



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**İZMİR KENTİNDE NET SIFIR ŞEHİR HEDEFİNE
ULAŞMAK İÇİN ELEKTRİKLİ ARAÇLARLA
ENTEĞRE ÇATI FOTOVOLTAİK SİSTEM
ÇÖZÜMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mert AFACAN

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

**İzmir
2024**

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**İZMİR KENTİNDE NET SIFIR ŞEHİR HEDEFİNE
ULAŞMAK İÇİN ELEKTRİKLİ ARAÇLARLA
ENTEĞRE ÇATI FOTOVOLTAİK SİSTEM
ÇÖZÜMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Mert AFACAN

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU

**Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Enerji Teknolojisi Yüksek Lisans Programı**

**İzmir
2024**

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İzmir Kentinde Net Sıfır Şehir Hedefine Ulaşmak İçin Elektrikli Araçlarla Entegre Çatı Fotovoltaik Sistem Çözümlerinin Geliştirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

02/09/2024

Mert AFACAN

ÖZET**İZMİR KENTİNDE NET SIFIR ŞEHİR HEDEFİNE ULAŞMAK
İÇİN ELEKTRİKLİ ARAÇLARLA ENTEGRE ÇATI
FOTOVOLTAİK SİSTEM ÇÖZÜMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

AFACAN, Mert

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU

Eylül 2024, 176 sayfa

İklim değişikliği, çağımızın ve insanlık tarihinin en büyük sorunlarından biri olmaya devam etmektedir. Endüstrileşme ve şehir nüfusundaki artış, karbon emisyonlarında sürekli bir yükselişe yol açmaktadır. Bu kapsamda, İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2030 yılına kadar net sıfır şehir hedefine yönelik karbon emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada, İzmir'de karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak elektrikli araçlar ve fotovoltaik güç sistemlerinin entegrasyonu üzerine odaklanılarak yenilikçi bir çözüm önerisi sunulmaktadır. Bu amaçla, "System Advisor Model (SAM)" yazılımı kullanılarak, 2030 yılı için yalnızca fotovoltaik sistem modeli ile fotovoltaik sistem ve elektrikli araçların entegre olduğu modeller oluşturulmuştur.

Çalışmanın sonuçlarına göre, İzmir'de 2030 yılı elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistem FV+EA (%100) tahmin modellemesiyle 15.129.634 ton karbondioksit emisyonunun engellenebileceği ve kentin 2030 yılındaki toplam karbon salınımının 2018 yılı karbon salınımına kıyasla %60,4 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, sistemin yaklaşık 25 milyar dolar finansal kazanç sağlayabileceği öngörülmüştür.

Anahtar sözcükler: İzmir, fotovoltaik, yenilenebilir enerji, karbondioksit salınımı, finansal analiz, elektrikli araçlar.

ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF ROOFTOP PHOTOVOLTAIC SYSTEM
SOLUTIONS INTEGRATED WITH ELECTRIC VEHICLES TO
ACHIEVE THE NET ZERO CITY TARGET IN İZMİR CITY**

AFACAN, Mert

MSc in Solar Energy

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mete ÇUBUKÇU

September 2024, 176 pages

Climate change continues to be one of the biggest problems of our age and human history. Industrialization and the increase in urban population lead to a continuous increase in carbon emissions. In this context, Izmir Metropolitan Municipality aims to reduce carbon emissions towards the net zero city target by 2030.

In this study, an innovative solution proposal is presented by focusing on the integration of electric vehicles and photovoltaic power systems to reduce carbon emissions in İzmir. For this purpose, a photovoltaic system model and models in which only photovoltaic systems and electric vehicles are integrated were created for 2030 by using the System Advisor Model (SAM) software.

According to the results of the study, it was determined that 15,129,634 tons of carbon dioxide emissions could be prevented with the 2030 modeling of the photovoltaic system FV+EA (100%) integrated with electric vehicles in Izmir and the city's total carbon emissions in 2030 could be reduced by 60.4% compared to the carbon emissions in 2018. According to the analysis results, it is predicted that the system can provide financial gains of approximately 25 billion dollars.

Keywords: İzmir, photovoltaic, renewable energy, carbon dioxide emissions, financial analysis, electric vehicles.

ÖNSÖZ

Bu çalışmaya, çağımızın en kritik sorunlarından biri olan küresel iklim değişikliği konusuna odaklanarak, çözüm önerileri geliştirmek amacıyla başladım. Bu süreç boyunca yalnızca bu alandaki bilgi ve becerilerimi artırmakla kalmayıp, lisans eğitimim sonrasında bir konuda uzmanlaşmanın gerektirdiği disiplin, özveri ve sabır gibi erdemleri yeniden kazanmanın önemli katkılarını da gördüm.

Tez konumun yenilikçi olması, bu alanda yapılmış somut çalışmaların azlığı ve özellikle gerekli istatistiksel verilerin eksikliği, zaman zaman bu çalışmanın tamamlanamayacağı endişesini doğurdu. Ancak, her seferinde kendimi yeniden motive ederek, uzun saatler boyunca sosyal hayattan uzaklaşıp, bu zorlukların üstesinden gelmeye çalıştım. Bu süreçte kendime meydan okumanın ve sonunda başarılı olmanın verdiği tatmin ve gurur, bu çabanın en büyük ödülü oldu.

Özellikle İzmir'deki çatı alanlarının tahminine dair veri eksikliği, coğrafi bilgi sistemleri (GIS) konusunda yazılım becerilerimi geliştirmemi sağladı. 2012 yılında yazdığım "Elektrikli Araç Modellenmesi" konulu lisans tezimden sonra, elektrikli araçları yenilenebilir enerji sistemlerinin gözdesi olan fotovoltaik güç sistemleriyle birleştirme fikri, motivasyonumu sürekli yüksek tutmamı sağladı. Modelleme için kullandığım Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM) yazılımını öğrenme sürecinde, eğitim materyallerinin sınırlı olması ve yazılımı büyük ölçüde kendi çabalarım ile öğrenmek zorunda kalmam, gelecekte karşılaşacağım tüm zorluklara karşı bana özgüven kazandırdı.

İzmir gibi sevdiğim ve yaşadığım bir şehir için böyle bir çalışma yapmak benim için büyük bir onurdur. Umarım bu çalışmam, diğer şehirlerimiz için de benzer ve daha kapsamlı projelere ilham kaynağı olur. Unutulmamalıdır ki, geleceğe yönelik doğru tahminler ve projeksiyonlar, yarınlarımızı kurtaracak adımları belirlemede büyük önem taşımaktadır.

İZMİR

02/09/2024

Mert AFACAN

İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI.....	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. İklim Değişikliği ve Küresel Isınma.....	4
2.1.1. İklim değişikliğinin etkileri	6
2.1.2. Sera gazı emisyonlarının azaltılması için yöntemler	14
2.1.3. Türkiye’de Sera Gazı Azaltımı Mücadele Yöntemleri	26

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.2. İzmir Kentinde Net Sıfır Şehir Hedefine Yönelik Yenilikçi Bir Çözüm	47
2.2.1. İzmir'in güneş enerjisi potansiyeli ve iklim hedefleri.....	47
2.2.2. İzmir'de sürdürülebilir enerji çözümleri ve gelecek perspektifleri	50
2.3. Fotovoltaik Güç Sistemleri	53
2.3.1. Fotovoltaik hücreler.....	54
2.3.2. Fotovoltaik güç sistemlerinin sınıflandırılması	57
2.3.3. Fotovoltaik panel performansına etki eden faktörler.....	60
2.3.4. Dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisi görünümü.....	63
2.3.5. Fotovoltaik güç teknolojileri ve projelendirme süreçlerine genel bakış.....	68
2.4. Fotovoltaik Sistem ve Elektrikli Araç Entegrasyonu	70
2.4.1. Literatür taraması.....	71
2.4.2. Elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistem modellemesi	81
2.5. Sistem Modellemesinde Kullanılan Analiz Parametreleri.....	82
2.5.1. Giriş parametreleri	82
2.5.2. Çıkış parametreleri.....	85
2.5.3. Ekonomik analiz parametreleri.....	87

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.5.4. Analiz yöntemleri	89
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	91
3.1. Metodoloji.....	91
3.1.1. Çatı alanı tahmini.....	91
3.1.2. Fotovoltaik sistem tasarım parametrelerinin analizi.....	98
3.1.3. Toplam güç talebi	109
3.1.4. Potansiyel elektrik üretimi.....	112
3.1.5. Ekonomik analiz	117
3.2. Çevresel ve Ekonomik Etkiler	134
3.2.1. Enerji güvenliği etkisi.....	134
3.2.2. Çevresel etki	138
3.2.3. Ekonomik etki.....	143
3.2.4. Yakıt maliyeti tasarrufu	145
4. TARTIŞMA.....	149
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	151

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ.....	161
TEŞEKKÜR	175
ÖZGEÇMİŞ.....	176



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Sera gazı etkisi.....	5
2.2 Küresel sıcaklık artışı	6
2.3 Ükelere göre 2023 yılı küresel sera gazı emisyonları.....	16
2.4 Ükelere göre 1990-2023 yılları arasındaki sera gazı emisyonları	17
2.5 Küresel sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı.....	19
2.6 Türkiye'nin 2022 yılı sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı.....	28
2.7 Türkiye 2024 yılı Mart ayı sonu itibarıyla elektrik üretimi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı	29
2.8 Türkiye'nin 1990-2021 yılları arasındaki elektrik ve ısı üretimi kaynaklı karbon emisyonları.....	30
2.9 Türkiye'nin enerji sektörüne yönelik strateji ve eylemleri.....	31
2.10 Türkiye'nin sanayi sektörüne yönelik strateji ve eylemleri.....	32
2.11 Türkiye'de konutlara ait sera gazı emisyonları	34
2.12 Türkiye'nin konut sektörüne yönelik strateji ve eylemleri.....	35
2.13 Türkiye'nin ulaştırma sektörüne yönelik strateji ve eylemleri	38
2.14 Türkiye'nin atık sektörüne yönelik strateji ve eylemleri.....	41
2.15 Türkiye'nin tarım sektörüne yönelik strateji ve eylemleri	43

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.16 İzmir kenti güneş enerjisi potansiyel atlası.....	48
2.17 Fotovoltaik sistem çalışma prensibi	54
2.18 Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem şeması.....	57
2.19 Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem şeması.....	59
2.20 FV sistemlerde verime etki eden faktörlerin kayıp oranları	60
2.21 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli.....	64
2.22 (a) Türkiye küresel radyasyon değerleri ve (b) Güneşlenme Süreleri....	64
2.23 Türkiye 2011-2022 yılları arasındaki güneş enerjisi kurulu güç grafiği.....	65
2.24 Türkiye’de FV sistemleri için değerlendirilebilecek çatı alanları	66
2.25 Seçili ülkelerin 2022 yılında güneş enerjisi kurulu güçleri	67
2.26 2030 yılı sistem senaryoları.....	82
3.1 2024 yılı İzmir kentine ait MsBuilding bina verileri.....	92
3.2 2024 yılı İzmir kenti MsBuilding bina çatı alanı verileri	93
3.3 QGIS yazılımı ile 2024 yılı İzmir kenti bina sayısının bulunması	94
3.4 QGIS yazılımı ile 2024 yılı İzmir kenti çatı alan toplamının bulunması.....	95
3.5 SAM yazılımının performans ve finansal model sayfası.	98

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.6 SAM ticari yatırımcı seçeneği giriş sekmeleri.	99
3.7 SAM yazılımı 2030 yılı FV sistem boyutlandırması	103
3.8 SAM yazılımında azimut ve eğim açılarının koordinat gösterimi	104
3.9 Senaryolarda kullanılan FV sistem kayıp oranları.	107
3.10 SAM yazılımı 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem elektrik talebi verisi.....	111
3.11 SAM yazılımı 2030 yılı FV+EA (%4,4) elektrik talebi verisi.	112
3.12 SAM yazılımı 2024 yılı “Yalnızca FV” sistem kurulum maliyeti	120
3.13 Seçili ülkelerde şebeke ölçekli güneş FV toplam kurulum maliyeti eğilimleri	121
3.14 SAM yazılımı 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem kurulum maliyeti	122
3.15 SAM yazılımı 2030 yılı “FV+EA (%4,4)” sistem kurulum maliyeti.....	124
3.16 SAM yazılımı 2030 yılı “FV+EA (%100)” sistem kurulum maliyeti	125
3.17 İzmir kenti 2023 yılı elektrik tüketim dağılımı.....	132
3.18 İzmir kenti için modellenen senaryoların enerji yeterliliği ve karbon salınım etkisi oranları.	155
3.19 İzmir kenti için modellenen senaryolara göre ekonomik analiz sonuçları.....	157
3.20 Senaryoların NPV sonuçları.....	159

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İklim değışikliğı etkileri	7
2.2 Türkiye'nin 2020-2021 yıllarındaki toplam taşıt sayısı ve ortalama sürüş mesafesi	36
2.3 Türkiye'de 2021 yılı tarım sektörü sera gazı emisyonları	42
2.4 İzmir 2018 yılı sera gazı salımları	49
2.5 Fotovoltaik hücre çeşitleri	56
3.1 Yıllar itibariyle Türkiye net elektrik tüketimi artış oranı	110
3.2 SAM yazılımı 2030 yılı "Yalnızca FV" sistem teknik çıktısı	113
3.3 Türkiye elektrikli araç projeksiyonu.....	114
3.4 SAM yazılımı 2030 yılı FV+EA (%4,4) sistem teknik çıktısı	116
3.5 SAM yazılımı 2030 yılı FV+EA (%100) sistem teknik çıktısı	117
3.6 Türkiye'deki 2024 yılı ortalama evirici fiyatları	119
3.7 ABD'de 2023-2030 yılı FV sistem tahmini işletme ve bakım giderleri.....	126
3.8 İzmir kenti 2024 yılı ortalama elektrik tüketim tarifesi.....	133
3.9 14 Haziran 2024 tarihli Türkiye'de güneş dayalı üretim tesisleri için sabit fiyat alım garantisi değerleri.....	134

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.10 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosu enerji güvenliği faktörleri	136
3.11 2030 yılı “FV+EA (%4,4)” sistem senaryosu enerji güvenliği faktörleri	137
3.12 2030 yılı “FV+EA (%100)” sistem senaryosu enerji güvenliği faktörleri	138
3.13 İzmir kentinde 2030 yılı FV+EA (%4,4) senaryosunda tahmini EA kullanımı ile sera gazı azaltımı.....	140
3.14 2030 yılı FV+EA (%100) İzmir kentindeki tüm araçların EA olduğu senaryosunda sera gazı azaltımı.	141
3.15 İzmir kentinde 2018 yılı baz alınarak 2030 yılı için modellenen senaryolara göre sera gazı azaltım oranları.....	142
3.16 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosu SAM yazılımı ekonomik analiz çıktıları.	144
3.17 2030 yılı “FV+EA (%4,4)” sistem senaryosu SAM yazılımı ekonomik analiz çıktıları	144
3.18 2030 yılı “FV+EA (%100)” sistem senaryosu SAM yazılımı ekonomik analiz çıktıları.	145
3.19 İzmir kentinde 2030 yılı İYM'li araçlardan EA'lara geçişte tahmini yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu	147
3.20 2030 yılı FV+EA senaryolarında “Yakıt maliyeti tasarrufu” sonuçları.....	148

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
<i>a.a.</i>	Alternatif akım
<i>Ah</i>	Amper-saat
<i>AM</i>	Hava Kütlesi
<i>CF</i>	Kapasite faktörü
<i>CO_{2e}</i>	Karbondiyoksit eşdeğeri
<i>c-Si</i>	Kristal silikon
<i>D</i>	Borcun piyasa değeri
<i>d.a.</i>	Doğru akım
<i>E</i>	Üretilen toplam enerji miktarı (kWh)
<i>E_p</i>	Öz sermaye piyasa değeri
<i>G</i>	Referans ışıyım şiddeti (1 kW/m ²)
<i>GW</i>	Giga-watt
<i>I_{mp}</i>	Maksimum güç noktasındaki akım (A)
<i>I_{sc}</i>	Kısa devre akımı (A)
<i>kW</i>	kilo-watt
<i>Mt</i>	Mega ton

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
MtC	Megaton karbon
MWh	Mega-watt saat
M_y	y yılındaki işletme ve bakım maliyeti
n	Borç ödeme vadesi
P_{mp}	FV hücresi maksimum güç noktası (W)
PR	Performans oranı
P_T	Teorik maksimum güç (W)
R	İskonto oranı
R_d	Borç maliyeti
R_e	Öz sermaye maliyeti
T	Vergi oranı
TWh	Tera-watt saat
USD	Amerikan doları
V	Sermaye toplam değeri
V_{mp}	Maksimum güç noktasındaki gerilim (V)
V_{oc}	Açık devre gerilimi (V)
y	Projenin ekonomik ömrü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A_a	Kullanılacak aktif panel sayısı
C_0	İlk yatırım maliyeti (\$/yıl)
C_y	Projenin y yılındaki maliyeti
E_{AC}	Sistem tarafından üretilen enerji miktarı
E_y	y yılında üretilen enerji miktarı (kWh/yıl)
F_y	y yılındaki yakıt maliyeti
H_t	Yüzeydeki toplam güneş ısıtımı miktarı (kWh/m ²)
I_y	y yılındaki yatırım maliyeti
P_{PV}	Fotovoltaik sistemin kurulu gücü (kWp)
Y_F	Yıllık hasat oranı
Y_R	Referans hasat
η_{sys}	Sistem verimliliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
BNEF	Bloomberg Yeni Enerji Finansmanı
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
COP	Taraflar Konferansı
EA	Elektrikli Araç
EPA	Çevre Koruma Ajansı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPIAŞ	Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
EU-ETS	Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
FV	Fotovoltaik

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
FVGS	Fotovoltaik güç sistemleri
GSYİH	Küresel gayri safi yurtiçi hasılası
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	Uluslararası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
IRR	İç karlılık oranı
İYM	İçten yanmalı motorlu araçlar
İZBB	İzmir Büyükşehir Belediyesi
LCOE	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
NPV	Net bugünkü değer
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NSRDB	Ulusal Güneş Radyasyonu Veritabanı
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü
PVGIS	Avrupa Birliği Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Araştırma Kurumu
QGIS	Quantum Coğrafi Bilgi Sistemi
SGE	Sera gazı emisyonları

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
STK	Standart Test Koşulları
TC	Türkiye Cumhuriyeti
TCMB	Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası
TDY	Tipik Tasarım Yılı
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TMY	Tipik Meteorolojik Yıl
TS	Türk Standardı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
V2G	Araçtan Şebekeye
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü
WWF	Doğal Hayatı Koruma Vakfı
YEK	Yenilenebilir enerji kaynakları

1. GİRİŞ

İklim değışikliğinin etkilerini azaltmak amacıyla, küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının 2050 yılına kadar sıfırlanması ve öncü düşük karbonlu şehirlerin 2040 yılına kadar net sıfır emisyona ulaşması gerekliliği giderek daha belirgin hale gelmektedir. Ancak, bu iddialı hedeflere ulaşmayı mümkün kılacak kesin yollar henüz tam olarak belirlenememiştir. Fotovoltaik sistemler, enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçların maliyetlerinin düşmeye devam etmesi, bu teknolojilerin derin karbonsuzlaştırma sürecinde birlikte önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Küresel nüfusun %55'i ve küresel gayri safi yurtiçi hasılanın (GSYİH) %80'i şehirlerde yoğunlaşmaktadır (UNDESA, 2018). Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) (2014) raporuna göre şehirler, küresel enerji tüketiminin %67-76'sını oluşturmakta ve şehirlerde tüketilen enerjiye bağlı küresel karbon emisyonları %71-76 arasında değişmektedir.

İzmir Büyükşehir Belediyesi (İZBB), iklim değışikliğiyle mücadele etmek için Avrupa Birliği'nin stratejik yönergeleri çerçevesinde sera gazı salınımlarını azaltma hedefi belirlemiştir. İZBB, iklim uyumu hedeflerini değerlendirerek, Belediye Başkanları Sözleşmesi'ne (Covenant of Mayors) 5 Ağustos 2019 tarihli Meclis Kararı ile resmi olarak bağlılık beyanında bulunmuştur. Bu taahhüt kapsamında, 2030 yılı itibarıyla sera gazı emisyonlarının (SGE) oranında düşürülmesi öngörülmüştür (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024b).

Öte yandan, Avrupa Komisyonu, Nisan 2022 tarihinde 2030 yılına kadar 100 iklim nötr ve akıllı şehir için Avrupa Birliği (AB) misyonuna katılmak üzere seçilen 112 şehri duyurmuştur. İzmir kenti, “İklim Nötr ve Akıllı Şehirler Misyonu” kapsamında seçilen 112 misyon şehri arasında yer almıştır. İZBB, 2030 yılına kadar net sıfır hedefine yönelik çalışmalarına devam etmektedir. Bu misyon, “Şehirler Misyonu” olarak da bilinmektedir. Seçilen 112 şehir tarafından; enerji, binalar, atık yönetimi ve ulaşım gibi tüm sektörlerde iklim nötrlüğü için genel bir plan ve ilgili yatırım planları içeren İklim Şehri Sözleşmeleri geliştirilmektedir (NZC, 2024; Kit-İzmir,2024).

Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki maliyet düşüşleri, bu kaynakların kullanımını artırarak küresel karbonsuzlaşma çabalarına önemli katkılar sağlamıştır. Türkiye'de, yenilenebilir enerji hala maliyetli olup, bu durum yenilenebilir enerji penetrasyonunu zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, toplumların enerji sistemlerini yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde karbonsuzlaştırmak için uygun stratejiler geliştirmeleri gerekmektedir. Özellikle şebekeye entegrasyonları arttıkça, fotovoltaik (FV) sistemler gibi değişken enerji kaynakları, değişkenliklerini dengelemek için enerji depolama çözümlerine ihtiyaç duymaktadır.

Önceki çalışmalarda, 2030 yılına kadar sadece çatı üstü FV, çatı üstü FV + batarya sistemleri ile karşılaştırıldığında, çatı üstü FV ile entegre elektrikli araç (EA) bataryalarının, en yüksek CO₂ emisyonu azaltma potansiyeline sahip ve maliyet etkin bir seçenek olduğu belirlenmiştir (Kobashi and Yarime, 2019; Kobashi, 2020).

Bu çalışmada, İzmir'in karbonsuzlaşma sürecini hızlandırmak amacıyla, elektrikli araç bataryaları ile entegre edilmiş çatı üstü fotovoltaik sistemlerin potansiyelleri ve bu teknolojilerin 2030 yıllarındaki maliyetleri incelenmiş ve karbon emisyonlarının azaltılmasındaki etkileri değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, iklim değişikliğinin etkileri ele alınarak mevcut çözüm yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu yöntemlerden fotovoltaik güç sistemlerine (FVGS) dair detaylı bilgiler verilmiş, sistemlerin dünyada ve Türkiye'deki uygulama alanları ve etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistemlerle ilgili literatür taraması yapılarak, bu sistemlerin modellenmesi ve tasarım parametreleri üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde, İzmir kenti için uygulanabilecek modellerin çevresel ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Şehir ölçeğinde kullanılabilir çatı alanı tahmin edilerek, potansiyel elektrik üretimi ve karbon emisyon azaltım miktarları belirlenmiştir.

Dördüncü bölümde, kullanılabilir çatı alanlarının belirlenmesi yöntemleri, çatı eğimi ve yönleri ile ilgili varsayımlar, fotovoltaik sistem kurulum maliyetlerinin belirlenmesinde yapı türlerinin önemi ve ekonomik analiz üzerinde büyük etkisi olan iskonto ve enflasyon oranları tartışılmıştır.

Beşinci bölümde, oluşturulan senaryoların sonuçları analiz edilmiş ve elde edilen bulgulara dayanarak önerilerde bulunulmuştur.



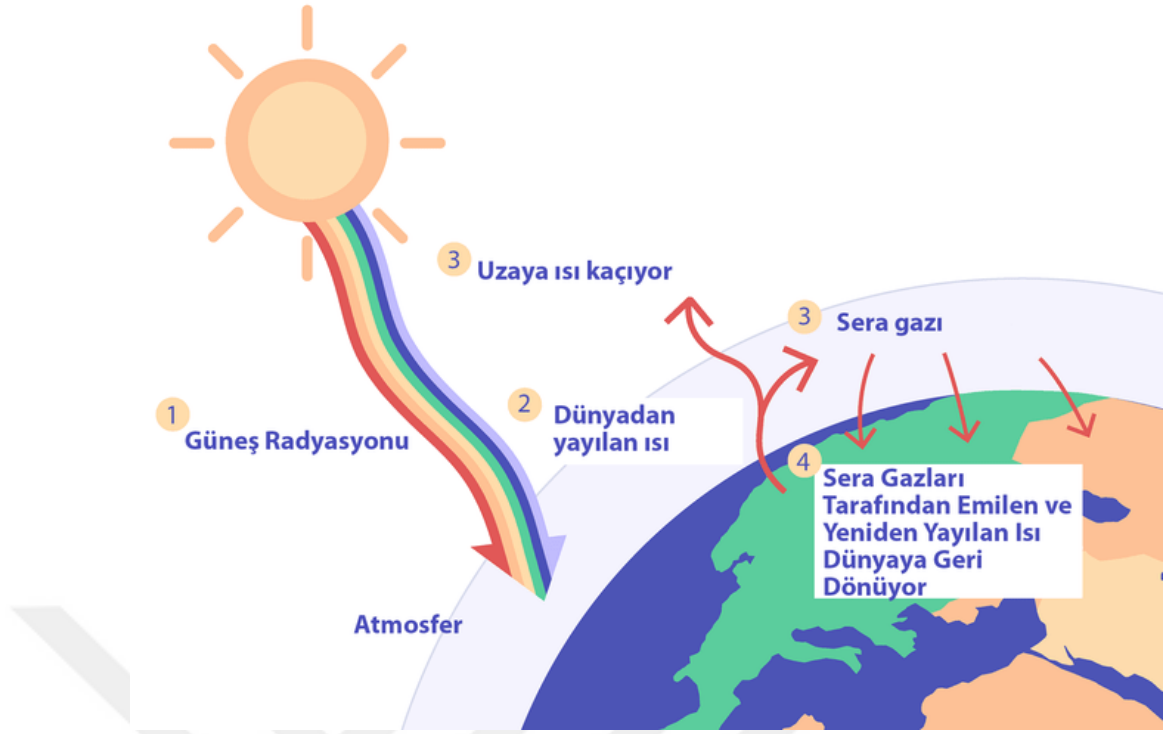
2. GENEL BİLGİLER

2.1. İklim Değişikliği ve Küresel Isınma

İklim sistemi, atmosferi, kara parçalarını, okyanusları ve canlıları içerir. Bu sistem, kendi iç dinamikleriyle şekillenirken aynı zamanda dış etkenlere bağlı olarak zaman içinde değişim gösterir. Doğal olaylar, volkanik patlamalar, güneş değişimleri gibi dış zorlamalara ek olarak, insan kaynaklı atmosfer bileşimindeki değişiklikleri de içermektedir. Güneş radyasyonu, iklim sisteminin enerji kaynağını oluşturur. Bu kompleks etkileşimler, rüzgârları, deniz akıntılarını, yağışları ve iklim örüntülerini şekillendirerek iklimin evrimini belirler (DMİ, 2015a).

Dünya'nın enerji dengesini etkileyen ve iklim değişikliğine yol açan temel üç unsur, güneş radyasyonu, atmosferdeki sera gazları ve yerküreden yayılan uzun dalga radyasyonundaki değişikliklerdir. Sera gazları olan su buharı, azot oksit, ozon ve karbondioksit atmosferde bulunduklarında, güneşten gelen kısa dalga radyasyonun bir kısmını soğurarak, gezegenin yüzeyinde yaşanabilir bir sıcaklık aralığının oluşumuna katkıda bulunur. Bu gazlar, gezegenimizin iklim sisteminin düzenli ve yaşanabilir kalmasını sağlayarak, hayatın sürdürülebilirliğine olanak tanır. Ancak, 19. yüzyıl sanayi devrimiyle birlikte artan fosil yakıt tüketimi, farklı yakıt türleri, yeşil alanların azalması gibi insan kaynaklı faktörler, atmosferdeki sera gazlarının artmasına yol açarak ozon tabakasının incelmesine, küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine sebep olmaktadır.

Yerküre ve atmosferde depolanan ısı enerjisi, atmosferik ve okyanusal dolaşım yoluyla yeryüzüne dağıtılır ve uzun dalga yer radyasyonu şeklinde atmosfere geri yayılır. Bu süreçte, ısı enerjisinin bir bölümü bulutlar ve sera gazları tarafından emilip atmosferden tekrar geri salınır. Bu doğal sera etkisi, Dünya'nın yüzeyini ve alt atmosferini ısıtarak beklenenden daha fazla ısınmasına neden olur. Ancak, kontrolsüz bir şekilde devam etmesi durumunda küresel ısınma meydana gelir. Doğal sera etkisi olarak adlandırılan bu durum sıcaklıklarda artışa ve iklim değişikliklerine yol açabilecek önemli bir faktördür (Silkin, 2014).

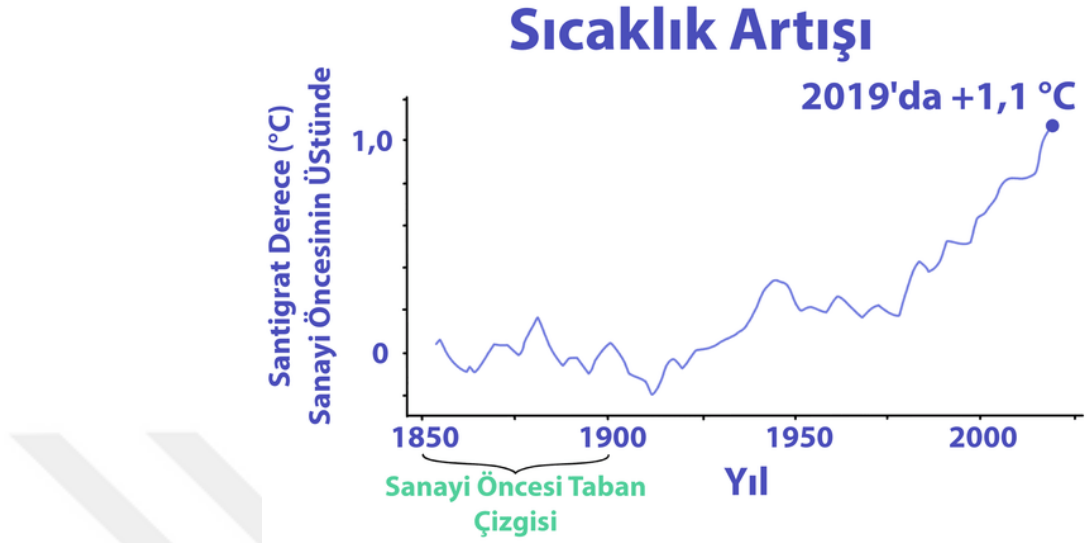


Şekil 2.1. Sera gazı etkisi (Deresoy, 2024).

Fosil ve biyokütle yakıtlarının yanması, sera gazı emisyonlarının (SGE) önemli kaynağını oluşturur. Çimento üretimi sürecinde karbondioksit salınımı gerçekleşirken, tarım faaliyetleri ve katı atık depolama sahalarında metan gazı salınımı meydana gelmektedir. Diazot monoksit emisyonunu naylon üretimi ve tarımda gübre kullanımı artırırken; klima ve buzdolabı kullanımı florlu SGE’de artışa sebep olur. Arazi kullanımında yapılan değişikliklerin iklim sistemi üzerindeki etkisi önemli boyuttadır. Tarım yapılması için açılan alanlar, koyu renkli yüzey alanını artırarak güneş ışınlarını emerek yansıtmaktan çok soğurmasına neden olur. Aynı zamanda orman tahribatıyla birlikte karbondioksiti tutan ağaç ve bitkilerin azalmasına yol açar. Çölleşme, atmosfere daha fazla toz salınımına neden olarak güneşten gelen enerjiyi azaltır ve küresel ısınmayı yavaşlatabilir. Şehirleşme ise şehir ısı adalarına yol açarak, şehirlerde çevresel bölgelere göre daha yüksek sıcaklık alanlarının oluşmasına neden olur (DMİ, 2015b).

Sanayi Devrimi'nin başlangıcıyla birlikte, küresel ısınma olgusu ortaya çıkmıştır. IPCC raporuna (2014) göre, 1950 ve 2010 yılları arasında iklim değişikliğine neden olan faktörlerin içinde insan etkisinin %95 olduğu

belirtilmektedir. Genellikle aşırı tüketim alışkanlıklarıyla, insanlar küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır.



Şekil 2.2. Küresel sıcaklık artışı (IPCC, 2021).

Öte yandan, dünyada sera gazı üreten tek canlının insanlar olmadığı bilinmektedir. Bitkilerin çürümesi ve hayvanların solunum yaparken atmosfere karbondioksit salmaları, doğal bir sera gazı emisyonu örneğidir. Ancak doğa, bitki ve hayvanların doğal salımını ekolojik denge içinde soğurulabilir ve bu gazlar sera etkisi yaratmaz. Teknoloji ve sanayi alanındaki gelişmeler sonucunda oluşan yapay çevrelerde, sera gazı salınımlarında yaşanan aşırı artış, ekolojik dengenin ciddi biçimde bozulmasına yol açmıştır. Bu durum, geri dönüşü neredeyse imkânsız ve son derece güç olan kalıcı zararlara neden olmuştur.

2.1.1. İklim değişikliğinin etkileri

İklim değişikliği, sadece ısınmayla sınırlı bir durum olmayıp, aynı zamanda doğal felaketleri tetikleyen bir krizdir. Önlem alınmadığı takdirde, ekosistemin maruz kaldığı tahribatın boyutu her geçen gün artmaktadır.

İklim değişikliğinin etkileri, sadece çevreyi değil, aynı zamanda insanları da derinden etkilemektedir. Küresel ısınma nedeniyle çölleşme, verimli topraklarda

kayıplara yol açar. Su kaynaklarının azalması ve erişiminin zorlaşması, temel bir ihtiyaç olan suya ulaşımı ve dolayısıyla tarımı olumsuz etkiler. Bu durum, insanların temel hayatta kalma mücadelesi verirken gıda bulma konusunda zorluk yaşamasına neden olur. Tarım, birçok ülkenin başlıca geçim kaynağını oluşturur. Tarım ürünleri, bir ülkenin dış ticaret dengesinde önemli bir yer tutar. Bu nedenle, tarım sektöründeki olumsuz etkiler, ülkelerin ekonomilerini de olumsuz yönde etkiler.

Tablo 2.1. İklim değişikliği etkileri (Doğan ve Tüzer, 2011).

Deniz Seviyesinde Yükselme ve Sahil Bölgeleri:	Sahillerde erozyon	Sel ve taşkınlar	Kıyılarda yerleşik toplulukları koruma maliyetleri
Enerji:	Enerji politikalarında değişim	Enerji tüketiminde değişim	Enerji maliyetlerinde değişim
İnsan Sağlığı:	İklimle bağlı ölümler	Salgın hastalıklar	Hava kalitesinde düşüş
Tarım:	Ürün kayıpları	Sulama problemleri	Tarım alanlarında değişim
Doğal Çevre ve Türler:	Doğal yaşam alanlarında kayıplar	Tür çeşitliliğinde azalma	
Su Kaynakları:	Su arzında azalma	Su kalitesinde düşüş	Su kaynakları için rekabet
Ormanlar:	Orman kompozisyonu	Ormanların dağılımında değişim	Orman sağlığı ve verimliliğinde düşüş

2.1.1.1. Ekosisteme etkisi

Ekosistemler, dünyanın olumsuz değişimlere karşı dengesini koruyan yapılardır. Geçen yüzyıl içinde, insanlık tarihi boyunca benzeri görülmemiş zararlara neden olan olumsuz gelişmeler ve çevresel bozulmalar, biyolojik çeşitlilik ve ekosistemlere büyük ölçüde zarar vermiştir. İnsan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklanan küresel iklim değişikliği, özellikle yanlış arazi kullanımı, kirlilik ve orman tahribatı gibi faktörlerle tetiklenmektedir. Bu faaliyetler, ekosistemlerin

yapısını ve işlevselliğini bozarak, doğal biyolojik dengeyi alt üst etmektedir. İklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik ve ekosistemler üzerindeki etkileri, türlerin ortadan kalkmasına, bazı türlerin ise göç etmelerine ve diğer türlerde ise popülasyon artışına sebep olmaktadır. Bu durum, biyolojik çeşitliliği etkileyerek, organizmalar arası etkileşimleri ve ekolojik besin halkasındaki potansiyel kopmaları içeren öngörülemeyen ekolojik felaketlere yol açma riskini beraberinde getirmektedir (Demir, 2009).

Son yıllarda ekosistemlere verilen zararlar, Madagaskar ve Ekvador gibi bölgelerde biyoçeşitlilik kaybına neden olmuştur. Madagaskar'da 12.000 bitki türü ile 190.000 hayvan türü, Ekvador'da ise yaklaşık 190.000 bitki ve 200.000 hayvan türünün yarısının yok olduğu tahmin edilmektedir. Bu tür kayıpların arka planında iklim değişikliği ve doğal yaşam alanlarının tahrip edilmesi gibi çeşitli faktörler bulunmaktadır. İklim değişikliği, ekosistemlere olumsuz etki ederek türlerin hayatta kalma şansını azaltmaktadır. Buna bağlı olarak, ekosistemlerin sürdürülebilir yönetimi ve biyolojik çeşitliliğin korunması büyük bir öneme sahiptir (WCED, 1991).

Küresel ısınmanın varlığı, günümüzde gözlemlenen sıcaklık artışının etkisiyle buzulların erimesi, su hacminin artması ve deniz seviyesinin yükselip, kıyı şeritlerinde daralmalara sebep olması vb. olaylarla kesin bir şekilde onaylanmıştır. Söz konusu olaylar sıcaklık artışının etkileri arasında yer almaktadır. Bu durum, kıyı bölgelerinde sıcaklık artışına bağlı olarak selleri ve humma gibi bazı hastalıkların yaygınlaşmasını beraberinde getirebilir (Kaya, 2020).

Buzullardaki erimelerin eski zamanlarda da meydana geldiğini savunanlar olmasına rağmen, bilimsel çalışmalar göstermiştir ki asıl büyük erimeler insan faaliyetlerine bağlı olarak belirgin şekilde artmıştır. Son yıllardaki iklim değişikliği ile buzulların erimesi arasında kuvvetli bir bağlantı bulunmaktadır. Bu ısınma nedeniyle dünya, büyük sel baskınları riski ile karşı karşıya kalabilir. Yapılan çalışmalar, deniz seviyesinin yükselmesi sonucunda kıyıların sular altında kalma riski olduğunu göstermektedir; aynı zamanda kıyılara yakın alanlarda erozyona yol açabileceğini ifade etmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD'de) buzul erimleri nedeniyle 2100 yılına kadar 25.000 kilometrekarelik

arazi kaybının meydana gelebileceği öngörülmektedir. Bu durum, deniz seviyesindeki yükselmelerin artması durumunda 2100'e kadar 0,09-0,88 m arasında bir artışa neden olabilir (Özel ve Kılıç, 2006).

Buzullar, okyanuslar ve denizler dahil su ekosisteminin sıcaklık nedeniyle zarar gördüğü ve görmeye devam edeceği bilimsel çalışmalarla ve gözlemlerle anlaşılmıştır. Okyanusların üst kısmındaki su sıcaklığındaki artış, su ekosistemi zarar vermektedir. Bu artışa bağlı olarak, sıcak sularda yaşayan türler kuzey bölgesine göç etmektedir (Demir, 2009).

Küresel ısınmanın etkisi sadece atmosferi değil, yeraltı su rezervlerini de olumsuz etkiler. Artan sıcaklıkların neden olduğu buharlaşma hızının artması, sulama suyu hacminin azalmasına ve kıtalar arasındaki su döngüsünde bozulmalara yol açmaktadır. Özellikle Amerika, Afrika ve Asya kıtalarındaki büyük kuyular kurumakta, yer altı su seviyeleri sürekli olarak azalmakta, sulak alanlar kaybolmaktadır. Bu durum, tarım alanları için de önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Mevsim döngülerindeki değişimler, artan sıcaklıkların etkisiyle yağış rejimlerinde azalmalara neden olacaktır. Kar yağışlarının düşmesi ve kar örtüsünün yerde daha kısa süre kalması, sulak alanlar, nehirler ve göller üzerinde olumsuz etkiler yaratacaktır. Su rezervlerindeki azalmalar, sadece çevresel değil aynı zamanda sosyo-ekonomik sorunları da beraberinde getirecektir. Çölleşme ve kuraklık gibi etkilerle tarımsal üretim alanlarında önemli kayıplar yaşanacaktır. Tarım topraklarının niteliğinin düşmesi, küresel çapta kıtlık gibi ciddi sorunlara yol açabilir (Bayraç ve Doğan, 2016).

Geleceğe dönük öngörüler, 2025 senesinden sonra üç milyar insanın su sıkıntısı yaşayacağını göstermektedir. Yetersiz ve azalan su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi büyük bir öneme sahiptir. Örneğin, bir kahve fincanı için gereken 170 kg suyu düşündüğümüzde, su kaynaklarının akılcı bir biçimde kullanılması ve korunması, suyun hayati önem taşıdığı tarım ve diğer sektörlerde sürdürülebilirliği sağlamak adına elzemdir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

Şehirleşme, artan sanayi faaliyetleri, plansız nüfus artışı, tarımda kimyasal gübre kullanılması ve ekolojik dengeyi bozarak canlıların kaybına neden

olmaktadır. Konvansiyonel enerji kaynaklarının azalması, insanları enerjiyi doğal kaynaklardan elde etmeye zorlayarak çevresel tahribata yol açacaktır. Ekosistemlerin yok olmasına sebep olan ve bunu önleyecek konumda olan devletler, şirketler ve bireyler, acil çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar geliştirmelidirler. Bu süreçte, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, çevresel etkilerin izlenmesi ve azaltılması, sürdürülebilir tarım uygulamalarının teşvik edilmesi gibi önlemler alınmalıdır. Ayrıca, eğitim ve farkındalık artırma çabalarıyla toplumların doğaya olan etkileri konusunda bilinçlenmeleri sağlanmalıdır. Bu sayede, gelecek nesiller için sağlıklı ve dengeli bir çevre bırakmak adına önemli adımlar atılabilir.

2.1.1.2. Tarımsal faaliyetlere etkisi

İnsanların temel yaşamsal ihtiyaçlarından biri olan beslenme, tarımsal üretim yoluyla sağlanmaktadır. Ancak, bu faaliyetlerin sürdürülebilirliği büyük ölçüde su kaynaklarına bağlıdır. Artan sıcaklıkların yol açtığı kuraklık, tarımsal üretimde önemli sorunlara neden olmaktadır. İklim değişikliği, doğal afetlerin sıklığını artırarak tarımsal üretimi olumsuz etkilemektedir. Özellikle aşırı yağışlara bağlı sel felaketleri ve yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan orman yangınları, tarım arazilerinin kaybına neden olmaktadır. Bu afetlerin farklı coğrafyalarda meydana gelme olasılığı, küresel düzeyde tarımın güvenliğini tehdit etmektedir.

Tarımsal üretimdeki düşüş ve üretim yöntemlerindeki değişiklikler, verimliliği olumsuz yönde etkileyerek kıtlık ve açlık sorunlarını körüklemektedir. . Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından hazırlanan gıda güvenliği raporu, Afrika'nın geniş bölgelerinde ciddi riskler olduğunu ve bu bölgelerde yaşayan insanların yeterli beslenme imkanlarına sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Gıda üretimindeki potansiyel düşüşler, az gelişmiş ülkelerde yaşayan çocukların zihinsel ve fiziksel gelişimlerini ciddi şekilde tehlikeye atabilir. 2080 yılına kadar 2,5°C'lik sıcaklık artışının, 50 milyon insanı açlık tehlikesi ile karşı karşıya bırakması beklenmektedir (Akalin, 2014).

2.1.1.3. Ormanlara etkisi

Ormanlar, dünyada bulunan birçok canlının evi ve yaşam alanıdır. Ancak, küresel sıcaklık artışları orman ekosistemine ciddi zararlar vermektedir. Ormanlar, atmosferdeki karbon dioksitin bir kısmını emerek, küresel ısınmaya karşı bir koruma sağlamaktadırlar. Ancak atmosferde kalan fazla karbon dioksit, fotosentez sürecini hızlandırarak ağaçların daha fazla besine ihtiyaç duymasına neden olmaktadır. Artan sıcaklık ve azalan nem, ağaçların beslenme ihtiyacını karşılamakta zorlanmalarına yol açmaktadır. Ormanların azalmasına yol açan diğer bir etken ise yangın felaketleridir. Küresel ısınma, dünya genelinde yangın sıklığını artırmıştır. Bu durumun arkasındaki sebepler arasında orman alt katmanlarındaki alglerin kuruması ve su kütlelerinin hızla buharlaşması yer almaktadır. Bu faktörler, orman ekosistemini olumsuz etkileyerek, yangınların sıklığını ve şiddetini artırmaktadır (Godrej, 2003).

Orman ekosistemlerindeki ağaçlar ve diğer canlı türleri, yaşamlarını sürdürebilmek için belirli bir sıcaklık aralığında bulunmak zorundadır. Sıcaklıkta meydana gelebilecek değişiklikler, birçok ağaç türünün yaşamını sürdürememesine yol açabilir. Bu durum, bazı türlerin yeni şartlara uyum sağlaması ve diğer orman türleri üzerinde baskı oluşturarak yayılması anlamına gelir. Özellikle güney bölgelerindeki orman türlerinin kuzeye doğru yayılma potansiyeli, gelecekte karşılaşılabilecek önemli bir olgu olarak öne çıkmaktadır (Maslin, 2009).

2.1.1.4. İklim göçleri

Göçebelik, tarih boyunca varlığını sürdürmüş ve medeniyetlerin gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Göçebeler, çeşitli faktörlerin etkisiyle hareket edebilirler ve bu faktörlerden biri de çevresel koşullardır. İklim değişiklikleri, tarih öncesi dönemlerden beri göç hareketlerinin daha aktif hale gelmelerine neden olan bir etken olmuştur. Ancak 21. yüzyıl itibarıyla, insan kaynaklı iklim değişikliği, göç hareketlerini artırmaktadır.

Göç ve iklim değişikliği kavramları, özellikle 1970'lerden itibaren sıkça bir arada kullanılmaktadır. Günümüzde aşırı iklim olayları, çevresel göç ve mülteci

kavramlarının doğmasına yol açmıştır. Çevresel sorunlar yüzünden evlerini terk etmek zorunda kalan kişiler, iklim mültecileri olarak adlandırılmaktadır. Daha önce çevresel mülteciler olarak adlandırılan bu kişiler, günümüzde iklim krizi ile ilişkilendirilmekte ve iklim mültecileri terimi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İklim mültecileri, kuraklık, çölleşme, ormansızlaşma ve hatalı arazi kullanımı gibi çevresel sorunların yanı sıra, nüfus artışı ve yoksulluk gibi sebeplerden dolayı yaşadıkları bölgeleri terk eden insanlardır. Bu kişiler, yalnızca uluslararası göç eden bireyler olarak değil, aynı zamanda kendi ülkeleri içinde çevresel faktörler nedeniyle yer değiştirmek zorunda kalan kişiler olarak da tanımlanmalıdır (Nazan vd., 2021).

İnsanlar, mevcut doğal afetler veya çevresel olumsuzluklar nedeniyle zaten göç etmek zorunda kalabilmektedirler. Ancak iklim değişikliğinin, bu duruma başka bir boyut ekleyerek daha geniş bir etki yaratması beklenmektedir. Yükselen sıcaklıkların neden olduğu aşırı hava olayları, sel, kasırga, fırtına gibi durumların yaşanması, göçü daha da artıracaktır. Bununla birlikte, iklim değişikliğinin yavaş ve yıkıcı etkileri, gerçek bir küresel soruna sebep olacak potansiyele sahiptir. Ani doğal afetlerin aksine, çölleşme, kıyı erozyonu, fırtına gibi sorunlar planlı göçü beraberinde getirecektir.

2.1.1.5. İnsan sağlığı üzerine etkisi

İklim değişikliğinin, insan sağlığı üzerinde birçok farklı etkisi bulunmaktadır. Sıcaklık artışlarına bağlı olarak meydana gelebilecek doğal afetler, pek çok sağlık sorununu beraberinde getirecektir. Avrupa Çevre Ajansı'na (2015) göre, sıcaklık artışlarının şu anki hızla devam etmesi durumunda, sıcaklık kaynaklı ölümlerin sayısı yılda 200.000'e ulaşabilir. İklim değişikliğinin, küresel bir sorun olarak insan hayatını tehlikeye sokma kapasitesi bir kez daha ortaya çıkmaktadır.

Yaz aylarında sıcaklıkla bağlantılı solunum yolu hastalıkları, birçok ölüme neden olmaktadır. 2003 yılında, sıcak dalgalarının etkisiyle yaklaşık 70.000 kişi hayatını kaybetmiştir. Ayrıca, sıcaklık artışının şeker hastalığı, enfeksiyon hastalıkları ve depresyon gibi sağlık sorunlarını tetiklediği ve hatta intiharları artırdığı tespit edilmiştir. İklim değişikliğinin etkisiyle aşırı soğuk hava olayları da

görülmektedir. Avrupa'da, her yıl aşırı soğuk hava dalgaları nedeniyle ölümler yaşanabilmektedir. Enfeksiyon hastalıklarının iklimsel göçlerle dünya genelinde hızla yayılması, kitlesel ölümlere yol açabilir (Olgun ve Kantarlı, 2020).

Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO, 2023) göre, 2030-2050 yılları arasında iklim değişikliği nedeniyle günlük ölümler dışında yetersiz beslenme, sıtma ve ishal gibi hastalıkların neden olacağı ölümlerin sayısı 250.000'in üzerine çıkacaktır. Bu ölümlerin büyük bölümü, sağlık altyapısının yetersiz olduğu az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaşanacaktır. Sera gazı salınımlarının düşürülmesi ve sürdürülebilir enerji politikalarının uygulanması, bu olumsuz durumun önlenmesinde kilit rol oynamaktadır.

Su kaynaklarının hızla tükenmesi ve kuraklık, açlık ve kıtlık gibi sorunlar, özellikle Afrika kıtası ve az gelişmiş ülkeler için öncelikli zorluklar arasında yer almaktadır. Bu bölgeler, çeşitli salgın hastalıklar ve yetersiz sağlık hizmetleri nedeniyle iklim değişikliğinin sağlık üzerinde yarattığı olumsuz etkilerle başa çıkmak zorundadır. Ayrıca, iklim değişikliğinin yol açtığı gıda krizleri ile karşı karşıya olan bu ülkeler, dünya genelindeki toplam SGE'ye kıyasla çok daha az emisyonu neden olmaktadır. Bu durumun çözümüne dair gerekli önlemler alınmazsa, küresel iklim değişikliği sadece az gelişmiş ülkeleri değil, uzun vadede gelişmiş ülkeleri de salgın hastalıklar aracılığıyla etkileyerek kitlesel ölümlere neden olacaktır (Gök, 2023).

2.1.1.6. Enerji üzerine etkisi

Fosil yakıtlar, iklim değişikliğine etki eden kritik faktörlerden biridir. Sanayi devrimi ile birlikte üretimden ulaşım kadar geniş bir alanda fosil yakıtların tercih edilmesi, dalgalanan piyasa koşullarından ve yüksek CO₂ emisyonlarından olumsuz etkilenmektedir. Mevcut petrol rezervlerinin azalması ve yeni petrol kaynaklarının keşfindeki azalma, fosil yakıtların sürdürülebilir olmadığını göstermektedir. Bu sebeplerle, sürdürülebilir alternatifler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Brown, 2008).

Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), giderek tükenmekte olan fosil yakıtlara sağlıklı bir alternatif olabilir ve teknolojik gelişmelerle yaygınlaşabilir.

Kyoto Protokolü'nden sonra devreye giren Paris İklim Anlaşması, yenilenebilir enerji kullanımına dair çeşitli yükümlülükleri de getirmiştir. Bu anlaşma, esas olarak endüstriyel olarak gelişmiş ülkelerin SGE'yi azaltma sorumluluklarını belirlerken, aynı zamanda gelişmekte olan ülkelere finansal destek sağlanmasını öngörmektedir. Ancak, büyük petrol ihracatçısı ülkelerin bu anlaşmayı onaylamamış olması, küresel çapta ortak bir taahhüt eksikliğini göstermektedir. Yine de Paris İklim Anlaşması, yenilenebilir enerjiye geçiş konusunda önemli bir ilerleme sağlamıştır.

2.1.2. Sera gazı emisyonlarının azaltılması için yöntemler

Sanayi Devrimi'nin başlangıcıyla birlikte, doğal iklim değişikliklerinin ötesinde, insan kaynaklı aktivitelerin iklim üzerinde belirgin bir etkisi olmaya başlamıştır. İkinci Dünya Savaşı'nın hemen akabinde yaşanan küresel nüfus artışı, dünya genelinde birçok önemli yapısal değişime sebep olmuştur. Artan nüfus ve tüketime paralel olarak tarımsal üretim artmış, endüstrileşme süreci hız kazanmış, uluslararası ticaret yoğunlaşmıştır. Söz konusu büyüme ve gelişmelerin çoğu fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimini arttırmıştır. Endüstriyel atıkların doğaya salınması çevre kirliliğine, atmosfere yayılan sera gazları ise küresel ısınmaya yol açmıştır.

Sera gazlarının temel kaynakları arasında fosil yakıtların yanması, sanayi faaliyetleri, taşımacılık, arazi kullanımındaki değişiklikler, katı atık yönetimi ve tarımsal uygulamalar bulunmaktadır (Türkeş, 2021).

1997 yılında, küresel ısınmayla mücadelede önemli bir aşama olarak görülen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (BMİDÇS) imzalanmasının ardından, sera gazı emisyonlarını (SGE) azaltmayı amaçlayan Kyoto Protokolü imzaya açılmıştır (Kyoto Protokolü, 1998).

Sera gazlarının belirgin özelliklerinden biri, moleküllerinin üç veya daha fazla atomdan oluşmasıdır ve bu moleküller, yüzeyden yayılan kızılötesi radyasyonu emerek bir kısmını geri yansıtır; bu süreç, dünyanın daha fazla ısınmasına yol açar. Paris Anlaşması kapsamında, hükümetler küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerin en fazla 2°C üzerinde tutmayı ve bu artışı

1,5°C'nin altında sınırlamayı taahhüt etmişlerdir. Ancak, şu ana kadar alınan önlemler bu hedefleri gerçekleştirmekte yetersiz kalmaktadır (CAT, 2019).

