

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜKETİM VERİLERİNE DAYALI GES TASARIMI VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba AĞI

MART 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜKETİM VERİLERİNE DAYALI GES TASARIMI VE ANALİZİ

Tuğba AĞI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 02/ 2025

Tezin Savunma Tarihi : 07/03/2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Tüketim Verilerine Dayalı GES Tasarımı ve Analizi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu çalışmanın her aşamasında kıymetli bilgileriyle, engin tecrübesiyle ve yol gösterici desteğiyle bana rehberlik eden ve gelişimime büyük katkı sağlayan danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi sadece akademik anlamda değil aynı zamanda bilimsel düşünme yöntemiyle de bana ilham kaynağı olmuştur.

Tez çalışmam boyunca yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan sevgili eşim Dr. Zübeyir ÖZCAN’a teşekkür ederim. Yoğun stresim karşısında gösterdiği anlayış, destek ve verdiği güç sayesinde bu çalışmayı tamamlamak benim için çok daha anlamlı hale gelmiştir.

Doğduğum günden itibaren beni koşulsuz sevgiyle büyüten, aldığım her kararda maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan kıymetli annem Hatun AĞI ve babam Rafet AĞI’ya en derin şükranlarımı sunarım. Bugünlere gelmemde en büyük pay şüphesiz onların emeği ve fedakârlıklarıdır. Varlıklarıyla bana güç veren, her zaman yanımda olup desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım kardeşlerim Cemile ULUPINAR ve Yusuf AĞI’ya gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, güneş enerjisi sektöründeki engin bilgi ve tecrübeleriyle bu tez çalışmasına değerli katkılarda bulunan, fikirleri ve yönlendirmeleriyle analiz sürecimi daha verimli hale getiren kıymetli arkadaşlarım Emre BOZ ve Sebahattin GÜRLEVİK’e en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların destekleri, bu çalışmanın daha sağlam temellere oturmasını sağlarken, sektörel bakış açımı geliştirmemde de büyük rol oynamıştır.

Bu tez, yalnızca akademik bir çalışmanın sonucu değil aynı zamanda hayatımdaki önemli insanların desteğiyle şekillenmiş bir emeğin ürünüdür. Bana inanan ve destek olan herkese minnettarlığımı sunar ve bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Tuğba AĞI

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tüketim Verilerine Dayalı GES Tasarımı ve Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/03/2025

Tuğba AĞI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Arzı ve Talebi.....	1
1.1.1. Enerji Talebi ve Dağılımı.....	1
1.1.2. Enerji Arzında Mevcut Durum	5
1.1.3. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları	6
1.1.4. Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli	8
1.1.5. Türkiye’de Enerji Üretiminde Lisanssız Tesisler	10
1.2. Güneş Enerjisi Santrallerine Genel Bakış	12
1.2.1. Fotovoltaik Panel	13
1.2.2. Evirici.....	16
1.2.3. Bağlantı Ekipmanları	18
1.2.4. Sayaç	18
1.2.5. Taşıyıcı Sistem.....	18
1.2.6. Diğer Ekipmanlar	19
1.3. Güneş Enerjisi Santrallerinin Modellenmesi.....	19
1.3.1. Güneş Enerjisinin Temel Özellikleri.....	19
1.3.2. Standart Test Koşullarında FV Panellerin Enerji Üretimi	21
1.3.3. Panel Eğim ve Yönünün Enerji Üretimine Etkisi	22
1.3.4. Panel Sıcaklığının Enerji Üretimine Etkisi	23
1.3.5. Kayıplar.....	24
1.3.6. Maliyetler	24
1.4. Literatür Araştırması	26

1.5. Tezin Amacı ve Katkıları	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	34
2.1. Materyal.....	34
2.1.1. İncelenen Üretim Bölgeleri	34
2.1.2. İncelenen Tüketiciler.....	35
2.1.3. Işınım, Meteoroloji Verileri ve PVGIS	37
2.1.4. Birim Fiyatlar	38
2.2. Fotovoltaik Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu	39
2.2.1. Kurulum	39
2.2.2. Saatlik Üretimin Hesaplanması.....	40
2.2.3. Aylık Üretimin Hesaplanması.....	41
2.2.4. Mahsuplaşma	41
2.3. Performans Ölçütleri	43
2.3.1. Amorti Süreleri	43
2.3.2. KWh Başına Kar	43
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
3.1. Tüketimi Karşılamanın GES Kurulu Gücü	45
3.2. Firmalarda Enerji Dengeleri ve Faturaların Uzun Vadede İncelenmesi	46
3.3. Panel Eğiminin GES Performansına Etkisi	52
3.4. Firmalara Göre Bulguların İncelenmesi	56
3.5. Konumlara Göre Bulguların İncelenmesi.....	60
4. SONUÇLAR.....	66
5. ÖNERİLER.....	68
6. KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TÜKETİM VERİLERİNE DAYALI GES TASARIMI VE ANALİZİ

Tuğba AĞI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2025, 72 Sayfa

Bu tez çalışmasında, farklı tüketici profillerine dayalı olarak GES tasarımı ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dokuz farklı OSB tüketicisine ait gerçek tüketim verileri ve iki modellenmiş tüketim verisi kullanılarak GES sistemlerinin saatlik ve aylık bazda üretim hesaplamaları yapılmıştır. Ekonomik analiz kapsamında tüketimi karşılayan GES kurulu gücü, enerji denge noktaları, yirmi beş yıllık fatura hesaplamaları, panel eğiminin enerji üretimine etkisi ve coğrafi konumların ekonomik etkileri Kar/kWh, Net Kar/kWh ve Amorti Süreleri cinsinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular GES kurulu güç gereksinimlerinin coğrafi konuma ve tüketim profiline bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca optimum panel eğiminin belirlenmesinin üretim verimliliğini artırarak ekonomik kazancı maksimize ettiği görülmüştür. Tüketici profillerinin analizi sonucunda yüksek enerji tüketimine sahip ve güneş enerjisi üretimiyle uyumlu tüketim profili sergileyen tüketicilerin ekonomik açıdan en avantajlı durumda olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte tüketim ihtiyacının üzerinde tasarlanan GES sistemlerinde şebekeye fazla enerji verilmesi durumunda ekonomik faydanın azaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma, GES yatırımlarında tüketim profilinin detaylı incelenmesinin ve coğrafi konum analizinin önemli olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, tüketim verileri, öz tüketim, enerji dengesi, panel eğimi, ekonomik analiz.

Master Thesis

SUMMARY

DESIGN AND ANALYSIS OF SOLAR POWER PLANTS BASED ON CONSUMPTION

Tuğba AĞI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2025, 72 Pages

This thesis focuses on the design and economic analysis of solar energy systems tailored to different consumer profiles. Using real consumption data from nine Organized Industrial Zone consumers and two modeled profiles, hourly and monthly production estimates were conducted. The study evaluated the required PV capacity, energy balance points, long-term bill projections, panel tilt angles, and the impact of geographical location in terms of key economic indicators such as profit per kWh, net profit per kWh, and payback period. The findings indicate that the optimal system size depends heavily on both geographic conditions and the specific energy usage patterns of the consumer. Determining the ideal panel tilt angle was shown to improve production efficiency and maximize financial gain. Consumers with high energy demand and consumption behavior that aligns well with solar generation were found to be in the most economically advantageous position. On the other hand, when systems were oversized and generated surplus energy fed back into the grid, the overall economic benefit decreased. Ultimately, the study emphasizes the importance of detailed analysis of both consumption profiles and geographical factors in solar energy investment planning.

Key Words: Solar energy, consumption data, self-consumption, energy balance, panel tilt angle, economic analysis.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 2023-2024 yılı Türkiye'nin aylık enerji tüketim davranışı (URL-1, 2024)	2
Şekil 2. Faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (EPDK, 2023)	3
Şekil 3. Türkiye güneş radyasyonu haritası	9
Şekil 4. Türkiye'nin aylık güneşlenme süreleri (URL-2, 2024)	9
Şekil 5. GES kurulu güç ve üretiminin yıllara göre değişimi (IRENA, 2024)	10
Şekil 6. Lisanssız kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (EPİAŞ, 2024)	11
Şekil 7. Fotovoltaik sistem bileşenleri ve enerji akışı	12
Şekil 8. Fotovoltaik GES kapasiteleri (IRENA, 2024)	13
Şekil 9. Güneş pilinin çalışma prensibi	14
Şekil 10. Panel katmanları	15
Şekil 11. FV panellerin elektriksel bağlantı şekilleri	17
Şekil 12. Küresel yatay ışınım dünya haritası (Şüri vd., 2011)	20
Şekil 13. Küresel yatay ışınım bileşenleri	21
Şekil 14. FV sistemlerde kayıplar (Deniz, 2013)	25
Şekil 15. F10 firmasının Ankara konumundaki enerji bileşenleri	47
Şekil 16. F10 firmasının Ankara konumundaki fatura bileşenleri	48
Şekil 17. F10 firmasının Ankara konumunda elde ettiği KWh başına kar	53
Şekil 18. F10 firmasının Ankara konumunda elde ettiği KWh başına net kar	54
Şekil 19. F10 firmasının Ankara konumunda panel eğimlerine göre amorti süreleri	55
Şekil 20. Firmaların tüketilen KWh başına kar ve net kar grafikleri	57
Şekil 21. Firmaların üretilen KWh başına kar ve net kar grafikleri	58
Şekil 22. Firmaların amorti süreleri	59
Şekil 23. F11 firması konum bazlı kWh başına kar ve net kar grafiği	61
Şekil 24. F11 firması konum bazlı amorti süreleri	62
Şekil 25. F10 firması konum bazlı kWh başına kar ve net kar grafiği	63
Şekil 26. F10 firması konum bazlı amorti süreleri	64

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Faturalanan tüketimin başlıca illere göre dağılımı (EPDK, 2023).....	4
Tablo 2. Kaynak bazında kurulu güç ve üretim değerleri (EPDK, 2023)	5
Tablo 3. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güçleri (IRENA, 2024)	7
Tablo 4. İncelenen üretim bölgeleri özellikleri	35
Tablo 5. Firmaların aylık tüketim davranışları.....	36
Tablo 6. GES kurulumunda birim maliyetler	39
Tablo 7. FV panel teknolojisine göre kullanılan değişkenler.....	40
Tablo 8. Tüketimi karşılayan GES güçleri	46
Tablo 9. F10 firmasının Ankara konumunda kritik noktaları.....	47
Tablo 10. Enerji satış başlangıç noktaları (%).....	49
Tablo 11. Enerji başa baş noktaları (%)	50
Tablo 12. Fatura başa baş noktaları (%)	51
Tablo 13. Bedelsiz enerji başlangıç noktaları (%).....	51
Tablo 14. Enerji özgürlük noktaları (%).....	51
Tablo 15. Üretim aşım noktaları (%).....	52

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
DGI	: Doğrudan Güneş Işınımı
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FV	: Fotovoltaik
GES	: Güneş Enerji Santrali
GEPA	: Türkiye Güneş Enerji Potansiyeli Atlası
GW	: Gigawatt
GWh	: Gigawatt saat
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
KYI	: Küresel Yatay Işınım
KW	: Kilowatt
KWh	: Kilowatt saat
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt saat
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
PVGIS	: Photovoltaic Geographical Information System
STK	: Standart Test Koşulları
TWh	: Terawatt saat
UV	: Ultraviyole
YI	: Yansıyan Işınım
YYI	: Yaygın Yatay Işınım

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Arzı ve Talebi

Türkiye’nin enerji sektörü, hızlı nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve ekonomik büyüme gibi dinamiklerden doğrudan etkilenmektedir. Bu durum, enerji talebindeki artışı tetikleyerek ülkenin enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı ve enerji üretim kapasitesinin artırılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

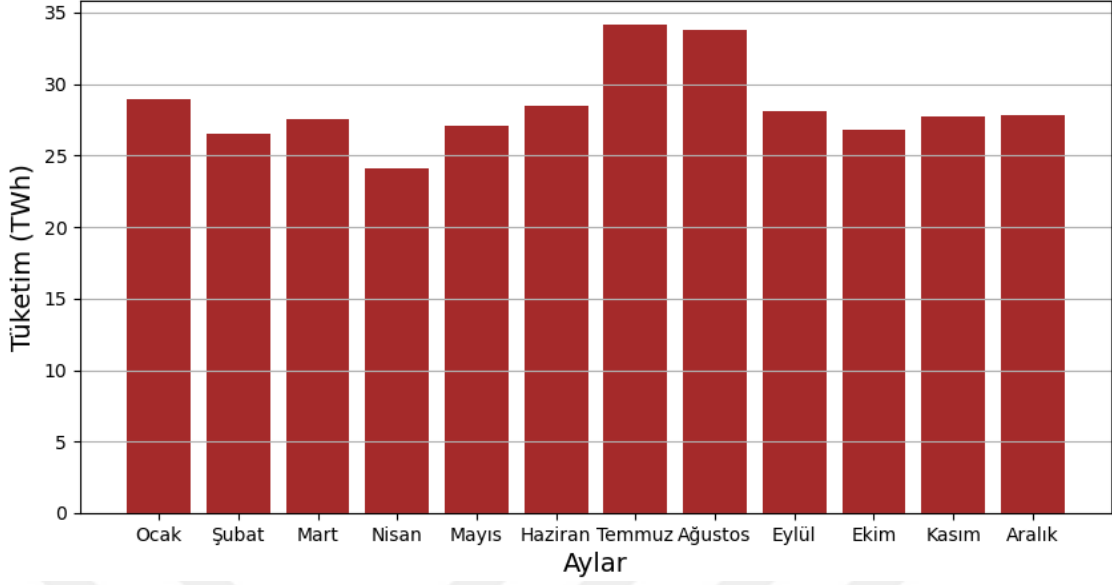
Ülkede enerji tüketimi, sektörel dağılımlar ve coğrafi farklılıklar açısından çeşitlilik göstermektedir. Enerji arzı ise fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki denge ile şekillenmektedir (EPDK, 2023). Bu kapsamda, enerji arz güvenliğinin sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerji verimliliğinin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve bağımsız bir enerji üretim politikası için önemlidir.

Enerji sektörüyle ilgili yasal düzenlemeler, teknolojik gelişmeler ve bölgesel enerji tüketim analizleri, Türkiye’nin enerji politikasının oluşturulmasında temel etkenlerdir. Hem arz hem de talep tarafında yaşanan bu düzenlemeler, enerji sektöründeki dinamik yapıyı göstermektedir.

1.1.1. Enerji Talebi ve Dağılımı

Türkiye’de enerji tüketimi, coğrafi bölgelere, tüketici davranışlarına ve mevsimsel ihtiyaçlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir (EPDK, 2023). Aylara göre tüketim incelendiğinde, enerji tüketimi yaz aylarında artan soğutma ihtiyaçlarıyla zirve yaparken, kış aylarında ise ısıtma amaçlı enerji kullanımı nedeniyle yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bahar aylarında bu tüketim genellikle daha dengeli bir seyir izlemekte, ancak bölgesel farklılıklar belirgin şekilde kendini göstermektedir.

Tüketici türüne göre enerji tüketimi incelendiğinde, sanayi sektörü en yüksek enerji tüketimini gerçekleştirirken, meskenler ve hizmet sektörü sırasıyla bu talebi takip etmektedir. Sanayi sektörünün enerji talebi genellikle üretim süreçlerine bağlı olarak yıl boyunca sabit bir seyir izlerken, meskenlerde ve ticari işletmelerde mevsimsel dalgalanmalar daha belirgin hale gelmektedir. Hizmet sektöründe ise enerji tüketimi, çalışma saatlerine bağlı olarak gündüz saatlerinde yoğunlaşmaktadır.



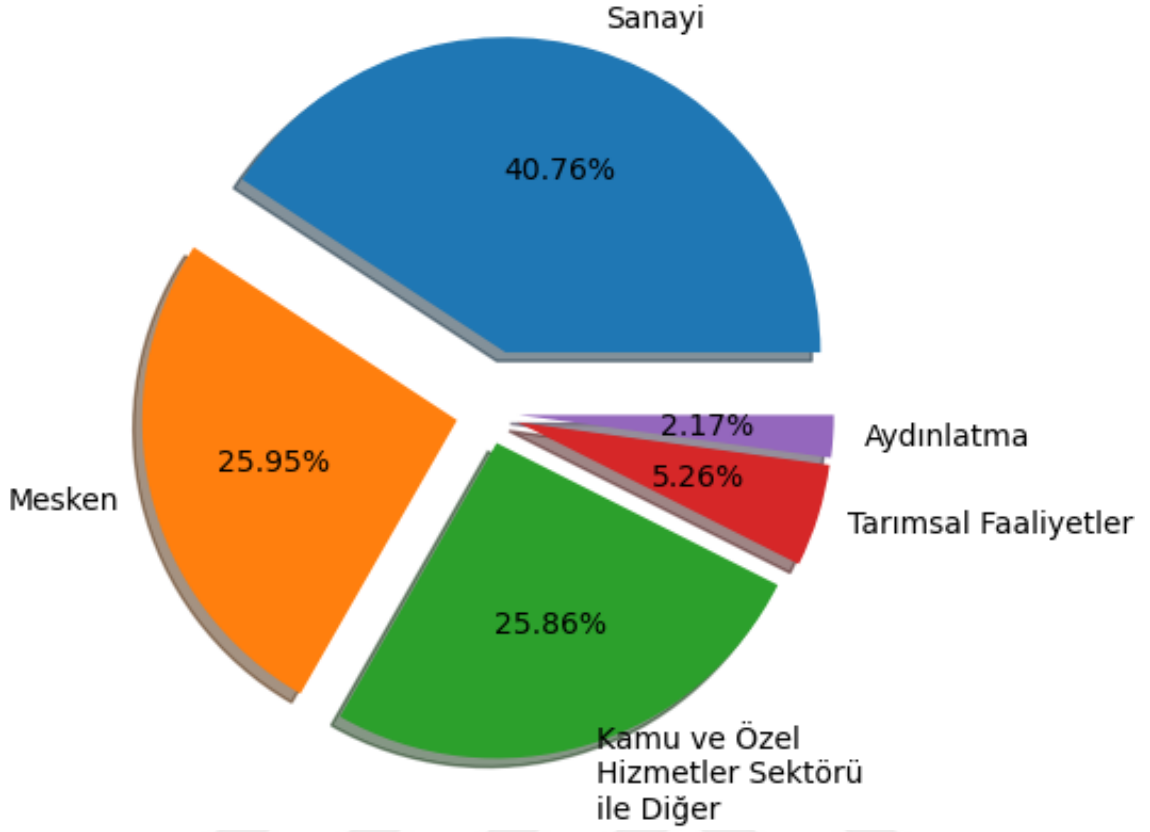
Şekil 1. 2023-2024 yılı Türkiye'nin aylık enerji tüketim davranışı (URL-1, 2024)

Coğrafi olarak, enerji tüketimi Türkiye'nin coğrafi bölgeleri arasında farklılık göstermektedir. Marmara Bölgesi, yoğun nüfusu ve sanayi yoğunluğu nedeniyle en yüksek enerji tüketimine sahipken, Ege ve İç Anadolu bölgeleri de dikkate değer bir paya sahiptir. Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde enerji tüketimi nispeten düşük olsa da, tarımsal sulama ve yerel üretim süreçleri bu bölgelerde belirgin enerji ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Bu çeşitlilik, enerji altyapısının coğrafi konumlara ve tüketim türlerine göre planlanmasının önemini vurgulamaktadır.

Şekil 1'de verilen Türkiye'nin aylık ortalama enerji tüketim verileri, tüketimin yıl içindeki mevsimsel değişimlerini göstermektedir (URL-1, 2024). Özellikle yaz aylarında enerji tüketiminde belirgin bir artış yaşandığı dikkat çekmektedir. Bu artış, soğutma sistemlerine duyulan yüksek ihtiyaç, tarımsal sulama faaliyetlerinin yoğunlaşması ve turizm bölgelerindeki enerji talebinin artması gibi faktörlere dayanmaktadır. Yaz aylarındaki bu tüketim davranışı, enerji kaynaklarının yönetiminde mevsimsel değişimlerin önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

Şekil 2'de, Türkiye'de 2023 yılına ait faturalandırılmış enerji tüketiminin farklı tüketici türlerine göre yüzdesel dağılımı gösterilmektedir (EPDK, 2023). Bu dağılım, enerji tüketiminin hangi sektörlerde yoğunlaştığını anlamak ve sektörel enerji politikalarını şekillendirmek açısından önemli bir perspektif sunmaktadır.

Enerji tüketiminde en büyük paya sanayi sektörü sahiptir. Sanayinin enerji tüketimindeki liderliği, enerji yoğun üretim faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum,



Şekil 2. Faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (EPDK, 2023)

Türkiye'nin enerji politikalarında sanayi sektörünü öncelikli olarak ele alması gerektiğini göstermektedir. Meskenler, enerji tüketiminde ikinci sırada yer alarak toplam tüketim içinde önemli bir payı temsil etmektedir. Hizmet sektörü, enerji tüketiminde üçüncü sırada yer almakta olup kamu binaları, hastaneler, okullar ve ticari işletmeleri kapsamaktadır. Bu grubun enerji talebi genellikle gündüz saatlerinde yoğunlaşmaktadır. Tarımsal faaliyetler, enerji tüketiminde önemli bir diğer grubu oluşturmaktadır. Tarım sektöründe enerji talebi sulama faaliyetlerinde yoğunlaşmakta olup, yaz aylarında artış göstermektedir.

Türkiye'nin enerji tüketim verileri iller bazında incelendiğinde, her bölgeden öne çıkan şehirlerin farklı oranlarda enerji talebine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 1'e göre, en yüksek enerji tüketimi Marmara Bölgesi'nde, 42,52 TWh ile İstanbul'da gerçekleşmiş olup bu, toplam tüketimin %16,67'sine karşılık gelmektedir. İstanbul'un ardından Ege Bölgesi'nden İzmir %6,44'lük payla ikinci sırada yer alırken, İç Anadolu Bölgesi'nden Ankara %5,83'lük payla üçüncü sırada bulunmaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki en yüksek tüketim ise %3,38 ile Gaziantep iline aittir (EPDK, 2023).

Tablo 1. Faturalanan tüketimin başlıca illere göre dağılımı (EPDK, 2023)

İller	Coğrafi Bölge	Tüketim (TWh)	Toplam Tüketime Oranı (%)
İstanbul (Tümü)	Marmara	42,52	16,67
İzmir	Ege	16,42	6,44
Ankara	İç Anadolu	14,88	5,83
Gaziantep	Güneydoğu Anadolu	8,63	3,38
Adana	Akdeniz	7,67	3,01
Trabzon	Karadeniz	1,55	0,61
Erzurum	Doğu Anadolu	0,96	0,38

Akdeniz Bölgesi'nde enerji tüketimi açısından dikkat çeken illerden biri %3,87 oranıyla Antalya'dır. Antalya'daki enerji talebinin büyük bir kısmı kamu ve özel hizmetler sektöründen kaynaklanmaktadır. Hizmet sektörünün toplam enerji tüketimi 4.68 TWh olup, bu değer toplam tüketim içerisinde %1,84'lük bir paya sahiptir. Antalya'da sanayi sektörünün enerji tüketimi ise 1.46 TWh ile %0,57 oranında kalmaktadır. Adana ise enerji tüketiminde farklı bir tablo çizmektedir. Adana'daki sanayi sektörünün tüketimi 3.63 TWh olup, bu değer toplam enerji tüketimi içerisinde %1,42'lik bir paya karşılık gelmektedir. Bu durum, Adana'nın sanayi odaklı bir enerji talebine sahip olduğunu, Antalya'nın ise hizmet sektöründe yoğunlaştığını göstermektedir.

Doğu Anadolu Bölgesi'nde ise enerji tüketiminde öne çıkan illerden biri Malatya'dır. Malatya'nın toplam enerji tüketimi 1.43 TWh olup, bölgesel tüketim içerisindeki payı %0,56'dır. Malatya'nın sanayi sektörüne ait tüketimi 0,46 TWh olarak kaydedilmiş ve bu, toplam enerji tüketiminde %0,18'lik bir paya denk gelmektedir. Buna karşılık, Elâzığ'ın sanayi sektörü enerji tüketimi Malatya'ya göre daha yüksektir. Elâzığ'da sanayi sektörünün enerji tüketimi 0,48 TWh olarak belirlenmiş ve toplam tüketim içerisindeki payı %0,19 olarak hesaplanmıştır (EPDK, 2023).

Bu veriler, Türkiye'nin enerji talebinin iller ve sektörler bazında çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sanayi, hizmet ve tarım gibi sektörlerin her birindeki enerji ihtiyaçları, illerin ekonomik ve coğrafi özelliklerine bağlı olarak şekillenmekte, bu da bölgesel enerji planlaması ve yatırımların önemini artırmaktadır.

Tablo 2. Kaynak bazında kurulu güç ve üretim değerleri (EPDK, 2023)

Kaynak Türü	Toplam Kurulu Güç (GW)	Oran (%)	Toplam Üretim (TWh)	Oran (%)
Hidrolik	31,96	29,23	63,85	19,66
Rüzgâr	11,81	10,80	34,07	10,49
Güneş	13,99	12,80	18,61	5,73
Biyokütle	2,08	1,90	9,71	2,99
Jeotermal	1,69	1,55	10,99	3,39
Yenilenebilir	61,54	56,28	137,23	42,25
Doğal Gaz	25,73	23,53	68,56	21,11
İthal Kömür	10,37	9,49	72,12	22,21
Linyit	10,19	9,32	40,93	12,60
Taş Kömürü	0,84	0,77	3,65	1,12
Asfaltit	0,41	0,37	1,59	0,49
Fuel Oil	0,26	0,24	0,70	0,22
Nafta	0,004	0,00	0,00	0,00
Lng	0,001	0,00	0,00	0,00
Motorin	0,001	0,00	0,002	0,00
Termik	47,81	43,72	187,56	57,75
Toplam	109,35	100,00	324,79	100,00

1.1.2. Enerji Arzında Mevcut Durum

Türkiye'nin elektrik üretimi, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu kaynakların çeşitliliği, ülkenin enerji arz güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından gücünü göstermektedir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin elektrik üretimi, yerli ve ithal kaynaklardan sağlanmaktadır (EPDK, 2023). Yenilenebilir enerji kaynaklarının payı giderek artarken, fosil yakıtların üretimdeki hâkimiyeti devam etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, Türkiye'nin elektrik üretiminde önemli bir paya sahiptir. Tablo 2'ye göre 2023 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji kaynakları, toplam kurulu gücün %56,28'ini ve üretimin %42,25'ini karşılamaktadır. Bu kaynaklar arasında hidrolik, rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal enerji bulunmaktadır. Fosil yakıtlar, Türkiye'nin elektrik üretiminde hâlâ büyük bir paya sahiptir. 2023 yılı itibarıyla fosil yakıtlar, toplam kurulu gücün %43,72'sini ve toplam üretimin %57,75'ini sağlamaktadır. Fosil yakıtlar arasında doğal gaz, ithal kömür, linyit ve taş kömürü öne çıkmaktadır (EPDK, 2023).

Türkiye'nin elektrik üretiminde fosil yakıtların yüksek paya sahip olması, enerji arz güvenliği açısından önemli riskler taşımaktadır. Özellikle doğalgaz ve ithal kömür gibi dışa bağımlı kaynaklar, döviz kuru dalgalanmaları, küresel ticaret koşulları ve uluslararası enerji piyasalarındaki değişimlerden etkilenme riskini taşımaktadır. Bu durum, Türkiye'nin enerji bağımsızlığını tehlikeye atmakta ve enerji fiyatlarında dalgalanmalara yol açabilmektedir.

1.1.3. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, doğada kendiliğinden yenilenebilen, rezerv ihtiyacı bulunmayan, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen enerji türüdür. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, su (hidroelektrik), biyokütle ve jeotermal olarak sıralanıyor olsa da temelde tüm bu kaynaklar güneş enerjisi ile ilintilidir. Güneş doğrudan veya dolaylı olarak tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşma süreçlerinde etkilidir (Kannan & Vakeesan, 2016).

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların aksine sera gazı emisyonlarını minimum düzeyde tutmakta, bu sayede iklim değişikliğinin önüne geçilmesinde önemli bir alternatif olarak görülmektedir (Hu vd., 2016). Güneş enerjisi sistemleri çalışırken doğrudan karbon emisyonu üretmez, çünkü elektrik üretim sürecinde fosil yakıt yakılması gibi karbon açığa çıkaran işlemler gerçekleşmez. Bu durum güneş enerji sisteminin üretim, kurulum, işletme ve sonlandırma safhalarının tamamında geçerli değildir. Fotovoltaik (FV) panellerin üretimi göz önüne alındığında paneller saf silikonun yüksek sıcaklıklarda kristalleştirilmesiyle üretilmektedir. Kristalleşme sürecinde oldukça yüksek enerji tüketilmesi ve enerji üretiminin halihazırda fosil yakıt ağırlıklı olması nedeniyle güneş enerjisi santrallerinin az da olsa bir karbon ayak izi mevcuttur (Stylos & Koroneos, 2014).

