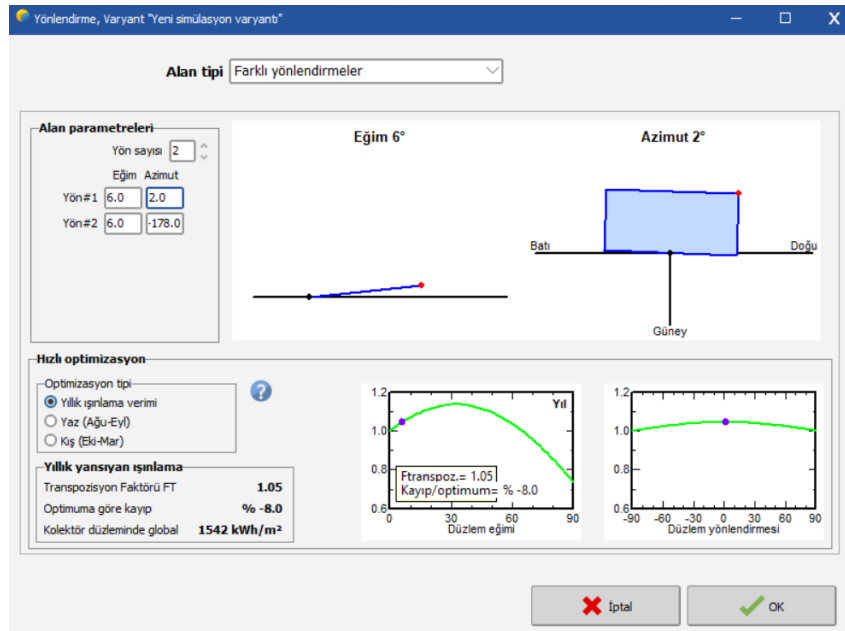
Şekil 3.19. PVsyst programı üzerinden aylık hava durumu verilerinin seçimi

Değişken kısmında yönlendirme seçeneği açılarak alan tipi (sabit eğik düzlem, farklı yönlendirmeler vb.), alan parametreleri (eğim, azimut vb.) ve hızlı optimizasyon vb. seçimleri yapılmaktadır. Simülasyonu yapılan şehirler için alan tipi farklı yönlendirmeler olarak seçilmiştir. Yön sayısı ikidir. Eğim değeri iki yön için de 6°'dir. Panel azimutunun hesaplanmasında ilk önce yapı azimutu tespit edilmektedir. Azimut değeri -180° ile 180° arasında değişmektedir. Google Earth programında seçilen

konumdaki yapıya gidilerek cetvel ile çatı mahyasına bir çizgi çekilmektedir. Google Earth yön değeri Şekil 3.20'deki gibi okunmaktadır. Yön değeri 180°'yi geçtiğinde değerden 360° çıkarılmaktadır. Bulunan bu değer yapı azimutudur. Sisteme ait yapı azimutu -88°'dir. Panellerin azimut değerleri, yapının azimut değerine +90° ve -90° eklenerek bulunmaktadır. Panellerin azimut değerleri 2° ve -178°'dir. PVsyst programında azimut değerleri 2° ve -178° olarak girilmiştir. Optimizasyon tipi yıllık ışınlama verimidir. PVsyst programında yönlendirme değerlerinin tanımlanması Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Google Earth yön değerinin okunması



Şekil 3.21. PVsyst programında yönlendirme değerlerinin tanımlanması

Şebekeye bağlı sistem tanımlaması yapılırken panel, inverter ve sistem çalışma bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada, panel olarak Generic üreticisine ait

ELNSM72M-550-HC-HV modeli ve inverter olarak Generic üreticisine ait SG110CX-P2 modeli kullanılmıştır. Panel bilgileri Çizelge 3.15'te, inverter bilgileri Çizelge 3.16'da ve sistem çalışma bilgileri Çizelge 3.17'de gösterilmektedir. Bu bilgilere göre dizideki maksimum panel sayısı, dizideki minimum panel sayısı, panel inverter uyum kontrolü, maksimum DC akım kontrolü ve DC yüklenme faktörü hesaplamaları yapılmıştır.

Çizelge 3.15. Panel bilgileri

Nominal Güç (W)	550
Nominal Gerilimi $U_{MPP(stc)}$ (Vmpp)	41,96
Nominal Akım (Impp)	13,11
Kısa Devre Akımı (Isc)	14
Açık Devre Gerilimi $U_{L(stc)}$ (Voc)	49,9
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-40 ile 85 °C
Sıcaklık Katsayısı β_L (%/°C)	-0,34
Sıcaklık Katsayısı β_{OC} (%/°C)	-0,27

Çizelge 3.16. İnverter bilgileri

DC	
Maksimum Giriş Voltajı (V)	1100
MPPT Maksimum Akım (A)	30
MPPT Maksimum Kısa Devre Akımı (A)	40
Vbaşlama (V) U_{invmin}	200
MPPT Minimum Gerilim (V)	200
MPPT Maksimum Gerilim U_{invmax} (V)	1000
DC Yüklenme Gücü (W)	154000
MPPT Sayısı	12
MPPT Bağlanan Dizi Sayısı	2
AC	
Nominal AC Aktif Güç (W)	110000
Nominal AC Görünür Güç (VA)	110000
Maksimum AC Aktif Güç (W)	110000
Maksimum AC Görünür Güç (VA)	110000
Nominal AC Gerilim (V)	400
Nominal AC Frekansı (Hz)	50
Nominal Çıkış Akımı (A)	151,1
Maksimum Çıkış Akımı (A)	167,1

Çizelge 3.17. Sistem çalışma bilgileri

Nominal Çalışma Sıcaklığı Ts (°C)	25
Maksimum Çalışma Sıcaklığı Tmax (°C)	70
Minimum Çalışma Sıcaklığı Tmin (°C)	-30

Dizideki maksimum panel sayısı hesabı

$$U_{L(modül\ T_{min}^{\circ C})} = \left(1 + \frac{\Delta T^{\circ C} \times \beta_L}{\%100}\right) \times U_{L(stc)} \quad (3.1)$$

$$n_{max} = \frac{U_{invmax}}{U_{L(modül\ T_{min}^{\circ C})}} \quad (3.2)$$

$$\Delta T(^{\circ}C) = T_{min} - T_s \quad (3.3)$$

$$\frac{\beta_L}{\%} = KV_{oc}$$

$$U_{L(stc)} = V_{oc}$$

$$U_{L(modül\ T_{min}^{\circ C})} = \left(1 + \frac{(-30 - 25) \times (-0,27)}{100}\right) \times 49,90$$

$$U_{L(modül\ T_{min}^{\circ C})} = 42,4899$$

$$n_{max} = \frac{1000}{42,4899} = 23,54$$

Dizideki maksimum panel sayısı 23 adet olmalıdır.

Dizideki minimum panel sayısı hesabı

$$U_{MPP(modül\ T_{max}^{\circ C})} = \left(1 + \frac{\Delta T^{\circ C} \times \beta_{MPP}}{\%100}\right) \times U_{MPP(stc)} \quad (3.4)$$

$$n_{min} = \frac{U_{invmin}}{U_{MPP(modül\ T_{max}^{\circ C})}} \quad (3.5)$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = T_{max} - T_s \quad (3.6)$$

$$\frac{\beta_{MPP}}{\%} = KV_{MPP}$$

$$U_{MPP(modül\ T_{min}^{\circ}\text{C})} = \left(1 + \frac{(70 - 25) \times (-0,34)}{100}\right) \times 41,96$$

$$U_{MPP(modül\ T_{min}^{\circ}\text{C})} = 35,5401$$

$$n_{min} = \frac{200}{35,5401} = 5,63$$

Dizideki minimum panel sayısı 6 adet olmalıdır.

Panel inverter uyum kontrolü

18 adet panel kullanılması durumunda;

$$\text{Maksimum dizi gerilimi} = N \times V_{oc} \times \left[1 + KV_{oc} \times (T_{min} - T_s) / 100\right] \quad (3.7)$$

$$\text{Maksimum dizi gerilimi} = 18 \times 49,90 \times \left[1 + \left(-\frac{0,27 \times (-30 - 25)}{100}\right)\right] = 1031,5827$$

Maksimum inverter DC gerilim= 1100 V

1031,5827 < 1100 V uygun

$$\text{Minimum dizi gerilimi} = N \times V_{oc} \times \left[1 + KV_{oc} \times (T_{max} - T_s) / 100\right] \quad (3.8)$$

$$\text{Minimum dizi gerilimi} = 18 \times 49,90 \times \left[1 + \left(-\frac{0,27 \times (70 - 25)}{100}\right)\right] = 789,0687$$

Minimum inverter DC gerilim= 200 V

789,0687 > 200 V uygun

$$\text{Maksimum MPPT gerilimi} = N \times V_{MPP} \times [1 + K V_{MPP} \times (T_{min} - T_s) / 100] \quad (3.9)$$

$$\text{Maksimum MPPT gerilimi} = 18 \times 41,96 \times \left[1 + \left(-\frac{0,34 \times (-30 - 25)}{100} \right) \right] = 896,5174$$

Maksimum inverter MPPT DC gerilim= 1000 V

896,5174 < 1000 V uygun

$$\text{Minimum MPPT gerilimi} = N \times V_{MPP} \times [1 + K V_{MPP} \times (T_{max} - T_s) / 100] \quad (3.10)$$

$$\text{Minimum MPPT gerilimi} = 18 \times 41,96 \times \left[1 + \left(-\frac{0,34 \times (70 - 25)}{100} \right) \right] = 639,7222$$

Minimum inverter MPPT DC gerilim= 200 V

639,7222 > 200 V uygun

Maksimum DC akım kontrolü

$$\text{İnverter MPPT Max. DC Akım} = \text{En yüklü MPPT'deki Dizi sayısı} \times \text{Panel Nominal Akım (Impp)} \quad (3.11)$$

$$\text{İnverter Max. DC Akım} = 2 \times 13,11 = 26,22 \text{ A}$$

26,22 < 30 A uygun

$$\text{İnverter MPPT Max. Kısa Devre DC Akım} = \text{En yüklü MPPT'deki Dizi sayısı} \times \text{Panel Kısa Devre Akım (Isc)} \quad (3.12)$$

$$\text{İnverter MPPT Max. Kısa Devre DC Akım} = 2 \times 14,00 = 28,00 \text{ A}$$

28,00 < 40 A uygun

DC yüklenme faktörü

18 Panel, 26 dizi ve 2 inverter kullanılması durumunda;

$$\text{DC Yükleme Faktörü} = (\text{Dizi sayısı} \times \text{Panel Sayısı} \times \text{Panel Gücü}) / (\text{İnverter AC Güç} \times \text{İnverter Sayısı}) \quad (3.13)$$

$$\text{DC Yükleme Faktörü} = (26 \times 18 \times 550) / (110000 \times 2) = 1,17$$

$$\text{İnverter DC Yükleme Faktörü} = 1,54$$

$$1,17 < 1,54 \text{ uygun}$$

PVsyst programında istenilen güç veya mevcut alan değeri girilerek projeye ait sistem tasarımı yapılabilmektedir. Paneller hesaplamalara uygun şekilde seri bağlanmakta ve diziler oluşturulmaktadır. Çalışmada, 18 adet panel seri bağlanmış ve 26 adet dizi oluşturulmuştur. Toplam panel sayısı 468 adettir. Toplam sistem gücü 257 kWp'tir. İnvertör sayısı her cepheye birer adet gelecek şekilde toplam 2 adettir. Şekil 3.22'de şebekeye bağlı sistem tanımlaması gösterilmektedir.

Şebekeye bağlı sistem tanımlama, Varyant V00: "Yeni simülasyon varyantı"

Alt alan

Alt dizinin ismi ve yönü
İsm: PV alanı
Yön: Karşık #1 ve #2
Eğim: 6° / 6°
Azimut: 2° / -178°

Ön boyutlandırma yardımı
Boyutlandırma: ☒ Boyutlandırma
Planlanan gücü giriniz: 257.4 kWp
... veya mevcut alan(modül): 1210 m²

PV modül seçimi

Mevcut: Filtre: Tüm PV modüller
Gereken tahmini modül sayısı: 468

Elin: 550 Wp 35V Si-mono ELNSM72M-550-HC-HV 2021 yılından beri Manufacturer 2021
Optimizör kullan: ☐

Gerilim boyutlama: Vmpp (60°C): 37.1 V
Voc (-10°C): 54.1 V

İnvertör seçimi

Mevcut: Çıkış gerilimi 380 V Tr 50Hz
Sungrow: 110 kW 180 - 1000 V TL 50/60 Hz SG110CX-P2 2022 yılından beri
İnvertör sayısı: 2
Çalışma gerilimi: 180-1000 V İnvertör global gücü: 220 kWac
Multi-MPPT kullanımı: ☒ Maksimum giriş gerilimi: 1100 V 12 MPPT ile invertör
İnvertörde güç paylaşımı: ☒

Dizi boyutlandırması

Modül ve zincir sayısı
Seri mod. sayısı: 18 ☐ 5 ile 20 arasında
Zincir sayısı: 26 ☒ 22 ile 33 arasında
Aynı yük kaybı: 0.0 % ☐ Boyutlandırma
Yön #1: 13 #2: 13

İşletme koşulları
Vmpp (60°C): 66.7 V
Vmpp (20°C): 75.8 V
Voc (-10°C): 97.3 V
Yüzey ıgırmı: 1000 W/m²
İmpp (STC): 341 A
İsc (STC): 364 A
İsc (STC'de): 364 A
Veri maks: ☐ Veri maks ☒ STC
Maksimum işletme gücü (1008 W/m² için ve 50°C): 241 kW
Alan nominal gücü (STC): 257 kWp

Alt alanlar listesi

İsm	#Mod	#Zincir	#MPPT
Elin - ELNSM72M-550-HC-HV	18	26	
Sungrow - SG110CX-P2	2	1	

Global sistem özeti

Panel sayısı	468
Panel yüzeyi	1209 m²
İnvertör sayısı	2
PV nominal gücü	257 kWp
Nominal AC gücü	220 kWac
Nom. güç oranı	1.170

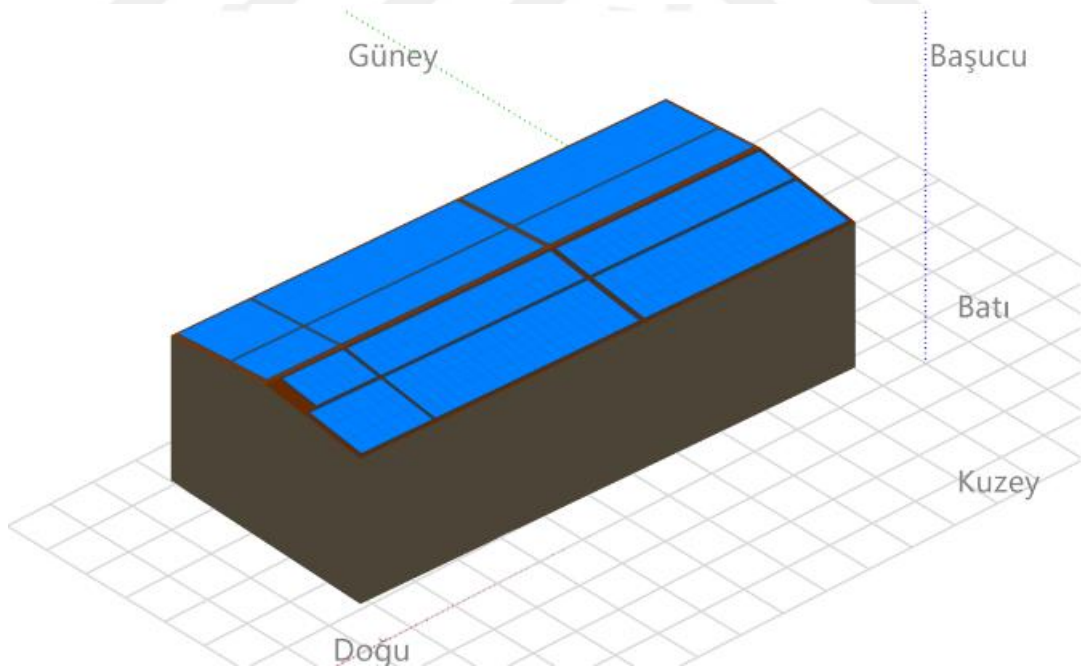
Sistem özeti Tek hat şeması İptal OK

Şekil 3.22. Şebekeye bağlı sistem tanımlaması

Uyumsuzluk görülmesi durumunda program bir hata yazısı ile bilgilendirmektedir. Kırmızı renkli uyarı yazıları düzeltilmeden simülasyon yürütülemez. Hata

bulunmaması halinde simülasyonu çalıştır butonu aktif hale gelmektedir. Ufuk bilgisi ve üç boyutlu tasarım gibi veriler de programa tanımlanabilmektedir.