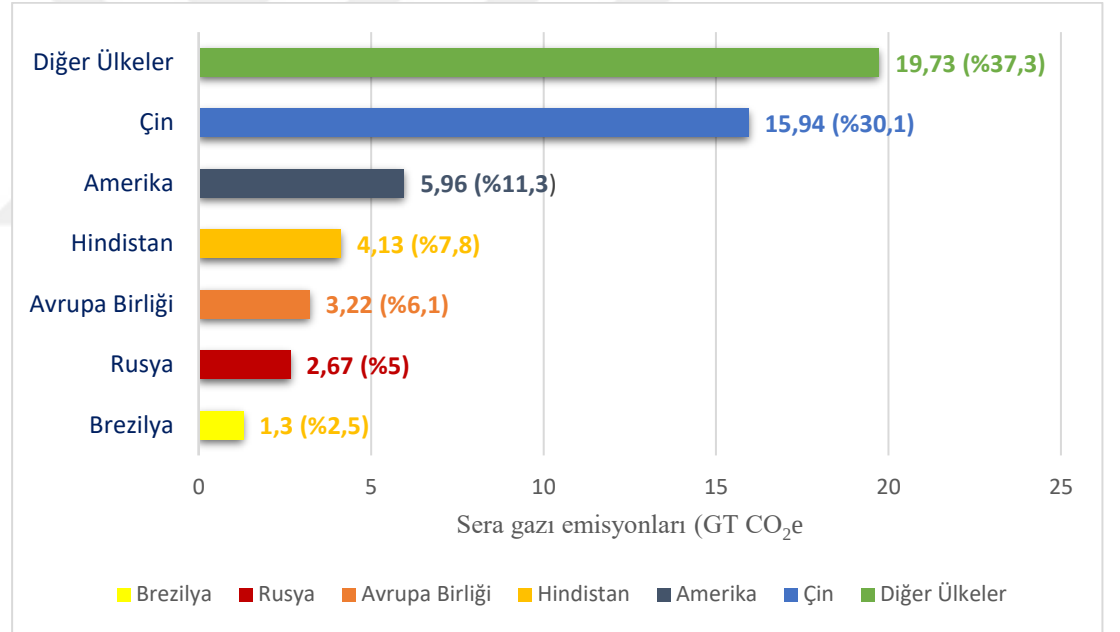
İnsan aktivitelerinin doğrudan bir sonucu olarak ortaya çıkan en belirgin sera gazı karbondioksittir (CO_2). Karbon döngüsünün bir parçası olan karbondioksit, bitkilerin solunumu, okyanuslardaki kimyasal reaksiyonlar, fosil yakıtların yanması ve belirli endüstriyel süreçler yoluyla üretilir. Karbondioksit tüketimi ise fotosentez yoluyla biyosferde veya okyanuslardaki fizikokimyasal süreçlerle gerçekleşir. CO_2 tüketim alanlarına yutaklar, üretim alanlarına ise kaynaklar adı verilmektedir. Karbon ayak izi, insan faaliyetleri sırasında atmosfere salınan sera gazlarının miktarını ifade eder. Bu, ulaşım, ısınma, üretim ve elektrik tüketimi gibi eylemler sırasında salınan ve birim CO_2 cinsinden ölçülen gaz miktarını kapsar. Atmosferdeki birikimi nispeten düşük olmasına rağmen, karbondioksit dünyanın uzun dalga boylu enerjisini emerek atmosferin ısınmasına büyük ölçüde neden olur ve insan kaynaklı SGE'nin yaklaşık %76'sını oluşturur (Türkeş, 2021).

Küresel ölçekte yapılan hesaplamalara göre, insan kaynaklı SGE, küresel karbon dengesini bozarak atmosfere salınan karbon miktarını artırmaktadır. Karbon döngüsünün iki ana bileşeni olan karasal ekosistemler (ormanlar da dahil olmak üzere tüm bitki örtüsünü ve toprakları içerir) ve okyanuslar, toplam karbonun 4,6 megatonluk kısmını oluşturmaktadır. Okyanuslar ve karasal ekosistemler tarafından tutulan veya uzaklaştırılan karbon miktarı, atmosfere salınan toplam karbon miktarından çıkarıldığında, insan faaliyetlerinden kaynaklanan net 3,3 megaton karbonun (MtC) her yıl atmosferde biriktiği tespit edilmiştir. İklim değişikliğini durdurmanın anahtarı, bu yıllık 3,3 MtC fazlalığını kontrol altına almak ve atmosferden uzaklaştırmaktır. Küresel ısınmaya en fazla etki eden sera gazı olan CO_2 , pek çok analizde diğer SGE'nin yerine kullanılmaktadır. Ayrıca, SGE miktarları, tüm sera gazları için CO_2 eşdeğeri birimleriyle ifade edilmekte ve böylece farklı sera gazlarının emisyonları bir araya getirilebilmektedir (Berberoğlu, 2021).

Endüstri çağı öncesinde atmosferdeki karbondioksit miktarı 280 ppm (milyonda bir parça) seviyesindeyken, 2019 yılında bu değer 412,43 ppm'ye

artmıştır. 2024 yılı Mart ayında ise karbondioksit seviyesi 425 ppm olarak tespit edilmiştir (NASA, 2024).

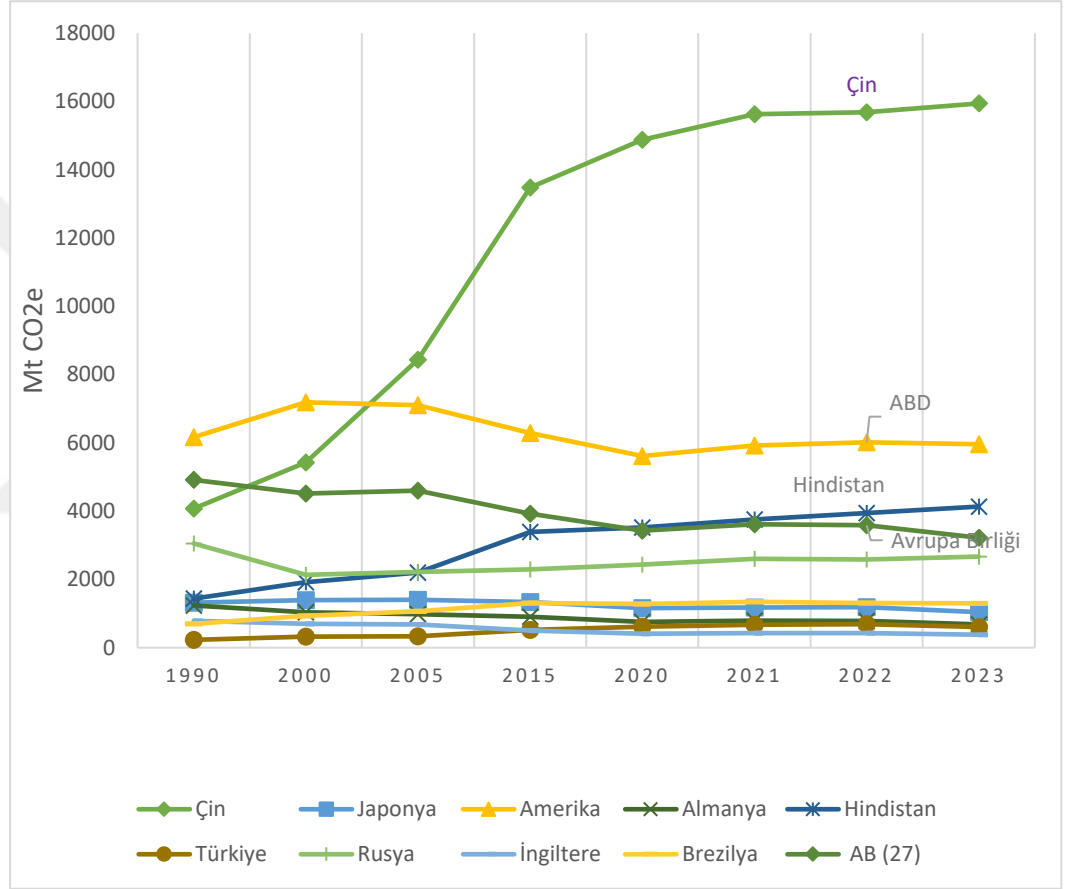
Yakın dönemde, küresel sera gazı salımları, genellikle Çin ve diğer hızla büyüyen ekonomilerin salımlarındaki artışa bağlı olarak artış göstermiştir. COVID-19 salgını sebebiyle, 2020'de küresel emisyonlar, 2019'a kıyasla %3,7 azalmış ve uzun süredir devam eden artış trendi bir miktar düzelmiştir. Ancak, salgının zirvesinin ardından küresel SGE yeniden yükselmeye başlayarak 2022'de, 2019 seviyelerine göre %2,3 ve 2021'e göre %1,4 artmış ve 53,8 Gigaton CO_{2e} seviyesine ulaşmıştır. BMİDÇS kapsamında, ülkeler kendi emisyon envanterleri oluşturmakta ve sera gazı salımlarını azaltmaya yönelik adımlar atmaktadırlar. CO₂ emisyonları, küresel iklim değişikliği azaltma anlaşmalarına rağmen, dünya çapında hala artmaktadır (The Emissions Database for Global Atmospheric Research, 2024).



Şekil 2.3. Ükelere göre 2023 yılı küresel sera gazı emisyonları (European Commission et al., 2024).

Dünya genelindeki SGE'lerin büyük bir kısmı sadece birkaç ülke tarafından salınmaktadır. 2023 yılında, SGE'ye neden olan ilk altı ülke; Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan, Avrupa Birliği, Rusya ve Brezilya olmuştur. Bu ülkeler, küresel Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın yaklaşık üçte ikisini, küresel nüfusun yarısını, küresel fosil yakıt tüketimi ve SGE'nin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Çin,

SGE'lerin yüzde 30,1'ini oluşturarak en büyük emisyon kaynağıdır. Ardından yüzde 11,3 ile ABD, yüzde 7,8 ile Hindistan ve yüzde 6,1 ile Avrupa Birliği gelmektedir. 2023'te Çin, Hindistan, Rusya ve Brezilya emisyonlarını 2022'ye kıyasla artırmış, Hindistan yüzdesel olarak en büyük artışı (+%6,1) ve Çin 784 Mt CO₂e ile en büyük mutlak artışı yaşamıştır. 2023'te Hırvatistan ve Kıbrıs hariç tüm AB ülkeleri, bir önceki yıla kıyasla emisyon seviyelerinde bir düşüş yaşamıştır (European Commission et al., 2024).

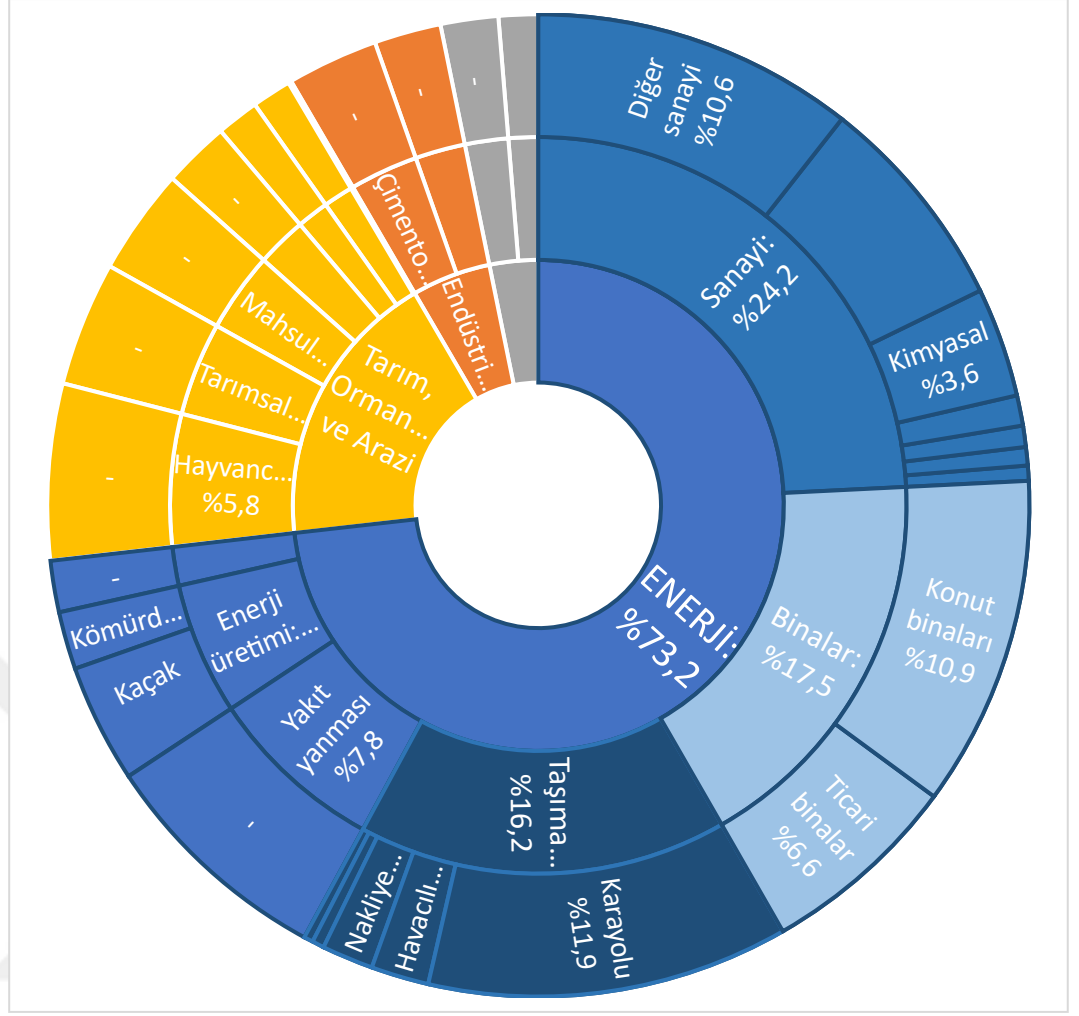


Şekil 2.4. Ükelere göre 1990-2023 yılları arasındaki sera gazı emisyonları (European Commission et al., 2024).

Uzun vadeli bir perspektifle bakıldığında, 2023 yılındaki en büyük altı emisyon yayıcısını (Çin, Amerika Birleşik Devletleri, AB, Hindistan, Rusya Federasyonu, Brezilya) ele aldığımızda, Avrupa Birliği'nin sera gazı emisyonları, en çok emisyonu neden olan ekonomiler arasında en önemli göreceli düşüşü göstererek, 2023'te 1990'a göre %33,9 daha düşük olduğu ve sera gazı

emisyonlarının ekonomik büyümeden ayrıldığı görülmektedir. Aynı dönemde, Rusya'nın sera gazı emisyonları da %12,8 azalırken, Amerika Birleşik Devletleri'nin emisyonları %4,0 azalmıştır. Aksine, Çin ve Hindistan gibi birleşen ekonomiler sera gazı misyonlarında önemli artışlar yaşamışlardır. Çin'in sera gazı emisyonları 1990'dan 2023'e %311,3 artarken, Hindistan'ın sera gazı emisyonları %198,9 ve Brezilya'nın sera gazı emisyonları %93,6 artmıştır (European Commission et al., 2024).

Sürdürülebilir bir iklim için, küresel sera gazı salımlarının hızla azaltılması zorunludur. Her yıl dünya yaklaşık 50 milyar ton sera gazı salınımına maruz kalmaktadır. Emisyonları en etkili biçimde azaltmak ve mevcut teknolojilerle hangi emisyonların ortadan kaldırılabilceğini anlamak için öncelikle salımların kaynağını belirlemek önemlidir (Ritchie, 2020).



Şekil 2.5. Küresel sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı, 2016 (Ritchie and Roser, 2020).

Şekil 2.5’de belirtilen dağılıma göre, emisyonların %73’ü enerji kullanımından, %18,4’ü tarım ve arazi kullanımından, %8’i ise sanayi ve atıklardan kaynaklanmaktadır (Ritchie, 2020).

Enerji tüketimi, insanlardan kaynaklanan sera gazı salınımlarının en büyük kaynağıdır. Bu emisyonların büyük bir kısmı, karayolu taşımacılığı (%11,9), konut binaları (%10,9) ve ticari binalar (%6,6) gibi faaliyetlerle ilişkilendirilmektedir. Bu tür faaliyetlerden kaynaklanan emisyonlar, doğrudan fosil yakıt yakılmasından kaynaklananlarla birlikte elektrik kullanımı gibi dolaylı emisyonları da içermektedir. Enerji dışındaki önemli faktörler arasında ise hayvancılık ve gübre (%5,8) ile tarımsal topraklar (%4,1) bulunmaktadır. Son 30 yılda, sera gazı emisyonlarının en hızlı büyüyen kaynakları arasında endüstriyel işlemler %203,

elektrik ve ısıtma %84 ve ulaştırma %78 artış göstermiştir. Endüstriyel emisyonlardaki artış, yalnızca CO₂ salımlarından değil, aynı zamanda artan soğutma ve iklimlendirme kullanımıyla da ilişkilendirilebilir. Bu tür faaliyetler, güçlü sera gazları olan hidroflorokarbonların üretilmesine yol açar. Otomobil seyahatlerindeki artış, ulaşım salımlarının ana itici güçlerinden biridir. Farklı endüstriler ve süreçlerdeki emisyonlar nedeniyle, tek veya basit bir çözümün mümkün olmadığı anlaşılabılır. Tek başına elektrik, ulaşım, gıda veya orman tahribatına odaklanmak yeterli değildir (Ge et al., 2020).

1970’li yıllardan itibaren çevresel problemler, dünya çapındaki ülkeler için en önemli meselelerden biri haline gelmiştir. Bu süre zarfında, çevre ile ilgili sayısız rapor hazırlanmış, uluslararası düzeyde pek çok toplantı düzenlenmiş ve bu toplantılarda alınan kararlar doğrultusunda çeşitli anlaşmalar, sözleşmeler ve eylem planları onaylanmıştır. Gerekli tedbirlerin alınması, sanayi sektörlerinde emisyonları azaltan teknolojik yatırımların yapılması, yenilenebilir enerji teşviklerinin sağlanması gibi çalışmalar, toplantılara katılan ülkelerin politikalarında giderek daha fazla yer bulmaktadır. Tüm bu düzenlemelerin nedeni, küresel nitelikteki çevre sorunlarıdır.

BM’nin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri içerisinde bulunan “İklim Eylemi” hedefi, dünya genelindeki tüm ülkelerin iklim değişikliği sorununu küresel ve acil bir mesele olarak algılamalarını hedefler. Bu sorunun çözümü için, tutarlı, etkili ve hızlı adımlar atılabilmesi için ulusal politikalarda iklim değişikliğinin merkezi bir konu haline getirilmesi, ulusal stratejilerde farkındalığın artırılması ve insanları iklim sorunları ve alınması gereken önlemler konusunda eğitmek amaçlanır. İklim değişikliği kontrol altına alınmazsa, ekonomileri etkileyecek, deniz seviyelerinin yükselmesi, hava koşullarının değişmesi ve doğal afetlerin daha sık ve şiddetli bir şekilde yaşanması gibi sonuçlar insan hayatlarını olumsuz yönde etkileyecektir.

Sera gazı emisyonlarının artmasının ekosistemleri, ekonomileri ve insan yaşamını ciddi şekilde tehdit ettiği anlaşıldığında, bireysel ülkelerin çözüm arayışları bölgesel ve küresel iş birliklerine ve kapsamlı çözüm bulma çabalarına evrilmiştir. Bu konuda atılan en önemli adımlar arasında; 1994’te yürürlüğe giren

BMİDÇS, 2005'te yürürlüğe giren Kyoto Protokolü, 2016'da yürürlüğe giren ve Türkiye'nin de 2016'da imzalayıp Kasım 2021 itibarıyla resmen taraf olduğu Paris İklim Anlaşması bulunmaktadır. Ayrıca, Avrupa Birliği'nin 2019'da ilan ettiği Avrupa Yeşil Mutabakatı, karbon nötrlüğe ulaşmayı hedefleyen ve bölgesel bir girişim olmasına rağmen uluslararası etkileri zamanla küresel ölçekte hissedilebilecek önemli bir adımdır (Dam, 2014).

2.1.2.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

1988 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından düzenlenen IPCC, insan faaliyetlerinin küresel ısınma üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu etkilerle mücadelede atılacak en kritik ve öncelikli adım olarak 1992 yılında Rio de Janeiro'da yapılan Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Zirvesi'nde, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi imzaya açılmıştır. Türkiye, sözleşmeye Mayıs 2004'te katılmıştır. Günümüzde, Türkiye dahil olmak üzere 197 ülke bu sözleşmeye taraf olarak yer almaktadır (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2023).

Sözleşmenin esas amacı; atmosferde bulunan sera gazı yoğunluğunun istikrarlı bir şekilde korunmasıyla iklim üzerindeki antropojenik etkilerin önlenmesidir. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun artışının kontrol edilmesiyle hedeflenen tatmin edici seviyenin, ekosistemlerin iklim değişikliğine doğal olarak uyum sağlayabilecekleri seviye olduğu vurgulanmıştır. İnsanlığın devamı için gıda üretiminin riske girmemesi ve ekonomik büyümenin sürdürülebilir bir şekilde devam etmesi amaçlanmıştır (United Nations, 2023b).

2.1.2.2. Kyoto Protokolü

1997'de Japonya'nın Kyoto şehrinde düzenlenen Birleşmiş Milletler 3. Taraflar Konferansı'nda, Kyoto Protokolü müzakereler sonucunda kabul edilmiştir ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Türkiye, 1997 yılında Birleşmiş Milletler İklim Sözleşmesi'ni imzalamış olup, Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü (OECD) üyesi olması nedeniyle protokolün ekinde yer alan gelişmiş ülkeler listesine dahil edilmiştir. Gelişmiş ülkelerin emisyonlarını sınırlama taahhüdünün ardından,

listeden çıkarılma talebinde bulunan Türkiye, 2009'da listeden çıkarıldıktan sonra Kyoto Protokolü'ne taraf olmuştur. Sanayileşmiş ülkelerin belirlenen oran ve süreler dahilinde sera gazı emisyonlarını azaltmayı taahhüt ettiği Kyoto Protokolü, karbon emisyonlarının düşürülmesi için yükümlülükler ve uygulanacak mekanizmaları belirlemektedir. Bu anlaşma kapsamında, 2008 ile 2012 yılları arasında sanayileşmiş ülkelerin sera gazı emisyonlarını 1990 yılındaki seviyenin %5'in altına düşürme hedefi konulmuştur. Avrupa Birliği, çevreci politikalar benimseyerek hedefini %8'e, Japonya da hedefini %6'ya yükseltmiştir (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2024a).

Kyoto Protokolü'nde başlatılan uygulamalar şu şekildedir: (Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, 2024).

1. Emisyon Ticareti: Protokole taraf olan ülkeler, emisyon azaltım miktarlarının bir kısmının ticaretini yapabilirler. Ancak, emisyon ticareti sadece emisyonları azaltma yükümlülüğü bulunan gelişmiş ülkeler arasında gerçekleştirilebilir.
2. Ortak Uygulama: Ülkeler, emisyon azaltımı ile elde ettikleri emisyon azaltım kredilerini, toplam hedeflerinden düşebilirler.
3. Sürdürülebilir Kalkınma Mekanizması: Ülkeler, diğer ülkelerde gerçekleştirdikleri projeler aracılığıyla "Onaylanmış Emisyon Azaltım Kredisi" kazanabilirler. Az gelişmiş ülkeler, bu projeleri kendi olanaklarıyla yürüterek kredi elde edebilir ve bu kredileri daha sonra satabilirler. Bu sistem, CO₂ emisyonlarını azaltan projeleri teşvik ederken, aynı zamanda az gelişmiş ülkelere finansal kaynak ve teknoloji transferi sağlamayı da destekler.

2.1.2.3. Paris Anlaşması

Kyoto Protokolü'nün 2020 yılında süresinin dolması nedeniyle, 2015'te Fransa'nın Paris kentinde düzenlenen Birleşmiş Milletler 21. Taraflar Konferansı'nda, 2020 yılı sonrası dönem için Paris Anlaşması kabul edilmiştir. Bu anlaşma, 4 Kasım 2016'da yürürlüğe girmiştir ve iklim değişikliğiyle mücadelede,

küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelere göre 2°C'nin altında tutmayı hedeflemektedir.

Türkiye, Paris Anlaşması'nı 22 Nisan 2016'da imzalamış ve 7 Ekim 2021'de resmi onay sürecini tamamlamıştır. Türkiye bu anlaşma ile 2030 yılına kadar emisyonlarını %21 azaltmayı hedeflediğini beyan etmiştir. Türkiye ayrıca, 2053 yılında net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı amaçladığını açıklayarak, yeşil kalkınma stratejisini başlatmıştır.

Paris Anlaşması'nın BMİDÇS'ne göre temeldeki en büyük farkı, her ülkenin somut katkılarını sağlayacakları bir sistem oluşturmastır. Tüm taraflar, ortak ama gelişmişlik düzeylerine göre farklılaştırılmış sorumluluklar almayı kabul etmiştir. Anlaşma, iklim değişikliğinden olumsuz etkilenecek ülkelerin uyum sağlamaları ve sera gazı azaltım yeteneklerini geliştirmeleri için özellikle gelişmekte olan ülkelere finansal ve teknolojik destek sağlanmasını öngörmektedir (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2024b).

2.1.2.4. Avrupa Yeşil Mutabakatı

AB, Aralık 2019 yılında duyurduğu Avrupa Yeşil Anlaşması ile AB politikalarını iklim değişikliği bağlamında yeniden şekillendirmeye karar vermiştir. Avrupa Birliği, 2050 yılına kadar karbon nötrlüğe ulaşmayı amaçlamaktadır ve bu hedef doğrultusunda; ekonomik ve endüstriyel büyüme modellerini iklim değişikliğiyle mücadeleyi önceliklendirecek şekilde yeniden yapılandırmaya başlamıştır. Avrupa Birliği, 2030'a kadar sera gazı emisyonlarını %55 azaltmayı amaçlamakta ve 2050'ye kadar dünyanın ilk karbon nötr kıtası olmayı planlamaktadır. Yeşil Mutabakat, AB'nin modern ve rekabetçi bir ekonomiye geçişini hızlandırmayı hedeflemektedir. AB Yeşil Anlaşması ve düşük karbon ekonomisine geçişin adımları ise şu şekilde sıralanabilir: (European Commission, 2024).

- ◆ AB içinde, enerji sektöründen, endüstriden ve havacılık sektörlerinden kaynaklanan SGE'leri azaltma hedefi doğrultusunda AB Emisyon Ticareti Sistemi'nin uygulanması,

- ◆ Emisyon ticaretinin kapsamı dışında kalan ulaşım, binalar ve tarım sektörleri için özel ulusal hedeflerin belirlenmesi,
- ◆ Doğal yaşamın restore edilmesiyle biyolojik çeşitliliğin artırılması, karbon emiliminin ve depolanmasının teşvik edilmesi,
- ◆ Taşımacılık kaynaklı SGE'lerin azaltılması için araçlarda emisyon standartlarının belirlenmesi gibi çeşitli stratejilerin kullanılması,
- ◆ Enerji verimliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji ve düşük karbon teknolojilerinin teşvik edilmesidir.

2.1.2.5. Birleşmiş Milletler İklim Konferansı

BMİDÇS'nin yürürlüğe girmesinden sonra düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Konferansları, dünya ülkelerinin bir araya gelerek çözüm yolları aradığı önemli bir platform haline gelmiştir. İlk kez 1995 yılında Berlin'de gerçekleşen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Birinci Konferansı COP-1 (Taraflar Konferansı-1) olup bugüne kadar 28 konferans düzenlenmiştir. Kyoto Protokolü, Japonya'nın Kyoto şehrinde düzenlenen COP-3'te, Paris Anlaşması ise 2015 yılında gerçekleşen COP-21'de kabul edilmiştir. Birleşik Krallık'ın Glasgow kentinde düzenlenen 1-12 Kasım 2021 tarihlerindeki Birleşmiş Milletler 26. Taraflar Konferansı (COP26), Paris Anlaşması hedeflerinin yeniden vurgulandığı bir platform olmuş ve üç önemli hedefin üzerinde ilerleme kaydedilmiştir:

- ◆ Küresel ısınmayı 1,5 derece ile sınırlandırmak amacıyla emisyon azaltımı taahhüdünde bulunulması.
- ◆ Gelişmekte olan ve kırılgan ülkeler için yıllık 100 milyar USD'lik iklim finansmanı sağlama taahhüdüne bağlı kalınması.
- ◆ Paris Anlaşması'nın uygulanmasına yönelik Paris Kural Kitabı üzerinde anlaşmaya varılması.

COP26 Taraflar Konferansı'nın ardından, 190'dan fazla ülkenin sağladığı uzlaşa AB Komisyonu tarafından da desteklenmiştir. Bu konferans kapsamında, kömür kullanımı ve fosil yakıt sübvansiyonlarının kademeli olarak azaltılmasına yönelik çabaların hızlandırılması kararlaştırılmıştır. Temiz enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve enerji tasarrufu sağlama konusunda alınacak tedbirler üzerinde durulmuş, düşük emisyonlu enerji üretim sistemlerine geçiş için ileri teknolojilerin geliştirilmesine yönelik çağrılar yapılmıştır. Paris Anlaşması'na ilişkin Kurallar Kitabı da bu süreçte tamamlanmıştır (Demir, 2022)

27. İklim Değişikliği Konferansı, Kasım 2022'de Sharm El-Sheikh'de gerçekleşmiş ve tüm katılımcı ülkelerin iklim krizine karşı en kötü senaryolardan kaçınmak için daha fazla çaba göstermeleri gerektiği vurgulanmıştır. COP27'nin en önemli kararlarından biri, sel ve kuraklık gibi iklim felaketlerine karşı savunmasız ülkeler için bir kayıp ve zarar fonu oluşturulmasıdır. Ayrıca, sanayi öncesi döneme kıyasla küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamak amacıyla ülkelerin kararlılıkla hareket etmeleri gerektiği ve iş dünyası ile akademik çevrelerin verdikleri taahhütlerde şeffaflık sağlamalarının önemi vurgulanmıştır. Düşük karbon ekonomisine geçişin geniş kapsamlı bir finansal dönüşüm gerektirdiği ve bu dönüşümde tüm finansal aktörlerin önemli rol oynaması gerektiği belirtilmiştir. Önceki iklim konferansları daha çok anlaşma ve planlama üzerine yoğunlaşmışken, COP27 uygulamaya yönelik görüşmelerle dikkat çekmiştir (United Nations, 2022).

En son gerçekleşen iklim değişikliği konferansı, COP-28, Birleşik Arap Emirlikleri'nde 12 Kasım ile 12 Aralık 2023 tarihleri arasında düzenlenmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA'nın) öngörülerine göre, küresel ısınmanın 1,5°C ile sınırlanabilmesi hedefinde dünya, 2030'a kadar üç kat daha fazla yenilenebilir enerji kapasitesine veya en az 11.000 GW'a ulaşmalıdır. Ayrıca, küresel ortalama yıllık enerji verimliliği iyileştirme oranının 2030'a kadar her yıl %2'den %4 ve üzerine çıkarılması gerektiğinin altı çizilmiştir (COP28 UAE, 2024).

Küresel durumun gözden geçirilmesi adı altında, özellikle enerji alanında yapılan incelemeler önemli kararları beraberinde getirmiştir (UNFCCC, 2024);

- ◆ Yenilenebilir enerji kaynaklarının üç kat ve enerji verimliliğinin iki kat artırılması hedeflenmiştir.
- ◆ 2050 yılına kadar net sıfır emisyonlu enerji sistemlerine geçişin hızlandırılması için çabalara ağırlık verilmiştir.
- ◆ Fosil yakıtlardan uzaklaşmanın hızlandırılması öngörülmüştür.
- ◆ Karbon yakalama ve azaltım teknolojilerinin geliştirilmesine ivme kazandırılması hedeflenmektedir.
- ◆ Karbondioksit dışı emisyonların küresel ölçekte azaltılması için daha fazla çaba harcanması planlanmaktadır.
- ◆ Düşük ve sıfır emisyonlu ulaşım araçlarının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır,
- ◆ Enerji yoksulluğunu hedef alan ve adil geçişi desteklemeyen fosil yakıt sübvansiyonlarının en kısa sürede kaldırılması yönünde adımlar atılması kararlaştırılmıştır.

2.1.3. Türkiye’de Sera Gazı Azaltımı Mücadele Yöntemleri

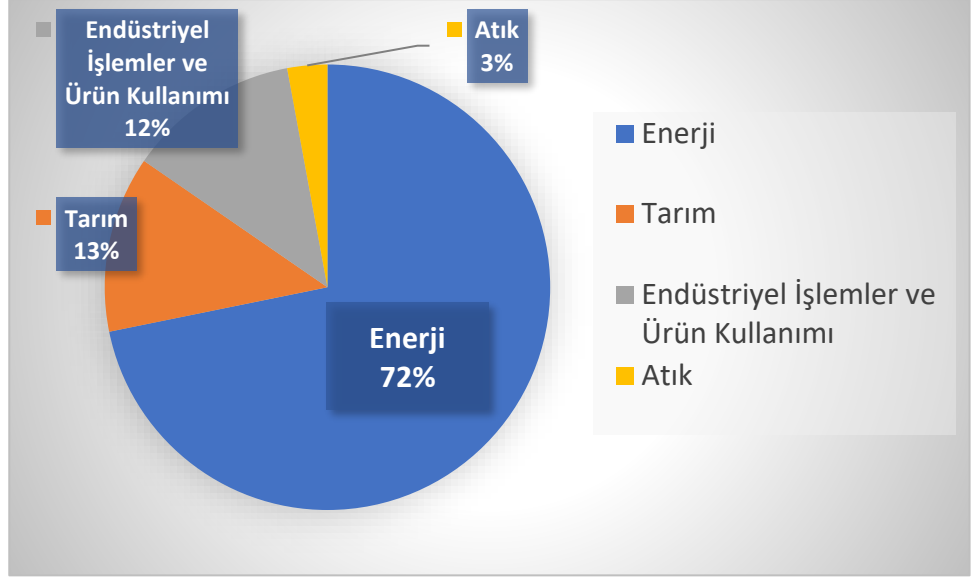
Türkiye, Akdeniz Havzası’nda konumlanmış olup, bölgede küresel ısınmanın etkisiyle sıcaklıkların artması beklenmektedir. Bu sıcaklık artışı, çeşitli çevresel değişimlere yol açarak, iklim değişikliğinin olumsuz etkileriyle mücadelede stratejik planlamaların yapılmasını gerektirmektedir. Uluslararası raporlar Akdeniz Havzası genelinde sıcaklıkların yükselmesi ile geniş çaplı kuraklıkların oluşacağını belirtmektedir. Türkiye’de sıcaklıkların 2,5° ila 4°C arasında artacağı, Doğu Anadolu ve Ege’de 4°C’ye, iç kesimlerde 5°C’ye kadar çıkacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda, uluslararası ve ulusal raporlara göre Türkiye, yakın gelecekte mevcut durumuna göre daha kurak ve sıcak bir iklimle karşı karşıya kalacak ve yağışları daha düzensiz ve belirsiz olacaktır (T.C. Çevre Şehircilik Bakanlığı, 2012).

WWF (Doğal Hayatı Koruma Vakfı) Türkiye'nin hazırlamış olduğu rapora göre, iklim değişikliği ile çeşitli olumsuz etkiler ortaya çıkacaktır. Raporda belirtilen başlıca etkiler şöyle öngörülmektedir:

- ◆ 2030'ların sonuna kadar sıcaklık artışının sınırlı kalacağı, ancak bu dönemi takiben belirgin bir artış yaşanacağı ifade edilmektedir.
- ◆ Bölgelere göre değişmekle beraber sıcaklık artışlarının kışın 4°C, yaz döneminde ise 6°C'ye ulaşması beklenmektedir.
- ◆ Türkiye genelinde kış dönemindeki yağışlarda bir düşüş beklenirken, yalnızca Kuzey Anadolu'nun doğu kesiminde yağış miktarında bir artış öngörülmektedir.

Tüm bu faktörler değerlendirildiğinde; ani ve şiddetli hava olaylarında artış, daha sık ve yoğun sıcak hava dalgaları, kuraklık ve bunun sonucu olarak tarımsal üretimde düşüş, orman yangınlarının sayısı ve şiddetinde artış, biyolojik çeşitliliğin azalması ve turizm sektörünün olumsuz etkilenmesi gibi sonuçların ortaya çıkması beklenmektedir.

İklim değişikliğiyle kararlı bir şekilde mücadele edebilmek için, Paris Anlaşması kapsamında belirlenen küresel sıcaklık artışını 1,5 °C ile sınırlandırma hedefinin hızla gerçekleştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu çerçevede, Türkiye 2021 yılında Paris Anlaşması'na katılarak, 2053 yılı için "Net Sıfır Emisyon" hedefini ilan etmiştir. Ayrıca, emisyon azaltım hedefini referans senaryoya göre %21'den %41'e çıkardığını bildirmiştir.¹² Kalkınma Planı, Orta Vadeli Program ve 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi doğrultusunda “*İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı 2024-2030*” hazırlanmıştır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).



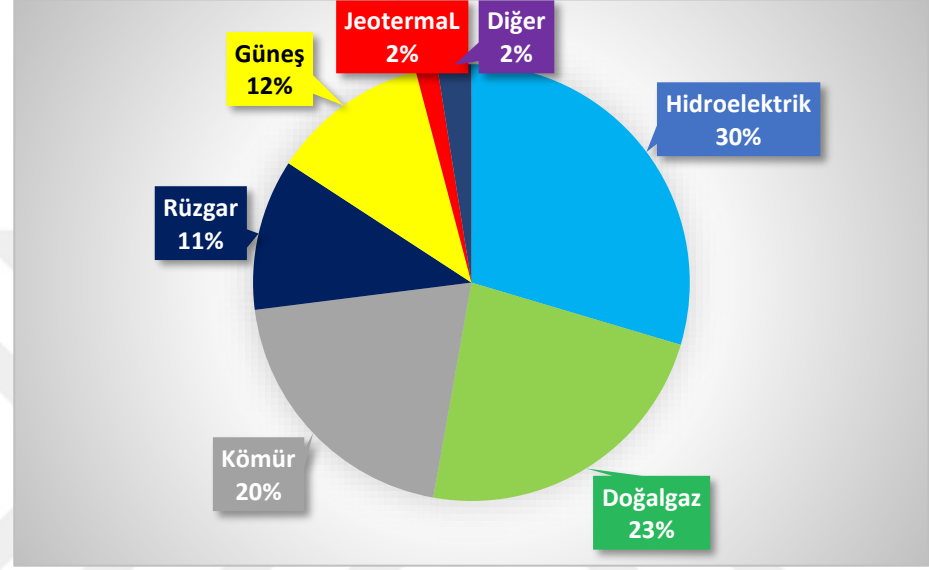
Şekil 2.6. Türkiye'nin 2022 yılı sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı (TÜİK, 2024b).

2022 yılı verilerine göre, toplam emisyonların %71,8'ünü enerji sektörü oluşturarak en büyük paya sahiptir. Bu sektörü, %12,8 ile tarım, %12,5 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %2,9 ile atık sektörleri izlemektedir (TÜİK, 2024b).

2.1.3.1. Enerji

Son on yılda Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretiminde üç kat artış gerçekleştirmiş ve yerli enerji kaynaklarını çeşitlendirme konusunda ilerleme kaydetmiştir. Bununla birlikte, fosil yakıt bağımlılığı hala yüksektir; doğalgazda %99, petrolde %93, ve kömürde %30 oranında dışa bağımlılık sürmektedir. Bu yüksek dışa bağımlılık, ülkenin cari işlemler dengesini olumsuz etkilemektedir. Ekonomik büyüme ve nüfus artışı enerji talebini artırmakta, yerli enerji kaynaklarının yetersizliği ise enerji ithalatının yüksek seviyelerde kalmasına neden olmaktadır. Ancak, Türkiye son yıllarda enerji sektöründe SGE'leri azaltmak ve iklim değişikliğine uyum sağlamak amacıyla yenilenebilir enerjiye daha fazla yatırım yapmaktadır. 2021-2022 döneminde devreye giren yeni santrallerin yaklaşık %78'i yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

2023'te Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi, bir önceki yıla göre %0,2 oranında azalarak 330,3 TWh'a düşmüş, elektrik üretimi ise %0,6 oranında azalarak 326,3 TWh olarak gerçekleşmiştir. Türkiye Ulusal Enerji Planı projeksiyonlarına göre, elektrik talebinin 2025'te 380,2 TWh ve 2030'da 455,3 TWh seviyelerine ulaşması beklenmektedir. Mart 2024 itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücü ise 107.959 MW'a ulaşmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024a).

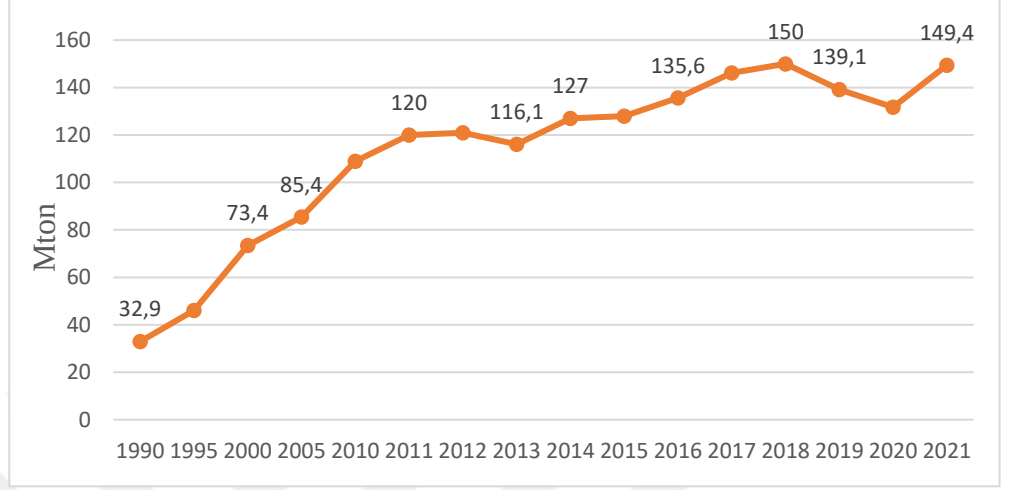


Şekil 2.7. Türkiye 2024 yılı Mart ayı sonu itibarıyla elektrik üretimi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024a).

Türkiye'nin elektrik enerjisi kurulu gücü 100.000 MW'ı aşmaktadır. Son zamanlarda yenilenebilir enerjiye odaklanan politikaların uygulanmasıyla birlikte, kömürle çalışan santrallerin payı azalmaktadır. 2024 Mart ayı sonunda, Türkiye'nin elektrik üretiminde kaynaklara göre dağılımı; %11,7'si güneş, %11,2'si rüzgâr, %29,6'sı hidrolik enerji, %1,6'sı yer altı sıcak su, %23,2'si doğal gaz, %20,2'si kömür ve %2,5'i diğer kaynaklardan sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerjinin toplam kurulu güç içindeki payı %54'e ulaşmış durumdadır (Şekil 2.7). Türkiye'nin rüzgâr ve güneş enerjisinin toplam üretim içindeki katkısı %22,9 ile Asya kıtasındaki en yüksek seviyedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024a).

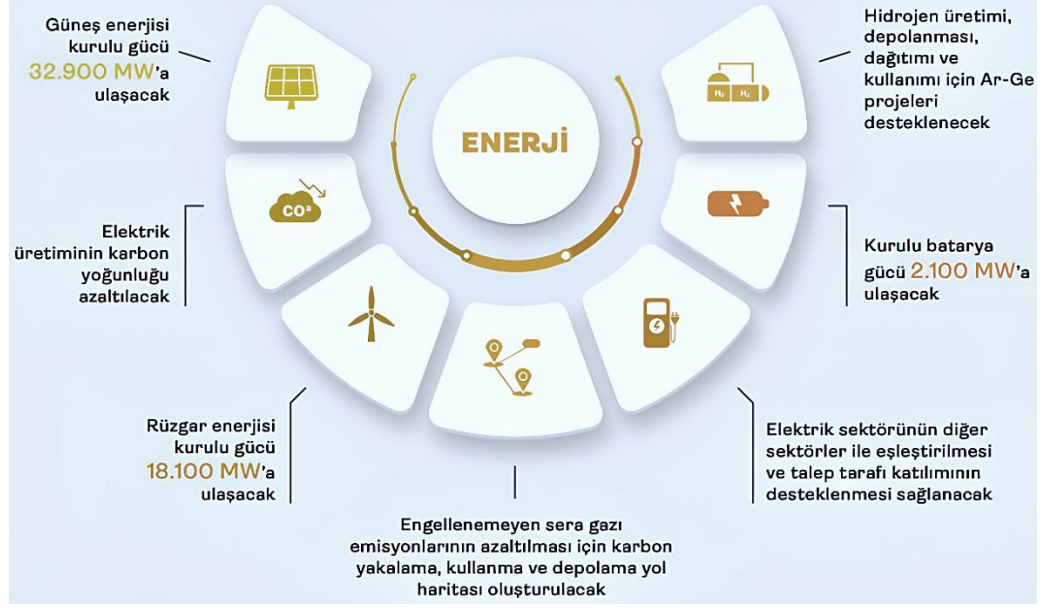
Türkiye'nin önemli karbon emisyonu kaynaklarından biri olan elektrik üretimi yıllar içinde artan bir eğilim göstermektedir. 2021'de, elektrik ve ısı üretimi kaynaklı emisyonlar 149,4 milyon ton CO₂ eşdeğerine ulaşmıştır ve sadece elektrik

sektöründen kaynaklanan emisyon miktarı 140,7 milyon ton CO₂ eşdeğerindedir. Elektrik üretimine bağlı emisyonlar, toplam emisyonların %24,8'ini oluşturur (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).



Şekil 2.8. Türkiye'nin 1990-2021 yılları arasındaki elektrik ve ısı üretimi kaynaklı karbon emisyonları (Mton), (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Bu bağlamda enerji sektöründe; elektrik üretiminin karbonsuzlaştırılması, sektörün diğer endüstrilerle entegre edilmesi, tüketici katılımının teşvik edilmesi, elektrik altyapısının güçlendirilmesi ve verimliliğin artırılması yoluyla SGE'nin azaltılması için karbon yakalama, kullanma ve depolama stratejileri belirlenmiştir.



Şekil 2.9. Türkiye'nin enerji sektörüne yönelik strateji ve eylemleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

➤ Karbonsuz elektrik üretiminin teşviki:

◆ Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerjilerine dayalı elektrik üretim kapasitesinin artırılması,

◆ Özellikle evler ve küçük işletmeler için dağıtık yenilenebilir enerji sistemlerinin genişletilmesi,

➤ Elektrik sektörünün diğer sektörlerle iş birliği ve talep yönetiminin desteklenmesi:

◆ Batarya teknolojilerinin geliştirilmesi,

◆ Yenilenebilir enerji sistemlerinin şebeke altyapısına entegrasyonunun güçlendirilmesi,

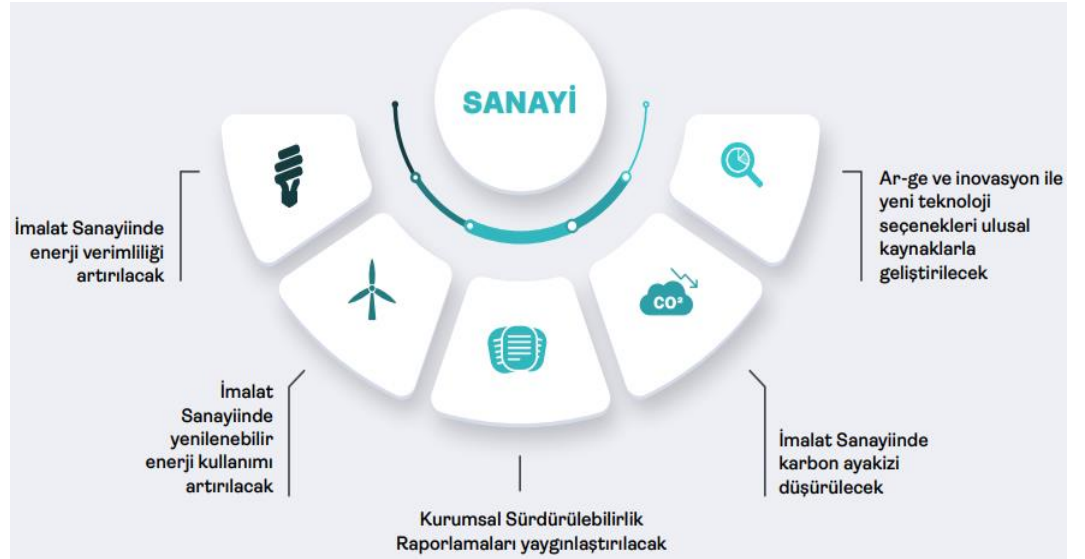
➤ Elektrik altyapısının güçlendirilmesi ve verimliliğin artırılması ile iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması,

➤ Elektrik üretiminde karbon emisyonu düşük teknolojilerin benimsenmesi ve alternatif enerji seçeneklerinin artırılması:

- ◆ Küçük ölçekli modüler reaktörlerin kullanımı için fizibilite çalışmaları yapılmasıdır.

2.1.3.2. İmalat sanayi sektörü

Türkiye ekonomisindeki önde gelen sektörlerden biri olan sanayide, katma değer açısından en büyük pay imalat sanayisindedir. İmalat sanayi sektörü, çeşitli alt alanlardan meydana gelmektedir. Bu alt alanlar arasında demir-çelik, ilaç, kimya, inşaat malzemeleri, elektrikli ve elektronik ekipmanlar, otomotiv ve hazır giyim sektörleri, dikkate değer ihracat kalemleri olarak öne çıkmaktadır. 2021 yılında sanayi sektörünün emisyonları, 141,4 milyon ton CO₂e olarak kaydedilmiştir ve Türkiye genel emisyonlarının %25'ini oluşturmuştur. Bu emisyonlar arasında enerji ve proses emisyonları, sırasıyla 66,24 ve 75,14 milyon ton CO₂e'ye ulaşmıştır. Toplam imalat sanayi emisyonları, 1990 yılında 60 milyon ton CO₂e'den 2021 yılında ise 141,4 milyon ton CO₂e'ye yükselmiştir. Bu bağlamda, imalat sanayi sektöründe emisyon azaltımına odaklı stratejiler belirlenmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a);



Şekil 2.10. Türkiye'nin sanayi sektörüne yönelik strateji ve eylemleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

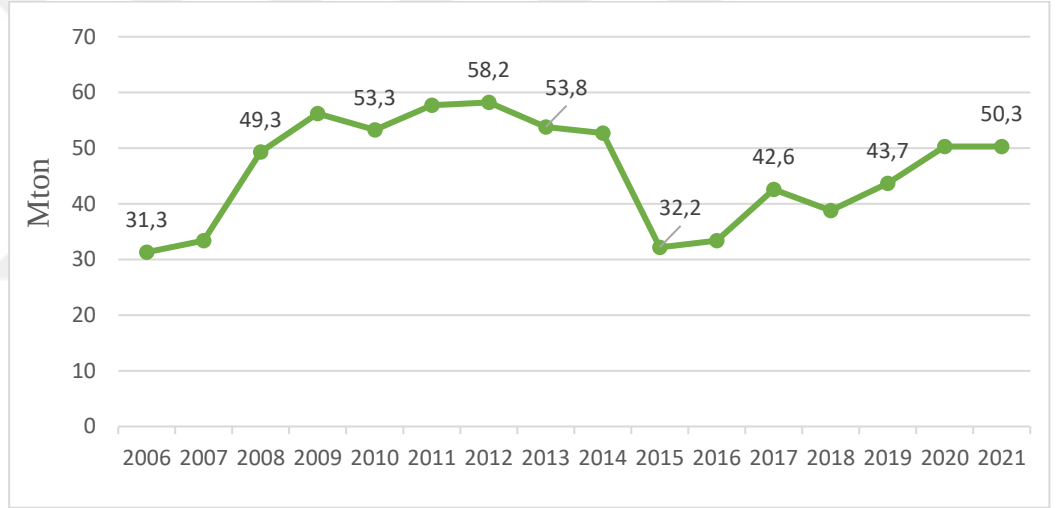
- Üretim endüstrisinde enerji verimliliğinin maksimum düzeyde kullanılması,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim endüstrisindeki kullanımının artırılması,
- Kamu inşaat ve altyapı projelerinde kullanılan çimento oranının azaltılması için çalışmalar yapılması,
- Üretim sektörü paydaşlarının kapasitelerinin geliştirilmesi,
- Tüm üretim alanlarında kaynak verimliliğinin desteklenmesi:
 - ◆ Yeşil Dönüşüm Destek Programı aracılığıyla üretim sektörünün yeşil dönüşümünü destekleyen yatırımların artırılması,
 - ◆ Yeşil dönüşüm için stratejik hammaddelerin tespit edilerek arz güvenliğinin sağlanması için politikaların belirlenmesi,
- Araştırma ve geliştirme ile yeni teknolojilerin yerli kaynaklar ile geliştirilmesi:
 - ◆ Karbon yakalama, kullanım ve depolama projelerinin desteklenmesi,
 - ◆ Sanayide ısıtma işlemlerinin elektrifikasyonuna yönelik Ar-Ge ve uygulama girişimlerinin geliştirilmesi,
- Sürdürülebilir yatırım seçeneklerinin tasarlanması ve yatırımcılara uygun finansal desteklerin sağlanmasıdır.