Yenilenebilir enerji, enerji güvenliği ve bağımsızlığı açısından da önemli bir konumdadır. Enerji güvenliği; bir ülkenin talebi karşılamak için yeterli enerji sağlanmasını garanti altına almak, fiziksel ve siber saldırılara karşı korunan bir güç sistemi ve altyapısına sahip olmak anlamına gelmektedir. Kesintisiz arz, çeşitlendirme ve yerel üretim enerji güvenliğinin temel unsurlarıdır. Enerji bağımsızlığı, bir ülkenin enerji ihtiyacını büyük ölçüde yerel kaynaklardan karşılayabilme kapasitesini ifade etmektedir. Bu, ithal enerjiye olan bağımlılığın azaltılması ve yerli enerji üretiminin artırılmasını gerektirmektedir. Güneş enerjisi, çoğu ülkede erişilebilir bir kaynak olduğu için yerli enerji üretiminin artırılmasına yönelik bir araçtır (Gökgöz & Güvercin, 2018).

Tablo 3. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güçleri (IRENA, 2024)

Yıl	Dünya (KW)	Avrasya (KW)	Türkiye (KW)
2014	1.698.295	84.742	27.940
2015	1.852.496	88.542	31.516
2016	2.015.003	91.912	34.446
2017	2.185.712	96.576	38.746
2018	2.360.957	100.719	42.230
2019	2.548.686	104.278	44.389
2020	2.819.247	110.463	49.195
2021	3.083.431	115.841	53.175
2022	3.391.349	119.154	55.946
2023	3.864.522	122.145	58.462

Enerji güvenliği ve bağımsızlığı aşağıdaki maddeler açısından stratejik öneme sahiptir (Bradshaw, 2009):

- Ekonomik İstikrar
- Ulusal Güvenlik
- Jeopolitik Avantajlar

Yenilenebilir enerji maliyetlerinin giderek azalmasından ve bu enerjinin uzun vadede ekonomik avantajlarından dolayı yenilenebilir enerjiye talep giderek artmaktadır. Demirgil ve Birol (2020), 1980-2018 dönemi için Türkiye’de yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, uzun dönemde yenilenebilir enerji tüketimindeki %1’lik artışın ekonomik büyümeyi %0,91 oranında artırdığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca kullandıkları Toda-Yamamoto nedensellik testi ile yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyümeyi tek yönlü etkilediğini göstermişlerdir. Bu çalışma, Türkiye’de yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki olumlu etkisini ortaya koyarak, yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasının uzun vadede ekonomik büyümeyi destekleyici bir faktör olduğunu göstermektedir.

Toplum sağlığı, enerji üretiminde kullanılan yöntemlerin çevresel etkileriyle doğrudan ilişkilidir. Fosil yakıtların yanması sırasında ortaya çıkan karbon dioksit (CO₂), kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde gibi kirleticiler, hava kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır (Jeffrey vd., 2021). Bu durum solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler problemler ve diğer sağlık sorunlarına yol açarak toplum sağlığını olumsuz etkilemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasıyla, fosil yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin önlenmesi de ayrıca mümkündür. Bu nedenle yenilenebilir enerji, sadece çevresel değil, aynı zamanda toplumsal bir gereklilik olarak görülmektedir (Jaiswal vd., 2022).

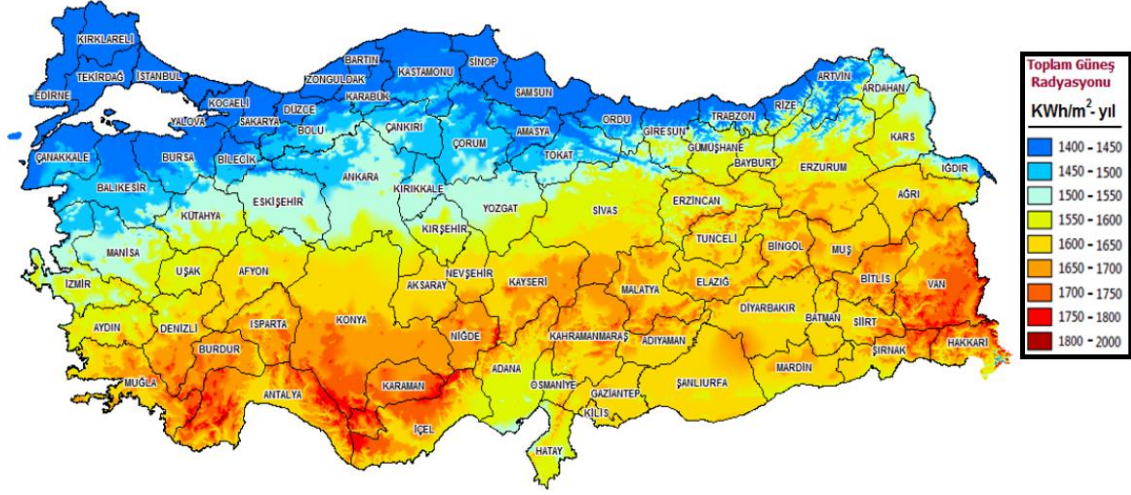
Tablo 3, 2014-2023 yılları arasında Dünya, Avrasya ve Türkiye'deki toplam yenilenebilir enerji kapasitesini göstermektedir. Bu değerler, küresel ve bölgesel olarak yenilenebilir enerji kapasitesinin düzenli bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kapasitesine ilişkin veriler, elektrik üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santrallerin ve diğer tesislerin maksimum net üretim kapasitesini temsil etmektedir (IRENA, 2024).

1.1.4. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

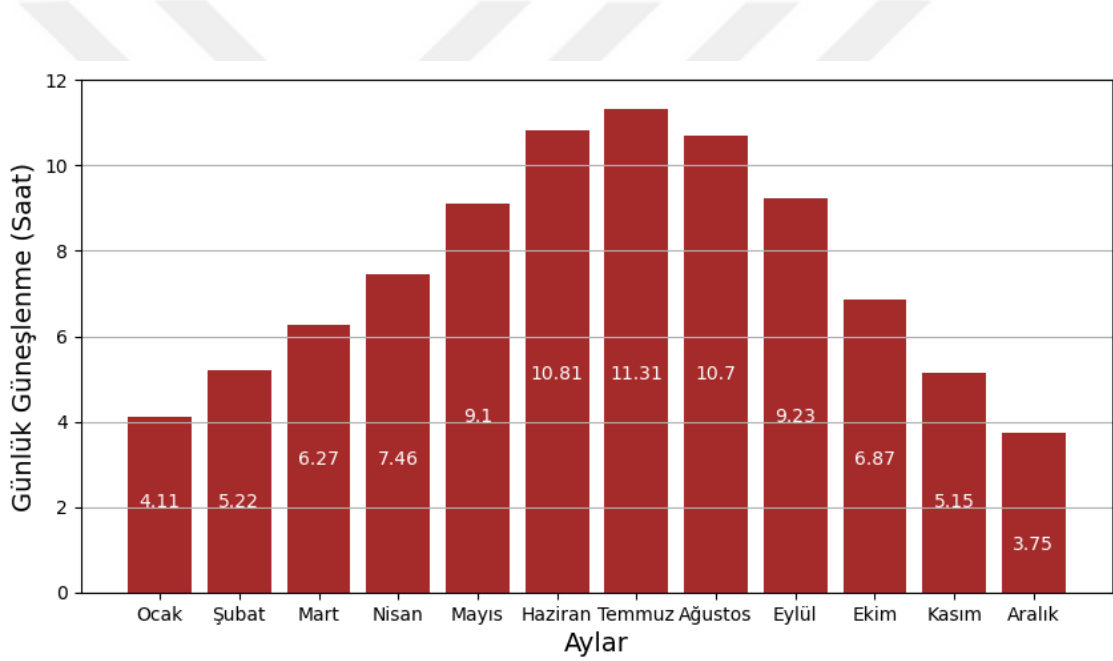
Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle güneş enerjisi potansiyeli açısından oldukça avantajlı bir ülkedir. Yıllık güneşlenme süresi, radyasyon miktarı ve bölgesel dağılım özellikleri, Türkiye'yi güneş enerjisi yatırımları için cazip bir pazar haline getirmektedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının paylaştığı Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre Türkiye'nin yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2741 saat/yıl (günlük 7,5 saat) olarak, ortalama yıllık toplam ışıınım değeri ise 1527 kWh/m² olarak hesaplanmıştır (URL-2, 2024). Bu değer, Avrupa ülkeleriyle karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Örneğin, Almanya'da yıllık toplam güneşlenme süresi 1600 saat (günlük ortalama 4,4 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 950-1200 kWh/m² arasında (günlük ortalama 3 kWh/m²) olmaktadır. Erkoç'un (2019) Almanya ve Türkiye'nin güneş enerji santrallerinin verimlerini incelediği çalışmasına göre Almanya güçlü ekonomisi ve izlediği doğru enerji politikasıyla güneş enerjisinden faydalanmak konusunda Türkiye'den daha etkin bir enerji üretimine sahiptir. Bu da doğru enerji politikaları ile güneş enerjisinden elde edilebilecek faydanın artırılabilceğini göstermektedir.

GEPA'da yer alan genel potansiyel görünümü Şekil 3'teki gibidir. Türkiye'nin coğrafi yapısı ve iklim özelliklerine göre güneş radyasyonu bölgeler arasında farklılık göstermektedir. Güneş enerjisi potansiyeli, Türkiye'nin tüm bölgelerine yayılsa da özellikle Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu bölgeleri yüksek radyasyon değerlerine sahiptir.

Şekil 4'te Türkiye 'de aylara göre ortalama gün içi güneşlenme süreleri verilmiştir. Ocak ayında ortalama 4,11 saat, aralık ayında ise 3,75 saat ile kış ayları güneşlenme sürelerinin en düşük olduğu dönemdir. Yaz ayları ise en yüksek güneşlenme sürelerinin gözlemlendiği dönemdir. Temmuz ayında ortalama 11,31 saat ile zirveye ulaşmaktadır.

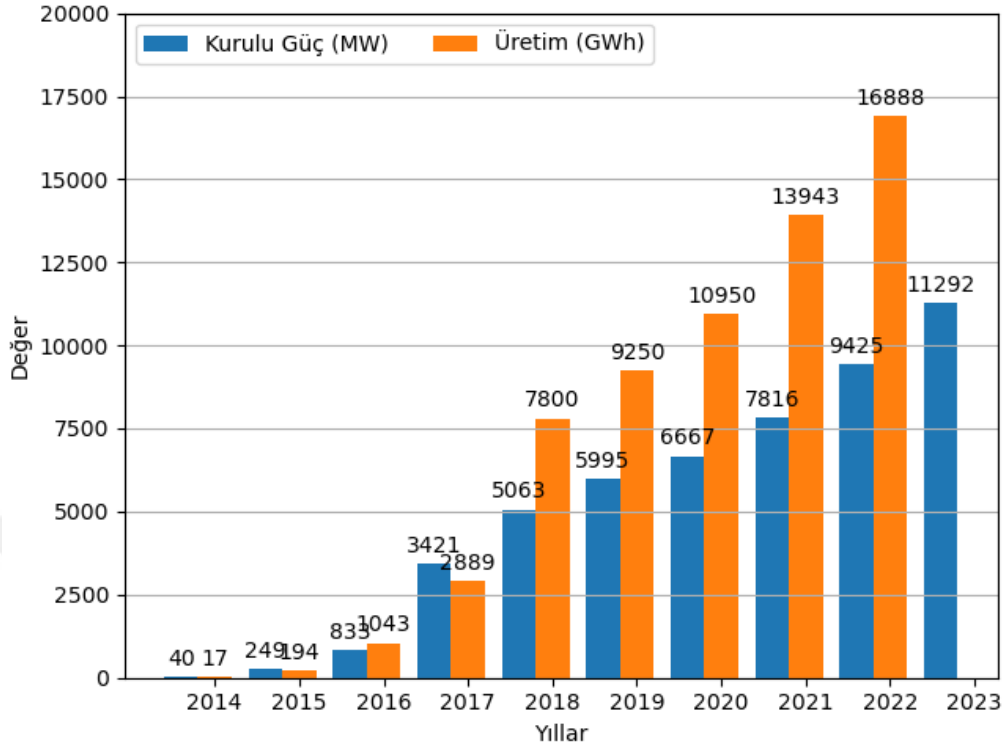


Şekil 3. Türkiye güneş radyasyonu haritası



Şekil 4. Türkiye'nin aylık güneşlenme süreleri (URL-2, 2024)

Şekil 5, Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücünün ve üretim miktarının 2020-2023 yılları arasında nasıl değiştiğini göstermektedir (IRENA, 2024). Verilere göre, Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücü ve üretimi yıllar içinde düzenli bir artış göstermiştir. Kurulu güç 2020 yılında 6,67 GW seviyesindeyken, güneş enerjisinden elde edilen toplam üretim yaklaşık 10,95 TWh civarındadır. 2021 yılında hem kurulu güç hem de üretim belirgin bir şekilde artmıştır. Üretim 13,95 TWh'ye ulaşmış, kurulu güç ise 7,82 GW olarak kaydedilmiştir. 2022 yılında en büyük sıçrama görülmüştür. Kurulu güç 9,43 GW'a ulaşmış ve üretim 16,89 TWh seviyesini görmüştür. 2023 yılı itibariyle Türkiye kurulu gücü 11,29



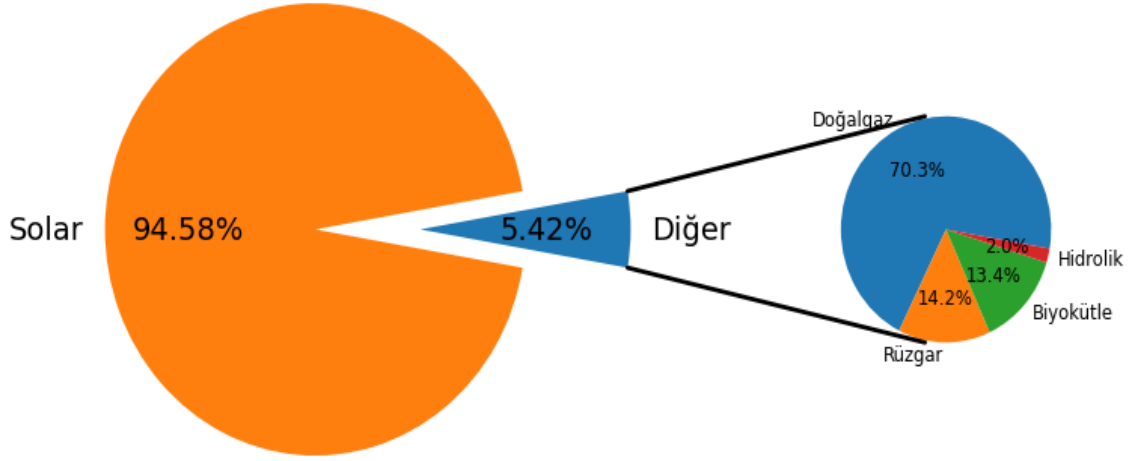
Şekil 5. GES kurulu güç ve üretiminin yıllara göre değişimi (IRENA, 2024)

GW'a ulaşmıştır. Bu, güneş enerjisinin Türkiye'nin enerji üretiminde giderek daha önemli bir pay aldığını göstermektedir.

1.1.5. Türkiye'de Enerji Üretiminde Lisanssız Tesisler

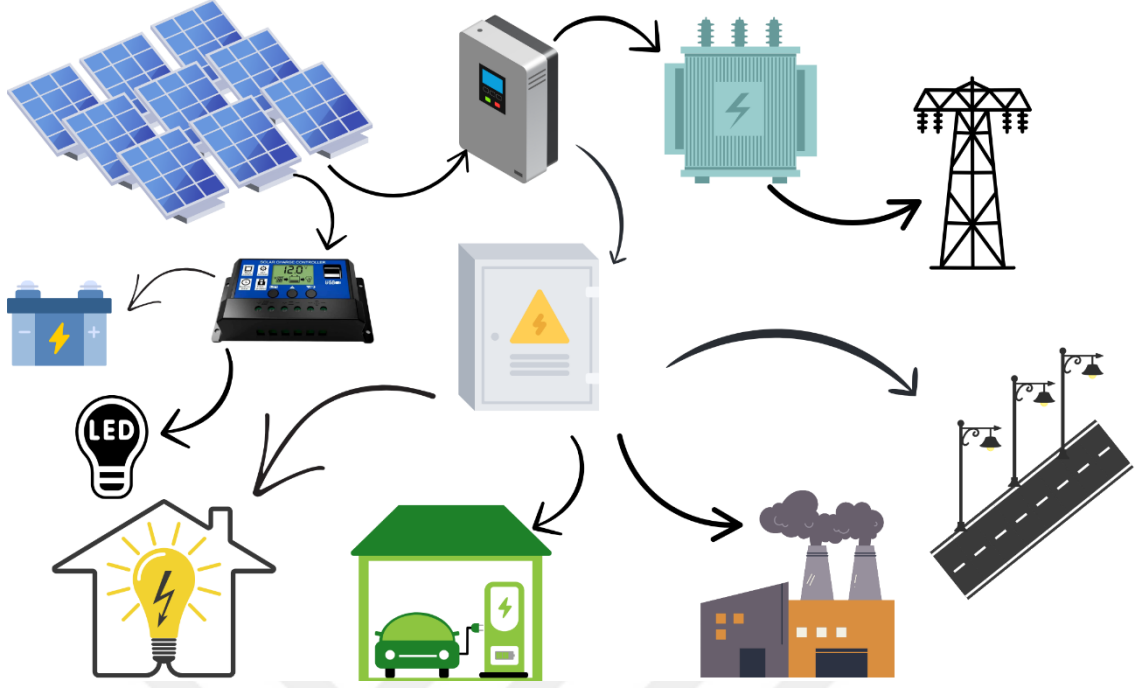
6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun 14'üncü maddesinin birinci fıkrası, belirli şartları sağlayan üretim tesislerini lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaf tutmaktadır (Resmi Gazete, 2013). Bu kapsamda, söz konusu tesislerde gerçekleştirilen üretim, "lisanssız üretim" olarak adlandırılmaktadır. Kanun, bu üretim tesislerini aşağıdaki şekilde sınıflandırmıştır:

1. İmdat grupları ve bağımsız üretim tesisleri: İletim veya dağıtım sistemiyle bağlantı kurmayan ve sadece imdat grupları olarak hizmet veren üretim tesisleri.
2. 1 MW'a kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri: Kurulu gücü azami bir megavat olan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanan üretim tesisleri.



Şekil 6. Lisanssız kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı (EPİAŞ, 2024)

3. Belediye katı atık tesisleri ve arıtma tesisi çamuru kullanan tesisler: Belediyelerin katı atık bertarafı veya arıtma çamuru kullanımı için kurdukları elektrik üretim tesisleri.
4. Mikrokojenerasyon ve verimli kojenerasyon tesisleri: Mikrokojenerasyon tesisleri ile Bakanlıkça belirlenen verimlilik değerini sağlayan kojenerasyon tesislerinden Kurulca onaylanmış olanlar.
5. Tüketimi ve üretimi aynı ölçüm noktasında olan yenilenebilir tesisler: Ürettiği enerjiyi dağıtım veya iletim sistemine vermeksizin tüketen ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı tesisler.
6. Elektrik depolama ve talep tarafı katılımı: Bakanlık görüşü alınarak Kurulca belirlenen limitler çerçevesinde elektrik depolama ve talep tarafı katılımına yönelik faaliyetler.
7. Tarımsal sulama için yenilenebilir enerji tesisleri: Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü veya sulama birlikleri tarafından kurulan, tarımsal sulama amaçlı tesislerin enerji ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik yenilenebilir enerji tesisleri.
8. Sanayi, belediye ve tarımsal sulama tesisleri için yenilenebilir enerji tesisleri: Belediyeler, bağlı kuruluşları, sanayi tesisleri ve tarımsal sulama tesislerinin, bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücünün iki katına kadar olan kurulumları. Diğer kişiler için bu sınır, sözleşme gücü ile sınırlıdır.
9. Sulama birliklerinin işlettiği taşınmazlardaki yenilenebilir enerji tesisleri: Sulama birliklerinin, DSİ'nin uygun görüşü doğrultusunda kendi sorumluluk alanlarında veya DSİ'ye ait taşınmazlarda kurduğu ve bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücü ile sınırlı yenilenebilir enerji tesisleri.



Şekil 7. Fotovoltaik sistem bileşenleri ve enerji akışı

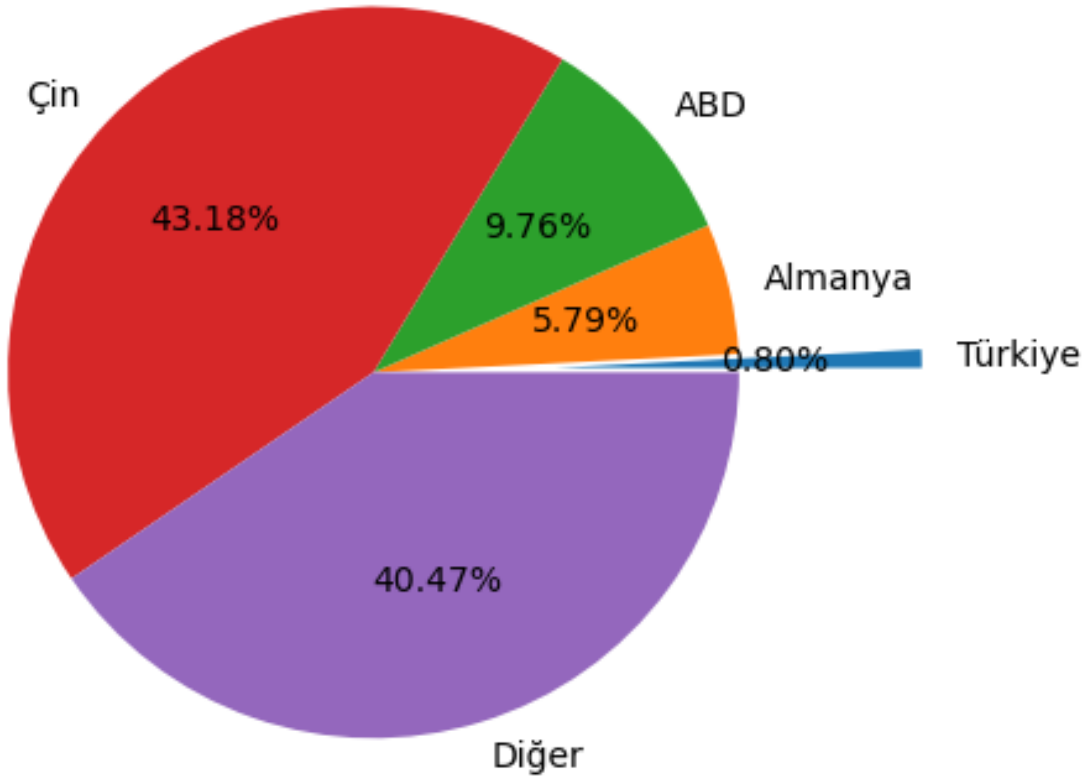
Bu düzenlemeler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji arz güvenliğinin artırılması amacıyla esnek ve teşvik edici bir çerçeve sunmaktadır.

Lisanssız üretim santrallerinin kaynaklara göre dağılımı, Şekil 6'da gösterilmektedir (EPİAŞ, 2024). Bu dağılım, Türkiye'deki lisanssız enerji üretim tesislerinin hangi enerji kaynaklarından faydalandığını ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş, rüzgar ve biyokütle gibi alanlarda lisanssız üretimin artan bir şekilde tercih edilmesi, sürdürülebilir enerji üretiminin yaygınlaştırılmasına katkı sağlamaktadır.

1.2. Güneş Enerjisi Santrallerine Genel Bakış

Güneş enerji santralleri (GES), güneşten gelen ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Küçük ölçekli bireysel sistemlerden, büyük ölçekli ticari projelere kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kullanım amacına göre çeşitlilik gösteren elemanları olan FV sistemlerin temel elemanları Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 8'de Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı verilerine dayanarak 2023 yılına ait ülkeler bazında fotovoltaik güneş enerji santrali kurulu kapasiteleri sunulmuştur (IRENA, 2024). Dünya genelindeki toplam kapasiteyi ve Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Türkiye ve Almanya gibi ülkelerin bu kapasite içerisindeki payını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

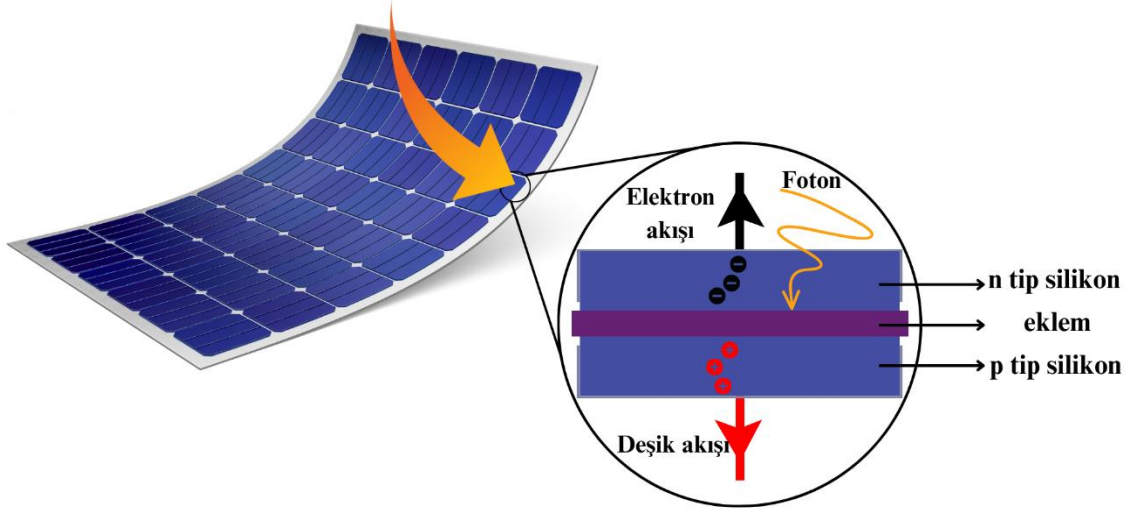


Şekil 8. Fotovoltaik GES kapasiteleri (IRENA, 2024)

Dünyada toplam FV GES kapasitesi 1,41 TW olarak verilmiştir. Bu, tüm ülkelerin güneş enerjisine olan katkısının toplamını temsil etmektedir. Çin'in FV GES kapasitesi, 609 GW ile toplamda %43'lük dilimdedir ve grafik üzerinde en büyük paya sahiptir. Bu, Çin'in güneş enerjisi sektöründeki liderliğini açıkça ortaya koymaktadır. ABD, 137 GW kapasiteyle %9,7'lik paya sahiptir ve ikinci sırada yer almaktadır. Almanya, 81 GW kapasite ile Avrupa'nın FV GES alanındaki lider ülkelerinden biridir ve %5,8'lik dilimdedir. Türkiye ise 11 GW kapasiteye sahiptir. %0,8'lik dilimle Türkiye, toplam kapasite içinde küçük bir paya sahip olmasına rağmen, son yıllarda güneş enerjisi yatırımlarını artırarak bu alandaki büyümesini sürdürmektedir.