Sistemin üç boyutlu tasarımı yakın gölgelemeler sekmesinden gerçekleştirilmektedir. Bu sekmede yapım/perspektif butonuna tıklanmakta ve yeni bir ekran açılmaktadır. Burada, oluştur bölümünde yapı/bileşik nesne ile yapılar inşa edilmektedir. Nesne ekle bölümünden eklenecek yapıya uygun şekil tipi (iki eğimli çatı, kare piramit, üçgen prizma vb.) seçilmektedir. İki eğimli çatı seçimi için şekil tipi ile ilgili ayrıntılar bu bölümde belirlenmektedir. Yapının kalkan saçağı, yan saçağı, çatının eğimi, bina yüksekliği, en ve boy değerleri girilebilmekte ve oluşturulan yapı renklendirilebilmektedir. Araçlar kısmından üç boyutlu nesnenin uygun konuma getirilmesi gerekmektedir. Bunun için yapı azimutu girilmektedir. Paneller için oluştur bölümünde masa dizisi seçeneği seçilmektedir. Yönlendirmenin yatay veya dikey olacağı belirlenmektedir. Boyuna modül sayıları X ve Y düzlemi için belirlenmektedir. Panellere ait azimut değerleri tanımlanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmaya ait üç boyutlu tasarım Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Gerçekleştirilen çalışmaya ait üç boyutlu tasarım

PVsyst programında, gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarında üretim değerleri, verimlilik, gölgeleme analizleri ve performans değerleri görülebilmektedir.

3.2.1 Sistem Tanımı, Özellikleri ve Tek Hat Şeması

Sistem, İstanbul’da seçilen konuma ait yapıda kurulması planlanan çatı üzeri güneş enerji santrali tahmini yapılarak diğer şehirler için seçilen konumlarda aynı çatı alanı kullanılarak, aynı özelliklerde iki eğimli çatı, eğim, azimut açısı, panel markası, panel sayısı, inverter markası ve inverter sayısı seçimi yapılmıştır. Sistem tüm konumlar için ortak tanımlanmıştır.

Sistem tanımlamasında azimut açısı ve çatı eğimi dikkate alınmıştır. Türkiye Kuzey yarım küre ülkesi olduğundan panelin konumu güneye bakacak şekilde konumlandırılmaktadır. Paneller çatı eğimine paralel yerleştirilmiştir. Bu şekilde yerleşim yapılması ile ek konstrüksiyon maliyetinden kaçınılmıştır. Yapı etrafında herhangi bir gölgeleme unsuru bulunmamaktadır, simülasyonlar bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Sistem özeti Şekil 3.24’te verilmiştir.

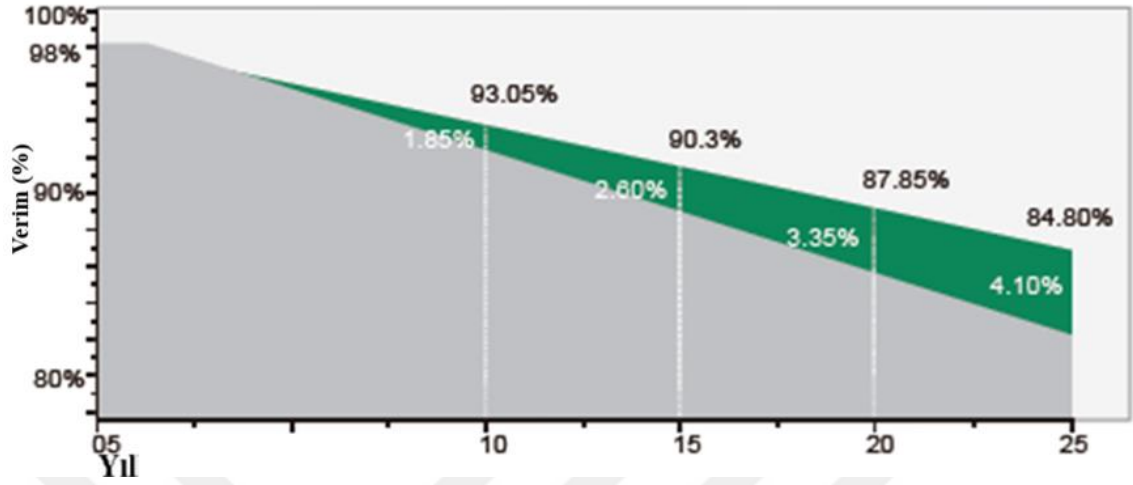
Sistem özeti			
Şebekeye bağlı sistem		Bina üzerinde	
Kolektör düzleminin yönlendirmesi		Yakın gölgelemeler	
Sabit düzlemler	2 yönlendirme	Lineer gölgelemeler : Hızlı (tablo)	
Eğim/azimut	6 / 2 °	Kullanıcı ihtiyaçları	
	6 / -178 °	Sınırsız yükleme (şebeke)	
Sistem bilgisi		İnvertör	
PV alanı		Öge sayısı	2 adet
Panel sayısı	468 adet	Toplam nom. güç	220 kWac
Toplam nom. güç	257 kWp	Nom. güç oranı	1.170

Şekil 3.24. İstanbul, Trabzon, İzmir, Adana, Niğde, Malatya, Mardin’e ait sistem özeti

Güneş enerji santralinde kullanılacak güneş panelleri, gerilim üretici olarak farklı sayılarda dizi oluşturacak şekilde seri bağlanmaktadır. Güneş panellerinin seri ve dizi sayısı tespit edilirken inverterin çalışma aralıkları ile uyumlu olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Her inverterin DC giriş tarafında farklı MPP giriş aralığı vardır. Ayrıca her inverter giriş akımı ve gerilimi sınırlandırılmıştır.

PV modül olarak Generic üreticisine ait ELNSM72M-550-HC-HV modeli kullanılmıştır. PV modül birim gücü 550 Wp’tir. Panel zorlu ortam koşullarına uyum sağlamaktadır, bunlar; kum, asit ve alkali, dolu taşları, 2400 Pa rüzgâr yükü ve 5400 Pa

kar yükü dayanımı, mükemmel PID direncidir. Panele ait verim değerleri Şekil 3.25'te verilmiştir. Sistem özellikleri Şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.25. PV modüle ait verim değerleri

PV modül		İnvertör	
Üretici	Generic	Üretici	Generic
Model	ELNSM72M-550-HC-HV	Model	SG110CX-P2
(Kullanıcı tarafından belirlenen parametreler)		(Orijinal PVsyst veritabanı)	
Birim gücü	550 Wp	Birim gücü	110 kWac
PV modül sayısı	468 adet	İnvertör sayısı	2 adet
Nominal (STC)	257 kWp	Toplam güç	220 kWac
Modül	26 zincir x 18 Seri	Çalışma gerilimi	180-1000 V
İşletme şartlarında (50°C)		Nom. güç oranı (DC:AC)	1.17
Pmpp	239 kWp	İnvertörde güç paylaşımı	
U mpp	689 V		
I mpp	347 A		
Total PV gücü		İnvertör toplam gücü	
Nominal (STC)	257 kWp	Toplam güç	220 kWac
Toplam	468 modül	İnvertör sayısı	2 adet
Panel yüzeyi	1209 m²	Nom. güç oranı	1.17
Hücre yüzeyi	1113 m²		

Şekil 3.26. Sistem özellikleri

Sisteme ait tek hat şeması Şekil 3.27'de gösterilmektedir.

BÖLÜM IV

BULGULAR

4.1 Işınım, Çevre Sıcaklığı, Kolektöre Yansıyan Küresel Işınım ve Şebekeye Verilen Enerji

PVsyst programı ile simülasyonu gerçekleştirilen şehirlere ait ışınlm, çevre sıcaklığı, kolektöre yansıyan küresel ışınlm ve şebekeye verilen enerji Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.

İstanbul'da en düşük aylık toplam ışınlm aralık ayında 40,90 kWs/m², en yüksek değer temmuz ayında 215,00 kWs/m² olmuştur. İstanbul'da en düşük çevre sıcaklığı ocak ayında 6,2 °C, en yüksek çevre sıcaklığı ağustos ayında 26,5 °C'dir. İstanbul'da kolektöre yansıyan küresel ışınlm en düşük aralık ayında 40,60 kWs/m², en yüksek temmuz ayında 214,80 kWs/m² olmuştur. İstanbul'da şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 9120 kWs, en yüksek haziran ayında 47296 kWs'tir.

Trabzon'da en düşük aylık toplam ışınlm aralık ayında 54,90 kWs/m², en yüksek değer haziran ayında 205,20 kWs/m² olmuştur. Trabzon'da en düşük çevre sıcaklığı şubat ayında 8,17 °C, en yüksek çevre sıcaklığı ağustos ayında 25,42 °C'dir. Trabzon'da kolektöre yansıyan küresel ışınlm en düşük aralık ayında 54,80 kWs/m², en yüksek haziran ayında 205,10 kWs/m² olmuştur. Trabzon'da şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 12037 kWs, en yüksek haziran ayında 45485 kWs'tir.

İzmir'de en düşük aylık toplam ışınlm aralık ayında 58,50 kWs/m², en yüksek değer temmuz ayında 242,30 kWs/m² olmuştur. İzmir'de en düşük çevre sıcaklığı ocak ayında 8,4 °C, en yüksek çevre sıcaklığı temmuz ayında 29,72 °C'dir. İzmir'de kolektöre yansıyan küresel ışınlm en düşük aralık ayında 58,40 kWs/m², en yüksek temmuz ayında 242,00 kWs/m² olmuştur. İzmir'de şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 13066 kWs, en yüksek temmuz ayında 51594 kWs'tir.

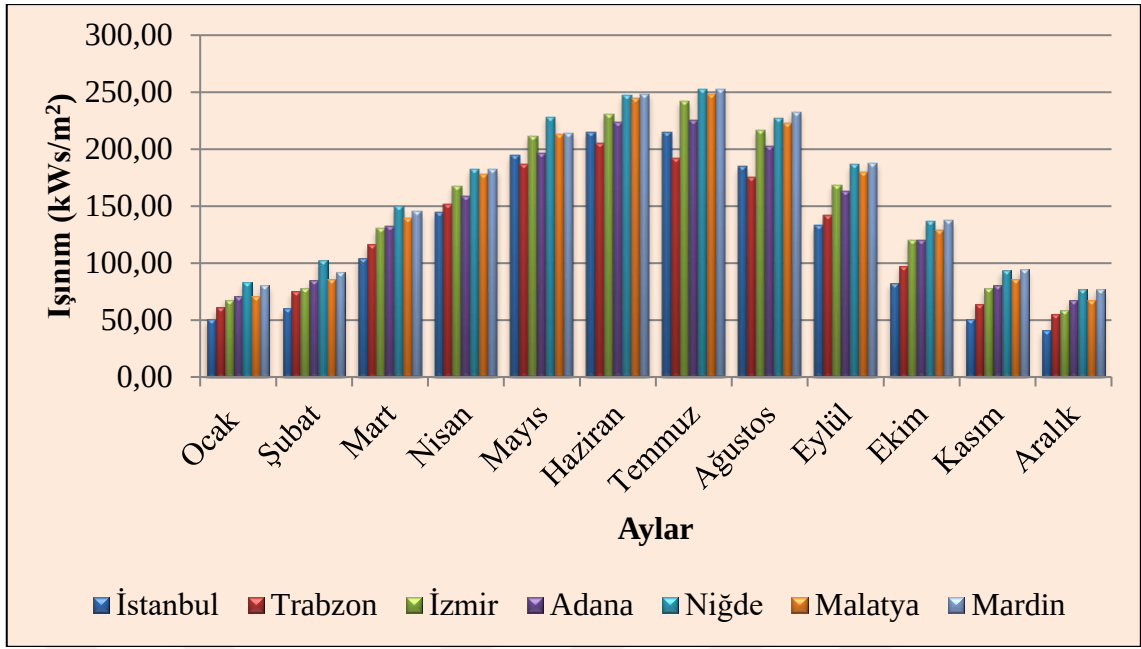
Adana'da en düşük aylık toplam ışınlm aralık ayında 67,60 kWs/m², en yüksek değer temmuz ayında 225,40 kWs/m² olmuştur. Adana'da en düşük çevre sıcaklığı ocak

ayında 8,34 °C, en yüksek çevre sıcaklığı ağustos ayında 29,43 °C'dir. Adana'da kolektöre yansıyan küresel ışıınım en düşük aralık ayında 67,60 kWs/m², en yüksek temmuz ayında 225,20 kWs/m² olmuştur. Adana'da şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 15009 kWs, en yüksek haziran ayında 48647 kWs'tir.

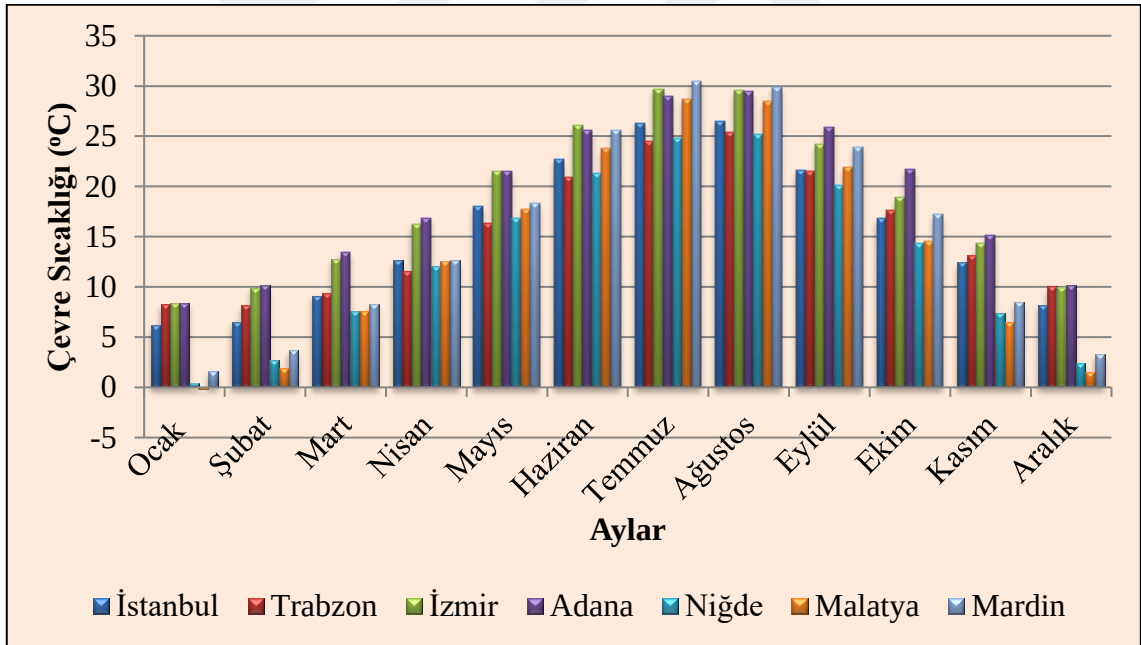
Niğde'de en düşük aylık toplam ışıınım aralık ayında 76,60 kWs/m², en yüksek değer temmuz ayında 253,00 kWs/m² olmuştur. Niğde'de en düşük çevre sıcaklığı ocak ayında 0,41 °C, en yüksek çevre sıcaklığı ağustos ayında 25,17 °C'dir. Niğde'de kolektöre yansıyan küresel ışıınım en düşük aralık ayında 76,50 kWs/m², en yüksek temmuz ayında 252,70 kWs/m² olmuştur. Niğde'de şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 17298 kWs, en yüksek temmuz ayında 54548 kWs'tir.

Malatya'da en düşük aylık toplam ışıınım aralık ayında 67,70 kWs/m², en yüksek değer temmuz ayında 248,50 kWs/m² olmuştur. Malatya'da en düşük çevre sıcaklığı ocak ayında -0,16 °C, en yüksek çevre sıcaklığı temmuz ayında 28,66 °C'dir. Malatya'da kolektöre yansıyan küresel ışıınım en düşük aralık ayında 67,70 kWs/m², en yüksek temmuz ayında 248,10 kWs/m² olmuştur. Malatya'da şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 15534 kWs, en yüksek haziran ayında 52862 kWs'tir.