2.1.3.3. Yerleşmeler ve hizmet sektörü

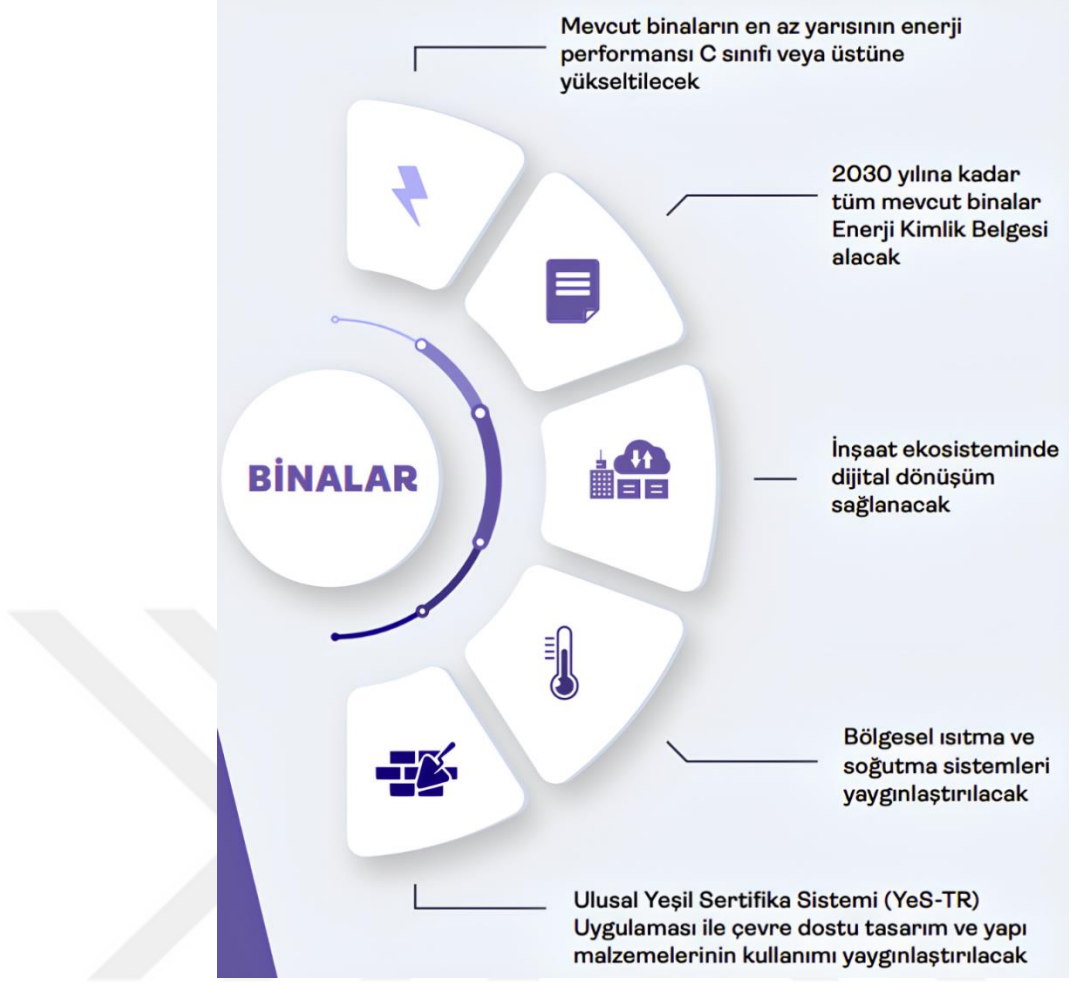
Türkiye'nin nüfusu ve kentleşme oranındaki artış, refah seviyesinin yükselmesiyle birlikte, ülke genelinde bina sayısının ve toprak alanının büyümesinde önemli bir faktördür. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine dayanarak yapılan tahminde, Türkiye'de yaklaşık olarak 9,5 milyon bina (hem konutlar hem de diğer yapılar) ve toplamda 3,6 milyar metrekarelik bir taban alanı

bulunmaktadır. Binalar genellikle "konutlar" ve "ticari ve hizmet amaçlı yapılar" olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

2021 yılı verilerine göre, konutlarda kullanılan enerjinin %53'ü doğalgazdan, %20'si elektrikten, %14'ü kömürden, %11'i yenilenebilir enerjiden ve %2'si petrol ürünlerinden sağlanmaktadır. Ticari ve hizmet binalarında ise enerji tüketiminin %53'ü elektrik, %32'si doğalgaz, %7'si kömür, %4'ü yenilenebilir enerji kaynakları ve %4'ü petrol ürünleri tarafından karşılanmaktadır. SGE açısından incelendiğinde, konut sektörünün emisyonları 2015-2021 yılları arasında %56 oranında artarak 32 Mton CO₂e'den 50 Mton CO₂e'ye yükselmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).



Şekil 2.11. Türkiye’de konutlara ait sera gazı emisyonları (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).



Şekil 2.12. Türkiye'nin konut sektörüne yönelik strateji ve eylemleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Bina sektöründe karbon emisyonu azaltımı amacıyla stratejiler geliştirilmiş ve bu stratejilerin uygulanmasını destekleyen eylemler belirlenmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a):

➤ Yeni yapıların enerji verimliliğinin artırılması:

- ◆ Tüm gelecek inşaat projelerinin, Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (NSEB) konseptine uygun yapılması,
- ◆ Enerji standartlarının iyileştirilmesi ve ulusal/uluslararası enerji verimliliği normlarına uyum sağlanması adına TS 825 Standardının güncellenmesi,

- Yapılarda kullanılan elektrikli cihazların enerji verimliliğinin artırılması,
- Yapı Bilgi Modelleme teknolojisi ile inşaat sektöründe dijital dönüşümünü sağlanması,
- Fotovoltaik sistemlerin bina uygulamalarında daha yaygın hale getirilmesi ve kullanımının artırılmasıdır.

2.1.3.4. Ulaştırma ve taşımacılık sektörü

Türkiye'deki ekonomik ilerleme, 1990'ların sonlarından itibaren motorlu araç sayılarında artışa neden olmuştur. 2002 yılında 8,66 milyon olan araç sayısı, 2022 yılında üç katına çıkarak 26,48 milyon olmuştur. Toplam özel araç sayısı 14,27 milyon olup, motorlu taşıt parkındaki payları %55,5'e kadar yükselmiştir. Türkiye'nin 85,28 milyonluk nüfusu göz önüne alındığında, günümüzde özel taşıt sahiplik oranı 1000 kişi başına 161 araç civarında seyretmektedir. Bu oran, gelişmiş ülkelerdekilere göre oldukça düşüktür. Ekonomik büyüme devam ettikçe, bu oranın daha da yükseleceği öngörülmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Tablo 2.2. Türkiye'nin 2020-2021 yıllarındaki toplam taşıt sayısı ve ortalama sürüş mesafesi (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Taşıt cinsi	2020			2021		
	Taşıt sayısı	Taşıt-km (milyon)	Ortalama yıl-km	Taşıt sayısı	Taşıt-km (milyon)	Ortalama yıl-km
Toplam	22 115 821	300 615	13 593	23 145 631	329 591	14 240
Otomobil	13 099 041	163 402	12 474	13 706 065	178 832	13 048
Benzin	3 201 894	29 661	9 264	3 495 172	34 218	9 790
Dizel	5 087 129	80 577	15 839	5 287 618	89 362	16 900
LPG	4 810 018	53 164	11 053	4 923 275	55 252	11 223
Minibüs	493 395	11 223	22 747	484 806	13 643	28 142
Otobüs	212 407	8 767	41 272	208 882	10 749	51 459
Kamyonet	3 938 732	63 540	16 132	4 115 205	70 621	17 161
Kamyon	859 670	40 748	47 400	886 303	41 340	46 643
Motosiklet	3 512 576	12 934	3 682	3 744 370	14 406	3 847

Türkiye'nin karayollarındaki seyahat hareketliliği, 1990'dan sonra yüksek bir ivme kazanmıştır. 2022'de kaydedilen şehirlerarası toplam seyahat 140,53 milyar-araç-km (BVKm) olarak ölçülmüştür. Bu miktarın %65,8'i devlet yollarında ve %19,7'si otoyollarda gerçekleşmiştir. Demiryolu taşımacılığı, diğer ulaşım türlerine göre daha çevreci görülmektedir ve son dönemlerde özellikle yüksek hızlı tren projelerine kapsamlı yatırımlar gerçekleştirilmiştir. Demiryolu hatlarında elektrifikasyonun artması, bu sistemin temiz enerji avantajını artırmaktadır. Denizyolu yolcu taşımacılığı genellikle özel sektör tarafından yürütülmektedir ve serbest piyasa koşullarında işletme maliyetleri çerçevesinde değerlendirilmektedir. Denizcilikte karbonsuz bir gelecek için sıfır emisyonlu yakıtlar veya diğer temiz enerji kaynaklarıyla çalışan gemilerin sayısının artması gerekmektedir. 1990 yılından itibaren toplam emisyonlar, üç kat artarak 102,3 milyon ton CO₂e seviyesine gelmiştir. Bu emisyonların önemli bir kısmı (%84,5 pay) karayolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır. En büyük ikinci emisyon kaynağı ise tarım ve ormancılıkta kullanılmakta olan taşıtlar ve makinelerdir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).



Şekil 2.13. Türkiye'nin ulaştırma sektörüne yönelik strateji ve eylemleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Her ulaşım sistemi, kendine özgü niteliklerle (taşıma süreleri, kapasiteler, maliyetler vb.) çeşitli ulaşım taleplerine yanıt verir. Tarih boyunca, bir ulaşım türünün diğerinin yerini alması tam anlamıyla mümkün olmamıştır. Bu nedenle, özellikle emisyonları azaltma amacıyla, her bir ulaşım modunun avantajlı olduğu alanlarda daha fazla kullanılması ve etkin biçimde yönetilmesi önemlidir. Ayrıca, mevcut ve gelecekteki ulaşım sistemlerinin kendi içinde daha etkin hale getirilmesi, dolaylı olarak emisyon azaltımına katkı sağlayacaktır. Ulaşım sektöründe kullanılmakta olan enerjinin daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması da emisyon azaltım potansiyelini arttıracaktır. Bu nedenle, ulaşım sektöründe bu kapsamlı stratejilerin tamamlayıcı unsurları şunlardır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a):

- Temel taşıma ve lojistik stratejileri çerçevesinde hızlı tren ağının genişletilmesi,
- Denizcilik sektöründe etkinlik ve yaygınlığın artırılması:
 - ◆ Şehirlerarası denizyolu yolcu taşımacılığının teşviki,
- Kamu taşıma sistemlerinin teşviki ve etkinliğin artırılması,
- Yeni nesil, çevreci araçların kabulünün teşviki,
- Yük taşımacılığı veriminin arttırılması,
- Ulaşım sektöründe elektrifikasyonun genişletilmesi,
- Alternatif ve sürdürülebilir yakıt kullanımının yaygınlaştırılması:
 - ◆ Kentsel ve kırsal otobüs taşımacılığında alternatif yakıt kullanımının yaygınlaştırılması,
 - ◆ Elektrikli araç şarj istasyonlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşviki,
 - ◆ Karayolu ağındaki şarj istasyonlarının planlanması ve yaygınlaştırılması,
- Ulaşım sistemlerinde modelleme ve tahmin çalışmaları:
 - ◆ Ulaşım emisyon verilerinin toplanması,
 - ◆ Yolcu ve yük taşımacılığında karbon ayak izi hesaplamalarının desteklenmesi.
- Elektrikli araç endüstrisi destekleri:
 - ◆ Ulaşım sektöründe elektrik enerjisi talep tahmin modellerinin oluşturulması,

- ◆ Ulusal düzeyde akıllı elektrikli araç entegrasyon ve şarj yönetimi arayüzlerinin geliştirilmesi,
- ◆ Batarya tedarik ve geri dönüşüm mevzuatının hazırlanması ve elektrikli araç batarya geri dönüşüm araştırmalarına destek sağlanmasıdır.

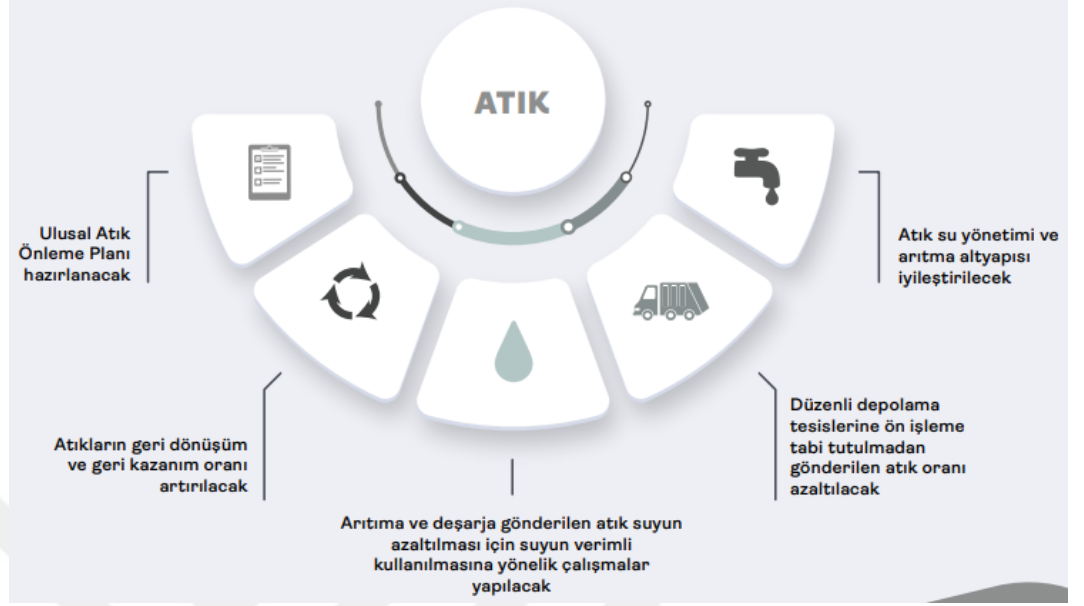
2.1.3.5. Atıklar ve atık yönetimi

Türkiye'de belediyeler, TÜİK'e topladıkları atıkların verilerini sunmaktadırlar. Bu atıklar, genellikle evlerden, iş yerlerinden, ofislerden, kamu kuruluşlarından ve okullardan gelen benzer nitelikteki atıkları içermektedir. En son TÜİK'in verilerine göre, 2020 yılında belediyelerin topladığı atık miktarı 32,3 milyon tona ulaşmıştır. Bu rakam, kişi başına günlük 1,13 kg atık anlamına gelmektedir ve dünya ortalamasının (0,74 kg/gün-kişi) önemli ölçüde üzerindedir. Ayrıca, AB-28 ortalamasının (1,38 kilogram/gün-kişi) altında kalmaktadır. 2021 yılı sera gazı envanterine göre, atık sektörü 14,7 milyon ton CO₂ eşdeğeri emisyon üretmiştir. Bu miktar, toplam emisyonların %2,6'sını oluşturmaktadır. Atık sektörü genellikle düşük emisyon üreten bir alan olarak kabul edilse de, maddelerin geri dönüştürülmesinin artması, özellikle imalat sanayi sektöründen kaynaklanan emisyonların dolaylı yoldan azaltılmasına katkı sağlamakta ve bu sektörü önemli bir emisyon azaltıcı konuma getirmektedir. IPCC raporuna göre, atık sektörü emisyonları dört ana kategori altında raporlanmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a):

- ◆ Katı atıkların yok edilmesi,
- ◆ Katı atıkların biyolojik olarak parçalanması,
- ◆ Atıkların yakılması,
- ◆ Atıksu arıtma ve boşaltımı.

2021 Türkiye emisyon envanterine göre, katı atıkların kontrollü ve plansız depolama sahalarında bertarafı, tüm atık sektörü emisyonlarının %63,5'ini

oluşturmaktadır. İkinci büyük emisyon kaynağı ise %36,3 ile atıksu arıtma ve boşaltım işlemlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.14. Türkiye'nin atık sektörüne yönelik strateji ve eylemleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Ulusal sera gazı envanter raporu göz önünde bulundurularak, atık sektöründeki emisyon azaltımına yönelik politikalar, tedbirler, hedefler, ilgili eylemler ve göstergeler çeşitli kategoriler altında listelenmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a):

- Atıkların ve atık suyun oluşmadan engellenmesi ve azaltılması,
- Düzenli depolama alanlarına ön işlem yapılmadan gönderilen atıkların miktarının azaltılması,
- Atıksu yönetimi ve arıtma altyapısının iyileştirilmesi,
- Atık yönetiminin geliştirilmesi için teşvik ve finansal mekanizmaların uygulanması,
- Atıkların üretimde hammadde/kaynak olarak kullanılmasının artırılmasıdır.

2.1.3.6. Tarım sektörü ve enerji ürünleri

Türkiye'deki tarımsal sektör, 85 milyon insanın beslenme gereksinimlerini karşılayan, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın ve ihracatın %6'sını oluşturan ve istihdamın %16'sını sağlayan bir alandır. TÜİK verilerine göre, 2022'de toplam tarım arazisi 38 milyon hektar civarındadır. Bu arazinin yaklaşık 23,9 milyon hektarı ekili arazi iken, 14,6 milyon hektarı mera ve çayır alanlarıdır. Ekili arazilerin %81,6'sında tarla bitkileri, %15,4'ünde meyve ve %3,0'ünde sebzeler yetiştirilmektedir. Tarla bitkileri yetiştirilen arazilerin 3 milyon hektarı nadasa bırakılmış durumdadır. Tarım sektörü emisyonları, 1990 yılında 46 milyon ton CO₂ eşdeğerken, 2021 yılında 72 milyon ton CO₂ eşdeğere ulaşmıştır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Tablo 2.3. Türkiye'de 2021 yılı tarım sektörü sera gazı emisyonları (Mton CO₂e), (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Enterik Fermentasyon	22,85	25,79	26,91	27,15	26,95	26,98	30,11	32,14	33,37	34,61	34,95
Gübre Yönetimi	5,64	6,43	6,77	7,07	6,96	7,06	7,70	8,51	8,60	9,06	9,14
Çeltik Tarımı	0,20	0,25	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,25	0,26	0,26	0,27
Tarım Toprakları	17,42	19,33	20,90	20,76	21,01	23,15	23,61	23,02	24,34	27,39	26,25
Anız Yakımı	0,23	0,22	0,24	0,22	0,17	0,16	0,17	0,16	0,16	0,17	0,16
Üre	0,56	0,64	0,81	0,79	0,81	1,30	1,45	1,26	1,29	1,66	1,30



Şekil 2.15. Türkiye'nin tarım sektörüne yönelik strateji ve eylemleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024a).

Tarım sektöründeki emisyon azaltımına yönelik stratejiler ve bu stratejik hedeflere ulaşmak için çeşitli adımlar atılmaktadır:

- Hayvan yetiştiriciliği kökenli metan emisyonlarının düşürülmesi,
- Arazi ve toprak yönetiminin optimize edilmesi,
- Tarım ilaçlarının kullanımında etkinliğin artırılması,
- Çiftçilere uygun finansman kaynaklarının erişiminin sağlanması,
- Tarım sektöründeki tüm paydaşların cinsiyet dengesi gözetilerek eğitim, bilinçlendirme ve kapasite geliştirme faaliyetlerinin genişletilmesi,
- Zararlı böcek ilaçları ve mikrobiyal ajanların kullanımının azaltılması,
- Tarım üretiminde kayıp, israf ve artık yönetiminin geliştirilmesidir.

2.1.3.7. Karbon yakalama ve tutma teknolojileri

Karbon yakalama, kullanma ve depolama, büyük CO₂ kaynaklarından gelen karbondioksitin atmosfere salınımını önleyen teknolojik süreçlerin bütünüdür. Bu süreçler genellikle üç aşamadan oluşur: yakalama, nakil ve depolama. Yakalama aşaması, endüstriyel tesislerden gelen CO₂'nin farklı yöntemlerle yakalanmasını içerir. Bu yöntemler arasında kimyasal absorpsiyon, membran teknolojisi ve kalsiyum döngüsü gibi çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bu teknikler, CO₂'nin yaklaşık %95'ini etkin bir şekilde yakalayabilir. Hangi yöntemin kullanılacağı, gaz bileşimi, CO₂ miktarı, operasyon basıncı ve ekonomik faktörlere bağlı olarak belirlenir. Taşıma aşaması, yakalanan CO₂'nin sıkıştırılarak depolama alanına veya kullanım tesisine taşınmasını içerir. Depolama aşaması ise, CO₂'nin belirli bir derinliğe enjekte edilerek yer altında depolanmasını sağlar. Bu genellikle boşaltılmış petrol veya doğal gaz rezervuarları veya uygun jeolojik formasyonlar kullanılarak yapılır. Depolanan CO₂'nin çoğu genellikle petrol kurtarma operasyonları için kullanılır, ancak sentetik yakıt üretimi, kimyasal üretim ve yapı malzemeleri gibi diğer endüstriyel kullanımlar da mümkündür (Akdağ ve Güllü, 2022).

Fosil yakıtlara dayalı enerji üretim tesislerinde özellikle CO₂ salınımını azaltan teknolojilerin kullanılması son derece hayati bir öneme sahiptir. Baca gazlarından salınan CO₂'nin soğurularak atmosfere yayılmadan önce yakalanması ve elde edilen CO₂'nin endüstriyel amaçlar için kullanılabilmesi için bu alandaki çalışmalar devam etmektedir (Kakaç ve Sezer, 2022).

2.1.3.8. Politika araçları

Emisyonların azaltılması ve iklim değişikliğiyle mücadele edilmesi, sadece çevresel ve sosyal boyutları değil, aynı zamanda ekonomik yönleriyle de büyük önem taşır. Bu bağlamda, küresel ölçekte çeşitli ekonomik araçlar kullanılarak emisyon azaltımı için adımlar atılmaktadır

Ekonomik araçlar, çevresel kirliliği azaltmak amacıyla piyasadaki ürün ve hizmetlere ek maliyetler ekleyerek, kirliliğe yol açan üreticileri bu maliyetleri

üstlenmeye teşvik eden bir sistem oluşturur. Bu yöntem, üreticilerin kirliliğin maliyetini topluma yansıtmak yerine, kirliliği kontrol altında tutmak için motive olmalarını sağlar (Arıkboğa, 2019).

İklim değişikliği ile mücadelede kullanılan ekonomik enstrümanlar arasında Karbon Vergisi, Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), Çevresel Teşvikler ve Destekler, Depozito-İade Programları, Ücretlendirme ve Harçlar ile Diğer Çevresel Vergiler bulunmaktadır.

Karbondioksit Vergisi: Fosil yakıtın kullanımıyla ortaya çıkan emisyon miktarını azaltmayı amaçlayan bir ücrettir. Karbonun fiyatlandırılması, karbondioksit emisyonlarından kaynaklanan toplumsal maliyetlerin ekonomik olarak telafi edilmesi anlamına gelir. Yale Üniversitesi'nin yapmış olduğu bir araştırma, atmosfere salınan karbonun yıllık ortalama 1,6 trilyon dolarlık bir zarara yol açtığını göstermektedir. İklim değişikliğiyle mücadele etmek için ekonomik karar alıcılar, çevresel zararın piyasa fiyatlarına yansıtılması gerektiği görüşündedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2024b).

Karbondioksit emisyonlarını azaltmak için uygulanan karbon fiyatlandırması, hükümetlere önemli miktarda gelir sağlarken aynı zamanda çevresel etkiyi azaltmaya yönelik önlemlere finansal bir destek sunar. Hükümetlerin karbon fiyatlandırma gelirlerini emisyon azaltımına ek katkı sağlayacak şekilde kullanmaları büyük önem taşımaktadır. Bazı ülkeler yalnızca karbon vergisi veya sadece emisyon ticaret sistemini kullanırken, bazı ülkeler her iki sistemi birden uygulamaktadır. Ton başına karbon vergisini artıran ülkeler ve küresel çapta karbon fiyatlandırması yapan ülkelerin sayısının artması, bu yöntemlerden elde edilen gelirlerin de artmasına neden olmaktadır. Avrupa Birliği gibi emisyon ticaret sistemi uygulayan bölgelerde elde edilen gelirlerin bir kısmı iklim değişikliği ile mücadele için harcanırken, diğer kısmı genel bütçeye katkıda bulunur ve bir kısmı da ekonomik kalkınmayı desteklemek üzere kullanılır (Birinci, 2020).

Emisyon Ticaret Sistemi (ETS): küresel ısınmaya yol açan sera gazı salımlarını özellikle CO₂ olmak üzere azaltmayı amaçlayan bir düzenlemedir. Bu mekanizma, kirleticilerin emisyonlarını azaltmaları için teşvik etmek amacıyla

ticari olarak alınıp satılabilen karbon tahsisatlarının (izinleri, sertifikaları) oluşturulması ve bunların özel ticaret platformlarında alınıp satılması üzerine kurulmuştur. ETS, sadece CO₂ gibi belirli sera gazlarını değil, tüm sera gazlarını içerebilir veya sadece bir kısmını kapsayabilir (OECD, 2024).

2005 yılında hayata geçirilen Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (EU-ETS), sera gazlarının olumsuz etkilerini azaltmayı hedefleyen kapsamlı bir emisyon ticaret mekanizmasıdır. Bu sistem, bugün neredeyse tüm Avrupa ülkelerinde aktif olarak uygulanmaktadır. Öte yandan, Kazakistan ve Yeni Zelanda gibi ülkeler kendi emisyon ticaret sistemlerini oluşturmuş, Türkiye ise benzer bir sistemi kurma planları yapmaktadır. EU-ETS, "sınırla ve ticaret yap" (cap and trade) prensibine dayanarak faaliyet göstermektedir (Ertunga ve Seyhun, 2022).

Kyoto Protokolü, iklim değişikliği meselesiyle ilgili her ülke için emisyon azaltım hedeflerini belirlemiştir. Anlaşmada, bu hedeflere ulaşmak için esneklik mekanizmaları tanımlanmıştır. Küresel ısınma ile başa çıkma çabalarının yüksek maliyetlerini hafifletmek için, temiz kalkınma mekanizması, ortak uygulama ve emisyon ticareti gibi yöntemler geliştirilmiştir. Bu mekanizmalar, çevresel hedeflere ulaşırken mali yükü azaltmayı hedefler. Sera gazı emisyonlarının (SGE) iklim değişikliğine etkisi dünya genelinde benzer olsa da bu emisyonların maliyetleri farklılık göstermektedir. Yükümlü ülkeler, öncelikle kendi sınırları içinde SGE'leri azaltarak sorumluluklarını yerine getirmek için ilgili mekanizmalardan yararlanmaktadırlar. Kısacası, esneklik mekanizmaları, birbirini tamamlayan özelliklere sahip olan araçlardır (Can, 2018).

Türkiye'de Emisyon Ticaret Sistemi'nin oluşturulmasına ilişkin adımlar, Orta Vadeli Program (2024-2026) kapsamında yer almaktadır. Türkiye'nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi doğrultusunda emisyon ticaret sisteminin kurulması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, karbon fiyatlandırmasıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Çevresel Sübvansiyonlar ve Teşvikler: çevreyi koruma amacıyla yapılan kamu politikaları arasında yer alır. Bu sübvansiyonlar ve teşvikler, SGE'lerin azaltılması için gereken maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olur ve kirlilik

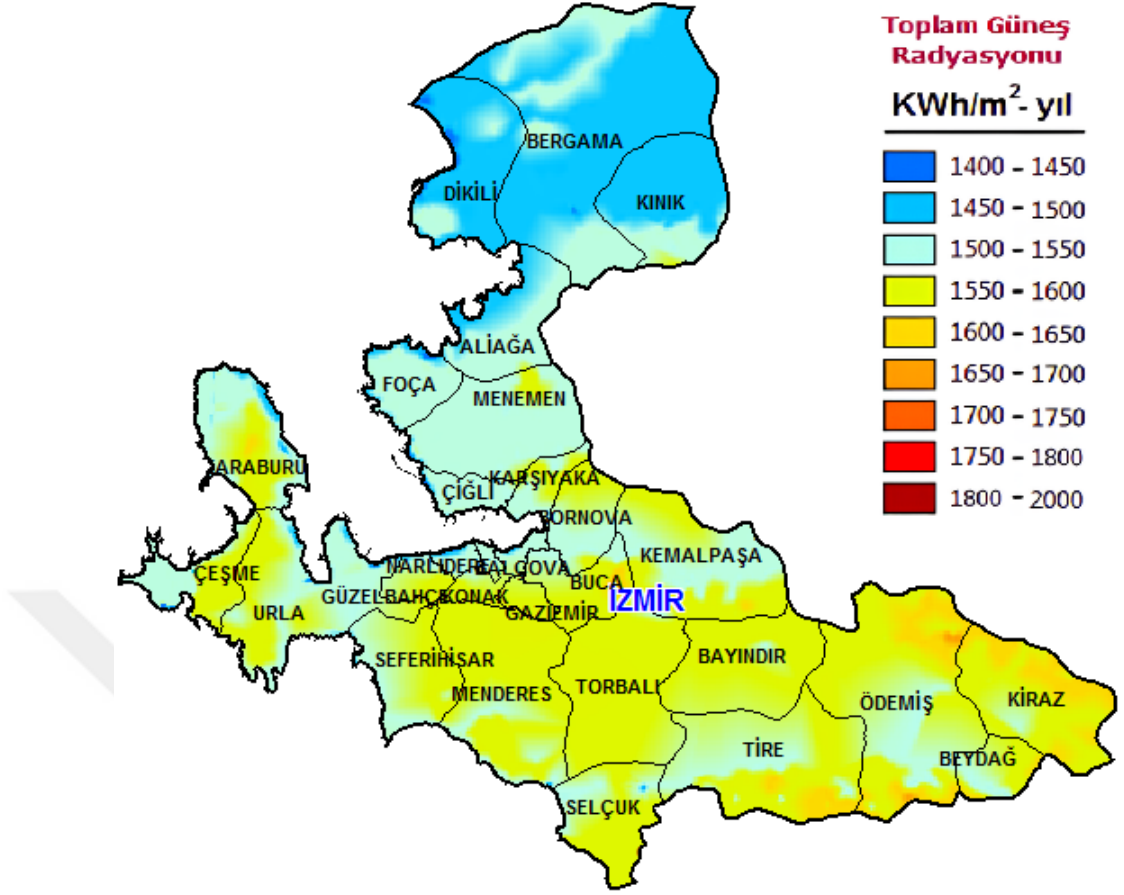
yaratan faaliyetlerin terk edilmesini teşvik eder. Yenilenebilir enerji ve çevre dostu teknolojilerin kullanımını teşvik etmek için uygulanmaktadırlar (Kayaer, 2013).

2.2. İzmir Kentinde Net Sıfır Şehir Hedefine Yönelik Yenilikçi Bir Çözüm

İzmir, Türkiye'nin batısında, Ege Bölgesi'nde bulunan önemli bir şehirdir. Şehir, koordinat olarak 37° 45' ve 39° 15' kuzey enlemleri ile 26° 15' ve 28° 20' doğu boylamları arasında yer alır ve yüzölçümü 12 bin km²'dir. İzmir, 4.479.525 kişilik nüfusuyla Türkiye'nin en büyük üçüncü kentidir ve Türkiye nüfusunun %5,25'ini oluşturmaktadır (T.C. İzmir Valiliği, 2024).

2.2.1. İzmir'in güneş enerjisi potansiyeli ve iklim hedefleri

İzmir'in coğrafi konumu ve geniş yüzölçümü, fotovoltaik sistemler için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Yüksek güneşlenme süresi ve geniş açık alanlar, güneş enerjisinden etkin bir şekilde yararlanılmasına olanak tanır. İzmir, yıllık ortalama 2.738 saat güneşlenme süresi ile Türkiye'nin en yüksek güneş potansiyeline sahip bölgelerinden biridir (GEPA, 2024).



Şekil 2.16. İzmir kenti güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA, 2024).

İZBB, iklim değişikliği ile mücadelede önemli adımlar atmaktadır. Bu çerçevede, “Belediye Başkanları Sözleşmesi (Covenant of Mayors)” taahhüdüne katılmış ve 2030 yılına kadar SGE’yi %40 oranında azaltmayı hedeflemiştir (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024b).

Belediye Başkanları Sözleşmesi, yerel yönetimlerin iklim değişikliği ile mücadele konusundaki taahhütlerini ve eylemlerini bir araya getiren uluslararası bir girişimdir. İzmir Büyükşehir Belediyesi, bu çabaya dâhil olarak, sürdürülebilir enerji politikaları ve iklim değişikliği ile ilgili stratejik yaklaşımlar geliştirip hayata geçirmektedir. Bu çerçevede, enerji verimliliği artırma, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlama ve SGE’leri düşürme konularına odaklanılmaktadır.

Bu çalışmaları daha da ileri taşıyan İzmir, Avrupa Birliği tarafından başlatılan “İklim Nötr ve Akıllı Şehirler Misyonu” kapsamında seçilen 112 şehirden biri

olmuştur. Böylece, 2030 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda daha somut adımlar atarak bu alandaki kararlılığını pekiştirmektedir (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2023).

İzmir Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı'na göre, 2018 yılında İzmir'in sera gazı salımları 25.062.569 ton karbondioksit eşdeğeri (t CO₂e) olarak kaydedilmiştir. Gerekli önlemlerin alınmaması durumunda, 2018 yılında kişi başına düşen sera gazı salımı 3,31 t CO₂e iken, 2030 yılında bu değer %6 artışla 3,51 tCO₂e'ye yükselmesi beklenmektedir (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024b).

Tablo 2.4. İzmir 2018 yılı sera gazı salımları (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024b).

Sektör	MWh	tCO ₂ e	%
Toplam (İzmir)	66.726.400	25.062.569	%100
Binalar, Ekipman/Saha	40.067.386	13.879.952	%55,4
Belediye Binaları/Sahaları	403.894	181.289	%0,7
Belediye dışındaki Konut Dışı Binalar / Sahalar	4.808.950	2.128.887	%8,5
Konutlar	10.722.856	3.592.798	%14,3
Sokak Aydınlatması	230.094	116.658	%0,5
Sanayi	23.901.592	7.860.319	%31,4
Ulaşım	21.659.891	5.780.293	%23,1
Belediye Araç Filosu	193.836	52.492	%0,2
Toplu Ulaşım (Belediye Otobüsleri)	683.162	185.137	%0,7
Toplu Ulaşım (Elektrik Sistemleri)	150.716	76.413	%0,3
Diğer araçlar (özel, diğer kamu vb.)	18.819.286	4.992.974	%19,9
Transit – Otobüs Durağı	175.066	47.443	%0,2
Sivil Havacılık	1.637.825	425.835	%1,7
Diğer Salımlar	384.752	4.465.606	%17,8
Katı Atık Bertarafı	-	595.316	%2,4
Atıksu Arıtma Tesisi	-	96.141	%0,4
Atıksu Arıtma Prosesi CH ₄	-	19.558	%0,1
Atıksu Arıtma Prosesi CO ₂	-	47.128	%0,2
Atıksu Arıtma Prosesi N ₂ O	-	8.555	%0,0
Nit./Denit Olmaksızın Atıksu Arıtma Süreci	-	134	%0,0
Atık su Deşarjı N ₂ O	-	20.766	%0,1
Endüstriyel Proses Emisyonları	-	1.519.992	%6,1
Tarım, Hayvancılık ve Gübre Yönetimi	-	2.059.089	%8,2
Sulama	384.752	195.069	%0,8
Enerji Üretimi	4.614.371	936.717	%3,7
Elektrik Üretimi İçin Yakıt Tüketimi	4.614.371	936.717	%3,7

Tablo 2.4'e göre, İzmir sera gazı emisyonlarının ana kaynaklarının %55,4 oranla binalar ve %23,1 oranla ulaşım sektörü olduğunu ortaya koymaktadır. Bu

durumda, toplam sera gazı salımlarının %78,5'i binalar ve ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır.

2.2.2. İzmir'de sürdürülebilir enerji çözümleri ve gelecek perspektifleri

Yenilenebilir enerji, karbon salınımlarını azaltmak ve sürdürülebilir bir yaşam biçimine geçişte önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, güneş ve rüzgâr enerjisi maliyetlerinin düşmesiyle birlikte, bu enerji kaynaklarının kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla ekonomik ve sürdürülebilir yollar bulmak, enerji sistemlerinin karbondan arındırılmasında büyük bir öneme sahiptir (IEA, 2018a).

Fotovoltaik sistemlerin maliyetlerindeki düşüş, son on yılda enerji arzının gelecekteki yapısını büyük ölçüde değiştirmiştir. Şebeke ölçekli güneş enerjisi FV sistemlerinin toplam kurulum maliyeti, 2010 yılında 4.808 USD/kWp iken, 2021 yılına gelindiğinde 857 USD/kWp seviyesine inmiştir. Bu, küresel ölçekte 11 yıl içinde %82 oranında bir maliyet düşüşü anlamına gelmektedir. Maliyet eğiliminde bazı dalgalanmalar görülecek olsa da bu eğilimin gelecek yıllarda da devam edeceği ve fosil yakıtların enerji kaynağı olarak rekabet gücünü azaltacağı öngörülmektedir (Dewi et. al., 2023). Elektrikli araçların (EA'ların) son zamanlardaki artışı ise fotovoltaik sistemlerin öz tüketimini önemli ölçüde düşük ek maliyetlerle artırma fırsatı sunmaktadır.

Elektrikli araçlar, düşük karbonlu bir ulaşım sektörünün temel bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Mevcut durumda, küresel SGE'lerin yaklaşık %25'i ulaşım faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji güvenliğinin sağlanması için ulaşım sektörünün elektrikli hale getirilmesi zorunludur. Temiz enerjiye dayalı mobilizasyona geçiş, birçok ülkenin geleneksel içten yanmalı motorlardan EA'lara aşamalı ve sürdürülebilir bir geçiş yaparak ulaşım sektöründe derin bir karbonsuzlaştırma sağlama politikalarının ana eksenidir. 2018 yılı itibarıyla, Çin, yaklaşık 1,1 milyon EA satışı ile dünyanın en büyük EA pazarını oluşturmakta ve küresel EA filosunun yaklaşık %50'sine sahip olan 2,3 milyondan fazla EA barındırmaktadır. Avrupa, 1,2 milyondan fazla EA ile ikinci sırada yer almakta ve onu 1,1 milyondan fazla EA ile Amerika Birleşik Devletleri takip

etmektedir. EA pazar payları incelendiğinde, Norveç, yeni EA satışlarının %46'sını gerçekleştirerek Avrupa'da lider konumundadır. Benzer bir eğilim gösteren, ancak daha düşük satış rakamlarına sahip olan Portekiz, 2018 yılında 8,200 EA satarak yıllık satış rekoru kırmış ve önceki yedi yılın toplam EA satışlarına göre %95'lik bir artış kaydetmiştir. Portekiz, diğer Avrupa ülkelerinin politikalarını yansıtarak, 2030 yılına kadar elektrikli araçların ulaşım sektöründeki payını %33'e çıkarmayı hedeflemektedir (Osorio et al., 2021).

İzmir kentinde, net sıfır şehir hedefinin gerçekleştirilmesi için gerekli enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanabilmesi amacıyla, ilk olarak kamu binalarının sürdürülebilir ve çevre dostu yapılar haline getirilmesinde güneş enerjisi santrallerinin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ulusal ve küresel enerji tüketim analizlerine baktığımızda, enerjinin büyük bir bölümünün yapı stoklarında ve sanayi sektöründe tüketildiği belirlenmiştir. Bu bağlamda, güneş enerjisi, yapı envanteri ve sanayi açısından yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkan bir konumda yer almaktadır. Ayrıca, ulaşım sektöründeki karbon salınımlarını azaltmak amacıyla elektrikli araçların teşvik edilmesi ve bu araçların enerji ihtiyacının fotovoltaik enerji sistemleri aracılığıyla karşılanması gereklidir. Bu yaklaşımlar, İzmir'in enerji arzının sürdürülebilirliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşmak için kritik bir öneme sahiptir.

İzmir, özellikle yerel ölçekte güneş enerjisi uygulamaları açısından büyük bir fırsat sunmakta olup, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi konusunda önemli bir kapasiteye sahiptir. 2025 yılından sonra şehir genelinde çok sayıda güneş enerjisi tesisinin inşası planlanmaktadır. Ayrıca, hibrit ve elektrikli araçların teşvik edilmesi, İzmir UPI 2030 Ulaşım Master Planı kapsamında yer alan önemli stratejik eylemlerden biridir. Elektrikli araç kullanımının teşvik edilmesi, İzmir'in çevresel koşullarının iyileştirilmesine önemli katkı sağlayacak olup, şehir bu geçiş sürecinde öncü olmanın avantajlarını görecektir (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024b).

Bu avantajlara rağmen, fotovoltaik sistemler ve elektrikli araçlar, entegrasyon süreçlerinde güç kararlılığı (gerilim ve frekans) ile esneklik (geleneksel enerji üretimi, enerji akışı ve şebeke limitleri) gibi önemli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır ve bu durum şebeke güvenilirliğini tehdit edebilir. FV üretiminin

başlıca dezavantajları arasında değişkenlik ve belirsizlik bulunmaktadır. Buna ek olarak, EA'lar güç kalitesini düşürebilir ve artan güç talebi ile güç sistemlerini aşırı yükleyerek istikrarsızlıklara yol açabilir. Bu sorunlar, FV üretiminin EA şarjı için kullanılmasıyla azaltılabilir. Ayrıca, bağımsız akülerin yakın gelecekte pahalı kalması beklendiğinden, EA'ların "Araçtan Şebekeye" (V2G) uygulamaları aracılığıyla FV sistemleri için enerji depolama kaynağı olarak kullanımı yaygınlaşacaktır. Böylece, EA'ların yalnızca ulaşım aracı olarak değil, aynı zamanda enerji depolama çözümleri olarak da kentsel çevrenin ayrılmaz bir parçası haline gelmesi öngörülmektedir. Ancak, gelişmekte olan ülkelerdeki şehirlerde FV ve EA entegrasyonunun teknik değerlendirmeleri, emisyon azaltımları ve ekonomik faydaları üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu nedenle, gelişmekte olan ülkeler için sürdürülebilir kalkınma ve hızlı karbonsuzlaşma yollarının belirlenmesi, gelecekteki sürdürülebilir ve eşitlikçi küresel toplumların oluşumu için büyük önem taşımaktadır. Çatılarda giderek daha ekonomik hale gelen fotovoltaik sistemler ve bunlarla entegre edilmiş batarya sistemleri ve/veya elektrikli araçlar, bu tür kentsel enerji sistemlerinin inşasında önemli bir rol oynamaktadır ve küresel ısınmanın çözümüne katkıda bulunabilecek anahtar unsurlardan biridir. Her iki teknolojinin de karbon nötr toplumların vazgeçilmez bileşenleri haline gelmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, Kyoto (Japonya), Cakarta (Endonezya), Shenzhen (Çin) gibi birkaç şehir dışında, İzmir (Türkiye) ve diğer şehirler için bu potansiyellerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi henüz yapılmamıştır.

İzmir gibi hızla büyüyen şehirler için, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve kullanımının artırılması büyük önem taşımaktadır. Elektrikli araçların bataryalarının FV sistemlerle entegre edilmesi, enerji depolama kapasitesini artırarak şebeke istikrarını destekleyebilir ve karbon emisyonlarını azaltmada etkili bir çözüm sunabilir. Gelecekte bu tür teknolojilerin yaygınlaşması, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına ve daha temiz bir çevre oluşturmaya yardımcı olacaktır. Ayrıca, bu entegrasyonun sağladığı enerji verimliliği, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini artırabilir. İzmir'in yenilenebilir enerji potansiyelini en üst düzeye çıkaracak stratejilerin ve politikaların belirlenmesi, sürdürülebilir bir kent gelişimi için kritik öneme sahiptir.

2.3. Fotovoltaik Güç Sistemleri

Dünya nüfusunun hızla artması nedeniyle enerjiye olan talep giderek yoğunlaşmaktadır. 19. Yüzyıl öncesine kadar yalnızca ısınma, yemek ve barınma gibi temel ihtiyaçlar için gerek duyduğumuz enerji; 20. Yüzyıl itibariyle enerjiye gereksinim duyan teknolojik alet, araç ve gereçlerin yaygın kullanımı nedeniyle hayatımızın değişmez bir parçası haline gelmiştir. Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenecek olması nedeniyle ihtiyaç duyulan enerjinin sürdürülebilirliği için yeni kaynak arayışlarına girilmiştir. Sonsuz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi, tarih boyunca kullanılan en eski çözümlerden biri olmuştur. Eskiden yalnızca ısı ve ışık enerjisi olarak yararlandığımız güneş, teknolojik gelişmeler ile birlikte elektrik üretiminde de kullanılabilir hale gelmiştir. Elektrik üretimine imkân sağlayan fotovoltaik panel teknolojisi günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde gerçekleşen termonükleer füzyon süreci sonucu ortaya çıkan ışıınım enerjisidir. Bu enerji, dünya atmosferi dışında 1370 W/m^2 gibi yüksek bir şiddete sahipken, atmosferin etkisiyle yeryüzüne ulaşan miktarı $0-1100 \text{ W/m}^2$ arasında değişiklik gösterir. Bu büyük enerji akışı, insanlığın mevcut enerji tüketimini katlayacak kadar büyük bir potansiyele sahiptir (Atalay vd., 2019).

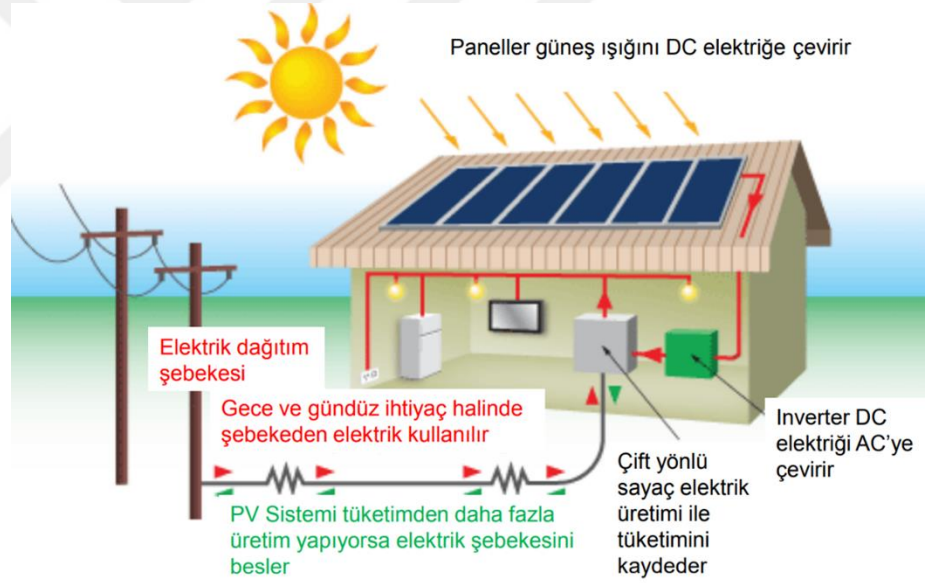
Güneş enerjisinin etkin bir şekilde değerlendirilmesine yönelik çabalar 1970'li yıllardan itibaren artmıştır. GES'ler, teknolojik gelişmeler ve maliyet düşüşleriyle birlikte hızla evrim geçirmiş ve çevre dostu bir enerji üretim kaynağıdır. Güneş enerjisi teknolojileri, yöntem, malzeme ve teknolojik seviyelerine göre farklılık gösterir. Genel olarak, bu teknolojiler iki ana grupta toplanabilir:

Termal Güneş Teknolojileri, güneş enerjisini kullanılarak öncelikle ısı elde edilen sistemlerdir. Bu sistemlerden elde edilen ısı, evlerin ısıtılması, sıcak su temini, endüstriyel uygulamalarda veya elektrik üretiminde kullanılabilir.

Fotovoltaik Teknolojisi ise güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren fotovoltaik hücreleri içermektedir. Bu hücreler genellikle silikon gibi yarı-iletken malzemelerden yapılmıştır. Güneş ışığıyla temas ettiklerinde, elektronları hareket ettirerek elektrik akımı üretirler.

2.3.1. Fotovoltaik hücreler

Fotovoltaik terimi, Antik Yunanca'da ışığı temsil eden "foto" ve elektriksel potansiyel farkı ifade eden "voltaik" kelimelerinin birleşimiyle ortaya çıkmıştır. Bu terim, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan kavramları ifade eder. "Fotoelektrik etki" terimi ise, 1839 yılında Fransız fizikçi Edmund Bequerel tarafından ortaya atılmış olup, bazı maddelerin ışığa maruz kaldığında düşük miktarda elektrik akımı üretebileceğini belirtir. Fotovoltaik paneller, Güneş'ten gelen güneş ışınımını, FV prensipler doğrultusunda elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Bu paneller, en küçük birim olan hücrelerden oluşur ve hücrelerin birleşmesiyle paneller oluşturulur. Fotovoltaik sistemler, küçük ev sistemlerinden, büyük güneş çiftliklerine kadar geniş bir yelpazede uygulanabilirler (Doğan, 2018).



Şekil 2.17. Fotovoltaik sistem çalışma prensibi (Ceyran, 2024).

Fotovoltaik hücreler, güneş ışığını yakalayıp doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerdir. Bu hücreler genellikle kare, dikdörtgen veya dairesel şekillerde tasarlanmış olup, alanları genelde 100 cm² civarındadır ve kalınlıkları 0,1 ile 0,4 mm arasında değişir. Fotovoltaik hücreler, fotovoltaik etkiye dayanarak çalışır; yani üzerlerine düşen ışık, uçlarında elektrik gerilimi oluşturur. Elektrik enerjisi üretimi, bu hücrelerin yüzeyine gelen güneş enerjisi ile sağlanır.

Güneş enerjisi, hücrelerin verimliliğine göre %5 ile %30 arasında elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla, birçok fotovoltaik hücre seri veya paralel olarak bağlanarak yüzeylere yerleştirilir ve bu şekilde fotovoltaik modüller oluşturulur. Modüller, ihtiyaç duyulan güç kapasitesine göre birbirine seri veya paralel bağlanarak büyük sistemler haline getirilebilir (Atalay vd., 2019).

Fotovoltaik modüller, farklı uygulamalara göre eviriciler, akümülatörler, akü şarj kontrol cihazları ve elektronik destek devreleri ile entegre edilerek FV sistemler oluştururlar. Fotovoltaik hücreler, elektrik enerjisinin gerektiği her alanda kullanılabilecek çok yönlü bir enerji kaynağıdır.

2.3.1.1. Fotovoltaik hücrelerin tarihçesi

1839 yılında Becquerel, elektrolit içirişine daldırılan elektrotlar arasında oluşan elektrik geriliminin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağlı olduğunu belirleyerek fotovoltaik etkilerin temelini atmıştır. Benzer bir etki, 1876'da G.W. Adams ve R.E. Day tarafından selenyum kristalleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak, fotovoltaik hücrelerin ilk olarak 1954 yılında silikon kristalleri kullanılarak uygulamaya konması, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi sürecinde önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir. 1914'te fotovoltaik hücrelerin verimliliği yalnızca %1 seviyesinde iken, 1954'teki bu gelişme, fotovoltaik enerji sistemleri için bir dönüm noktası oluşturmuştur. Bu dönemde yapılan araştırmalar ve geliştirmeler genellikle uzay araçlarında kullanılan enerji sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. 1973 Petrol Krizi'nin ardından, Avrupa, Amerika ve Japonya'da geniş çaplı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Fotovoltaik hücrelerin elektrik üretim sistemleri olarak yeryüzünde kullanılabilmesi amacıyla yapılan çalışmalar 1950'lerde başlamıştır. Silikon kristaline dayalı fotovoltaik hücrelerin verimliliğini artırma çabalarının yanı sıra, daha az yarı iletken malzeme kullanarak daha ekonomik olarak üretilebilen ince film fotovoltaik hücreler üzerine araştırmalar hız kazanmıştır (Kaymak, 2009).

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, özellikle son yirmi yılda çevresel duyarlılığın artmasıyla üniversitelerin öncülük ettiği bir alan olmuştur. Ancak, kamuoyundan gelen baskılar ve çok uluslu şirketlerin fosil yakıtlara alternatif

olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeleriyle, fotovoltaik sistemlerdeki teknolojik yenilikler hızla artmış, enerji sistemlerine yönelik talep yükselmiş ve bu da üretim kapasitesinin önemli ölçüde genişlemesine sebep olmuştur. Geleneksel enerji üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında uzun süre pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemlerinin, büyük şirketlerin katılımı ve artan talep sayesinde maliyetlerinde hızlı düşüşler görülmektedir. Özellikle sosyal maliyet olarak adlandırılabilir ve genellikle göz ardı edilen maliyetler göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemler fosil yakıtlı sistemlere göre ekonomik bir alternatiftir (Oktik, 2001).

2.3.1.2. Fotovoltaik hücre çeşitleri

Fotovoltaik hücreler, çeşitli yarı iletken materyallerin kullanımıyla üretilmektedir ve bu materyaller, hücrelerin performansı ile maliyetleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Üretim aşamasında kullanılan yarı iletken maddelere bağlı olarak, fotovoltaik hücreler farklı kategorilere ayrılabilir. Bu kategorilendirme, Tablo 2.5’de yer alan bilgiler doğrultusunda yapılmaktadır (Zengin, 2024).

Tablo 2.5. Fotovoltaik hücre çeşitleri (Zengin, 2024).

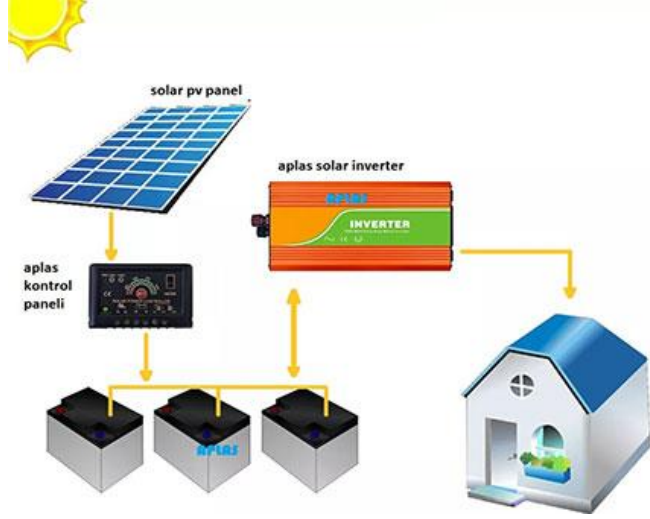
Kristal Silikon Hücreler	İnce Film Hücreler	Diğer Yapılar
Monokristal Yapılı	Şekilsiz Silikon	Tandem Yapılar
Polikristal Yapılı	Bakır İndiyum Diselenid	Boya duyarlı Yapılar
	Kadmiyum Tellürid	Organik Yapılar

2.3.2. Fotovoltaik güç sistemlerinin sınıflandırılması

Fotovoltaik hücreler, yüzeylerine düşen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürerek sürdürülebilir bir enerji kaynağı sağlarlar. Bu hücreler, seri ve paralel bağlantılarla birleştirilerek yüksek güç üretebilen FV panellerini oluşturur. Panel sayısını artırmak ve çıkış gücünü optimize etmek adına, birçok panel birbirine seri veya paralel olarak bağlanarak bir yüzeye monte edilebilir. Paneller, uygun ortam koşullarında nominal güçlerini üretebilirler. Panel sayısı, hedeflenen enerji miktarına göre belirlenir. Ayrıca, sistem performansını artırmak amacıyla bir maksimum güç noktası takibi (MPPT) eklenmesi de mümkündür. Bu, güneş enerjisinden en verimli şekilde faydalanmayı sağlayarak sistem verimliliğini optimize eder. Panellerin cam yüzeyinin kirlenmiş olması, güneş ışınlarının dik gelmemesi, hava koşullarının aşırı sıcak veya soğuk olması gibi faktörler ise panel verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Zeynel vd., 2017).

2.3.2.1. Şebekeden bağımsız sistemler

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler, elektrik şebekesinden bağımsız olarak kurulan, FV panelleri tarafından üretilen elektriği akülerde depolayarak, eviriciler aracılığıyla evlerimizde kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir (Şekil 2.18). Şebekeden bağımsız sistemler, genellikle dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler şunlardır: FV panelleri, akü grupları, şarj kontrol cihazları ve eviriciler.

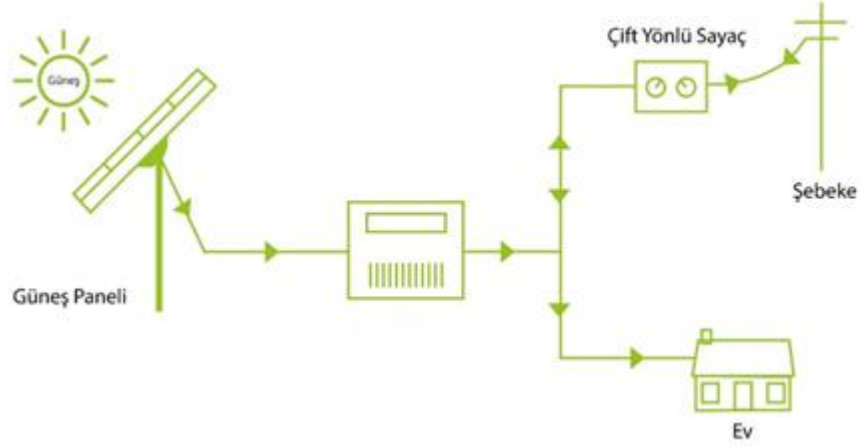


Şekil 2.18. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem şeması (Atalay vd., 2019).