1.2.1. Fotovoltaik Panel

Fotovoltaik panellerin işleyişi, temel olarak yarı iletken malzemelerin fotonları doğru akım (DC) elektrik enerjisine dönüştürmesiyle gerçekleşmektedir. Güneşten gelen fotonlar, panel yüzeyindeki yarı iletken malzemeye çarpar. Bu çarpma sonucunda, hücrelerdeki elektronlar uyarılarak yörüngelerinden ayrılır ve bir hareketlilik kazanır. Elektronların



Şekil 9. Güneş pilinin çalışma prensibi

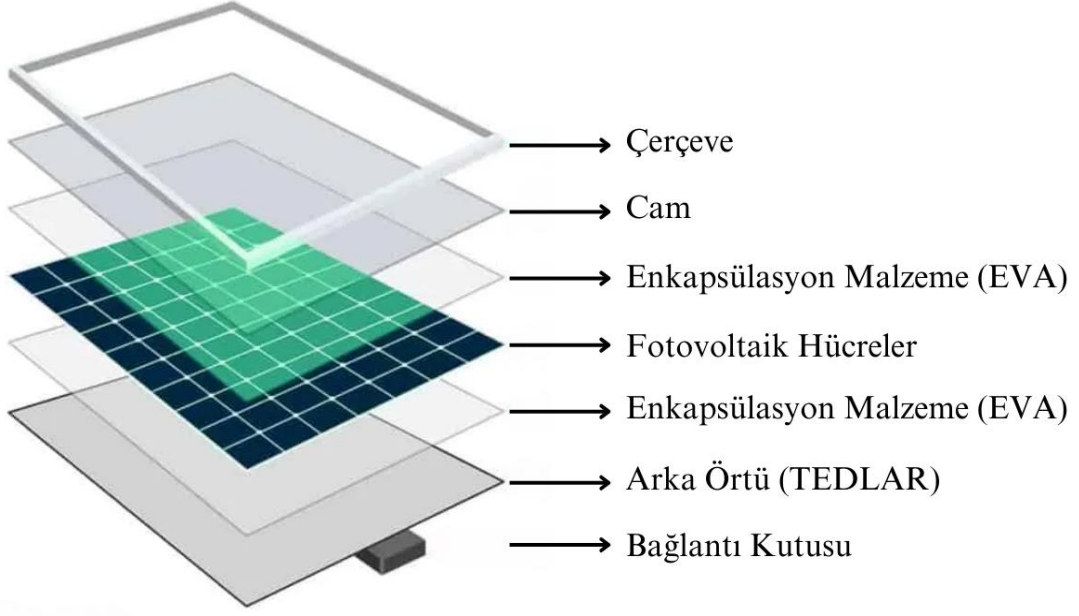
hareketi, hücrede DC akım oluşturur. Üretilen DC akım, eviriciler aracılığıyla alternatif akıma (AC) dönüştürülerek kullanılabilir hale getirilir.

Şekil 9’da güneş pilinin çalışma prensibi verilmiştir. Güneş pilleri, "PN eklemi" adı verilen iki farklı yarı iletken tabakadan oluşmaktadır. P-tipi yarı iletken, elektron eksikliği (pozitif yük) ile karakterize edilirken, N-tipi yarı iletken ise serbest elektronlar (negatif yük) içermektedir.

Bir yarı iletkenin valans bandında bir elektron eksik olduğunda, bu eksik elektron "deşik" olarak adlandırılmaktadır. Elektronlar negatif yük taşıyıcılarıdır ve bu eksiklik pozitif bir yük gibi davranmaktadır. PN bağlantısı, elektriksel alan oluşturarak, serbest elektronların doğru yönde hareket etmesini sağlamaktadır. Fotonların taşıdığı enerji, yarı iletken malzemenin bant aralığını aştığında, elektronlar serbest hale gelmektedir. Elektrik alanı, bu serbest elektronların belirli bir yöne hareket etmesini sağlamak ve bir elektrik devresinde akım oluşturmaktadır (Abou Jieb & Hossain, 2022).

Fotovoltaik hücrelerin bireysel olarak ürettiği elektriksel güç düşük seviyededir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilirken, bu yapıya da ‘fotovoltaik modül’ adı verilmektedir. Modül içindeki hücreler voltajı artırmak için genellikle seri bağlanmaktadır. Tipik bir modül, seri bağlanmış 60 adet hücreden oluşmaktadır.

Panellerin fotovoltaik hücrelerini dış etkenlerden korumak için enkapsülasyon malzemeleri kullanılmaktadır. Arka tabakalar, güneş panellerinin dış katmanıdır ve iç devrelerin dış ortamla elektriksel izolasyonunu sağlamaktadır. Bu sayede, güneş panellerinin



Şekil 10. Panel katmanları

ömrü boyunca dayanıklılığının yüksek ve güvenlik riskinin ise düşük olması sağlanmaktadır. Bu katmanlar Şekil 10’da açıkça gösterilmektedir.

Fotovoltaik sistemlerde bir panelin ürettiği gerilim genellikle yaklaşık 228 ila 466 volt arasında değişmektedir. Ancak bu değerlerin güç seviyeleri, ticari veya endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan enerji talebini karşılamak için yetersizdir. Bu nedenle, fotovoltaik hücreler, daha yüksek güç değerleri elde etmek amacıyla seri ve paralel bağlantılarla organize edilmektedir. Seri bağlantı eviricilerin giriş geriliminin sağlanması gibi yüksek gerilim gerektiren uygulamalar için kullanılmaktadır. Paralel bağlantılar ise enerji depolama cihazlarının şarj edilmesi gibi yüksek akım gerektiren sistemler için tercih edilmektedir. Şekil 11’de FV panellerin enerji çıkışını artırmak amacıyla kullanılan seri ve paralel bağlantı düzenekleri açıkça gösterilmektedir.

Farklı güç değerlerine sahip fotovoltaik panellerin bir arada kullanılması, sistemin genel performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Seri bağlantılarda, sistemin çıkış akımı, en düşük akım değerine sahip panelin akım seviyesi ile sınırlanmaktadır. Benzer şekilde, paralel bağlantılarda, sistemin çıkış gerilimi, en düşük gerilim değerine sahip panelin gerilim değeri ile belirlenmektedir. Bu durum, sistemin potansiyel kapasitesinin tam olarak kullanılamamasına yol açarak verimliliğin düşmesine neden olmaktadır. Buna ek olarak, bir dizi içinde bulunan panellerden herhangi birinin üzerine gölge düşmesi, bu panelin enerji üretim kapasitesini sınırlamakta, dolayısıyla tüm serinin performansını

olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum, özellikle çatı uygulamaları için büyük önem taşımaktadır. Çatıdaki baca, havalandırma çıkışları veya diğer fiziksel engellerin yarattığı gölge, sistem verimliliğinde ciddi kayıplara neden olabilmektedir. Bu bağlamda, güneş enerjisi sistemlerinin tasarım aşamasında, farklı güçteki panellerin bir arada kullanımından kaçınılması ve gölge etkisinin minimuma indirilebilmesi için uygun yerleşim düzeninin oluşturulması gerekmektedir (Fouad vd., 2017).

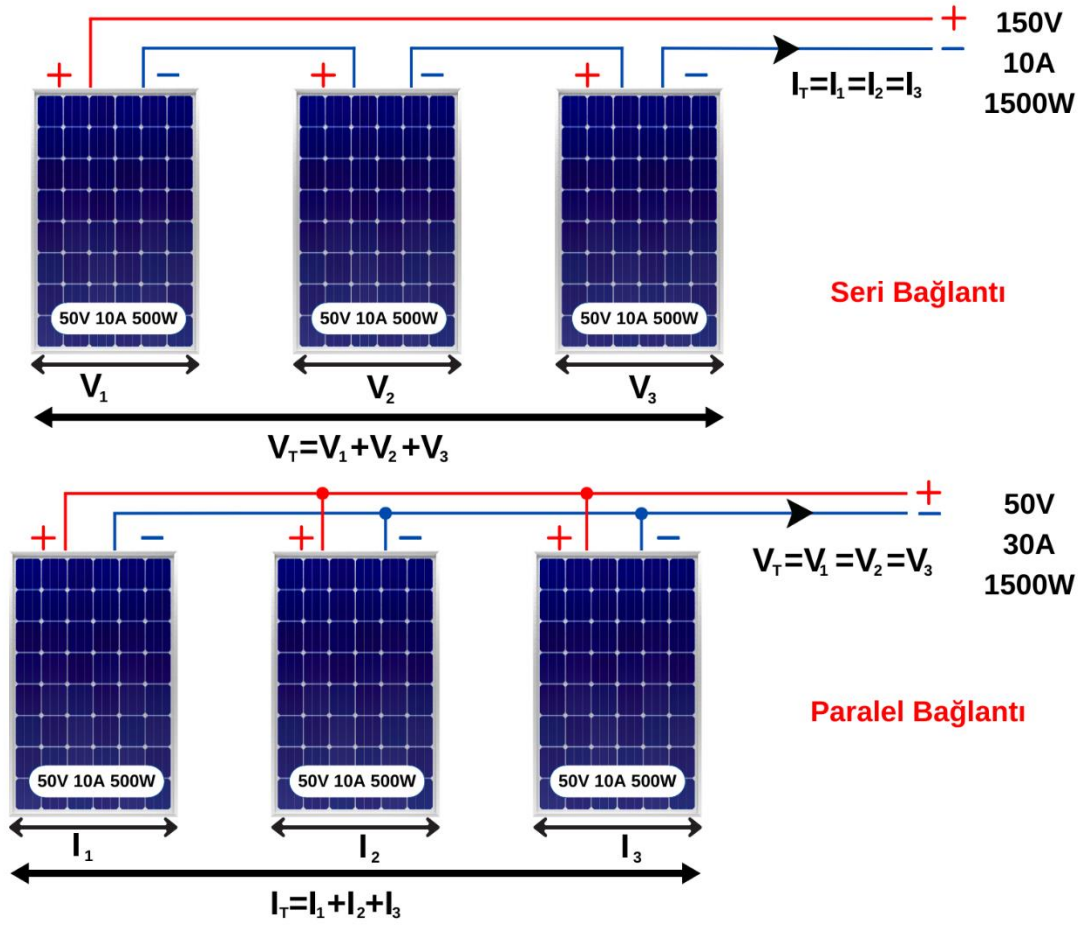
Bugün piyasada bulunan dört temel güneş paneli türü, enerji üretim kapasitesi, verimlilik, maliyet ve uygulama alanları açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Bunlar; Monokristal, Polikristal, Monokristal PERC, ince film panellerdir. Monokristal güneş panelleri, tek bir silikon kristalinden üretilmektedir. Polikristal paneller ise birden fazla silikon kristalinin eritilip bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. PERC paneller monokristal panellerin gelişmiş bir versiyonu iken hücrelerin arka yüzeyine eklenen pasivasyon katmanı sayesinde ışık soğurması ve elektrik üretim verimliliğini artırmasıyla bilinir. Son olarak, ince film paneller, silikon dışında farklı malzemelerden üretilmektedir (Gerbinet vd., 2014).

1.2.2. Evirici

Eviriciler, güneş panelleri tarafından üretilen doğru akımı şebekede veya elektrikli cihazlarda kullanılabilecek alternatif akıma dönüştüren elektronik cihazlardır. Şebeke bağlantılı sistemlerde evirici, üretilen elektriğin şebekeyle senkronize olmasını sağlayarak elektrik şebekesinin stabilitesinin ve güvenilirliğinin korunmasına yardımcı olmaktadır. Çeşitli türde eviriciler mevcuttur. Bunların başında, on-grid eviriciler, off-grid eviriciler, hibrit eviriciler, merkezi eviriciler ve mikro-eviriciler gelmektedir (Kolantla vd., 2020).

On-grid evirici, Şebeke elektriğine doğrudan bağlanabilen evirici çeşididir. Hem şebeke hem GES elektriğinden aynı anda faydalanma imkanı sunmaktadır. On-grid eviriciler, tamamen şebeke bağlantısına bağımlıdır. Şebekede elektrik kesintisi olması durumunda, güneş enerjisi sistemi enerji üretse bile inverterin güvenlik protokolleri gereği enerji şebekeye aktarılamamakta ve sistem devre dışı kalmaktadır. Tek fazlı ve üç fazlı çeşitleri mevcuttur.

Off-grid eviriciler, güneş enerjisi sistemlerinde, şebeke bağlantısının olmadığı ya da sistemin tamamen bağımsız çalışmasının istendiği durumlarda kullanılan cihazlardır. Bu eviriciler, genellikle kırsal bölgelerde, enerji altyapısının yetersiz olduğu alanlarda veya kullanıcıların enerji bağımsızlığı tercih ettiği projelerde tercih edilmektedir. Enerji depolama



Şekil 11. FV panellerin elektriksel bağlantı şekilleri

sistemleri ile bütünleşmiş olarak çalışmaktadırlar. Güneş enerjisi üretiminin fazla olduğu durumlarda enerjiyi bataryalarda depolarken, üretimin yetersiz olduğu durumlarda ise bataryada bulunan enerji ile sistemi beslemektedirler.

Hibrit eviriciler, hem on-grid hem de off-grid sistem özelliklerini bir arada sunan çok işlevli enerji dönüştürücülerdir. Enerji depolama sistemleri ile bütünleşmiş olarak çalışarak hem şebekeye enerji aktarımı hem de enerji depolama işlemlerini yönetebilmektedirler.

Merkezi eviriciler, yüksek kapasiteli dizi evirici türleridir. Kullanıldıkları sistemlerde tüm panel dizilerinin enerjisi tek bir eviricide toplanarak işlenmektedir. Yüksek güç kapasiteleri sayesinde büyük çaplı santrallerde kullanım alanı bulmaktadırlar.

Mikro-eviriciler, tek bir güneş panelinin bağlandığı evirici çeşididir. Küçük çaplı santrallerde kullanılmaktadırlar.

1.2.3. Bağlantı Ekipmanları

Güneş enerji santrallerinin temel bileşenleri arasında bağlantı ekipmanları ve kablolar da bulunmaktadır. GES için özel olarak tasarlanmış bu kablolar çift izolasyona sahip olduklarından ısıya ve soğuğa dayanıklıdır. Doğrudan dış ortamlarda kullanıldıklarından UV ışınlarına ve darbelere karşı korumalı olmak zorunda kalan solar kabloların üretiminde, genellikle bakır veya alüminyum tercih edilmektedir. Güneş panellerinden eviriciye doğru akımı taşımak için tasarlanmıştır. Tavsiye edilen ömrü yirmi beş yıl olan solar kablolar birbirine konnektörler aracılığı ile bağlanmaktadır. Bu bağlantı su geçirmezlik, güvenlik ve dayanıklılık açısından önemlidir. Solar konnektörlerin doğru kullanılması ile bağlantı noktalarında korozyon ve buna bağlı olarak geçiş dirençlerinin ortaya çıkması ile kayıpların artması önlenmektedir.

1.2.4. Sayaç

Eviriciden sonra üretilen enerji GES panosuna aktarılmaktadır. Bu panoda bulunan tek yönlü sayaç santralde üretilen elektrik enerjisini ölçmek için kullanılmaktadır. Bunun yanında, şebeke panosunda şebekeden çekilen ve şebekeye verilen enerji ölçümü yapılabilmesi için çift yönlü sayaç kullanılmaktadır. Çift yönlü sayaçların uzaktan izlenebilmesi için otomatik sayaç okuma sistemi (OSOS) uyumlu olması tercih edilmektedir.

1.2.5. Taşıyıcı Sistem

Taşıyıcı sistemler; panellerin güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde yerleştirilmesi için kullanılan yapısal sistemlerdir. Bu sistemler çevresel koşullara dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Taşıyıcı sistemler, santrallerin kurulum maliyetlerinde önemli bir kalemdir ve projenin türüne, yerel coğrafyaya göre değişmektedir. Çatı uygulamalarında çatı tipine göre taşıyıcı sistem özellikleri değişir. Ayarlanabilir ve sabit sistem gereksinimi ve maliyetleri de birbirinden farklıdır. Taşıyıcı sistem tasarımında rüzgâr ve kar yükü gibi çevresel faktörlerin etkisi göz önünde bulundurularak statik hesaplamalar yapılmakta ve tasarım bu hesaplamalara göre yapılmaktadır.

1.2.6. Diğer Ekipmanlar

Fotovoltaik güneş santralleri tüketicinin ihtiyaçlarına göre çeşitli ek ekipmanlara sahip olabilmektedir. Örneğin, akü şarj regülatörü, panellerden elde edilen elektriğin akülere güvenli ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Bu cihaz, şarj işlemi sırasında akünün aşırı şarj olmasını veya tamamen deşarj edilmesini önlemekte, böylece akü ömrünü uzatmakta ve sistem verimliliğini artırmaktadır.

Akümülatör, güneş olmadığı zamanlarda enerji kullanımı için elektrik enerjisini depolamak amacıyla bu sistemlerde kullanılmaktadır. Akü seçimleri güneşin olmadığı zaman dilimi dikkate alınarak gerekli olan enerji ihtiyacına göre yapılmaktadır. Akümülatör genellikle off-grid sistemlerde kullanılmaktadır.

Sigortalar sistem güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Güneş paneli ve akü bağlantılarında DC sigortalar kullanılmakta ve olası arıza durumlarında enerjiyi kesmektedir.

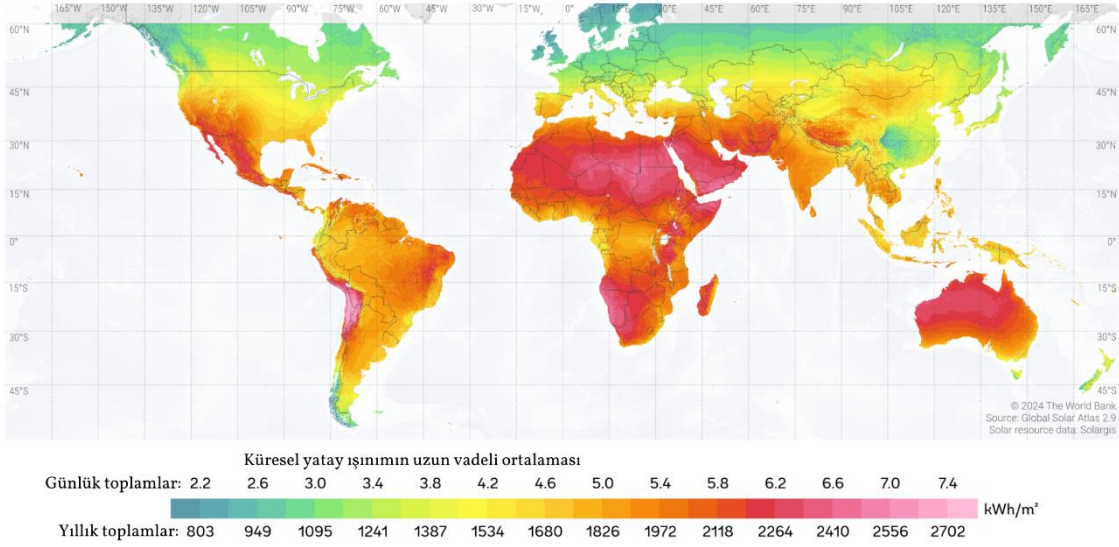
1.3. Güneş Enerjisi Santrallerinin Modellenmesi

FV panellerin enerji üretimi, çevresel koşullara, panel özelliklerine ve sistem tasarımına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. FV panellerin performansını tahmin etmek ve enerji üretim potansiyelini analiz etmek, matematiksel modellerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu modeller, genellikle, güneş ışıınımı, panel tipi, panel eğim ve yönü, sıcaklık, rüzgâr hızı ve sistem kayıpları gibi faktörleri dikkate alarak enerji üretim tahminlerinde kullanılmaktadır.

1.3.1. Güneş Enerjisinin Temel Özellikleri

Güneş enerjisi, kurulum ve kullanım kolaylığının yanı sıra işletme safhasında çevre kirliliğine yol açmaması ve zararlı atık üretmemesi gibi özellikleriyle öne çıkan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşten yayılan enerjinin yalnızca küçük bir kısmı Dünya'ya ulaşmaktadır. Atmosferin dış yüzeyine ulaşan güneş ışını, metrekaresine başına yaklaşık 1367 W olarak ölçülmüştür ve bu değer güneş sabiti olarak adlandırılmaktadır (Johnson, 1954). Ancak atmosferin gelen ışınların bir kısmını soğurması nedeniyle bu enerjinin tamamı yeryüzüne ulaşamamaktadır. Yeryüzüne ulaşan enerji miktarı ayrıca

GÜNEŞ KAYNAĞI HARİTASI
KÜRESEL YATAY IŞINIM

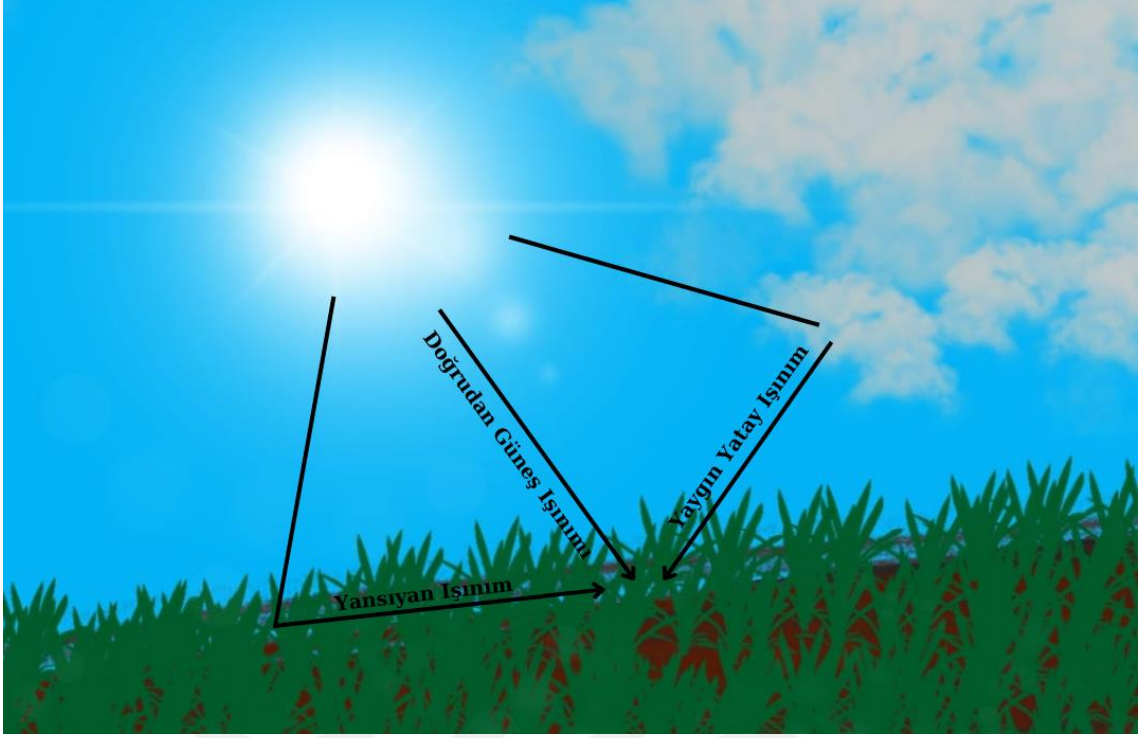


Şekil 12. Küresel yatay ışıının dünya haritası (Şuri vd., 2011)

atmosfer koşullarına, coğrafi konuma ve güneşlenme süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Güneş enerji sistemleri için önemli bir ölçüt olan küresel yatay ışıının (KYI), yatay bir yüzeye düşen toplam güneş ışıınınını ifade etmektedir. Şekil 12’de dünya KYI haritası verilmiştir (Şuri vd., 2011). Haritadan elde edilen veriler hem yerel hem de küresel ölçekte sürdürülebilir enerji üretimi hedeflerine ulaşmak için büyük önem taşımaktadır. Kuzey ve güney yarımkürede $20^{\circ} - 40^{\circ}$ enlemleri arası güneş kuşağı olarak adlandırılmaktadır ve dünya üzerinde en çok güneş ışıınınını bu bölgeler almaktadır.

Küresel yatay ışıınının üç bileşeni vardır. Doğrudan güneş ışıınını (DGI), güneş ışıınının atmosferden geçtikten sonra herhangi bir sapma olmadan yatay bir yüzeye dik olarak ulaşan kısmıdır. Açık ve bulutsuz günlerde daha yoğundur. Yaygın yatay ışıının (YYI), atmosferdeki moleküller, aerosoller ve bulutlar tarafından saçılan güneş ışıınınıdır. Bu ışıının, doğrudan güneşten değil, her yönden yatay yüzeye ulaşmaktadır. Yansıyan ışıının (YI), yeryüzü veya çevredeki yüzeylerden yansıyarak yatay yüzeye ulaşan ışıının miktarıdır. Küresel yatay ışıının hesaplamalarında genellikle bu bileşen ihmal edilmektedir. Şekil 13’te küresel yatay ışıının bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 13. Küresel yatay ışınlm bileşenleri

1.3.2. Standart Test Koşullarında FV Panellerin Enerji Üretimi

Standart test koşullarında (STK), FV panellerin enerji üretimi, gelen güneş ışınlmı ve panelin nominal kapasitesine bağlıdır. Bu koşullarda güneş ışınlmı, panel tipi, panel eğim ve yönü, sıcaklık, rüzgâr hızı ve sistem kayıpları gibi faktörler dikkate alınmaksızın panellerin maksimum performans gösterdiği varsayılmaktadır. Bu koşullar altında, rüzgârsız bir ortamda, 25 °C sıcaklıkta ve güneşe tam doğrultulmuş bir FV panelin 1000 W/m² güneş ışınlmında enerji üretimi yaptığı kabul edilmektedir. STK'de bir saatlik enerji üretimi Denklem 1 ile verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$P_{panel,t} = \left(\frac{G_{panel,t}}{G_{ref}} \right) \times P_{tepe} \quad (1)$$

Burada; $P_{panel,t}$, panelin saatlik enerji üretimini; $G_{panel,t}$, panel yüzeyine düşen saatlik güneş ışınlmını; P_{tepe} , panelin nominal çıkış gücünü ve G_{ref} ise saatlik referans güneş ışınlmını temsil etmektedir. Bu formül, panel üzerine düşen ışınlmın birim alandaki gücünü

temel almakta ve panelin nominal kapasitesini enerji üretimi ile ilişkilendirmektedir. Bu formül ve koşullar, panellerin ideal performansını değerlendirmek için temel referans olarak görülmektedir. Ancak gerçek dünya simülasyonlarında enerji üretiminin güneş ışınımı, panel tipi, panel eğim ve yönü, sıcaklık, rüzgâr hızı ve sistem kayıpları gibi faktörlerden etkileniyor olması, bu formülü yetersiz kılmaktadır. Bu nedenle, bu faktörlerin ayrıca göz önünde bulundurulması, gerçeğe yakın bir tahmin elde edilmesi için gereklidir.

1.3.3. Panel Eğim ve Yönünün Enerji Üretimine Etkisi

FV panellerin enerji üretim performansı, panel yüzeyinin eğimi ve yönü ile doğrudan ilişkilidir. Panel yüzeyi, güneş ışınlarını maksimum düzeyde absorbe edebilecek bir açıyla yerleştirilmelidir. Bu açılar, panel yüzeyine düşen saatlik güneş ışınımını ($G_{panel,t}$) önemli ölçüde etkilemektedir. Panel yüzeyine düşen saatlik güneş ışınımı Denklem 2 ile verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$G_{panel,t} = G_{DGI,t} \cos(\theta) + G_{YYI,t} + G_{YI,t} \quad (2)$$

Burada; $G_{panel,t}$, panel yüzeyine düşen saatlik güneş ışınımını; $G_{DGI,t}$, doğrudan güneş ışınımını; $\cos(\theta)$, panel yüzeyinin güneş ışınlarına göre eğim ve yönünü ifade eden çarpanı; $G_{YYI,t}$, yaygın yatay ışınımı; $G_{YI,t}$ ise zeminden yansıyan ışınımı ifade etmektedir. Panel yüzeyine gelen ışınımın eğim ve yön açısına bağlı bileşeni $\cos(\theta)$, Denklem 3 ile verilen formülle ifade edilmektedir.

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \cos(\alpha - \gamma) \quad (3)$$

Burada; δ , saatlik güneş deklinasyon açısını; φ , coğrafi enlemi; β , panelin eğim açısını; α , güneşin azimut açısını; γ ise panelin azimut açısını temsil etmektedir.

Bu formüller, panel eğim ve yön açısının, panel yüzeyine gelen ışınımı nasıl etkilediğini matematiksel olarak ifade etmektedir. Eğimin ve yönün yanlış ayarlanması durumunda, ışınımın bir kısmı panel yüzeyine ulaşamamakta ve enerji üretiminde ciddi kayıplara neden olmaktadır.

1.3.4. Panel Sıcaklığının Enerji Üretimine Etkisi

Sıcaklık, FV panellerin enerji üretiminde önemli bir etkidir. Panel yüzeyi sıcaklığı arttıkça, yarı iletken malzemenin iç direnç özellikleri değişmekte ve bunun sonucunda panel verimliliği azalmaktadır. Özellikle yaz aylarında veya yoğun güneş ışığı altında, aşırı sıcaklıklar panel performansında kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenle, gerçek enerji üretim değerlerini daha doğru bir şekilde tahmin etmek için panel sıcaklığının üretime olan etkisi dikkate alınmalı ve matematiksel olarak modellenmelidir (Huld & Gracia Amillo, 2015).