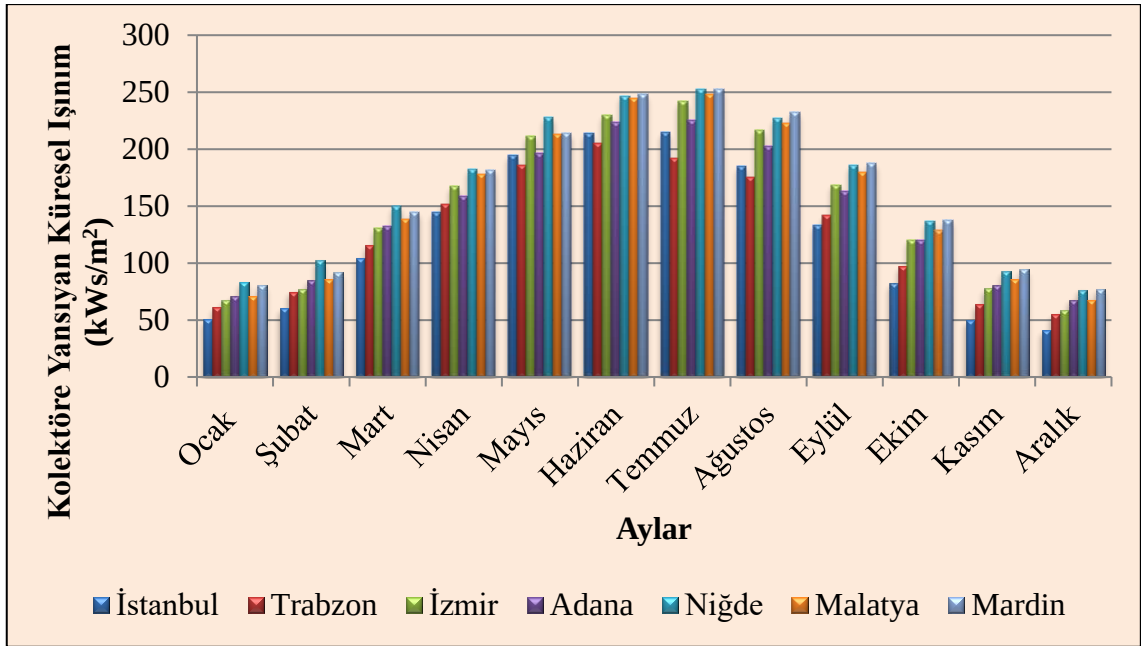
Mardin'de en düşük aylık toplam ışıınım aralık ayında 76,60 kWs/m², en yüksek değer temmuz ayında 252,90 kWs/m² olmuştur. Mardin'de en düşük çevre sıcaklığı ocak ayında 1,6 °C, en yüksek çevre sıcaklığı temmuz ayında 30,51 °C'dir. Mardin'de kolektöre yansıyan küresel ışıınım en düşük aralık ayında 76,60 kWs/m², en yüksek temmuz ayında 252,30 kWs/m² olmuştur. Mardin'de şebekeye verilen enerji en düşük aralık ayında 17221 kWs, en yüksek haziran ayında 52717 kWs'tir.



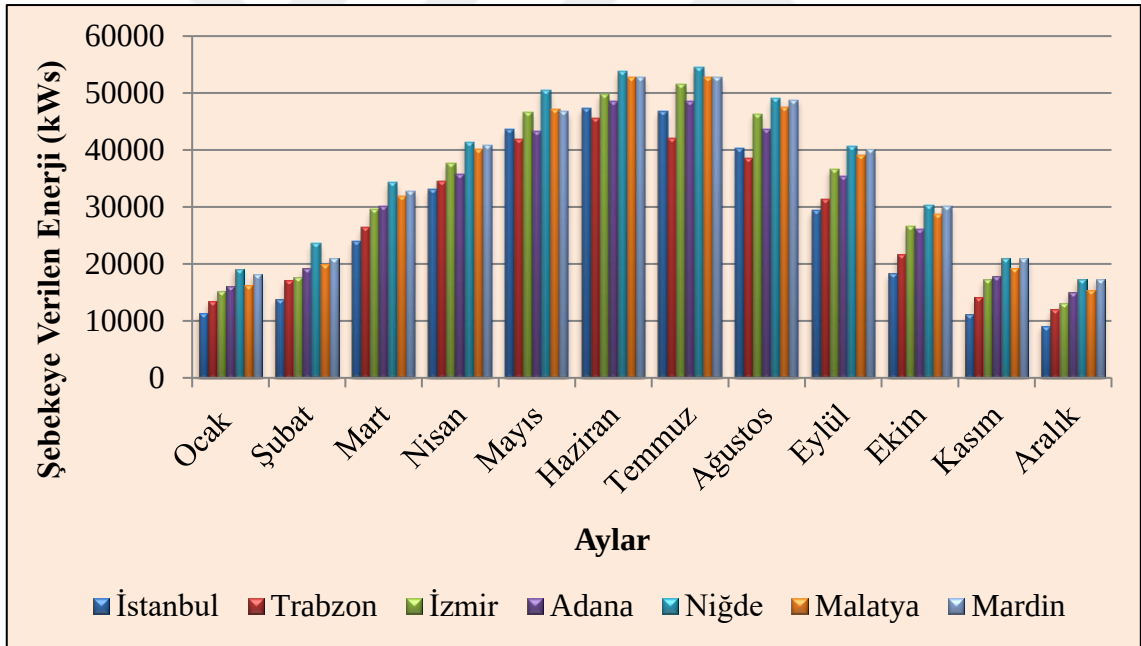
Şekil 4.1. Işınım (kW/m²)



Şekil 4.2. Çevre sıcaklığı (°C)

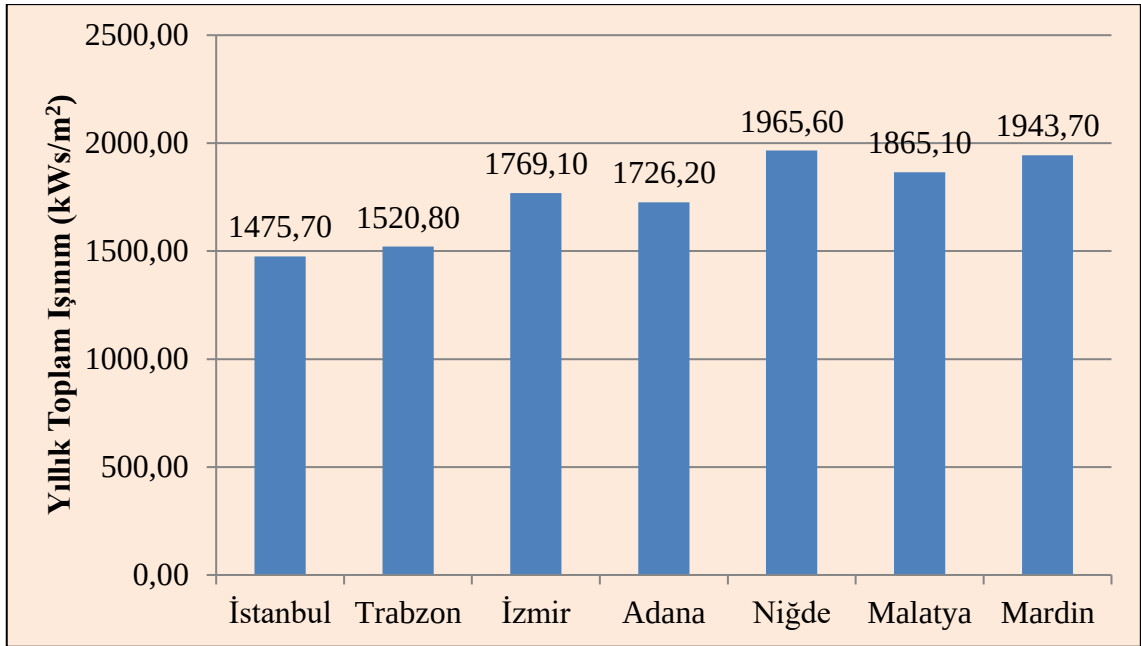


Şekil 4.3. Kolektöre yansıyan küresel ışınlm (kW/m²)



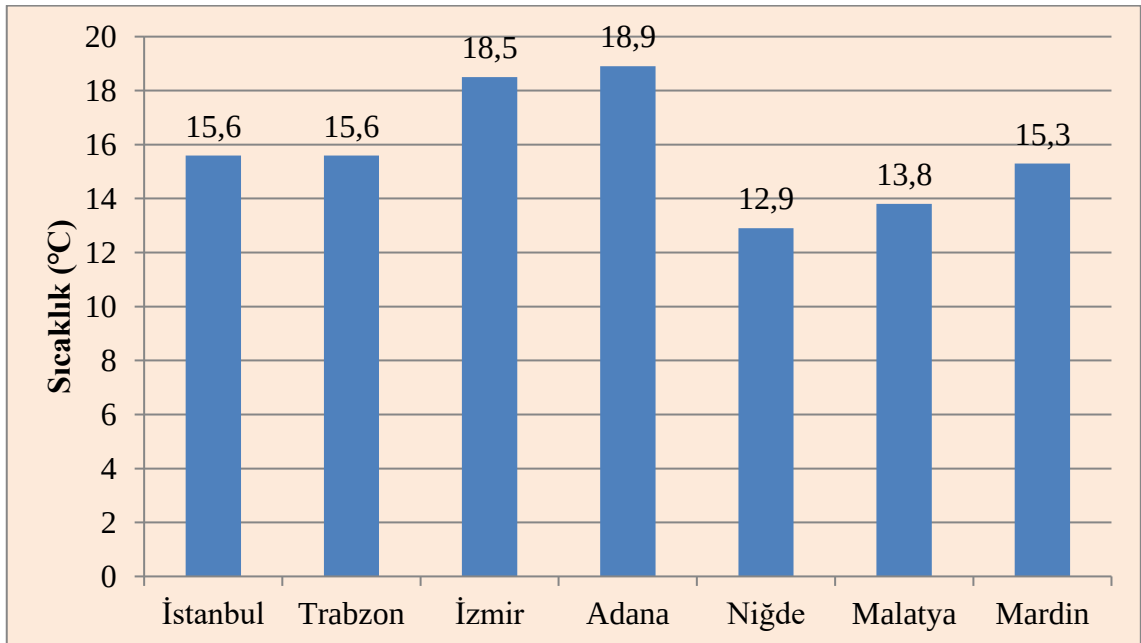
Şekil 4.4. Şebekeye verilen enerji (kW)

Yıllık toplam ışınlm verilerine bakıldığında en düşük ışınlmın İstanbul'da, en yüksek ışınlmın ise Niğde'de olduğu görülmüştür. Şekil 4.5'te şehirlere ait yıllık toplam ışınlm miktarları verilmiştir.



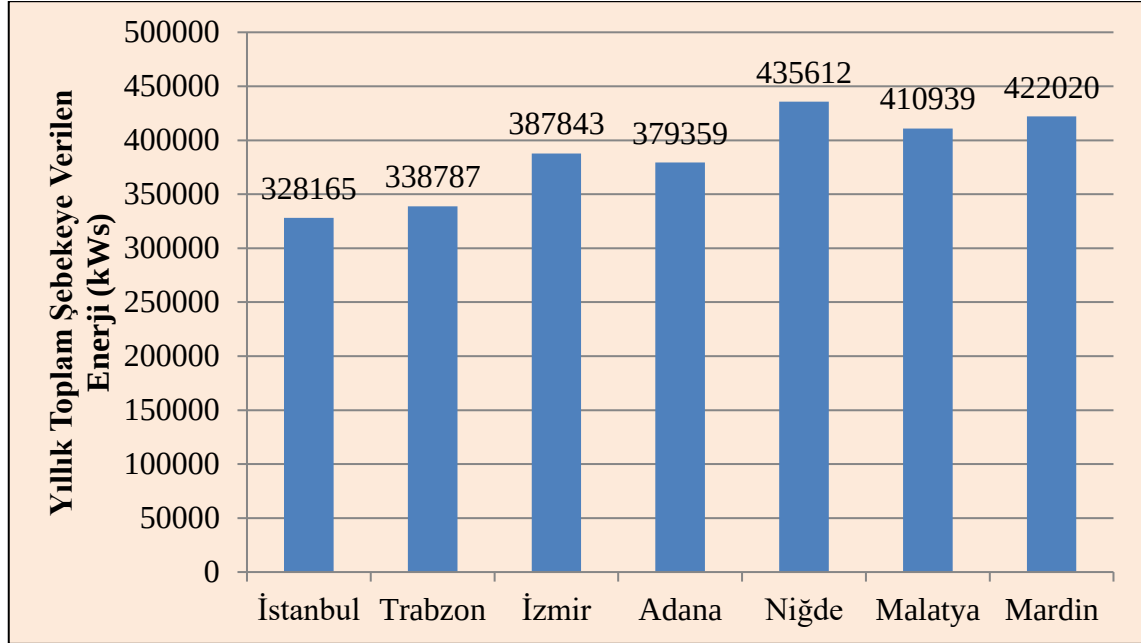
Şekil 4.5. Yıllık toplam ışınlm (kW/m²)

Yıllık ortalama çevre sıcaklığı en yüksek 18,9 °C ile Adana’da, en düşük çevre sıcaklığı 12,9 °C ile Niğde’de de olduğu görülmüştür. Şehirlere ait yıllık ortalama çevre sıcaklıkları Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Yıllık ortalama çevre sıcaklığı (°C)

Şekil 4.7’de yıllık toplam şebekeye verilen enerji bilgilerine bakıldığında en yüksek üretim yılda 435612 kWs ile Niğde’de, en düşük üretim yılda 328165 kWs ile İstanbul’da gerçekleştiği görülmektedir. Üretilen enerjilerin şehirlere göre sıralanışı şu şekildedir: Niğde, Mardin, Malatya, İzmir, Adana, Trabzon, İstanbul.



Şekil 4.7. Yıllık toplam şebekeye verilen enerji (kW)

4.2 Performans Oranı ve Kayıplar

Performans oranları üretilen faydalı enerjinin (Y_f), ideal dizi verimine (Y_r) oranlanmasıyla bulunmaktadır. Simülasyonu yapılan şehirlerde ilk yıla ait Y_f , Y_r ve PR değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Üretilen faydalı enerji sistemde gerçekleşen kayıplar sonrası şebekeye verilen enerjidir. İdeal dizi verimi herhangi bir kayıp olmaksızın sistemin standart test koşullarında çalıştığı durumda üretilen enerjidir. Performans oranı %100’e yaklaştıkça, güneş enerji santralinin daha verimli çalıştığı görülmektedir. Yapılan çalışmaya göre en yüksek performans oranı Trabzon’a, en düşük performans oranı ise Mardin’e aittir. Performans oranlarının şehirlere göre sıralanışı şu şekildedir: Trabzon, İstanbul, Niğde, Malatya, Adana, İzmir, Mardin. Seçilen şehirlerde, PVsyst programı simülasyon raporundan alınan aylara ait performans oranları Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Şehirlere ait Yf, Yr ve PR değerleri

İstanbul			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	1,42	1,62	0,877
Şubat	1,91	2,14	0,893
Mart	3,00	3,35	0,896
Nisan	4,28	4,81	0,890
Mayıs	5,46	6,28	0,869
Haziran	6,12	7,14	0,857
Temmuz	5,86	6,93	0,846
Ağustos	5,05	5,96	0,847
Eylül	3,80	4,43	0,858
Ekim	2,31	2,66	0,868
Kasım	1,45	1,67	0,868
Aralık	1,14	1,31	0,870
Ortalama	3,49	4,03	0,866

Trabzon			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	1,69	1,96	0,862
Şubat	2,36	2,67	0,884
Mart	3,31	3,73	0,887
Nisan	4,48	5,05	0,887
Mayıs	5,25	6,00	0,875
Haziran	5,89	6,84	0,861
Temmuz	5,28	6,18	0,854
Ağustos	4,84	5,65	0,857
Eylül	4,06	4,72	0,860
Ekim	2,71	3,14	0,863
Kasım	1,83	2,13	0,859
Aralık	1,51	1,77	0,853
Ortalama	3,61	4,16	0,868

Çizelge 4.1. (Devam) Şehirlere ait Yf, Yr ve PR değerleri

İzmir			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	1,91	2,18	0,876
Şubat	2,44	2,76	0,884
Mart	3,71	4,20	0,883
Nisan	4,88	5,58	0,875
Mayıs	5,83	6,82	0,855
Haziran	6,44	7,66	0,841
Temmuz	6,47	7,81	0,828
Ağustos	5,81	7,00	0,830
Eylül	4,75	5,61	0,847
Ekim	3,34	3,87	0,863
Kasım	2,23	2,59	0,861
Aralık	1,64	1,88	0,872
Ortalama	4,13	4,84	0,853