Fotovoltaik panellerin ürettiği elektrik enerjisi, ilk aşamada bir şarj yönetim birimi tarafından düzenlenir ve enerji depolama ünitelerinde saklanır. Bu depolanan enerji, ardından bir evirici aracılığıyla konutlarda kullanılabilecek elektrik akımına dönüştürülür. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerde, akülerin kalitesi kritik bir rol oynar. Yüksek şarj-deşarj verimliliği, aşırı sıcaklıklara karşı direnç ve uzun ömür özelliklerine sahip aküler, bu tür sistemlerde tercih edilmesi gereken temel özelliklerdir. Bu özelliklere sahip aküler, sistemin performansını artırır ve güvenilir bir enerji depolama çözümü sunar. Şebekeden bağımsız sistemlerdeki akülerin seçimi, sistemin ömrü, güvenilirliği ve verimliliği açısından önemli bir faktördür (Atalay vd., 2019).

2.3.2.2. Şebeke bağlantılı sistemler

Şebeke bağlantılı sistemler dört ana komponentten meydana gelir: fotovoltaik paneller, eviriciler, çift yönlü sayaçlar ve veri toplama birimleri (datalogger). Bu sistem, güneş enerjisinin elektrik şebekesine entegre edilmesini sağlar. FV panelleri, güneşten gelen ışığı elektriğe dönüştürerek bu enerjiyi evirici aracılığıyla kullanılabilir hale getirir. Çift yönlü sayaçlar, üretilen ve tüketilen enerji miktarını izleyerek şebekeyle etkileşimi düzenler. “Datalogger” ise sistem performansını kaydederek veri analizi için önemli bilgiler sağlar.



Şekil 2.19. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem şeması (Sari ve Özyiğit, 2020).

Şebeke entegrasyonuna sahip fotovoltaik enerji sistemleri, genellikle iki temel tasarım konsepti altında şekillendirilir: merkezi yapılar ve dağıtılmış sistemler (seri eviriciler kullanılarak kurulan sistemler). Merkezi yapılar genellikle elektrik üretimine odaklanır ve şebeke enerjisinden minimum düzeyde faydalanır. Bu tür yapılar, genelde geniş ölçekli elektrik üretim tesislerinde tercih edilir. Diğer taraftan, dağıtılmış sistemler daha küçük ölçekli uygulamalar için uygundur ve dizi eviricilerin kullanımı sayesinde yerel enerji üretiminde esneklik sağlar.

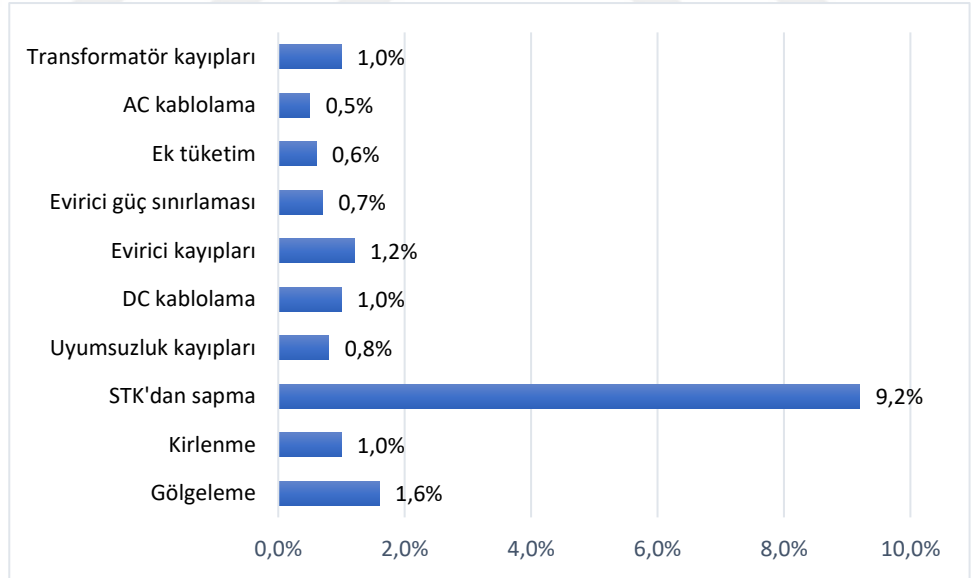
Her iki tasarım da, enerji depolamaya ihtiyaç duymadan çalışır ve bu, önemli bir avantaj sunar. Bu sistemler, sadece şebeke elektriğinin mevcut olduğu bölgelerde kullanılabilir. Yüksek güç talebi olduğunda ve güneş enerjisi yetersiz kaldığında, sistem, şebeke bağlantılı elektrik ile gerekli güç desteğini sağlar. Benzer şekilde, düşük güç tüketiminin olduğu zamanlarda güneş enerjisi fazla ise, sistem şebekeden enerji çeker ve yatırımcı bu sağlanan elektrik enerjisi üzerinden gelir elde eder. Bu esnek çalışma prensibi, şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin verimli ve maliyet açısından uygun bir şekilde enerji üretimine katkıda bulunmasını sağlar (Çekirdek, 2017).

Fotovoltaik enerji sistemleri, çeşitli teknik alanları bir araya getiren karmaşık bir teknolojidir. Bu durum, sistem tasarımı sürecinde temel bileşenlerin kapasitelerinin ve performanslarının titizlikle değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Sistem dizaynı sırasında, FV paneli, evirici, akü grupları ve diğer temel

unsurların doğru kapasite hesaplamaları yapılmalı ve kalite standartlarına uygunluğu sağlanmalıdır. Bu, fotovoltaik sistemlerin güvenilir, etkili ve uzun ömürlü olmasına katkı sağlar.

2.3.3. Fotovoltaik panel performansına etki eden faktörler

Fotovoltaik sistemlerin performansını etkileyen birçok faktör, genellikle enerji üretiminde kayıplara neden olmaktadır. Bu faktörleri çevresel ve sistem tasarım koşulları olarak iki ana grupta inceleyebiliriz. Çevresel etkenler arasında sıcaklık, tozlanma ve karlanma gibi faktörler yer alırken, sistem tasarım koşulları arasında gölgelenme, alternatif akım (a.a.) ve doğru akım (d.a.) kablo kayıpları gibi faktörler yer almaktadır. Ayrıca, santralde kullanılan malzemelerin kalitesine bağlı olarak paneller arasındaki uyumsuzluklar ve evirici kayıpları da önemli etmenlerdir. Fotovoltaik sistemdeki bu çeşitli kayıplar sistem verimini nasıl etkilediği, Şekil 2.20'deki grafikte görülebilir. Bu faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi ve yönetilmesi, fotovoltaik sistemlerin optimal performansı açısından önem arz etmektedir.



Şekil 2.20. FV sistemlerde verime etki eden faktörlerin kayıp oranları (Cubukcu and Gumus, 2020).

Şekil 2.20'de fotovoltaik sistemlerdeki kayıplar analiz edildiğinde, en büyük kaybın standart test koşullarından (STK'dan) sapmadan, yani panel sıcaklığındaki değişimler, güneş ışınımındaki dalgalanmalar ve hava koşullarındaki farklılıklar gibi çevresel etmenlerden kaynaklandığı, en küçük kaybın ise AC kablolarında yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu kayıpların etkisini doğru bir şekilde değerlendirmek için FV performans oranının detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Fotovoltaik sistemlerde verimliliği etkileyen faktörler hem çevresel koşullara hem de kullanılan sistemin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çubukçu ve Gümüş (2020) tarafından sunulan kayıplar, literatürde genel kabul gören değerleri yansıtırken, yazarların çalışmasında bu değerler, kendi projelerinin spesifik koşullarına göre şekillendirilmiştir. Ancak, fotovoltaik sistemlerde proje bazlı farklılıklar büyük önem taşımaktadır. Özellikle lokal çevre koşulları, ışınım seviyeleri, sıcaklık değişimleri, gölgeleme etkileri ve sistemin kurulduğu coğrafi konum gibi faktörler, kayıp oranlarında ciddi değişikliklere yol açabilir.

Bu nedenle, bizim çalışmamızda kullanılan kayıp değerleri, SAM yazılımında hesaplanan sonuçlarla birlikte projemizin özgün koşulları dikkate alınarak belirlenmiş ve optimize edilmiştir.

2.3.3.1. Çevresel faktörler

Fotovoltaik paneller, çevresel koşullara bağlı olarak zaman içinde kirlenmeye maruz kalarak performans düşüşlerine neden olabilir. Fotovoltaik panellerinin performansını etkileyen başlıca etkenlerden biri sıcaklıktır. Sıcaklıkların dikkatle değerlendirilmesi ve belirli sıcaklık aralıklarında daha az performans kaybı yaşatan panellerin seçilmesi, sistem verimliliğini artırır. Fotovoltaik paneller genellikle standart test koşullarında (1000W/m^2 ışınım, 1.5 AM hava kütlesi ve 25°C hücre sıcaklığı) test edilir. Bu testlerde elde edilen akım ve gerilim eğrileri, ışınım ve sıcaklık gibi değişkenlerden doğrudan etkilenir. Işınım seviyesi, sıcaklığa göre daha geniş değişiklikler gösterebilir. Işınım miktarı yarıya düştüğünde, güç üretimi de aynı oranda azalır. Paneller, güneş ışınımının bir kısmını emer, bir kısmı emilmeden yüzeyden geri yansır ve geri yansıyan ışınımın etkisiyle oluşan kayıplar yansıma kayıpları olarak adlandırılır. Panellerin verimliliğini artırmak ve ışığın etkili bir

şekilde emilmesini sağlamak için çeşitli katman teknolojileri kullanılır. Ancak, panellerin yüzeyindeki kir ve lekeler ışığın emilimini azaltarak önemli enerji kayıplarına neden olabilir. Özellikle toz birikintileri, az yağışlı bölgelerde panellerin verimliliğini %15 oranında azaltabilir (Piliouguine et al., 2008).

Ancak, tozlanma kaynaklı kayıpların, tozun cinsi, yağış sonrasındaki süre, panel açısı ve temizlik planlaması gibi faktörlere bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Bu faktörlerin tümü incelendiğinde, tozlanma kaynaklı verim kayıplarının genellikle %4'ten fazla olmadığı görülmüştür (Kymakis et al., 2009).

2.3.3.2. Sistemsel faktörler

Enerji üretimini büyük ölçüde etkileyen bir diğer kritik unsur gölgelemedir. Gölgeleme analizi, potansiyel gölgeleme sorunlarının olduğu durumlarda, tasarımların doğru bir şekilde planlanmasına olanak sağlar. Sistem içerisindeki kablolama, büyük kayıplar ve arızalar açısından önemli bir risk faktörüdür. Kablolama hesaplamalarının hatalı yapılması, kabloların yanmasına ya da yüksek seviyede verim kaybına yol açabilir. Bu sebeple, sistem tasarımı aşamasında kablo kesitlerinin doğru şekilde hesaplanması önemlidir.

Gerilim düşümü, enerji aktarımında verimliliği sağlamak için önemli bir parametredir ve kablo kesiti ile ters orantılıdır. Türkiye’de hem alternatif akım hem de doğru akım tarafında %1 ile %3 arasında gerilim düşüşleri kabul edilebilir sınırlar olarak belirlenmiştir (Deniz, 2013).

Fotovoltaik sistemlerin kurulumu ve tasarım aşamalarında, eviricinin çalışma gerilimin belirlenen sınırlar içinde kalması esastır. Bu bağlamda, geniş gerilim aralığına sahip eviricilerin seçilmesi, sistemin genel verimliliğini artırabilir. Dar gerilim aralığına sahip bir MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) evirici tercih edilmişse, sıcaklık değişimlerinin yol açtığı gerilim dalgalanmalarını dikkatle analiz etmek önemlidir.

Eviriciler genellikle -25°C ile $+60^{\circ}\text{C}$ arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Eviricilerin optimum performans sağlayabilmesi için, aşırı

sıcaklıklardan, doğrudan güneş ışığından, yüksek nemden ve tozlu ortamlar gibi olumsuz koşullardan korunmaları gerekmektedir. Farklı üreticilerin panellerinin aynı MPPT'ye bağlanması, sistemin verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, projelendirme aşamasında, daha fazla MPPT sayısına sahip evirici modellerinin tercih edilmesi daha yüksek verim sağlayabilir. Panellerin MPPT akımlarına göre gruplandırılması ve benzer MPPT akım değerlerine sahip panellerin aynı dizide seri bağlantılarla birleştirilmesi, uyumsuzluktan kaynaklanan verim kayıplarını azaltır. Merkezi evirici kullanımı durumunda, birden fazla dizinin bulunması, eviricinin verimliliğini azaltabilir ve üretim performansını olumsuz etkileyebilir. Bunun nedeni, eviricinin MPPT fonksiyonunu etkin bir şekilde gerçekleştirememesidir (Selbaş ve Çetin, 2022).

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1)$$

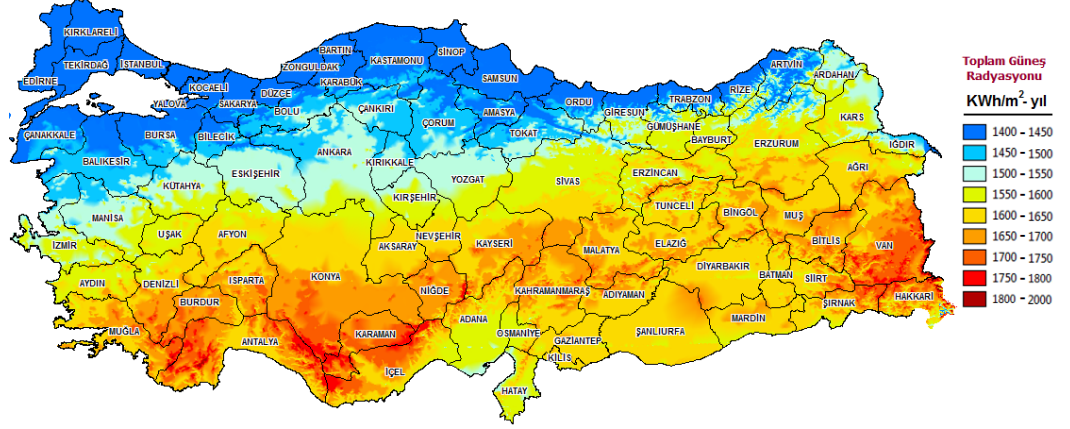
$$P_T = V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (2)$$

$$FF = \frac{P_{mp}}{P_T} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{\text{Alan A}}{\text{Alan B}} \quad (3)$$

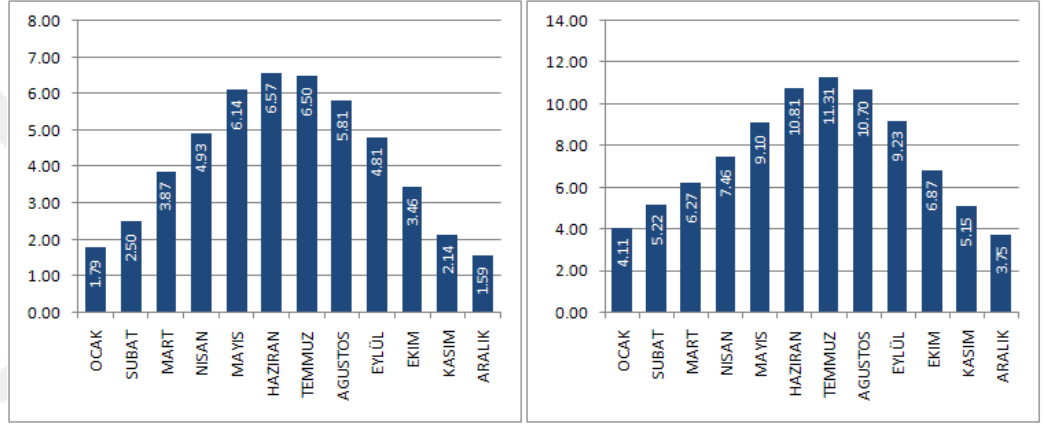
Doldurma Faktörü (FF), sıcaklık değişimlerine son derece duyarlı bir parametredir. Bu oran, fotovoltaik panelin performansını belirlemek için bir ölçüt olarak kabul edilir ve bu göstergenin beklenen değerden sapması ya da değişiklikler, panelin üretim sürecindeki olası sorunları işaret edebilir. Bu tür sapmalar, teorik olarak belirlenen en yüksek değer doğru olmayabileceğini düşündürülebilir.

2.3.4. Dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisi görünümü

Türkiye güneş enerjisi bakımından coğrafi konumu ve iklimi itibarıyla büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle İç Anadolu, Güneydoğu, Ege ve Akdeniz bölgeleri, güneş enerjisi yoğunluğu ve güneşlenme süresi açısından diğer bölgelere göre daha avantajlıdır. Bu bölgelerdeki turuncu renkler, güneş enerjisi yoğunluğunun en yüksek olduğu illeri belirtmektedir.



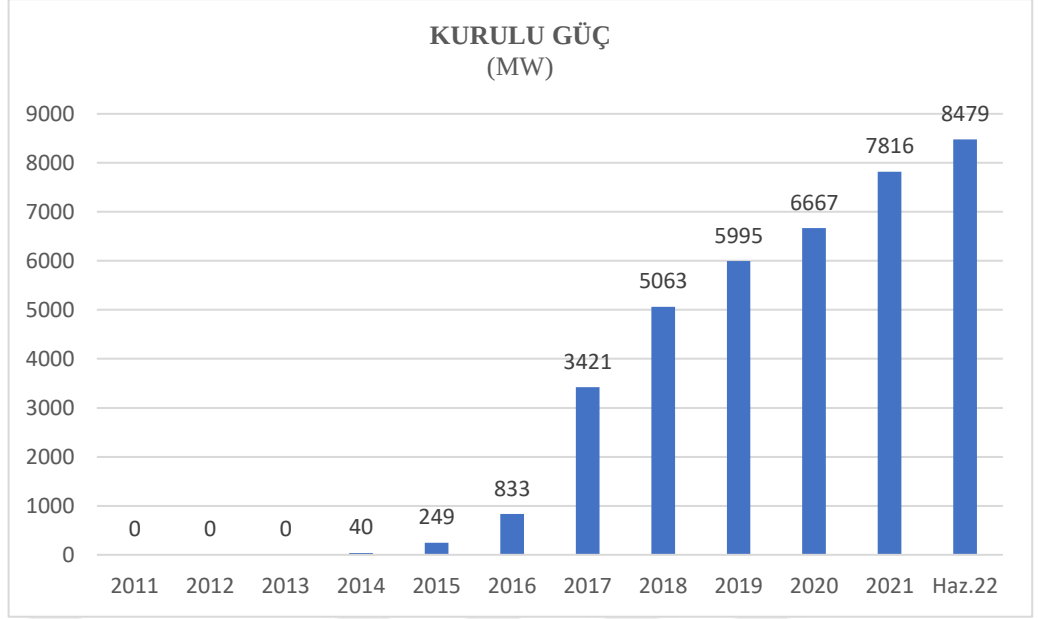
Şekil 2.21. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli (ETKB, 2024b).



Şekil 2.22. (a) Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) ve (b) Güneşlenme Süreleri (saat) (ETKB, 2024b).

Güneş enerjisi haritası, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki potansiyeli görsel olarak ortaya koymaktadır. Türkiye, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verilerine göre, yıllık ortalama 2.741 saat güneşlenme süresi ve yıllık ortalama 1.527,46 kWh/m² toplam ısınım değeri ile yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip bir ülkedir. 2022'nin Haziran ayı itibarıyla, Türkiye'nin güneş enerjisi tabanlı elektrik üretim kapasitesi 8,479 MW'a ulaşmıştır (ETKB, 2024b).

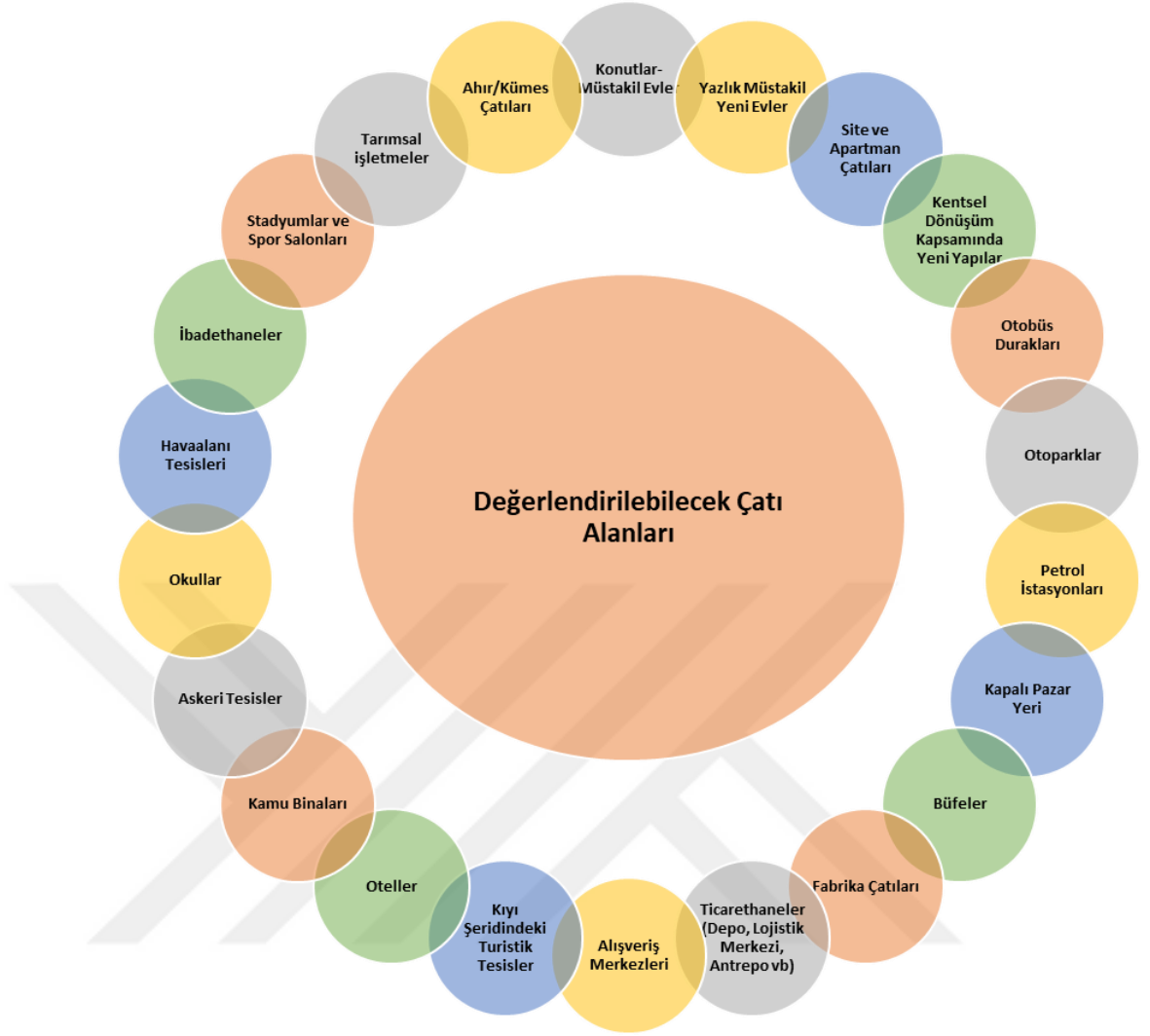
Bu rakam, yıllar içindeki kurulu güç değişimini gösteren bir grafikte birlikte Şekil 2.23'te sunulmuştur. Türkiye, sürdürülebilir enerji hedefleri doğrultusunda güneş enerjisi alanında önemli bir büyüme kaydetmiştir. Gelecekte, bu potansiyelin daha fazla değerlendirilmesiyle birlikte ülkenin enerji bağımsızlığına olumlu katkılar sağlaması beklenmektedir.



Şekil 2.23. Türkiye 2011-2022 yılları arasındaki güneş enerjisi kurulu güç grafiği (ETKB, 2024b).

Türkiye’deki bina stoku, TÜİK verilerine göre 11,6 milyondur. Bu binaların yaklaşık %87’si, konut niteliklidir. Her yıl bina stokuna eklenen 100.000’den fazla yeni bina ile birlikte bu stok sürekli olarak artmaktadır (ETKB, 2024b).

Bu yoğun yapılaşma eğilimi, gelecek yıllarda çatı ve cephe alanlarına yönelik önemli güneş enerjisi yatırımlarının yapılma potansiyelini beraberinde getirmektedir. Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli dikkate alındığında, çatı ve cephelerin bu alanda değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi açısından büyük önem taşımaktadır. Kullanılabilecek çatı alanları Şekil 2.24’teki gibi gruplandırılabilir.

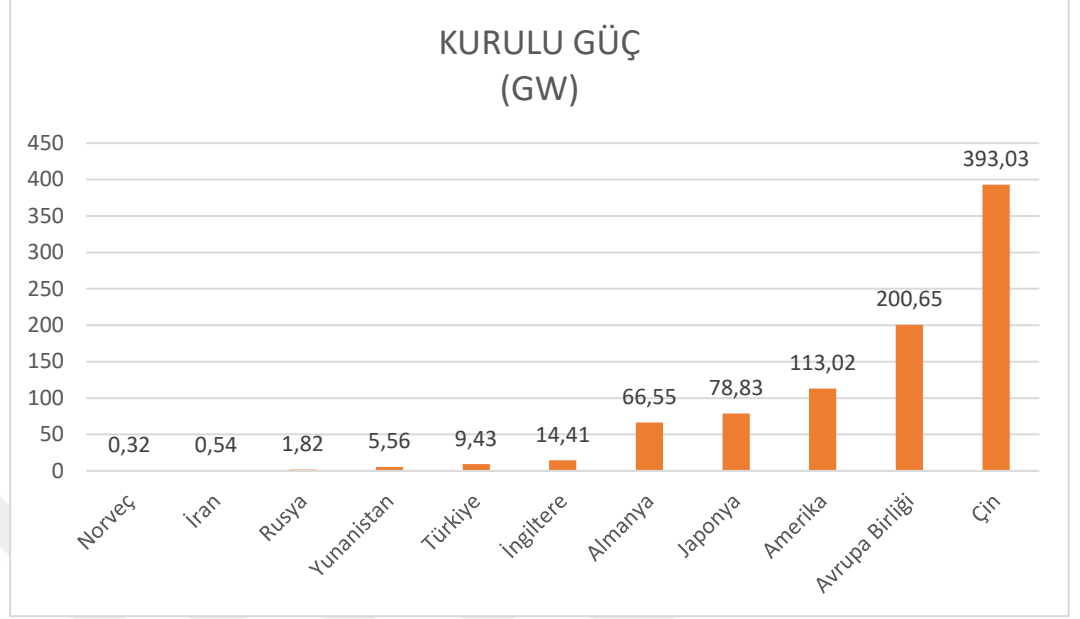


Şekil 2.24. Türkiye’de FV sistemleri için değerlendirilebilecek çatı alanları (ETKB, 2024b).

Güneşten dünyaya ulaşan enerji, küresel enerji talebinin oldukça üzerindedir. Dünya'ya yıllık olarak düşen güneş enerjisi miktarı, geçmişte kullanılan toplam fosil yakıtın çok ötesindedir. Yer yüzeyine ulaşan güneş enerjisinin ortalama yoğunluğu 1,37 kW/m²'dir. Küresel yıllık elektrik enerjisi talebi yaklaşık 17.000 TWh iken, güneşten gelen bir günlük enerji miktarı 174.000 TWh olarak belirlenmiştir. Bu durum, güneşten sadece birkaç saatlik enerji alımının, dünya genelindeki yıllık enerji ihtiyacını karşılamaya yeterli olduğunu ortaya koymaktadır (Arslan ve Türkdoğan, 2022).

IEA verilerine göre, dünya her yıl 1,5 katrilyon (1.5×10^{15}) MWh güneş enerjisi alır. Bu enerji miktarı, dünya nüfusunun yıllık tüketiminin 28 bin katıdır.

Her doksan dakikada bir yeryüzüne düşen güneş ışığı, dünya genelindeki yıllık enerji talebini karşılamaya yeterlidir (Kılıç, 2015).



Şekil 2.25. Seçili ülkelerin 2022 yılında güneş enerjisi kurulu güçleri (International Renewable Energy Agency, 2023).

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın raporlarına göre, dünya genelindeki güneş enerjisi kurulu gücü 2022 yılı itibariyle 1053,12 GW seviyesine ulaşmıştır. 2022 yılında Çin toplam 393 GW kurulu FV kapasitesi ile sektörün lideri konumundadır. Çin'i sırasıyla Amerika (113 GW), Japonya (78 GW) ve Almanya (66,55 GW) takip etmektedir (International Renewable Energy Agency, 2023). Bu veriler, güneş enerjisinin küresel ölçekte hızla büyüdüğünü ve birçok ülkenin sürdürülebilir enerji alanında önemli adımlar attığını göstermektedir.

Uluslararası Enerji Ajansı, güneş enerjisinin 2023 yılında küresel yenilenebilir enerji kapasitesindeki artışın ana itici gücü olmaya devam edeceğini belirtmektedir. IEA'nın yeni raporuna göre, 2023 yılında güneş enerjisi kapasite artışı 286 GW'a ulaşmıştır. Bu rakamın, düşük modül fiyatları, dağıtık güneş FV sistemlerinin daha geniş çapta benimsenmesi ve büyük ölçekli dağıtım için artan politika baskısı gibi faktörlerle 2024 yılı için yaklaşık 310 GW'a çıkması öngörülmektedir (IEA, 2023).

Güneş enerjisi, Türkiye'nin de enerji portföyünde önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye'nin farklı bölgelerinde yıllık güneşlenme süresi, 2.993 ile 1.971 saat/yıl arasında çeşitlenmektedir. Ülkenin genel yüzeyine yayılan brüt güneş gücü miktarı 111.500 GW'tır (ETKB, 1998).

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) hazırladığı Türkiye Ulusal Enerji Planı çerçevesinde, 2022 yılının sonunda güneş enerjisi kapasitesi 9,4 GW olarak belirlenmiştir. Ancak, 2035 yılına kadar bu kapasitenin yaklaşık %450 oranında bir artışla 52,9 GW seviyesine çıkarılması hedeflenmiştir (ETKB, 2022).

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, ülkenin enerji arzının çeşitlendirilmesinde güneş enerjisinin önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Bu hedeflere ulaşmak, ekonomik kalkınmayı destekleyerek istihdam yaratma potansiyeli de taşımaktadır. Güneş enerjisi sektöründeki yatırımlar, iş imkanlarını genişletecek ve nitelikli çalışma alanları oluşturacaktır. Ayrıca, fosil yakıtlardan kaynaklanan çevresel sorunları azaltacak ve iklim değişikliği ile mücadeleye önemli bir katkıda bulunacaktır.

2.3.5. Fotovoltaik güç teknolojileri ve projelendirme süreçlerine genel bakış

Fotovoltaik sistem teknolojileri, enerji üretimi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojilerin temelinde kullanılan en yaygın malzeme, silisyum elementidir. Fotovoltaik hücrelerin üretiminde kullanılan yarı iletken materyaller arasında silisyum, galyum arsenit, kadmiyum sülfür ve tellür gibi çeşitli elementler bulunmaktadır. Bu hücreler, genel olarak kristalin ve amorf olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Silisyum tabanlı hücreler ise, ince film ve şerit formasyonları, tek kristalli ve çok kristalli gibi çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilmektedir. Bu hücrelerin yüzeyleri çeşitli şekillerde biçimlendirilir ve genellikle 100 cm² civarında bir alanı kaplar ve kalınlıkları 0,2–0,4 mm arasında değişir. Günümüzde elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan fotovoltaik modüllerin yüzey alanları 2,1 m²'ye kadar çıkabilir ve güçleri 675 Wp gibi yüksek değerlere ulaşabilir. Bu modüllerin birleştirilmesiyle yüksek güçlü FV panelleri ve fotovoltaik güç santralleri kurulabilir. Kurulum ve teknoloji türüne bağlı olarak, 13 ila 25 dönüm

büyükliğindeki bir alan, 1 MW kapasiteli bir fotovoltaik güç santrali kurmak için uygundur. Özellikle binaların çatı ve cephelerine entegre edilen FV güç santralleri, elektrik enerjisi üretimini tüketim noktalarında gerçekleştirebilmektedir (ETKB, 2024b).

Fotovoltaik sistemlerin etkin bir şekilde kurulabilmesi ve enerji üretiminde üst düzey bir performans sağlayabilmesi için projelendirme aşaması büyük bir öneme sahiptir. Bu aşamada, kurulum yerinin seçimi, eviricilerin gücü, panellerin eğimi, yönü ve kapasitesi çeşitli faktörlerin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Projelendirme sürecinde, farklı iklim veri tabanları, gölgeleme analizleri ve üretim sonuçlarını etkileyebilecek diğer faktörleri değerlendirmek için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Projelerin doğru bir şekilde öngörülmesi ve güneş enerjisi sistemlerinin verimli şekilde çalışması amacıyla geliştirilen bu yazılımlar arasında; Sistem Advisor Model (SAM), PVSyst, Homer, RETScreen, Insel, PV-Sol Expert, Solar Design Tool ve PV F-Chart programları en çok bilinenler arasındadır.

Yenilenebilir enerji endüstrisinin dinamikleri içerisinde, güneş enerjisi teknolojilerin etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi ve projelerin başarıyla hayata geçirilebilmesi için tasarım programlarının rolü büyüktür. Bu programlar, finansal ve maliyet analizlerinin tutarlı bir metodoloji ile gerçekleştirilmesini sağlayarak, sektördeki profesyonellerin karar alma süreçlerini hızlandırmakta ve projelerin önceliklerinin belirlenmesinde rehberlik etmektedir. Aynı zamanda, Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi ve bu faaliyetler için gerekli sürekli yatırımın geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Tasarım programları, çeşitli çıktılar üreterek kullanıcılara detaylı analiz imkânı sunmaktadır. Aylık güneş grafikleri ve batarya şarj durumları gibi veriler, sistem performansını aylık ve yıllık bazda görselleştirmekte ve değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Başlangıç yatırım maliyetleri, santralden elde edilen enerji geliri ve yıllık enerji maliyeti gibi finansal parametreler, projenin ekonomik fizibilitesini ortaya koymaktadır. Sistem güç çıkışı ve yılın her saatine göre oluşturulan grafikler, enerji üretimindeki zamansal değişimi gösterirken; modüllere ulaşan güneş ışıınımı, panel verimliliği, eğim ve azimut açısı gibi teknik

parametreler, sistemin performans analizinde önemli veriler sunmaktadır. Ek olarak, emisyon düşürme miktarı, sistem maliyeti, satın alınan ve satılan enerji maliyeti gibi faktörler, sürdürülebilirlik ve finansal geri dönüş süresi açısından önemli bilgiler sağlamaktadır (Keskin, 2012).

Bu programlar, sektördeki aktörlerin teknoloji ve maliyet kıyaslaması yapmalarını sağlayarak, yenilenebilir enerji projelerinin çok daha verimli olarak geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

2.4. Fotovoltaik Sistem ve Elektrikli Araç Entegrasyonu

Fosil yakıt tüketiminin giderek artması, yüksek karbon emisyonlarına ve çevresel endişelere sebep olmaktadır. Dünyada inşaat ve ulaşım sektörleri toplam karbon emisyonlarının neredeyse %34'ünü oluşturmaktadır. Bu sektörlerden kaynaklanan büyük karbon emisyonlarıyla ilgili endişeler nedeniyle, verimli ve düşük karbonlu enerji tedarikinin acil bir şekilde araştırılmasını gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin bina ve ulaşım sektörlerindeki kullanımının artırılması, ekonomik ve çevresel performans avantajları nedeniyle geleceğe yönelik bir çözüm sunmaktadır. Bu sebeple, inşaat sektöründe, bina çatılarına fotovoltaik panellerin entegrasyonu ve ulaşım sektöründe alternatif yakıtlı araçların kullanım oranının artırılması üzerine çalışmalar yapılmakta ve teşvik edilmektedir. Birçok araştırmacı, yenilenebilir enerjiye dayalı bina ve ulaşım entegrasyon sistemleri için yenilikçi tekniklere odaklanarak fizibilite çalışmaları, niceliksel değerlendirme ve kontrol stratejileri geliştirmektedir.

Bu çerçevede, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak amacıyla, küresel CO₂ emisyonlarının 2050 yılına kadar sıfıra indirilmesi ve önde gelen düşük karbonlu şehirlerin 2040 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşması gerektiği giderek daha belirgin hale gelmektedir. Fotovoltaik sistem teknolojileri, depolama sistemleri ve elektrikli araçlar (EA'lar) gibi yenilikler, maliyetlerin düşmesiyle birlikte derin karbonsuzlaştırma sürecinde önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

Elektrikli araçlar ile FV sistemlerin entegrasyonu ise iki temel yenilenebilir enerji teknolojisinin faydalarını kullanarak enerji verimliliğini artırmayı ve karbon

emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Bu entegrasyon, EA bataryalarının enerji depolama kapasitesini kullanarak FV sistemlerinin ürettiği enerji fazlasını depolamayı ve gerektiğinde şebekeye geri beslemeyi mümkün kılmaktadır. Elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistemler, yenilenebilir enerji teknolojilerinin ulaştırma sektörüne entegrasyonu konusunda önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Bu entegrasyonun verimli şekilde çalıştırılması sırasında kullanılan Araçtan Şebekeye (Vehicle-to-Grid, V2G), Araçtan Eve (Vehicle-to-Home, V2H) ve Araçtan Her Şeye (Vehicle-to-Everything, V2X) sistemleri ise elektrikli araçların bataryalarındaki enerjinin elektrik şebekesine geri beslenmesini, evlerde kullanılmasını ya da istenilen farklı kullanım alanlarına aktarılmasını sağlamaktadır. Tüm bu alanlardaki mevcut araştırmaların özet ve sonuçları aşağıda sunulmuştur.

2.4.1. Literatür taraması

Japonya’da yapılan bir çalışmada, Japon hanelerinde 2030’a doğru EA ile entegre konut FV sistemlerinin ekonomik bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirme, bu teknolojilerin geleceğe yönelik maliyet tahminlerini de içermektedir. Fotovoltaik (FV) ve elektrikli araçlar (EA’lar) kombinasyonunun, 2018’de şebeke elektriği ve benzinli araç kullanımıyla rekabetçi bir maliyet sunduğu görülmüştür. 2030’a gelindiğinde, FV + EA kombinasyonunun Japonya’daki hanelerdeki enerji ekonomisini önemli ölçüde iyileştireceği ve yıllık enerji maliyetlerini (elektrik ve benzin) %68’e kadar azaltacağı ve hane enerji sistemini %92 oranında karbonsuz hale getireceği sonucuna varılmıştır. Öte yandan, EA’nın büyük bataryasının minimum ek maliyetle kullanılabilmesi nedeniyle FV + EA sisteminin, yalnızca FV veya FV + akü sistemlerinden çok daha ekonomik olduğu bulunmuştur (Kobashi and Yarime, 2019).

Kyoto Şehri için yapılan diğer bir araştırmada, çatı üstü Fotovoltaik paneller, aküler ve elektrikli araçlar gibi unsurlardan oluşan şehir ölçeğinde bir enerji sisteminin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Elektrikli araçların (EA) hızlı bir şekilde benimsenmesi ve EA’ların elektrik depolama amacıyla kullanılması, sadece fotovoltaik sistemler ve akülerin dağıtımına odaklanmaktan ya da EA’ların yalnızca şarj edilmesine izin vermekten daha düşük maliyetlerle

şehirlerdeki çatı üstü FV penetrasyonuna önemli bir katkı sağlayabileceği bulunmuştur. Bu yaklaşım, elektrik depolama kapasitesini artırarak enerji verimliliğini iyileştirmekte ve FV sistemlerin şebeke ile entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Mevcut araç filosunun tamamının elektrikli araçlarla değiştirilmesi durumunda şehirdeki araç ve elektrik kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %60-74 oranında azaltılabileceği ve 2030 yılına kadar enerji maliyetlerinin %22-37 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir (Kobashi et al., 2020b).

Çin'in Shenzhen ve Japonya'nın Kyoto şehirlerinde yapılan çalışmada, şarj ve deşarja (Araçtan Eve: V2H) izin veren batarya veya EA'lar ile entegre konut fotovoltaik sistemlerinin çevresel ekonomik değerlendirmesi yapılmış ve bu teknolojilerin 2030'a yönelik maliyet projeksiyonları da dahil edilmiştir. Kyoto'da gerçekleştirilen çalışmada, "FV + EA" (V2H) sisteminin, "yalnızca FV", "FV + akü" ve "EA şarjı" seçenekleriyle karşılaştırıldığında, 2030'a doğru oldukça uygun maliyetli hale geldiği gözlemlenmiştir. FV'den elde edilen karbonsuz elektriğin EA'lar aracılığıyla şarj edilmesi sayesinde, incelenen tüm teknoloji kombinasyonlarında "FV + EA"nın en yüksek CO₂ emisyon azaltma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir (Kobashi et al., 2020a).

Kobashi ve ark. (2021), sekiz Japon şehirde yaptıkları bir araştırmada, çatı üstü güneş FV + EA konseptini incelemiştir. Bu konseptin uygulanmasıyla, 2030'a kadar dokuz büyük Japon şehrinin elektrik talebinin %53 ila %95'ini karşılayabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca yazarlar, şehirlerdeki elektrik üretimi ve araç kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %54 ila %95 oranında azaltılabileceğini ve %26 ila %41 arasında potansiyel maliyet tasarrufu sağlanabileceğini keşfetmişlerdir.

Başka bir araştırmada, 2020'den 2040 yılına kadar Japonya'daki konut ve ticari bölgelerde, bağımsız aküler veya elektrikli araçlarla entegre edilmiş çatı üstü fotovoltaik sistemleri üzerinde teknik ve ekonomik analizler yapılmıştır. 2025'e gelindiğinde, konut "FV + EA" sistemlerinin geri ödeme süresi dokuz yıl, enerji maliyetlerinde %23'lük bir tasarruf ve iç getiri oranı (IRR) %11'e ulaşmış ve gelecek yıllarda da gelişim kaydetmiştir. Elektrik ve benzin tüketiminden

kaynaklanan CO₂ emisyonları %88 oranında azaltılmış ve sistem, elektrik talebinin %89'unu karşılayabilecek bir kapasiteye ulaşmıştır (Kobashi et al., 2022).

Barone ve ekibi (2022), hava şartlarının ve yerel enerji piyasası fiyatlarının enerji ve ekonomik performans üzerindeki etkisini değerlendirerek; binadan araca - araçtan binaya (V2B²) planının Avrupa'daki uygulamasını incelemiştir. Bu yeni enerji yönetimi planının iki temel amacı bulunmaktadır: küme düzeyinde kendi kendine tüketilen yenilenebilir elektriğin payını artırarak birden fazla binada enerji esnekliğini ve verimliliğini teşvik etmek ve elektrik şebekesiyle olan etkileşimi azaltmaktır. Önerilen küme, bir ev, iki bina, bir ofis alanı ve bir elektrikli araçtan oluşmaktadır. Önerilen V2B² planının enerji ve ekonomik performansı büyük ölçüde hava koşullarına ve elektrik alım/satım fiyatına bağlıdır. Bu doğrultuda, farklı kurulum sahalarını dikkate alarak hava durumu ve güneş ışınım potansiyelinin enerji ve ekonomik performans üzerindeki etkisini farklı senaryolarda değerlendirmek için üç farklı V2B² yerleşim planı simüle edilerek kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Güneş ışınımının homojen dağılımını sağlamak için artan enlem dereceleri dikkate alınarak seçilen 22 farklı Avrupa lokasyonu için karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Önerilen V2B² planı sayesinde enerji tasarrufunu minimum %13,6'dan maksimum %71,2'ye kadar gerçekleştirebildiği ekonomik sonuçlara ulaşılmıştır.

Kore'de gerçekleştirilen bir araştırmada, beş farklı senaryoda, çatı üstü fotovoltaik sistemlerinin yanında elektrikli araçlar kullanılarak karbondan arındırma potansiyeli teknik ve ekonomik analizlerle 2019'dan 2030'a kadar dört şehir ve bir il için incelenmiştir. Kore'deki çeşitli yapı tipleri ve Seul'deki farklı bina kategorileri için çatı üstü FV ve EA'ların enerji, ekonomik ve çevresel performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca, teknik ve düzenleyici değişkenler (örneğin, EA verimliliği, tarife garantisi vb.) birden fazla performans ölçütü için optimize edilmiştir. "FV + EA" sisteminin Kore'deki şehirlerde CO₂ emisyonlarını %86'ya kadar ve enerji maliyetlerini %51'e kadar azalttığı bulunmuştur. Özellikle konut binalarının, diğer bina türlerine kıyasla her yönden üstün performans sergilediği belirlenmiştir (Chang et al., 2022).

Elektrikli araç sistemleri ile entegre çatı üstü fotovoltaik sistemlerine (FV + EA) odaklanan bir araştırmada, FV + EA sistemleri ile yük arasındaki etkileşimi simüle etmek ve şehir düzeyindeki enerji-çevre-ekonomik etkileri değerlendirmek için bir çerçeve geliştirilmiştir. Örnek olay çalışması olarak Çin'in Shenzhen kenti kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, EA bataryalarının FV'ye depolama hizmeti sağlamasıyla, FV öz tüketiminin 2030 yılına kadar yalnızca FV sisteminde %78'e ve "FV + EA" sisteminde %95'e önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermiştir. Sistem, Shenzhen'deki toplam enerji talebinin %37'sini karşılayabilmektedir; bu, mevcut elektrik üretim kapasitesinin iki katıdır. Şebeke güç tüketiminin ve araçlarda yakıt tüketiminin azaltılmasıyla şehir genelindeki CO₂ emisyonlarının %42 oranında azaltılabileceği görülmüştür. Kaçınılan yakıt ve elektrik harcamaları, FV ve EA'lara yapılan ek sermaye yatırımından daha ağır basmaktadır ve toplam %21 oranında net maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Tek başına FV sistemiyle karşılaştırıldığında, FV + EA sistemi Shenzhen için daha kapsamlı faydalar sağlayabilmektedir. Bu analitik çerçeve, Çin'deki ve yurtdışındaki elektrikli araç alımında henüz bir artış yaşanmamış çoğu şehir için genelleştirilebilir (Liu et al., 2022).

Japonya'nın Kyoto Şehri ile kıyaslanarak teknik ve ekonomik analizler kullanılarak gerçekleştirilen bir araştırmada, Endonezya'nın Jakarta Kenti'nin kentsel karbonsuzlaştırma çabalarına odaklanılarak çatı üstü fotovoltaik sistemlerinin elektrikli araçlarla birleştirilmesi potansiyelleri araştırılmıştır. Çatı üstü FV sisteminin 2019'da Jakarta'da zaten maliyet açısından rekabetçi olduğu, ancak yalnızca %3-4 oranında maliyet tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, "Yalnızca FV" sisteminin 2030 yılına kadar giderek daha uygun maliyetli olacağı (%8-15 maliyet tasarrufu) belirlenmiştir. Elektrikli araçların bataryalarıyla birleştirilerek oluşturulan çatı üstü FV sistemlerinin ise Jakarta'nın elektrik talebinin %75-76'sını karşılayabildiği, elektrik üretimi ve sürüşten kaynaklanan %33-34 potansiyel maliyet tasarrufu sağlayabildiği ve şehirdeki hava kalitesini önemli ölçüde artıracığı sonucuna varılmıştır (Dewi et al., 2023).

Fransa'nın Paris, Lyon ve Marsilya kentleri için yapılan bir araştırmada; ulaştırma, enerji ve inşaat sektörlerini eş zamanlı olarak karbonsuzlaştırmak adına umut verici bir yol olarak elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistem (FV+EA)

konsepti üzerinde durulmuştur. SAM yazılımı kullanılarak, çatı üstü güneş enerjisi FV panellerinin mevcut çatı alanının yarısına kurulması ve 2030 yılına kadar binek araç sahiplerinin yarısının içten yanmalı motorlu araçlarını (İYM'ler) elektrikli araçlarla değiştirmesi durumunda, Fransa'nın en kalabalık üç şehrinin toplam elektrik talebinin %20 ila %42'sini karşılayabileceği hesaplanmıştır. Güneş FV + EA birleşimi, binek araç kullanımından ve elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını %43 ila %48 oranında azaltabilecektir. Ayrıca, bağlantı potansiyel olarak 2 ya da 3 yıllık geri ödeme süresi, yaklaşık 0,04 €/kWh'lik seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) ve tarife garantisi olmadan 6-19 milyar € net bugünkü değer (NPV) ile değerli bir yatırım olacağı sonucuna varılmıştır (Arowolo et al., 2023).

Deroubaix ve ekibi (2023), Fransa'daki Ile-de-France banliyö bölgesi ile Japonya'daki Kyoto şehrini karşılaştırarak; çatı üstü "FV + EA" sistemleri ile Paris'in karbonsuzlaştırma potansiyelini değerlendirmiştir. FV + EA sisteminin ve yalnızca FV sisteminin enerji yeterliliğini, öz tüketimini, öz yeterliliğini, maliyet tasarruflarını ve CO₂ emisyonlarını analiz ederek çeşitli senaryoları incelemişlerdir. Paris için toplam çatı alanının %50-60'ını veya Ile-de-France için %20-30'unu kapsayan belirli bir çatı kaplamasının üzerinde, FV elektrik üretiminin düzenli olarak talebi aştığı tespit edilmiştir. Bu çatı kapsamının üzerinde, çatı üstü FV sisteminin potansiyelini daha da hayata geçirmek için tarife garantileri (FIT) veya depolamaya ihtiyaç vardır. FV sistemlerinin elektrikli araçlarla entegrasyonunun, banliyö bölgesindeki çatı FV'lerden elde edilen büyük miktardaki elektrik üretimi daha çok depolama gerektirdiğinden; Ile-de-France'da Paris'e göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, önümüzdeki yıllarda FV ve EA maliyetlerinin düşmesiyle, Paris ve Ile-de-France genelinde FV + EA sistemlerinin düşük maliyetli elektrik sağlayarak CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili olabileceği öngörülmektedir.

Enerji krizi ve çevresel endişelerin artmasıyla, elektrikli araçların benimsenmesi potansiyel bir çözüm olarak dikkat çekmektedir. Akıllı şebeke kavramlarının geliştirilmesi, araçtan her şeye (V2X) teknolojisinin entegrasyonu, elektrikli araçların rolünü daha da güçlendirmiştir. V2X, elektrikli araçların bataryalarının kullanılmadığı zamanlarda ek faydalar sağlamak amacıyla geniş bir yelpazede kullanılabilen kapsamlı bir terimdir. Çift yönlü şarj; akü varlığından gelir

elde etmek, elektrik şebekesine katkı sağlamak, binaların ve evlerin enerji tüketimini azaltmak veya yükler için yedek güç sağlamak gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Özellikle yoğun dönemlerde elektrikli araçların ek enerji sağlayabilmesine ve elektriği şebekeye geri satmasına olanak tanıyan V2G, ileri bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli araçlar, V2G aracılığıyla yenilenebilir enerjiyi şebekeye entegre etme ve şebekenin elektrik yükünü dengeleme potansiyeline sahiptir.

Buonomano ve ark. (2019), elektrik enerjisi depolamayla donatılmış entegre düz plakalı fotovoltaik/termal kolektörlerle desteklenen binalarla, gelecekteki bir V2B senaryosunun; enerji, çevresel ve ekonomik performansını analiz etmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, şebeke elektriği talebinde %57'lik bir azalma ve CO₂ emisyonlarında %51'lik bir düşüş elde edilerek birincil enerjide önemli bir tasarruf sağlandığı bulunmuştur.

Borge-Diez ve ark. (2021), Araçtan Binaya (V2B), Araçtan Şebekeye (V2G) ve Araçtan Eve (V2H) ve yöntemlerinin, inşaat sektörü çalışanlarının elektrikli araçlara sahip olması ve geceleri evlerinde şarj edilen enerjinin gündüz iş saatlerinde ticari bir binaya aktarılması gibi çeşitli senaryoları bir araya getirdiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar, bina enerji verimliliğinin arttığını, yoğun talebin azaldığını ve işyeri taşımacılığında elektrikli araç kullanımının arttığını gözlemlemişlerdir.

O'Neill ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, mikro şebeke ortamında EA'ların ve V2G'nin yıllık operasyonlarını ve getirilerini değerlendirmekte ve çeşitli çalışma modlarını göstermektedir. Araştırmanın ana katkılarından biri, EA şarj senaryolarının V2G operasyonları üzerindeki etkisini açığa çıkarmaktır. Ayrıca, araştırma, V2G işlemlerinin mevsimsel özelliklerini değerlendirmek için yıl boyunca simülasyonlar sırasında V2G ile değişen yenilenebilir enerji üretimi arasındaki etkileşimleri ortaya koyuyor. Simülasyon sonuçları, V2G'nin optimize edilmiş bir mikro şebeke ortamında işletilmesinin, sistemin ekonomik etkinliğini artırdığını ve seviyelendirilmiş elektrik maliyetini (LCOE) %5,7'ye kadar azalttığını göstermektedir. Ayrıca, V2G'nin, daha yüksek güneş enerjisi üretim oranına sahip şebekelere daha fazla fayda sağladığı

belirlenmiştir. Sonuçlar, EA teknolojisindeki en son ilerlemelerin, V2G'nin ekonomik uygulanabilirliğini artırmanın yanı sıra ek depolama kapasitesi ve puant talep yönetimi sağlayarak şebeke verimliliğini artırma potansiyelini de iyileştirdiğini göstermektedir.

Owens ve ark. (2022), sabit depolama ve diğer jeneratör sistemlerine alternatif olan V2G'nin uzun vadeli karbon azaltma potansiyelini değerlendirmiştir. Bir örnek olay olarak, V2G'nin etkisi, yüksek seviyede EA kullanımına ve katı emisyon kısıtlamalarına tabi olan New England bölgesindeki bir güç sisteminin kurulması ve işletilmesi yoluyla incelenmiştir. New England'daki hafif hizmet araçlarının %13,9'unun katılımıyla, 14,7 GW sabit depolamanın (700 milyon doların üzerinde sermaye tasarrufu) yerini almasıyla V2G'nin sistem kapasitesi ve değeri üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak, katılım oranları %5 ile %80 arasında değiştiğinde, toplam sistem tasarrufları %2,2 ila %20,3 (183-1326 milyon \$) arasında olmuştur. Son olarak, varış noktasına dayalı sistem topolojisi, konumsal V2G katkılarını değerlendirmiş ve V2G sisteminin yerleşim bölgelerinde, yalnızca ticari alanlara kıyasla 2,5 kat daha değerli olduğunu göstermiştir. V2G, büyük ölçekte yenilenebilir enerji büyümesini destekleyebilir, depolama ihtiyacını azaltabilir ve geleneksel olarak rüzgâr ve güneş enerjisi kesintilerini dengelemek için kullanılan jeneratörlerin yerini alabilir.