FV panellerinin sıcaklığı güneş ışıınımına, ortam sıcaklığına ve ortamdaki rüzgârın hızına bağlıdır. Ortam sıcaklığı panelin sıcaklığının belirlenmesinde en önemli değişken olarak kabul edilirken; güneş ışıınımı panelin ısınmasına, rüzgâr ise soğumasına neden olmaktadır ve bu etkilerin modele dahil edilmesi tahminlerin doğruluğunu artırmaktadır. Panel sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan model Denklem 4 ile verilmiştir.

$$T_{panel,t} = T_{ortam,t} + \frac{G_{panel,t}}{U_0 + U_1 W_{panel,t}} \quad (4)$$

Bu denklemde; $T_{panel,t}$, panel sıcaklığını; $T_{ortam,t}$, ortam sıcaklığını; $G_{panel,t}$, gelen güneş ışıınımını; U_0 , panelin doğal soğuma katsayısını; U_1 , panelin rüzgâr etkisiyle soğuma katsayısını ve $W_{panel,t}$ ise panel yüksekliğindeki rüzgâr hızını temsil etmektedir. Bu denklemin Denklem 1’de verilen ifadeye eklenmesiyle Denklem 5 elde edilmektedir.

$$P_{panel,t}(\bar{G}, \bar{T}) = \bar{G} \times P_{tepe} \times (1 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) \quad (5)$$

$$A_1 = k_1 \ln(\bar{G}) \quad (6)$$

$$A_2 = k_2 (\ln(\bar{G}))^2 \quad (7)$$

$$A_3 = k_3 \bar{T} \quad (8)$$

$$A_4 = k_4 \bar{T} \ln(\bar{G}) \quad (9)$$

$$A_5 = k_5 \bar{T} (\ln(\bar{G}))^2 \quad (10)$$

$$A_6 = k_6 \bar{T}^2 \quad (11)$$

$$\bar{G} = \frac{G_{panel,t}}{G_{ref}} \quad (12)$$

$$\bar{T} = T_{panel,t} - T_{STK} \quad (13)$$

Burada, k ve U katsayıları modül teknolojilerine göre çeşitlilik göstermektedir. Bu katsayılar, modülün ısıtım ve sıcaklığa verdiği tepkileri belirlemektedir. Örneğin, kristal silikon modüller, sıcaklık değişimlerine daha hassas bir yanıt verirken, CdTe modüller düşük ısıtım koşullarında daha yüksek performans göstermektedirler.

1.3.5. Kayıplar

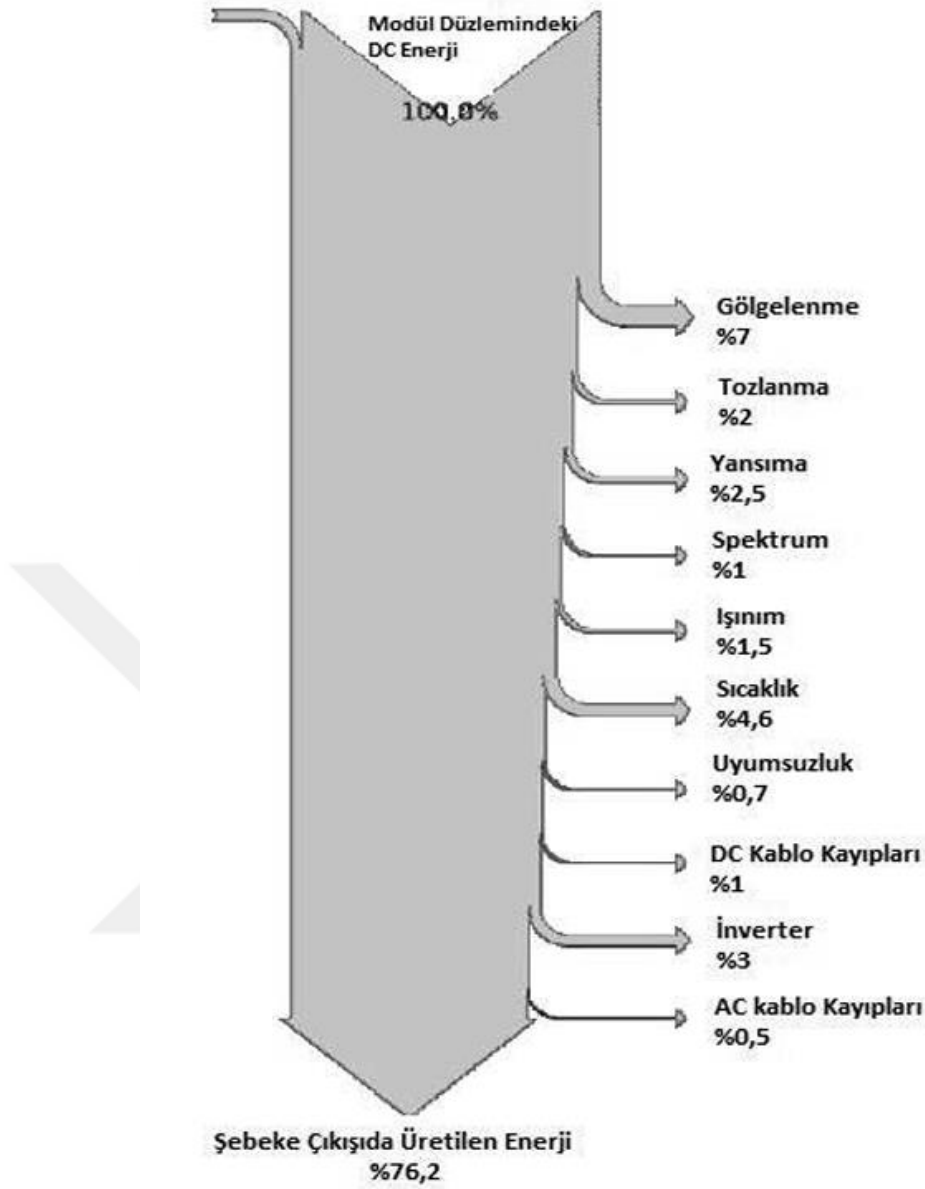
Kayıp analizi, sistemde enerji kayıplarının belirlenmesi ve bu kayıpların minimize edilmesi için yapılan bir incelemedir. Performans Oranı, şebeke bağlantılı bir FV sistemin gerçek performansının, ideal performansa oranıdır. Şebeke çıkışındaki AC enerji ile, sistemdeki FV panellerin STK şartlarında üretilebilecek enerji arasındaki fark dikkate alınmaktadır. Yani FV sistem kayıpları ne kadar düşüğe sistemin performans oranı kadar yüksektir. Şekil 14'te, güneş modüllerinin düzlemindeki DC enerjiden, şebekeye ulaştırılan AC enerjiye kadar çeşitli kayıpların oranları gösterilmektedir (Deniz, 2013).

FV modülleri karla kaplıysa enerji çıkışı genellikle çok düşüktür. Bu etki ne sıklıkla kar yağdığına bağlıdır ancak daha da önemlisi karın erimeden veya kaymadan önce modüller üzerinde ne kadar kaldığına bağlıdır.

1.3.6. Maliyetler

Güneş enerji santrallerinin ekonomik analizi, yatırımın maliyet etkinliğini değerlendirmek için yapılmaktadır. Ekonomik analiz, sistemin kurulum maliyetleri, bakım ve işletme giderleri, enerji satış fiyatları ve yatırımın geri dönüş süresi gibi finansal göstergeleri içermektedir.

Kurulum maliyetleri, güneş panelleri, eviriciler, bağlantı ekipmanları, GES pano, taşıyıcı sistem, kablo tavaları, topraklama sistemi, depolama üniteleri ve santral gücüne bağlı SCADA yazılımını içermektedir. Bu maliyetlerdeki değişkenler sistemin on-grid, off-grid, çatı uygulamaları ve arazi uygulamalarına göre değişiklik göstermektedir. On-grid şebekelerde depolama üniteleri kurulum maliyetini ciddi anlamda etkilerden arazi uygulamalarında taşıyıcı sistem maliyetleri etkilidir.



Şekil 14. FV sistemlerde kayıplar (Deniz, 2013)

Bakım ve işletme giderleri düzenli aralıklarla yapılan panel temizliği ve panel arıza kontrollerini kapsamaktadır. Yoğun toz ve yağmurlu alanlara kurulan santrallerin temizlik periyotları daha kısadır. Düzenli aralıklarla termal kameralarla yapılan panel ölçümleri, panellerde ve hücrelerde oluşan arızaların görülmesini sağlarken zamanında müdahale ile sistem verimliliği korunmuş olur.

Enerjinin üreticiden tüketiciye ulaştırılması için iletim ve dağıtım hatlarının kullanılması gerekmektedir. Söz konusu bedel dağıtım sistemi, iletim sistemi ile teknik ve teknik olmayan kayıp maliyetlerini içermektedir. Enerji bedeline dağıtım bedelinin eklenmesi neticesinde vergi öncesi birim enerji bedeline ulaşılmaktadır.

1.4. Literatür Araştırması

Zhang ve arkadaşları (2025), çalışmalarında elektrik fiyat dalgalanmaları ve yük talebi değişimlerinden etkilenen fotovoltaiik sistemlerin ekonomik faydalarını analiz etmeye yönelik boşlukları ele almışlardır. Araştırmalarında, bina entegrasyonlu yarı-esnek kristal silikon fotovoltaiik sisteminin ekonomik performansını incelemek için gerçek elektrik tüketim verilerini kullanmışlar ve öz tüketim oranı kavramlarını tanıtmışlardır. Araştırma sonucunda, nominal öz tüketim oranı arttıkça sistemin ekonomik faydalarının yükseldiği ve geri ödeme süresinin kısaldığı bulunmuştur. Ayrıca, düşük öz tüketim oranlarının politika değişimlerine daha duyarlı olduğu ve bu durumun ekonomik kazançları etkilediği belirlenmiştir. Bu bulgular, nominal öz tüketim oranının artmasının sistemin ekonomik faydalarını artıracağını ve geri ödeme süresini kısaltacağını, aynı zamanda düşük öz tüketim oranlarının politika değişimlerine karşı daha hassas olduğunu ve ekonomik kazançları etkilediğini göstermektedir.

Gergely ve arkadaşları (2025), çalışmalarında elektrik tüketimi ile fotovoltaiik üretiminin, net sıfır enerji bina çerçevesinde konut binalarında yük uyumunu araştırmışlardır. Araştırmalarında, yük uyumunu etkileyen faktörlerin duyarlılık analizini yapmak amacıyla 316 akıllı sayaç verisi kullanmışlar ve yıllık ile günlük tüketim desenleri, FV eğim açısı ve yön açısını dikkate almışlardır. Araştırma sonucunda, FV sistemlerinin büyüklüğünün, yalnızca %30.3 öz tüketim ve %39.5 şebeke bağımlılığına neden olduğu ve bu durumun, daha iyi büyüklük stratejilerine ve uyumsuzlukların azaltılmasına ihtiyaç duyduğunu bulmuşlardır. Alternatif FV boyutlandırma yaklaşımları önerilmiş, öz üretim maksimize edilerek %46.7 öz tüketim sağlanmış ve şebeke bağımlılığı önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu bulgular, tüketim değişkenliğini anlamının ve FV konfigürasyonlarını optimize etmenin yük uyumu sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirebileceğini ve FV sistemlerinin doğru şekilde optimize edilmesinin, şebeke etkilerini azaltarak FV sistemlerini geliştirilebileceğini göstermektedir.

Liao ve arkadaşları (2025), çalışmalarında Wuhan'daki 36 sanayi parkında fotovoltaiik üretim fazlası ve FV üretimi ile enerji talepleri arasındaki dengeyi kapsamlı bir şekilde analiz etmişlerdir. Araştırmalarında, FV üretimini belirlemek için coğrafi bilgi sistemleri verilerinden ve saha anketlerinden elde edilen 3D modellemeyi kullanmışlar, enerji talebini ise sanayi bina standartlarına ve saha anket varsayımlarına dayalı simülasyonlarla tahmin etmişlerdir. Araştırma sonucunda, incelenen sanayi binalarının yaklaşık üçte birinin enerji

Üretim fazlası gösterdiği, beşte birinin ise yıllık 1000 saatten fazla üretim fazlası verdiği, günlük ortalama fazla enerji süresinin ise 3.4 ile 4.9 saat arasında olduğu bulunmuştur. Yedi vakada, yılda 1 GWh'den fazla FV retim fazlası olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, FV fazla enerjilerinin yönetilmesi gereken önemli bir sorun olduğunu, özellikle yüksek FV z yeterlilik oranına sahip binalarda üretim fazlasının daha sık görüldüğünü göstermektedir.

Lara ve Daz (2024), çalışmalarında fazla enerjisi olan fotovoltaik sistemlerin, son on yılda dağıtık üretime önemli katkılarda bulunduğunu ve ancak yeni düzenlemelerle bu büyümenin etkilendiğini ne sürmüşlerdir. Araştırmalarında, fazla enerjisi olmayan öz tüketimin kârlılığını; coğrafi bilgi sistemleri araçları, saha ölçümleri ve güneş ışınımı ölçer kullanarak incelemişlerdir. Araştırma sonucunda, geri ödeme süresinin 4.57 yıl, iç verim oranının %23.4 ve öz yeterlilik oranının %5.0 olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, fazla enerjisi olmayan öz tüketim için kârlılık koşullarını ortaya koymakta ve fazla enerjili öz tüketime alternatif bir çözüm sunmaktadır.

Santiago ve arkadaşları (2024), çalışmalarında FV sistemlerin, karbon salınımını azaltma hedefi doğrultusunda, yoğun nüfuslu bir şehirdeki apartman bloklarında kolektif öz tüketim için büyük elektrik üretim kapasitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalarında, üç farklı gelir seviyesine sahip mahallelerin enerji talep profillerini modelleyerek, her gelir seviyesi için talep karşılama faktörünü ve elektrik şebekesiyle yapılan enerji alışverişini hesaplamışlardır. Araştırma sonucunda, farklı g derecelerine ve farklı evsel elektrik tarifelerine sahip öz tüketim için yedi düzenleyici çerçevenin ekonomik kârlılığını analiz etmişlerdir. Sonuçlar, FV modüllerin nominal gücündeki sürekli artış ve elektrik fiyatlarının yükselmesiyle birlikte, öz tüketim FV sistemlerinin krlılığının, düzenleyici çerçeveye bakılmaksızın neredeyse garanti olduğunu göstermektedir.

Cieşlak (2024), çalışmasında, elektrik faturası düzenlemelerindeki gelişmeler ve enerji depolama sistemleriyle birlikte artan FV kurulum ilgisi doğrultusunda, Polonya'da bir üretici-tüketici fotovoltaik kurulumunun operasyonel ve finansal geçerliliğini incelemişlerdir. Araştırmasında, enerji depolama sistemine sahip olmayan standart bir FV sistem ile bataryalı bir kurulum arasında iki seçenek değerlendirilmiş ve FV sistemi tarafından alınıp satılan elektriğin farklı şekillerde hesaplandığı dört senaryo analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda, enerji depolama sisteminin, enerji öz tüketimini %28.6'dan %60.4'e çıkardığı ve bu durumun bazı durumlarda yatırımın kârlılığını önemli ölçüde etkileyebileceği bulunmuştur. En kötü senaryoda, geri ödeme süresi çok uzun (13.7 yıl) iken, en uygun senaryoda ek finansmanla bu süre 3.9 yıla düşmektedir.

Hassan ve arkadaşları (2024), çalışmalarında, enerji depolama bataryalarının Bağdat şehrindeki güneş panelleriyle donatılmış evlerde öz tüketimi ve bağımsızlığı nasıl artırabileceğini incelemişlerdir. Araştırmalarında, farklı büyüklüklerdeki bataryaların binaların enerji verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırma sonucunda, batarya kapasitesinin artmasıyla birlikte öz tüketim ve öz yeterlilik oranlarının sırasıyla %64.35'ten %88.38'e ve %57.46'dan %80.89'a yükseldiği bulunmuştur. Bu durum, büyük bataryaların güneş panellerinin enerji kullanımını optimize edebileceğini, şebeke bağımlılığını azaltabileceğini ve sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik edebileceğini göstermektedir. Bu bulgular, ESB ile öz tüketim ve öz yeterlilik oranları arasında dördüncü dereceden bir ilişki olduğunu ve güneş çıkışı ile enerji ihtiyacındaki mevsimsel değişimlerin etkisini ortaya koymaktadır.

Phap ve arkadaşları (2024), çalışmalarında, çatı tipi güneş enerjisi sistemlerinin elektrik sistemi güvenliğini sağlamak ve ulusal enerji şebekesindeki yatırım baskısını azaltmak için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalarında, Vietnam'daki haneler için lityum bataryalar kullanan, şebekeye bağlı güneş enerjisi projelerinin teknik ve ekonomik verimliliğini analiz etmişlerdir. Analiz, farklı iklim özelliklerine sahip üç bölgede yatırım olanaklarını netleştirmeyi amaçlamaktadır. Araştırma sonucunda, Vung Tau şehrinde yapılan projenin en yüksek güneş enerjisi çıktısını sağladığı ve net bugünkü değerinin 2669\$ olduğu, Hai Phong ve Binh Dinh şehirlerindeki projelerin sırasıyla 129\$ ve 1661\$ değerlerine ulaştığı bulunmuştur. Ayrıca, projelerin geri ödeme süreleri, Hai Phong, Binh Dinh ve Vung Tau bölgelerinde sırasıyla 12.4 yıl, 10.7 yıl ve 9.9 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, lityum batarya kullanan güneş enerjisi sistemlerinin, öz tüketimi artırabileceğini ve hanelerin elektrik şebekesi kullanımını azaltabileceğini göstermektedir.

Wang ve arkadaşları (2024), çalışmalarında, bina entegreli FV sistemlerinin ofis binalarındaki enerji performansını karşılaştırarak, farklı iklim bölgeleri için optimal çözümler sunduklarını belirtmişlerdir. Araştırmalarında, FV çatı, FV pencere ve FV gölgeleme sistemlerinin enerji performansını değerlendiren simülasyon modelleri geliştirmişlerdir. Araştırma sonucunda, Pekin'de FV pencere ve FV gölgeleme sistemlerinin en yüksek enerji üretim kapasitesine sahip olduğu, Kunming'de ise FV çatı sisteminin en yüksek enerji üretim kapasitesine sahip olduğu bulunmuştur. Kunming'de FV çatı, FV pencere ve FV gölgeleme sistemleri sırasıyla %111.78, %39.36 ve %44.43 enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Huseinbegović ve arkadaşları (2024), çalışmalarında, enerji depolama sistemi olmayan, sıfır enerji güç sistemi içinde bina entegreli FV sistemlerinin optimal boyutlandırılmasına odaklanmışlardır. Araştırmalarında, bina entegreli sistemlerinin yerel yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve sera gazı emisyonlarını düşürme gibi önemli avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir. Ancak, bina entegreli sistemlerin uygulanması, güç dağıtım sistemi operatörünün koyduğu yasal, düzenleyici ve teknik sınırlamalar nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Araştırma sonucunda, bina entegreli sistemlerin boyutlandırılmasında, enerji depolama sistemi bulunmaması durumunda, yatırımın iç verimliliği oranı ve öz yeterlilik oranının optimize edilmesinin önemli bir hedef olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, farklı tarifeler, yük profilleri, fiyat dalgalanmaları ve verimlilikteki değişiklikleri dikkate alan bir yaklaşım sunduğunu ve sıfır enerji kısıtlaması altında gerçek veri setleri ile değerlendirilen bina entegreli sistemlerinin optimal boyutlandırılmasının sağlanabileceğini göstermektedir.

Mohand Kaci ve arkadaşları (2024), çalışmalarında, küçük ölçekli FV sistemlerinin elektrik üretme, fosil yakıtları koruma ve sera gazı emisyonlarını azaltma konusundaki başarısını araştırmışlardır. Araştırmalarında, Şebeke/FV ve Şebeke/FV/Batarya olmak üzere iki farklı FV sistemi inceleyerek, bu sistemlerin teknik performanslarını, öz tüketim ve öz yeterlilik değerlendirmeleri ile net mevcut değer, iç verimlilik oranı, karlılık endeksi ve iskonto edilmiş geri ödeme süresi gibi ekonomik parametreleri kullanarak değerlendirmişlerdir. Araştırma sonucunda, Şebeke/FV sistemlerinin dört iklim bölgesinde teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu bulunmuş, Şebeke/FV/Batarya sistemleri için ise batarya maliyetleri ve bölgesel bir mahsuplaşma sisteminin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Kumar ve arkadaşları (2023), çalışmalarında, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğası ve gelişmekte olan ülkelerde bu kaynaklardan enerji üretim maliyetlerinin yüksekliğini araştırmışlardır. Araştırmalarında, çatı tipi FV sistemler için öz tüketimin, düşük maliyetli elektrik üretimi sağladığı için daha cazip olduğunu vurgulamışlardır. Araştırma sonucunda, şebeke bağlantılı FV sistemin maliyetinin 0.0086 \$/(kWh) olduğunu ve satış fiyatının 0.062 \$/(kWh) olduğunu, bu durumun yıllık enerji maliyetini %35.23 oranında azaltacağını bulmuşlardır.

Fuster-Palop ve arkadaşları (2023), çalışmalarında, binalarda öz tüketimi artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla FV öz tüketiminin cazibesini araştırmışlardır. Çalışmanın ilk kısmında, Akdeniz havzasında bulunan bir İspanya belediyesinde net ölçme ve net

faturalandırma ile öz tüketim potansiyelini karşılaştıran, coğrafi bilgi sistemleri tabanlı bir tekno-ekonomik model geliştirilmiştir. 3734 bina üzerinde yapılan optimizasyonda, yıllık talep profilleri kullanılarak çeşitli senaryolar değerlendirilmiştir. Çalışmada, belediyenin potansiyel öz yeterliliğinin %21.9 ile %42.5 arasında değiştiği bulunmuştur. İkinci kısımda, binalarda öz yeterlilik, öz tüketim, ekonomik geri ödeme süresi ve iç verim oranını tahmin etmek için basitleştirilmiş regresyon tabanlı modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde, yük ve yüksek radyasyon saatleri arasındaki uyumu ölçen yeni bir katsayının regresyonlarda yüksek korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir.

Chatzigeorgiou ve arkadaşları (2023), çalışmalarında FV sistemler ve batarya depolama sistemlerinin ikincil tüketim sistemlerine entegrasyonunu araştırmışlardır. Araştırmalarında, FV-Batarya sistem boyutlandırmasını ve ekonomik değerlendirmesini yapabilmek için simülasyon ve yüksek çözünürlüklü veriler kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, FV-Batarya boyutlandırmasının, destekleyici mekanizmaların, maksimum finansal kazançları üzerine önemli ölçüde etki ettiğini bulmuşlardır. Bu bulgular, elektrik fiyatları ve tüketim sınıfı gibi parametrelerin etkisiyle her bir ülkenin optimal güç-enerji oranının değiştiğini göstermektedir.

Khan ve arkadaşları (2023), çalışmalarında Katar'ın enerji yoğun konut sektöründe, iklim değişikliğinin çatı tipi FV sistemler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalarında, bina enerji simülasyonu, FV sistemi optimizasyonu ve performans değerlendirmesini içeren entegre bir modelleme yaklaşımı kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, 2100 yılına kadar villa elektrik tüketiminin %22 artacağı ve yaz aylarında artan soğutma talepleri nedeniyle bu artışın %26'ya çıkacağı bulgusu elde edilmiştir. Ayrıca, FV sisteminin kapasitesinin 7.4 kW'den 8.2 kW'ye yükseldiği, ancak iklim değişikliği nedeniyle FV sistemin enerji katkısının %18'den %16'ya düştüğü tespit edilmiştir. Bu bulgular, FV sistemlerinin finansal açıdan güçlü bir şekilde uygulanabilir olduğunu, ancak azalan panel verimliliği ve yükselen sıcaklıklar göz önünde bulundurularak FV boyutlandırma metodolojilerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Varo-Martínez ve arkadaşları (2021), çalışmalarında, FV öz tüketim sistemlerinin, FV sistemlerin yayılmasına ve dolayısıyla yenilenebilir enerjilerin ilerlemesine katkıda bulunabileceğini araştırmışlardır. Araştırmalarında, farklı kurulu tepe gücü, panel yönü ve eğimi ile kurulum seviyesindeki engellemeye bağlı olarak bir FV öz tüketim sisteminin karlılık sınırlarını inceleyen sistematik bir çalışma yaklaşımı kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, İspanya'nın Cordoba şehri örneğinde, FV panellerinin güneye dönük ve 15

derece eğimli olduğunda maksimum karlılığın sağlandığı, en olumsuz koşulların ise panellerin kuzeye dönük ve 90 derece eğimi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, engelleme seviyesi arttıkça, maksimum net bugünkü değerin azaldığı ve optimal değerin daha düşük güçteki kurulumlar için elde edildiği görülmüştür.

Bošnjaković ve arkadaşları (2021), çalışmalarında, FV sistemlerin maliyet etkinliğini, Hırvatistan'ın kırsal bölgesindeki aile evlerinde incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmalarında, Homer programı ile batarya enerji depolaması olmadan 3.6 kW kapasiteli bir FV güç santralinin optimal boyutunun hesaplanması yaklaşımını kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, Dragotin, Hırvatistan'daki tipik bir evde kurulan FV sisteminin, mevcut elektrik tarifeleri, yatırım fiyatları ve ekipman bakım masrafları göz önünde bulundurularak, hükümet teşvikleri olmadan 10.5 yılda kendini amorti edebileceği bulunmuştur. Bu bulgular, FV sistemlerinin kırsal alanlarda etkin bir seçenek olabileceğini ve devlet desteklerinin olmaması durumunda bile uzun vadeli ekonomik faydalar sağladığını göstermektedir.

Elkholy ve arkadaşları (2022), çalışmalarında, ofis binalarına entegre FV sistemlerinin şebeke etkileşimi ve yük uyumu metriklerini incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmalarında, zaman serisi kümelenmesi gibi veri odaklı bir teknik kullanarak, FV evirici çıkışı ve yük ile şebeke arasındaki verileri farklı zaman dilimlerinde ölçmeyi ve bunun, FV sisteminin performansı ve boyutlandırması üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Araştırma sonucunda, zaman serisi kümelenmesi ve hareketli ortalama tekniklerinin kullanıldığı incelemeler, FV sisteminin kapasite faktörü ve öz tüketime uygunluk gibi metriklerin, net sıfır enerji binalarının gereksinimlerini karşılayacak optimal FV tasarımını belirlemede önemini ortaya koymuştur. Bu bulgular, FV sistemlerinin boyutlandırılmasının, şebeke etkileşimi ve yük uyumunun iyileştirilmesi ile daha verimli hale getirilebileceğini ve net sıfır enerji binalarının hedeflerine ulaşmada katkı sağlayacağını göstermektedir.

Khamharnphol ve arkadaşları (2023), çalışmalarında, Tayland'ın güney merkezindeki beş hastanede 100 kWp gücünde bir çatı tipi FV sistemin teknolojik ve ekonomik değerlendirmesini yapmışlardır. Araştırmalarında, PVsyst simülasyon aracı kullanarak, farklı eğim ve yön açıları, güneş radyasyonları ve ortam sıcaklıkları ile güneş panelleri, eviriciler ve sistem dengeleme bileşenleri ile yapılan simülasyonları kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, finansal analizde en uygun senaryoların özel enerji alım anlaşması ve mahsuplaşma senaryoları olduğu ve Takua Thung hastanesi için en düşük düzeyde enerji maliyeti 0.07 USD/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, hastaneler ve ilgili paydaşlar

için çatı tipi FV sistemlere yapılan yatırımların potansiyelini ve uygun ekonomik faydalarını göstermektedir.

1.5. Tezin Amacı ve Katkıları

Bu tez çalışmasının amacı, tüketici davranışları ve enerji tüketim verilerine dayalı olarak GES tasarımına yönelik bir analiz sunmaktır. Farklı tüketim profillerine sahip işletmeler için özelleştirilmiş GES sistemleri tasarlayarak kurulum maliyetinin düşürülmesi, güneş enerjisinin daha etkin ve verimli kullanılmasını sağlamak hedeflenmektedir.