Adana			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	2,01	2,29	0,878
Şubat	2,66	3,02	0,881
Mart	3,76	4,27	0,881
Nisan	4,61	5,28	0,873
Mayıs	5,43	6,32	0,859
Haziran	6,30	7,45	0,846
Temmuz	6,08	7,27	0,836
Ağustos	5,46	6,54	0,835
Eylül	4,58	5,43	0,843
Ekim	3,28	3,86	0,850
Kasım	2,31	2,68	0,862
Aralık	1,88	2,18	0,862
Ortalama	4,04	4,72	0,856

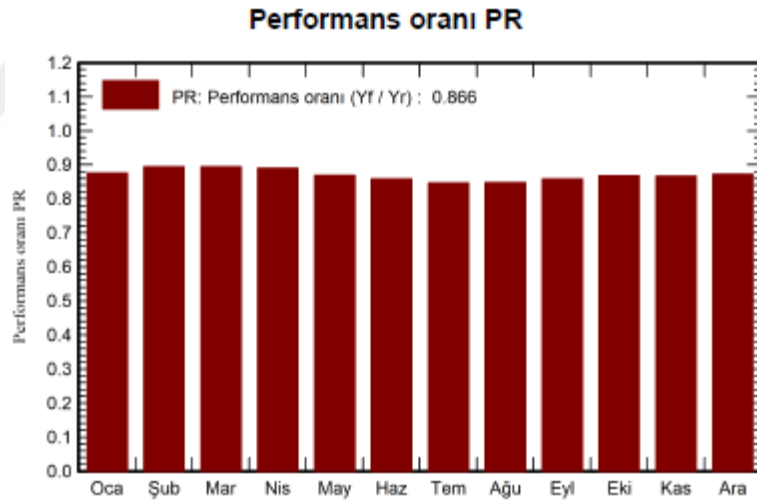
Çizelge 4.1. (Devam) Şehirlere ait Yf, Yr ve PR değerleri

Niğde			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	2,39	2,68	0,892
Şubat	3,28	3,65	0,899
Mart	4,29	4,82	0,890
Nisan	5,35	6,08	0,880
Mayıs	6,33	7,35	0,861
Haziran	6,97	8,23	0,847
Temmuz	6,84	8,15	0,839
Ağustos	6,14	7,32	0,839
Eylül	5,27	6,20	0,850
Ekim	3,80	4,40	0,864
Kasım	2,72	3,10	0,877
Aralık	2,17	2,47	0,879
Ortalama	4,64	5,38	0,862

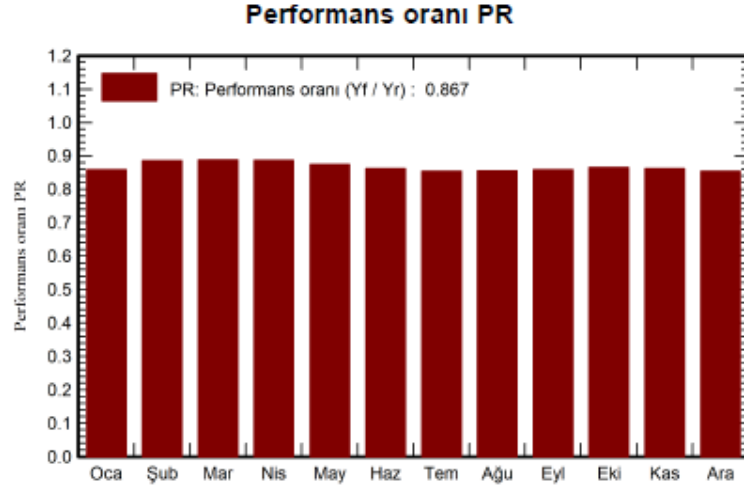
Malatya			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	2,03	2,28	0,890
Şubat	2,78	3,07	0,905
Mart	4,00	4,48	0,893
Nisan	5,19	5,92	0,877
Mayıs	5,91	6,86	0,862
Haziran	6,85	8,15	0,840
Temmuz	6,61	8,00	0,826
Ağustos	5,95	7,19	0,828
Eylül	5,06	5,99	0,845
Ekim	3,60	4,15	0,867
Kasım	2,50	2,85	0,877
Aralık	1,92	2,18	0,881
Ortalama	4,37	5,10	0,857

Çizelge 4.1. (Devam) Şehirlere ait Yf, Yr ve PR değerleri

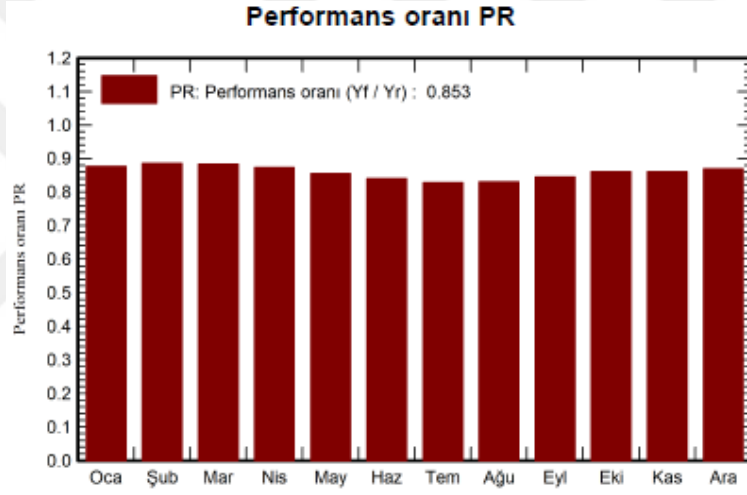
Mardin			
Aylar	Yf (kWs/kWp/gün)	Yr (kWs/m ² /gün)	PR (Yf/Yr)
Ocak	2,27	2,59	0,876
Şubat	2,92	3,28	0,890
Mart	4,10	4,67	0,878
Nisan	5,29	6,06	0,873
Mayıs	5,86	6,90	0,849
Haziran	6,83	8,26	0,827
Temmuz	6,61	8,14	0,812
Ağustos	6,12	7,50	0,816
Eylül	5,19	6,25	0,830
Ekim	3,77	4,43	0,851
Kasım	2,71	3,14	0,863
Aralık	2,16	2,47	0,874
Ortalama	4,49	5,32	0,844