Akıllı, çift yönlü şarj stratejileri (araçtan X'e, V2X) ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılmasına yönelik bir araştırmada; V2X ile ilişkili iş modellerinin başarıyla uygulanmasını kolaylaştırmak için, çeşitli kullanım senaryolarının gelir potansiyelleri, ek maliyetleri ve gelecek yıllar için elde edilen karları analiz edilmiştir. Kâr analizi, bazı V2X türlerinin yakın gelecekte kesinlikle kârlı hale gelebileceğini göstermektedir. Örneğin araçtan eve (V2H) için, iyimser bir bakış açısıyla 2040 yılında araç ve yıl başına 390 € kâr belirlenmiştir. Dış koşulların V2X karlılığı açısından büyük etkisi olduğu, kullanıcı durumları ve coğrafi konum parametrelerinin ek maliyetler üzerinde en büyük etkiyi gösterdiği tespit edilmiştir (Dossow and Kern, 2022).

Yun Lo ve ekibinin (2023) yaptığı bir çalışmada, şebekeye olan bağımlılığı azaltmak ve pik yük yönetimini optimize etmek için saatlik hassasiyetle yeni bir

V2B stratejisi içeren Akıllı Enerji Yönetim Sistemi (SEMS) geliştirilmiştir. Bu sistem, bina enerjisi ve elektrikli araç şarjını koordine eden, EA şarj ve deşarj faaliyetlerini planlayan ve algoritma, filo bileşimi, park süreleri ve şarj öncelikleri gibi faktörleri göz önünde bulundurarak EA park etme modellerini oluşturmaktadır. Ekonomik değerlendirme, EA batarya bozulma maliyetlerini ve çevresel etkilerle ilişkili dış masrafları da kapsamaktadır. Simülasyon sonuçları, bina şebekesi güç talebinde (%65) ve karbon emisyonlarında (%64) önemli bir azalma olacağını göstermektedir. FV+V2B Senaryosu, ilk yatırım maliyetleri, enerji tasarrufları ve karbon ayak izinin azaltılması arasında optimum dengeyi kurarak tercih edilen seçenek olarak belirlenmiştir.

Tian ve ark. (2024), Araçtan Şebekeye (V2G) ve güç kaynağı koordineli optimizasyon kontrolünün, elektrikli araçların, güç kaynaklarının ve karbon emisyonlarının dinamik özelliklerini dikkate alarak; güç sistemlerinin karbon emisyonu azaltma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Bir şehirden alınan gerçek yük verileri kullanılarak yapılan bir örnek olay çalışması, V2G'nin ve güç kaynağı koordineli optimizasyon kontrolünün; karbon azaltımı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Sonuçlar, 2035 yılına kadar zirve-vadi düzenlemesinin (elektrikli araçların %100 katılımı senaryosu) 138.783.799 ton karbon azaltımı ile toplam %1,101 azaltım oranına karşılık geleceğini ve pik tıraşlama-vadi doldurma regülasyon gücünün 1.211.000 MW'a ulaşacağını göstermektedir.

Sagaria ve ark. (2024), İspanya'nın 2030 ve 2050 enerji hedeflerine ulaşmayı amaçlayan, enerji depolama için elektrikli araç bataryalarının kullanılmasında Araçtan Şebekeye (V2G) teknolojisinin potansiyelini araştırmıştır. Doğrulan Simulink modeline göre, birincil enerji depolama olarak 2030'da 3,15 milyon EA ve 2050'de 22,7 milyon EA kullanılacağı belirtilmiştir. Detaylı analiz, yenilenebilir enerji tesislerinin yüksek yaygınlığını desteklemek için 3,15 milyon EA tarafından sağlanan depolamanın 2030'da 122 GW'lık enerji depolama kurulumunun ve 22,7 milyon EA'nın 2050'de 2,7 TW enerji depolama ihtiyacının yerini alabileceğini göstermektedir. Analiz, EA'ların yüksek depolama kapasitesini ve birincil ESS (enerji depolama sistemi) olarak potansiyelini ortaya çıkarmakta ve şebeke desteğinde V2G teknolojisini etkinliğini vurgulamaktadır. Genel sonuçlar,

gelecekte ek enerji depolama altyapısına duyulan ihtiyacın en aza indirilmesinde V2G teknolojisinin rolünün altını çizmektedir.

Elektrikli araçların daha geniş kabul görmesini sağlamak için, V2H ve V2G uygulamaları da dâhil olmak üzere “araçtan her şeye” (V2X) teknolojisi giderek önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, araç sahiplerinin yaygın bir endişesi, V2X dağıtımlarıyla ilişkili akü yaşlanmasının potansiyel olarak hızlanmasıyla ilgilidir.

Gong ve ark. (2024) yaptıkları bir çalışmada, çeşitli şarj stratejileri yaklaşımı ile EA bataryasının bozulmasını ölçmek için sistematik bir yaklaşım sunulmuştur. Sürüş ve V2X uygulamalarının özelliklerini yansıtan tasarlanmış koşullar altında batarya yaşlanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, V2X uygulamaları ile batarya bozulması arasındaki karmaşık ilişkileri araştırmak için kapsamlı bir parametre çalışması yürütülmüştür. DeneySEL sonuçlar, 20 ayın sonunda tüm V2X ve %3,09 SOH referans senaryoları arasındaki yaşlanma yayılımının, literatürde bildirilen aynı koşullar altında hücreden hücreye üretim varyasyonunun neden olduğu yayılmadan daha düşük olduğunu göstermektedir. Parametre çalışmasının sonuçları, birincil mobilite beklentilerine ek olarak V2X uygulamalarının benimsenmesinin, batarya bozulmasını önemli ölçüde artırmadığını ve hatta uygun şekilde yapılandırıldığı takdirde geleneksel kontrolsüz şarj stratejisiyle karşılaştırıldığında kapasite kaybını azaltabildiğini ortaya koymaktadır.

Philip ve ark. (2023) yaptığı araştırmada, 500 Avustralyalı tüketiciden oluşan temsili bir örneklemin elektrikli araçlara yönelik belirtilen tercihlerini inceleyerek, benzer pazarlardaki politika yapıcılarının EA alımını potansiyel olarak nasıl hızlandırabilecekleri konusunda karma bir model analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen özellikler arasında; satın alma fiyatı, sürüş menzili, hızlı şarj süresi, halka açık hızlı şarj cihazının kullanılabilirliği, mali teşvikler ve araçtan şebekeye (V2G) sistemi bulunmaktadır. Satın alma fiyatı, sürüş menzili, hızlı şarj süresi, halka açık hızlı şarj cihazının kullanılabilirliği ve enerji faturası indirimleri şeklindeki mali teşviklerin, elektrikli araç satın alma seçimini etkileyen önemli faktörler olduğu görülmüştür. Ayrıca, genç tüketicilerin elektrikli araç satın alma olasılıklarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı Dağıtılmış Enerji Kaynakları ile çalışan Elektrikli Araçların (EA'lar) payının artırılması, iklim nötrlüğüne yönelik önemli bir adımdır. Bu yaklaşım, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmanın yanı sıra, sera gazı emisyonlarını düşürerek sürdürülebilir enerji sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlayabilir. Ancak, bu dönüşümün beraberinde getirdiği zorluklar da göz önünde bulundurulmalıdır. EA'ların ve Fotovoltaik sistemlerin yaygınlaştırılması, enerji arzında önemli değişikliklere neden olabilir. Bu, şebekelerin güç arzı ve talebinin sürekli dengesini korumasını zorlaştırabilir ve istikrarı tehdit edebilir. Özellikle, FV panellerinin enerji üretimindeki dalgalanmalar ve elektrikli araçların şebekeye geri besleme yapması, beklenmedik güç dalgalanmalarına yol açabilir. Bu da şebeke güvenliği ve kararlılığına zarar verebilir.

Abdalla ve arkadaşlarının (2023) yaptığı bir çalışmada, FV öz tüketimini artırmak ve ev elektrik maliyetlerini azaltmak için çift katmanlı bir ev enerji yönetimi stratejisi önerilmektedir. Ev aletlerinin, enerji depolama sistemlerinin ve EA teknolojisinin FV öz tüketimini artırmadaki rolünü araştırmak için altı farklı senaryo simüle edilmiştir. Sonuçlar, önerilen stratejinin, farklı senaryolara bağlı olarak öz tüketimi artırabileceğini ve şebeke tüketimini sırasıyla %17-41 ve %27-78 oranında azaltabileceğini göstermektedir.

Secchi ve ekibinin (2023) yaptığı çalışmada, mevcut FV gücünün, EA şarj değişiminin veya araçtan şebekeye (V2G) sisteminin daha etkin kullanılmasıyla genel net yük değişimini azaltmak için, akıllı EA şarjına yönelik bir optimizasyon algoritması önerilmiştir. Şebeke düzeyinde yapılan simülasyonların sonuçları, önerilen yaklaşımın, herhangi bir tahmin hatası olmaması durumunda net yük varyansını %60'a kadar ve kalıcı tahmin modeli kullanıldığında yaklaşık %50 oranında azaltabileceğini göstermektedir. Ek olarak, V2G politikası, gerilim dalgalanmalarının aralığını ve hat üzerindeki aşırı yüklenme riskini önemli ölçüde azaltmaktadır.

2.4.2. Elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistem modellemesi

Çalışmamızda, İzmir kenti için çatı üstü fotovoltaik sistemler ve elektrikli araçlarla entegrasyonunu içeren üç senaryo üzerinden emisyon azaltımı ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar, 2030 yılına yönelik öngörülen maliyet projeksiyonlarına dayanarak oluşturulmuştur:

1. 2030 “Yalnızca FV” Senaryosu: Bu senaryo, yalnızca FV sistemlerini içermektedir. Elektrikli araçlar dahil edilmeden, İzmir kenti için 2030 yılına ait FV maliyet öngörülleri baz alınarak FV sistemlerinin etkisi analiz edilmiştir.
2. 2030 “FV + EA (%4,4)” Senaryosu: İzmir’de 2030 yılında toplam motorlu kara taşıtlarının %4,4’ünün elektrikli araçlardan oluşacağı öngörüsüyle, FV sistemlerinin elektrikli araçlarla entegre edildiği bir senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoda, hem FV sistemlerinin hem de elektrikli araç altyapısının 2030 yılı maliyet projeksiyonları değerlendirilmiş ve bu entegrasyonun sağlayacağı emisyon azaltımı ve maliyet analiz edilmiştir.
3. 2030 “FV + EA (%100)” Senaryosu: İzmir kentindeki tüm motorlu kara taşıtlarının 2030 yılında elektrikli araçlara dönüştüğü varsayımıyla oluşturulmuştur. Bu senaryo, %100 EA kullanımının FV sistemleriyle birlikte maliyet ve emisyon azaltımına olan katkısını incelemektedir.

Her üç senaryoda da, FV ve EA sistemlerinin 2030 yılı maliyet öngörülleri dikkate alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş, böylece farklı düzeylerde EA penetrasyonu ile FV sistemlerinin entegrasyonunun etkileri analiz edilmiştir.



Şekil 2.26. 2030 yılı sistem senaryoları.

2.5. Sistem Modellemesinde Kullanılan Analiz Parametreleri

2.5.1. Giriş parametreleri

Elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistemlerin tasarım ve performans analizi sırasında, çeşitli girdi parametreleri kritik rol oynar. Bu parametreler, sistemin verimliliğini ve performansını optimize etmek için önemlidir.

2.5.1.1. Işınım şiddeti

Fotovoltaik sistemlerin performansını belirleyen temel faktörlerden biri, ışıınım şiddetidir. Bu parametre, belirli bir yüzeye düşen güneş enerjisi miktarını temsil eder ve genellikle watt/metrekare (W/m^2) birimi ile ölçülür. Güneş ışıınımı yoğunluğu, gün boyunca ve yılın farklı dönemlerinde değişkenlik gösterir. Fotovoltaik sistemlerin tasarım sürecinde, yerel ışıınım verileri kullanılarak yıllık enerji üretimi projeksiyonları yapılır. Işıınım verileri, meteoroloji istasyonlarından veya yerel ölçüm cihazlarından elde edilir ve bu veriler simülasyon yazılımlarına girilerek sistemin enerji üretim kapasitesi hesaplanır. Yüksek ışıınım değerleri, fotovoltaik modüllerin daha fazla enerji üretmesini sağlar, bu nedenle doğru ışıınım verileri, sistem performansının optimize edilmesinde büyük öneme sahiptir (Arslanoğlu ve Abdulvahap, 2021).

2.5.1.2. İdeal modül açısı

Fotovoltaik modüllerin maksimum güneş ışığını absorbe edebilmesi için yerleştirildikleri açığı ifade eder. Bu açı, modüllerin bulunduğu coğrafi konum ve yılın belirli zamanlarına göre değişir. Genellikle, panel açısı yerel enleme eşit veya yakın bir değerde ayarlanır. İdeal açı, modüllerin güneş ışığını en verimli şekilde almasını sağlayarak enerji üretimini maksimize eder. Modüllerin açısının doğru ayarlanması, özellikle sabit montajlı sistemlerde büyük önem taşır. Mevsimsel olarak ayarlanabilen sistemlerde, yıl boyunca farklı açılar kullanılarak enerji üretimi optimize edilebilir (Franklin, 2017).

2.5.1.3. Panel verimliliği

Fotovoltaik modüllerin aldığı güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesini ifade eder. Bu verimlilik, tercih edilen malzeme ve teknolojiye göre farklılık göstermektedir. Monokristal silikon modüller genellikle daha yüksek verimlilik sağlarken, polikristal ve ince film modüller farklı verimlilik değerlerine sahiptir. Verimlilik, modülün yüzey alanı başına ürettiği enerji miktarını belirler ve daha yüksek verimlilik, aynı yüzey alanından daha fazla enerji üretimi anlamına gelir. Modül verimliliği, fotovoltaik sistemlerin toplam enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen bir faktör olduğundan, sistem tasarımında dikkatle değerlendirilmelidir (Karakaya ve Şen, 2019).

2.5.1.4. Degradasyon oranı

Fotovoltaik modüllerin zamanla performans kaybını ifade eder. Modüller, yıllar içinde çeşitli çevresel etkenler nedeniyle yavaş yavaş verimliliklerini kaybederler. Degradasyon oranı, genellikle yıllık bazda yüzde olarak belirtilir. Örneğin, %0,5 yıllık degradasyon oranı, modül verimliliğinin her yıl %0,5 oranında azalacağı anlamına gelir. Yüksek degradasyon oranları, sistemin ömrü boyunca toplam enerji üretimini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, sistem tasarımında ve yatırım analizlerinde degradasyon oranının doğru bir şekilde hesaplanması önemlidir (Jordan and Kurtz, 2013).

2.5.1.5. Kablo kayıpları

Fotovoltaik sistemlerde üretilen elektriğin kablolar aracılığıyla taşınırken yaşadığı enerji kayıplarını ifade eder. Elektrik, kablolar üzerinden geçerken direnç nedeniyle bir miktar enerji kaybeder. Bu kayıplar, kabloların uzunluğu, çapı ve malzemesi gibi faktörlere bağlıdır. Kablo kayıplarının minimize edilmesi için, uygun kablo boyutları ve malzemeleri seçilmelidir. Düşük dirençli kablolar kullanılarak ve kablo yolları optimize edilerek bu kayıplar azaltılabilir.

2.5.1.6. Uyumsuzluk kayıpları

Fotovoltaik sistemlerdeki farklı modüllerin performans uyumsuzluklarından kaynaklanan enerji kayıplarını ifade eder. Modüllerin farklı üretim toleransları, gölgelenme, kirlilik veya diğer çevresel faktörler nedeniyle her modülün aynı verimlilikte çalışmaması durumunda ortaya çıkar. Bu kayıplar, sistemin toplam enerji üretimini olumsuz etkiler. Uyumsuzluk kayıplarının minimize edilmesi için, benzer performans özelliklerine sahip modüllerin bir araya getirilmesi ve dizilimlerin dikkatle yapılması önemlidir. Ayrıca, mikro eviriciler veya güç optimizasyon cihazları kullanılarak bu kayıplar azaltılabilir (Boztepe, 2017).

2.5.1.7. Tozlanma faktörü

Fotovoltaik modüllerin yüzeyinde biriken toz ve kirlerin neden olduğu enerji üretim kayıplarını ifade eder. Toz ve kir, güneş ışığının modüllere ulaşmasını engelleyerek verimliliği düşürür. Tozlanma etkisi, modüllerin yer aldığı bölgenin coğrafi özelliklerine ve çevresel koşullara göre farklılık gösterir. Tozlu ve kirli bölgelerde, modüllerin düzenli olarak temizlenmesi gereklidir. Temizlik sıklığı ve yöntemleri, tozlanmanın etkilerini minimize etmek için önemlidir. Tozlanma, fotovoltaik sistemlerin performansını doğrudan etkileyen bir unsurdur ve düzenli bakım ve temizlik işlemleriyle bu etki azaltılabilir.

2.5.1.8. Gölgeleme faktörü

Fotovoltaik modüllerin üzerine düşen gölgelerin neden olduğu enerji üretim kayıplarını ifade eder. Gölgeleme, modüllerin verimliliğini ciddi şekilde düşürebilir ve toplam enerji üretimini olumsuz etkileyebilir. Gölgeleme etkisi, modüllerin yerleştirildiği konum ve çevresel unsurlara bağlı olarak değişir. Ağaçlar, binalar veya diğer yapılar, modüllerin üzerine gölge düşmesine neden olabilir. Gölgelemenin minimize edilmesi için, modüllerin doğru bir şekilde yerleştirilmesi ve çevresel faktörlerin dikkate alınması önemlidir (Adak vd., 2019).

2.5.2. Çıkış parametreleri

Bu bölümde, enerji sistemlerinin değerlendirilmesi ve optimizasyonu için önemli olan temel çıkış parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler, sistemin üretim kapasitesini, verimliliğini ve performansını belirlemeye yönelik bilgiler sağlamaktadır. Alt başlıklar halinde sunulan nihai hasat, referans hasat, sistem verimliliği, kapasite faktörü ve performans oranı gibi parametreler, enerji üretim projelerinin analizinde ve iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

2.5.2.1. Nihai hasat

Fotovoltaik sistemlerin belirli bir zaman diliminde ürettiği toplam elektrik enerjisinin FV sistemin toplam anma gücüne oranı olarak ifade edilir. Fotovoltaik sistemlerin tasarımında ve değerlendirilmesinde, nihai hasat verileri kullanılarak sistemin enerji üretim potansiyeli ve ekonomik getirileri analiz edilir (Sharma and Chandel, 2013).

$$Y_F = E / P_{PV,anma} \quad (4)$$

2.5.2.2. Referans hasat

Referans hasat, FV panelinin düzlemine düşen toplam ışıyım miktarının (H_t) referans ışıyım değerine (G) bölünmesiyle elde edilir (Sharma and Chandel, 2013).

Bu oran, ideal koşullar altında elde edilebilecek enerji miktarını ifade eder ve genellikle güneş ışınımının tepe saatleri olarak ifade edilir. Referans hasat, sistemin bulunduğu yerin ışınım kaynakları ve hava koşulları gibi faktörlere bağlıdır.

$$Y_R = H_t / G \quad (5)$$

2.5.2.3. Performans oranı

Performans oranı, nihai hasat ile referans hasat arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu oran, FV sisteminin gerçek çalışma koşulları altında ne kadar etkili olduğunu gösterir.

$$PR = Y_F / Y_R \quad (6)$$

2.5.2.4. Sistem verimliliği

Sistem verimliliği, FV sisteminin ürettiği toplam AC enerjinin (E_{AC}), sistemin aldığı toplam güneş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Bu verimlilik, panel verimliliği, evirici verimliliği, kablo kayıpları gibi bileşenlerin toplam etkisini yansıtır. Sistem verimliliği, sistemin genel enerji dönüşüm etkinliğini gösterir (Elamim et al., 2018).

$$\eta_{sys} = \frac{E_{AC}}{H_t \times A_a} \quad (7)$$

2.5.2.5. Kapasite faktörü

Kapasite faktörü, belirli bir dönemde üretilen toplam enerjinin, sistemin aynı dönemde tam kapasiteyle çalışması durumunda üretebileceği maksimum enerjiye oranıdır. Yıllık kapasite faktörü, sistemin yıllık enerji üretiminin, yıl boyunca tam kapasiteyle çalışması durumunda üretebileceği enerjiye bölünmesiyle hesaplanır. Bu faktör, sistemin gerçek çalışma performansını uzun vadede değerlendirir (Elamim et al., 2018).

$$CF = \frac{E_{AC}}{P_{pv,anma} \times 8760} \quad (8)$$

2.5.3. Ekonomik analiz parametreleri

Bu bölümde, enerji projelerinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi ve analiz edilmesi amacıyla kullanılan temel ekonomik analiz parametreleri ele alınmıştır. Bu parametreler, bir projenin finansal verimliliğini, maliyet etkinliğini ve yatırım getirisi potansiyelini belirlemek için önemli bilgiler sunmaktadır.

2.5.1.1. Gelirler

Fotovoltaik sistemlerin ekonomik analizinde en önemli parametrelerden biridir. Bu gelirler, üretilen elektrik enerjisinin satışı veya tüketimi ile elde edilen finansal kazançları ifade eder. FV sistemler, ürettikleri elektrik enerjisini şebekeye satabilir veya kendi tüketimleri için kullanabilirler. Üretilen elektriğin satışından elde edilen gelirler, sistemin ekonomik sürdürülebilirliğini sağlar ve yatırımın geri dönüşünü hızlandırır. Ayrıca, elektrik maliyetlerinden tasarruf edilmesi de gelir olarak değerlendirilir.

2.5.1.2. İlk yatırım maliyeti

Fotovoltaik sistemlerin kurulumunda yapılan başlangıç harcamalarını ifade eder. Bu maliyetler, FV paneller, eviriciler, montaj yapıları, kablolar ve diğer bileşenlerin satın alınması ve kurulumu için yapılan harcamaları içerir. Ayrıca, mühendislik, izinler ve diğer yasal masraflar da ilk yatırım maliyetine dahildir. İlk yatırım maliyeti, sistemin ekonomik analizinde önemli bir parametredir çünkü bu maliyetler, yatırımın geri dönüş süresini ve genel ekonomik performansını etkilemektedir.

2.5.1.3. Bakım ve onarım masrafları

Fotovoltaik sistemlerin işletme ömrü boyunca düzenli olarak yapılan harcamaları kapsar. Bu masraflar, sistemin performansını ve verimliliğini korumak

için gereklidir. Bakım masrafları, düzenli temizlik, modül ve evirici kontrolleri, kablo bağlantılarının kontrolü gibi rutin işlemleri içerir. Onarım masrafları ise sistemde oluşan arızaların giderilmesi için yapılan harcamaları kapsar. Bu masrafların doğru bir şekilde tahmin edilmesi, sistemin uzun vadeli ekonomik performansını değerlendirmek için önemlidir.

2.5.1.4. Sistem kullanım bedeli

Fotovoltaik sistemlerin işletimi sırasında kullanılan enerji ve hizmetler için yapılan masrafları ifade eder. Bu bedeller, şebekeye bağlantı ücretleri, veri izleme ve yönetim hizmetleri gibi maliyetleri içerir.

2.5.1.5. Amortisman değeri

Fotovoltaik sistemlerin işletme ömrü boyunca değer kaybını ifade eder. Amortisman, sistem bileşenlerinin zamanla yıpranması ve eskiyerek değer kaybetmesi nedeniyle hesaplanır. Bu değer, sistemin mali tablosunda gider olarak gösterilir ve vergi avantajı sağlamaktadır. Amortisman hesaplaması, sistemin ekonomik analizinde önemli bir rol oynar çünkü bu değer, yıllık maliyetleri ve net gelirleri etkiler (TURMOB, 2022).

2.5.1.6. Sigorta ücreti

Fotovoltaik sistemlerin çeşitli risklere karşı korunması için ödenen primleri ifade etmektedir. Bu riskler arasında doğal afetler, hırsızlık, yangın ve diğer olası zararlar bulunmaktadır.

2.5.1.7. Banka faiz tutarı

Fotovoltaik sistemlerin finansmanı amacıyla alınan kredilerin faiz ödemelerini tanımlar. Yatırımcılar, sistemin kurulum maliyetlerini karşılamak için bankalardan kredi alabilirler. Bu kredilerin geri ödenmesi sırasında ödenen faiz tutarı, sistemin toplam maliyetini artırır ve yatırımın geri dönüş süresini etkilemektedir.

2.5.1.8. Gelir vergisi

Fotovoltaik sistemlerin ürettiği elektrik enerjisinden elde edilen gelirler üzerinden ödenen vergileri ifade eder. Gelir vergisi, sistemin net gelirlerini etkiler ve ekonomik analizde göz önünde bulundurulması gereken kritik bir parametredir.

2.5.4. Analiz yöntemleri

Bu yöntemler, net bugünkü değer (NPV), iç verim oranı (IRR), seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) ve geri ödeme süresi gibi kriterleri içerir.

2.5.4.1. Net bugünkü değer yöntemi (NPV)

NPV, bir yatırımın gelecekteki nakit akışlarının bugünkü değerine indirgenmiş toplamını ifade eden bir finansal değerlendirme yöntemidir. NPV, bir projenin veya yatırımın zaman içinde yaratacağı gelirlerin, bugünkü maliyetlere göre değerini hesaplar ve yatırımın karlılığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Pozitif NPV, yatırımın karlı olduğunu, negatif NPV ise zarar edeceğini göstermektedir (CFI, 2024).

$$NPV = \sum_{y=1}^Y \frac{C_y}{(1+r)^t} - C_o \quad (9)$$

2.5.4.2. İç karlılık oranı (IRR)

IRR, bir yatırımın beklenen nakit akışlarının bugünkü değerini sıfıra indirgeyen iskonto oranıdır. Başka bir deyişle, IRR, bir yatırımın net bugünkü değerini sıfıra eşitleyen faiz oranıdır. IRR, yatırım projelerinin karlılığını değerlendirmede yaygın olarak kullanılan bir finansal metriktir (Demir, 2024).

$$IRR = \sum_{y=1}^y \frac{C_y}{(1+IRR)^y} - C_o \quad (10)$$

2.5.4.3. Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE)

LCOE, bir enerji üretim tesisinin ömrü boyunca üretilecek enerjinin birim maliyetini hesaplayan bir ölçüttür. LCOE, toplam yaşam döngüsü maliyetlerini ve toplam enerji üretimini dikkate alarak, projenin ekonomik performansını öngörmeyi sağlamaktadır (Öznazik, 2022).

$$LCOE = \sum_{y=1}^y \frac{I_y + M_y + F_y}{(1 + r)^y} \div \sum_{y=1}^y \frac{E_y}{(1 + r)^t} \quad (11)$$

2.5.4.4. Geri ödeme süresi

Geri ödeme süresi, bir fotovoltaik sisteminin yatırım maliyetlerinin, sistem tarafından üretilen enerji tasarrufları ve gelirler aracılığıyla geri kazanıldığı süreyi ifade etmektedir. Bu süre, yatırımın ne kadar sürede geri döneceğini ve sistemin ekonomik olarak karlı hale geleceğini gösterir. Geri ödeme süresi hesaplanırken, FV sisteminin kurulum maliyeti (paneller, eviriciler, montaj vb.), yıllık enerji üretimi ve enerji fiyatı dikkate alınır. Yıllık enerji üretimi, sistemin bulunduğu yerin güneş ışınım değerleri ve sistem verimliliği ile hesaplanır. Bu hesaplama, yatırımın ne kadarlık bir sürede kendini amorti edeceğini belirlemektedir (Yalılı, 2021).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Metodoloji

Elektrikli araçların sonuçlara olan etkisi ve 2030 yılındaki tahmini değerlerin günümüzdeki koşullar ile değerlendirmesini yapabilmek amacıyla; 2030 yılında “Yalnızca FV” sistem, FV+EA (%4,4) ve FV+EA (%100) sistemleri için teknik ve ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.

İzmir kenti için fotovoltaik (FV) ve elektrikli araç (EA) modellemesi sürecinde ilk adım, çatı alanlarının hesaplanmasıdır. Bu hesaplama ile kentteki çatılara uygulanabilecek potansiyel güç kapasitesi ortaya konmuştur. Modül ve evirici gibi sistem bileşenleri dikkatle seçilir. Seçilen cihazların verimlilikleri, oluşabilecek gölgeleme etkileri, cihaz ve kablo kayıpları detaylı olarak hesaplanır. Tüm bu parametreler analiz yazılımına girilerek potansiyel elektrik üretimi hesaplanır. Kurulum maliyeti, işletme maliyeti ve finansal parametreler belirlenir. Bu bilgiler doğrultusunda NPV, LCOE ve geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Bu analizler, sistemin ekonomik fizibilitesini ve yatırımın geri dönüş süresini belirlemek için kritik öneme sahiptir.

3.1.1. Çatı alanı tahmini

Kentsel çatı alanlarının değerlendirilmesi, şehir düzeyinde fotovoltaik potansiyelin belirlenmesinde kritik bir aşamadır. Bu amaçla üç farklı yöntem kullanılmaktadır; yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya ve hibrit yöntemler. Her yöntemin kendi içinde barındırdığı avantajlar ve dezavantajlar mevcut olup, şehirlerin çeşitli koşullarına bağlı olarak en uygun değerlendirme yaklaşımı seçilebilir. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) aracılığıyla arazi kullanımı ve farklı bina türleri gibi mekânsal verilerden yararlanır; ayrıca, binaların ayak izini tahmin etmek için uzay ve uydu görüntüleme teknolojileri ile görüntü işleme tekniklerinden faydalanır. Aşağıdan yukarıya yöntem ise, münferit binaların saha ölçümlerine dayanan daha küçük ölçekli bir analizle başlar ve bu veriler, şehir genelindeki FV potansiyelini tahmin etmek amacıyla genişletilir. Hibrit yaklaşım, bu iki yöntemin bir kombinasyonudur; belirli örnek binalar

seçilerek detaylı ölçümler yapılır ve ardından bu veriler yukarıdan aşağıya analiz teknikleri ile bütünleştirilerek kentsel alanın geneli için FV potansiyeli tahmin edilir (Liu et al., 2022).

Teknik FV potansiyeli hesaplamaları, uygun alan oranı, modül verimliliği ve modül alanı gibi varsayımlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yaptığımız araştırmalarda, İzmir kenti için resmi ve spesifik bir çalışmaya rastlanmaması nedeniyle, çeşitli yöntemler denenmiş ve en tutarlı sonuçların görüntü işleme teknolojileri kullanılarak elde edilebileceği belirlenmiştir.

Bu kapsamda, İzmir'in çatı alanı potansiyeli, QGIS (Quantum Coğrafi Bilgi Sistemi) coğrafi bilgi sistem yazılımı kullanılarak yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin analiz edilmesi suretiyle hesaplanmıştır (Şekil 3.1). Bu yaklaşım, fotovoltaik sistemler için potansiyel kurulum alanlarının doğru ve verimli bir şekilde belirlenmesine imkân sağlar.



Şekil 3.1. 2024 yılı İzmir kentine ait MsBuilding bina verileri (Microsoft, 2024).

QGIS, kullanıcıların haritalardan veri oluşturmaya, yönetmesine ve analiz etmesine olanak tanıyan, ücretsiz ve açık kaynaklı bir coğrafi bilgi sistemi

yazılımıdır. Bu çalışmada, “Microsoft Building Footprints” veri seti kullanılarak İzmir kentindeki tüm çatılar belirlenmiştir (Şekil 3.2). Microsoft'un ücretsiz olarak erişilebilen bu veri seti, yeryüzünün yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin düzenli aralıklarla derin sinir ağı yöntemleriyle taranması sonucunda tespit edilen çatı koordinatlarını içermektedir (Microsoft, 2024). Bu yöntem, fotovoltaik sistemler için potansiyel kurulum alanlarını tespit etmek amacıyla oldukça etkili bir araçtır.

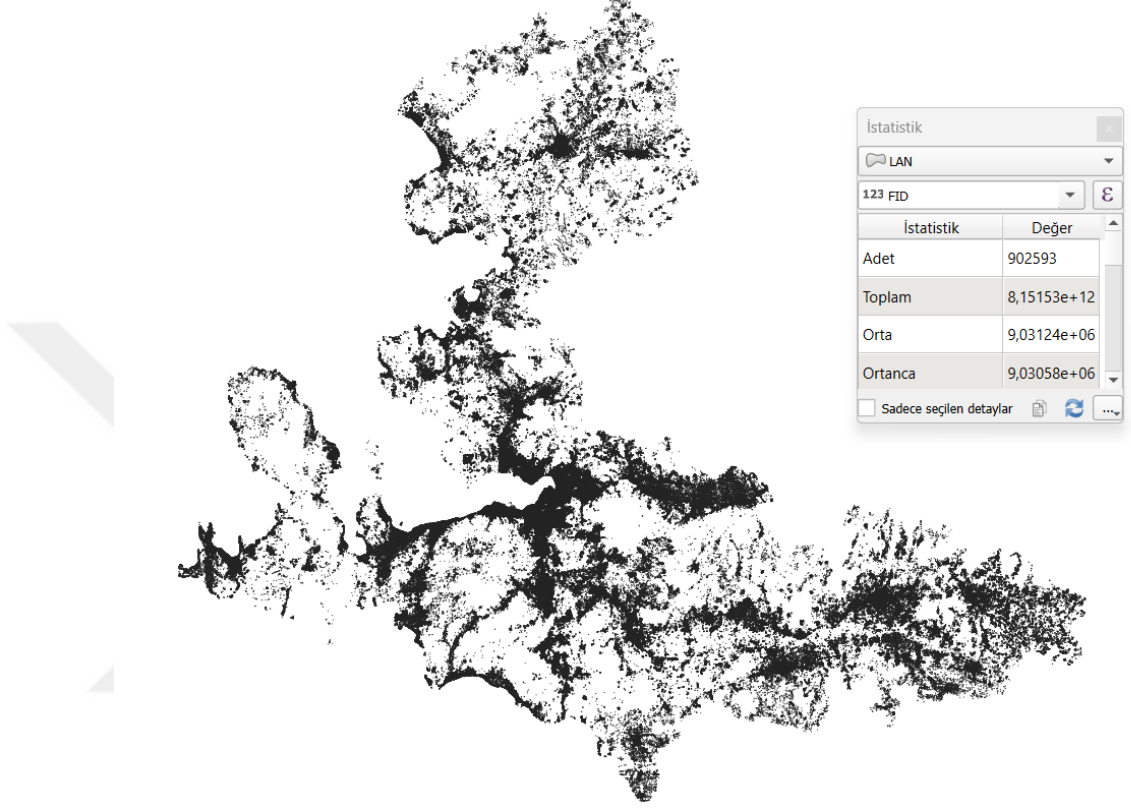


Şekil 3.2. 2024 yılı İzmir kenti MsBuilding bina çatı alanı verileri (Microsoft, 2024).

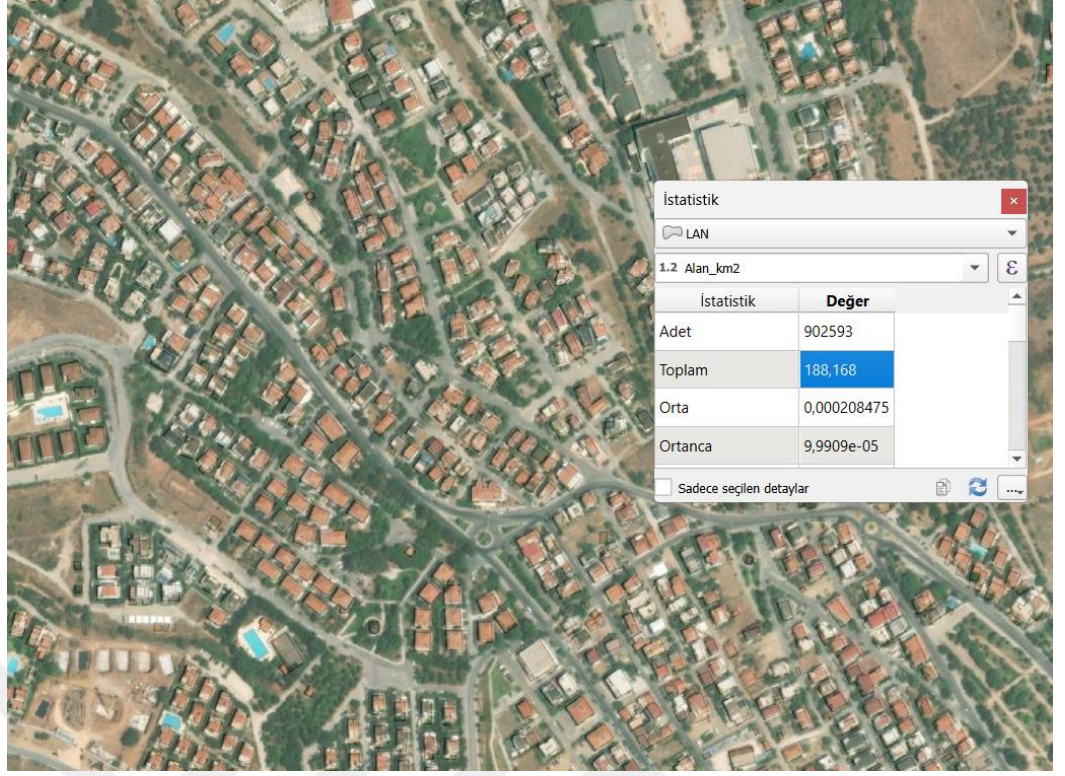
Alan hesaplamalarının yapılabilmesi amacıyla, “Microsoft Building Footprints” veri seti, QGIS yazılımında GeoJSON formatından Shapefile formatına dönüştürülmüştür. Türkiye'nin il sınırlarına ait veri, Millî Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü tarafından ücretsiz olarak sağlanan "Türkiye Mülki İdare Sınırları" Shapefile formatındaki veri kullanılarak QGIS yazılımında katman olarak eklenmiş ve sadece İzmir sınırları içerisindeki çatılar belirlenmiştir.

"Objeleri Seç" komutu kullanılarak, İzmir il sınırları içerisindeki bina verisi ayrılmış ve ayrı bir Shapefile dosyası olarak kaydedilmiştir. Microsoft Building

Footprints verilerine göre, İzmir kenti için bina sayısı 902.593 adet olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.3). Bu sayede, fotovoltaik sistemler için potansiyel kurulum alanlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi süreci daha doğru ve verimli bir şekilde yürütülebilmektedir.



Şekil 3.3. QGIS yazılımı ile 2024 yılı İzmir kenti bina sayısının bulunması.



Şekil 3.4. QGIS yazılımı ile 2024 yılı İzmir kenti çatı alan toplamının bulunması.

Türkiye bölgesinde alanların doğruya yakın hesaplanabilmesi için projeksiyon sistemi olarak “WGS 84 / Pseudo Mercator EPSG: 3857” koordinat sistemi kullanılmıştır.

Öznetelik tablosunda "Alan_m2" sütunu oluşturularak İzmir kentindeki bina çatı alanları hesaplanmıştır. Hesaplanan alanlar, yeni bir sütunda kilometrekareye çevrilerek "İstatistik Özet Tablosu" oluşturulmuştur. “Microsoft Building Footprints” verilerine göre, İzmir kentinin toplam çatı alanı 188 km² olarak belirlenmiştir (Şekil 3.4).

İzmir kentinin toplam çatı alanı belirlenmiş olup, bu alanın fotovoltaik sistemler için uygunluğunu değerlendirmek amacıyla daha detaylı analizler yapılması gerekmektedir. Gölgeleme faktörleri, çatılarda bulunan HVAC (havalandırma, klima ve ısıtma) ekipmanları, antenler ve diğer yapısal unsurlar gibi engeller kullanılabilir çatı alanı kapasitesini düşürmektedir. Ayrıca, eski binaların yapısal bütünlüğü ve çatı kapasiteleri, ek ağırlık oluşturacak fotovoltaik sistem kurulumlarına izin vermeyebilir.

Kullanılabilir çatı alanının belirlenmesi için, güneş ışınlamı analizi ve gölgeleme simülasyonları yapılarak, her bir çatının yıl boyunca alacağı güneş ışınlamı miktarı hesaplanmalıdır. Bu sayede, yalnızca güneş enerjisinden maksimum verim alınabilecek alanlar kullanılabilir çatı alanı olarak değerlendirilecektir.

Tüm bu faktörler dikkate alındığında, İzmir kentinde fotovoltaik sistemlerin kurulabileceği toplam efektif çatı alanının hesaplanmasının zorluğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli çalışmalar bu konuda araştırmalar yapmış ve belirli varsayımlar oluşturmuştur.

EMBER tarafından (2023) Türkiye'deki çatıların fotovoltaik sistemler için uygunluğunun araştırıldığı bir çalışmada, uydu görüntülerinin analizinin yapılabilmesi için Google Earth Engine (GEE) yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada, çatılar; baca, anten, güneş kolektörü ve FV paneli gibi çatı üstü donatılar ile örtü altı yetiştiriciliği yapılan sera çatıları göz önünde bulundurularak uygunluklarına göre sınıflandırılmıştır. Bu bağlamda, düz ve eğimli çatıların toplam uygun alanı 772 milyon m² olarak belirlenmiş olup, bu değer toplam çatı alanının %27,6'sını temsil etmektedir. İzmir özelinde ise çatı uygunluk oranı %31,5 olarak tespit edilmiştir. 2021 ve 2022 yıllarına ait Türkiye'de tamamlanmış çeşitli çatı GES (Güneş Enerjisi Santrali) projelerinin uydu görüntüleri analiz edildiğinde, 1 kW'lık çatı GES kapasitesinin ortalama 6,3 m²'lik bir alan kapladığı belirlenmiştir. Farklı kaynakların incelenmesi sonucunda, hesaplamalarda daha temkinli bir yaklaşım benimsenmiş ve 1 kW'lık FV panelin 6,4 m²'lik bir alan kaplayacağı varsayılmıştır.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2020) tarafından yapılan benzer bir çalışmaya göre, Türkiye'deki konut binalarının çoğunluğunun kırma çatıya sahip olduğu varsayımıyla, çatı üstü fotovoltaik sistemler için uygun minimum çatı alanı, tüm bina tiplerinde toplam çatı alanının %25'i olarak belirlenmiştir. Alışveriş merkezleri gibi daha yeni yapılar için ise çatı alanının %50'sinin kullanılabilir olduğu öngörülmüş; diğer tüm binalarda ise yeni ve eski yapıların karışımına bağlı olarak çatı alanının %66'sı kullanılabilir olarak kabul edilmiştir. Çatı üstü FV sistemlerde kW başına gereken toplam alan 7 m² olarak hesaplanmıştır (EMO, 2019).

Fotovoltaik sistemler için kullanılabilir çatı alanı oranına ilişkin farklı şehirler için çeşitli modelleme ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Kobashi ve arkadaşlarının 2020 yılında Japonya'nın Kyoto şehrinde, Dewi ve arkadaşlarının 2023 yılında Endonezya'nın Cakarta şehrinde, Liu ve arkadaşlarının 2022 yılında Çin'in Shenzhen şehrinde, Kobashi ve arkadaşlarının 2021 yılında Japonya'nın sekiz şehrinde ve Arowolo ile Perez'in 2023 yılında Fransa'nın Paris, Lyon ve Marsilya şehirlerinde yaptığı çalışmalarda, şehirlerdeki çatı alanının %70'inin çatı üstü güneş FV kurulumu için teknik olarak uygun olduğu öngörülmüştür. 1 kW'lık bir panel için 5 m², kurulum veya gölgelendirme için kullanılan alanlar için ek 2 m² tahsis edilerek toplamda 7 m²'lik bir alana ihtiyaç olduğu tahmin edilmiştir. Dış gölgeleme kayıpları, ışınların gölgelenmesi ve ağaçlar ile binalar gibi yakındaki nesnelerden gelen dağınık olay ışınımı, yasal ve düzenleyici kısıtlamalar gibi etmenler, şehirlerdeki çatı alanlarının tümünün kullanımına izin vermemektedir. Bu faktörler, FV sistemlerin kurulumunda dikkate alınması gereken önemli sınırlamalardır.

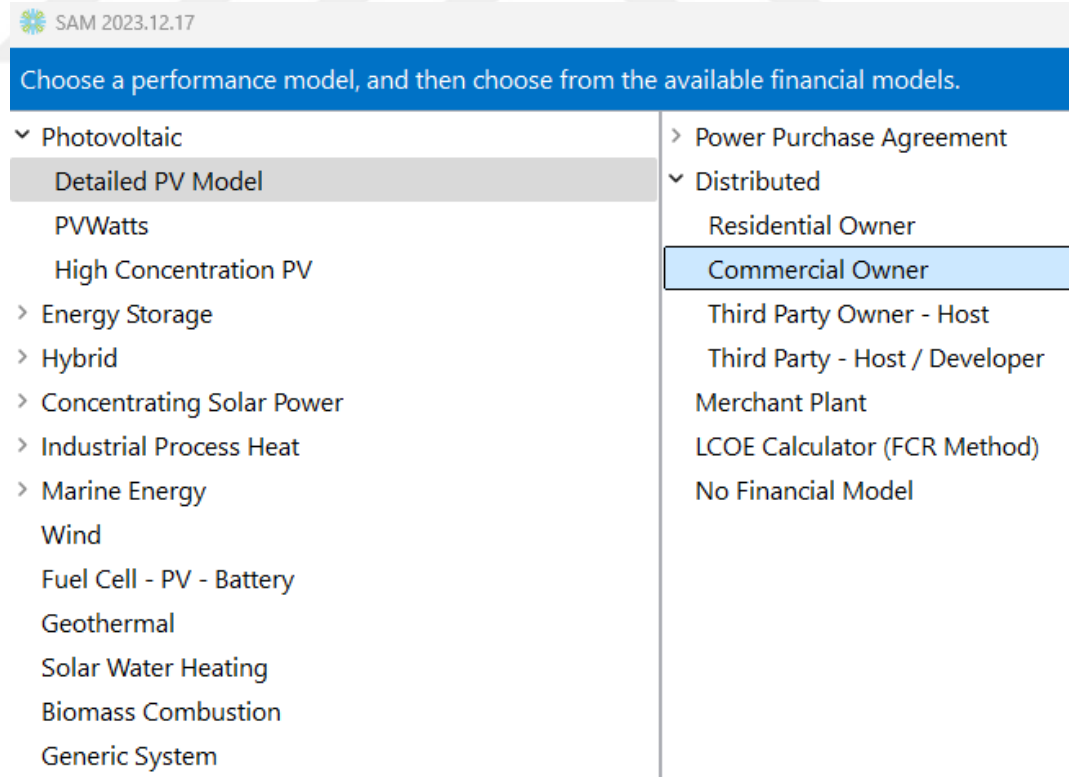
Yapılan araştırmalar neticesinde, İzmir şehri için kullanılabilir çatı alanına ilişkin resmi bir istatistiki çalışmaya rastlanmaması nedeniyle, uydu görüntülerinden rastgele seçimlerle yapılan analizler ve mevcut literatürdeki benzer çalışmalara paralel olarak İzmir şehri için öngörülerde bulunulmuştur. Bu kapsamda, gölgeleme etkileri de hesaba katılarak: İzmir'deki çatı alanlarının %35'inin fotovoltaik sistemler için uygun olduğu öngörülmüş ve 1 kW'lık bir FV panel kurulumu için 7 m²'lik bir alan gereksinimi tespit edilmiştir. Bu değerler, İzmir'deki çatı alanlarının güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmek için yapılan analizlerde kullanılmak üzere belirlenmiştir.

FV sistem kurulumuna bina cephelerinin dahil edilmemesi, potansiyel konumlar olarak otopark ve yol alanlarının dikkate alınmaması, gelecekteki FV modül teknolojilerinin daha az yer kaplayacağı ve daha yüksek verimlilik sağlayacağı göz önüne alındığında, oluşturulan varsayımın ihtiyatlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu temkinli yaklaşım, mevcut teknolojik kısıtlamalarla birlikte, gelecekteki teknolojik gelişmelerin ve alternatif kurulum alanlarının ilerleyen çalışmalarda dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir.

3.1.2. Fotovoltaik sistem tasarım parametrelerinin analizi

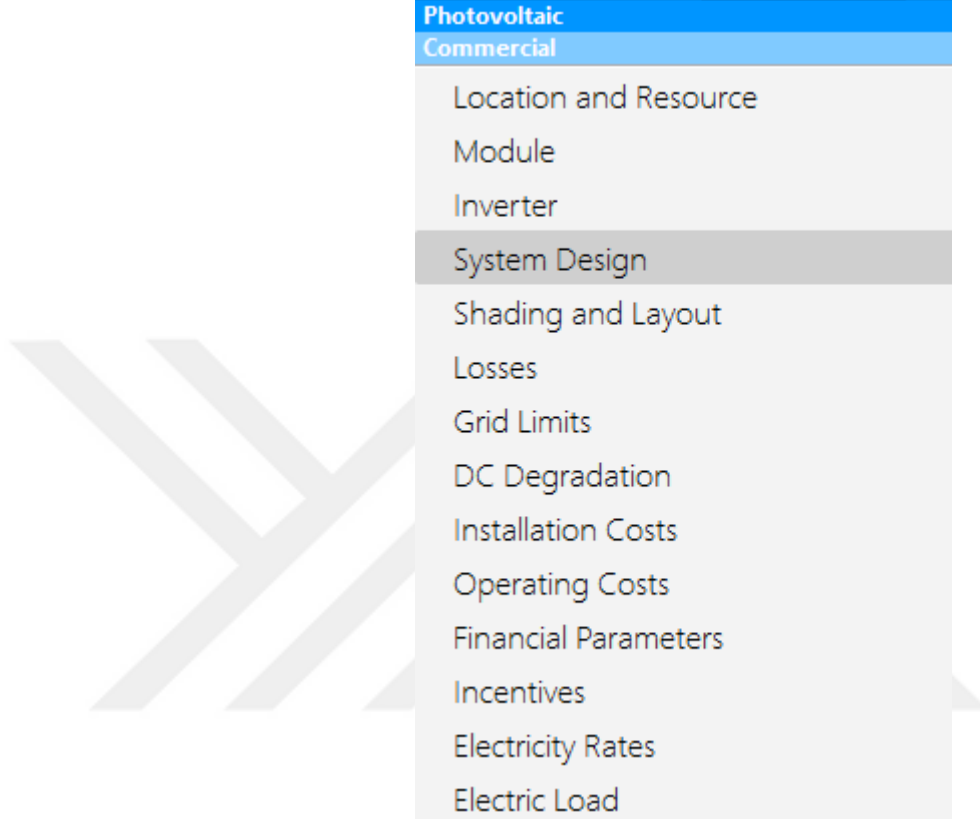
“System Advisor Model (SAM)” enerji teknolojilerinin tekno-ekonomik analizine yönelik ücretsiz bir masaüstü uygulamasıdır. Proje yöneticileri ve mühendisleri, politika analistleri, teknoloji geliştiricileri ve araştırmacılar tarafından yenilenebilir enerji projelerinin teknik, ekonomik ve finansal fizibilitesine ilişkin soruları araştırmak için kullanılır (NREL, 2024). Bu çalışmada, net şimdiki değer (NPV), yıllık enerji üretimi, geri dönüş süresi, yaşam döngüsü maliyeti (LCOE), sistem performansı ve verimliği gibi teknik parametreleri hesaplamak ve ekonomik analizler yapmak için “System Advisor Model (SAM’in 2023.12.17 güncel sürümü)” kullanılmıştır. SAM’de girdi olarak kullanılacak parametreler sırasıyla belirlenmiştir.

Fotovoltaik sistem tasarımında ilk adım olarak, konutlar, sanayi tesisleri ve ticari yapıların çatılarına kurulacak sistemlerin projelendirilmesini sağlamak amacıyla “Commercial Owner” (Ticari Yatırımcı) seçeneği kullanılmıştır.



Şekil 3.5. SAM yazılımının performans ve finansal model sayfası.

Modelleme sayfasında gerçekleştirilen adımlarda yapılan seçimler ve girilen değerler, ilgili gerekçeleriyle birlikte aşağıda ayrıntılı olarak sıralanmaktadır. Bu adımlar, fotovoltaik sistemlerin doğru ve detaylı bir şekilde incelenmesi açısından büyük önem taşır.



Şekil 3.6. SAM “ticari yatırımcı” (commercial owner) seçeneği giriş sekmeleri.

3.1.2.1. Lokasyon seçimi

İzmir ili için Ulusal Güneş Radyasyonu Veritabanı (NSRDB)’den, İzmir merkezinin enlem 38,41° ve boylam 27,14° koordinatları baz alınarak, 2022 yılına kadarki ortalamalardan oluşan bir hava durumu dosyası oluşturulmuştur. NSRDB, ABD Enerji Bakanlığı tarafından desteklenen ve Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yönetilen geniş kapsamlı bir veri tabanıdır. Bu veri tabanı, güneş ışınımı ve meteorolojik veriler sunarak güneş enerjisi projeleri için kritik bilgiler sağlar (NSRDB, 2024).

Üç farklı formatta oluşturulan dosyalardan, daha az hata payı içermesi nedeniyle "TDY" formatı tercih edilmiştir. 2030 yılı için yapılan gelecek tahminlemesi varyasyonunda ise "TMY" formatı kullanılmıştır. TMY veri setlerinin gelecekteki üretimlerinde, standart sapmanın ağırlıklandırma faktörlerinden biri olarak veya tipik bir yıl veri setinin geliştirilmesinde ek bir bileşen olarak kullanılabileceği tavsiye edilmektedir (NREL Transforming Energy, 2024).

3.1.2.2. Modül seçimi

Fotovoltaik sistem tasarımında kullanılan modül olarak, güncel teknolojiye dayalı ve 72 hücreli, 550,62 Wda gücündeki JA Solar JAM72S30-550/MR Mono-c-Si (2023) modeli tercih edilmiştir. Başlangıçta, SAM yazılımı tarafından Sunpower SPR_X21-335 Mono-c-Si modeli önerilmiştir. Ancak, günümüzde daha yüksek watt değerine sahip modüller piyasaya sürülmüş olup, bu yeni modüller daha yüksek verimlilik ve ekonomik avantajlar sunmaktadır. Bu sebeple, JA Solar'ın güncel ve verimi yüksek olan modeli tercih edilmiştir.

3.1.2.3. Evirici seçimi

Fotovoltaik sistemlerde evirici, güneş panelleri tarafından üretilen doğru akımı (d.a.) alternatif akıma (a.a.) dönüştürmek için kullanılan kritik bir bileşendir. Evirici seçimi, sistemin verimliliği, güvenilirliği ve uzun ömürlülüğünü doğrudan etkilediğinden büyük bir öneme sahiptir. Evirici olarak modellemede kullanılmak üzere SAM yazılımının önerdiği SolarEdge Technologies Ltd'nin SE6000H-US [240V] güncel modeli seçilmiştir.