Çalışmada organize sanayi bölgelerinde faaliyet gösteren tüketicilerin bir yıl boyunca aylık enerji tüketim verileri temel alınarak analizler yapılması planlanmıştır. Bu kapsamda, tüketim ihtiyacını karşılayacak optimum GES kurulu gücünün hesaplanması, firmaların enerji dengelerinin belirlenmesi ve GES ömrü boyunca fatura analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, güneş panellerinin eğim açılarının enerji üretimi ve ekonomik kârlılık üzerindeki etkilerinin incelenmesi, farklı tüketim profillerine sahip firmaların güneş enerjisinden elde edebileceği ekonomik kazançların şehir bazında değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Böylece GES kurulum maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu tezin önemli katkılarından biri, tüketici davranışı profilleri ile güneş enerjisi üretimi arasındaki ilişkinin enerji ve fatura dengeleri üzerindeki etkisinin ortaya konulmasıdır. Çalışma, farklı tüketim profillerinin güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkilerini ve bu profillerin, tüketicilerin enerji dengesi ile uzun vadeli mali sonuçları üzerindeki doğrudan etkilerini analiz etmektedir. Bu sayede, tüketiciler, geniş bir kurulu güç analizi yelpazesi üzerinden elde edilen sonuçlarla, ekonomik ve verimlilik açısından kendilerine en uygun olan güneş enerjisi santralının kurulu gücünü belirleyebilmektedir. Bu yaklaşım, tüketicilerin yatırım kararlarını daha doğru ve etkili bir şekilde almasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışma, GES yatırımlarının ekonomik analizine yönelik altı temel bileşeni ortaya koyarak literatüre katkı sağlamaktadır. Bu bileşenler, GES sistemlerinin yatırım geri dönüş süreçlerini ve ekonomik faydalarını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir:

Enerji Satış Başlangıç Noktası: Bu noktanın altındaki kurulu güç seviyelerinde, GES yalnızca enerji maliyetlerini düşürmekte ancak bu seviyenin üzerinde kurulan santraller şebekeye enerji satışı yoluyla ek gelir elde ederek yatırımın cazibesini artırmaktadır. Bu

noktanın belirlenmesi, yatırımcıya ekonomik analiz açısından yol gösterici bir kriter sunmaktadır.

Enerji Başa Baş Noktası: Firmanın yıllık toplam enerji tüketimini tamamen karşılayabilecek santral kapasitesini ifade eder. Bu nokta, yirmi beş yıllık tüketimi dengeleyecek GES kurulu gücünü tanımlamakta olup, yatırımcıların sistem boyutlandırmasını optimize etmelerine yardımcı olmaktadır.

Bedelsiz Enerji Başlangıç Noktası: GES sisteminin, tüketici ihtiyacını aşarak şebekeye ücretsiz enerji vermeye başladığı kritik noktadır. Bu nokta, fazla üretimin ekonomik geri dönüş üzerindeki etkisini değerlendirmek için önemli bir bileşendir.

Enerji Özgürlük Noktası: Tüketicinin herhangi bir fatura ödemeyeceği son noktayı ifade eder. Bu noktanın ötesinde GES'in ürettiği enerji, tüketim ihtiyacını tamamen karşılamakta ve tüketiciye sürekli bir enerji bağımsızlığı sağlamaktadır.

Üretim Aşım Noktası: GES tarafından üretilen fazla enerjinin şebekeye verilmesine rağmen, bu noktadan itibaren dağıtım firmasının ek enerji için ödeme yapmayı durdurduğu seviyedir. Bu nokta, fazla üretimin finansal getirisi üzerindeki sınırları belirleyerek, yatırımcılar için ekonomik optimizasyon açısından kritik bir eşik oluşturmaktadır.

Fatura Başa Baş Noktası: Tüketicinin toplam enerji maliyetleri ile GES aracılığıyla şebekeye satılan enerji gelirlerinin eşitlendiği noktadır. Bu noktada, şebekeye satılan enerji gelirleri sayesinde faturalar tamamen karşılanmakta ve enerji maliyetleri sıfırlanmaktadır.

Bu altı bileşen, GES yatırımlarının ekonomik analizinde yatırımcıların karar alma süreçlerine katkı sağlayarak, optimum sistem boyutlandırmasının ve finansal geri dönüş sürelerinin daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanıyabilecek kritik noktalaradır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

GES tasarımlarında, genellikle sözleşme gücü esas alınırken, ekonomik analizlerde yatırım maliyeti ve amorti süresi gibi faktörler ön planda tutulmaktadır. Ancak, bu durum yatırım sahiplerinin yalnızca amorti süresine odaklanmalarına ve kurabilecekleri maksimum kapasiteye yönelmelerine neden olabilmektedir. Böyle bir yaklaşım, yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle yatırımcıların GES projelerinden vazgeçmesine yol açabilmektedir. Diğer yandan, ülkeler enerji bağımsızlığı hedefleri ve yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir kalkınma açısından taşıdığı önem sebebiyle GES politikalarına öncelik vermekte ve çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirmektedir. Bu bağlamda, hem ülkelerin enerji politikalarına rehberlik etmek hem de yatırımcıların ekonomik faydalarını artırmak amacıyla GES tasarımlarının optimum seviyelerde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ortalama yirmi beş yıl ömrü olan bir yatırımı yapan yatırımcının yatırım analizinin de yirmi beş yıllık bir dönemi kapsaması gerektiği göz önünde bulundurularak, bu çalışmada yapılan tüm analizler yirmi beş yıllık bir süreyi kapsamaktadır. Çalışmada, GES tasarımlarına yön verecek detaylı analizlerin önemine vurgu yapılmış ve mevcut yöntemlerin ötesinde yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yöntem, tüketim verilerinin dikkate alınmasını ve tüketim profili analizine dayalı olarak GES tasarımı yapılmasını önermektedir. Bu yöntem, tüketici davranışlarını dikkate alarak, yatırımcıların bütçelerine uygun GES kapasitesinin kârlılığını öngörebilmelerini ve bu doğrultuda bilinçli kararlar almalarını sağlamaktadır.

2.1. Materyal

2.1.1. İncelenen Üretim Bölgeleri

GES üretim performansı üzerinde, seçilen bölgelerin güneş potansiyeli en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesinden her biri için bir şehir ve bu şehirlerde bulunan bir Organize Sanayi Bölgesi (OSB) incelenmiştir. Şehir seçiminde, büyükşehir statüsünde olması, sanayi bölgelerindeki elektrik tüketimlerinin yüksek olması ve seçilen şehirlerin enlem ve boylam değerlerinin ülke genelinde dengeli bir dağılım göstermesi gibi kriterler dikkate alınmıştır. İncelenen bölgelerin temel özellikleri, enlem-boylam değerleri, güneş enerjisi için optimum panel eğim ve yönleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. İncelenen üretim bölgeleri özellikleri

Şehir	OSB	Enlem	Boylam	Eğim	Yön
Adana	Adana Hacı Sabancı OSB Bölge Müdürlüğü	37,00821	35,57608	33	7
Erzurum	Erzurum OSB Bölge Müdürlüğü	39,93004	41,16446	35	-25
İzmir	İzmir Atatürk OSB	38,50451	27,03750	33	0
Gaziantep	Gaziantep OSB	37,14915	37,29521	31	-2
Ankara	Ostim OSB	39,97476	32,74539	34	-4
İstanbul	İstanbul Anadolu Yakası OSB	40,88500	29,38855	32	9
Trabzon	Arsin OSB	40,95914	39,96214	35	0

Tablo 4’te verilen eğim ve yön değerleri açı olarak ifade edilirken panel yönü olarak 0° güneye, 180° ise kuzeye karşılık gelmektedir.

Tabloda yer alan eğim ve yön değerleri, seçilen şehirlerde güneş enerjisinden maksimum verim elde edilmesi için önerilen optimum değerlerdir. Eğim, panellerin yüzeyinin yatay düzleme olan açısını, yön ise panellerin hangi doğrultuda olması gerektiğini ifade etmektedir. Bu çalışmada, farklı bölgelere yönelik analizlerin standardize edilmesi amacıyla tüm bölgeler için panellerin eğim açısı 18 derece, yönü ise 0 derece olarak kabul edilmiştir. 18 derece Türkiye’de kullanılan çatı eğimlerinin yaklaşık bir ortalama değeri olarak seçilmiştir. Bu standart seçim, güneş ışınlarının yıl boyunca en uygun şekilde yakalanmasını sağlamak ve farklı bölgelerdeki performans karşılaştırmalarını kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır.

2.1.2. İncelenen Tüketiciler

Bu çalışmada, GES tasarımı ve ekonomik analizlerin gerçek tüketim profillerine dayalı olarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, farklı tüketim özelliklerine sahip dokuz sanayi firması örnek alınmıştır. Buna ek olarak, onuncu firma, bu dokuz firmanın ortalama tüketim değerleri hesaplanarak oluşturulmuş ve genel bir referans tüketici modeli olarak değerlendirilmiştir. On birinci firma ise güneş enerji üretim profiline uygunluğun incelenmesi amacıyla tasarlanmış özel bir modeldir. Her bir tüketicinin elektrik

Tablo 5. Firmaların aylık tüketim davranışları

Aylar	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Ocak	107,5	19,4	22,9	56,0	148,7	27,9	94,7	283,2	65,8	91,8	6,0
Şubat	105,2	41,7	23,4	59,6	154,0	23,7	76,3	251,9	64,3	88,9	8,0
Mart	84,7	62,4	32,4	72,7	168,3	29,3	80,4	237,0	55,4	91,4	11,5
Nisan	81,2	14,2	31,9	58,0	131,4	22,4	74,9	169,4	41,6	69,4	13,8
Mayıs	80,3	21,3	35,5	64,8	153,1	27,6	87,4	195,9	62,9	81,0	15,1
Haziran	59,3	110,0	33,4	57,3	147,3	24,3	78,5	195,9	46,1	83,6	16,1
Temmuz	44,0	149,9	35,6	60,9	136,0	26,6	100,2	265,5	44,5	95,9	17,8
Ağustos	55,8	120,3	38,1	64,9	149,1	31,9	106,1	314,6	44,6	102,8	16,9
Eylül	53,0	115,7	37,5	60,7	134,3	39,2	99,5	235,9	47,2	91,5	14,4
Ekim	56,7	28,5	34,2	62,0	85,0	33,1	88,5	194,3	56,0	70,9	11,2
Kasım	40,4	20,0	32,6	56,5	111,6	30,1	86,4	216,9	60,3	72,8	8,5
Aralık	47,8	23,3	34,5	65,2	114,5	31,2	87,4	251,2	63,3	79,8	6,3
Toplam	816,5	727,2	392,4	739,0	1633,9	347,9	1060,8	2812,2	652,3	1020,2	146,1

talebi, yıllık toplam tüketim miktarına ve aylık tüketim profiline dayanarak detaylı şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler, GES kapasite tasarımı ve ekonomik modellemelerde incelenmiştir. Tüketicilerin çeşitliliği, tasarımların farklı büyüklük ve tipteki sanayi tesislerinin incelenmesini ve etkilerinin gözlemlenmesini sağlamıştır. Çalışmada kullanılan tüketicilerin bir yıl boyunca aylık MWh cinsinden tüketimleri Tablo 5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablodaki yıllık toplam tüketim değerleri firmalar arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir. F8 firması, yıllık toplam 2,81 GWh ile en yüksek tüketim değerine sahiptir. F11 firması ise yıllık toplam 0,15 GWh ile en düşük tüketim değerine sahiptir. Bu firma, güneş enerji üretim profiline uygunluğu incelemek amacıyla tasarlanmış bir model olduğundan, düşük ve dengeli tüketim değerleri sunmaktadır.

F2, F7 ve F8 gibi firmalarda aylık tüketimlerin mevsimsel dalgalanmalar gösterdiği görülmektedir. Örneğin, F8 firmasının yaz aylarında tüketimi artarken, kış aylarında tüketim daha düşük seviyelerdedir. Bu durum, mevsimsel üretim döngülerine bağlı olarak enerji talebinin değişebileceğini göstermektedir. F10 ve F11 gibi firmalar, yıl boyunca nispeten sabit tüketim profillerine sahiptir. Bu durum, güneş enerji santrallerinin enerji üretim profiliyle uyumlu bir tüketim yapısı sunmaktadır.

F10 firması, diğer dokuz firmanın ortalaması alınarak oluşturulmuş bir model olduğundan, sanayi tüketiminde genel bir temsil sunmaktadır. Bu yaklaşım, farklı tüketicilerin ortak yönlerini değerlendirmek ve genel bir sonuç çıkarmak açısından önemlidir.

F11 firması ise özel olarak güneş enerji üretim profiline uygunluğun değerlendirilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Ankara Ostim OSB’de on altı yıllık meteorolojik verilerin ortalamasına göre 100kW gücüne sahip bir GES santralının enerji üretimi F11 firmasının tüketimi olarak kullanılmıştır. Bu firma, düşük ve dengeli bir tüketim yapısına sahiptir ve bu özelliğiyle güneş enerji sistemlerinin optimize edilmesinde referans bir model olarak değerlendirilmiştir. F11 gibi düşük tüketim değerine sahip firmalar için daha küçük kapasiteli GES sistemleri yeterli olabilir ancak bu tür firmalarda yatırımın geri dönüş süresi daha uzun olabileceğinden, ekonomik analizler detaylı şekilde yapılmalıdır.

Çalışmada kullanılan bu tüketim verileri; farklı büyüklükteki sanayi tesislerinin enerji ihtiyaçlarını anlamaya, GES kapasitesinin optimize edilmesine, tüketim profiline dayalı ekonomik analizler yapılmasına ve tüketici bazında uygun enerji üretim modelleri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Tablo 5’teki tüketim verileri, çalışmada GES tasarımlarının gerçekçi ve uygulanabilir modellerle yapılmasını sağlamış, tüketicilerin enerji ihtiyaçlarına ve ekonomik beklentilerine yönelik kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına imkân tanımıştır.

2.1.3. Işınım, Meteoroloji Verileri ve PVGIS

Bu çalışmada GES tasarımında kullanılan ışınlam ve meteorolojik veriler, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi tarafından sağlanan PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) veri tabanından alınmıştır (Huld vd., 2012). PVGIS, güneş enerji sistemleri için gerekli olan uzun vadeli ışınlam, sıcaklık, rüzgâr hızı ve diğer meteorolojik parametreleri sağlamasıyla, GES tasarımlarında yaygın olarak kullanılan güvenilir bir kaynaktır.

PVGIS’te kullanılan güneş radyasyonu tahminleri büyük ölçüde uydu görüntülerinden elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, bir diğer önemli veri kaynağı İklim Yeniden Analiz Verileridir. Yeniden analiz verileri, geçmiş meteorolojik olayların modeller aracılığıyla yeniden hesaplanması ve bilinen ölçümlerle düzeltmeler yapılmasıyla elde edilmektedir. Bu veri kümelerinin en büyük avantajı, küresel bir kapsama alanına sahip olmalarıdır. Özellikle

kutup bölgeleri gibi uydu verilerinin yetersiz kaldığı alanlarda kullanışlıdır. PVGIS 5.2'nin geliştirilmesinde, yeniden analiz tabanlı güneş radyasyonu verileri arasında önemli bir kaynak olan ECMWF ERA-5 veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmini Merkezi (ECMWF) tarafından üretilmiş olup, güneş enerjisi analizlerinde kullanılan yüksek kaliteli bir meteorolojik veri kaynağıdır (Molteni vd., 1996).

PVGIS güneş enerjisi üretim verilerini hesaplarken bir dizi özelliği göz önünde bulundurmaktadır. Bunlar saatlik güneş ışıınımları, panellerim eğim ve yönü, sıcaklık, rüzgâr, panel teknolojisi, GES kurulum tipi ve sistem kayıplarıdır. PVGIS hesaplamalarına dahil edilmeyen, ancak FV sistemlerinin enerji çıktısını etkileyebilecek bazı faktörler bulunmaktadır. Bunlar, kar, toz, kir, kısmi gölgelenme olarak sıralanabilmektedir (Malvoni vd., 2017). FV modüllerinin karla kaplanması enerji üretimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu etki, karın ne sıklıkla yağdığına ve modüller üzerinde ne kadar süre kaldığına bağlıdır. Modül eğimi ve kurulum şekli de karın etkisini belirleyen önemli faktörlerdir. Toz yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde modüllerin yüzeyinde birikme olabilmektedir. Modüllerin düzenli temizlenmesi bu etkinin boyutunu azaltabilir. Modüllerin bir kısmının gölgelenmesi enerji üretimini ciddi şekilde düşürebilmektedir. Bu etki, kurulumun yerel koşullarına bağlıdır ve FV sistem tasarımında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörler, PVGIS'te hesaba katılmamakla birlikte, sistem tasarımı ve kurulumu sırasında dikkate alınması gereken önemli etkenlerdir.

2.1.4. Birim Fiyatlar

GES'ler, yalnızca enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik getiri sağlayan yatırımlar olarak da öne çıkmaktadır. Bir işletmenin GES ile elektrik üretmesi, tüketimini kendi üretimiyle karşılaması anlamına gelmekte olup, enerji maliyetlerini düşürerek tasarruf sağlamasına olanak tanımaktadır.

Bunun yanı sıra, işletmenin tüketiminden daha fazla enerji üretmesi ve bu üretim fazlasını şebekeye aktarması durumunda, GES'lerin ek gelir kaynağı oluşturma potansiyeli de ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, GES'lerin ekonomik analizinin yapılabilmesi açısından enerji birim fiyatlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

GES'lerin ekonomik analizinde en önemli parametrelerden biri, enerji alım ve satım fiyatlarıdır. Üretilen enerjinin değerini belirlemek için kullanılan bu fiyatlar, GES yatırımlarının ekonomik fizibilitesini ortaya koymada temel kriterlerden biridir. Bu

Tablo 6. GES kurulumunda birim maliyetler

Kurulu Güç (kWp)	Birim Maliyet (USD/Wp)
0-15	0,9-1,2
15-50	0,7-0,9
50-300	0,5-0,7
300-1000	0,4-0,6
1000-10000	0,28-0,4

çalışmada; enerji alım fiyatı 3,705608 TL/kWh, enerji satım fiyatı ise 1,645646 TL/kWh olarak baz alınmıştır. Bu değerler, mevcut piyasa koşullarındaki güncel alım-satım birim fiyatlarını temsil etmektedir.

GES'lerin ekonomik analizinde bir diğer kritik faktör ise kurulum maliyetleridir. Mevcut piyasada GES kurulum maliyetleri, kurulu güç başına düşen maliyet (kWp başına birim fiyat) olarak belirlenmektedir. Bu değerler Tablo 6'da verilmiştir. Hesaplamalar için Dolar-TL dönüşümü güncel pariteden yapılmıştır. Genel olarak, GES'in toplam gücü arttıkça, kWp başına birim maliyetler düşmektedir. Çalışmada, ilgili kurulu güç için birim fiyat hesaplanırken, ara değerler için enterpolasyon yöntemi uygulanmış ve en uygun birim fiyatlar belirlenmiştir. Bu kapsamda, GES yatırımının maliyet-fayda analizi yapılırken hem kurulum maliyetleri hem de enerji üretim gelirleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

2.2. Fotovoltaik Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu

2.2.1. Kurulum

Bu çalışmada, GES üretiminin modellenmesi için PVGIS veri tabanı kullanılmıştır. Bu veri tabanı, 2005-2020 yılları arasında ölçülmüş meteorolojik verilere dayanarak tasarlanan bir GES'in üretim simülasyonunun yapılmasına olanak tanımaktadır (Huld vd., 2012).

GES üretim simülasyonunun gerçekleştirilmesi için öncelikle bazı temel parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki, GES'in kurulacağı konumdur. Çalışmada incelenen bölgeler Tablo 4'te verilmiştir. Bu bölgeler, tüm firmalar için potansiyel üretim alanları olarak değerlendirilmiş ve her bölge için ayrı ayrı üretim modelleri oluşturulmuştur.

Tablo 7. FV panel teknolojisine göre kullanılan değişkenler

Katsayı	Kurulum Tipi	c-Si	CIS	CdTe
U_0	Serbest	26,9	22,64	23,37
U_0	BIPV/BAPV	20	20	20
U_1	Serbest	6,2	3,6	5,44
U_1	BIPV/BAPV	3,2	2	3,2
k_1	-	-0,017237	-0,005554	-0,046689
k_2	-	-0,040465	-0,038724	-0,072844
k_3	-	-0,004702	-0,003723	-0,002262
k_4	-	0,000149	-0,000905	0,000276
k_5	-	0,000170	-0,001256	0,000159
k_6	-	0,000005	0,000001	-0,000006

Bir diğer önemli parametre ise GES'in kurulu gücüdür. İlgili üretim bölgelerinde, firmaların bir yıllık elektrik tüketimlerini karşılayacak şekilde kurulu güç değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu güç değerleri, firmalar için %100 referans gücü olarak kabul edilmiş ve bu değeri temel alarak %0 ile %250 aralığında üretim modelleri oluşturulmuştur.

GES üretiminde FV panellerin tipi ve yönü, sistemin performansını etkileyen önemli etkenlerdir. Bu çalışmada, tüm üretim bölgelerinde panellerin; serbest kurulumuna sahip olduğu, güneğe yönlendirildiği, eğim açılarının 18 derece olduğu ve c-Si tipi paneller kullanıldığı kabul edilmiştir. Bu panel teknolojisi için, Denklem 4 ve 5'te kullanılan U ve k parametreleri Tablo 7'de sunulmuştur. Bu parametreler, ilgili panel teknolojisinin performansını belirlemek için modelleme sürecinde kullanılmıştır.

2.2.2. Saatlik Üretimin Hesaplanması

Tasarlanan GES modelleri için saatlik üretim değerleri, Denklem 4'te verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Bu formül, GES modellerinin üretimini belirlemeye olanak sağlasa da sistem kayıplarını göz önünde bulundurmaması önemli bir eksiklik teşkil etmektedir. Bu eksikliği gidermek amacıyla Denklem 4 güncellenmiş ve sistemin tamamında %14'lük bir kayıp olduğu kabul edilmiştir. Güncellenmiş denklem aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$P_{panel,t}(\bar{G}, \bar{T}) = \bar{G} \times P_{tepe} \times (1 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) \times (1 - L_{sistem}) \quad (14)$$

Burada L_{sistem} , sistem kayıplarını ifade etmektedir. Bu parametre; kablo kayıpları, gölgeleme kayıpları, ekipman kayıpları, evirici kayıpları gibi faktörleri kapsayan toplam kayıp oranını temsil etmektedir. Bu düzenleme ile modelin gerçekçiliği artırılmış ve sistemde meydana gelen kayıpların üretime etkisi dikkate alınmıştır.

2.2.3. Aylık Üretimin Hesaplanması

Türkiye’de faturalandırma aylık bazda yapılmaktadır. Buna göre, her ay sonunda dağıtım firmaları, ilgili işletmenin sayacı üzerinden tüketimini tespit ederek faturalandırmaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında gerekli hesaplamalar aylık bazda gerçekleştirilmiştir. Ancak, simülasyon sonucu elde edilen üretim değerleri hem saatlik bazda hesaplanmış hem de toplam 16 yıllık geçmiş meteorolojik verilerden yararlanılmıştır. Bu nedenle, bir üretim modelinin belirli bir ay için ortalama aylık üretiminin tespit edilmesi gerekmektedir.

Öncelikle, her yıl içinde bir ay seçilmiştir. İlgili ay için aylık üretim, saatlik üretimin o ay boyunca toplanması sonucu elde edilmiştir. Tüm yıllar için bu işlem tekrarlanmıştır. Son olarak, ilgili ayın on altı yıllık ortalaması alınmış ve bu değer ilgili ay için ortalama üretim değerleri olarak kabul edilmiştir. Bu sürece ilişkin ifade aşağıda verilmiştir:

$$E_{aylık} = \frac{1}{Y_{il}} \times \sum_{i=0}^{Y_{il}} \sum_{j=0}^{A_y} P_{panel,j}(\bar{G}, \bar{T}) \quad (15)$$

Burada; $E_{aylık}$, ilgili ay için ortalama üretim değerini; Y_{il} , toplam simülasyon yılını; A_y ise bir aylık süreyi ifade etmektedir. Bu işlem sonunda, tüm üretim bölgelerinde tüm aylar için gücün üretime etkisi belirlenmiştir.

2.2.4. Mahsuplaşma

GES kurulu bir işletme için mahsuplaşma, üretilen elektrik enerjisi ile tüketilen elektrik enerjisinin karşılaştırılması ve fazla üretilen enerjinin şebekeye verilerek belirli bir dönem sonunda denkleştirilmesi anlamına gelmektedir. Bu süreçte, bir aylık süre boyunca işletme enerji ihtiyacını GES üretiminden karşılarken, üretimin yetersiz kaldığı noktada şebekeden ihtiyacını karşılamakta veya üretimin fazlasını şebekeye vermektedir. Ancak,

Türkiye’de faturalandırma aylık bazda yapıldığından, mahsuplaşma da aylık bazda gerçekleştirilmektedir. Buna göre, her ay sonunda üretim ve tüketim karşılaştırılmakta, tüketim üretimden fazla ise fark faturalandırılmakta, üretim tüketimden fazla ise de işletme fazla ürettiği enerji için gelir elde etmektedir.

Bu noktada, firmaların tüketim ve üretim değerleri kullanılarak fatura hesabı yapılabilmektedir. Öncelikle, üretim ve tüketimin karşılaştırılması gerekmekte olup, bu aşağıdaki ifade yardımıyla aylık bazda hesaplanmaktadır:

$$E_F = E_U \times (1 - \eta)^{y_{il}-1} - E_T \quad (16)$$

Burada; E_F , üretim ve tüketim arasındaki farkı; E_U , ilgili ay için ortalama üretim değerini; E_T , ilgili ay için tüketim değerini; η ise GES kurulduktan sonra yıllık verim düşümünü ifade etmektedir. Tüm işletmeler için tasarlanan GES modellerinde yıllık %0,3 verim düşümü olduğu kabul edilmiştir.

Denklem (16) ile hesaplanan fark için iki durum söz konusudur. E_F negatif ise, işletme ürettiğinden daha fazla tüketim yapmıştır ve fatura ödemesi gerekmektedir. E_F pozitif ise, fazla üretilen enerji şebekeye aktarılmaktadır. Ancak, Türkiye’de GES kurulu bir işletmenin şebekeye satabileceği toplam enerji, yıllık tüketimi kadarıyla sınırlıdır. Bu kotayı aşan şebeke aktarımları için işletmeye ödeme yapılmamaktadır.

Mahsuplaşma, aşağıdaki ifadeye göre yapılmaktadır:

$$Fatura = \begin{cases} E_F \times M_{alim} & E_F < 0 \\ E_F \times M_{satim} & E_F > 0 \end{cases} \quad (17)$$

Burada; M_{alim} , enerji alım birim fiyatını; M_{satim} , enerji satım birim fiyatını ifade etmektedir. Faturanın negatif değer alması, işletmenin ödeme yaptığını; pozitif değer alması ise işletmenin gelir elde ettiğini göstermektedir.

Denklem 17, GES kurulu bir işletmenin aylık üretim ve tüketiminin göz önünde bulundurulması sonucu faturalandırma işleminin yapılmasında kullanılmaktadır. Bu hesaplar her ay için aylık bazda yapılmış ve çalışmada GES ömrü yirmi beş yıl olarak kabul edildiği için GES ömrü boyunca toplanmıştır. Bu sayede GES ömrü boyunca elde edilen üretim, tüketim ve kazanç sonuçları belirlenmiştir.

2.3. Performans Ölçütleri

2.3.1. Amorti Süreleri

GES için amorti süresi, yapılan yatırımın geri kazanılması için gereken süreyi ifade etmektedir. Bu süre, kurulum maliyeti, sistemin elektrik üretim kapasitesi, enerji fiyatları, devlet teşvikleri, bakım giderleri ve finansal destekler gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Bu çalışmada, belirlenen GES modeli için amorti süresi, işletmenin kümülatif fatura karının kurulum maliyetini aştığı ilk ay olarak hesaplanmıştır. Hesaplama süreci aylık fatura karının hesaplanması ile başlamakta ve bu işleme dair ifade aşağıda verilmektedir:

$$K_{Aylık} = F_{GES+} - F_{GES-} \quad (18)$$

Burada; $K_{Aylık}$, aylık fatura karını; F_{GES+} , GES kurulu olduğunda aylık faturayı, F_{GES-} ise GES kurulu olmasaydı firmanın aylık faturasını ifade etmektedir. İşletmenin GES üretiminden sağladığı tasarruf ve şebekeye satıştan elde ettiği gelir dikkate alınarak aylık bazda fatura karı belirlenmiştir.