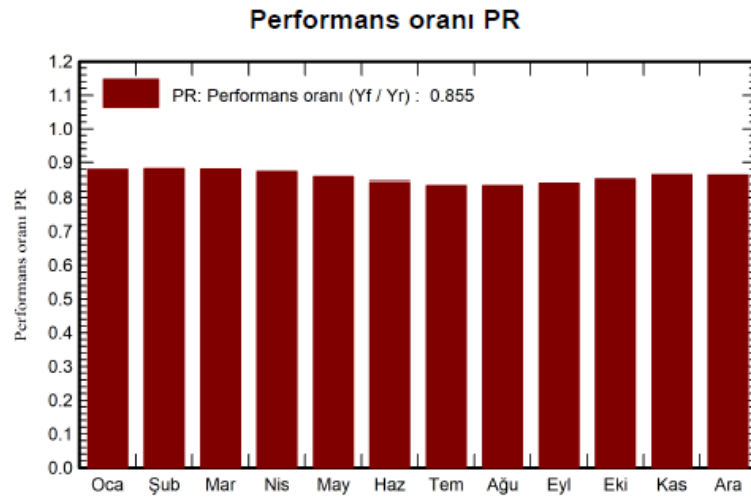
Şekil 4.8. İstanbul performans oranı



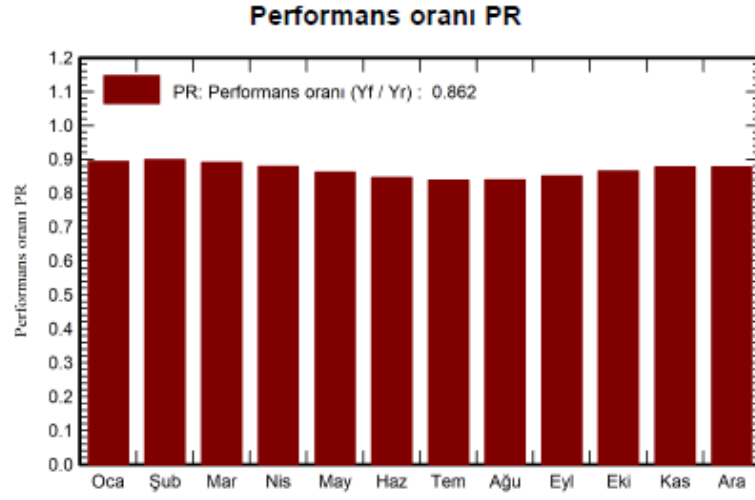
Şekil 4.9. Trabzon performans oranı



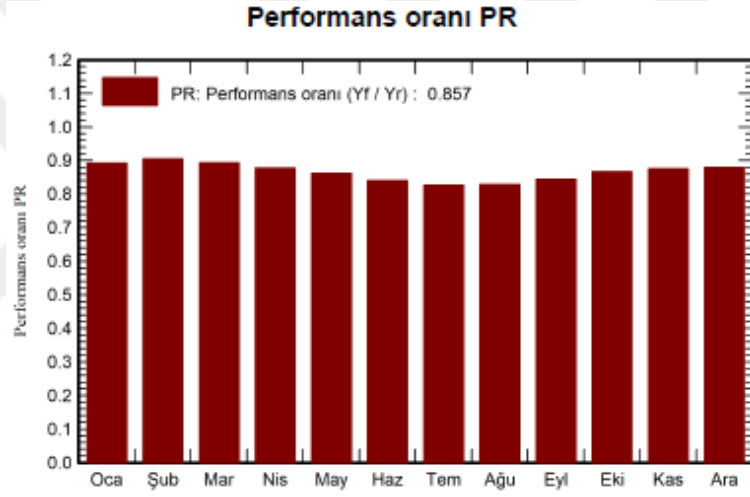
Şekil 4.10. İzmir performans oranı



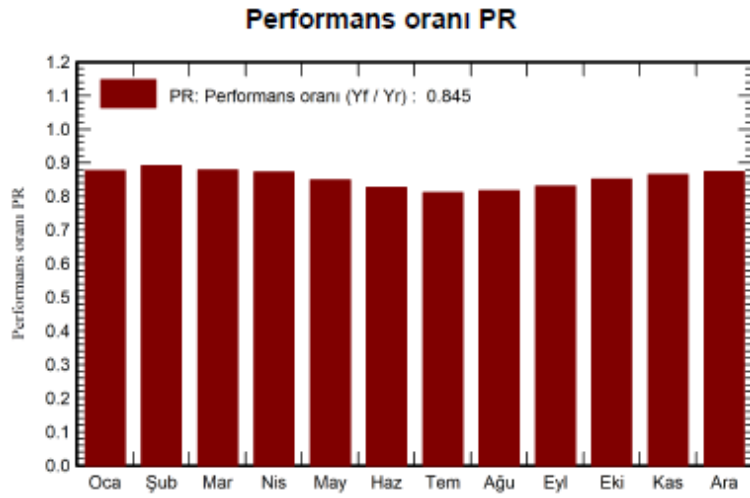
Şekil 4.11. Adana performans oranı



Şekil 4.12. Niğde performans oranı

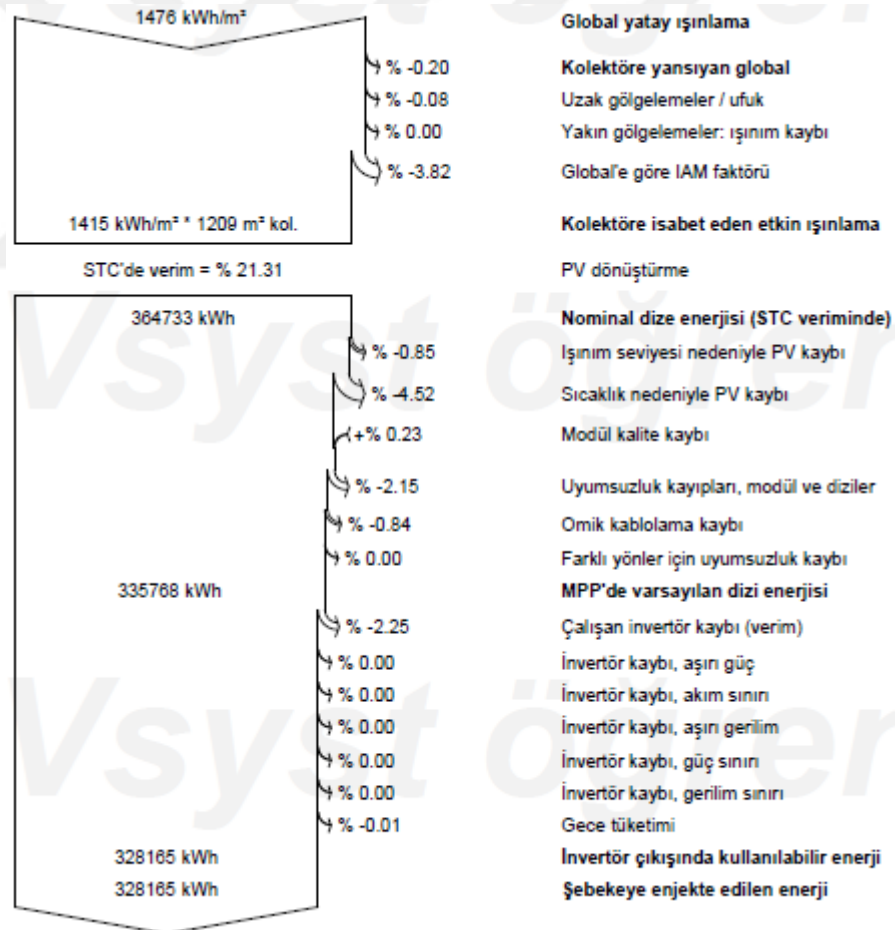


Şekil 4.13. Malatya performans oranı

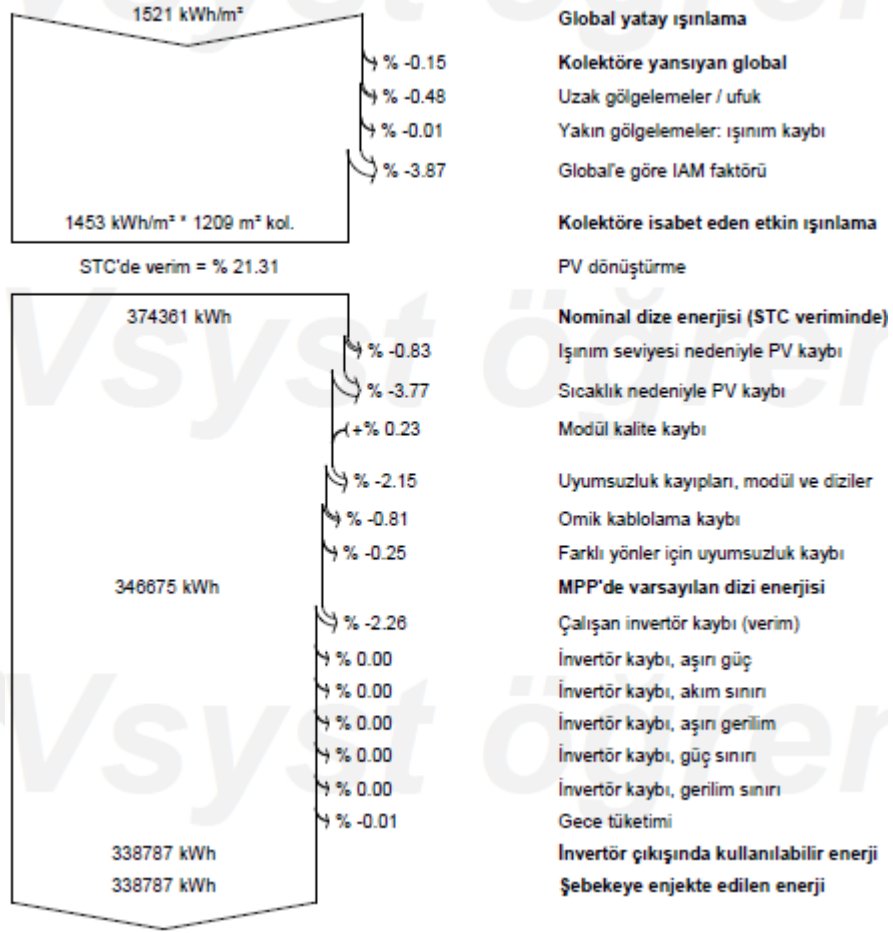


Şekil 4.14. Mardin performans oranı

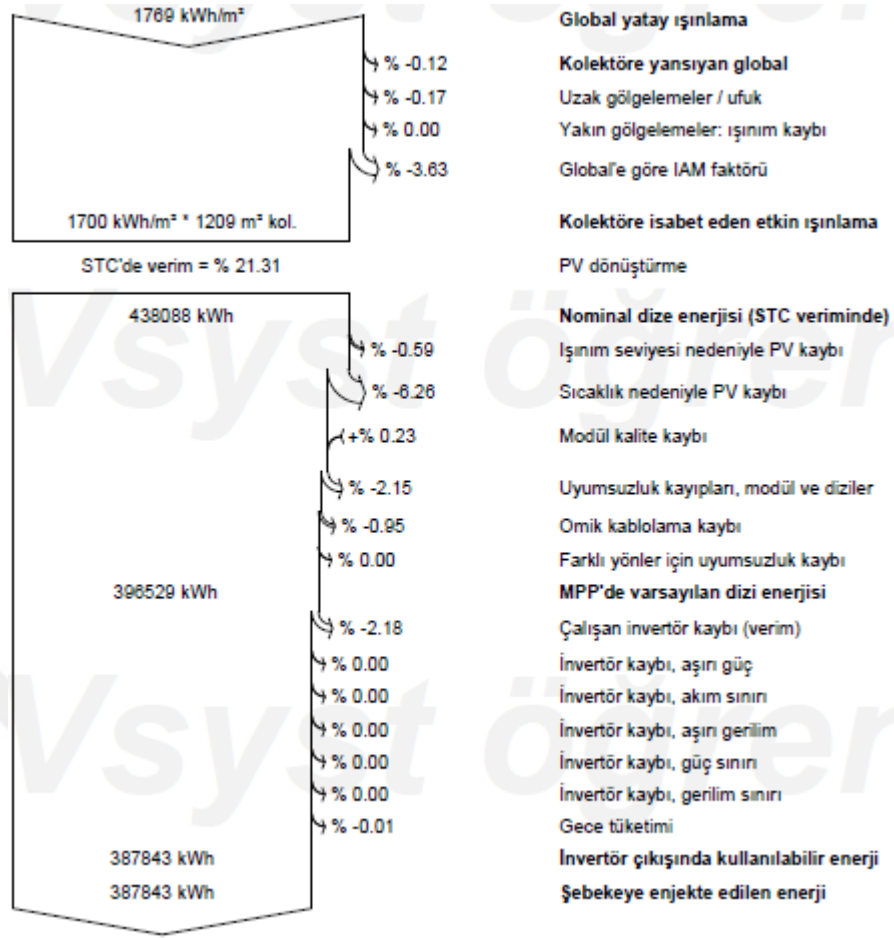
IAM faktörü PV modüllerin üzerine düşen ışınımın azalmasından kaynaklanmaktadır. Güneş ışınlarının açısındaki değişimden kaynaklı PV modüllerin veriminde değişikliğe sebep olmaktadır. Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'deki diyagramlar PVsyst programı simülasyon raporundan alınmıştır. Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'e bakıldığında sırasıyla IAM faktörünün İstanbul için %3,82, Trabzon için %3,87, İzmir için %3,63, Adana için %3,59, Niğde için %3,80, Malatya için %3,74, Mardin için %3,40 kayıp oluşturduğu görülmektedir. Işınım seviyesi nedeniyle PV kaybı İstanbul için %0,85, Trabzon için %0,83, İzmir için %0,59, Adana için %0,63, Niğde için %0,48, Malatya için %0,55, Mardin için %0,49'dur. Sıcaklık kayıpları İstanbul için %4,52, Trabzon için %3,77, İzmir için %6,26, Adana için %6,09, Niğde için %5,03, Malatya için %5,64, Mardin için %6,12'dir.



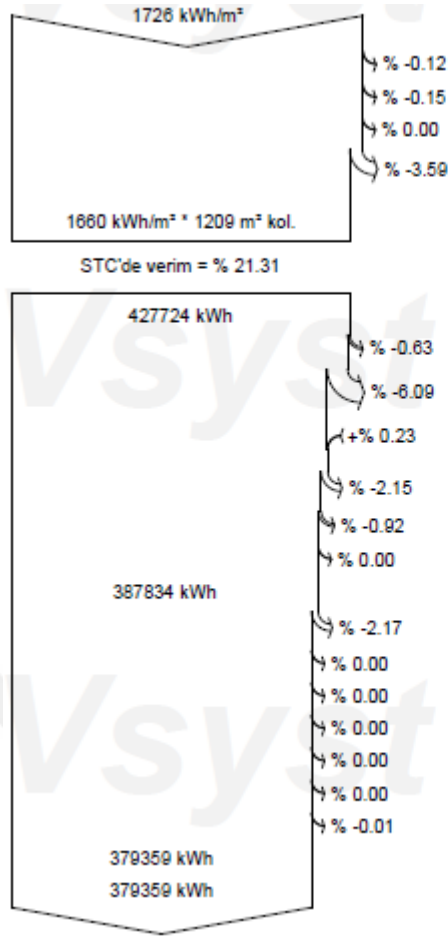
Şekil 4.15. İstanbul kayıplar diyagramı



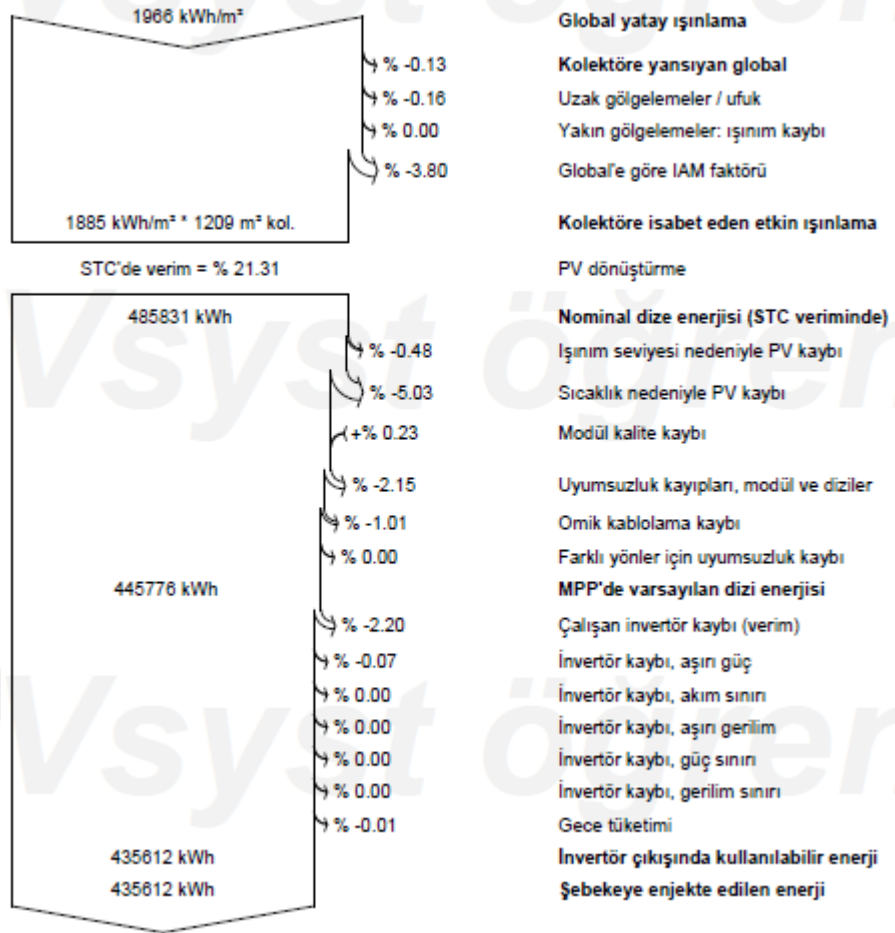
Şekil 4.16. Trabzon kayıplar diyagramı



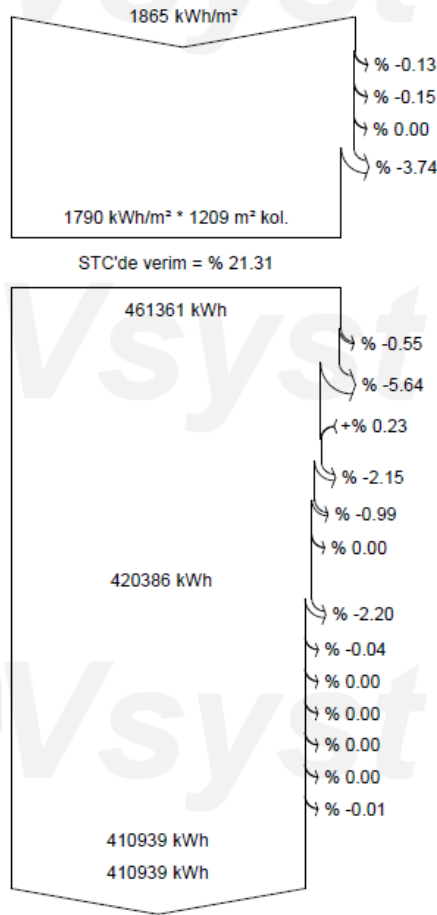
Şekil 4.17. İzmir kayıplar diyagramı



Şekil 4.18. Adana kayıplar diyagramı



Şekil 4.19. Niğde kayıplar diyagramı



Global yatay ışınlama

Kolektöre yansıyan global

Uzak gölgelermeler / ufuk

Yakın gölgelermeler: ışınlım kaybı

Global'e göre IAM faktörü

Kolektöre isabet eden etkin ışınlama

PV dönüştürme

Nominal dize enerjisi (STC veriminde)

İşinım seviyesi nedeniyle PV kaybı

Sıcaklık nedeniyle PV kaybı

Modül kalite kaybı

Uyumsuzluk kayıpları, modül ve diziler

Omik kablolama kaybı

Farklı yönler için uyumsuzluk kaybı

MPP'de varsayılan dizi enerjisi

Çalışan invertör kaybı (verim)

İnvertör kaybı, aşırı güç

İnvertör kaybı, akım sınırı

İnvertör kaybı, aşırı gerilim

İnvertör kaybı, güç sınırı

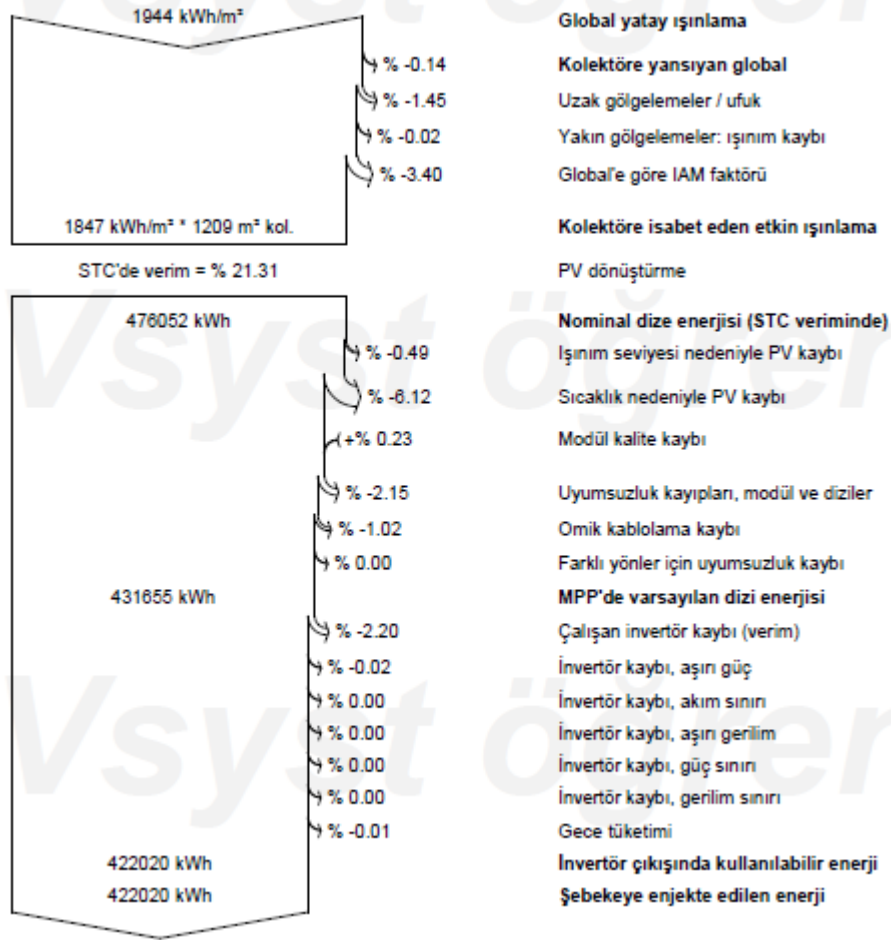
İnvertör kaybı, gerilim sınırı

Gece tüketimi

İnvertör çıkışında kullanılabilir enerji

Şebekeye enjekte edilen enerji

Şekil 4.20. Malatya kayıplar diyagramı



Şekil 4.21. Mardin kayıplar diyagramı

4.3 Ekonomik Değerlendirme

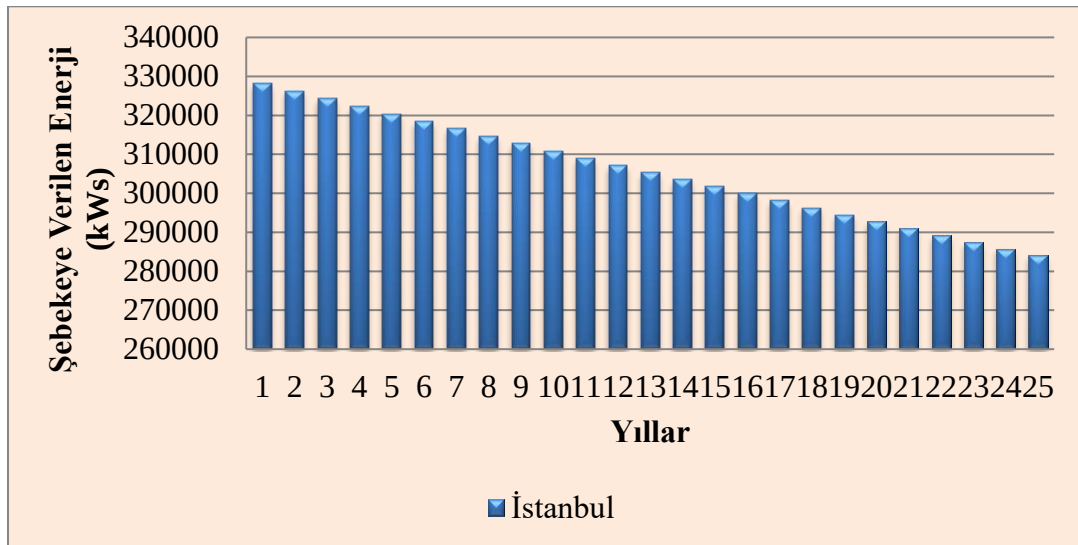
Çatı üzeri güneş enerji santralleri için maliyet kalemleri panel, inverter, konstrüksiyon, pano, DC AC kablolar, sarf malzemeler, güvenlik, lisans ve izinler, işçilik ve diğer giderlerdir. Generic üreticisine ait 550 Wp güce sahip ELNSM72M-550-HC-HV panelin birim fiyatı ortalama 144 USD ve SG110CX-P2 110kWac inverterin birim fiyatı 5300 USD'dir. Sistemde 468 adet panel ve 2 adet inverter kullanılmıştır.

Maliyet kalemlerine ait piyasa verileri araştırılarak ortalama değerler kullanılmıştır. Maliyet tablosu Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Sistemin toplam maliyeti 117612 USD'dir. Panel %57,3, işçilik ve diğer giderler %14,33, inverter %9,00, konstrüksiyon %5,78, DC-AC kablolar %4,76, sarf malzemeler %3,83, GES pano %2,87, güvenlik %1,28, lisans ve izinler %0,85 oranında maliyete etki etmiştir.