3.1.2.4. Sistem tasarımı

İzmir kenti için yapılan bu çalışmada, SAM yazılımı kullanılarak 2030 yılına yönelik üç ayrı senaryo oluşturulmuştur: "Yalnızca FV Sistem", "FV+EA (%4,4)" ve "FV+EA (%100)" senaryoları. 2024 yılı için watt başına fotovoltaik sistem maliyeti hesaplanmış ve bu maliyetler 2030 yılı senaryolarıyla karşılaştırılmıştır; ancak 2024 yılına dair ayrı bir senaryo modellenmemiştir. Her bir senaryoda yıllık

elektrik üretimi, mali kazançlar ve FV sistemlerinin kullanımıyla sağlanan finansal tasarruflar analiz edilmiştir. Bu tasarruflar, FV sistemlerinin devreye girmemesi durumunda ödenecek olan elektrik ve yakıt maliyetlerine kıyasla hesaplanmıştır. Ayrıca, her senaryoda ne kadar karbon salınımının önleildiği değerlendirilmiştir.

Bu analizler sonucunda, “Yalnızca FV” sistemine dayalı senaryo ile FV+EA (%4,4) senaryosu karşılaştırılmış ve İzmir'de 2030 yılında motorlu taşıtların %4,4'ünün elektrikli araçlardan oluşmasının enerji üretimi ve mali kazanç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Diğer yandan, 2030 yılı FV+EA (%100) senaryosunda tüm motorlu taşıtların elektrikli olduğu varsayılarak yapılan analiz, elektrikli araçların sisteme sağladığı katkıyı daha geniş bir perspektifte ortaya koymuştur. Bu karşılaştırmalar sonucunda, elektrikli araçların enerji üretimi, mali kazançlar ve karbon azaltımı üzerindeki olumlu etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Fotovoltaik sistem tasarımı, güneş enerjisinin en yüksek verimlilikle elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlamak amacıyla çeşitli teknik ve mühendislik prensiplerinin uygulanmasını gerektirir. Bu süreç, bir dizi bileşenin doğru bir şekilde seçilmesi ve yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir.

İzmir kentinin toplam çatı alanı 188 km² olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre, İzmir'deki çatı alanlarının %35'inin fotovoltaik sistemler için uygun olduğu öngörülmüş ve 1 kW'lık bir FV panel kurulumu için 7 m²'lik bir alan gereksinimi tespit edilmiştir. Bu bağlamda, İzmir şehrindeki 2024 yılındaki kullanılabilir çatı alanı “65,8 km²” olarak belirlenmiş olup, kurulabilecek toplam FV gücü “9,4 GW” olarak hesaplanmıştır.

2030 yılındaki “Yalnızca FV Sistem” ve “FV+EA” senaryolarında kurulabilecek toplam FV gücü hesaplaması için, 2030 yılına kadar kullanılabilinecek çatı alanlarındaki artış, Türkiye'deki toplam bina sayısındaki artış baz alınarak hesaplanmıştır. Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) elde edilen istatistiksel değerlere göre 2010-2020 yılları arasında bina sayısındaki artış oranı %18 olmuştur. 2024-2030 yılları arasında beklenen artış oranı %10 olacaktır (Atmaca A.ve Atmaca N., 2022).

2024 yılı için bulunan değerlerin %10 artışı ile 2030 yılındaki tahmini kullanılabilir çatı alanı “72,38 km²” ve sonuç olarak kurulabilecek toplam FV gücü “10,34 GW” olarak hesaplanmıştır.

Sistem tasarımının sonraki adımı, kullanılacak FV panellerinin, eviricilerin ve diğer yardımcı ekipmanların seçilmesidir. FV panellerinin tipi (monokristalin, polikristalin, ince film), verimlilik oranları, nominal güç çıkışları ve boyutları dikkate alınarak belirlenir. Seçilen 550,62 W nominal güce sahip JA Solar JAM72S30-550/MR Mono-c-Si (2023) modelden, belirlenen “10,34 GW” FV gücü kurulabilmesi için “18.778.833” adet panel kullanılması gerektiği hesaplanmıştır.

Eviriciler, doğru akım (d.a.) gücünü alternatif akıma (a.a.) dönüştürme kapasitelerine göre seçilir. d.a./a.a. oranı, FV panel grubunun maksimum çıkış güç değerinin (standart test koşullarında, STK) eviricinin nominal gücüne oranıdır. Bu oran fotovoltaiik sistemlerin tasarımında kritik bir parametre olarak kabul edilir ve doğru belirlenmesi, sistemin genel performansını, maliyet etkinliğini ve uzun vadeli güvenilirliğini doğrudan etkiler. Son yıllarda, FV panel fiyatlarındaki ciddi düşüşler, d.a./a.a. oranının yüksek tutulmasını cazip hale getirmiştir. Bu ekonomik değişim, diğer saha malzemelerini sabit tutarken sahaya daha fazla FV panel eklemeyi (yüksek d.a./a.a. oranı seçimi) anlamlı hale getirmiştir. Daha yüksek d.a./a.a. oranı, daha fazla FV panelin aynı eviriciye bağlanmasını sağlar ve bu, sistemin genel enerji üretimini artırırken birim başına maliyeti düşürür (EMO, 2024).

Yüksek d.a./a.a. oranları seçilirken dikkatli bir mühendislik değerlendirmesi yapılması gereklidir. Aşırı yüklenme riski ve bunun yol açabileceği olumsuz etkiler de dikkate alınmalıdır. Eviricinin aşırı boyutlandırılması, eviricinin daha uzun süre yüksek güçte çalışmasına neden olabilir ve dolayısıyla cihazın ömrünü etkileyebilir. Yüksek güçte çalıştırmak, eviricinin dahili ısınmasını artırır ve çevresini ısıtabilir. Eviriciler aşırı ısındığında, en yüksek güç üretimini azaltır ve verimliliği düşmektedir. Seçilen 2023 model evirici, tek fazlı modeller için 2,00 d.a./a.a. oranına kadar aşırı boyutlandırmaya izin vermektedir (Solaredge, 2023).

Fotovoltaik sistemin ekonomik fayda sağlaması amacıyla tüm parametreler dikkate alınarak sistem çıktıları oluşturulmuş ve 1,0-1,5 oranları arasındaki değerler üzerinden çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizlerde, 1,2 d.a./a.a. oranının en verimli ve optimum finansal kazanç sağladığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, “Desired DC to AC Ratio (İstenen d.a.-a.a. oranı)” komutu kullanılarak d.a./a.a. oranı başlangıçta SAM yazılımının önerdiği şekilde "1,2" olarak belirlenmiştir (Şekil 3.7). SAM yazılımı, 1,2 d.a./a.a. oranına göre yapılan hesaplamalarda, 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosunda toplamda "1.425.185" adet SolarEdge Technologies Ltd: SE6000H-US [240V] model eviricinin kullanılması gerektiğini belirlemiştir. Bu evirici modeli, belirlenen oranla uyumlu olarak, sisteminin verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını destekleyecek kapasiteye sahiptir. SAM yazılımında en uygun alt dize sayısı “dokuz” modül olarak belirlenmiştir.

AC Sizing		Sizing Summary	
Number of inverters	1,425,185	Nameplate DC capacity	10,340,001.02 kWdc
DC to AC ratio	1.20	Total AC capacity	8,616,668.510 kWac
Desired array size	1.034e+07 kWdc	Total inverter DC capacity	8,712,455.194 kWdc
Desired DC to AC Ratio	1.2	Number of modules	18,778,833
☒ Estimate Subarray 1 configuration		Number of strings	2,086,537
		Total module area	47,322,659.16 m ²

System and subarray capacity and voltage ratings are at module reference conditions shown on the Module page.

Şekil 3.7. SAM yazılımı 2030 yılı FV sistem boyutlandırması.

2030 yılı için “Yalnızca FV” sistem tasarımı yapılırken belirlenen tüm değerler ve parametreler, elektrikli araçların dahil edildiği “FV+EA” senaryolarında da FV kısmı için aynen korunmuştur.

Fotovoltaik sistem tasarımında bir sonraki aşama, "eğim ve azimut açılarının" belirlenmesidir. Eğim açısı ve azimut açısı, fotovoltaik panellerinin optimum performansla çalışabilmesi için önemli faktörlerdir. Panellerin eğim açısı ve yönü, coğrafi konuma göre optimize edilir. Bu açıların doğru bir şekilde belirlenmesi, panellerin maksimum güneş ışığını almasını sağlar ve dolayısıyla enerji üretim verimliliğini artırır.

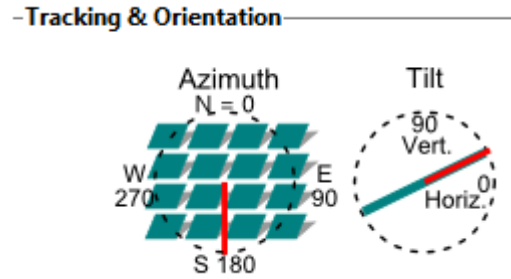
Eğim açısı, fotovoltaik panellerin yatay düzleme göre eğim açısını ifade eder. Bu açı, güneş ışınlarının panel yüzeyine dik bir şekilde gelmesini sağlamak

amacıyla optimize edilir. Azimut açısı ise fotovoltaik panellerin yatay düzlemde kuzeyden itibaren saat yönünde ölçülen yön açısını ifade eder. FV panellerinin azimut açısının doğru ayarlanması, gün boyunca maksimum güneş ışığı almasını sağlamaktadır.

EMBER tarafından (2023) yılında yapılan bir araştırma, Türkiye'deki çatıların fotovoltaik sistemler için uygunluğunu değerlendirmiştir. Araştırmada, eğimli çatıların eğim açısının 33° olduğu varsayılmıştır. Hesaplanan azimut açıları, çatı yönüne göre 45 derecelik sekiz kategoriye ayrılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, Türkiye'deki çatıların büyük bir kısmının kuzey-güney doğrultusunda yer aldığı tespit edilmiştir.

İzmir kentinde güneş kolektörleri üzerine yapılan bir çalışmada, yıl boyunca optimum eğim açısının 0° (Haziran) ile 61° (Aralık) arasında değiştiği tespit edilmiştir. Kış aylarında eğim açısının $55,7^\circ$, ilkbaharda $18,3^\circ$, yazın $4,3^\circ$ ve sonbaharda 43° olduğu belirlenmiştir. Bu mevsimsel değişikliklerin yıllık ortalaması alındığında, İzmir kentinde yıllık optimum sabit eğim açısının $30,3^\circ$ olduğu belirlenmiştir. Bu açı, yıl boyunca en yüksek verimi elde etmek için belirlenen sabit eğim açısıdır (Ülgen, 2007).

İzmir Büyükşehir Belediyesi İmar Yönetmeliğine (2024) göre çatılar, $\%33$ eğimli ve her kenarından suyun akmasını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Çatıların izin verilen maksimum boyutları içinde kalmak ve binanın genel görünümünü bozmamak şartıyla, çatı kaplaması olarak fotovoltaik paneller kullanılabilir (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024a).



Şekil 3.8. SAM yazılımında azimut ve eğim açılarının koordinat gösterimi.

Şekil 3.8'de, SAM yazılımında azimut koordinat gösteriminde azimut açısı, panellerin yatay düzlemde kuzey yönü ile oluşturduğu açı olarak tanımlanmıştır. Türkiye gibi kuzey yarımkürede bulunan ülkelerde, en yüksek enerji verimliliği sağlanabilmesi için güneş panellerinin güney yönüne bakması önerilmektedir. Bu doğrultuda, panellerin güney yönünü işaret etmesi için 180° azimut açısı kullanılmalıdır.

Fotovoltaik sistemin eğim ve azimut açılarının belirlenmesi amacıyla, tüm parametreler dikkate alınarak sistem çıktıları oluşturulmuş ve azimut açısı için 0° ile 180° , eğim açısı için ise 0° ile 33° arasındaki değerler değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, İzmir kenti için en yüksek enerji üretiminin, panellerin 180° azimut açısı ile güney yönüne bakacak şekilde ve $30,3^\circ$ eğim açısıyla monte edilmesi durumunda elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu analiz bulguları doğrultusunda, SAM yazılımında fotovoltaik sistem tasarımımda bu değerler kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

3.1.2.5. Gölgeleme faktörleri

Gölgeleme, fotovoltaik sistemlerin performansını olumsuz etkileyen bir faktördür. Gölgelemenin etkilerinin minimize edilmesi için sistem tasarımında dikkatli bir yerleşim yapılması gerekmektedir. Ağaçlar, binalar ve diğer yapıların oluşturduğu gölgeler FV panellerinin verimliliğini azaltabilir. Gölgeleme, FV hücrelerinin bir kısmının veya tamamının ışık almasını engelleyerek, elektrik üretimini düşürür.

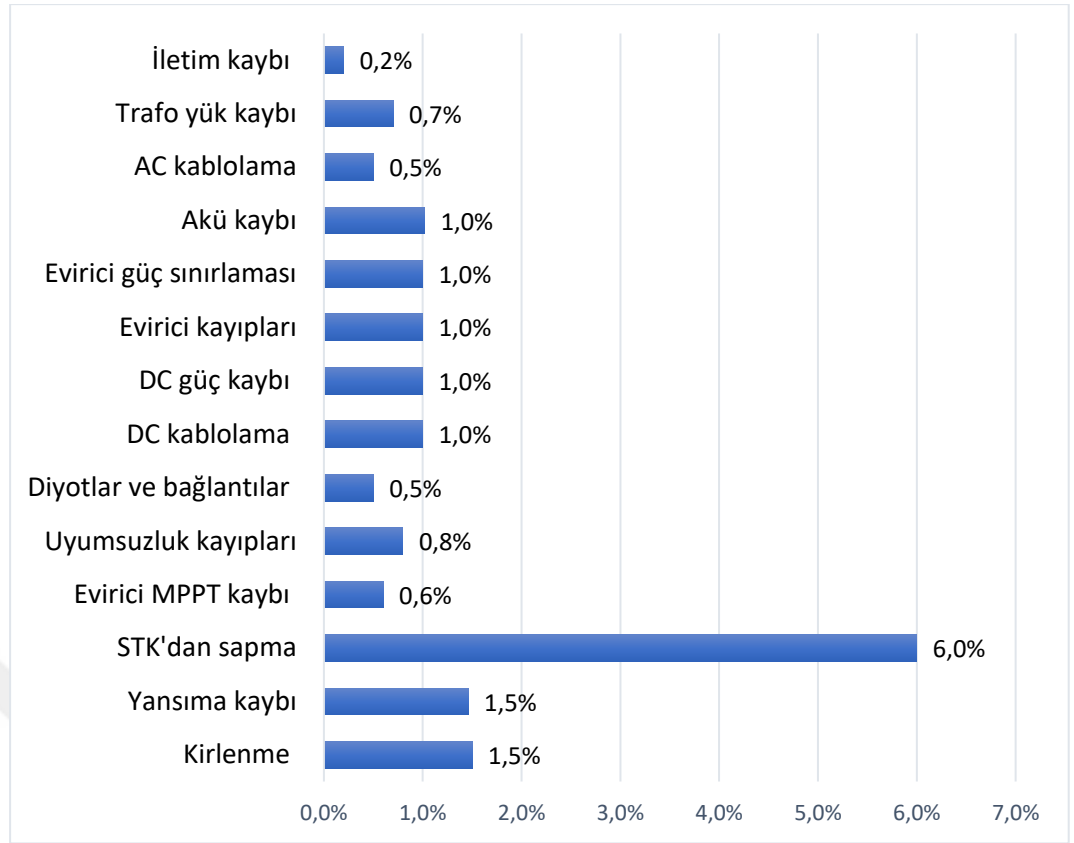
Çalışmamızda, kullanılabilir çatı alanının belirlenmesi sırasında gölgeleme ve diğer kısıtlayıcı faktörler dikkate alınarak, kullanılabilir çatı alanı tahminine bu etkiler dahil edilmiştir. Bu nedenle, SAM yazılımında gölgeleme kayıpları ayrıca bir parametre olarak girilmemiştir.

3.1.2.6. Kayıplar

FV sistemlerde çeşitli kayıplar oluşabilir. Bu kayıpların doğru bir şekilde hesaplanması ve minimize edilmesi, sistem verimliliği açısından kritiktir.

Optik kayıplar, güneş ışığının FV panellerine ulaşması sırasında meydana gelen kayıplardır. Elektriksel kayıplar; kablo direnci, bağlantı noktaları ve evirici verimsizliği gibi faktörlerden kaynaklanır. Kablo kayıplarını minimize etmek için uygun kesitli kablolar kullanılmalı ve bağlantılar düzgün yapılmalıdır. Termal kayıplar; FV panelleri sıcaklık arttıkça verimlilikleri düşer. Termal kayıpların minimize edilmesi için panellerin uygun şekilde havalandırılması ve serinletilmesi gereklidir. SAM yazılımı panel kayıplarını, seçilen panelin teknik özelliklerine göre kendisi belirlemektedir. Kirlenme ve tozlanma; panellerin yüzeyinin kirlenmesi ve tozlanması ışık geçirgenliğini azaltır ve verimliliği düşürür. Düzenli bakım ve temizlik, bu kayıpları minimize eder.

Çalışmamızda kullanılan kayıp değerleri, literatürde genel kabul gören değerler ve çalışmalar, lokal çevre koşulları, ışıyım seviyeleri, sıcaklık değişimleri, gölgeleme etkileri ve sistemin kurulduğu coğrafi konum gibi faktörler dikkate alınarak oluşturulmuştur;



Şekil 3.9. Senaryolarda kullanılan FV sistem kayıp oranları.

Akü kaybı yalnızca FV+EA sistem tasarımlarında dikkate alınmaktadır. Şekil 3.9'da gösterilen diğer kayıplara ek olarak, FV sistem tasarımında seçilen %21,85 verimliliğe sahip modülün %78,15'lik kaybı da dahil edildiğinde, toplam sistem kaybı %81,2'ye ulaşmaktadır. Bu durumda, FV sistemin net verimliliği “%18,8” olarak hesaplanmaktadır.

Çalışmamızda FV+EA sistemlerinde EA bataryaları, bir enerji depolama aracı olarak, klasik akü sistemine benzer şekilde kullanılmıştır. EA bataryaları, FV sistemin öz tüketimini maksimize edecek şekilde ayarlanmıştır.

SAM yazılımındaki ayarlara göre bataryalar, FV sistemden gelen enerjiyi yalnızca fazla olduğunda şarj etmek ve yalnızca enerji açığı olduğunda deşarj etmek üzere ayarlanmıştır. Bu "yük dengelenmesi" stratejisi, enerji kayıplarını azaltmaktadır. Bataryalar yalnızca FV sistemden gelen enerji üretimi yük talebini karşılamadığında devreye girmesi nedeniyle; bataryaların çok sık kullanılamaması

ve dolayısıyla şarj-deşarj döngülerinin sınırlı kalması nedeniyle akü kaybı %1 olarak belirlenmiştir.

Bu bağlamda FV+EA sistemlerinde, akü kaybı da hesaba katıldığında, sistemin net verimliliği “%18,6” olmaktadır.

3.1.2.7. Şebeke limitleri

FV sistemlerin şebekeye bağlanması, belirli limitler ve düzenlemeler doğrultusunda gerçekleştirilir. Şebeke limitleri, sistemin güvenli ve etkin bir şekilde işletilmesini sağlar. Gerilim ve frekans limitleri; şebekeye bağlanan FV sistemlerin, belirli gerilim ve frekans aralıklarında çalışması gerekmektedir. Şebeke operatörleri, bu limitleri belirleyerek sistemin entegrasyonunu sağlar. Güç kalitesi; FV sistemlerin şebekeye entegre edilmesinde güç kalitesi önemli bir faktördür. Harmonik bozulmalar ve ani gerilim değişimleri, şebeke stabilitesini etkileyebilir. Bu nedenle, eviriciler ve diğer güç elektroniği bileşenleri, bu tür etkileri minimize edecek şekilde tasarlanmalıdır. Maksimum üretim kapasitesi; şebeke operatörleri, belirli bir bölgedeki maksimum üretim kapasitesini sınırlar. Bu limitler, şebekenin aşırı yüklenmesini ve dengesizlikleri önlemek amacıyla uygulanır.

3.1.2.8. Panel ömrü

FV panellerin ömrü, zamanla verimliliklerinin azalmasıyla belirlenir. Bu süreç, d.a. bozulma olarak adlandırılır ve çeşitli faktörlerden etkilenir. FV panellerin yıllık bozulma oranları genellikle %0,5 ile %1 arasında değişir. Bu oran, panel tipine, malzeme kalitesine ve çevresel koşullara bağlıdır.

Uzun ömür ve dayanıklılık; FV panellerin uzun ömürlü olabilmeleri için kaliteli malzemelerden üretilmeleri ve uygun koşullarda çalıştırılmaları gerekmektedir. Panellerin dayanıklılığını artırmak için üretim sürecinde çeşitli testler yapılır ve kalite kontrol süreçleri uygulanır.

Çalışmamızda FV panellerin yıllık bozulma oranı %0,5 olarak alınmıştır. Bu bozulma oranıyla, 25 yıllık bir proje sonunda panel verimliliğinde yaklaşık %12'lik bir azalma meydana gelmekte ve verimlilik %88,22'ye düşmektedir.

3.1.3. Toplam güç talebi

Şehirlerin elektrik tüketimi, konut, ticari ve sanayi alanlarındaki enerji kullanımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Elektrik tüketimi analizinde, nüfus yoğunluğu, iklim koşulları, endüstriyel faaliyetler ve enerji verimliliği programları dikkate alınmalıdır. Şehirlerin günlük ve mevsimsel elektrik talep profilleri, FV sistem tasarımı için kritik öneme sahiptir.

Fotovoltaik sistemlerin tasarımında, şehirlerin ve elektrikli araçların elektrik tüketim ihtiyaçlarının doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu bölümde, İzmir kentinin genel elektrik tüketimi değerlendirilmiştir.

Elektrik yükü, bir sistemin elektrik tüketim profilini gösterir. Elektrik yükü analizinde, çeşitli tüketim bileşenleri ve bunların zaman içindeki değişimleri dikkate alınır. Konut alanlarında elektrik tüketimi, genellikle ısıtma, soğutma, aydınlatma ve ev aletlerinin kullanımından kaynaklanır. Bu tüketim, günlük yaşam alışkanlıklarına ve mevsimsel değişimlere göre farklılık gösterir. Ticari ve endüstriyel alanlarda elektrik tüketimi ise üretim süreçleri, iş saatleri ve kullanılan ekipmanların enerji verimliliği gibi faktörlere bağlıdır. Bu tür tüketim, genellikle daha sabit ve yüksek düzeydedir.

İzmir, Türkiye'nin batısında yer alan ve önemli bir sanayi, ticaret ve turizm merkezidir. Bu nedenle, elektrik tüketimi de oldukça çeşitlidir ve yüksek seviyelerdedir. Elektrik tüketim verileri, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından sağlanmaktadır. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü (TEDAŞ) tarafından yayınlanan rapora göre 2022 yılında İzmir kentinde kişi başına düşen net elektrik tüketimi 4.755 kWh olmuştur (TEDAŞ, 2023).

Yapılan araştırmalarda 2023 yılına ait veri bulunmaması ve 2024 yılının henüz tamamlanmamış olması nedeniyle 2022 yılı elektrik tüketim verileri ile tahmin oluşturulmuştur. İzmir kenti için yıllık ortalama verilerin bulunmaması nedeniyle, Türkiye elektrik tüketimi artışının son on yıllık ortalaması (%4) ile genişletilerek İzmir kenti için tahmini 2030 yılı verisi oluşturulur (TEDAş, 2023).

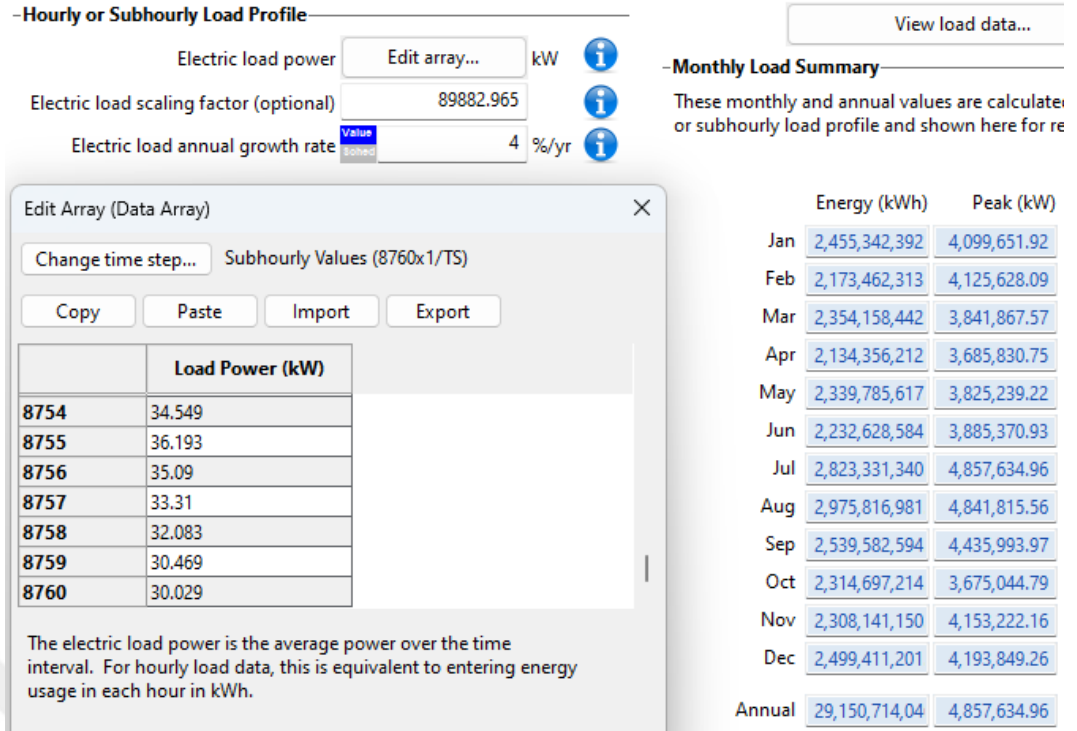
Tablo 3.1. Yıllar itibariyle Türkiye net elektrik tüketimi artış oranı (TEDAş, 2023).

Yıllar	Toplam Birim (GWh)	Yüzdesel Artış Oranı
2013	198.045	1,6%
2014	207.375	4,7%
2015	217.312	4,8%
2016	231.204	6,4%
2017	249.023	7,7%
2018	258.232	3,7%
2019	257.273	-0,4%
2020	262.702	2,1%
2021	286.692	9,1%
2022	286.576	0,0%
Türkiye son on senelik (2012-2022) ortalama artış yüzde oranı:		4,0%

Yıllık ortalama %4 artış varsayılarak; İzmir kenti için tahmini 2030 yılı kişi başına elektrik tüketimi “6.508 kWh” olarak tespit edilmiştir.

$$\text{İzmir elektrik tüketimi} = \text{İzmir kenti nüfusu} \times \text{kişi başı elektrik tüketimi}$$

İzmir kentinin nüfusu (4.479.525) ve kişi başı elektrik tüketimi verilerinden yararlanılarak İzmir kentinin 2030 yılına ait “Yalnızca FV” sistem için hesapladığımız tahmini elektrik tüketimi toplamı “29.150.714 MWh” olarak bulunmuştur (şekil 3.10).



Şekil 3.10. SAM yazılımı 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem elektrik talebi verisi.

Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi (EPIAŞ) Şeffaflık Platformu (2023) tarafından yayınlanan 2023 yılına ait anlık olarak gerçekleşen tüketim değerlerinin saatlik bazda oluşturulan verileri indirilmiştir. “Electric Load Data” (Elektrik yük verileri) seçeneği ile SAM yazılımına yüklenerek saatlik elektrik tüketim değerleri tanımlanır. Türkiye ait saatlik elektrik tüketim verileri olması ve mega watt cinsinden tanımlanması nedeniyle “elektrik yükü ölçülendirme faktörü” kullanılarak İzmir kentinin yıllık elektrik tüketim verileri düzenlenmiştir.

2030 yılına kadar elektrikli araç sayılarında yüksek artış beklenmektedir (EPDK, 2024a). Bu bağlamda, FV+EA (%4,4) senaryosu için: İzmir kenti 2030 yılı toplam elektrik tüketimi, Tablo 3.19’da belirlenen 2030 yılı EA (%4,4) elektrik tüketim değeri olan 225.702 MWh değeri dahil edilerek “29.376.416 MWh” olarak hesaplanmıştır. EA’ların elektrik tüketimi, kentin toplam elektrik tüketiminin %0,77’sini oluşturmaktadır.

Hourly or Subhourly Load Profile

Electric load power

Edit array...

kW

Electric load scaling factor (optional)

90578.8918

Electric load annual growth rate

Value

4

%/yr

Adjust Load Profile to Monthly Usage

☐ Scale electric load profile to monthly usage

Monthly electricity usage for scaling

Edit values...

kWh

Download

Click Download Electric Load Data to run a macro that downloads modeled hourly load data. See Help for details.

Download Electric Load Data

View load data...

Monthly Load Summary

These monthly and annual values are calculate or subhourly load profile and shown here for re

	Energy (kWh)	Peak (kW)
Jan	2,474,353,098	4,131,393.83
Feb	2,190,290,537	4,157,571.13
Mar	2,372,385,722	3,871,613.57
Apr	2,150,881,654	3,714,368.62
May	2,357,901,613	3,854,856.48
Jun	2,249,914,908	3,915,453.76
Jul	2,845,191,233	4,895,245.63
Aug	2,998,857,507	4,879,303.74
Sep	2,559,245,537	4,470,340.05
Oct	2,332,618,961	3,703,499.15
Nov	2,326,012,137	4,185,378.85
Dec	2,518,763,113	4,226,320.51
Annual	29,376,416,02	4,895,245.63

Şekil 3.11. SAM yazılımı 2030 yılı FV+EA (%4,4) elektrik talebi verisi.

FV+EA (%100) senaryosu için: İzmir kenti 2030 yılı toplam elektrik tüketimi, Tablo 3.19’da belirlenen 2030 yılı EA (%100) elektrik tüketim değeri olan 5.120.617 MWh değeri dahil edilerek “34.271.331 MWh” olarak hesaplanmıştır. EA’ların elektrik tüketimi, kentin toplam elektrik tüketiminin %14,9’unu oluşturmaktadır.

3.1.4. Potansiyel elektrik üretimi

Potansiyel saatlik çıktı, FV sistemlerin saatlik bazda ne kadar enerji üretebileceğini gösterir. Bu bölümde, SAM yazılımı ile yapılan analizlerin sonuçları ve üretim tahminleri paylaşılmıştır. SAM yazılımı, sistem bileşenleri, coğrafi konum, iklim verileri ve gölgeleme faktörleri gibi parametreleri dikkate alarak saatlik üretim tahminleri yapar.

SAM yazılımında belirlediğimiz parametreler girildikten sonra 2030 yılındaki “Yalnızca FV” sistem tahmini yıllık elektrik üretimi Tablo 3.2’de

“17.569.438 MWh” olarak hesaplanmıştır. Kapasite faktörü %19.4, Enerji Verimi 1.699 kWh/kWp, yıllık performans oranı 0,86 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.2. SAM yazılımı 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem teknik çıktısı.

Parametreler	Değer
1. Yılda yıllık a.a. enerjisi	17.569.438 MWh
1. Yılda d.a. kapasite faktörü	19.4%
1. Yılda enerji verimi	1.699 kWh/kWp
1. Yılda performans oranı	0,86

3.1.4.1. İzmir kentindeki elektrik araç görünümü

İzmir kentinde TÜİK (2024a) rakamlarına göre Mart 2024'te toplam araç sayısı 1.837.135 adettir. Türkiye genelindeki toplam araç sayısı ise 29.367.254 adettir. İzmir kentindeki araç sayısı toplamı Türkiye'nin %6,3'ünü oluşturmaktadır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) 2024 yılı Nisan raporuna göre, 2023 başında Türkiye'de 14.896 elektrikli araç bulunurken, bu sayı Nisan 2024 itibarıyla 93.973'e çıkmıştır. Aynı dönemde, şarj noktalarının sayısı da 1 Nisan 2024 itibarıyla 17.233'e ulaşmıştır; bu rakam, 11.412'yi kamuya açık ve 5.821'yi özel olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Türkiye'de her bir şarj soketine düşen elektrikli araç sayısı ortalama 5,4'tür. Avrupa genelinde bu oran ise 13,75'tir, bu da Türkiye'nin şarj altyapısının kıyaslandığında oldukça iyi bir seviyede olduğunu göstermektedir.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (2024a) "Elektrikli Araç ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu" 2024 Nisan ayı raporunda Türkiye'deki 2030 yılı EA sayısı yüksek senaryoya göre 1.679.600 adet olarak tahmin edilmiştir. Ancak İzmir kentine ait özel bir çalışma yapılmamıştır. İzmir kentindeki araç sayısı toplamının Türkiye'nin %6,3'ünü oluşturmaya verisi kullanılarak, “İzmir kenti 2030 yılı EA sayısı”, 2030 yılı Türkiye tahmini EA sayısının %6,3'ü alınarak “105.815” adet olarak belirlenmiştir. Çalışmamızda bu değer, 2030 yılı FV+EA (%4,4) senaryosunda kullanılmıştır.

Tablo 3.3. Türkiye elektrikli araç projeksiyonu (EPDK, 2024a).

Elektrikli Araç Sayısı			
Yıllar	Düşük Senaryo	Orta Senaryo	Yüksek Senaryo
2025	202.030	269.154	361.893
2030	776.362	1.321.932	1.679.600
2035	1.779.488	3.307.577	4.214.273

Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK, 2024a) verilerine göre, İzmir'deki toplam araç sayısı Mart 2024'te 1.837.135 adettir. Türkiye'de motorlu kara taşıtlarının son on yıllık artış oranı ortalama %4,56'dır. Bu veriler dikkate alınarak, İzmir'deki toplam araç sayısının her yıl yaklaşık %4,56 oranında artarak 2030 yılında 2.400.681 adete ulaşacağı öngörülmüştür.

Bu projeksiyona göre, 2030 yılında İzmir için öngörülen EA sayısının toplam İYM'li araç sayısına oranı %4,4'tür. Bu nedenle, ikinci senaryo FV+EA (%4,4) olarak adlandırılmıştır. "FV + EA (%100)" senaryosu ise, İzmir kentindeki tüm motorlu kara taşıtlarının (2.400.681 adet) 2030 yılında elektrikli araçlara dönüştüğü varsayımıyla oluşturulmuştur.

3.1.4.2. Elektrikli araçlarla entegre FV sistemi 2030 yılı elektrik üretimi

Türkiye'de elektrikli araçların kullanımı hızla artmaktadır. Bu araçlar arasında en çok tercih edilen modeller Tesla Model 3, Renault Zoe, ve Nissan Leaf gibi markalardır. Yerli üretim olarak 2023 yılında satışa sunulan TOGG (Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu) elektrikli araç modeli ise, ülkenin elektrikli araç pazarında önemli bir yer edinmiştir. İzmir kenti 2030 FV+EA projeksiyonunda örnek araç olarak TOGG T10X V1 RWD uzun menzilli versiyonun 88,5 kWh'lik bataryası kabul edilmiştir.

FV+EA (%4,4) senaryosunda, İzmir kentinde 2030 yılı EA sayısı olarak belirlenen 105.815 adet EA ve 88,5 kWh'lik batarya kapasitesi dikkate alınarak ulaşılabilecek tahmini toplam batarya kapasitesi "9.364.628 kWh" olarak

hesaplanmıştır. 22 kW’lık şarj cihazları ve EA sayısı kullanılarak ise talep edilen batarya gücü “2.327.930 kW” olarak belirlenmiştir.

FV+EA (%100) senaryosunda ise, İzmir kentinde 2030 yılı EA sayısı olarak varsayılan 2.400.681 adet EA ve 88,5 kWh’lik batarya kapasitesi dikkate alınarak ulaşılabilecek tahmini toplam batarya kapasitesi “212.460.299 kWh” olarak hesaplanmıştır. 22 kW’lık şarj cihazları ve EA sayısı kullanılarak ise talep edilen batarya gücü “52.814.990 kW” olarak belirlenmiştir.

Bu veriler SAM yazılımında sırasıyla “Desired bank capacity, Desired bank power” (İstenen akü kapasitesi, İstenen akü gücü) seçeneklerine girdi olarak aktarılır. Örnek araç için gelecek nesil batarya gerilimi 800 V_{da}, batarya hücreleri gerilimi 3,6 V_{da} ve hücre kapasitesi 74.9 Ah olarak belirlenmiştir (Farasis Energy, 2024).

Elektrikli araçların Araçtan Eve (çift taraflı) şarj cihazlarına yönelik etkili kullanım modeli belirlemek önem arz etmektedir. EA’ları fotovoltaiik sistemlere entegre ettiğimizde, gün içindeki araç kullanım süresinin kısıtlanmasını önlemek amacıyla bataryanın şarj durumu en az %50 ve en çok %95 arasında olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu düzenleme, elektrik ihtiyacının bataryadan karşılanabileceği minimum şarj seviyesini (%50) ve aşırı şarjı önlemek ve batarya sağlığını korumak için maksimum şarj seviyesini (%95) belirler. Böylece, en kötü durumda bile EA bataryasının geri kalan %50’lik kısmı ile gün içerisindeki herhangi bir sürüş sağlanabilecektir. Konut, sanayi veya ticarethanelerin elektrik ihtiyacı, FV sistem elektrik üretiminin yetersiz kaldığı durumlarda; elektrik ihtiyacı EA bataryası tarafından karşılanır. EA batarya ise yalnızca FV sistemin aşırı elektrik üretimi durumunda sistem tarafından şarj edilir. Bu koşullar SAM yazılımına “Batarya Yönetimi” (Battery Dispatch) bölümünde girdi olarak aktarılır.

Batarya yönetimi bölümünde, enerji depolama sisteminin performansını optimize etmek için “Yüke Deşarj Oranı” (Discharge to Load) %25 olarak belirlenmiştir. Yüke deşarj oranı, bataryanın ürettiği enerjinin ne kadarının

doğrudan sisteme, yani yüke sağlanacağını ifade eder. Bu oran, bataryanın doluluk seviyesine bağlı olarak yük taleplerini karşılamak için ne kadar enerji vereceğini belirler. %25 değeri, bataryanın toplam kapasitesinin %25'inin doğrudan sisteme yönlendirildiği anlamına gelir.

Yüke deşarj oranı, hem bataryanın uzun ömürlü olmasını sağlamak hem de enerji taleplerini karşılayarak sistem verimliliğini artırmak amacıyla kritik bir parametredir. Özellikle bataryanın minimum şarj seviyesi %50 olarak belirlendiği için, yüksek deşarj oranları, bataryanın aşırı deşarj olmasına neden olabilir. Bu da uzun vadede batarya sağlığının zarar görmesine yol açmaktadır. Bataryanın daha düşük oranlarda deşarj edilmesi ise, bataryanın ömrünü korumak açısından avantaj sağlasa da, bu durumda sistemin enerji taleplerini karşılamakta yetersiz kaldığı ve enerji açığı oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle, bataryanın ömrünü uzatmak ve aynı zamanda enerji taleplerini karşılamak amacıyla %25'lik deşarj oranı seçilmiştir.

SAM yazılımında belirlediğimiz tüm bu parametreler girildikten sonra 2030 yılındaki FV+EA (%4,4) sistemi tahmini yıllık elektrik üretimi Tablo 3.4'te "17.388.866 MWh" olarak hesaplanmıştır. Kapasite faktörü %19,2, enerji verimi 1.682 kWh/kWp, yıllık performans oranı 0,85 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.4. SAM yazılımı 2030 yılı FV+EA (%4,4) sistem teknik çıktısı.

Parametreler	Değer
1. Yılda yıllık a.a. enerjisi	17.388.866 MWh
1. Yılda d.a. kapasite faktörü	19,2%
1. Yılda enerji verimi	1.682 kWh/kWp
1. Yılda performans oranı	0,85

2030 yılındaki FV+EA (%100) senaryosunda ise, tahmini yıllık elektrik üretimi "17.122.017 MWh" olarak hesaplanmıştır. Kapasite faktörü %18.9 , enerji verimi 1.656 kWh/kWp, yıllık performans oranı 0,84 olarak bulunmuştur (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. SAM yazılımı 2030 yılı FV+EA (%100) sistem teknik çıktısı.

Parametreler	Değer
1. Yılda yıllık a.a. enerjisi	17.122.017 MWh
1. Yılda d.a. kapasite faktörü	18,9%
1. Yılda enerji verimi	1.656 kWh/kWp
1. Yılda performans oranı	0,84

Senaryo tasarımı sonuçlarına göre, Yalnızca FV sistemi ile karşılaştırıldığında, FV+EA sistemlerinde yıllık elektrik üretiminde düşüşler gözlemlenmiştir. Bu düşüşler, FV+EA (%4,4) senaryosunda %1,03, FV+EA (%100) senaryosunda ise %2,55 olarak hesaplanmıştır. Bu enerji üretim kayıpları, EA bataryalarının sisteme entegre edilmesiyle birlikte ortaya çıkan, bataryaların şarj ve deşarj işlemlerinden kaynaklanan sistem verimliliği kayıplarını yansıtmaktadır.

SAM yazılımı analizi sonucunda elde edilen tüm üretim tahminleri, FV sistemlerin belirli bir süre boyunca ne kadar enerji üreteceğini göstermektedir. Bu tahminler, sistem tasarımı ve ekonomik analizler için kritik veriler sağlar.

3.1.5. Ekonomik analiz

FV sistemlerin ekonomik analizi, kurulum maliyetleri, işletme maliyetleri, finansal parametreler ve teşvikler gibi çeşitli bileşenlerin değerlendirilmesini içerir. Bu bölümde, SAM yazılımı kullanılarak yapılan finansal analizler ve ekonomik sonuçlar paylaşılmıştır.

SAM yazılımı kullanılarak yapılan maliyet analizleri, Amerikan doları üzerinden hesaplanmıştır. 14 Haziran 2024 tarihinde T.C. Merkez Bankası tarafından belirlenen kur baz alınarak, 1 Amerikan doları 32,52 Türk Lirası olarak dikkate alınmıştır (T.C. Merkez Bankası, 2024).

3.1.5.1. Kurulum maliyeti

Kurulum maliyeti, FV sistemlerin başlangıçta yatırım yapılan maliyetlerini kapsar. Bu maliyetler arasında FV panelleri, eviriciler, montaj yapısı, kablolama ve işçilik maliyetleri bulunmaktadır. Kurulum maliyetine %20'lik katma değer vergisi (KDV) tutarı eklenilmiştir. Kurulum maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

$$M_{\text{kurulum}} = M_{\text{panel}} + M_{\text{evirici}} + M_{\text{montaj}} + M_{\text{işçilik}} \quad (12)$$

2024 yılı için fotovoltaik panellerin watt başına maliyetinin belirlenmesi amacıyla kapsamlı bir piyasa araştırması gerçekleştirilmiştir. Türkiye'deki FV panel fiyat ortalamasını tespit etmek üzere, tasarım aşamasında belirlenen panel modeli baz alınarak Türkiye'deki on farklı satıcıdan temin edilen gerçek fiyatlar, önceki çalışmalarda belirlenen fiyat verileri, uluslararası kuruluşların yayımladığı güncel ortalama fiyatlar ve Türkiye Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen fiyatlar dikkate alınarak watt başına düşen tahmini ortalama maliyet hesaplanmıştır. 2024 yılı için panellerin maliyeti “0,39\$/Wp” olarak belirlenmiştir. Evirici fiyatları için ise, Türkiye Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 2024 yılına ait birim fiyatları kullanılarak farklı güç kapasitelerine sahip eviricilerin maliyetleri hesaplanmış ve bu ortalama “0,15\$/Wac” olarak tespit edilmiştir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024c; IEA, 2018b).

Tablo 3.6. Türkiye'deki 2024 yılı ortalama evirici fiyatları (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı).

Evirici: (Ölçü: Ad.)	Nominal birim fiyat TL	Watt başına birim fiyat TL
En az 3 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺36.250	₺12,1
En az 5 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺46.020	₺9,2
En az 7 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺62.950	₺9,0
En az 10 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺67.810	₺6,8
En az 15 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺92.020	₺6,1
En az 20 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺105.250	₺5,3
En az 25 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺112.750	₺4,5
En az 30 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺121.050	₺4,0
En az 35 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺133.270	₺3,8
En az 40 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺140.470	₺3,5
En az 50 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺161.070	₺3,2
En az 60 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺179.570	₺3,0
En az 100 kW güçlü evirici MPPT ≤ 2	₺219.500	₺2,2
En az 30 kW güçte evirici MPPT ≥ 3	₺130.350	₺4,3
En az 40 kW güçte evirici MPPT ≥ 3	₺148.970	₺3,7
En az 50 kW güçte evirici MPPT ≥ 3	₺170.870	₺3,4
En az 60 kW güçte evirici MPPT ≥ 3	₺193.970	₺3,2
En az 100 kW güçte evirici MPPT ≥ 3	₺241.300	₺2,4
Ortalama Fiyat (TL/Wac):		₺5,0
19.06.2024 Dolar Kuru:		₺32,5
Ortalama Fiyat (\$/Wac):		\$0,15

Fotovoltaik sistemlerin, paneller ve eviriciler dışında kalan ve FV panellerinin şebeke bağlantılı veya şebekeden bağımsız bir sisteme entegrasyonunu ve işletimini sağlamak için gerekli tüm bileşenler, "Sistem Denge Bileşenleri" (Balance of System, BoS) olarak adlandırılır. Bu bileşenler, montaj malzemeleri, kablolama, şarj kontrol cihazları ve diğer yardımcı cihazlar ve malzemeleri kapsamaktadır. Sistem denge bileşenlerinin maliyeti için gerçekleştirilen detaylı fiyat analizleri sonucunda, watt başına düşen ortalama maliyet 0,2\$ olarak belirlenmiştir. İşçilik maliyetleri watt başına 0,08\$ olarak hesaplanmış olup, mühendislik ve proje süreçlerinin maliyeti ise 0,03\$ olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, şebeke bağlantıları için belirlenen maliyet watt başına 0,02\$ olarak kaydedilmiştir (IEA, 2018b; Çeliktaş ve Kırac, 2019; Çilli, 2023; IRENA, 2022).

PV Capital Costs

Direct Capital Costs

Module	17,071,661 units	0.6 kWdc/unit	9,400,001.8 kWdc	0.39 \$/Wdc	\$ 3,666,000,715.32
Inverter	1,295,623 units	6.0 kWac/unit	7,833,336.7 kWac	0.15 \$/Wac	\$ 1,175,000,498.70
Balance of system equipment	0.00		0.20		\$ 1,880,000,366.83
Installation labor	0.00	+	0.08	+	\$ 752,000,146.73
Installer margin and overhead	0.00		0.00		\$ 0.00
					Subtotal
					\$ 7,473,001,727.59
-Contingency					
			Contingency	0 % of subtotal	\$ 0.00
					Total direct cost
					\$ 7,473,001,727.59

Indirect Capital Costs

		% of direct cost		\$/Wdc		\$	
Permitting and environmental studies		0		0.00		0.00	\$ 0.00
Engineering and developer overhead		0	+	0.03	+	0.00	\$ 282,000,055.02
Grid interconnection		0		0.02		0.00	\$ 188,000,036.68
-Land Costs							
Land area	35,435.377	acres					
Land purchase	\$ 0/acre	0	+	0.00	+	0.00	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0	+	0.00	+	0.00	\$ 0.00
							Total indirect cost
							\$ 470,000,091.71

Sales Tax

Sales tax basis, percent of direct cost	100 %	Sales tax rate	20.0 %	\$ 1,494,600,345.52
---	-------	----------------	--------	---------------------

Total Installed Cost

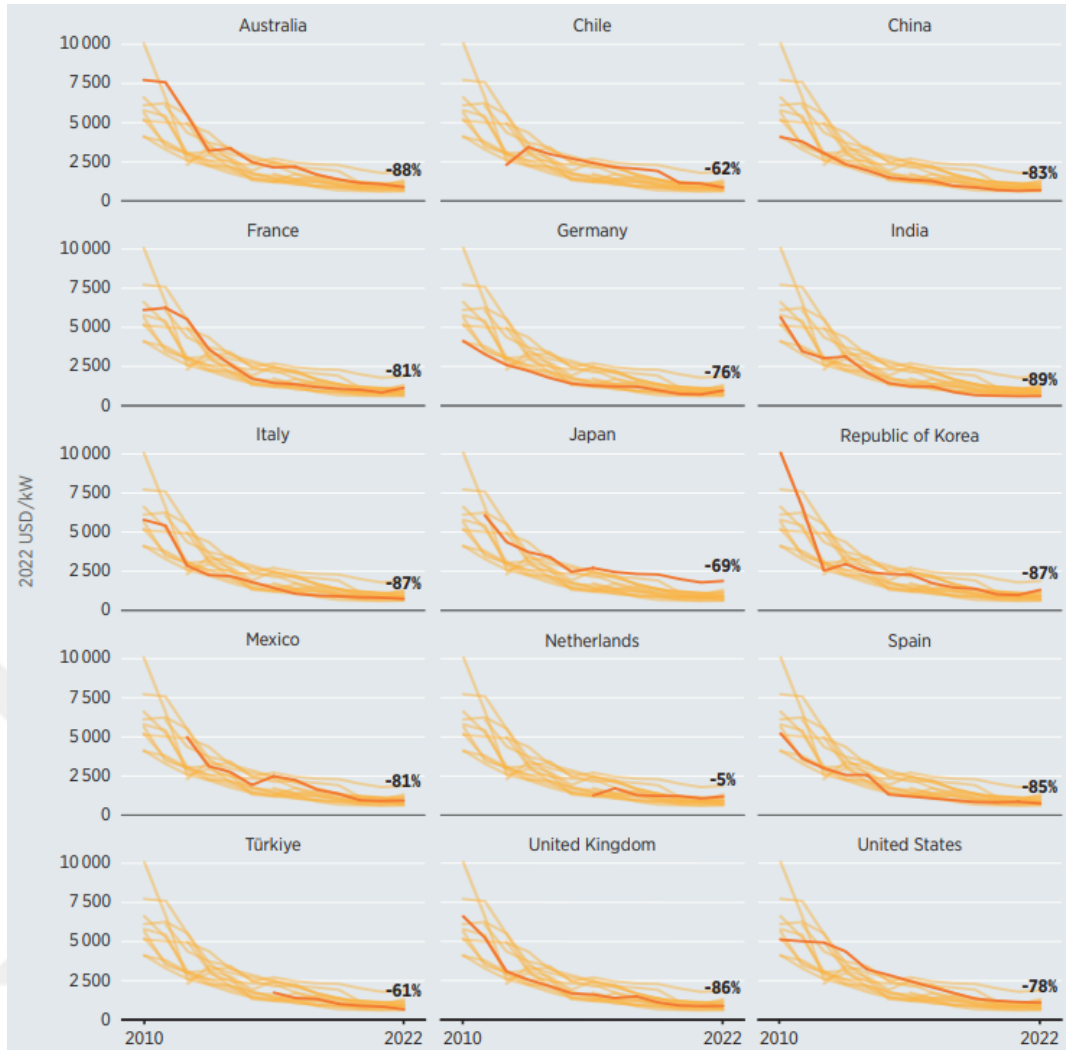
The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.

Total Installed Cost	\$ 9,437,602,164.81
Total installed cost per capacity	\$ 1.00/Wdc

Şekil 3.12. SAM yazılımı 2024 yılı “Yalnızca FV” sistem kurulum maliyeti.

Tüm maliyet kalemleri SAM yazılımına girildiğinde, 2024 yılında FV sisteminin birim maliyeti 1\$/Wp olarak hesaplanmıştır. Belirlenen 9.4 GW'lık tahmini kurulum gücü için uygulanan bu yaklaşık 1\$/lık birim fiyat, toplam sistem maliyetini 9.437.602.165\$ olarak belirlemektedir (Şekil 3.12).

IRENA (2022) tarafından yayımlanan Yenilenebilir Enerji Üretim Maliyetleri raporuna göre, Türkiye'deki FV sistem kurulum maliyetlerinin 2010-2022 yılları arasında %61 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Küresel ortalama maliyetlerinin ise 2010-2016 yılları arasında %67, 2016-2022 yılları arasında %37 oranında azaldığı belirtilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Seçili ülkelerde şebeke ölçekli güneş FV toplam kurulum maliyeti eğilimleri, 2010-2022 (IRENA, 2022).

“2030 Yılı İçin Yalnızca FV Sistem Modeli”: ilk senaryoya yönelik bu modelde yapılan maliyet hesaplamasında, önceki dönemlerdeki FV sistem maliyetlerindeki düşüş oranlarının ortalaması kabul edilerek fiyat tahmini gerçekleştirilmiştir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın raporuna göre, Türkiye’de son 12 yılda FV sistem maliyetlerinde %61 oranında bir düşüş yaşanmıştır (IRENA, 2022). Bu oran baz alınarak, 2024-2030 yılları arasındaki 6 yıllık dönemde %30’luk bir maliyet düşüşü öngörülmüştür. Bu öngörü doğrultusunda, 2030 yılı için FV sistem birim maliyeti 0,7\$/Wp olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda, 2030 yılı için daha önce öngörülen 10,34 GW gücündeki FV sistem için toplam maliyet “7.258.680.839\$” olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.14).

PV Capital Costs

Direct Capital Costs

Module	18,778,833 units	0.6 kWdc/unit	10,340,001.0 kWdc	0.25 \$/Wdc	\$ 2,585,000,256.61
Inverter	1,425,185 units	6.0 kWac/unit	8,616,668.5 kWac	0.10 \$/Wac	\$ 861,666,851.00
Balance of system equipment					\$ 1,447,600,143.70
Installation labor					\$ 723,800,071.85
Installer margin and overhead					\$ 0.00
					Subtotal \$ 5,618,067,323.17
-Contingency					
				Contingency 0 % of subtotal	\$ 0.00
					Total direct cost \$ 5,618,067,323.17

Indirect Capital Costs

	% of direct cost	\$/Wdc	\$	
Permitting and environmental studies	0	0.00	0.00	\$ 0.00
Engineering and developer overhead	0	0.03	0.00	\$ 310,200,030.79
Grid interconnection	0	0.02	0.00	\$ 206,800,020.53
-Land Costs				
Land area	38,978,911 acres			
Land purchase	\$ 0/acre	0	0.00	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0	0.00	\$ 0.00
				Total indirect cost \$ 517,000,051.32

Sales Tax

Sales tax basis, percent of direct cost	100 %	Sales tax rate	20.0 %	\$ 1,123,613,464.63
---	-------	----------------	--------	---------------------

Total Installed Cost

The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.

Total Installed Cost	\$ 7,258,680,839.13
Total installed cost per capacity	\$ 0.70/Wdc

Şekil 3.14. SAM yazılımı 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem kurulum maliyeti.