Her ay için hesaplanan fatura karı, toplam kümülatif kar değerine eklenmiştir. Kümülatif kar aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır:

$$K_{Toplam}(n) = K_{Toplam}(n - 1) + K_{Aylık} \quad (19)$$

Burada; $K_{Toplam}(n)$, n'inci ayda biriken toplam fatura karına; $K_{Aylık}$ ise n'inci aydaki fatura karına karşılık gelmektedir. Kümülatif karın, başlangıçta yapılan GES kurulum maliyetini aştığı ilk ay, amorti süresi olarak kabul edilmiştir. Bu yöntem ile hesaplanan amorti süresi, işletmenin yaptığı yatırımın hangi ayda geri döneceğini ortaya koymaktadır.

2.3.2. KWh Başına Kar

Bu çalışmada ele alınan firmalar hem davranışları hem de toplam enerji ihtiyaçları bakımından farklılık göstermektedir. Sonuçların karşılaştırılabilir olması için normalize edilmiş bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmuştur. Normalize edilen sonuçlar, firma büyüklüğünün etkisinden arındırılmış olup, her firmanın kendi özellikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Normalize edilmiş sonuçlara ulaşmak için, öncelikle firmaların ürettiği ve tükettiği enerji değerleri baz alınarak KWh başına kar hesaplanmıştır. Bu hesaplama, aşağıdaki ifadeye göre gerçekleştirilmiştir:

$$KWh \text{ Başına Kar} = \frac{K_{Toplam}}{\sum E_{ref}} \quad (20)$$

Burada; K_{Toplam} , firmaların yirmi beş yıllık toplam fatura karını; E_{ref} ise referans alınan enerji miktarını ifade etmektedir. Referans enerji E_{ref} , iki farklı yaklaşıma göre ele alınmıştır. Tüketilen enerji bazlı yaklaşımda E_{ref} olarak işletmenin toplam tükettiği enerji kullanılmıştır. Üretilen enerji bazlı yaklaşımda ise E_{ref} olarak işletmenin GES ile ürettiği toplam enerji alınmıştır. Bu hesaplamalar, firma büyüklüğünün etkisini ortadan kaldırarak işletmelerin kârlılık performanslarının daha adil bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamaktadır.

Denklem (20), yalnızca işletmenin toplam fatura karını baz aldığından kurulum maliyeti göz önüne alınmamıştır. Gerçekçi bir finansal değerlendirme yapılabilmesi için, kurulum maliyeti de dahil edilerek net kâr hesaplaması yapılmıştır. Bu işlem için aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$KWh \text{ Başına Net Kar} = \frac{K_{Toplam} - C_{Kurulum}}{\sum E_{ref}} \quad (21)$$

Burada; K_{Toplam} ; yirmi beş yıllık toplam fatura karını; $C_{Kurulum}$, GES kurulum maliyetini; E_{ref} ise referans enerji miktarını ifade etmektedir. Bu hesaplama ile tüm gelir ve giderler dikkate alınarak gerçek kârlılık analiz edilmiştir. Böylece işletmelerin KWh başına elde ettiği net kazanç, kurulum maliyetleriyle birlikte değerlendirilmiş ve uzun vadeli yatırım geri dönüşleri daha sağlıklı bir şekilde ortaya konulmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Tüketimi Karşıl原因an GES Kurulu Gücü

GES tasarımı yapılırken, tüketimi karşılayan GES gücünün doğru bir şekilde belirlenmesi, enerji üretim maliyetlerini optimize etmek ve enerji verimliliğini artırmak açısından önemlidir. Tüketimi karşılayan GES gücü, firmanın yıllık enerji tüketimini tam olarak karşılayacak şekilde optimize edildiğinde odak noktası enerji giderlerini sıfırlamak isteyen firmaların gereksiz fazla kapasiteye yatırım yapılmasının önüne geçmektedir.

Fazla enerji üretimi, yerel elektrik şebekesi üzerinde baskı oluşturmakta ve enerji dengesizliklerine neden olmaktadır. Tüketimle uyumlu GES tasarımı, şebekeye verilen fazla enerji miktarını sınırlandırarak bu tür sorunların önüne geçmektedir. Ayrıca, bu yaklaşım enerji bağımsızlığını desteklerken, çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, GES tasarımında tüketim verilerinin dikkatlice analiz edilmesi ve bu doğrultuda sistemin optimize edilmesi, başarılı bir enerji yatırımı için gereklidir.

Fazla enerji üretimi genellikle enerji depolama sistemlerine ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Ancak tüketimi karşılayan bir GES tasarımı, enerji depolama ihtiyacını azaltarak hem maliyetleri düşürmekte hem de sistemin karmaşıklığını minimum seviyelere indirmektedir.

Tablo 8’de verilen firmaların tasarlanan kW cinsinden GES gücü değerleri, her firmanın bir yıllık enerji tüketimini karşılamak için ihtiyaç duyduğu güneş enerji santrali kapasitesini göstermektedir. Bu değerler, şehirlerin güneş enerjisi potansiyeline, iklim koşullarına ve firmaların yıllık enerji tüketim profiline bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Şehirlerin güneş enerjisi potansiyeli tasarlanan GES gücü üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Örneğin, Adana ve Trabzon arasındaki fark incelendiğinde, Adana gibi yüksek güneş potansiyeline sahip bir şehirde, aynı enerji tüketimini karşılamak için daha düşük kapasiteli bir GES yeterli olmaktadır. Buna karşılık, güneş potansiyeli nispeten düşük olan Trabzon’da, aynı tüketimi karşılamak için daha yüksek kapasiteli bir GES gerekmektedir. Güneş enerjisi üretimi, bulutluluk, nem oranı ve sıcaklık gibi faktörlerden de etkilenmektedir. Özellikle Trabzon gibi Karadeniz ikliminin hâkim olduğu şehirlerde, güneşlenme süresi ve radyasyon yoğunluğu sınırlıdır. Bu nedenle Trabzon’da tasarlanan GES güçleri, diğer şehirlere göre daha yüksek değerler almıştır.

Tablo 8. Tüketimi karşılayan GES güçleri

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Adana	540	481	259	489	1080	230	701	1859	431	675	97
Ankara	559	498	269	506	1118	238	726	1924	446	698	100
Erzurum	584	520	281	528	1168	249	759	2011	467	730	105
Gaziantep	528	470	254	478	1057	225	686	1819	422	660	95
İstanbul	629	561	302	570	1259	268	818	2168	503	786	113
İzmir	526	469	253	477	1053	224	684	1813	421	658	94
Trabzon	771	687	371	698	1543	329	1002	2655	616	963	138

3.2. Firmalarda Enerji Dengeleri ve Faturaların Uzun Vadede İncelenmesi

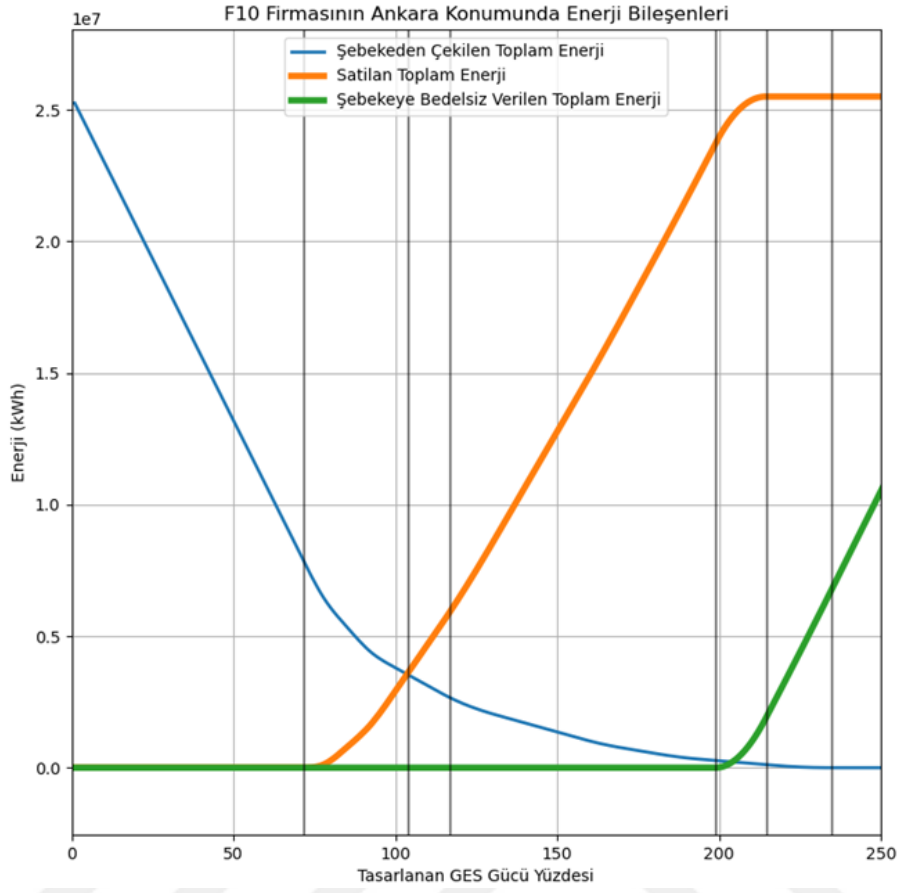
Şekil 15, Ankara lokasyonunda yer alan F10 firmasının 25 yıllık enerji bileşenlerini göstermektedir. Yapılan analizde, x eksenini tüketimi karşılayan güneş enerji santrali (GES) güç yüzdesini, y eksenini ise normalize edilmiş enerji bileşenlerini temsil etmektedir. F10 firmasının son yılında elektrik tüketimi esas alınarak, gelecek bir yıllık tüketimin tamamını GES ile karşılayabilmesi için gereken kurulu güç yaklaşık 698 kW olarak hesaplanmıştır. Bu değer, grafikte yer alan tasarlanan GES gücü yüzdesi ekseninde %100'e karşılık gelmektedir.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada, GES tasarımı sırasında öne çıkan kritik noktalar belirlenmiş ve grafikte işaretlenmiştir. Bu noktalar ve güç karşılıkları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9'da verilen enerji satış başlangıç noktasın yaklaşık 502 kW gücüne karşılık gelmektedir. Bu güç değerinin üzerinde bir santral kurulması durumunda F10 firması, şebekeye enerji satışı yapmaya başlamaktadır. Bu noktanın altındaki kapasiteler, sadece enerji maliyetlerini düşürmekle sınırlı kalırken, bu noktanın üzerinde kurulan santraller ek gelir sağlayarak yatırımı daha cazip hale getirmektedir. Bu noktanın belirlenmesi, GES sisteminin ekonomik analizinde yatırımcıya önemli bilgiler sunmaktadır.

Enerji başa baş noktası, ihtiyaç duyulan enerjiyi tamamen karşılayabilecek santral gücü olarak tanımlanır. F10 firması için bu nokta, tasarlanan GES gücünün %104'üne ve yaklaşık 726 kW gücüne karşılık gelmektedir. Bu, firmanın 25 yıllık tüketimini karşılayabilecek santral kapasitesini ifade etmektedir.

Bedelsiz enerji başlangıç noktası santralin şebekeye bedelsiz enerji vermeye başlayacağı nokta olup, tasarlanan GES gücünün %199'una ve yaklaşık 1389 kW gücüne



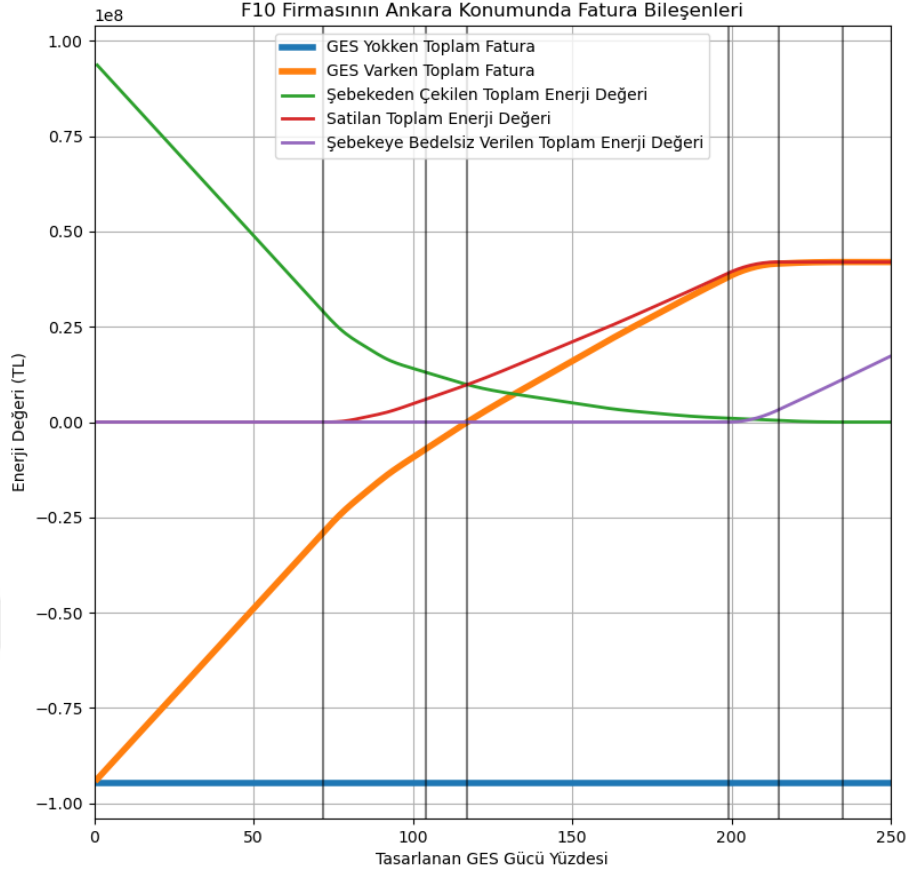
Şekil 15. F10 firmasının Ankara konumundaki enerji bileşenleri

Tablo 9. F10 firmasının Ankara konumunda kritik noktaları

Kritik Nokta	Yüzdesel Karşılığı	Güç Karşılığı (KW)
Enerji Satış Başlangıç Noktası	%72	502
Enerji Başa Baş Noktası	%104	726
Bedelsiz Enerji Başlangıç Noktası	%199	1389
Enerji Özgürlük Noktası	%235	1640
Üretim Aşım Noktası	%215	1501
Fatura Başa Baş Noktası	%117	816

karşılık gelmektedir. Türkiye'nin mevcut enerji mevzuatına göre, belirli bir üretim kapasitesinin üzerinde şebekeye verilen enerji için ödeme yapılmamaktadır. Bu, firmanın ticari kazanç sağlayabileceği üst sınırı aşan kapasitenin ekonomik olarak verimsiz hale geldiği bir durumdur.

Enerji özgürlük noktası, ay sonunda tüketici tarafından fatura ödenen son nokta olarak tanımlanmıştır. Bu noktadan itibaren tüketici, hiçbir ay fatura ödememektedir. F10 firması



Şekil 16. F10 firmasının Ankara konumundaki fatura bileşenleri

için bu nokta, tasarlanan GES gücünün %235'ine ve yaklaşık 1640 kW gücüne karşılık gelmektedir.

Üretim aşım noktası, santralin ürettiği fazla enerjinin şebekeye verilmesine rağmen, dağıtım firmasının ek enerji için ücret ödemeyi durdurduğu seviyedir. Bu noktanın ötesine geçildiğinde, yıllık kazanç üst sınır değerine ulaşmış olmaktadır. F10 firması için bu nokta, tasarlanan GES gücünün %215'ine ve yaklaşık 1501 kW gücüne denk gelmektedir.

Fatura başa baş noktası ödenen toplam enerji maliyetleri ile GES aracılığıyla şebekeye satılan enerji gelirlerinin eşit olduğu durumu ifade etmektedir. Bu noktada santral, şebekeye satılan enerji gelirleri sayesinde artık faturayı tamamen karşılayabilir duruma gelmektedir. Bu noktada, alınan ve satılan enerjinin mali değeri eşittir.

F10 firmasının fatura başa baş noktası %117 ve 826 KW gücünde santral kurulduğunda görünen bir değerdir. %117 kapasite, fatura maliyetlerini sıfırlamak için gereken en düşük tasarım kapasitesini temsil etmektedir. Bu noktada, firmaların yıllık enerji maliyetleri sıfırlanmaktadır.

Tablo 10. Enerji satış başlangıç noktaları (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Adana	47	21	77	70	64	64	67	63	60	74	79
Ankara	44	20	74	67	67	62	66	62	55	72	99
Erzurum	43	22	73	66	66	60	64	60	55	70	88
Gaziantep	44	21	74	66	65	60	64	60	56	70	89
İstanbul	40	19	69	63	63	57	61	57	52	67	91
İzmir	44	20	76	68	66	63	66	63	57	72	81
Trabzon	47	20	73	66	71	60	63	60	60	71	82

Yapılan çalışmalar sonucunda dikkat çeken bu kritik noktaların her firmaya ve konuma göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Gerçek tüketim verileri bulunan dokuz firmanın, bu firmaların ortalamalarıyla oluşturulan F10 firmasının ve güneş enerji üretim profiline uygun tüketim değerine sahip olan F11 firmasının enerji satış başlangıç noktaları yüzdesel olarak için Tablo 10’da verilmiştir.

F11 firmasına ait tüketim değerlerine bakıldığında, güneş enerji santralinden maksimum verim sağlayan bir tüketim profilinin, enerji satmaya başladığı noktanın daha yüksek güç seviyesinde olduğu görülmektedir. Bu durum, F11 firmasının tüketim alışkanlıklarının santral üretimi ile daha uyumlu olduğunu ve santralden elde edilen enerjinin daha verimli bir şekilde tüketim ihtiyacını karşıladığını göstermektedir. Bunun sonucunda, santralden elde edilen enerji öncelikle tüketim ihtiyacını karşılamakta, ardından şebekeye satış için yönlendirilmektedir.

Firmanın kendi tüketim profiline göre daha düşük güç seviyesinde enerji satmaya başlaması, ilk bakışta olumlu bir durum gibi görünse de F11 firmasının sonuçlarının verdiği bilgiye dayanarak bunun aslında istenmeyen bir durum olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, tüketim profillerinin ve tüketicilerin aylık enerji tüketim alışkanlıklarının, kurulacak güneş enerji santralinin performansı ve etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo incelendiğinde, her bir firmanın aylık enerji tüketim profiline bağlı olarak enerji satış başlangıç noktasının değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu, tüketim profillerinin, güneş enerji santralinden elde edilen verimliliği ve santral tasarımını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Dengeli bir tüketim profili santralin üretim potansiyelinden daha fazla yararlanılmasını sağlamakta ve enerji satış başlangıç noktasını daha yüksek güç değerlerine taşımaktadır. Dengesiz bir tüketim profili ise santralin ürettiği enerjinin bir kısmının tüketim

Tablo 11. Enerji başa baş noktaları (%)

Adana	Ankara	Erzurum	Gaziantep	İstanbul	İzmir	Trabzon
103	104	103	103	103	104	103

ihtiyacını karşılamadan doğrudan şebekeye verilmesine neden olmakta, bu da düşük bir enerji satış başlangıç noktasına yol açmaktadır.

Tablonun şehirler bazında incelenmesi, firmaların aylık enerji tüketim profillerinin, her şehirdeki GES üretim potansiyeli ile aynı düzeyde uyumlu olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, GES kurulumlarının etkinliği ve verimliliği üzerinde tüketim alışkanlıklarının yanı sıra bölgesel farklılıkların da önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Güç yüzdesinin %100 olması, santralin firmanın yıllık enerji tüketim miktarını tamamını karşıladığı noktayı göstermektedir. Çalışmada, şehirler ve firmalar arasındaki kıyaslama, %100 referans değerine göre yapılmıştır. Bu yaklaşım, santral kapasitelerinin ve kritik noktaların değerlendirilmesinde tutarlılık sağlamaktadır. Firmaların enerji başa baş noktaları Tablo 11’de verilmiştir.

Enerji başa baş noktası, güneş enerji santralinin ürettiği enerjinin firmanın yıllık enerji tüketimini tam olarak karşıladığı kapasiteyi ifade etmektedir. Bu çalışmada başa baş noktası, GES kapasitesinin zamanla santral verimliliğindeki azalmaya bağlı olarak %3-4 oranında kaymaktadır. Bu kaymanın nedeni, hesaplamaların 25 yıllık üretime göre yapılması ve uzun vadeli santral performansında verimin düşmesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 12’de on bir firmanın farklı şehirlerde GES ile ulaştıkları fatura başa baş noktalarını göstermektedir. Fatura başa baş noktaları firmanın enerji giderlerini tamamen ortadan kaldırdığı seviyeyi ifade eder.

Tablo incelendiğinde fatura başa baş noktalarının enerji başa baş noktalarından yüksek olduğu ve firmalara göre de değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni, enerji başa baş noktasının yalnızca enerji tüketimini karşıladığı halde, fatura başa baş noktalarının şebeke bağlantı maliyetleri, vergiler ve diğer sabit giderleri de dikkate almasıdır. F11 firması için Ankara ve Gaziantep’te fatura başa baş noktalarının enerji başa baş noktaları ile aynı olduğu görülmektedir. Bu durum, F11’in tüketim profilinin ve maliyet yapısının GES tasarımıyla mükemmel bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bu uyum, enerji bağımsızlığına ulaşmada ideal bir durumdur. Bu kapsamda tüketim-üretim profili uyumunun

Tablo 12. Fatura başa baş noktaları (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Adana	122	125	110	113	114	114	113	116	120	113	106
Ankara	124	123	114	117	118	118	117	120	123	117	104
Erzurum	124	122	112	116	117	116	115	119	122	116	105
Gaziantep	123	123	113	116	117	117	116	119	122	116	104
İstanbul	126	121	116	119	120	120	119	122	126	119	106
İzmir	123	124	112	115	116	116	115	118	122	115	105
Trabzon	122	125	112	115	115	116	115	118	121	115	106

Tablo 13. Bedelsiz enerji başlangıç noktaları (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Adana	195	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
Ankara	192	200	199	199	199	199	199	197	196	199	200
Erzurum	194	199	198	198	199	198	199	197	196	199	199
Gaziantep	191	199	199	199	198	199	199	198	197	199	199
İstanbul	189	199	198	198	197	198	197	196	195	198	199
İzmir	194	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
Trabzon	194	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199

Tablo 14. Enerji özgürlük noktaları (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Adana	>250	197	182	182	189	186	186	210	210	187	117
Ankara	>250	182	219	220	237	224	233	>250	>250	235	108
Erzurum	>250	180	247	248	212	>250	232	>250	>250	220	122
Gaziantep	>250	185	198	198	218	203	214	242	242	216	116
İstanbul	>250	183	235	236	245	239	241	>250	>250	243	124
İzmir	>250	187	197	198	195	202	191	215	218	193	112
Trabzon	>250	196	191	192	196	195	192	217	218	194	118

sabit giderlerin etkisini de azalttığı görülmektedir. Daha düşük bir fatura başa baş noktası, yatırımın daha kısa sürede geri dönmesine etki etmektedir.

Enerji özgürlük noktası, bir firmanın tüketim ihtiyacını karşılayan ve aynı zamanda maksimum üretim kapasitesine ulaşan GES'in, firmanın elektrik ihtiyacını dış bir kaynaktan destek almaksızın karşılamasını ifade etmektedir. Bu nokta, firmanın enerji bağımsızlığına ulaştığı seviyedir. Santralin yirmi beş yıllık çalışma sonucunda firmaların kendi enerji bağımsızlığını kazandığı noktalar Tablo 14'te görülmektedir.

Tabloda firmalar arasında %180 ile %250'den büyük değerler arasında geniş bir değişim görülmektedir. F11 firması güneş enerji üretim profiline en uygun firma olduğu için enerji özgürlük noktalarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. F1 için %250'den büyük

Tablo 15. Üretim aşım noktaları (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11
Adana	211	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215
Ankara	207	215	215	215	215	215	215	213	212	215	215
Erzurum	209	215	214	214	215	214	214	213	212	215	215
Gaziantep	207	215	215	215	215	215	215	214	213	215	215
İstanbul	205	215	214	214	213	213	213	212	210	213	215
İzmir	209	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215
Trabzon	210	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215

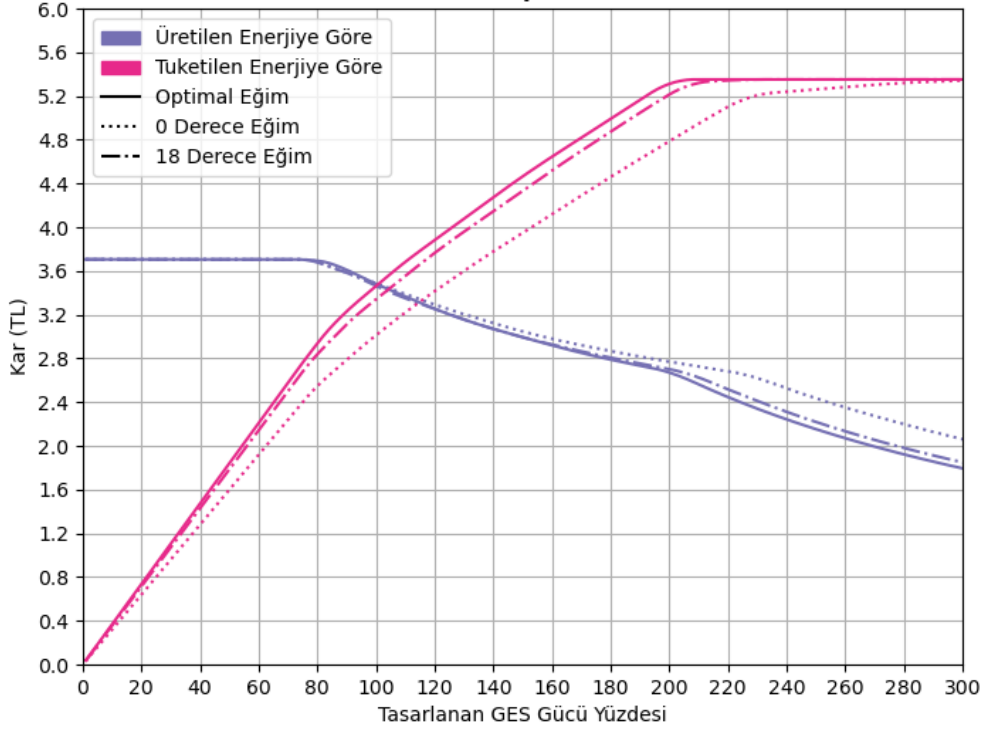
noktalar firmanın tüketim profiline göre GES'in bağımsızlık için oldukça büyük bir kapasite gerektirdiğini göstermektedir. Bu durum, her firmanın farklı tüketim profiline sahip olduğunu ve GES tasarımının bu profillere göre optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Şehirler bazında incelendiğinde bu firmaların genellikle Adana'da daha düşük kapasitelerde enerji özgürlük noktalarına sahip oldukları görülmektedir.

Üretim aşım noktası santral sahibinin ürettiği fazla enerjiden ekonomik getiri elde edemeyeceği anlamına gelir. Bu nokta; santral tasarımı, tüketim profili, şehir bazlı güneş potansiyeli ve enerji politikaları gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Tablo 15'teki sonuçlar, şehirler arasında üretim aşım noktalarının belirgin bir şekilde farklılık göstermediğini ancak özellikle İstanbul'da (%205–%213) diğer şehirlere göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Firmalar bazında incelendiğinde F11 firması, tüm şehirlerde üretim aşım noktasını %215'te yakalamıştır. Bu, firmanın tüketim profilinin ve santral tasarımının oldukça dengeli olduğunu ve fazla üretim nedeniyle ekonomik kayıpların minimize edildiğini göstermektedir. Diğer firmalar arasında ise F1 ve F8'in bazı şehirlerde (%207–%213) daha düşük üretim aşım noktalarına ulaştığı görülmektedir. Bu, bu firmaların tüketim profillerinin santral tasarımıyla yeterince uyumlu olmadığını göstermektedir.

Üretim aşım noktası, şebeke operatörlerinin ve devletin enerji politikalarına bağlıdır. Fazla enerjinin şebekeye verilmesi durumunda operatör, genellikle sabit bir tarife uygular. Ancak, belirli bir noktadan sonra operatörün ek enerji için ödeme yapmaması, firmaların bu noktada ekonomik zarar yaşamasına neden olmaktadır.