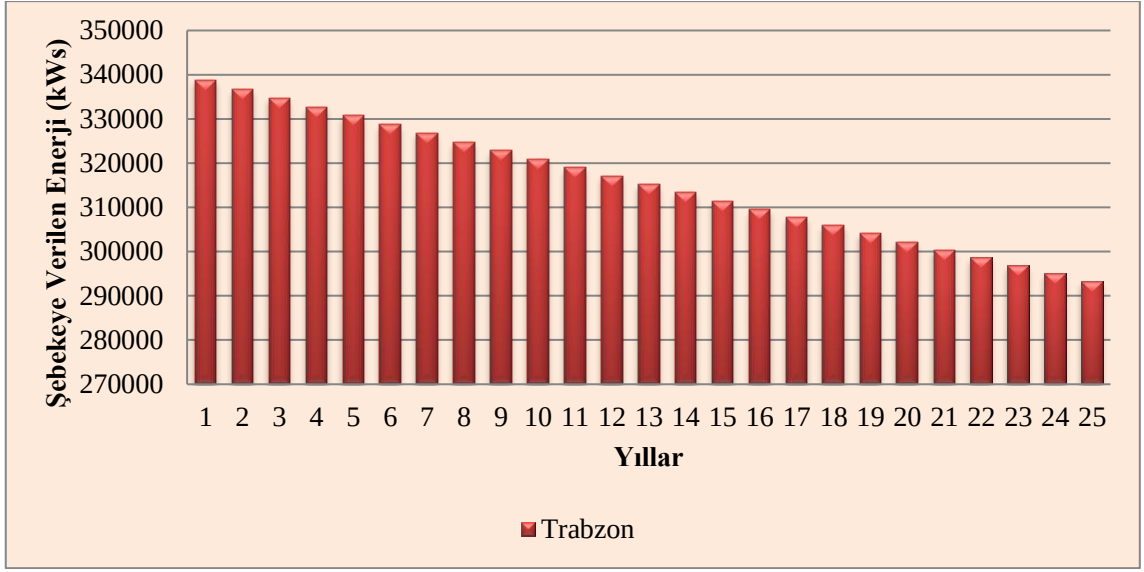
Çizelge 4.2. Maliyet tablosu

MALİYET KALEMİ	TOPLAM BEDEL (USD)	MALİYETE ETKİSİ (%)
Panel	67392	57,3
İnverter	10600	9,0
Konstrüksiyon	6800	5,78
GES pano	3370	2,87
DC-AC kablolar	5600	4,76
Sarf malzemeler	4500	3,83
Güvenlik	1500	1,28
Lisans ve izinler	1000	0,85
İşçilik ve diğer giderler	16850	14,33
Toplam	117612	100

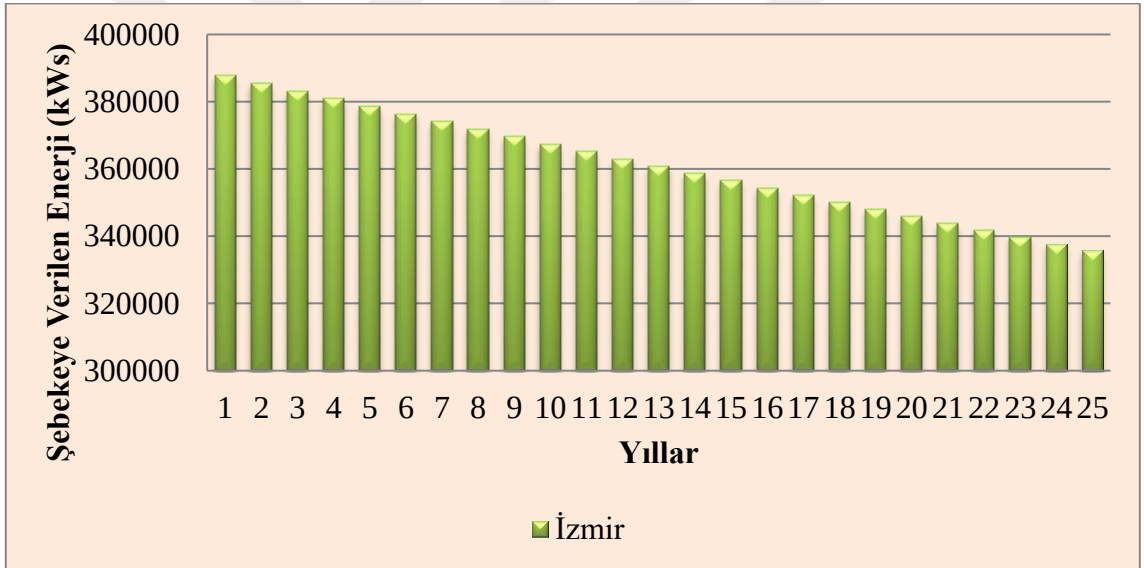
ELNSM72M-550-HC-HV panel için lineer performans garantisi verilmektedir. Paneller 10 yıllık süre sonunda %93,05, 15 yıllık süre sonunda %90,3, 20 yıllık süre sonunda %87,85, 25 yıllık süre sonunda %84,80 verime sahip olacaktır. Kurulması planlanan çatı üzeri güneş enerji santralleri için panel yaşlanması sonucu üretim düşüşü olacaktır. Üretimde lineer bir düşüş olacağından yıllık ortalama %0,6 verim kaybı ile üretim değerleri hesaplanmıştır. Panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü şehirler için sırasıyla Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



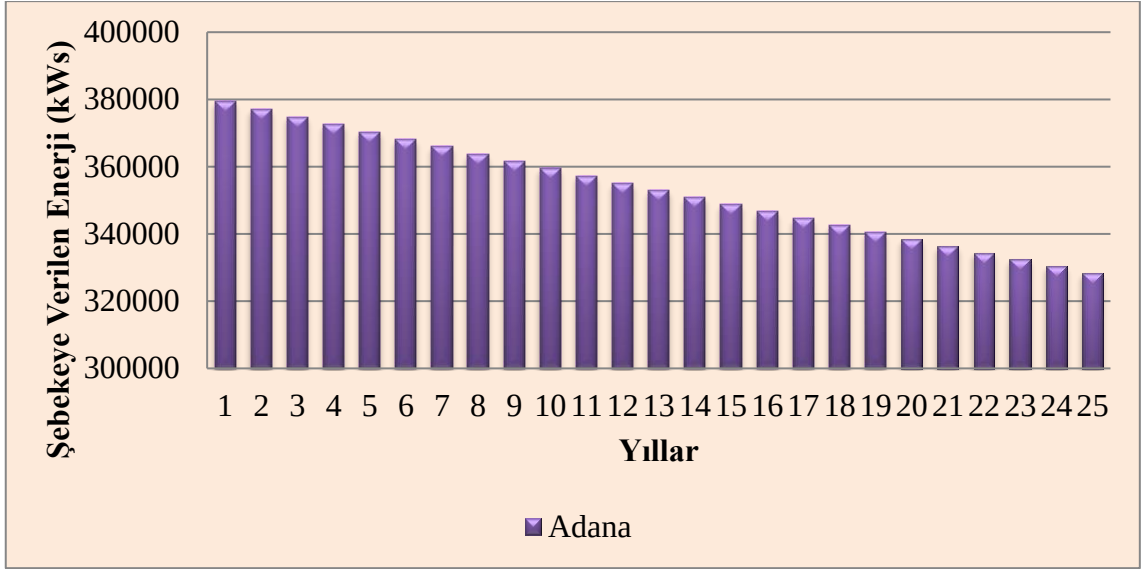
Şekil 4.22. İstanbul panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü



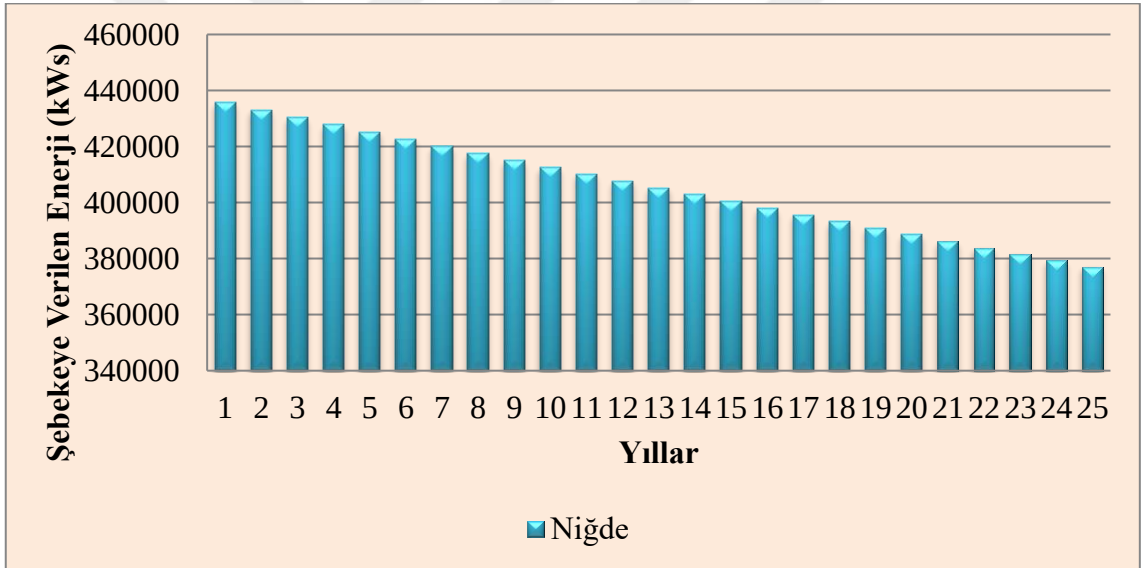
Şekil 4.23. Trabzon panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü



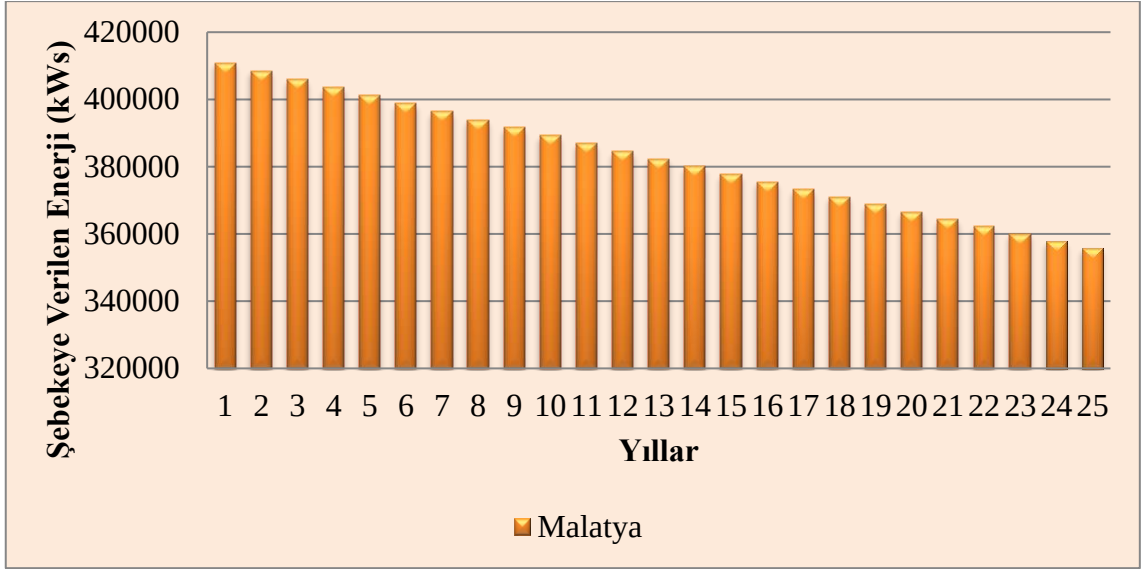
Şekil 4.24. İzmir panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü



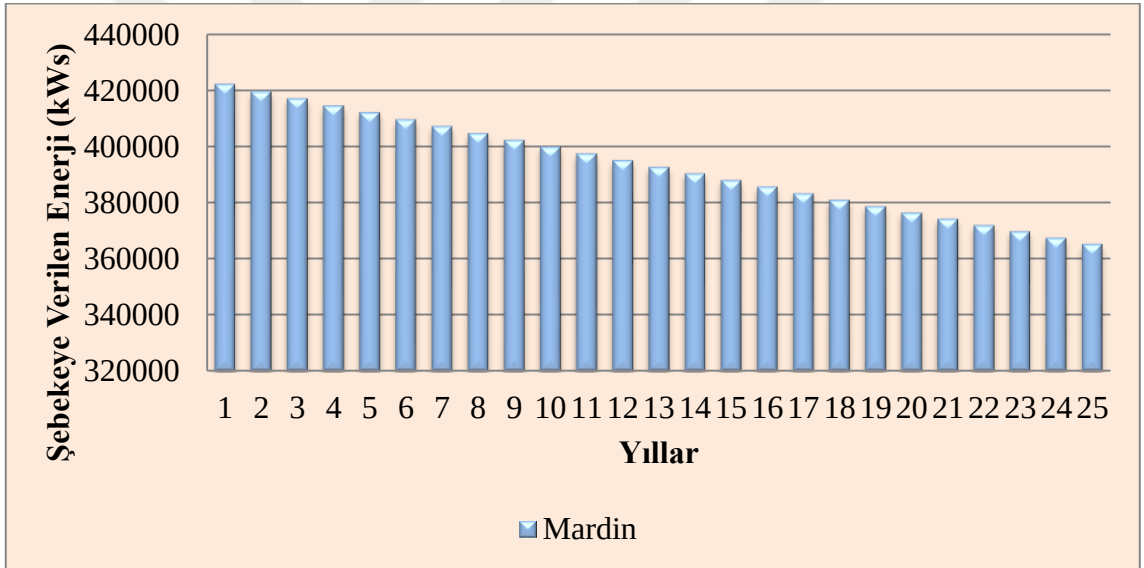
Şekil 4.25. Adana panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü



Şekil 4.26. Niğde panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü



Şekil 4.27. Malatya panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü



Şekil 4.28. Mardin panel yaşlanmasına bağlı üretim düşüşü

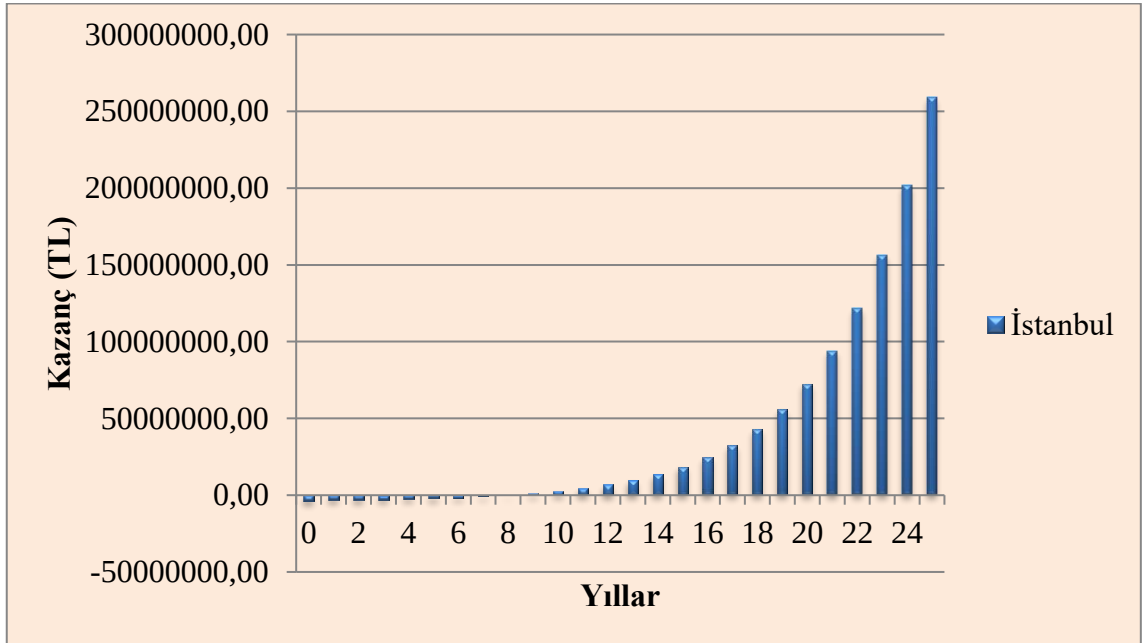
Bina kendi elektrik ihtiyacının bir kısmını çatı üzeri güneş enerji santralinden karşılayacağından faturaya yansiyacaktır. Elektrik alım birim fiyatı 2,13 TL/kWs olarak hesaplarda uygulanmıştır. Elektrik alım birim fiyatı İstanbul'da seçilen konuma ait sanayideki binada uygulanan birim fiyattır, şirketin elektrik faturalarından alınmıştır. Bu fiyat ile hesaplama yapılarak ilk yıla ait kazanç miktarlarına bakıldığında çatı üzeri güneş enerjisi santrali ile elde edilen kazanç İstanbul'da 698991,45 TL, Trabzon'da 721616,31 TL, İzmir'de 826105,59 TL, Adana'da 808034,67 TL, Niğde'de 927853,56 TL, Malatya'da 875300,07TL, Mardin'de 898902,60 TL,'dir. Kazanç tablosu Çizelge

4.3'te gösterilmiştir. TÜİK tüketici fiyat endeksi seçilmiş maddelere ait ortalama fiyatlar tablosundan son beş yıldaki elektrik fiyatlarındaki artış göz önünde bulundurularak, elektrik fiyatının yıllık ortalama %28,8 artacağı öngörülmüştür (TÜİK, 2024).