“2030 FV+EA (%4,4) Sistem Modeli”: İkinci senaryomuz olan bu model için maliyet hesaplaması aşağıdaki durumlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Bağımsız çalışmalar, belirli segmentlerdeki elektrikli araçlar ve içten yanmalı motorlu araçlar (İYM, Internal Combustion Engine-ICE) arasında fiyat eşitliğinin 2025-2028 yılları arasında gerçekleşeceğini öngörmektedir. Özellikle Avrupa'da küçük elektrikli araçlar için bu eşitliğin 2025 yılı civarında sağlanacağı tahmin edilmektedir. Elektrikli araç fiyatlarının 2018'dan sonra kayda değer ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir. 2022 yılına gelindiğinde, Çin'de satılan elektrikli araçların yaklaşık %55'inin ortalama içten yanmalı motorlu araçlardan daha ucuz olduğu görülmüştür. Bu olumlu eğilimler, elektrikli araçların pazar payının artmaya devam etmesi ve şarj altyapısı gibi destekleyici sistemlerin geliştirilmesi

durumunda, 2030 yılına kadar birçok ülkede elektrikli ve İYM araçlar arasında fiyat paritesinin sağlanabileceğini göstermektedir (IEA, 2024).

Bloomberg Yeni Enerji Finansmanı (BNEF) raporuna göre, Avrupa'da elektrikli otomobillerin 2027 yılından sonra benzinli ve dizel araçlardan daha düşük maliyetle üretileceği öngörülmektedir (BNEF, 2021). Raporda, C ve D segmenti sedanlar ve SUV segmenti gibi büyük elektrikli araçların 2026 yılında İYM'lerle aynı maliyet seviyesine geleceği belirtilmiştir. BNEF, batarya fiyatlarının 2020 yılında 137 dolar/kWh seviyesinden 2029 yılında 60 dolar/kWh seviyesine düşeceğini tahmin etmektedir. En kötümser senaryoya göre, elektrikli araçların 2028 yılına kadar hemen hemen tüm kombinasyonlarda fiyat eşitliğine ulaşması beklenmektedir.

Çift yönlü şarj (V2H), harici şarj noktaları veya araç içi şarj cihazları aracılığıyla uygulanabilir. Harici çift yönlü şarj cihazları, düşük hacimli üretime sahip bir teknolojidir ve şu anda temel bir şarj cihazından daha pahalıdır. İngiltere merkezli bir çalışma, bu maliyet farkının önümüzdeki on yıl içinde yaklaşık 1.200-2.400 dolara düşürülebileceğini tahmin etmiştir. V2G/V2H için maliyetler yüksek olsa da, bunun zamanla çeşitli değer akışları aracılığıyla geri kazanılabileceği umut verici görünmektedir (Dwyer et. al., 2021).

Bu çerçevede, 2030 tahminlerine göre elektrikli araçların İYM'lerle fiyat eşitliğini yakalayacağı varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle, “Yalnızca FV” sistem senaryosundan farklı olarak, elektrikli araçların maliyetine batarya değişim maliyeti ve çift yönlü şarj (V2H) maliyeti dahil edilmiştir. 2030 yılı için, 25 yıllık proje süresi boyunca iki kez değiştirilecek olan bataryaların birim maliyeti 50\$/kWh olarak, çift yönlü şarj birim maliyeti ise 50\$/kW olarak öngörülmüştür. Bu öngörüler doğrultusunda, 2030 yılı için FV+EA (%4,4) sistem birim maliyeti “0,72\$/Wp” olarak kabul edilmiştir.

Bu varsayımlar doğrultusunda, 2030 yılı için daha önce belirlenen 10,34 GW'lık FV güç kapasitesi ve öngörülen 0,72\$/Wp'lik birim maliyet sonucunda, “2030 yılı FV+EA (%4,4)” senaryosunda toplam sistem maliyeti 7.398.356.260\$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.15).

PV Battery Capital Costs

Direct Capital Costs

Module	18,778,833 units	0.6 kWdc/unit	10,340,001.0 kWdc	0.25 \$/Wdc	\$ 2,585,000,256.61
Inverter	1,425,185 units	6.0 kWac/unit	8,616,668.5 kWac	0.10 \$/Wac	\$ 861,666,851.00
Balance of system equipment		0.00	0.14	0.00	\$ 1,447,600,143.70
Installation labor		0.00	0.07	0.00	\$ 723,800,071.85
Installer margin and overhead		0.00	0.00	0.00	\$ 0.00
Battery DC capacity	9,364,602.6 kWh	0.00 \$/kWh	2,327,923.7 kW	50.00 \$/kW	\$ 116,396,184.20
					Subtotal \$ 5,734,463,507.38
-Contingency					
			Contingency 0 % of subtotal		\$ 0.00
					Total direct cost \$ 5,734,463,507.38

Indirect Capital Costs

	% of direct cost	\$/Wdc	\$
Permitting and environmental studies	0	0.00	\$ 0.00
Engineering and developer overhead	0	0.03	\$ 310,200,030.79
Grid interconnection	0	0.02	\$ 206,800,020.53
-Land Costs			
Land area	38,978.911 acres		
Land purchase	\$ 0/acre	0	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0	\$ 0.00
			Total indirect cost \$ 517,000,051.32
			=
Percent of indirect cost attributed to battery	0 %		Total battery indirect cost \$ 0.00
			+
			Total system indirect cost \$ 517,000,051.32

Sales Tax

Sales tax basis, percent of direct cost	100 %	Sales tax rate	20.0 %	\$ 1,146,892,701.48
---	-------	----------------	--------	---------------------

Total Installed Cost

	Total battery related installed cost	\$ 139,675,421.05
	Total system related installed cost	\$ 7,258,680,839.13
	Total installed cost	\$ 7,398,356,260.17
	Total installed cost per capacity	\$ 0.72/Wdc

The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.

Şekil 3.15. SAM yazılımı 2030 yılı “FV+EA (%4,4)” sistem kurulum maliyeti.

“2030 FV+EA (%100) Sistem Modeli”: Üçüncü senaryomuz olan bu model için yapılan maliyet hesaplamasında, FV+EA (%4,4) senaryosuna ek olarak, elektrikli araç sayısındaki artış ve buna bağlı olarak batarya sayısının da yükselmesi nedeniyle kurulum maliyeti artmıştır. Şekil 3.16’da hesaplanan maliyetlere göre, 1,01 \$/Wp’lik birim maliyet üzerinden, “2030 yılı FV+EA (%100)” senaryosunda toplam sistem maliyeti 10.427.580.376\$ olarak hesaplanmıştır.

PV Battery Capital Costs

Direct Capital Costs

Module	18,778,833 units	0.6 kWdc/unit	10,340,001.0 kWdc	0.25 \$/Wdc	\$ 2,585,000,256.61
Inverter	1,425,185 units	6.0 kWac/unit	8,616,668.5 kWac	0.10 \$/Wac	\$ 861,666,851.00
Balance of system equipment				0.14 \$/Wdc	\$ 1,447,600,143.70
Installation labor				0.07 \$/m ²	\$ 723,800,071.85
Installer margin and overhead				0.00	\$ 0.00
Battery DC capacity	212,460,308.4 kWh	0.00 \$/kWh	52,814,992.3 kW	50.00 \$/kW	\$ 2,640,749,614.82
Subtotal					\$ 8,258,816,937.99
-Contingency					
Contingency 0 % of subtotal					\$ 0.00
Total direct cost					\$ 8,258,816,937.99

Indirect Capital Costs

	% of direct cost	\$/Wdc	\$
Permitting and environmental studies	0	0.00	\$ 0.00
Engineering and developer overhead	0	0.03	\$ 310,200,030.79
Grid interconnection	0	0.02	\$ 206,800,020.53
-Land Costs			
Land area	38,978.911 acres		
Land purchase	\$ 0/acre	0.00	\$ 0.00
Land prep. & transmission	\$ 0/acre	0.00	\$ 0.00
Total indirect cost			
\$ 517,000,051.32			
Total battery indirect cost			
\$ 0.00			
Total system indirect cost			
\$ 517,000,051.32			

Sales Tax

Sales tax basis, percent of direct cost	100 %	Sales tax rate	20.0 %	\$ 1,651,763,387.60
---	-------	----------------	--------	---------------------

Total Installed Cost

Total battery related installed cost	\$ 3,168,899,537.78
Total system related installed cost	\$ 7,258,680,839.13
Total installed cost	\$ 10,427,580,376.91
Total installed cost per capacity	\$ 1.01/Wdc

The total installed cost is the sum of the indirect, sales tax, and direct costs. Note that it does not include any financing costs from the Financial Parameters page.

Şekil 3.16. SAM yazılımı 2030 yılı “FV+EA (%100)” sistem kurulum maliyeti.

3.1.5.2. İşletme maliyeti

Bakım ve Onarım: Fotovoltaik panellerin dayanıklılığını ve verimliliğini korumak için düzenli bakım ve onarım süreçleri önemlidir. Bu kapsamda, panellerin düzenli olarak temizlenmesi, bağlantı noktalarının gözden geçirilmesi ve gerektiğinde onarımlarının yapılması, sistemin verimlilik seviyesinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. İşletme maliyeti, fotovoltaik sistemlerin yıllık işletim ve bakım masraflarını kapsamaktadır. Bu giderler arasında temizlik, bakım,

onarım ve sigorta masrafları bulunmaktadır. İşletme maliyetlerinin yıllık olarak hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır:

$$M_{\text{işletme}} = M_{\text{temizlik}} + M_{\text{bakım}} + M_{\text{sigorta}} \quad (13)$$

IRENA (2023) tarafından yayımlanan Yenilenebilir Enerji Üretim Maliyetleri raporuna göre, OECD üyesi ülkelerde 2023 yılı ortalama işletme ve bakım maliyetleri 18.2\$ ve OECD üyesi olmayan ülkeler için 9.6\$ olarak tahmin etmektedir.

Tablo 3.7. ABD’de 2023-2030 yılı FV sistem tahmini işletme ve bakım giderleri (NREL, 2022).

FV Sistem İşletme ve Bakım Giderleri								
Yıllar	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Yaklaşık maliyet (\$/kWp):	19,4	18,8	18,2	17,6	17,0	16,4	15,8	15,2
Tam değer (\$/kWp):	19	19	18	18	17	16	16	15

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, Amerika Birleşik Devletleri’nde kW başına yıllık işletme ve bakım giderleri, 2024 yılında ortalama 18,76\$ olarak ve 2030 yılında 15\$ olarak tahmin etmektedir (NREL, 2022).

Fotovoltaik (FV) santrallerin işletme ve bakım maliyetleri, sistemin ölçeğine ve kullanılan ekipmanların kalitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu maliyetler, yıllık olarak yatırım maliyetinin %1 ila %3’ü arasında değişir. Daha büyük sistemlerde ve yüksek kaliteli ekipman kullanıldığında, bakım ve işletme maliyetleri genellikle daha düşük seviyelerde tutulabilir (Solar Enerjin, 2023).

Tasarlanan senaryolarda bütünsel bir tasarım yapılarak, hem sanayi ve ticari yapılar için büyük ölçekli FV sistemler hem de konutlar için daha küçük ölçekli sistemler birleştirilmektedir. Türkiye’deki işçilik maliyetlerinin ABD’ye kıyasla daha düşük olması göz önünde bulundurulduğunda, ortalama işletme ve bakım birim maliyetleri 25 yıllık proje süresince “10\$/kWp” olarak kabul edilmiştir. Bu maliyet, 2030 yılı için öngörülen “7.258.680.839\$” yatırım maliyetinin %1,4’üne denk gelmektedir. Farklı ölçeklerdeki sistemlerin yer aldığı bu projede, özellikle

büyük ölçekli sanayi ve ticari sistemler daha düşük işletim ve bakım maliyetlerine katkı sağlayarak uzun vadede maliyet avantajı sunmaktadır. “FV+EA” senaryolarında EA’ların bataryaları için ise bir bakım maliyeti alınmamıştır. Bu veriler, SAM yazılımına girilerek maliyet analizine dahil edilmiştir.

Bu çalışmada, 2030 Yalnızca FV sistemi ve FV+EA (%4,4) ile FV+EA (%100) senaryoları için yapılan maliyet hesaplamalarında, yalnızca FV sistemlerinin bakım ve işletme maliyetleri dikkate alınmıştır. EA bataryalarının bakım ve işletme maliyetleri ise hesaba katılmamıştır. Bunun temel sebebi, uluslararası raporlara dayalı öngörüler doğrultusunda, EA bataryalarının maliyetinin 2030 yılı itibarıyla içten yanmalı motorlu araçlarla fiyat eşitliğine ulaşacağı düşüncesidir. Aynı mantıkla, EA bataryalarının bakım ve işletme maliyetleri de projeye dahil edilmemiştir. Tıpkı İYM’li araç kullanıcılarının kendi araçlarının bakım ve masraflarını üstlenmesi gibi, EA sahiplerinin de batarya bakım ve işletme giderlerini üstleneceği varsayılmıştır.

Ayrıca, EA bataryalarının uzun ömürlü olacak şekilde tasarlanmış olması ve 10. ve 20. yıllarda batarya değişimi yapılacak şekilde projelendirilmesi nedeniyle, bataryaların ara dönem bakımlarına ihtiyaç duyulmadığı varsayılmıştır. Batarya teknolojisindeki gelişmeler, özellikle lityum-iyon bataryaların uzun vadeli kullanımında, rutin bakımların önemli ölçüde daha düşük maliyetli veya gereksiz hale gelebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, FV+EA senaryolarında EA bataryalarının bakım maliyetleri, projeye dahil edilmemiş ve yalnızca FV sistemlerine ait bakım ve işletme maliyetleri değerlendirilmiştir.

3.1.5.3. Finansal parametreler

Finansal parametreler, FV sistemlerin ekonomik değerlendirilmesinde kullanılan temel veriler arasında yer alır. Bu parametreler, yatırımın geri dönüş süresi (ROI), IRR ve NPV gibi kriterleri içerir.

Model tasarımlarında tüm kent için ortak bir hesaplama yöntemi benimsendiğinden, "kredi kullanımı" senaryolara dahil edilmemiştir. Ancak, yenilenebilir enerji sistemleri için sağlanan kredilerin düşük faiz oranları ve

getirileri göz önüne alındığında, yapılan analiz sonuçlarının ihtiyatlı bir değerlendirme olacağı söylenebilir.

İzmir kentindeki tüm çatıların FV sistem tasarımında, SAM yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, projeksiyonlardaki finansal hesaplamalar için enflasyon oranı ve reel iskonto oranı gibi parametreler talep etmektedir. SAM yazılımında, nominal iskonto oranı bu veriler üzerinden otomatik olarak hesaplanmakta ve yatırım analizlerinde kullanılmaktadır. Ancak, bu projede nominal iskonto oranı yerine, daha doğru bir finansal değerlendirme sunabilmek adına, Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti (WACC) kullanılacaktır. WACC, projenin finansmanındaki borç ve özsermaye maliyetlerini yansıtarak gerçekçi bir iskonto oranı sağlar. Bu nedenle, tasarlanan senaryolarda yatırımın net bugünkü değerini (NPV) ve iç getiri oranını (IRR) doğru bir şekilde hesaplayabilmek için WACC, nominal iskonto oranı yerine tercih edilmiştir.

Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti (WACC), bir şirketin borç ve özsermayesini kullanarak elde ettiği fonların ortalama maliyetini ifade eder. WACC, borçlanma maliyeti ve özsermaye maliyetini şirketin sermaye yapısındaki ağırlıklarıyla çarparak hesaplanır. Borçlanma maliyeti, vergi avantajlarından dolayı indirgenirken, özsermaye maliyeti, genellikle Sermaye Varlıklarını Fiyatlama Modeli (CAPM) kullanılarak hesaplanır. WACC temelde iki ana bileşenden oluşur (CFI, 2024):

- Borçlanma Maliyeti: Şirketin kredi sağlayıcılardan aldığı borcun maliyeti.
- Özsermaye Maliyeti: Yatırımcıların şirkete yaptıkları sermaye yatırımlarından bekledikleri getiri.

Bu iki maliyet, şirketin sermaye yapısındaki borç ve özsermaye ağırlıklarına göre şu formülle hesaplanır (CFI, 2024):

$$WACC = \left(\frac{E_p}{V} \times Re \right) + \left(\frac{D}{V} \times Rd \times (1 - Tc) \right) \quad (14)$$

Bu oran, bir şirketin gelecekteki nakit akışlarını bugünkü değere indirgerken iskonto oranı olarak kullanılır. Özellikle Finansal Değerleme (FV) sistemlerinde, yatırım projelerinin uygunluğunu değerlendirmek için kullanılır. Eğer bir projenin İç Getiri Oranı (IRR), WACC'den yüksekse, proje finansal açıdan karlı kabul edilir. Bu şekilde, WACC şirketlerin yatırım kararlarını ve projelerinin değerlemelerini doğrudan etkileyen bir ölçüttür (Altunbaş, 2019).

IRENA'nın WACC kıyaslama aracı (IRENA, 2023) 100 ülke için teknoloji ve ülkeye özgü WACC kıyaslama değerleri vermektedir. Bu değerler IRENA, IEA Wind Task 26 ve ETH Zürih finansman maliyeti anketinin sonuçlarıyla kalibre edilmiştir. Bu çalışmada, 100 ülke için kara rüzgârı, açık deniz rüzgârı ve FV teknolojileri için teknolojiye özgü WACC verileri oluşturulmuştur. OECD ülkeleri ve Türkiye için WACC değerleri %7,5 değerindedir (IRENA,2023; IRENA, 2021).

Bu çalışmada, Türkiye için FV teknolojilerine özgü WACC değeri, OECD ülkelerinin de ortalaması olan “%7,5” olarak belirlenmiştir. Türkiye'nin OECD üyeliği göz önünde bulundurularak, bu değer FV sistemlerinin finansal analizlerinde iskonto oranı olarak kullanılmıştır. Bu oran, Türkiye'deki FV projelerinin sermaye maliyetlerini gerçekçi bir şekilde yansıtarak, projelerin finansal fizibilitesinin değerlendirilmesinde temel bir parametre olarak kabul edilmiştir.

Analiz süresi 25 yıl olarak varsayılmıştır. Türkiye’de uygulanan KDV oranı %20’dir (Resmi Gazete, 2024). 2024 yılında Türkiye’deki kurumlar vergisi genel oranı ise %25’tir (GİB, 2024).

Projeksiyon hesaplamalarında hurda değeri dikkate alınmamıştır. Hurda değeri, FV sistemlerin kullanım ömrünün sonunda geri kazanılabilir bileşenlerin ekonomik değerini temsil etse de 25 yıllık bir proje sürecinde bu değer güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi zordur. Teknolojideki hızlı gelişmeler, geri dönüşüm süreçlerinin belirsizliği ve hurda malzemelerinin gelecekteki ekonomik değerlerinin öngörülememesi, bu değeri gerçekçi olmayan bir gelir kalemi haline getirebilir. Ayrıca, geri dönüşüm maliyetlerinin hurda değerini dengeleme ihtimali yüksektir, bu da net bir kazanç sağlamayabilir. Projenin finansal analizinde esas

odak, sistemin enerji üretimi, maliyet avantajları ve çevresel faydalarıdır; dolayısıyla hurda değeri yerine projede bu ana unsurlara odaklanılmıştır.

3.1.5.4. Teşvikler

Fotovoltaik sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla, çeşitli devlet ve yerel yönetim teşvikleri uygulanmaktadır. Bu teşvikler, yatırım maliyetlerini düşürerek geri ödeme sürelerini kısaltmada önemli bir rol oynar. Genellikle vergi indirimleri, hibe programları ve düşük faizli krediler şeklinde sunulan bu teşvikler, yatırımcılar için cazip fırsatlar sunmaktadır. Ancak bu çalışmada, İzmir kenti genelinde tasarlanan çatı üstü fotovoltaik sistemleri ve FV+EA sistemleri analizlerinde, tüm yatırımlar özsermaye kullanılarak gerçekleştirilmiş ve borç ya da kredi gibi dış finansman kaynaklarına başvurulmamıştır.

Türkiye'de, 50 kW'a kadar kurulu güce sahip FV sistemlerinin fazla elektrik satışında gelir vergisi muafiyeti sağlanırken, 240 kW üzeri FV sistem yatırımları için KDV muafiyeti ve yatırıma katkı oranı gibi ek teşvikler mevcuttur. Bu teşvik oranları, Türkiye'nin farklı bölgelerine göre değişiklik göstermektedir; 1., 2., 3. ve 4. bölgelerde %30, 5. bölgede %40 ve 6. bölgede %50 olarak belirlenmiştir (Önsöz, 2023). İzmir'in 4. bölgede yer alması nedeniyle bu teşviklerden faydalanma potansiyeli bulunmasına rağmen, yapılan analizlerde teşvikler dikkate alınmamıştır.

Teşviklerin kullanılmama sebebi, İzmir kenti genelindeki konut, ticari ve sanayi yapılarının toplu olarak değerlendirilmiş olmasıdır. Bu farklı yapı türleri için teşviklerin uygulanabilirliği, her bir yapının özel durumuna göre farklılık gösterebilir. Özellikle konut sahipleri bireysel olarak bu teşviklerden yararlanamazken, ticari ve sanayi yapıları için teşvik alma durumu, yapıların özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Ancak, bu çalışmada tüm yapı türleri birlikte ele alındığı için teşviklerin bireysel bazda analiz edilmesi mümkün olmamıştır. Ayrıca, İzmir genelinde bu ölçekte bir projede teşvik alma potansiyelini belirlemek için kapsamlı bir envanter çalışması yapılması gerekmektedir. Bu da mevcut proje

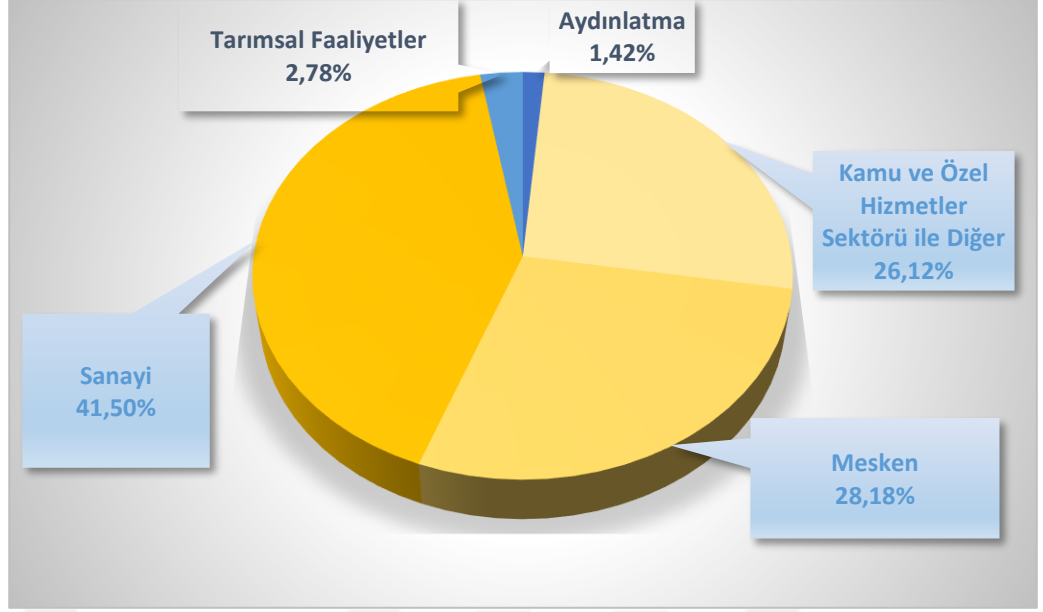
kapsamında mümkün görülmemiştir. Bu sebeplerden dolayı, analizler yalnızca özsermaye üzerinden gerçekleştirilmiş ve teşvikler hesaba katılmamıştır.

3.1.5.5. Elektrik tarifeleri

Elektrik tarifeleri, tüketim maliyetlerinin belirlenmesinde rol oynar. Bu tarifeler sabit fiyat, zaman dilimine göre değişen fiyat ve talep tabanlı fiyatlandırma gibi çeşitli yöntemlerle belirlenmektedir.

Türkiye'deki elektrik tarifeleri, sanayi, ticarethane, konut, tarımsal sulama ve aydınlatma gibi farklı kategorilere ayrılmıştır. Ayrıca, tek zamanlı ve günün üç farklı diliminde uygulanan üç zamanlı tarifeler bulunmaktadır. Elektrik faturaları genellikle tek zamanlı tarife ve kademeli olarak yansıtılmaktadır. 240 kWh'e kadar olan düşük kademe tüketim için enerji birim maliyeti daha uygun fiyatlıdır. Aylık tüketim 240 kWh'i aştığında ise, daha yüksek bir tarife uygulanmaktadır. Bu sistem, elektrik tüketimini azaltmak ve enerji tasarrufu teşvik etmek amacıyla devreye alınmıştır.

İzmir'deki konutlar, ticarethaneler ve sanayi bölgeleri için yapılan modelleme çalışmasında, yaygın olarak kullanılan tarife tipi olması nedeniyle tek zamanlı ve kademeli tarife tercih edilmiştir (EPDK, 2024c). Elektrik tüketimi birim fiyatları, Temmuz 2024 tarihi ve sonrası için, katma değer verileri dikkate alınarak belirlenmiştir (İnanç, 2024).



Şekil 3.17. İzmir kenti 2023 yılı elektrik tüketim dağılımı (EPDK, 2024b).

Senaryolar çatı alanı üzerinden hesaplandığı için ve bina türlerinin sayısı ile tüketim değerlerinin ayrı ayrı belirlenememesi nedeniyle, EPDK (2024b) raporundaki İzmir kenti elektrik tüketim dağılımı esas alınarak tek tip tarife oluşturulmuştur. Bu kapsamda, farklı tip aboneliklere ait birim fiyatlar ve İzmir kentinin elektrik tüketim dağılım oranları dikkate alınarak ortalama elektrik tüketimi tarifesini 0,122\$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.8).

2030 yılına yönelik senaryo analizlerinde, elektrik birim fiyatı olarak 0,122 \$/kWh değeri kullanılmıştır. Bu fiyat, 2024 yılı verilerine dayanmaktadır ve WACC'ye dayalı reel analiz yaklaşımı çerçevesinde sabit kabul edilmiştir. Türkiye'deki elektrik fiyatlarının gelecekte nominal olarak artması olası olsa da, dolar bazındaki reel fiyatın sabit kalacağı öngörülmüştür. Türkiye'deki enflasyon ve döviz kuru artışlarının birbiriyle paralel hareket ettiği göz önüne alındığında, elektrik fiyatları reel anlamda 0,122 \$/kWh seviyesinde kalacaktır. Bu nedenle, projede elektrik fiyatları 2024 yılı verisi üzerinden değiştirilmeden kullanılmıştır.

Tablo 3.8. İzmir kenti 2024 yılı ortalama elektrik tüketim tarifiesi.

Mesken tipi	Aktif enerji (TL/kWh)	Dağıtım bedeli (TL/kWh)	KDV	Tüm vergiler dahil son fiyat (TL/kWh)	İzmir elektrik tüketim oranları
Konut (240 kWh tüketime kadar)	₺0,48	₺1,37	8%	₺2,01	14,09%
Konut (240 kWh tüketimden sonra)	₺1,13	₺1,37	8%	₺2,98	14,09%
Ticarethane (900 kWh tüketime kadar)	₺1,91	₺1,40	18%	₺4,55	13,06%
Ticarethane (900 kWh üstü tüketim)	₺2,83	₺1,40	18%	₺5,27	13,06%
Sanayi	₺3,05	₺1,03	18%	₺4,37	41,50%
Şehit Aileleri ve Gaziler	₺0,06	₺0,83	18%	₺1,05	0,00%
Tarımsal Sulama	₺1,65	₺1,15	8%	₺3,34	2,78%
Genel Aydınlatma	₺3,89	₺0,84	8%	₺5,11	1,42%
Diğer					0,00%
Toplam:					100,00%
01.07.2024	Ortalama tek fiyat (TL/kWh):				₺3,97
01.07.2024	Ortalama tek fiyat (\$/kWh):				0,122

Modellenen sistemlerde, tüketim ihtiyaçlarının karşılanmasından sonra ortaya çıkan fazla elektrik enerjisi, ilgili tedarik şirketi tarafından, abone grubunun belirlenmiş perakende tek zamanlı aktif enerji tarifeleri üzerinden satın alınmaktadır.

1 Mayıs 2023 tarihinde 32177 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 7189 numaralı Cumhurbaşkanlığı Kararı uyarınca, 1 Haziran 2021 ile 31 Aralık 2030 tarihleri arasında devreye girecek olan YEK'lere dayalı elektrik üretim tesislerinde 2023 ve 2024 yıllarında geçerli olacak fiyatlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir (EPIAŞ, 2024);

Tablo 3.9. 14 Haziran 2024 tarihli Türkiye’de güneşe dayalı üretim tesisleri için sabit fiyat alım garantisi değerleri.

Yenilenebilir enerji kaynağına dayalı üretim tesis tipi	YEKDEM sabit alım garantisi fiyatı (TL/kWh)	YEKDEM yerli aksam desteği (TL/kWh)
Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	₺ 1,78	₺ 0,48
Dolar çevrimi:	\$ 0,054	\$ 0,015

3.2. Çevresel ve Ekonomik Etkiler

Fotovoltaik sistemler ve elektrikli araçların entegrasyonu, çevresel ve ekonomik açıdan önemli etkiler yaratmaktadır. Bu bölümde, İzmir şehri ve dünya genelinde bu sistemin uygulanması durumunda oluşacak etkiler, enerji güvenliği, karbon emisyonlarının azalması ve ekonomik kazançlar açısından değerlendirilmiştir.

3.2.1. Enerji güvenliği etkisi

Enerji güvenliği, bir ülkenin enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir, güvenilir ve uygun maliyetlerle karşılayabilme kapasitesidir. İzmir ve Türkiye için FV+EA sistemleri, enerji güvenliğini artırarak, enerji ithalatını azaltır ve YEK’lerin kullanımını teşvik eder. Bu da enerji maliyetlerini düşürür ve enerji arz güvenliğini artırmaktadır.

Bu bağlamda, enerji güvenliğini güçlendirmek için çeşitli yöntemler ve parametreler dikkate alınmalıdır. Özellikle fotovoltaik sistemler ve elektrikli araç entegrasyonunda, enerji güvenliğini sağlamak ve artırmak için “öz tüketim, öz yeterlilik ve enerji yeterliliği” faktörlerinin değerlendirmesi önemlidir.

Öz tüketim, FV sistemler tarafından üretilen enerjinin ne kadarının doğrudan tüketildiğini ifade eder. Bu oran, yerinde üretilen enerjinin tüketimle ne ölçüde örtüştüğünü gösterir. Yüksek öz tüketim oranı, enerji üretiminin büyük bir kısmının yerinde kullanıldığını gösterir ve şebekeye bağımlılığı azaltmaktadır. Özellikle

FV+EA sistemlerinde, elektrikli araçların bataryalarının gün içindeki enerji üretimi ile şarj edilmesi, öz tüketim oranını artırarak enerji verimliliğini yükseltir. Yalnızca FV sistemler için öz tüketim oranı şu şekilde hesaplanır: (Deroubaix et. al., 2023)

$$\text{Öz Tüketim}_{FV} = \frac{\text{Yerinde tüketilen enerji}}{\text{Toplam üretilen enerji}} \times 100 = \frac{E_{FV_{yük}}}{E_{FV_{yük}} + E_{FV_{şebeke}}} \quad (15)$$

Elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistemler için öz tüketim oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Öz Tüketim}_{FV+EA} = \frac{E_{FV_{yük}} + E_{akü_{yük}}}{E_{FV_{yük}} + E_{akü_{yük}} + E_{FV_{şebeke}}} \quad (16)$$

Öz Yeterlilik ise bir bölgenin enerji ihtiyacını tamamen kendi ürettiği enerji ile karşılamasıdır. Enerji sisteminin kendi enerji ihtiyaçlarını ne kadar karşılayabildiğini ölçmekte ve dış enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmaktadır. Yalnızca FV sistemler için öz yeterlilik oranı şu şekilde hesaplanır: (Deroubaix et. al., 2023):

$$\text{Öz Yeterlilik}_{FV} = \frac{\text{Yerinde üretilen ve tüketilen enerji}}{\text{Toplam enerji tüketimi}} \times 100 = \frac{E_{FV_{yük}}}{E_{yük}} \quad (17)$$

Elektrikli araçlarla entegre FV sistemler için öz yeterlilik oranı şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Öz Yeterlilik}_{FV+EA} = \frac{E_{FV_{yük}} + E_{akü_{yük}}}{E_{yük}} \quad (18)$$

Enerji yeterliliği, bir enerji sisteminin kullanıcıların enerji taleplerini karşılama yeteneğini ifade eder. Yüksek enerji yeterliliği oranı, enerji sisteminin kullanıcıların enerji ihtiyaçlarını etkin bir şekilde karşıladığını gösterir. Enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin korunması, enerji güvenliği açısından önemlidir. Yalnızca FV sistemler için enerji yeterliliği şu şekilde hesaplanır (Deroubaix et. al., 2023):

$$\text{Enerji Yeterliliği}_{FV} = \frac{\text{Üretilen enerji}}{\text{Talep edilen enerji}} \times 100 = \frac{E_{FV_{yük}} + E_{FV_{şebeke}}}{E_{yük}} \quad (19)$$

Elektrikli araçlarla entegre fotovoltaik sistemler için enerji yeterliliği şu şekildedir:

$$\text{Enerji Yeterliliği}_{FV+EA} = \frac{E_{FV_{yük}} + E_{akü_{yük}} + E_{FV_{şebeke}}}{E_{yük}} \quad (20)$$

2030 yılı “Yalnızca FV” sistem ve 2030 yılı FV+EA (%4,4) ile FV+EA (%100) sistem senaryolarına ait öz tüketim, öz yeterlilik ve enerji yeterliliği oranları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 3.10. 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosu enerji güvenliği faktörleri.

"2030 yılı Yalnızca FV Sistem"	E _{yük} : Şehrin elektrik Tüketimi (kWh)	Şebekeden şehrin elektrik tüketimine sağlanan elektrik (kWh)	E _{FV_{yük}} : FV sistemden şehrin elektrik tüketimine sağlanan elektrik (kWh)	E _{FV_{şebeke}} : FV sistemden şehir şebekesine sağlanan elektrik (kWh)
Ocak	2.455.340.000	1.923.810.000	531.532.000	195.120.000
Şubat	2.173.460.000	1.510.250.000	663.211.000	392.549.000
Mart	2.354.160.000	1.511.740.000	842.421.000	562.503.000
Nisan	2.134.360.000	1.250.390.000	883.970.000	834.880.000
Mayıs	2.339.790.000	1.279.440.000	1.060.350.000	799.692.000
Haziran	2.232.630.000	1.195.930.000	1.036.700.000	793.802.000
Temmuz	2.823.330.000	1.511.050.000	1.312.280.000	763.742.000
Ağustos	2.975.820.000	1.654.580.000	1.321.230.000	650.845.000
Eylül	2.539.580.000	1.455.710.000	1.083.870.000	733.514.000
Ekim	2.314.700.000	1.466.880.000	847.821.000	625.825.000
Kasım	2.308.140.000	1.718.790.000	589.348.000	423.777.000
Aralık	2.499.410.000	2.011.520.000	487.891.000	161.646.000
Toplam	29.150.720.000	18.490.090.000	10.660.624.000	6.937.895.000
FV sistem 2030 yılı senaryosu Öz Tüketim Oranı:				61%
FV sistem 2030 yılı senaryosu Öz Yeterlilik Oranı:				37%
FV sistem 2030 yılı senaryosu Enerji Yeterliliği Oranı:				60%

Tablo 3.11. 2030 yılı “FV+EA (%4,4)” sistem senaryosu enerji güvenliği faktörleri.

"2030 yılı FV+EA (%4,4) sistem"	E _{yük} : Şehrin elektrik Tüketimi (kWh)	E FV _{yük} : FV sistemden şehrin elektrik tüketimine sağlanan elektrik (kWh)	E FV _{şebeke} : FV sistemden şehir şebekesine sağlanan elektrik (kWh)	E akü _{yük} Aküden şehrin elektrik tüketimine sağlanan elektrik (kWh)
Ocak	2.474.350.000	533.847.000	107.520.000	75.367.000
Şubat	2.190.290.000	667.044.000	279.429.000	96.165.800
Mart	2.372.390.000	847.516.000	422.598.000	118.730.000
Nisan	2.150.880.000	889.841.000	693.976.000	118.560.000
Mayıs	2.357.900.000	1.067.330.000	644.105.000	130.604.000
Haziran	2.249.910.000	1.043.380.000	639.602.000	129.657.000
Temmuz	2.845.190.000	1.320.470.000	608.553.000	129.510.000
Ağustos	2.998.860.000	1.329.240.000	497.279.000	128.146.000
Eylül	2.559.250.000	1.090.610.000	581.991.000	127.296.000
Ekim	2.332.620.000	853.099.000	480.691.000	122.858.000
Kasım	2.326.010.000	592.937.000	328.058.000	80.941.900
Aralık	2.518.760.000	489.884.000	87.218.200	63.893.500
Toplam	29.376.410.000	10.725.198.000	5.371.020.200	1.321.729.200
FV+EA (%4,4) sistemi 2030 yılı senaryosu Öz Tüketim Oranı:				69%
FV+EA (%4,4) sistemi 2030 yılı senaryosu Öz Yeterlilik Oranı:				41%
FV+EA (%4,4) sistemi 2030 yılı senaryosu Enerji Yeterliliği Oranı:				59%

Tablo 3.12. 2030 yılı "FV+EA (%100)" sistem senaryosu enerji güvenliği faktörleri.

"2030 yılı FV+EA (%100) sistem"	E _{yük} : Şehrin elektrik Tüketimi (kWh)	E FV _{yük} : FV sistemden şehrin elektrik tüketimine sağlanan elektrik (kWh)	E FV _{şebeke} : FV sistemden şehir şebekesine sağlanan elektrik (kWh)	E akü _{yük} Aküden şehrin elektrik tüketimine sağlanan elektrik (kWh)
Ocak	2.886.650.000	580.476.000	1.274.280	131.611.000
Şubat	2.555.250.000	742.679.000	1.040.190	288.383.000
Mart	2.767.690.000	953.113.000	1.040.080	414.234.000
Nisan	2.509.280.000	1.013.370.000	6	638.652.000
Mayıs	2.750.790.000	1.208.880.000	3	607.163.000
Haziran	2.624.810.000	1.178.640.000	5	585.249.000
Temmuz	3.319.280.000	1.493.920.000	4	548.373.000
Ağustos	3.498.550.000	1.498.370.000	5	433.845.000
Eylül	2.985.690.000	1.234.750.000	2	536.435.000
Ekim	2.721.300.000	962.815.000	7	468.844.000
Kasım	2.713.590.000	667.540.000	2	317.406.000
Aralık	2.938.460.000	529.210.000	1.409.740	109.351.000
Toplam	34.271.340.000	12.063.763.000	4.764.324	5.079.546.000
FV+EA (%100) sistemi 2030 yılı senaryosu Öz Tüketim Oranı:				100%
FV+EA (%100) sistemi 2030 yılı senaryosu Öz Yeterlilik Oranı:				50%
FV+EA (%100) sistemi 2030 yılı senaryosu Enerji Yeterliliği Oranı:				50%

3.2.2. Çevresel etki

FV+EA sistemlerinin çevresel etkileri, özellikle karbon emisyonlarının azalması açısından büyük önem taşır. Elektrikli araçların FV sistemlerle şarj edilmesi, fosil yakıt kullanımını azaltır. İzmir'de uygulanacak FV+EA sistemleri, yerel hava kalitesini iyileştirirken, küresel ölçekte karbon ayak izinin azalmasına katkı sağlar.

İzmir kentindeki sera gazı emisyonlarına etkisinin hesaplanabilmesi için, İzmir'in toplam sera gazı emisyon verileri, oluşturulan senaryolardaki FV sistemler tarafından üretilen elektrik miktarı ve elektrikli araç kullanımı ile fosil yakıtlı araçların yerine geçerek engellenen emisyon değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

2024 yılı İzmir kentindeki içten yanmalı motorlu araç (İYM) sayısı, TÜİK (2024a) verilerine göre 1.837.135 adettir. Toplam araç sayısının %29,6'sı benzinli, %35'i dizel ve %32,6'sı LPG yakıt kullanmaktadır.

Elektrikli araç sayısı ise 2030 yılı için 105.815 adet olarak tahmin edilmiştir. TÜİK (2024e) verilerine göre bir aracın yıllık ortalama sürüş mesafesi 13.415 km'dir.

IEA (Uluslararası Enerji Ajansı, 2021) tarafından sunulan: benzinli araçlar için 6.5 litre/100 km, dizel araçlar için 4.7 litre/100 km ve LPG'li araçlar için 7 litre/100 km değerleri esas alınmıştır.

Benzinli araçların emisyon faktörü litre başına 2,32 kg CO₂, dizel araçların 2,7 kg CO₂/litre ve LPG'li araçların 1,5 kg CO₂/litre olarak tespit edilmiştir (EPA, 2024).

Bu durumda, içten yanmalı motorlu araç kullanımı yerine elektrikli araç kullanıldığında sağlanabilecek emisyon azaltımı şu şekilde hesaplanabilir:

Emisyon Azaltımı (t CO₂) = Araç sayısı × Yıllık ortalama sürüş mesafesi (km)

$$\times \text{yakıt miktarı (litre/100km)} \times \text{Yakıt türüne göre emisyon faktörü } \left(\frac{\text{t CO}_2}{\text{litre}} \right) \quad (21)$$

Tablo 3.13. İzmir kentinde 2030 yılı FV+EA (%4,4) senaryosunda tahmini EA kullanımı ile sera gazı azaltımı.

Parametreler	Değer	Birim
İzmir 2030 EA (%4,4) sayısı tahmini	105.815	adet
Yıllık ortalama sürüş mesafesi	13.415	km/yıl
İzmir EA toplam yıllık sürüş mesafesi	1.419.508.225	km/yıl
Benzinli araç ortalama yakıt tüketimi	6,5	litre/100 km
Dizel araç ortalama yakıt tüketimi	4,7	litre/100 km
LPG'li araç ortalama yakıt tüketimi	7,0	litre/100 km
Benzinli araç oranı	30%	oran
Dizel araç oranı	36%	oran
LPG'li araç oranı	34%	oran
İYM araç ortalama yakıt tüketimi	6,0	litre/100 km
2030 EA sayısı kadar İYM'li aracın yıllık yakıt tüketimi	85.843.308	litre
Benzinli araç emisyon faktörü	2,32	kg CO ₂ /litre
Dizel araç emisyon faktörü	2,70	kg CO ₂ /litre
LPG'li araç emisyon faktörü	1,50	kg CO ₂ /litre
Benzinli araç toplam emisyonu	60.025	tCO ₂
Dizel araç toplam emisyonu	84.198	tCO ₂
LPG'li araç toplam emisyonu	43.798	tCO ₂
2030 EA sayısı kadar İYM emisyonu	188.020	tCO ₂

İzmir kentindeki içten yanmalı motorlu araçların tamamının elektrikli araçlara dönüştürülmesi durumunda oluşabilecek karbon emisyon azaltımını değerlendirebilmek için FV+EA (%100) senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryo, 2030 yılı FV+EA senaryosundan farklı olarak araç batarya miktarının artırılmasını içermektedir. Bu doğrultuda, elektrikli araç kullanım oranının elektrik üretimine ve karbon emisyon azaltımına etkisi analiz edilmiştir. Bu senaryoda, İzmir'deki toplam araç sayısının 2030 yılında 2.400.681 adete ulaşacağı öngörülmüştür.

Tablo 3.14. 2030 yılı FV+EA (%100) İzmir kentindeki tüm araçların EA olduğu senaryosunda sera gazı azaltımı.

Parametreler	Değer	Birim
İzmir tüm araçlar EA (%100) senaryosu	2.400.681	adet
Yıllık ortalama sürüş mesafesi	13.415	km/yıl
İzmir EA (%100) toplam yıllık sürüş mesafesi	32.205.135.615	km/yıl
Benzinli araç ortalama yakıt tüketimi	6,5	litre/100 km
Dizel araç ortalama yakıt tüketimi	4,7	litre/100 km
LPG'li araç ortalama yakıt tüketimi	7,0	litre/100 km
Benzinli araç oranı	30%	oran
Dizel araç oranı	36%	oran
LPG'li araç oranı	34%	oran
İYM'li araç ortalama yakıt tüketimi	6	litre/100 km
2030 EA sayısı kadar İYM'li araç yakıt tüketimi	1.947.572.638	litre
Benzinli araç emisyon faktörü	2,32	kg CO ₂ /litre
Dizel araç emisyon faktörü	2,70	kg CO ₂ /litre
LPG'li araç emisyon faktörü	1,50	kg CO ₂ /litre
Benzinli araç toplam emisyonu	1.361.816	tCO ₂
Dizel araç toplam emisyonu	1.910.237	tCO ₂
LPG'li araç toplam emisyonu	993.662	tCO ₂
2030 tüm araçlar EA (%100) sayısı kadar İYM'li araç emisyonu	4.265.714	tCO ₂

Sera gazı emisyonlarındaki azaltımların hesaplanmasında, Türkiye'nin “ulusal elektrik şebekesi emisyon faktörleri” kullanılmaktadır. ETKB (2024c) verilerine göre, yeni kurulacak bir güneş veya rüzgâr enerji santrali ile üretilecek her 1 MWh'lik elektrik için 0,6345 ton CO₂ emisyon azaltımı sağlanmaktadır. Bu durumda, fotovoltaik sistemler kurularak üretilen elektrikten sağlanabilecek emisyon azaltımı şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Emisyon Azaltımı (t CO}_2\text{)} = \text{Üretilen Elektrik (MWh)} \times \text{Emisyon fak.} \left(\frac{\text{t CO}_2}{\text{MWh}} \right) \quad (22)$$

İzmir Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı'na göre, İzmir'in 2018 yılı sera gazı salımları 25.062.569 ton CO₂e olarak hesaplanmıştır (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2024b). Bu çalışma kapsamında, 2018 yılı emisyon seviyeleri referans alınarak, 2030 yılı için tasarlanan FV ve FV+EA senaryolarında üretilen yıllık elektrik enerjisi ve elektrikli araç kullanımının, 2018 yılına kıyasla ne kadar karbon emisyonu azaltımı sağlayacağı analiz edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.15'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.15. İzmir kentinde 2018 yılı baz alınarak 2030 yılı için modellenen senaryolara göre sera gazı azaltım oranları.

Senaryolar	Yıllık Elektrik Üretimi (MWh)	İzmir Karbon Salınımı Azaltımı (tCO ₂ /MWh)	İzmir Karbon Salınımı Toplamına Yüzdesel Etkisi
2030 İzmir Yalnızca FV	17.569.438	11.147.808,41	44,5%
2030 İzmir FV+EA (%4,44)	17.388.866	11.221.255,68	44,8%
2030 İzmir FV+EA (%100)	17.122.017	15.129.633,73	60,4%

Tablo 3.15'deki sonuçlara göre 2030 yılında İzmir kenti kullanılabilir çatı alanlarına fotovoltaik sistem kurulması durumunda, 11.147.808 ton CO₂e ve 2018 yılı karbon emisyonu miktarına göre %44,5 oranında karbon emisyonunu azaltılabileceği hesaplanmıştır.

2030 yılı EA projeksiyonuna göre 105.815 EA'nın İYM'li araç yerine geçeceği tahminine göre oluşturulan FV+EA (%4,4) sisteminin ise; yalnızca FV sistemine göre %0,66 artış ile 11.221.256 ton CO₂e ve 2018 yılı karbon emisyonu miktarına göre %44,8 oranında karbon emisyonunu azaltılabileceği hesaplanmıştır.

2030 yılındaki tüm İYM'li araçların EA olması varsayılarak oluşturulan FV+EA (%100) senaryosunda ise; yalnızca FV sistemine göre %35,7 artış ile 15.129.634 ton CO₂e ve 2018 yılı karbon emisyonu miktarına göre %60,4 oranında karbon emisyonunu azaltılabileceği hesaplanmıştır.

3.2.3. Ekonomik etki

FV+EA sistemlerinin ekonomik etkileri, enerji maliyetlerinin düşmesi ve ekonomik büyümeyi desteklemesi açısından değerlidir. Elektrik üretim maliyetlerinin düşmesi ve fosil yakıt bağımlılığının azalması, İzmir ekonomisine olumlu katkılar sağlar. FV sistemleri ile üretilen enerji, elektrikli araçların maliyetlerini düşürerek, kullanıcıların enerji giderlerini azaltır. FV+EA sistemlerinin yaygınlaşması, yeni iş imkanları ve yatırımları teşvik eder.

İzmir kenti için oluşturulan senaryolardaki ekonomik etki değerlendirmesinde toplam maliyet, geri ödeme süresi, LCOE ve NPV parametrelerinin değerlendirilmesi önemlidir. Toplam maliyet, FV+EA sistemlerini şehir düzeyinde uygulayabilmek için gerekli yatırım miktarı hakkında bilgi verir. Geri ödeme süresi, LCOE ve NPV ise yatırımın finansal fizibilitesini ölçmektedir. Geri ödeme süresi, toplam yatırımın ne kadar hızlı geri kazanılabileceğini gösterir ve yılın birikmiş bugünkü gelir değerinin ilk yatırıma eşit olduğu veya onu aştığı noktayı kontrol ederek nakit akışlarına göre hesaplanır. NPV, projenin ömrü boyunca genel karlılığını temsil eder ve proje süresine bölündüğünde yıllık NPV elde edilir.

Tüm senaryolar için veri girişleri SAM yazılımına girildikten sonra sistem çıktıları aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir:

Tablo 3.16. 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosu SAM yazılımı ekonomik analiz çıktıları.

2030 yılı "Yalnızca FV" senaryosu ekonomik analiz parametreleri	Değer
Seviyelendirilmiş nominal enerji maliyeti (LCOE)	4,09 cent/kWh
Sistemsiz elektrik faturası (1. yıl)	3.556.387.072 \$
Sistemli elektrik faturası (1. yıl)	1.884.692.736 \$
Sistem ile net tasarruf (1. yıl)	1.671.694.464 \$
Net bugünkü değer (NPV)	9.021.919.232 \$
Basit geri ödeme süresi	5,2 yıl
İndirimli geri ödeme süresi	6,9 yıl
Net sermaye maliyeti (C ₀)	7.258.680.832 \$

Tablo 3.17. 2030 yılı “FV+EA (%4,4)” sistem senaryosu SAM yazılımı ekonomik analiz çıktıları.

2030 yılı FV+EA (%4,4) senaryosu ekonomik analiz parametreleri	Değer
Seviyelendirilmiş nominal enerji maliyeti (LCOE)	4,34 cent/kWh
Sistemsiz elektrik faturası (1. yıl)	3.583.922.688 \$
Sistemli elektrik faturası (1. yıl)	1.827.710.464 \$
Sistem ile net tasarruf (1. yıl)	1.756.212.352 \$
Net bugünkü değer (NPV)	9.195.188.224 \$
Basit geri ödeme süresi	5,1 yıl
İndirimli geri ödeme süresi	6,6 yıl
Net sermaye maliyeti (C ₀)	7.398.356.480 \$

Tablo 3.18. 2030 yılı “FV+EA (%100)” sistem senaryosu SAM yazılımı ekonomik analiz çıktıları.

2030 yılı FV+EA (%100) senaryosu ekonomik analiz parametreleri	Değer
Seviyelendirilmiş nominal enerji maliyeti (LCOE)	9,13 cent/kWh
Sistemsiz elektrik faturası (1. yıl)	4.181.102.336 \$
Sistemli elektrik faturası (1. yıl)	2.092.745.600 \$
Sistem ile net tasarruf (1. yıl)	2.088.356.736 \$
Net bugünkü değer (NPV)	1.880.696.064 \$
Basit geri ödeme süresi	6,1 yıl
İndirimli geri ödeme süresi	8,5 yıl
Net sermaye maliyeti (C ₀)	10.427.580.416 \$

3.2.4. Yakıt maliyeti tasarrufu

2030 yılı FV+EA sistemi senaryosunda, içten yanmalı motorlu araçlardan (İYM) elektrikli araçlara geçiş durumunda yakıt tasarrufu ve ek finansal kazanç elde edilmesi beklenmektedir. Bu değerlendirme için benzinli, dizel ve LPG’li araç yakıt tüketim maliyetleri, bir aracın yıllık ortalama sürüş mesafesi, EA’lar için evde şarj maliyeti ve İYM’li araçların ortalama yakıt tüketimi bilgileri kullanılmaktadır.

14 Haziran 2024 fiyatları ile benzinli araç yakıt maliyeti 1,28\$, dizel araç yakıt maliyeti 1,29\$ ve LPG’li araç yakıt maliyeti 0,61\$ olarak belirlenmiştir (Petrol Ofisi, 2024). İzmir’deki benzinli, dizel ve LPG’li araçların oranları sırasıyla %30, %36 ve %34 olarak tespit edilmiştir (TÜİK, 2024d). Bu veriler ışığında, İYM’li araçların ortalama yıllık yakıt tüketim maliyeti yaklaşık 1,06\$ olarak hesaplanmıştır. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı, 2021)’ ya göre benzinli araçların 6.5 litre/100 km, dizel araçlar 4.7 litre/100 km ve LPG’li araçlar 7 litre/100 km ortalama yakıt tüketimi vardır.

TÜİK (2024e) verilerine göre, bir aracın yıllık ortalama sürüş mesafesi 13.415 km’dir. EA’ların ortalama elektrik tüketimi ise 17 kWh/100 km olarak belirlenmiştir (U.S. Department of Energy, 2024). Elektrikli aracın evde şarj

edilmesi durumundaki maliyeti, elektrik tüketim birim fiyatı olarak belirlenen 0,122 \$/kWh kabul edilmiştir (Bkz. Tablo 3.8).

Bu veriler dikkate alınarak, İYM’li araçlardan elektrikli araçlara geçişte tahmini yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu FV+EA (%4,4) senaryosunda 62.762.274\$ ve FV+EA(%100) senaryosunda 1.423.920.992\$ olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 3.19’da detaylı olarak sunulmuştur.



Tablo 3.19. İzmir kentinde 2030 yılı İYM'li araçlardan EA'lara geçişte tahmini yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu.