3.3. Panel Eğiminin GES Performansına Etkisi

Panellerin güneş ışığına tam dik konumda olması maksimum üretimin olduğu noktadır. Bu bağlamda F10 firmasının Ankara konumunda farklı panel eğimleri için kWh başına kâr üzerindeki etkisi Şekil 17'de verilmiştir. Bu analizde, kurulum maliyeti hesaba

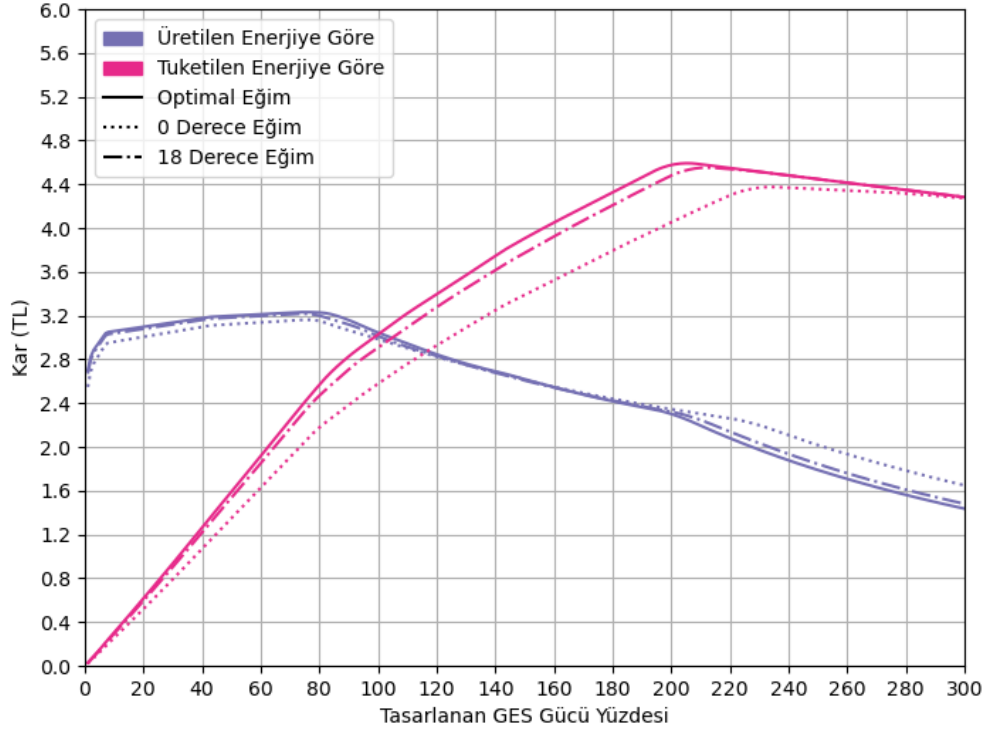


Şekil 17. F10 firmasının Ankara konumunda elde ettiği KWh başına kar

katılmadan yalnızca enerji alım gideri ve satım gelirleri dikkate alınmıştır. Grafik, tasarlanan GES gücü yüzdesine bağlı olarak elde edilen kârın "üretilen enerjiye göre" ve "tüketilen enerjiye göre" iki farklı yaklaşımla analizini sunmaktadır.

Grafik incelendiğinde, optimal eğimde kWh başına kârın, diğer eğimlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, optimal eğimin güneş ışınlarının daha verimli bir şekilde panellere ulaşmasını sağladığını ve enerji üretim kapasitesini artırdığının kanıtıdır. Tüketilen enerjiye göre yapılan analizde kâr değerleri belirgin şekilde daha yüksektir. Bunun nedeni, tüketilen enerjinin şebekeye satılmaktan daha ekonomik bir fayda sağlamasıdır. Enerji alım maliyetinden tasarruf edildiği için tüketim odaklı bir yaklaşım daha avantajlı görünmektedir. Üretilen enerjiye göre analizinde kâr değerleri özellikle yüksek GES kapasite oranlarında düşüş göstermektedir. Bu durum, şebekeye verilen fazla enerjinin ekonomik olarak daha düşük bir değere sahip olmasından ve üretim aşım noktasına ulaşılmasından kaynaklanmaktadır.

Eğimin 0° olduğu durumda, kâr değerleri optimal eğim ve 18° eğimden daha düşüktür. Bu durum, panellerin düz bir şekilde yerleştirilmesinin güneş ışınlarından maksimum fayda sağlamadığı ve bu nedenle enerji üretiminin sınırlı kaldığını göstermektedir. Özellikle düşük



Şekil 18. F10 firmasının Ankara konumunda elde ettiği KWh başına net kar

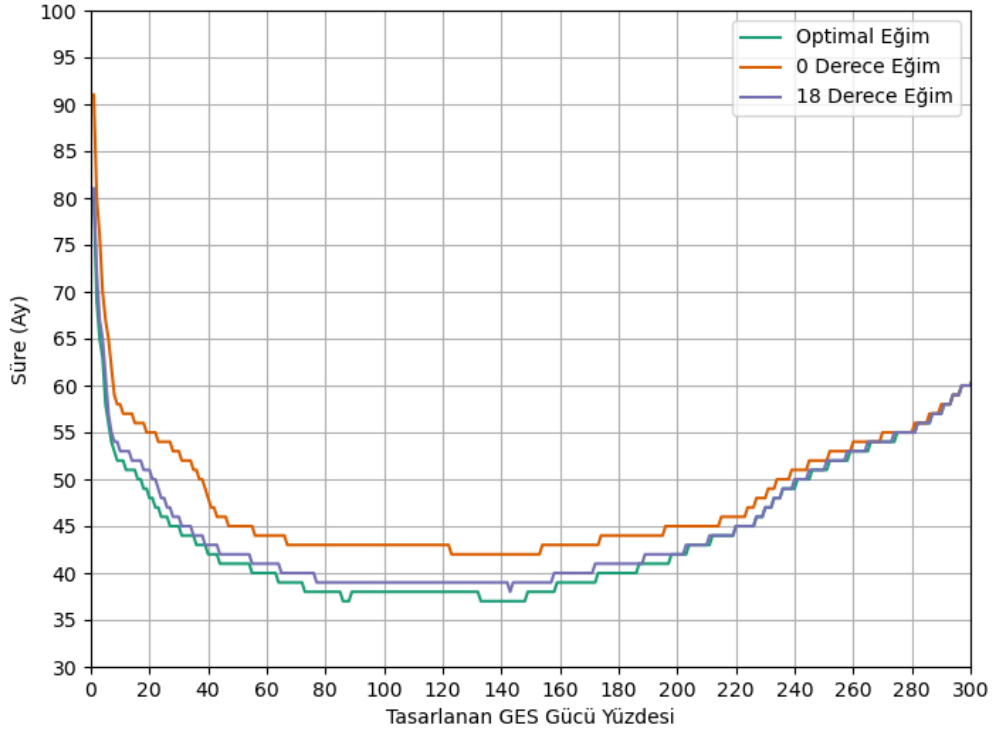
GES kapasitelerinde 0° eğim ile kâr değerleri, diğer eğimlere kıyasla daha az avantaj sağlamaktadır.

Eğim 18° iken, 0° eğimden daha iyi performans göstermektedir ancak optimal eğim kadar yüksek kâr sağlayamamaktadır. Bu durum, eğimin artışının enerji üretimine olumlu etkisini göstermekte ancak optimal eğimden sapmanın verimliliği azalttığını kanıtlamaktadır.

GES gücü, %72'den sonra enerji satış başlangıç noktası olduğu için bu noktadan sonra şebekeye verilen fazla enerjinin ekonomik değerinin düşük olmasından dolayı kar/kWh oranının azalmaya başladığı gözlemlenmektedir. Grafikte görülen ikinci kırılma noktası üretim aşım noktasıdır. Bu noktadan sonra üretim artsa da fazla enerji bedeli olmadığından karda azalma yaşanmaktadır. Bu durum kritik noktalarının önemini göstermektedir.

F10 firmasının Ankara'da farklı eğimlerde tasarlanan güneş enerji santrali için kWh başına net kârın, kurulum maliyetleri dahil edilerek incelenmiş ve Şekil 18'de verilmiştir. Bu analiz, tasarlanan GES gücü yüzdesine bağlı olarak üretilen ve tüketilen enerjiye göre elde edilen net ekonomik faydayı ortaya koymaktadır.

Yatırım maliyetleri, GES kapasitesinin başlangıçta devreye alınmasından itibaren net kâr üzerinde baskı oluşturmaktadır. Özellikle tasarlanan kurulu gücün yaklaşık %10'u



Şekil 19. F10 firmasının Ankara konumunda panel eğimlerine göre amorti süreleri

kapasiteye ulaştığında bu maliyetlerin kârlılık üzerindeki etkisi ciddi bir şekilde görünür hale gelmektedir. Bu noktada, enerji üretim maliyetleri ile yatırım geri ödeme süresi arasındaki ilişki belirginleşmektedir. %72 kapasite aşıldığında enerji başa baş noktasına ulaşılır ve bu noktadan itibaren bir miktar enerji sisteme verilmeye başlanır. Ancak bu sisteme verilen enerjinin ekonomik değeri, sistemden çekilen enerjiye kıyasla daha azdır. Bu nedenle, enerji satışının başladığı noktada kârlılıktaki artış eğilimi azalmaya başlar.

Ankara'da bulunan F10 firması için tasarlanan GES gücü yüzdesine bağlı olarak yatırımın geri ödeme süresini gösteren grafik Şekil 19'da verilmiştir. Grafiğin başlangıç bölgesinde amorti sürelerinde hızlı bir düşüş görülmektedir. Yatırımın bu bölgede ekonomik olarak uygun olmadığı, daha yüksek kapasitelerde kuruluma yönelmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Yaklaşık %80-140 kapasite aralığında amorti süresi minimum değerlere yaklaşmaktadır. Bu nokta, firmanın enerji ihtiyacını çoğunu veya tamamını karşılayan kurulum kapasitelerinin genellikle ekonomik geri dönüş süresini sağladığını göstermektedir. Yaklaşık %150'den itibaren amorti süresi tekrar artmaya başlamaktadır. Bu, fazla enerji üretiminin ekonomik verimliliği azalttığını ve yatırımın geri dönüşünün uzadığını göstermektedir.

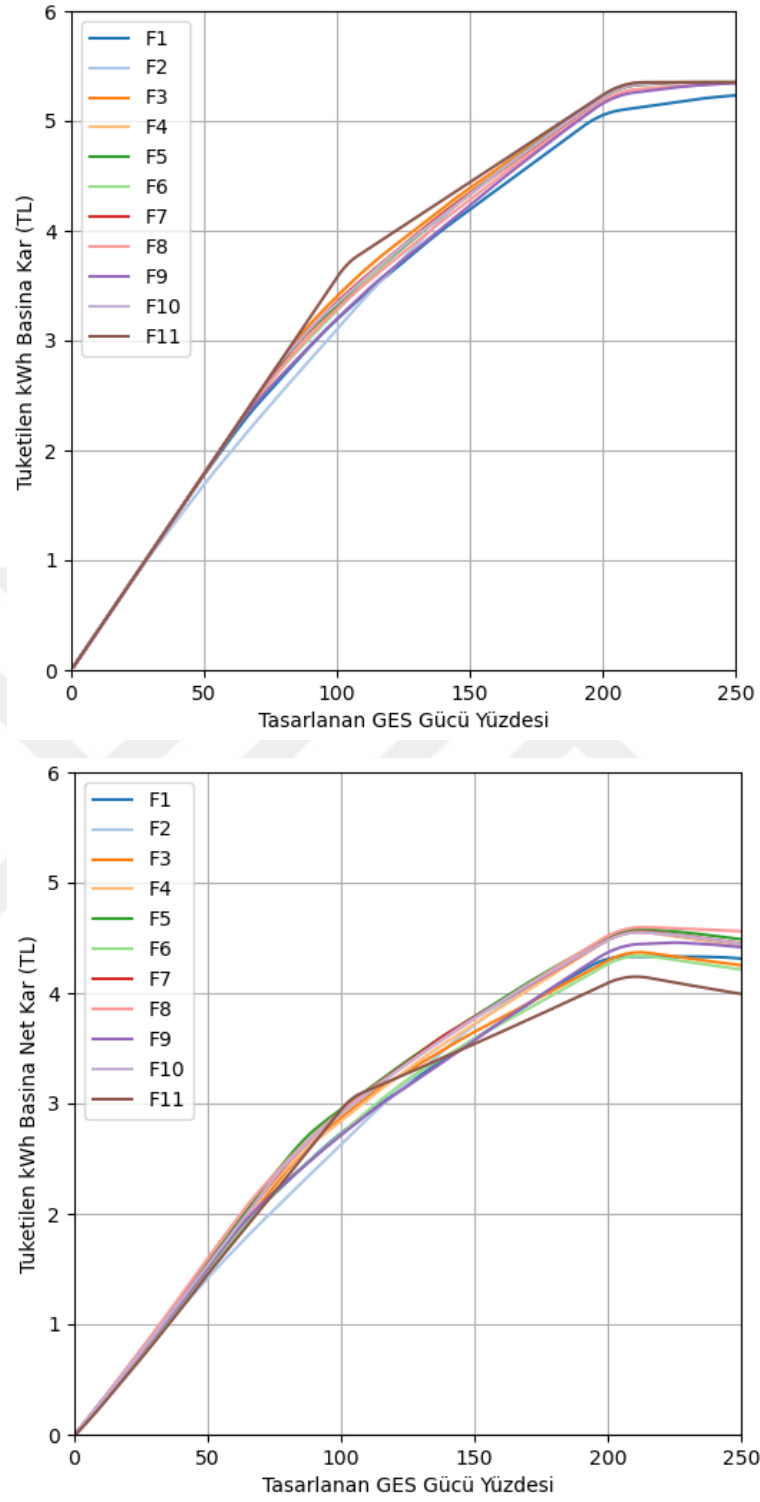
En düşük amortisman süreleri, optimum panel eğiminde elde edilmektedir. Bu, güneş radyasyonundan en yüksek verimle faydalandığını ifade eder. Optimum eğim açısında bu sürenin düşmesi, yatırımın doğru tasarlanması durumunda önemli mali avantajlar sağlanabileceğini gösterir. 18 derece eğim, optimum eğime yakın sonuçlar vermektedir ancak minimum amortisman süresi açısından biraz daha uzun bir geri dönüş süresine sahiptir. 0 derece eğimde, amorti süreleri diğer seçeneklere göre daha uzundur. Bu, düz panellerin güneş radyasyonunu etkili bir şekilde yakalayamaması ile ilgilidir.

Varo-Martínez ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada FV panellerin kurulu güç kapasitesi, yönelim açısı, eğim açısı ve gölge seviyeleri gibi faktörlerin sistem verimliliği ve yatırım geri dönüşü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir sonucunda öz tüketim amaçlı FV sistemlerinin doğru boyutlandırılmasının, yatırımın geri dönüş süresi ve enerji verimliliği açısından kritik bir faktör olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada da doğru panel eğiminin karlılık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak panel eğiminin santral karlılığı ve verimi üzerindeki önemi bakımından sonuçlar paralellik göstermektedir.

3.4. Firmalara Göre Bulguların İncelenmesi

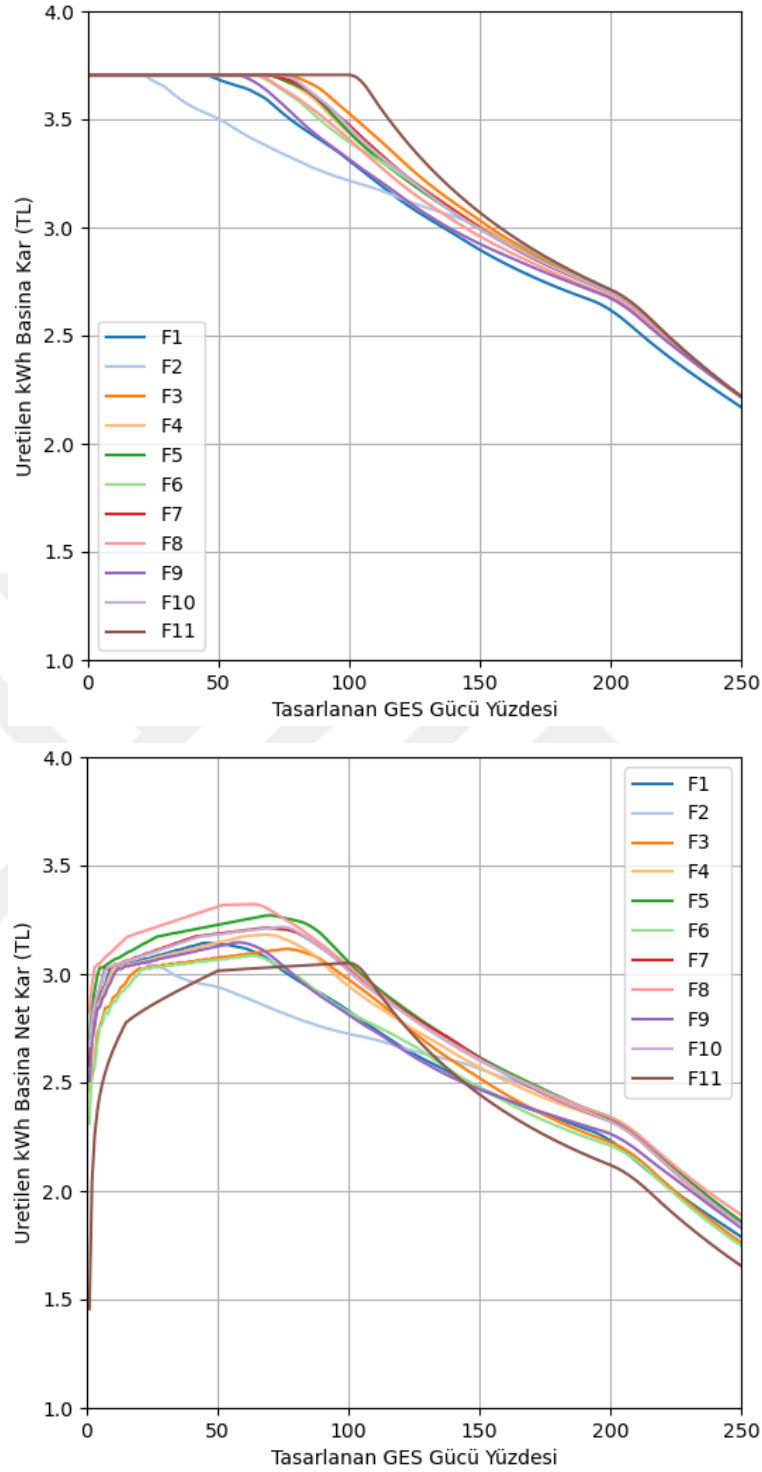
Bu bölümde, Ankara konumunda yer alan 11 firmanın 25 yıllık GES tasarımına yönelik ekonomik analizleri incelenmiştir. Her bir firma için tasarlanan GES gücüne bağlı olarak ortaya çıkan kWh başına kâr, kWh başına net kâr ve yatırımın geri dönüş süreleri grafiksel olarak sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Analizler kapsamında farklı firmaların enerji tüketim profillerine bağlı olarak ekonomik performanslarındaki değişimler karşılaştırılmıştır. Bu sayede, firmaların GES yatırım kararlarına yön verebilecek temel ekonomik veriler ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda 11 firmanın kW başına karını gösteren sonuçlar Şekil 20’de verilmiştir.

Grafik, düşük GES kapasitesiyle başlanıldığında, kWh başına kârın hızla arttığını göstermektedir. Bu durumun nedeni düşük kapasitelerde üretilen enerjinin doğrudan firmanın enerji tüketimini karşılaması ve enerji faturalarında ciddi tasarruf sağlamasıdır. Tüm firmaların eğrileri, GES kapasitesinin tüketimin çoğunu veya tamamını karşıladığı noktada kâr artışının yavaşladığını göstermektedir. Bu noktadan itibaren, firmalar enerji ihtiyaçlarını tamamen karşılamakta ve fazla enerji üretmeye başlamaktadır. Ancak, fazla enerjinin şebekeye satılması durumunda elde edilen gelir, enerji tüketiminden sağlanan tasarrufa kıyasla daha düşüktür. Net kar grafiği yatırım maliyetlerinin hesaba dahil



Şekil 20. Firmaların tüketilen KWh başına kar ve net kar grafikleri

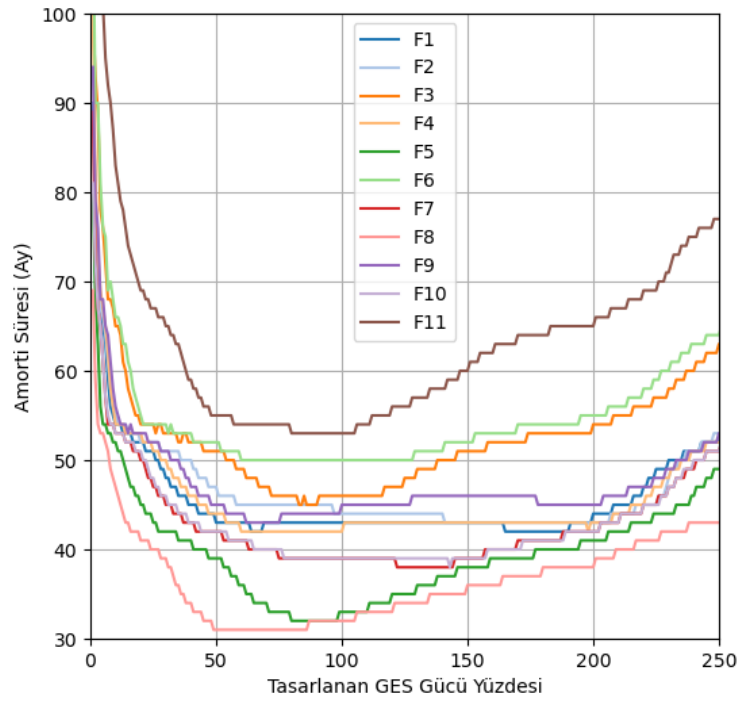
edilmesiyle oluşmuştur. Her firmanın tüketim güçleri ve aylık tüketim profillerinin farklı olmasının GES'ten ekonomik açıdan sağladığı faydanın da farklı olduğu görülmüştür.



Şekil 21. Firmaların üretilen KWh başına kar ve net kar grafikleri

Başka bir yaklaşım olarak üretilen enerjiye göre kW başına kar ve net kar grafiği Şekil 21’de verilmektedir.

Bu grafiklerde, Ankara konumunda bulunan 11 firmanın 25 yıl sonunda üretilen enerjiye göre sırasıyla kWh başına kâr ve kWh başına net kâr değerleri analiz edilmiştir. İlk



Şekil 22. Firmaların amorti süreleri

grafik enerji satış fiyatlarına dayalı kârları, ikinci grafik ise enerji fiyatlarına ek olarak yatırım maliyetlerini de hesaba katmaktadır. Her iki grafik, tasarlanan GES kapasitesinin kârlılık üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Yaklaşık %0-100 aralığında tüm firmalar için kWh başına kâr, düşük GES kapasitesinde maksimum düzeydedir. Kapasite %100'e yaklaştıkça kWh başına kâr değerleri azalmaya başlamaktadır.

Bunun nedeni üretilen enerjinin şebekeye satışıyla elde edilen gelir, kendi enerji tüketiminden sağlanan tasarruftan daha düşük kalmaktadır. Bu nokta enerji satış başlangıç noktasının önemini vurgulamaktadır. Farklı firmaların kâr eğrilerindeki ayrışmalar firmaların tüketim profillerine göre şebeke bağımlılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu durum kritik noktaların her firmaya özgü olduğunu göstermektedir.

Yaklaşık %100-250 aralığında kWh başına kâr, tüm firmalarda belirgin bir şekilde azalmaktadır. Bu durum artan GES kapasitesine rağmen şebekeye satılan enerjiden elde edilen gelirlerin marjinal faydasının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle yaklaşık %200 kapasite üzerinde firmaların eğrileri hızla düşüş göstermektedir. Bu, şebekeye fazla enerji satışı yapıldığında elde edilen kârın enerji tüketim tasarrufuna oranla çok daha az avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu nokta bedelsiz enerji başlangıç noktasıdır.

Net kar grafiği yatırım maliyetlerinin etkilerini göstermektedir. F11 firması GES üretimiyle uyumlu olsa da yaklaşık %0-100 aralığında düşük kar sağlamaktadır. Bu durum F11 firmasının diğer firmalara göre düşük tüketim değeriinde olmasından kaynaklanır. Yapılan çalışmada yüksek tüketim değeriilerine sahip firmaların ekonomik açıdan daha fazla fayda sağladığı sonucuna varılmıştır.

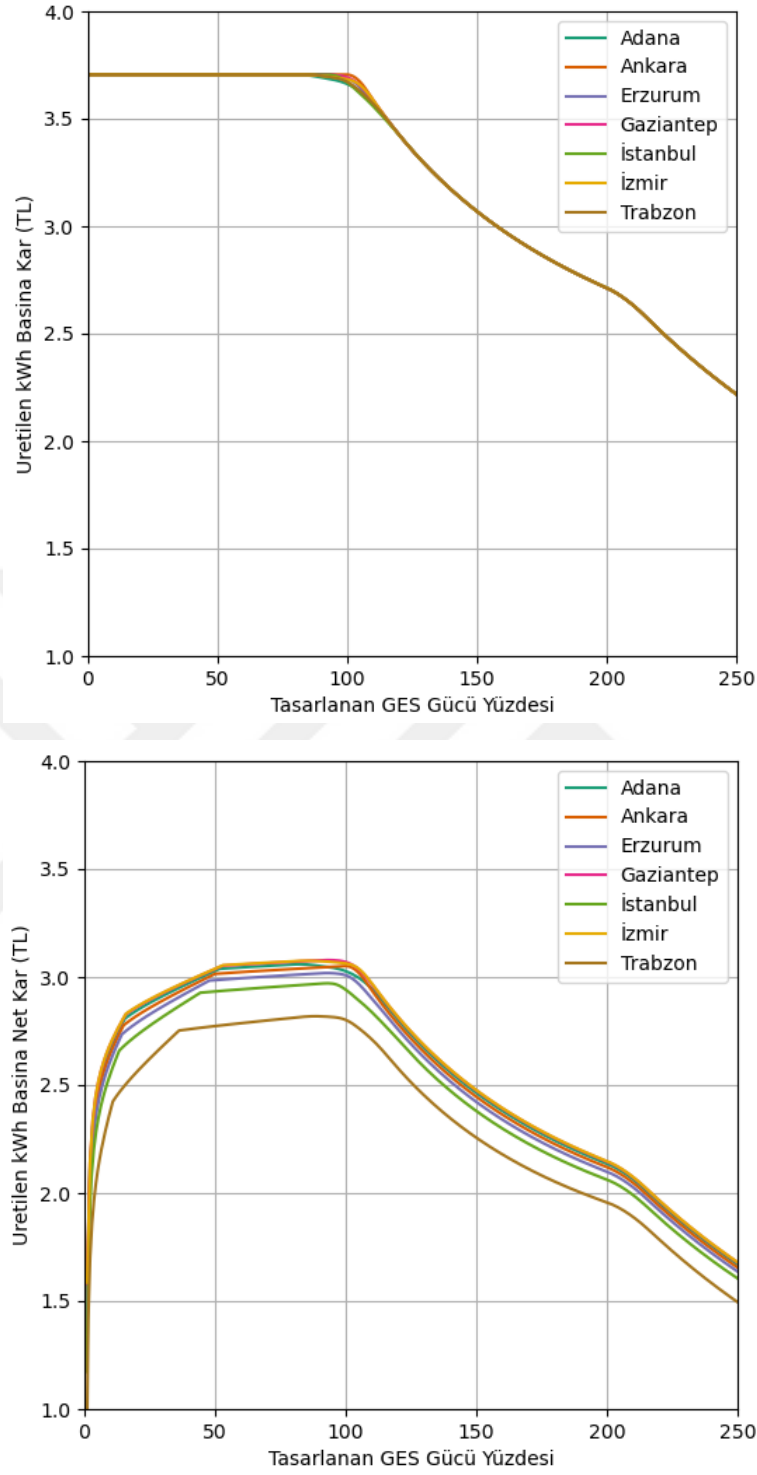
Firmaların ekonomik analizine ek olarak amorti süreleri hesaplanmış grafiği Şekil 22’de verilmiştir. F8 firması, kurulu gücü en yüksek firma olmasına rağmen en kısa amorti süresine sahiptir. Bu durum, F8 firmasının yüksek enerji tüketimiyle GES üretimini etkili bir şekilde entegre ettiğini ve üretilen enerjiden maksimum ekonomik fayda sağladığını göstermektedir.