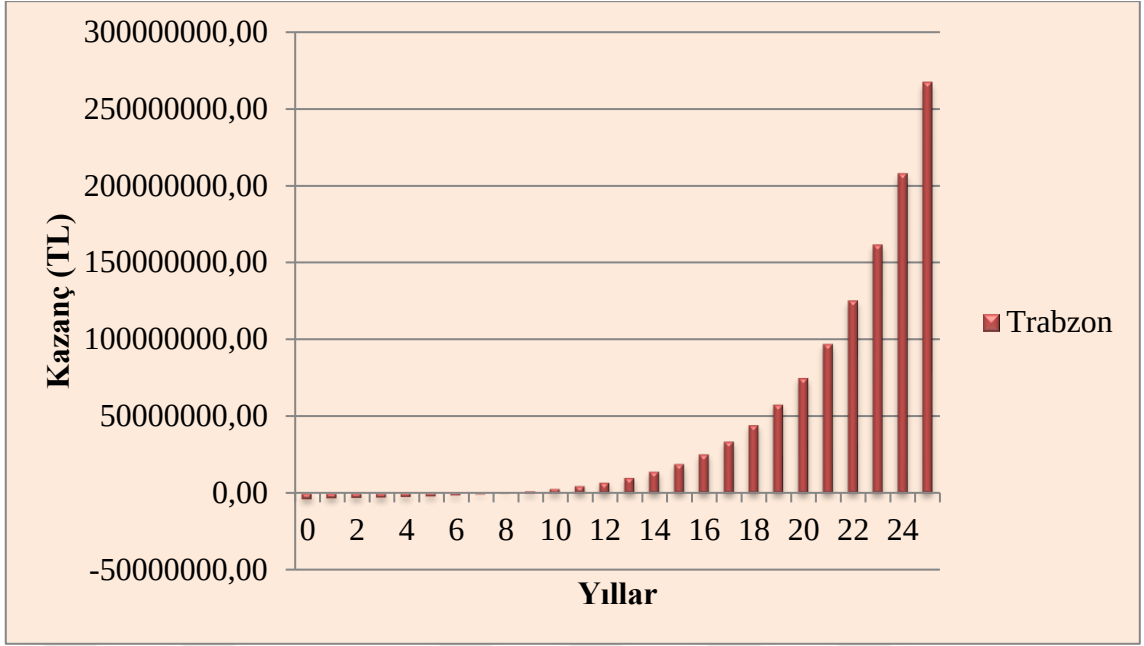
Çizelge 4.3. Kazanç tablosu

Şehirler	Kazanç (TL)
İstanbul	698991,45
Trabzon	721616,31
İzmir	826105,59
Adana	808034,67
Niğde	927853,56
Malatya	875300,07
Mardin	898902,60

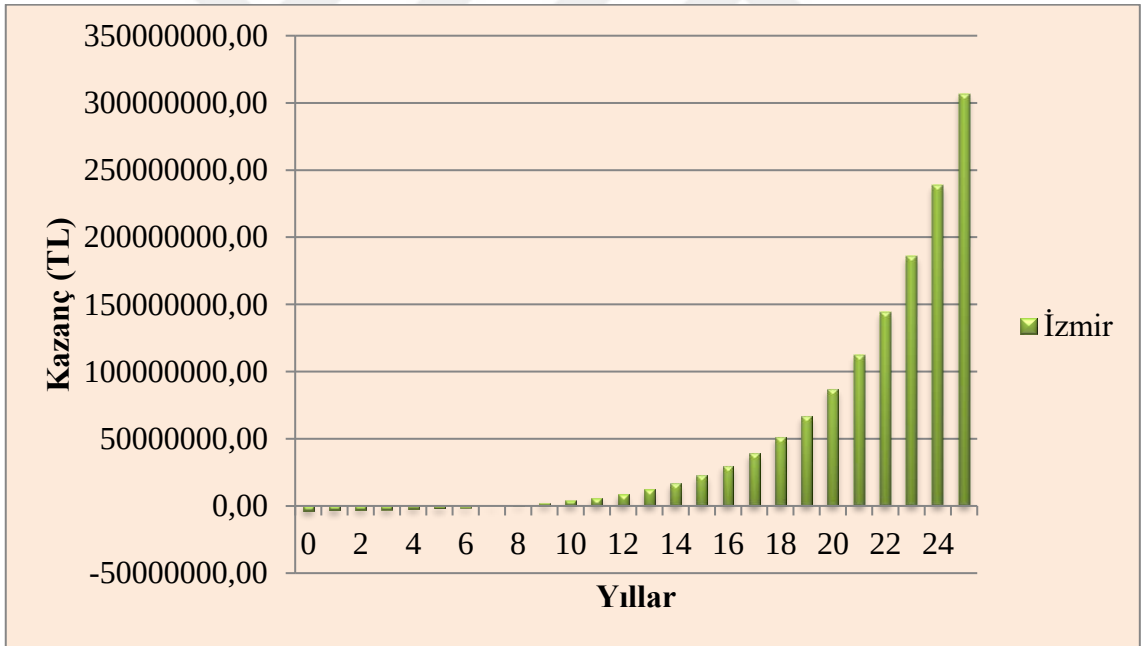
Yıllara göre enerji üretimindeki düşüş ve elektrik fiyatlarındaki artış göz önünde bulundurularak sistemlere ait geri dönüşüm grafikleri şehirler için sırasıyla Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Grafiklerde kazanç eksenini pozitif yöne döndüğünde sistemin kar ettirmeye başladığı anlaşılmaktadır. İstanbul 8. yılda, Trabzon 8. yılda, İzmir 8.yılda, Adana 8. yılda, Niğde 7. yılda, Malatya 8. yılda, Mardin 7. yılda kar ettirmeye başlamıştır.



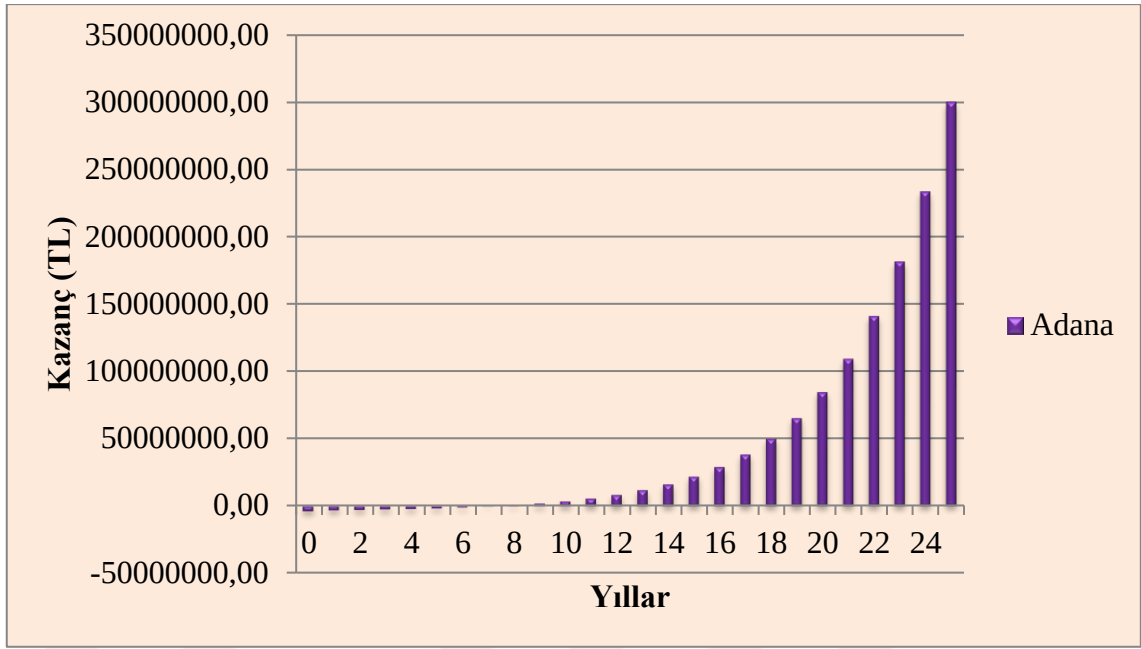
Şekil 4.29. İstanbul sistem geri dönüşüm grafiği



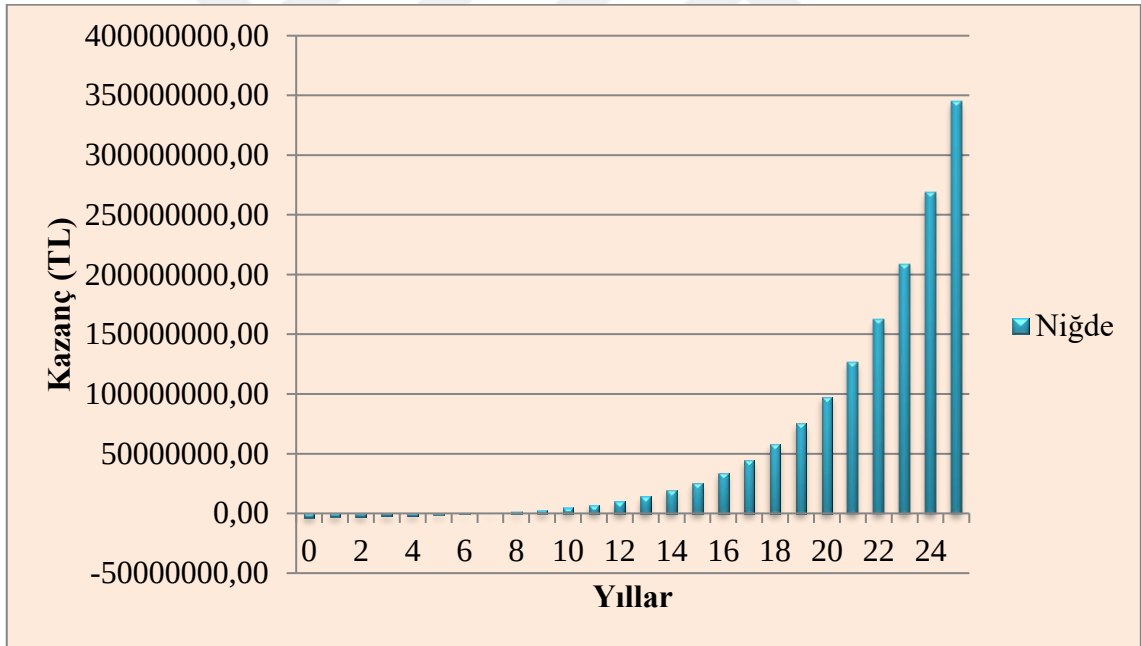
Şekil 4.30. Trabzon sistem geri dönüşüm grafiği



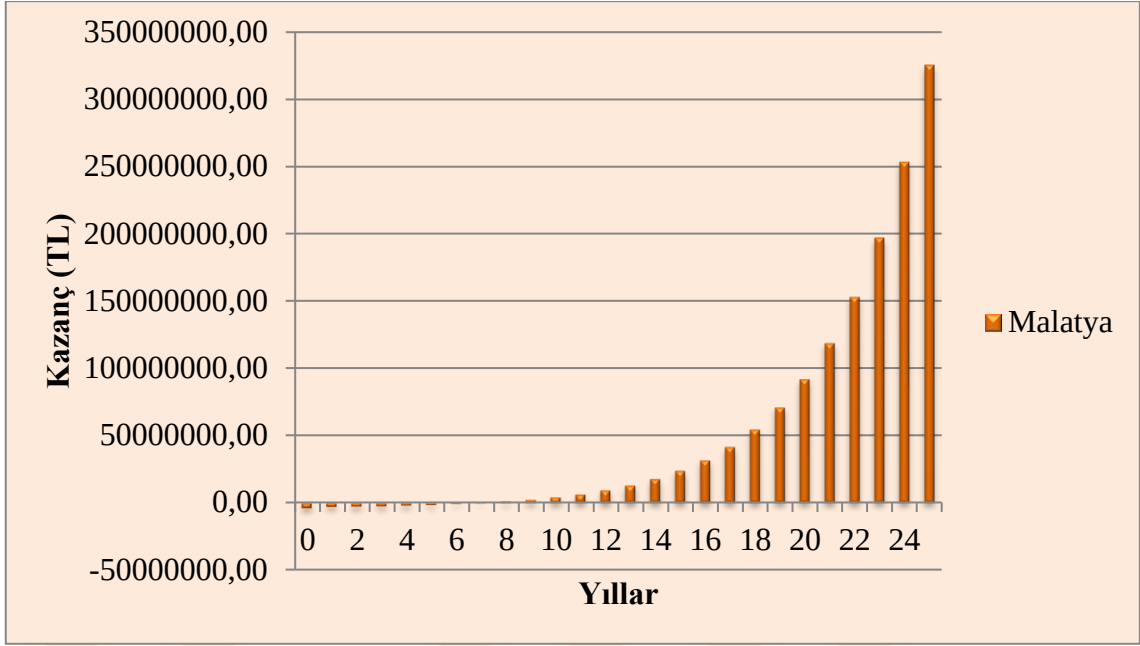
Şekil 4.31. İzmir sistem geri dönüşüm grafiği



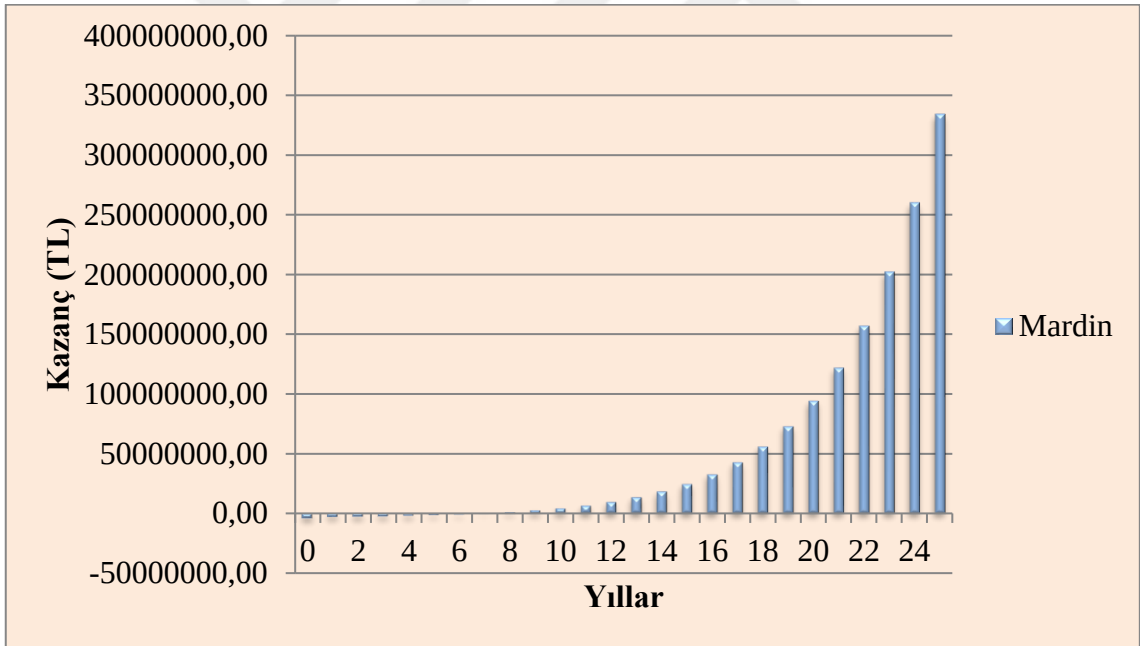
Şekil 4.32. Adana sistem geri dönüşüm grafiği



Şekil 4.33. Niğde sistem geri dönüşüm grafiği



Şekil 4.34. Malatya sistem geri dönüşüm grafiği



Şekil 4.35. Mardin sistem geri dönüşüm grafiği

Yatırımın ömrü boyunca elde edilen kazançlar ve yatırımın risk değeri göz önünde bulundurularak kurulacak sistemlere ait net şimdiki değer hesabı yapıldığında değerler pozitif olarak bulunmuştur. İskonto oranı %28,8 ve sistem yatırım ömrü 25 yıl olarak hesaplamalar yapılmıştır. Kullanılan formül 4.1’de verilmiştir. Pozitif NPV değeri, yatırımın bugünkü değerinin yatırım maliyetinden daha fazla olduğunu göstermektedir

ve dolayısıyla bu yatırımın ekonomik olarak karlı olduğu söylenebilmektedir. Elektrik fiyatlarındaki artışın kazançları büyük ölçüde artırdığı, üretimdeki küçük azalmaların bu kazancı önemli ölçüde etkilemediği anlaşılmaktadır.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (4.1)$$

4.4 Çevresel Değerlendirme

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırladığı Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü, yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi ile sağlanacak sera gazı salım azaltımı hesaplamalarına yönelik faktörlere yer vermektedir. Güneş enerjisinden üretilen her 1 MWs'lik elektrik için 0,6345 ton CO₂ eşdeğer emisyonundan kaçınılmaktadır. Çatı üzeri güneş enerji santrali ile yılda toplamda İstanbul'da 328165 kWs, Trabzon'da 338787 kWs, İzmir'de 387843 kWs, Adana'da 373359 kWs, Niğde'de 435612 kWs, Malatya'da 41039 kWs, Mardin'de 422020 kWs üretim yapılacaktır. Çatı üzeri güneş enerji santralleri için üretilen enerji miktarlarına bağlı olarak sera gazı azaltımı Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Sera gazı azaltımı

	ÜRETİLEN ENERJİ (kWs/yıl)	SERA GAZI AZALTIMI (ton CO ₂)
İstanbul	328165	208,22
Trabzon	338787	214,96
İzmir	387843	246,09
Adana	379359	240,70
Niğde	435612	276,40
Malatya	410939	260,74
Mardin	422020	267,77

Çatı üzeri güneş enerji santralleri ile yılda Environmental Protection Agency (EPA)'dan alınan verilere göre en düşük üretime sahip İstanbul için 208,22 ton CO₂ salınımının engellenmesi; benzinle çalışan bir binek otomobilin 48310916 km yol kat etmesi, 1247015542 adet telefon şarj edilmesi ve 121 dönüm ağacın kesilmemesi ile eşdeğer olmaktadır. En yüksek üretime sahip Niğde için 276,40 ton CO₂ salınımının engellenmesi benzinle çalışan bir binek otomobilin 6412994 km yol kat etmesi,

165534097 adet telefon şarj edilmesi ve 161 dönüm ağacın kesilmemesi ile eşdeğer
olmaktadır.



BÖLÜM V

SONUÇ

Bu çalışmada, Türkiye’de yedi farklı bölgeden seçilen şehirlerde çatı üzeri güneş enerjisi santralleri için güneş radyasyonu, meteorolojik veriler, coğrafi özellikler, ekonomik koşullar, çevresel etmenler araştırılmış ve PVSyst programı ile santrallere ait analiz sonuçları ortaya konmuştur.

İstanbul’da güneş enerjisi potansiyeli orta düzeydedir. Ilıman iklim koşullarına sahip olmasına rağmen kış aylarındaki yoğun bulut örtüsü ve yağışlar santralin üretimini düşürmektedir. Güneşli gün sayısının yüksek olması avantajdır. İstanbul, sanayinin merkezi konumunda bir şehir olduğundan üretilen enerjiye talep yüksektir. Dolayısıyla, bu bölgede kurulacak güneş enerjisi santrali, şehirdeki enerji ihtiyacına katkı sağlayacaktır. Enerji üretimini daha yakın bir tüketici kitlesine taşıyacak ve ekonomik açıdan cazip olacaktır.

Trabzon, Türkiye’de en az güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgededir. Yoğun yağışlar, bulutlu hava ve nem oranı elemanların ömrünü olumsuz etkilemekte ve güneş enerjisi santrallerinde ek maliyetler oluşturmaktadır. Trabzon’da kurulacak bir güneş enerjisi santrali bölgenin topografik yapısı ve iklim koşulları nedeniyle maliyetli olacaktır. Trabzon’a kurulacak bir güneş enerjisi santrali çevresel sürdürülebilirlik ve etkinlik açısından detaylı olarak değerlendirilmedi.

İzmir’de güneş enerjisi potansiyeli yüksektir. Rüzgâr hızı ve yaz aylarındaki yüksek sıcaklık panel performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Kullanılacak elemanların yüksek rüzgâr hızlarına uygun seçilmesi gerekmektedir.

Adana yüksek güneş enerjisi potansiyeline ve güneşli iklim koşullarına sahip bir şehirdir. Yüksek güneşlenme süreleri ve düşük bulut örtüsü, çatı üzeri güneş enerji santrallerinin verimliliğini artırmaktadır ancak yüksek sıcaklık ve güneş radyasyonu güneş panellerinin aşınmasına ve performanslarının azalmasına neden olabilmektedir.

Niğde'nin güneş enerjisi potansiyeli çok yüksektir. Sıcak ve kurak iklimi sayesinde güneş enerjisi sistemlerinin yüksek verimle çalışmasını sağlayabilmektedir fakat çok yüksek sıcaklıklar ve kış aylarındaki don olayları panellerin verimini olumsuz etkilemektedir. Yüksek rakımlı bölgelerde rüzgâr hızları dikkate alınmalıdır.

Malatya yüksek güneş enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen bölgede kış ayları soğuk ve karlı geçtiğinden kar birikimi yaşanması durumunda panel performansı olumsuz etkilenecek ve düzenli panel temizliği gereksinimi olacaktır. Bölgedeki yüksek rüzgâr hızları, güneş panellerinin ve montaj sistemlerinin daha dayanıklı olmasını gerektirmektedir.

Mardin'de güneş enerjisi potansiyeli çok yüksektir. Bölge genellikle sıcak ve güneşli iklim koşullarına sahiptir fakat yüksek sıcaklıklar panel performansını olumsuz etkilemektedir. Bölgenin kimi zaman şiddetli rüzgarlarla karşılaşması, güneş panellerinin dayanıklılığı ve montaj sistemlerinin sağlamlığı açısından da önem taşımaktadır.

Yıllık toplam ışıınım ile yıllık toplam şebekeye verilen enerji doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Çevre sıcaklığının artış göstermesi panel üretiminin artış göstereceği anlamına gelmemektedir. En yüksek yıllık çevre sıcaklığı Adana ilinde olmasına rağmen yıllık toplam şebekeye verilen enerji en yüksek değere sahip değildir. Karşılaştırılan tüm şehirler arasında en yüksek aylık çevre sıcaklığı değeri 30,51 °C ile temmuz ayında Mardin'de olmasına rağmen en yüksek şebekeye verilen enerji 54548 kWs ile Niğde'de gerçekleşmiştir. Temmuz ayında ışıınım değerleri Mardin ve Niğde için sırasıyla 252,90 kWs/m² ve 253 kWs/m²'dir. Niğde'nin temmuz ayındaki çevre sıcaklığı değeri 24,84 °C'dir. Burada çevre sıcaklığındaki artışın panel verimine olumsuz etkisi görülmektedir. Çevre sıcaklıklarının yükselmesi ile performans oranlarında da düşüş olduğu görülmüştür. En yüksek üretim yılda 435612 kWs ile Niğde'de, en düşük üretim yılda 328165 kWs ile İstanbul'da gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek performans oranı Trabzon'a, en düşük performans oranı ise Mardin'e aittir.

Çatı üzeri güneş enerjisi santralleri, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağıdır ve kurulumdan sonra düşük maliyetle çalışmaktadırlar. Çalışmaya ait sistem geri dönüşüm

sürelerinin 7- 8 yıl olması, NPV değerlerinin pozitif olması güneş enerjisi santrallerinin kurulumunun finansal olarak uygun olduğunu göstermektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması sera gazı azaltımına katkı sağlamaktadır. Seçilen şehirlerde en yüksek üretime sahip Niğde ilinde 276,40 ton sera gazı azaltımı olduğu görülmektedir.

Analizler ve araştırmalar sonucunda Türkiye'deki güneş enerjisi potansiyelinin geleceğimiz için umut vadettiği görülmektedir. Türkiye, enerjiyi temin edebilme potansiyelinin yüksek olduğu bir ülkedir. Çatı üzeri güneş enerjisi santrallerinin kurulmasıyla çatılar verimli hale dönüştürülebilmekte, enerjide dışa bağımlı olmadan enerjiyi temin edebilme imkânı sağlamakta ve ülkemizin kalkınmasında etkin rol oynayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Akcan, E., Kuncan, M. ve Minaz, M.R., “PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu”, ***European Journal of Science and Technology No. 18***, 248-261, 2020.

Ali, I., Shafiullah, G., ve Urmee, T., “A preliminary feasibility of roof-mounted solar PV systems in the Maldives”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 83, 18–32, 2018.

Alkan, S. ve Ateş, Y., “Çatı Üzeri Doğu-Batı Yönelimli Optimizerli Güneş Enerji Sisteminin Güney Yönelimli Sisteme Göre Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi”, ***European Journal of Science and Technology No. 19***, 375-385, 2020.

Al-Saqlawi, J., Madani, K., ve Mac Dowell, N., “Techno-economic feasibility of grid-independent residential roof-top solar PV systems in Muscat, Oman”, ***Energy Conversion and Management***, 178, 322-334, 2018.

Al-Sharafi, A., Sahin, A. Z., Ayar, T., ve Yilbas, B. S., “Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 69, 33–49, 2017.

Altaş İ. H., Fotovoltaj Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, ***Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü***, Trabzon, 1998.

Anonim, On grid GES, <https://muhendistan.com/sebeke-baglantili-solar-sistem-tasarimi/>, 18.03.2023.

Anonim, Off grid GES, <https://muhendistan.com/sebekeden-bagimsiz-solar-sistem-tasarimi/>, 18.03.2023.

Anonim, Güneş enerjisi santrallerindeki gelişmeler, <https://yesilekonomi.com/kurulu-guc-104-mwi-asti/>, 10.05.2023.

Ates, A.M. ve Singh, H., “Rooftop solar Photovoltaic (PV) plant – One year measured performance and simulations”, *Journal of King Saud University – Science*, 1-9, 2021.

Atsu, D., Seres, I. ve Farkas, I., “The state of solar PV and performance analysis of different PV Technologies grid-connected installations in Hungary”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-9, 2021.

Ban, C., Hong, T., Jeong, K., Koo, C., ve Jeong, J., “A simplified estimation model for determining the optimal rooftop photovoltaic system for gable roof”, *Energy and Buildings*, 151, 320–331, 2017.

Bayraktar, M., Binatlı, B. Ve Üzümoğlu, T., Türkiye enerji sektörü sürdürülebilirlik politikaları, https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/menu/turkiye_bina_sektor_u_karbonsuzlasma_yol_haritasi_-v1_20231218095757.pdf, 04.05.2024.

Berwal, A.K., Kumar, S., Kumari, N., Kumar, V. ve Haleem, A., “Design and analysis of rooftop grid tied 50 kW capacity Solar Photovoltaic (SPV) power plant”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1288-1299, 2017.

EİGM, Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, 10.02.2022.

Elüstün, H.G., <https://kalkinmasozlugu.izka.org.tr/gunes-enerjisi/>, 11.12.2023.

EMO, Elektrik Mühendisleri Odası Raporu, https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369, 14.05.2023.

Energy Policies of IEA Countries-Turkey 2009 Review, *International Energy Agency*, ISBN-978-92-64-06041-8, 2009.

EPA, Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References, <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>, 10.06.2024.

EPDK, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, **Resmi Gazete 30772**, 2019.

EPDK, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, **Resmi Gazete 31920**, 2022.

Erzurum, E.N. ve Sayin, S., “PVSYST Programıyla Fotovoltaik Panel Uygulama ve Maliyet Analizi Üzerine Çalışma: Sivas Örneği”, **4th INTERNATIONAL CONGRESS ON ECONOMICS FINANCE AND ENERGY “Political Economy of Energy Revolution”**, 536-548, 2020.

ETKB, 2022 Yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı Enerji Sektörü Özet Raporu, <https://www.elder.org.tr/Content/files/a4cfa306-6d2a-44ff-920d-2f2b55741b18.pdf>, 14.05.2023.

ETKB, Güneş enerjisi neden önemlidir?, <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>, 02.09.2023.

Gagnon, P., Margolis, R., Melius, J., Phillips, C. ve Elmore, R., “Estimating rooftop solar technical potential across the US using a combination of GIS-based methods, lidar data, and statistical modeling”, **Environ. Res. Lett. 13 (2018) 024027**, 2018.

IEA, World Energy Outlook (2019), Renewables 2020 global status report, World Energy Outlook 2019 – Analysis, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>, 17.04.2021.

IRENA, Renewable Energy Statistics 2019, **The International Renewable Energy Agency**, Abu Dhabi, 2019.

IRENA, Renewable Energy Statistics 2021, *The International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, 2021.

Jones, D., Güneş enerjisi, <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>, 11.06.2023.

Kabir, M. H., Endlicher, W., & Jägermeyr, J., “Calculation of bright roof-tops for solar PV applications in Dhaka Megacity, Bangladesh”, *Renewable Energy*, 35(8), 1760-1764, 2010.

Kanat, H., Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisi Yatırımlarını Etkileyen Faktörler: Konya Güneş Enerjisi Yatırımları Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Konya, 2019.

Khan, M.M.A., Asif, M. ve Stach, E., “Rooftop PV Potential in the Residential Sector of the Kingdom of Saudi Arabia”, *Buildings* 2017, 7, 46, 2017.

Khan, S., Sudhakar, K., Yusof, M. H. B., Azmi, W. H. ve Ali, H. M., “Roof integrated photovoltaic for electric vehicle charging towards net zero residential buildings in Australia”, *Energy for Sustainable Development*, 73, 340-354, 2023.

Kumar, N. M., Gupta, R. P., Mathew, M., Jayakumar, A., ve Singh, N. K., “Performance, energy loss, and degradation prediction of roof-integrated crystalline solar PV system installed in Northern India”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100409, 2019.

Sancar, M.R. ve Altınkaynak, M., “İsparta İli İçin Farklı Çatı Tiplerinde Tasarlanan Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması”, *European Journal of Science and Technology Special Issue* 32, 1024-1028, 2021.

Sharma, S., Kurian, C.P. ve Paragond, L.S., “Solar PV System Design Using PVsyst: A Case Study of an Academic Institute”, *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)*, 123-128, 2018.

Senyonyi, B., Mahmoud, H., Sekiguchi, H. ve Hassan, H, “New approach for zero energy industries via integrating energy management and renewable energy system: Enviro-economic investigation”, *Energy and Buildings*, 319, 114573, 2024.

Shukla, A. K., Sudhakar, K., ve Baredar, P., “Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India”, *Solar Energy*, 136, 437–449, 2016.

T.C. Çevre ve İklim Değişikliği Bakanlığı, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr>, 2024.

Thebault, M., Clivillé, V., Berrah, L., ve Desthieux, G., “Multicriteria roof sorting for the integration of photovoltaic systems in urban environments”, *Sustainable Cities and Society*, 60, 102259, 2020.

TÜİK, “Tüketici fiyat endeksi seçilmiş maddelere ait ortalama fiyatlar”, [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Eylul-2024-53618#:~:text=T%C3%9CFE'deki%20\(2003%3D100,%63%2C47%20olarak%20ger%C3%A7ekle%C5%9Fti.&text=Bir%20%C3%B6nceki%20y%C4%B1l%C4%B1n%20ay%C4%B1%20ay%C4%B1na%20g%C3%B6re%20en%20az%20art%C4%B1%C5%9F%20g%C3%B6steren,26%2C60%20ile%20ula%C5%9Ft%C4%B1rma%20oldu.,](https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Eylul-2024-53618#:~:text=T%C3%9CFE'deki%20(2003%3D100,%63%2C47%20olarak%20ger%C3%A7ekle%C5%9Fti.&text=Bir%20%C3%B6nceki%20y%C4%B1l%C4%B1n%20ay%C4%B1%20ay%C4%B1na%20g%C3%B6re%20en%20az%20art%C4%B1%C5%9F%20g%C3%B6steren,26%2C60%20ile%20ula%C5%9Ft%C4%B1rma%20oldu.,) 2024.

Uçar, H. (2012), Rüzgar enerjisi destekli hidrojen üretim sistemlerinin tekno-ekonomik analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2012.

Yang, Y., Campana, P. E., Stridh, B., ve Yan, J., “Potential analysis of roof-mounted solar photovoltaics in Sweden”, *Applied Energy*, 279, 115786, 2020.

ÖZ GEÇMİŞ

tarihinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini İlköğretim Okulu'nda ve lise öğrenimini Lisesi'nde tamamladı. 2015 yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2020'de mezun oldu. 2020 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