Yüksek enerji tüketimi, GES üretimi ile tasarruf edilen enerji maliyetlerini artırarak amorti süresini kısaltmıştır. F5 firması, enerji tüketimi açısından ikinci sırada olmasına rağmen amorti süresi bakımından F8’den sonra en iyi performansa sahiptir. F11 firması, tüketim değeri en düşük firma olmasına rağmen GES üretimi ile uyumlu bir tüketime sahiptir. Ancak bu, yatırımın geri dönüş süresi açısından ekonomik avantaj sağlamamıştır.

Huseinbegović ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışma, enerji depolama sisteminin bulunmadığı durumlarda, fotovoltaik (FV) sistemlerin kurulu gücünün optimize edilmesinin önemli bir hedef olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada ise, şebeke operatörü ile mahsuplaşmanın mümkün olduğu senaryolarda, FV sistemlerin kurulu gücünün optimal boyutlandırılmasına yönelik elde edilen sonuçlar sunulmuş ve bu sonuçlar, optimal boyutlandırmanın önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular, FV sistemlerin kurulu gücünün optimal boyutlandırılmasının, enerji yönetimi ve ekonomik verimlilik açısından bir gereklilik olduğunu göstermektedir.

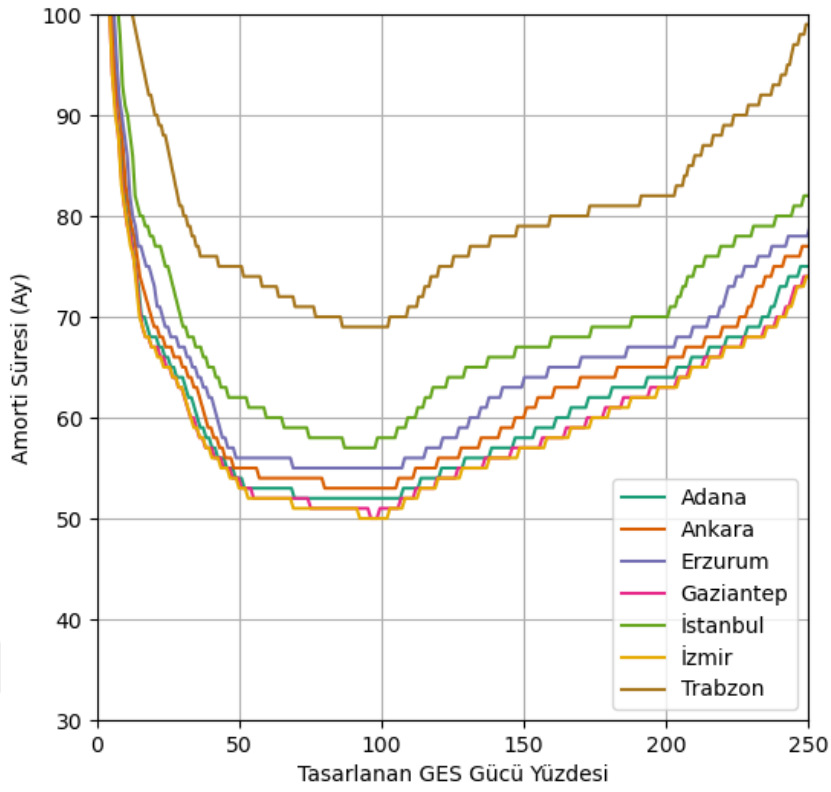
3.5. Konumlara Göre Bulguların İncelenmesi

Bu bölümde, çalışma kapsamında analiz edilen farklı şehirlerdeki organize sanayi bölgelerindeki GES yatırımlarının ekonomik performansları karşılaştırılmaktadır. Her bir organize sanayi bölgesi için 25 yıllık bir dönem baz alınarak, üretilen enerjiye dayalı kar, yatırım maliyetlerinin de dahil edilmesiyle hesaplanan net kar ve amorti süreleri incelenmiştir. Çalışmada, her bir bölgenin güneşlenme potansiyeli, enerji tüketim profili ve ekonomik değişkenleri dikkate alınarak, GES yatırımlarının konum bazlı uygunluk düzeyleri değerlendirilmiştir.



Şekil 23. F11 firması konum bazlı kWh başına kar ve net kar grafiği

Şekil 23'te F11 firmasının üretilen enerjiye göre kW başına kar ve net kar grafikleri verilmiştir. F11 firması Ankara'da bir Organize Sanayi Bölgesi güneş enerji üretim verilerinden üretilen tüketim verilerine sahip olduğu için kWh başına kar grafiği incelendiğinde en çok Ankara'da karlılık gösterdiği ve sadece tasarlanan GES gücünün



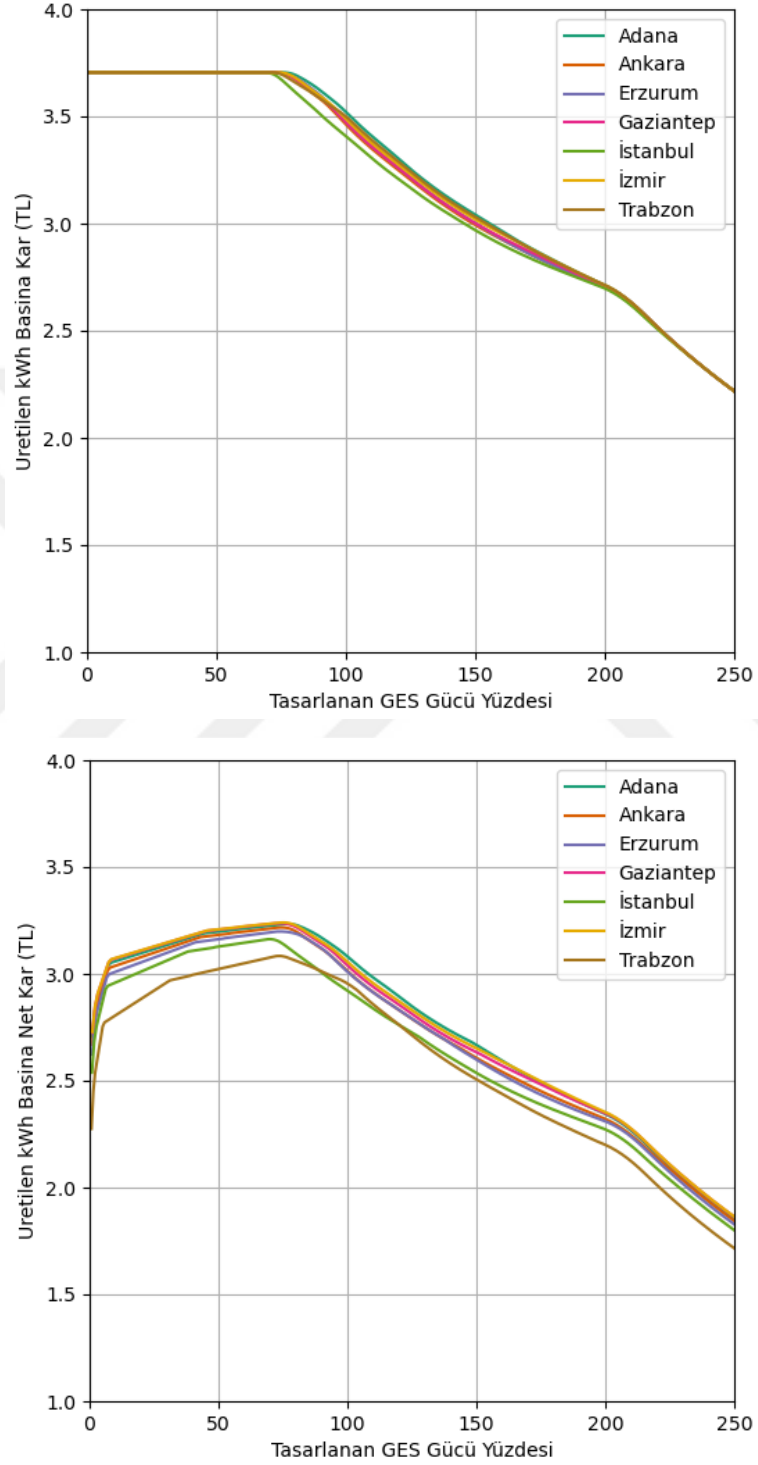
Şekil 24. F11 firması konum bazlı amorti süreleri

%100 civarında diğer şehirlerden farkının açıldığı görülmüştür. Yatırım maliyetleri de göz önünde bulundurulduğunda net kar grafiğinde İzmir, Ankara, Gaziantep ve Adana şehirlerinde daha çok marjinal fayda sağladığı görülmektedir. Trabzon, İstanbul ve Erzurum şehirlerinin nispeten düşük güneş potansiyeli bu şehirde GES kurulum karlılığını düşürmektedir.

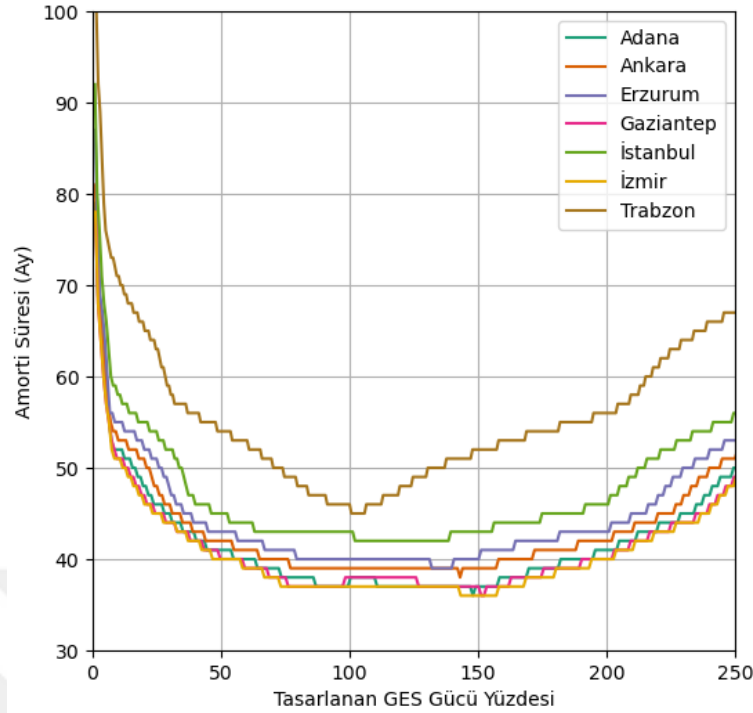
F11 firmasının ekonomik analizini amorti süreleri üzerinden değerlendirmek için Şekil 24'te amorti süreleri verilmiştir. Amorti süreleri grafiğinden elde edilen bulgulara göre, F11 firmasının İzmir'de bir organize sanayi bölgesinde (OSB) faaliyet göstermesi durumunda, yatırımın geri dönüş süresinin en kısa süreye sahip olacağı görülmüştür. Tasarlanan GES gücünün %100 kapasitesinde kurulduğu varsayıldığında, F11 firmasının yatırımı yaklaşık 50 ayda amorti edebileceği öngörülmektedir. Amortisman süresinin ardından, firma santralin verimliliğine odaklanarak yirmi beş yıllık GES ömrü boyunca kWh başına yaklaşık 3,1 TL kar elde edebilecektir.

Bu çalışma, aynı zamanda F11 firmasının enerji tüketim profiline sahip bir işletmenin, en uygun şehirleri belirlemesine olanak sağlamaktadır. Analizler, üç farklı yaklaşımla şehirlerin ekonomik ve enerji potansiyeli açısından değerlendirilmesi için yol göstericidir.

İncelemeler, dokuz gerçek firmanın ortalaması alınarak oluşturulan F10 firması için yapıldığında sonuçlar Şekil 25'teki gibidir.



Şekil 25. F10 firması konum bazlı kWh başına kar ve net kar grafiği



Şekil 26. F10 firması konum bazlı amorti süreleri

Grafik incelendiğinde, F10 firması için kWh başına karın en yüksek olduğu şehir, tasarlanan GES gücünün yaklaşık %70-170 aralığında Adana olarak belirlenmiştir. Aynı aralıkta, kWh başına karın en düşük olduğu şehir ise İstanbul olarak tespit edilmiştir. Yatırım maliyetlerinin dahil edildiği net kar grafiği incelendiğinde, Adana'nın genel olarak daha yüksek bir karlılık sağladığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, karlılığın en düşük olduğu şehir genellikle Trabzon olmasına rağmen, tasarlanan GES gücü yüzdelere bağlı olarak bazı değişiklikler dikkat çekmektedir. Örneğin, tasarlanan GES gücünün %100 kapasitesinde olduğu durumda Trabzon'un İstanbul'a kıyasla daha yüksek bir karlılık sağladığı görülmüştür. Bu bulgular, bölgesel farklılıkların yatırım ve karlılık üzerindeki etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

F10 firması için farklı şehirlerde tasarlanan GES projelerinin amorti süreleri analiz edilmiştir. Bu kapsamda, yatırım maliyetleri, enerji üretim potansiyeli ve bölgesel tüketim profilleri dikkate alınarak, amortisman sürelerinin şehirler arasında nasıl değiştiği incelenmiştir. Amorti süreleri, bir yatırımın geri dönüş süresini ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmek açısından önemlidir. F10 firmasının amorti sürelerini içeren grafik, farklı şehirlerdeki yatırımın ekonomik performansını karşılaştırmalı olarak sunarak, GES kurulumu için en uygun lokasyonların belirlenmesine katkı sağlamaktadır. F10 firmasının amorti süreleri grafiği Şekil 26'da verilmiştir.

KWh başına net kar grafiğinde, tasarlanan GES gücünün %100 kapasite ile kurulduğu varsayıldığında, en düşük kârlılığın İstanbul'da olduğu, ancak amorti süreleri açısından aynı kapasitede en uzun geri dönüş süresinin Trabzon'da gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte, İzmir, Adana ve Gaziantep şehirleri, yatırımı kısa sürede amorti etme konusunda öne çıkmaktadır. Bu durum, GES yatırımları yapılırken yalnızca amorti sürelerine odaklanılmaması gerektiğini, ekonomik değerlendirmelerde farklı yaklaşımların ve kriterlerin de dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.



4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, dokuz farklı tüketiciye ait gerçek tüketim verileri ile iki modellenmiş tüketici verilerine dayalı olarak GES tasarımı ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreci, saatlik ve aylık bazda üretim hesaplamalarına dayalı iki aşamadan oluşmuştur. Ekonomik analiz kapsamında ise tüketim gereksinimlerini karşılayan GES kurulu gücü, enerji denge noktaları, 25 yıllık fatura hesaplamaları, panel eğiminin enerji üretimine etkisi, tüketim profillerinin ekonomik getirileri ve coğrafi konumların yatırımın geri dönüş süresi üzerindeki etkileri Kar/KWh, Net Kar/KWh ve Amorti Süreleri cinsinden incelenmiştir. Bu kapsamda, yıllık enerji tüketimini karşılamak için her firmanın ihtiyaç duyduğu optimum GES kapasiteleri belirlenmiş ve aşağıdaki önemli bulgular elde edilmiştir:

- GES kurulu güç gereksinimleri, tüketici firmaların coğrafi konumlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir.
- Her firmanın yıllık enerji tüketim miktarı farklı olduğundan, gereksinim duyulan GES kapasiteleri değişiklik göstermektedir.

Firmaların uzun vadeli enerji dengeleri ve fatura analizleri doğrultusunda aşağıdaki kritik noktalar tespit edilmiştir:

- Enerji Satış Başlangıç Noktası
- Enerji Başa Baş Noktası
- Bedelsiz Enerji Başlangıç Noktası
- Enerji Özgürlük Noktası
- Üretim Aşım Noktası
- Fatura Başa Baş Noktası

Çalışmada panel eğiminin GES performansına etkisi incelenmiş ve optimum panel eğiminin belirlenmesinin enerji üretim verimliliğini artırdığı, dolayısıyla ekonomik kazancı maksimize ettiği görülmüştür. Özellikle, amortisman süresinin azalmasında optimum eğim açısının belirlenmesinin kritik bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, GES tasarım sürecinde panel eğiminin bölgesel güneş ışınlımı koşullarına uygun şekilde dikkatle hesaplanmasının önemini vurgulamaktadır.

Tüketici profillerinin ekonomik analizi sonucunda, her firmanın enerji tüketim kapasitesi ve aylık tüketim profillerinin farklı olmasının, GES'ten sağlanan ekonomik

faydayı doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Çalışma bulguları, güneş enerjisi santrali kurulmadan önce tüketim profillerinin ayrıntılı olarak analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymuş ve "GES'ten en fazla ekonomik fayda sağlayan tüketici profili nasıl olmalıdır?" sorusuna yanıt sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yüksek enerji tüketimine sahip ve güneş enerjisi üretimi ile uyumlu tüketim profili sergileyen firmaların en avantajlı konumda olduğu görülmüştür.

Ayrıca, ekonomik fayda açısından öncelikli hedefin tüketim ihtiyaçlarını karşılamak olduğu belirlenmiştir. %100 tüketim kapasitesinin üzerinde tasarlanan GES sistemlerinde, şebekeye verilen fazla enerjinin oranı arttıkça ekonomik getirinin azaldığı tespit edilmiştir.

Son olarak, GES yatırımının ekonomik getirileri üzerindeki coğrafi konum etkileri incelenmiş ve tüketici profillerinin yerel üretim profilleriyle uyumlu olmaması durumunda kârlılığın azaldığı görülmüştür. Çalışma bulguları, aynı tüketim profilini sürdürecektir şekilde farklı şehirlerde şube açmayı planlayan firmaların, potansiyel GES yatırımlarının sonuçlarını öngörebilmesine olanak sağlamaktadır.

5. ÖNERİLER

Sürdürülebilir FV santral kurulumlarının sağlanabilmesi için santralin kurulumu ve işletme sürecinde karşılaşılabilecek parametreler ile maliyetlerin dikkate alınarak planlama ve yönetim süreçlerinin yürütülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda,

- Yapılan çalışmada tespit edilen altı bileşenin daha detaylı incelenmesi bu noktaların kurulum maliyetleri ve ekonomik karlılık üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koyabilir.
- Çalışmada %100 tüketim kapasitesinin üzerinde tasarlanan GES'lerde şebekeye enerji verme oranı arttıkça ekonomik faydanın azaldığı tespit edilmiştir. Ekonomik faydayı artırmak için fazla enerjinin depolanması veya enerji paylaşım modellerinin geliştirilmesi denge noktalarını ne yönde etkilediği araştırılabilir.
- Bu çalışma sonuçları tüketim profili GES üretim profili ile uyumluluğun ekonomik karlılık üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. GES etkinliği ve verimliliği üzerinde talep tarafı yönetimi kullanılarak etkileri araştırılabilir.
- Çalışmadaki fatura başa baş noktalarının enerji başa baş noktalarından yüksek olmasının tespit edilmesi GES tasarımlarının enerji tüketimini karşıladığı halde tüm maliyetleri kapsayamadığını göstermektedir. Bu nedenle, depolama sistemleri, enerji yönetim stratejileri veya sabit maliyetleri azaltmaya yönelik politika önerileri üzerinde çalışmalar yapılabilir.
- Bu çalışmada aylık ve yıllık bazda enerji tüketimi göz önünde bulundurulmuştur. Saatlik ve günlük bazda üretim ve tüketim eşleşmeyebilir. Özellikle güneş enerjisinin en fazla üretildiği saatlerde (gündüz) tüketim düşükse, fazla enerji şebekeye verilir ve kayıplara neden olur. Bu nedenle yük uyumsuzluğu ortaya çıkabilir. Tüketim verilerinin saatlik ve günlük analiz edilmesi daha detaylı sonuçlar verebilir.
- Yapılan çalışmada maliyet ve fatura hesaplamalarında işletme bakım maliyetleri, değişen elektrik fiyatları ve tarifeler göz önünde bulundurulmamıştır. Bu değişkenler eklenerek etkileri detaylı analiz edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abou Jieb, Y., & Hossain, E. (2022). *Photovoltaic Systems*. Springer International Publishing.
- Bošnjaković, M., Čikić, A., & Zlatunić, B. (2021). Cost-benefit analysis of small-scale rooftop PV systems: The case of dragotin, Croatia. *Applied Sciences*, 11(19), 9318.
- Bradshaw, M. J. (2009). The geopolitics of global energy security. *Geography Compass*, 3(5), 1920-1937.
- Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2023). Evaluating the techno-economic effect of pricing and consumption parameters on the power-to-energy ratio for sizing photovoltaic-battery systems: an assessment of prosumers in the Mediterranean Area. *Energies*, 16(10), 4073.
- Cieślak, K. J. (2024). Profitability Analysis of a Prosumer Photovoltaic Installation in Light of Changing Electricity Billing Regulations in Poland. *Energies*, 17(15).
- Demirgil, B., & Birol, Y. E. (2020). Yenilenebilir enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: Türkiye için bir Toda-Yamamoto nedensellik analizi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 21(1), 68-83.
- Deniz, E. (2013). Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar. *Elektrik Mühendisleri Odası*.
- Elkholy, A., Nafeh, A. E. S. A., & Fahmy, F. H. (2022). Impact of time resolution averaging analysis on integrated photovoltaic with office buildings and grid interaction metrics: Case study. *Energy and Buildings*, 257.
- EPDK. (2023). *Elektrik Piyasası 2023 Yılı Piyasa Gelişim Raporu*. Ankara.
- EPIAŞ. (2024). *Elektrik Piyasası Aralık Ayı Sektör Raporu*. Ankara.
- Erkoç, R. (2019). *Güneş Enerji Santrallerinin Modellenmesi, Ekonomik Analizi Ve Değerlendirme: Almanya Ve Türkiye Uygulamaları*. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ordu.
- Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499–1511.
- Fuster-Palop, E., Prades-Gil, C., Masip, X., Viana-Fons, J. D., & Payá, J. (2023). Techno-economic potential of urban photovoltaics: Comparison of net billing and net metering in a Mediterranean municipality. *Energies*, 16, 3564.
- Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 747–753.

- Gergely, L. Z., Barancsik, L., & Horváth, M. (2025). Beyond net zero energy buildings: Load profile analysis and community aggregation for improved load matching. *Applied Energy*, 379, 124934.
- Gökgöz, F., & Güvercin, M. T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 226–239.
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Jaszczur, M., Ali, B. M., Abass, R. A., & Salman, H. M. (2024). Optimizing solar energy utilization: insights on energy storage battery capacities and residential self-sufficiency. *Energy Systems*, 1–37.
- Hu, A., Levis, S., Meehl, G. A., Han, W., Washington, W. M., Oleson, K. W., Van Ruijven, B. J., He, M., & Strand, W. G. (2016). Impact of solar panels on global climate. *Nature climate change*, 6, 290–294.
- Huld, T., & Gracia Amillo, A. M. (2015). Estimating PV module performance over large geographical regions: The role of irradiance, air temperature, wind speed and solar spectrum. *Energies*, 8, 5159–5181.
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar energy*, 86, 1803–1815.
- Huseinbegović, S., Smajkić, A., Ahmethodžić, L., Smaka, S., & Gajip, S. (2024). Optimal building integrated photovoltaic sizing approach according to load profile under zero export restrictions with real data validation. *Renewable Energy Focus*, 50, 100605.
- IRENA. (2024). *Renewable Energy Statistics*. The International Renewable Energy Agency.
- Jaiswal, K. K., Chowdhury, C. R., Yadav, D., Verma, R., Dutta, S., & Jaiswal, K. S. (2022). Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, 7, 100118.
- Jeffry, L., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M., & Show, P. L. (2021). Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel*, 301, 121017.
- Johnson, F. S. (1954). The solar constant. *Journal of Atmospheric Sciences*, 11, 431–439.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62, 1092–1105.
- Khamharnphol, R., Kamdar, I., Waewsak, J., Chiwamongkhonkarn, S., Khunpetcha, S., Kongruang, C., & Gagnon, Y. (2023). Techno-economic assessment of a 100 kWp solar rooftop PV system for five hospitals in Central Southern Thailand. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12, 77–86.
- Khan, M. I., Al Huneidi, D. I., Asfand, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Climate Change Implications for Optimal Sizing of Residential Rooftop Solar Photovoltaic Systems in Qatar. *Sustainability*, 15, 16815.

- Kolantla, D., Mikkili, S., Pendem, S. R., & Desai, A. A. (2020). Critical review on various inverter topologies for PV system architectures. *IET Renewable Power Generation*, 14, 3418–3438.
- Kumar, K., Soomro, A. M., Kumar, M., Kumar, L., & Arici, M. (2023). Sustainable on-grid solar photovoltaic feasibility assessment for industrial load. *Journal of Central South University*, 30, 3575–3585.
- Lara, E. G., & Díaz, A. V. (2024). Sizing of photovoltaic systems for self-consumption without surpluses through on-site measurements: Case study of the Dominican Republic. *Renewable Energy*, 236, 121422.
- Liao, W., Xu, S., Xie, W., Wang, Y., Liu, L., Xie, M., Li, G., & Wang, M. (2025). Evaluation of annual and temporal photovoltaic (PV) surplus energy in industrial buildings: A Case study of 36 industrial parks in Wuhan, China. *Energy and Buildings*, 328, 115193.
- Malvoni, M., Leggieri, A., Maggiotto, G., Congedo, P. M., & De Giorgi, M. G. (2017). Long term performance, losses and efficiency analysis of a 960 kWp photovoltaic system in the Mediterranean climate. *Energy conversion and management*, 145, 169–181.
- Mohand Kaci, G., Mahrane, A., Ghedamsi, K., & Chikh, M. (2024). Techno-economic feasibility analysis of grid-connected residential PV systems in Algeria. *Energy & Environment*, 35, 1936–1966.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petrolia, T. (1996). The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 122, 73–119.
- Phap, V. M., Huyen, C. T., Tung, N. T., Thao, N. T., & Thanh, D. Q. (2024). Study on technical, economic, environmental efficiency of self-consumption rooftop solar power using lithium-ion battery for households in Vietnam. *Journal of Energy Storage*, 99, 113446.
- Resmi Gazete. (2013). 6446 sayılı *Elektrik Piyasası Kanunu*. Cumhurbaşkanlığı Basımevi.
- Santiago, I., Palacios-Garcia, E. J., Gonzalez-Redondo, M., Arenas-Ramos, V., Simon, B., Hayes, B. P., & Moreno-Munoz, A. (2024). Assessment of generation capacity and economic viability of photovoltaic systems on urban buildings in southern Spain: A socioeconomic, technological, and regulatory analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203, 114741.
- Stylos, N., & Koroneos, C. (2014). Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 64, 639–645.
- Šúri, M., Cebecauer, T., & Skoczek, A. (2011). SolarGIS: Solar data and online applications for PV planning and performance assessment. *26th European photovoltaics solar energy conference*.
- URL-1. (2024, Aralık 25). *EPİAŞ Şeffaflık Platformu*. <https://seffaflik.epias.com.tr> adresinden alınmıştır.

- URL-2. (2024, Aralık 25). *Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: <https://gepa.enerji.gov.tr/> adresinden alınmıştır.
- Varo-Martínez, M., Fernández-Ahumada, L. M., López-Luque, R., & Ramírez-Faz, J. (2021). Simulation of self-consumption photovoltaic installations: profitability thresholds. *Applied Sciences*, 11, 6517.
- Wang, M., Zhao, X., Li, S., Yang, Z., Liu, K., Wen, Z., Li, Y., & Peng, J. (2024). Analysis of energy performance and load matching characteristics of various building integrated photovoltaic (BIPV) systems in office building. *Journal of Building Engineering*, 96, 110313.
- Zhang, H., Chen, X., Li, W., Peng, R., Ji, J., Su, X., & Luo, C. (2025). Energy, economic, emissions analysis of semi-flexible crystalline silicon photovoltaic system integrated with factory building roofs based on actual electricity load and cost conditions. *Energy and Buildings*, 115358.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğba AĞI, İlköğrenimini Alaca Dr. Ali Dedekargınoğlu İlköğretim Okulu'nda başarıyla tamamladıktan sonra, lise eğitimini Alaca Mehmet Çelik Anadolu Lisesi'nde sürdürdü ve 2010 yılında mezun oldu. Lisans eğitimini, 2012-2018 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Mezuniyetinin ardından çeşitli projelerde görev alarak saha ve tasarım tecrübesi kazandı. 2022 yılında, güneş enerjisi sistemleri ve mühendislik projeleri gibi konularda uzmanlaşmak amacıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2021 yılında AĞI Mühendislik firmasını kurarak serbest müşavir mühendis olarak çalışma hayatını sürdürmeye devam etmektedir.

Alici, O., Ağı, T., & Atasoy, A. (2023). Prediction of Solar Energy Production Quantity Using AR. *In 2023 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)* (pp. 1-5).