Girdi parametreleri (14 Haziran 2024)	Değer	Birim
2030 FV+EA (%4,4)		
Dolar kuru fiyatı	32,52	Türk lirası
Benzinli araç yakıt maliyeti	1,28	dolar
Dizel araç yakıt maliyeti	1,29	dolar
LPG'li araç yakıt maliyeti	0,61	dolar
İYM araç ortalama yakıt maliyeti	1,06	dolar
İYM araç yıllık ortalama sürüş mesafesi	13.415	km
EA ortalama elektrik tüketimi	15,9	kWh/ 100 km
Benzinli araç ortalama yakıt tüketimi	6,5	litre/100 km
Dizel araç ortalama yakıt tüketimi	4,7	litre/100 km
LPG'li araç ortalama yakıt tüketimi	7,0	litre/100 km
Benzinli araç oranı	30%	oran
Dizel araç oranı	36%	oran
LPG'li araç oranı	34%	oran
İYM araç ortalama yakıt tüketimi	6,0	litre/100 km
Evde şarj elektrik maliyeti	0,122	dolar
İzmir 2030 yılı FV+EA (%4,4) tahmini EA sayısı	105.815	adet
İzmir 2030 yılı FV+EA (%100) senaryosu EA sayısı	2.400.681	adet
EA'ların 2030 FV+EA (%4,4) toplam elektrik tüketimi	225.702	MWh
EA'ların 2030 FV+EA (%100) toplam elektrik tüketimi	5.120.617	MWh
Çıktı Parametreleri		
İYM'li araç için yıllık yakıt tüketim maliyeti (1 adet)	853	dolar
EA için yıllık yakıt tüketim maliyeti (1 adet)	260	dolar
FV+EA (%4,4) senaryosunda İYM'li araçlar durumunda toplam yıllık tüketim maliyeti	90.297.895	dolar
FV+EA (%4,4) senaryosunda EA'lar durumunda toplam yıllık tüketim maliyeti	27.535.621	dolar
FV+EA (%4,4) senaryosunda İYM'li araçlardan EA'lara geçişte yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu	62.762.274	dolar
FV+EA (%100) senaryosunda İYM'li araçlar durumunda toplam yıllık tüketim maliyeti	2.048.636.212	dolar
FV+EA (%100) senaryosunda EA'lar durumunda toplam yıllık tüketim maliyeti	624.715.221	dolar
FV+EA (%100) senaryosunda İYM'li araçlardan EA'lara geçişte yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu	1.423.920.992	dolar

2030 yılı FV+EA (%4,4) senaryosuna, içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçişte yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu olan 7.170.415.616\$ eklendiğinde, net bugünkü değer 16.365.603.840\$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.21).

2030 yılı FV+EA (%100) senaryosuna, içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçişte yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu olan 23.441.959.680\$ eklendiğinde, net bugünkü değer 25.322.655.744\$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.20).

Tablo 3.20. 2030 yılı FV+EA senaryolarında “Yakıt maliyeti tasarrufu” sonuçları.

FV+EA senaryoları 25 yıllık yakıt maliyeti tasarrufu		
2030 FV+EA (%4,4) NPV	9.195.188.224	dolar
2030 FV+EA (%4,4) Yakıt tasarruflu NPV	16.365.603.840	dolar
2030 FV+EA (%100) NPV	1.880.696.064	dolar
2030 FV+EA (%100) Yakıt tasarruflu NPV	25.322.655.744	dolar
FV+EA (%4,4) senaryosunda 25 yıllık kazanılan yakıt tüketim maliyeti tasarrufu (WACC: %7,5)	7.170.415.616	dolar
FV+EA (%100) senaryosunda 25 yıllık kazanılan yakıt tüketim maliyeti tasarrufu (WACC: %7,5)	23.441.959.680	dolar

4. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, İzmir kentine uygulanabilecek potansiyel fotovoltaik güç sistemleri (FVGS) ve bu sistemlerle birlikte çalışacak elektrikli araçlar ve bataryalar incelenmiştir. QGIS coğrafi bilgi sistemi yazılımı kullanılarak FVGS kurulabilecek çatıların tahmini alan hesaplaması yapılmıştır. İzmir kenti için toplam çatı alanı 188 km² olarak belirlenmiştir. Bu alanın ne kadarının kullanılabileceğine dair resmi bir çalışma bulunmamaktadır. İzmir kenti gibi büyük şehirlerde çatı alanlarının yaklaşık %30-%70'inin fotovoltaik sistemler için uygun olduğu kabul edilmektedir (NREL, 2016). Tez çalışmamızda, uydu görüntülerinden rastgele seçimlerle yapılan analizler ve mevcut literatürdeki benzer çalışmalara paralel olarak İzmir çatı alanlarının %35'inin fotovoltaik sistemler için uygun olduğu öngörülmüştür. Daha detaylı bir çalışma için, çatı alanlarının kullanılabilirliğini belirlemek üzere kent düzeyinde LiDAR (Işık Tespiti ve Menzil Belirleme) verileri ve CBS'nin kullanılması, dron ve benzeri hava araçları ile çatıların 3D modellerinin oluşturularak güneş ışığını engelleyen unsurların tespiti ve bina yük kapasitelerinin yapısal mühendislik analizleri ile fotovoltaik sistem taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çatı yönlerinin ve belirlenen en verimli azimut ve eğim açısı değerlerinin tüm çatılar için uygulanabilir olduğu varsayılmıştır. Elektrik üretiminde en yüksek verimliliği sağlayan açılarının kullanılması, gelecekteki tahminlerde en yüksek potansiyelin hesaplanmasını hedeflemektedir. Gelecek yıllarda FVGS teknolojilerinin gelişmesi ve daha verimli modüller ile bileşenlerin üretilmesi, yıllık elektrik üretim kapasitesini doğal olarak artıracaktır. Bu açıdan en verimli koşulların seçilmesi, gelecekteki tahminleri daha isabetli hale getirmektedir.

2024 yılı için kurulum maliyeti 1 \$/Wp, 2030 yılı için ise 0,7\$/Wp olarak kabul edilmiştir. Sistemlerin kurulum maliyetleri belirlenirken İzmir kentindeki sanayi, ticari ve konut binaları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bu öngörülen değerler, büyük ve küçük ölçekli tüm fotovoltaik güç sistemleri için ortalama maliyetleri yansıtmaktadır. Gelecek çalışmalarda, kent ölçeğinde bina kullanım tipleri ve çatı alanlarının ayrıntılı analizinin gerçekleştirilmesi, kurulum

maliyetlerinin belirlenmesinde daha detaylı ve kesin sonuçlar elde etme açısından önemlidir.

Bu çalışmada, IEA (Uluslararası Enerji Ajansı, 2021) tarafından sunulan yakıt tüketimi verileri dikkate alınarak, 2030 yılı için tahmini ortalama yakıt tüketimleri belirlenmiştir. Benzinli araçlar için 6.5 litre/100 km, dizel araçlar için 4.7 litre/100 km ve LPG'li araçlar için 7 litre/100 km değerleri esas alınmıştır. Bu değerler hem şehir içi hem de şehir dışı sürüş koşullarının ortalamalarını temsil eden global standartlara dayanmaktadır.

Ancak, günümüzde bu değerlerin üzerinde yakıt tüketimi gerçekleşebilmektedir. Özellikle şehir içi trafik koşulları, sürüş alışkanlıkları, duruş-kalkış sıklığı gibi etmenler, araçların ortalama yakıt tüketimini olumsuz yönde etkileyerek daha yüksek tüketim değerlerine yol açabilmektedir. Bununla birlikte, yanlış vites kullanımı, gereksiz hızlanma ve sürücünün yakıt verimliliğine uygun sürüş tekniklerini kullanmaması, gerçek yakıt tüketimlerini artıran başlıca faktörlerdir. Bu durum, IEA'nın ideal koşullar altında sunduğu yakıt tüketimi verilerinin sahada daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır.

2030 yılına yönelik tahminlerde ise araç teknolojilerindeki gelişmelerin, bu artışları dengeleyeceği öngörülmektedir. Özellikle motor hacimlerinin küçülmesi, yakıt verimliliği optimizasyonları, elektronik kontrol sistemlerinin gelişmesi ve düşük emisyonlu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla, araçların genel yakıt tüketiminde azalma beklenmektedir. Bu gelişmeler hem şehir içi hem de şehir dışı sürüşlerde daha düşük yakıt tüketim değerleriyle sonuçlanabilir. Dolayısıyla, 2030 yılı için tahmin edilen yakıt tüketimi değerlerinde IEA verilerinin referans alınması, ilerleyen teknoloji ve sürüş koşullarındaki iyileşmelerle mevcut dalgalanmaların dengeleneceği öngörüsüyle makul ve geçerli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde küresel bir sorun haline gelen iklim değişikliği ve küresel ısınma, geçmişte sadece sıcaklık artışı olarak değerlendirilmekteydi. Bu olayın etkilerinin uzun yıllar sonra ortaya çıkacağı yanlıgısı nedeniyle, sera gazı salınımını azaltmak için gerekli önlemler alınmamış; ormansızlaşma, endüstriyel tesislerin yaygınlaşması, yoğun tarım ve hayvancılık faaliyetleri, ulaşım ve enerji üretiminde fosil yakıt kullanımının artması gibi durumlar yaşanmıştır. Son dönemde yapılan araştırmalar, bu faaliyetlerin neden olduğu sera gazı emisyonlarının önlem alınmadığı takdirde ciddi sorunlara yol açacağını ortaya koymuştur.

Artan sıcaklıklar, kuraklık, sel ve kasırğa gibi aşırı hava olaylarını tetikleyebilirken, deniz seviyelerinin yükselmesi buzulların erimesine ve kıyı bölgelerinde su baskınlarına yol açabilir. Bunun yanı sıra, okyanuslardaki asitlik seviyesinin yükselmesiyle deniz ekosisteminin zarar görmesi, habitatların kaybolması ve tarımsal verimliliğin düşmesi gibi sonuçlar ortaya çıkacaktır. Bu durumlar, insanları doğdukları bölgelerden göç etmeye zorlayacak ve sıcaklık artışı nedeniyle çeşitli hastalıkların yayılması ve su kaynaklarının azalması gibi sorunlarla karşı karşıya bırakacaktır.

Sera gazı salınımlarının artışının ekosistemler, ekonomiler ve insan hayatı üzerinde ciddi tehdit oluşturduğu fark edildiğinde, ülkelerin bireysel çözüm arayışları yerini bölgesel ve küresel iş birliklerine ve kapsamlı çözüm arayışlarına bırakmıştır. Uluslararası toplum, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyoto Protokolü, Paris İklim Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi anlaşmalar aracılığıyla bir araya gelerek, sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik kapsamlı stratejiler geliştirmiştir. Bu anlaşmalar doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, enerji verimliliğinin artırılması ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi gibi hedefler belirlenmiştir.

Türkiye, sera gazı emisyonlarını azaltma hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik üretimini üç kat artırmış ve yerli enerji kaynaklarını çeşitlendirmede kayda değer ilerlemeler sağlamıştır.

Ancak kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtlarda dışa bağımlılığı halen devam etmektedir. Son yıllarda ise Türkiye, enerji sektöründe sera gazı salınımlarını düşürmek ve iklim değişikliğine uyum sağlamak amacıyla yenilenebilir enerjiye yatırımlarını önemli ölçüde artırmıştır. 2021-2022 yılları arasında faaliyete geçen yeni enerji santrallerinin yaklaşık %78'i yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanmaktadır. Bu dönemde, fotovoltaik sistemlerin kullanımı ve güneş enerjisinin yaygınlaştırılması da bu stratejik planlamanın önemli bir parçası olmuştur.

Bu çerçevede, İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2030 yılına kadar net sıfır hedefine yönelik olarak sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Bu çalışmada, İzmir şehri için belirlenen bu hedef doğrultusunda, elektrikli araçlarla entegre çatı üstü fotovoltaik sistemlerin emisyon azaltma potansiyeli incelenmiş ve ekonomik analizleri yapılmıştır. Analizde, 2030 yılı için “Yalnızca FV” sistem, 2030 yılı FV+EA (%4,4) ve FV+EA (%100) senaryoları oluşturulmuştur. Bu senaryolar üzerinden yapılan analizler, İzmir’in enerji dönüşüm stratejisine yönelik önemli veriler sağlamaktadır.

İzmir kentinde potansiyel fotovoltaik güç sistemleri (FVGS) kurulumu için uygun çatı alanı tahmini yapılmıştır. Coğrafi bilgi sistem yazılımı “QGIS” kullanılarak İzmir kentinin toplam çatı alanı 188 km² olarak belirlenmiştir. Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda, gölgeleme faktörleri ve sistem kurulumuna uygun olmayan çatıların etkisi göz önünde bulundurularak, toplam çatı alanının %35'inin kullanılabilir olduğu varsayılmış ve bu doğrultuda 65,8 km² alan hesaplanmıştır. Bu durumda, kurulabilecek toplam FV gücü 9,4 GW olarak tespit edilmiştir. 2030 yılı senaryolarında ise bina sayısındaki artış nedeniyle bu değer %10 artarak 72,38 km² kullanılabilir çatı alanı ve 10,34 GW kurulu güç olarak hesaplanmıştır.

Sistem modellemesinde “System Advisor Model (SAM)” yazılımı kullanılmıştır. SAM, pratik kullanımı, hızlı işlem kapasitesi ve ücretsiz erişim imkânı ile fizibilite analizleri için ideal bir araç olarak öne çıkmaktadır. Diğer yazılımlarla kıyaslandığında, SAM daha kullanıcı dostu bir arayüze sahiptir. Ancak, analiz sonuçlarının doğruluğu açısından girilen verilerin doğruluğu ve kullanıcıların bu veriler hakkında bilgi sahibi olmaları büyük önem taşımaktadır.

Analizde, güncel olarak kullanılan modül ve evirici seçimleri yapılmıştır. Doğru akım/alternatif akım (d.a./a.a.) oranı, sistemin optimum verimliliğini sağlamak amacıyla 1.2 olarak belirlenmiştir. Panellerin eğim açısı $30,3^\circ$ ve azimut açısı güney yönüne 180° bakacak şekilde, en yüksek verim elde edilecek şekilde optimize edilmiştir.

Çatıların eğiminin azalmasıyla birlikte yapısal sorunlar artış göstermektedir. Eğimli çatı yapıları, yağmur sularının binaya sızma riskini önemli ölçüde azaltır. Soğuk bölgelerde yoğun kar yağışı, çatıların statik yüklerini etkileyen önemli bir faktördür. Çatı eğimi $\%30$ 'un üzerine çıktığında, kar yükünden kaynaklanan kuvvetlerde azalma sağlanmakta, bu da deprem yükleri açısından ek bir avantaj sunmaktadır (Alptekin ve Kasapoğlu, 2015). Fotovoltaik sistemlerin elektrik üretimi açısından verimli açılarda yerleştirilmesinde, mimari ve statik yapının da dikkate alınması gerekliliği aşikardır. Gelecek çalışmalarda, kent ölçeğinde çatı mimarisi ve bina statikleri ile ilgili detaylı analizlerin yapılması, modellemenin daha kesin sonuçlar verebilmesi açısından önem arz etmektedir.

İzmir'deki elektrikli araç sayısının 2030 yılında 108.815 adede ulaşacağı öngörülmüştür. Elektrikli araçların batarya kapasitesi 88,5 kWh olarak belirlenmiş ve şarj seviyesi $\%50$ ile $\%95$ arasında sınırlandırılmıştır. Batarya teknolojilerindeki ilerlemeler ve araç paylaşım sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte depolama kapasitesinde ve elektrik üretiminde artış beklenmektedir.

İzmir kentinin 2024 yılı için öngörülen elektrik tüketimi yaklaşık 23 TWh iken, 2030 yılı için bu tüketim 29,2 TWh olarak tahmin edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, 2030 yılında “Yalnızca FV” sistem yıllık elektrik üretiminin yaklaşık 17.6 TWh olacağı belirlenmiştir. 2030 yılı FV+EA ($\%4,4$) senaryosunda, yıllık elektrik üretimi 17,4 TWh olarak tahmin edilirken, tüm araçların EA olması durumu ele alınan FV+EA ($\%100$) sisteminin yıllık elektrik üretimi 17,1 TWh olarak hesaplanmıştır. Elektrikli araçların entegre edildiği senaryolarda, elektrik üretimindeki hafif azalma, bataryaların şarj ve deşarj süreçlerinde meydana gelen enerji kayıplarından ileri gelmektedir.

Türkiye'nin 2023 yılında FV sistemlerden elde ettiği toplam yıllık elektrik üretimi 18,61 TWh olarak kaydedilmiştir (EPDK 2024b). Bu veriler karşılaştırıldığında, yalnızca İzmir şehri çatılarına kurulacak FV sistemler ile yıllık 17,6 TWh elektrik üretilebilmesi, Türkiye'nin 2023 yılındaki tüm fotovoltaik enerji santrallerinden üretilen elektriğin %88,7'sine eşdeğer olacaktır. Kaldı ki, fotovoltaik sistemlerin uygulama alanlarından biri olan çatı FV sistemlerin etkin sonuçlarının yanı sıra, arazi tipi FV sistemler, su üzerinde kurulabilen yüzer FV sistemler ve tarım arazilerinde enerji üretimini mümkün kılan agrifotovoltaik sistemlerin de entegrasyonu ile kentlerdeki karbon salınımının azaltılması ve temiz enerji elde edilmesi konusunda önemli bir adım atılmış olacaktır. Bu çeşitli fotovoltaik uygulamaların bir araya gelmesi, kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji çözümlerinin benimsenmesine ve çevresel faydaların artırılmasına katkıda bulunacaktır.

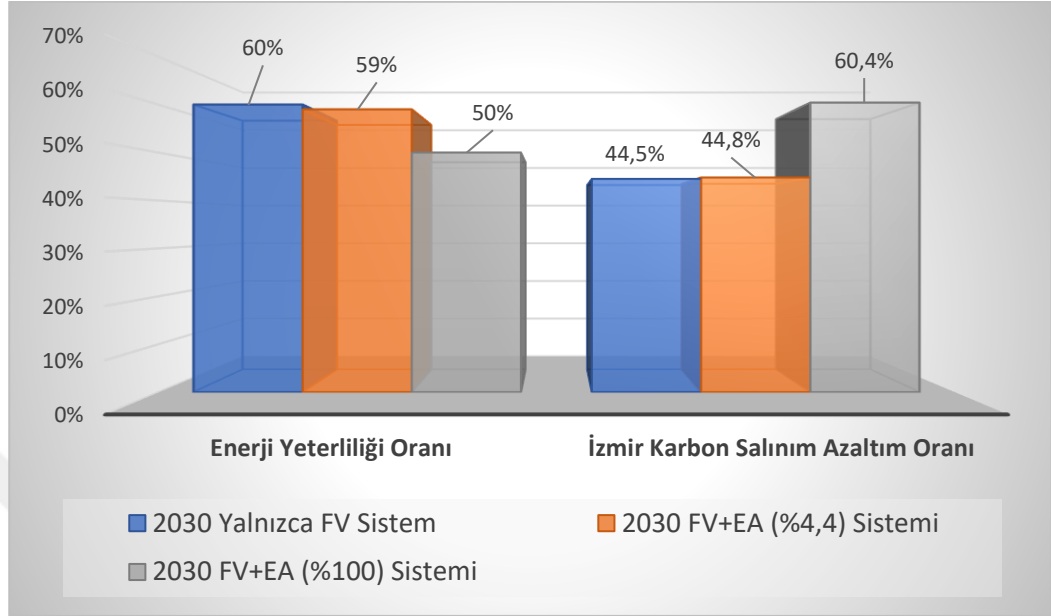
İzmir kenti için modellenen senaryoların uygulanması sonucunda, enerji güvenliği, karbon emisyonlarının azaltımı ve ekonomik kazançlar açısından ortaya çıkacak etkiler incelenmiştir. Enerji güvenliği bağlamında, İzmir kentinin elektrik ihtiyacının 2030 yılında “Yalnızca FV” sistem ile %61'inin, FV+EA (%4,4) sistemi ile %59'unun ve FV+EA (%100) sistemi ile %50'sinin; fotovoltaik sistemler ve FV+EA sistemleri ile karşılanabileceği tespit edilmiştir (Şekil 3.18).

2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosunda 11.147.808 ton CO₂ emisyonunun engellenebileceği hesaplanmıştır. Bu karbon salınımı azaltımı, İzmir kentinin 2018 yılındaki toplam karbon salınım miktarını %44,5 düşürmektedir.

2030 yılı FV+EA (%4,44) senaryosunda ise 11.221.226 ton CO₂ emisyonunun azaltılabileceği öngörülmüştür. Bu değer içerisindeki 188.020 ton CO₂ azaltımı, içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçiş ile sağlanmıştır.

Elektrikli araçların karbon salınımına etkisinin daha belirgin bir şekilde anlaşılabilmesi için İzmir kentindeki tüm araçların elektrikli araç olması senaryosu "FV+EA (%100)" oluşturulmuştur. Bu senaryoda, emisyon azaltımı 15.129.634 ton CO₂ değerine ulaşmıştır. FV+EA (%100) senaryosunda, elektrikli araçların FV

sistemlere entegrasyonu ile sağlanan karbon salınım azaltımı, İzmir kentinin 2018 yılındaki toplam karbon salınım miktarını %60,4 oranında düşürmektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. İzmir kenti için modellenen senaryoların enerji yeterliliği ve karbon salınım etkisi oranları.

Elektrikli araçların sistemlere dahil edilmesi, karbon salınımının azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Fotovoltaik güç sistemlerinin artışıyla, yüksek elektrik üretim periyotlarında şebekeye geri verilen elektrik, şebekelerde dalgalanmalara yol açabilir. Elektrikli araçların doğal bir akü olarak sisteme entegre edilmesi, şebeke altyapısında oluşabilecek yüklerin çözümüne katkıda bulunacaktır.

Yapılan maliyet analizleri sonucunda, 2024 yılı için FV sistem birim maliyeti 1 \$/Wp, 2030 yılı Yalnızca FV sistem birim maliyeti 0,7\$/Wp, 2030 yılı için FV+EA (%4,44) senaryosu birim maliyeti 0,72\$/Wp ve 2030 yılı için FV+EA (%100) sistem birim maliyeti 1,01\$/Wp olarak belirlenmiştir. 2030 yılına gelindiğinde FV sistem birim maliyetlerinin 1\$/Wp'den 0,7\$/Wp'ye düşeceği görülmektedir. Projeksiyonlarda, maliyetlerin tamamen özsermaye ile finanse edileceği düşünülmüştür.

Analiz sonuçlarına göre, 2030 yılı “Yalnızca FV” sistem senaryosunda reel seviyelendirilmiş enerji maliyeti LCOE 4,09 cent/kWh, net bugünkü değer (NPV) 7.258.680.832\$, basit geri ödeme süresi 5,2 yıl ve iskontolu geri ödeme süresi 6,9 yıl olarak hesaplanmıştır.

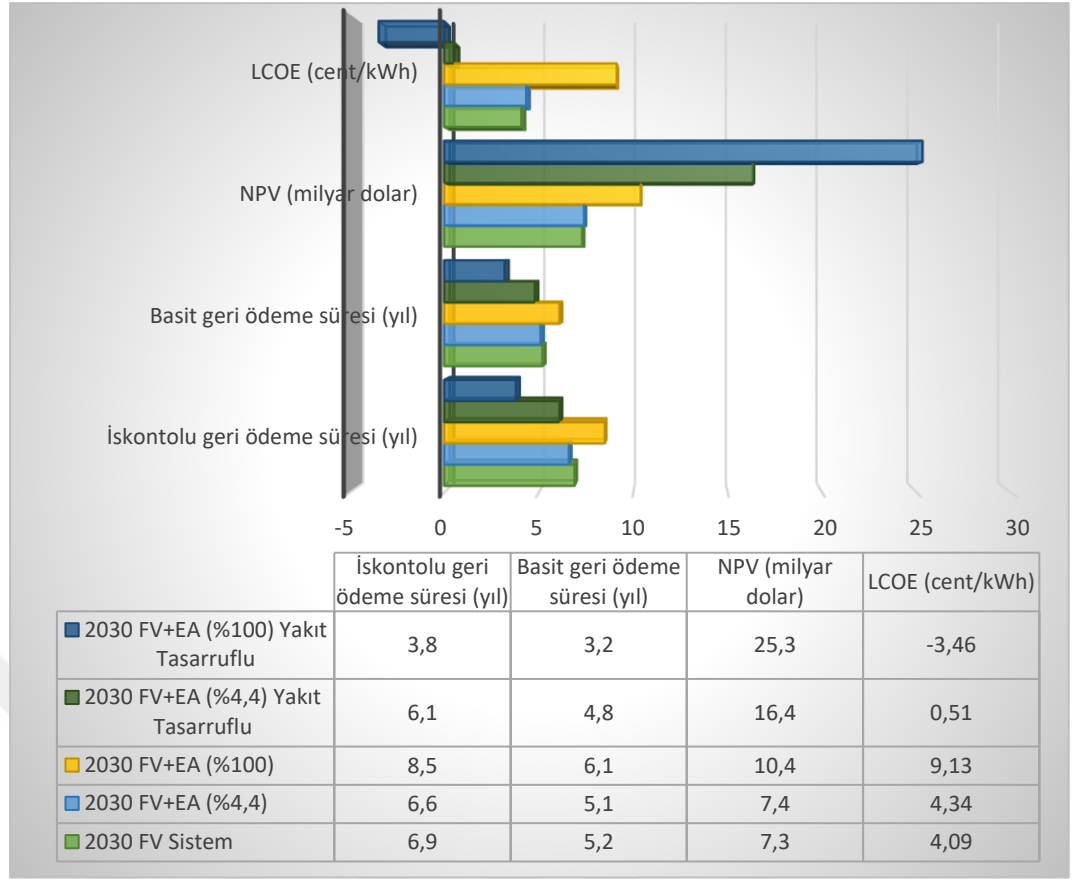
2030 yılı FV+EA (%4,4) sistem senaryosunda, LCOE 4,34 cent/kWh, NPV 7.398.356.480\$, basit geri ödeme süresi 5,1 yıl ve iskontolu geri ödeme süresi 6,6 yıl olarak hesaplanmıştır.

2030 yılı FV+EA (%100) sistem senaryosunda, LCOE 9,13 cent/kWh, NPV 10.427.580.416\$, basit geri ödeme süresi 6,1 yıl ve iskontolu geri ödeme süresi 8,5 yıl olarak bulunmuştur.

2024 yılı için global ortalama seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) değerleri, konut çatı tipi fotovoltaik sistemler için 11,7 – 28,2 cent/kWh, ticari ve endüstriyel çatı FV sistemleri için 4,9 – 18,5 cent/kWh, büyük ölçekli FV sistemler için 2,4 – 9,6 cent/kWh ve büyük ölçekli enerji depolamalı FV sistemler için 6 – 21 cent/kWh aralığında değişmektedir (Lazard, 2024). Bu bağlamda, 2030 yılı için elde edilen sonuçların global maliyet aralıkları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

İzmir kenti için yapılan simülasyonlarda, kapasite faktörleri 2030 “Yalnızca FV”, 2030 FV+EA (%4,4) ve 2030 FV+EA (%100) sistem senaryoları için sırasıyla %19,4, %19,2 ve %18,9 olarak bulunmuştur. Dünyada iyi güneşlenme koşullarına sahip bölgelerde FV sistemlerin kapasite faktörleri genellikle %15-%25 arasında değişmektedir. Bu oranlar, İzmir’in güneşlenme koşulları ve uluslararası ortalamalar göz önüne alındığında, beklenen aralıkta yer almaktadır.

Şekil 3.19’da senaryoların ekonomik analiz yöntemlerinin sonuçları özet olarak sunulmuştur.



Şekil 3.19. İzmir kenti için modellenen senaryolara göre ekonomik analiz sonuçları.

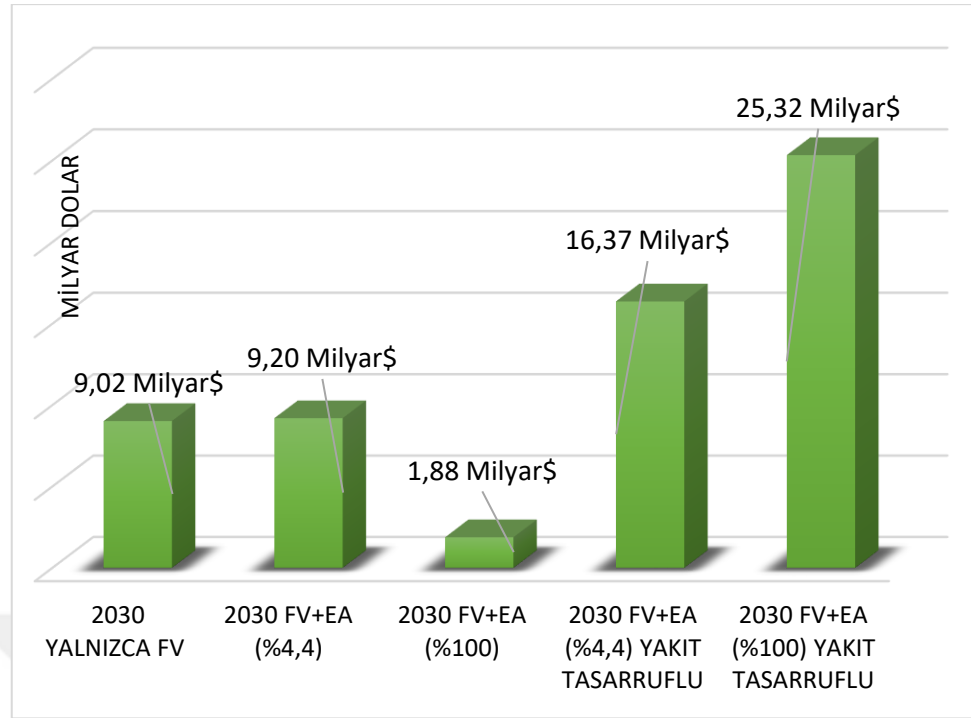
“FV+EA” senaryolarında elde edilen sonuçlar, yakıt tüketimi maliyeti tasarrufunun sistemlere dahil edilmediği durumu yansıtmaktadır. Bu nedenle, elektrikli araçların projeye olan finansal katkıları geri ödeme süresi, LCOE ve NPV gibi kritik finansal göstergelere yansıtılmamıştır. Eğer yakıt tasarrufları 25 yıllık proje süresi boyunca ek kazanç olarak dahil edilseydi, FV+EA senaryolarında geri ödeme süreleri kısalacak, NPV değerleri oldukça yüksek seviyelere çıkacak ve LCOE değerlerinde ise önemli bir düşüş gözlemlenecekti.

Yakıt tasarruflarının dahil edilmemesi ile “FV+EA” senaryolarında elde edilen finansal göstergeler, FV sistemlerin (Yalnızca FV) değerleriyle daha uygun bir şekilde kıyaslanabilmiştir. Eğer yakıt tasarrufları dahil edilseydi, FV+EA senaryolarındaki finansal göstergeler çok daha avantajlı görünecek, bu da FV sistemlerle karşılaştırıldığında yanlış yönlendirilmiş veya aşırı iyimser sonuçlar doğurabilecekti. Özellikle FV+EA (%100) senaryosunda, tüm motorlu araçların elektrikli araçlarla değiştirilmesi ve yakıt tasarruflarının sisteme dahil edilmesi,

finansal getiriye büyük ölçüde artırarak, NPV değerlerinin aşırı yüksek ve LCOE değerlerinin negatif çıkmasına neden olmuştur. Geri ödeme sürelerinin de yakıt tasarruflarıyla birlikte önemli ölçüde kısaldığı görülmüştür. Bu sebeple, finansal analiz bölümünde yakıt tasarrufları dahil edilmemiş, ancak bilgi amaçlı olarak Şekil 3.19'da sonuçlar gösterilmiştir.

Yakıt tasarrufları doğrudan finansal analizlerde değerlendirilmek yerine, ayrı bir hesaplama yapılarak FV sistemlerden elde edilen NPV ile yakıt tasarruflarından sağlanan NPV ayrı ayrı belirlenmiş ve bu iki değer toplanarak toplam NPV hesaplanmıştır. Bu yöntem, FV sistemlerin ve EA'ların projeye katkılarını ayrı ayrı analiz etme fırsatı sunmuş, böylece hem finansal hem de karbon salınımı açısından daha net bir değerlendirme yapılabilmiştir. FV sistemlerinin ve elektrikli araçların projeye olan bireysel etkilerinin ayrı ayrı analiz edilmesi, toplam etkinin doğru bir şekilde hesaplanmasını ve bu etkilerin finansal sonuçlara şeffaf bir şekilde yansıtılmasını sağlamıştır. Bu düzenleme, yakıt tasarrufunun dahil edilmesi durumunda geri ödeme süresi, LCOE ve NPV gibi finansal parametrelerde oluşacak önemli değişiklikleri de net bir şekilde ifade etmektedir.

İYM'li araçlardan elektrikli araçlara geçişte tahmini yıllık yakıt tüketim maliyeti tasarrufu FV+EA (%4,4) senaryosunda 62.762.274\$ ve FV+EA(%100) senaryosunda 1.423.920.992\$ olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler ile senaryolarda bulunan NPV değerleri toplanarak Şekil 3.20'deki FV+EA yakıt tasarruflu projeksiyonları elde edilmiştir.



Şekil 3.20. Senaryoların NPV sonuçları.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, elektrikli araçlarla entegre çatı fotovoltaik sistemlerin İzmir'de ve genel olarak Türkiye'de uygulanabilirliğini göstermektedir. Elde edilen bulgulara göre, bu sistemler enerji güvenliğini artırmakta, çevresel faydalar sağlamakta ve ekonomik büyümeyi desteklemektedir. FV+EA sistemlerinin yaygınlaştırılması için devlet teşviklerinin artırılması ve yenilenebilir enerji altyapılarının geliştirilmesi önerilmektedir. Elektrikli araçlar için şarj altyapısının yaygınlaştırılması ve iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Şarj istasyonlarının sayısının artırılması ve şarj sürelerinin kısaltılması, kullanıcıların bu teknolojilere geçişini hızlandırabilir.

Yenilenebilir enerji ve batarya teknolojileri konusundaki araştırma ve geliştirme çalışmalarına daha fazla yatırım yapılması tavsiye edilmektedir. Daha verimli enerji çözümleri geliştirilerek FV+EA sistemlerinin etkinliği artırılabilir. Bu sayede, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılması ve iklim değişikliği ile mücadelede önemli adımlar atılması mümkündür. FV+EA sistemlerinin başlangıç yatırım maliyetleri yüksek olabilir, ancak Türkiye'de yenilenebilir enerji ve elektrikli araçlara yönelik devlet teşvikleri, FV+EA sistemlerinin ekonomik avantajlarını artıracaktır. Vergi indirimleri, hibe programları ve düşük faizli krediler

gibi destekler, bu sistemlerin maliyetini düşürerek yaygınlaşmasını sağlayabilir. Ayrıca, yenilenebilir enerji politikalarının sürekli ve kararlı bir şekilde desteklenmesi önem arz etmektedir. Enerji politikalarının uzun vadeli ve sürdürülebilir olması, FV+EA sistemlerinin başarısı için kritik bir faktördür.

FV+EA sistemlerinin çevresel faydalarını artırmak amacıyla halkın bilinçlendirilmesi ve çevresel farkındalığın artırılması önerilmektedir. Eğitim ve farkındalık kampanyaları düzenlenerek, sürdürülebilir enerji kullanımının önemi vurgulanmalıdır. Elektrikli araçların ve fotovoltaik sistemlerin toplumsal kabulü, bu teknolojilerin yaygınlaşması açısından önemlidir. Kullanıcıların bu sistemlere olan güveninin artırılması ve kullanım kolaylıkları hakkında bilgilendirilmesi faydalı olacaktır.

Özetle, yenilenebilir enerji teknolojilerinin, özellikle fotovoltaik güç sistemlerinin maliyetlerindeki keskin düşüşler ve karbon salınımını azaltmadaki başarıları, iklim değişikliği sorununa çözüm bulmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, fosil yakıtlı araçlar yerine elektrikli araçlara geçilmesi ve bu teknolojilerin fotovoltaik sistemlerle entegre çalışması, karbon salınımının azaltılmasında başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. İzmir kenti özelinde hedeflenen karbon azaltımının en etkili yollarından biri olacağı değerlendirilmektedir. Bu tür değerlendirmelerin tüm şehirler ve ülkeler için yapılması, bu konudaki farkındalığın artmasına ve daha geniş çapta uygulanabilir çözümler geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdalla, M. A. A., Min, W., Bing, W., Ishag, A. M. and Saleh, B.,** 2023, Double-layer home energy management strategy for increasing PV self-consumption and cost reduction through appliances scheduling, EV and storage. *Energy Reports*, 10, 3494-3518p.
- Adak, S., Cangi, H. ve Yılmaz, A. S.,** 2019, Fotovoltaik Sistemin Çıkış Gücünün Sıcaklık ve Işımaya Bağlı Matematiksel Modellemesi ve Simülasyonu. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 316-327.
- Akalın, M.,** 2014, İklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkileri: Bu etkileri gidermeye yönelik uyum ve azaltım stratejileri, *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 358s.
- Altunbaş, S.,** 2019, Ağırlıklı Ortalama Sermaye Maliyeti (WACC), <https://www.linkedin.com/pulse/a%C4%9F%C4%B1rl%C4%B1kl%C4%B1-ortalama-sermaye-maliyeti-wacc-siyami-altunba%C5%9F/>, (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2024).
- Arıkboğa, Ü.,** 2019, Çevre Politikasının Ekonomik Araçları Ve Türkiye’de Belediye Uygulamaları, *Marmara Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 41(1), 23-50.
- Arowolo, W. and Perez, Y.,** 2023, Rapid decarbonization of Paris, Lyon and Marseille's power, transport and building sectors by coupling rooftop solar PV and electric vehicles. *Energy for Sustainable Development*, 74, 196-214p.
- Arslan, F. ve Türkdoğan, S.,** 2022, Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği, *J. Innovative Eng. Nat. Sci.*, c. 2, s. 2, ss. 77s.
- Atalay Ö., Yorgun B. ve Erdem R.,** 2019, Fotovoltaik (Pv) Güneş Enerjisi Sistemleri Ve Çatı Uygulamaları, 8. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Mersin, 2s.
- Atik, H.,** 2017, Küresel Isınma-İklim Değişikliği ve Sosyo-Ekonomik Etkileri, *Nobel Akademi Yayıncılık, Ankara*.
- Atmaca, A. ve Atmaca, N.,** 2022, Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130691.
- Avrupa Çevre Ajansı (AÇA),** 2015, Değişen Bir İklimde Yaşamak, 5s.
- Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., Palombo, A., & Russo, G.,** 2022, Energy virtual networks based on electric vehicles for sustainable buildings: System modelling for comparative energy and economic analyses. *Energy*, 242, 122931.
- Bayraç, N. H. ve Doğan, E.,** 2016, Türkiye’de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 11(1), 35-36s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Berberoğlu, S.**, 2021, İklim Değişikliğine Uyum Konusunda Kurumsal Kapasitenin Geliştirilmesi Projesi, Modül 1: Yönetici Özeti, Ankara, <https://iklimiduy.org/modul/iklimiduymodul1.pdf>, (Erişim tarihi: 25 Şubat 2024).
- Birinci, N.**, 2020, Karbon Fiyatlandırmasından Elde Edilen Gelirlerin Kullanımı ve Etkinliği, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(19), 155-179.
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi**, 2024, “Kyoto Protokolü”, (1998) https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/kyoto_protokol.pdf , Ek-A, (Erişim tarihi: 1 Mart 2024).
- BNEF**, 2021, Bloombergnef’s Global EV Outlook 2021: Commercial Vehicles, <https://www.bloomberg.com/professional/insights/trading/bloombergnefs-global-ev-outlook-2021-commercial-vehicles/>, (Erişim tarihi: 5 Mayıs 2024).
- Brown, L. R., Larsen, J., Dorn, J. G. and Moore, F. C.**, 2008, Time for Plan B. *Earth Policy Institute*, 1-12p.
- Boztepe, M.**, 2017, Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler. *EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni*, 321, 13-17.
- Borge-Diez, D., Icaza, D., Açikkalp, E. and Amaris, H.**, 2021, Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share. *Energy*, 237, 121608.
- Buonomano, A., Calise, F., Cappiello, F. L., Palombo, A. and Vicidomini, M.**, 2019, Dynamic analysis of the integration of electric vehicles in efficient buildings fed by renewables. *Applied Energy*, 245, 31-50p.
- Can, F.**, 2018, Türkiye’de Uygulanan ve Gönüllü Karbon Piyasalarında Faaliyette Bulunan Projelerin Paydaş Katılımı Açısından Değerlendirilmesi, *Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 1-17.
- CAT**, 2019, İklim Eylemini Artırmak Serisi Türkiye Kasım 2019, 140s.
- CFI**, 2024, Net Present Value (NPV), <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/net-present-value-npv/>, (Erişim tarihi: 21 Mayıs 2024).
- Ceyran, Z.**, 2024, Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemleri, <https://docplayer.biz.tr/14755766-Fotovoltaik-gunes-enerji-sistemleri.html>, (Erişim tarihi: 8 Ağustos 2024).
- Chang, S., Cho, J., Heo, J., Kang, J. and Kobashi, T.**, 2022, Energy infrastructure transitions with PV and EV combined systems using techno-economic analyses for decarbonization in cities. *Applied Energy*, 319, 119254.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- COP28 UAE**, 2024, Global Renewables And Energy Efficiency Pledge, <https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge>, (Erişim tarihi: 17 Nisan 2024).
- Çekirdek, M.**, 2017, Fotovoltaik Güç Santrallerinin Tekno-Ekonomik Analizi: Türkiye Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, 13s.
- Çelebi, B. ve Kaya, K.**, 2022, *Sürdürülebilir Yaşam İçin Geleceği Kurtarmak: Türkiye’de Yerel İklim Değişikliği Politikası*. Uluslararası Eşitlik Politikası Dergisi, 2(2), 35s.
- Çelikleş M. S. ve Kırac B.**, 2019, Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Tesisin Uzun Erimli Teknik ve Ekonomik Analizi, *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi* 2019, 2(2): 101-112s.
- Çelikyay, H. H. ve Bayraktar, H. K.**, 2010, İklim Politika Belgelerinde İklim Dostu Kentler ve Dirençlilik Stratejileri, *HUMANITAS-Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(İncos VIII Özel Sayısı), 87-107.
- Çilli K.**, 2023, Güneş Enerjisi Kurulum Maliyeti (Çatı), <https://www.gunes.net.tr/gunes-enerjisi-kurulum-maliyeti-cati/#:~:text=bir%20rakam%20yazd%C4%B1k,-,G%C3%BCne%C5%9F%20enerjisi%20kurulum%20maliyeti%202023,%24%20veya%2017000%24%20olarakta%20de%C4%9Fi%C5%9Febilir>, (Erişim tarihi: 20 Haziran 2024).
- Çubukçu, M. ve Gümüş, H.**, 2020, Performance analysis of a grid-connected photovoltaic plant in eastern Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100724.
- Dam, M.M.**, 2014, Sera Gazı Emisyonlarının Makroekonomik Değişkenlerle İlişkisi: OECD Ülkeleri İçin Panel Veri Analizi, Yayımlanmamış Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi/Sosyal Bilimler Enstitüsü/İktisat Anabilim Dalı, Aydın, 27s.
- Demir, A.**, 2009, Küresel iklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem kaynakları üzerine etkisi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 45s.
- Demir, A.**, 2022, Paris Anlaşması ve 26. Taraflar Konferansı (COP 26)’nda Türkiye değerlendirmesi: yükümlülükler ve sorumluluklar. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, 15(2), 162-170.
- Demir U.**, 2024, İç Kârlılık Oranı, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99757/mod_resource/content/1/14%20%C4%B0%C3%A7%20K%C3%A2r%20Oran%C4%B1.pdf, (Erişim tarihi: 21 Mayıs 2024).
- Deniz, E.**, 2013, Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar, *Akademi Enerji, İzmir*, 1-14s.
- Deresoy, Z.**, 2024, Her yıl 990 milyar dolar değerinde gıdayı çöpe atıyoruz, <https://www.bilimup.com/her-yil-990-milyar-dolar-degerinde-gidayi-cope-atiyoruz>, (Erişim tarihi: 8 Ağustos 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Deroubaix, P., Kobashi, T., Gurriaran, L., Benkhelifa, F., Ciais, P. and Tanaka, K.,** 2023, SolarEV City Concept for Paris. *Applied Energy*, 350, 121762.
- DMİ (Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü),** 2015a, Yeni Senaryolar İle Türkiye İklim Projeksiyonları Ve İklim Değişikliği, Ankara, 4s.
- DMİ (Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü),** 2015b, *Yeni Senaryolar İle Türkiye İklim Projeksiyonları Ve İklim Değişikliği*, Ankara, 6s
- Doğan, S. ve Tüzer, M.,** 2011, Küresel iklim değişikliği ve potansiyel etkileri. *CÜ İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 12(1), 21-34.
- Doğan, S.,** 2018, Şebeke Etkileşimli Fotovoltaik Güç Sistemlerinin İncelenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 5s.
- Dossow, P. and Kern, T.,** 2022, Profitability of V2X under uncertainty: Relevant influencing factors and implications for future business models. *Energy Reports*, 8, 449-455p.
- Dwyer, S., Dargaville, R., Nagrath, K., Thorpe, A., Milton, A., James, B., ... and Paevere, P.,** 2021, N1 Opportunity Assessment: Electric Vehicles and the Grid.
- EMBER,** 2023, Çatılarda 120 GW'tan Fazla Potansiyel Mevcut, <https://ember-climate.org/tr/analizler/ara%C5%9Ft%C4%B1rma/catilarda-120-gwtan-fazla-potansiyel-mevcut/>, (Erişim tarihi: 20 Haziran 2024)
- EMO (Elektrik Mühendisleri Odası),** 2019, EPDK - Lisanssız Elektrik Üretimi Konusunda Örnek Uygulamalar, https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=93667, (Erişim tarihi: 20 Haziran 2024).
- EMO (Elektrik Mühendisleri Odası),** 2024, Pv Tesislerde Yüksek Dc-Ac Oranı Seçimi ve Fırsatlar, https://www.emo.org.tr/ekler/34cf73066426f46_ek.pdf, , (Erişim tarihi: 15 Ocak 2024).
- Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı,** 2024, Emisyon Ticareti - Zorunlu Karbon Piyasaları, https://evcedruzgar.enerji.gov.tr/iklim_deg/emisyon_ticareti.aspx, (Erişim tarihi: 15 Nisan 2024).
- Elamim, A., Hartiti, B., Haibaoui, A., Lfakir, A. and Thevenin, P.,** 2018, Performance evaluation and economical analysis of three photovoltaic systems installed in an institutional building in Errachidia, Morocco. *Energy Procedia*, 147, 121-129.
- EPA (United States Environmental Protection Agency),** 2024, Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories, <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/ghg-emission-factors-hub-2024.pdf>, (Erişim tarihi: 22 Haziran 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)**, 2024a, Elektrikli Araç Ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/5-14379/elektrikli-arac-ve-sarj-alt-yapisi-projeksiyonu->, (Erişim tarihi: 17 Mayıs 2024).
- EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)**, 2024b, 2023 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu, <https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-167/resmi-istatistikler>, (Erişim tarihi: 8 Haziran 2024).
- EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)**, 2024c, Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>, (Erişim tarihi: 4 Temmuz 2024).
- EPIAŞ (Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi)**, 2023, Gerçek Zamanlı Tüketim, <https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-consumption/ex-post-consumption/real-time-consumption>, (Erişim tarihi: 15 Nisan 2024).
- EPIAŞ (Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi)**, 2024, 01.07.2021 Tarihinden 31.12.2030 Tarihine Kadar İşletmeye Girecek YEK Belgeli Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretim Tesisleri İçin Uygulanacak Fiyatlar Hk.
- European Commission**, 2024, Delivering the European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en, (Erişim tarihi: 16 Nisan 2024).
- European Commission, Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., ... and Pekar, F.**, 2024, GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024, (Erişim tarihi: 4 Mart 2024), 3-5p.
- Farasis Energy**, 2024, Product Overview, https://www.farasis-energy.com/app/uploads/2023/12/Broschure-Produktubersicht-Product-overview_2023_WEB_EUR-1.pdf, (Erişim tarihi: 7 Mayıs 2024).
- Franklin, E.**, 2017, Solar photovoltaic (PV) site assessment. *Retrieved from Cooperative extention: <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1697-2017.pdf>*.
- Ge, M., Friedrich, J. and Vigna, L.**, 2020, (4). Charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors. *World Resources Institute*, 6.
- GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası)**, 2024, <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/35.aspx>, (Erişim tarihi: 3 Ocak 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- GİB (Gelir İdaresi Başkanlığı)**, 2024, Kurumlar Vergisi Beyan Rehberi, <https://www.turmob.org.tr/arsiv/mbs/resmigazete/-2024KurumlarVergisiRehberi.pdf>, (Erişim tarihi: 15 Mayıs 2024).
- Godrej, D.**, 2003, *Küresel İklim Değişimi*. (O. Kılıçdağı, Çev.) İstanbul: Metis Yayınları, 86-87s.
- Gong, J., Wasylowski, D., Figgner, J., Bihn, S., Rücker, F., Ringbeck, F. and Sauer, D. U.**, 2024, Quantifying the impact of V2X operation on electric vehicle battery degradation: An experimental evaluation. *eTransportation*, 20, 100316.
- Gök, H.**, 2023, *İklim Değişikliğinin Çevresel Etkileri Ve İklim Değişikliği Politikalarında Yerel Yönetimlerin Rolü*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Güllü, G. ve Akdağ, A. S.**, 2022, “Net Sıfır” Hedefinde Karbon Yakalama, Kullanım Ve Depolama Teknolojilerinin Yeri, *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 1(1), 62-79.
- IEA (International Energy Agency)**, 2018a, World Energy Outlook 2016, 24p.
- IEA (International Energy Agency)**, 2018b, National Survey Report of PV Power Applications in Turkey 2018, 6-7p.
- IEA (International Energy Agency)**, 2021, Fuel economy in Turkey, <https://www.iea.org/articles/fuel-economy-in-turkey>, (Erişim tarihi: 15 Mayıs 2024).
- IEA (International Energy Agency)**, 2023, Renewable Energy Market Update Outlook for 2023 and 2024, s.19.
- IEA (International Energy Agency)**, 2024, Global EV Outlook 2024 Trends İn Electric Cars, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>, (Erişim tarihi: 5 Mayıs 2024).
- International Renewable Energy Agency**, 2023, Statistical Review of World Energy, <https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity>, (Erişim tarihi: 9 Şubat 2024).
- IPCC**, 2001, Climate Change 2001: Synthesis Report, (Watson R.T., et al., eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 21s.
- IPCC**, 2002, Presentations by the IPCC Working Groups for the IPCC Third Assessment Report: IPCC Synthesis Report Part II (Habiba Gitay). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC**, 2014, Climate Change 2014 Synthesis Report, Switzerland, 5p.
- IPCC**, 2021, Climate Change 2021: The physical science basis, Cambridge university.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- IRENA (International Renewable Energy Agency)**, 2021, Figure A1 Country and technology-specific real after-tax WACC assumptions for 2021, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/May/IRENA_Cost_of_financing_renewable_power_Appendix_2023.pdf?rev=0c9288a22ab44676a1fd5b8ca0c774e8, (Erişim tarihi: 15 Ağustos 2024).
- IRENA (International Renewable Energy Agency)**, 2022, Renewable Power Generation Costs in 2022, <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>, 88-108p., (Erişim tarihi: 21 Haziran 2024).
- IRENA (International Renewable Energy Agency)**, 2023, Renewable Power Generation Costs in 2023, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf, 207p., (Erişim tarihi: 1 Eylül 2024).
- İmer Ertunga, E. ve Seyhun, Ö. K.**, 2022, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması Ve Türkiye'nin İhracatına Olası Etkileri, *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 13(1), 1-13.
- İzmir Büyükşehir Belediyesi**, 2023, "2030'da İzmir iklim nötr şehir olacak", <https://www.izmir.bel.tr/tr/Haberler/2030-da-izmir-iklim-notr-sehir-olacak/48426/156>, (Erişim tarihi: 15 Haziran 2024).
- İzmir Büyükşehir Belediyesi**, 2024a, İzmir Büyükşehir Belediyesi İmar Yönetmeliği (43. Madde), <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=38661&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeligi&mevzuatTertip=5>, (Erişim tarihi: 17 Ocak 2024).
- İzmir Büyükşehir Belediyesi**, 2024b, İzmir Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı 2020 (İzmir SECAP), <https://skpo.izmir.bel.tr/content.aspx?MID=112>, (Erişim tarihi: 5 Ocak 2024).
- Jordan, D. C. ve Kurtz, S. R.**, 2013, Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29.
- Kakaç, S. ve Sezer Uzol, N.**, 2022, *İleri Enerji Sistemleri ve Çevre*, Türkiye Bilimler Akademisi.
- Karakaya, H. ve Şen, İ. E.**, 2019, Fotovoltaik panellerde verim iyileştirme yöntemleri. *Academic Perspective Procedia*, 2(3), 1179-1188.
- Kaya, H. E.**, 2020, Kyoto'dan Paris'e Küresel İklim Politikaları. *Meriç Uluslararası Sosyal ve Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 4(10), 170-172s.
- Kayaer, M.**, 2013, Bir Çevre Koruma Aracı Olarak Çevresel Vergilerin, Sübvansiyon Ve Teşviklerin Ve Dış Yardımların Kullanılması, *Azerbaycan'ın Vergi Jurnalı*, 2013/1. S.129-142.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kaymak, M. K.**, 2009, Güneş Enerjisi (PV, solar energy), ITÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/PV.html>, (Erişim tarihi: 12 Nisan 2024).
- Keskin, E.**, 2012, Türkiye iklim koşullarında fotovoltaik güç sistemlerinin tasarım ve maliyet analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi 18-23s.
- Kılıç, F. Ç.**, 2015, Güneş enerjisi, Türkiye’deki son durumu ve üretim teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, 56(671), 29s.
- Kit-İzmir**, 2024, Şehirler Misyonu, <https://www.kitizmir.org/tr/topluluk/sehirler-misyonu-nedir/1003>, (Erişim tarihi: 15 Haziran 2024).
- Kobashi, T. and Yarime, M.**, 2019, Techno-economic assessment of the residential photovoltaic systems integrated with electric vehicles: A case study of Japanese households towards 2030, *Energy Procedia*, 158, 3802-3807p.
- Kobashi, T., Choi, Y., Hirano, Y., Yamagata, Y. and Say, K.**, 2022, Rapid rise of decarbonization potentials of photovoltaics plus electric vehicles in residential houses over commercial districts. *Applied Energy*, 306, 118142.
- Kobashi, T., Jittrapirom, P., Yoshida, T., Hirano, Y. and Yamagata, Y.**, 2021, SolarEV City concept: Building the next urban power and mobility systems. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024042.
- Kobashi, T., Say, K., Wang, J., Yarime, M., Wang, D., Yoshida, T. and Yamagata, Y.**, 2020a, Techno-economic assessment of photovoltaics plus electric vehicles towards household-sector decarbonization in Kyoto and Shenzhen by the year 2030. *Journal of cleaner production*, 253, 119933.
- Kobashi, T., Yoshida, T., Yamagata, Y., Naito, K., Pfenninger, S., Say, K., ... and Hara, K.**, 2020b, On the potential of “Photovoltaics+ Electric vehicles” for deep decarbonization of Kyoto’s power systems: Techno-economic-social considerations. *Applied Energy*, 275, 115419.
- Kymakis, E., Kalykakis, S. and Papazoglou, T. M.**, 2009, Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete, *Energy conversion and management*, 50(3), 433-438p.
- Lazard**, 2024, Levelized Cost of Energy Analysis, <https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazard-s-lcoe-plus-june-2024-vf.pdf>, (Erişim tarihi: 5 Temmuz 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liu, J., Li, M., Xue, L. and Kobashi, T.**, 2022, A framework to evaluate the energy-environment-economic impacts of developing rooftop photovoltaics integrated with electric vehicles at city level. *Renewable Energy*, 200, 647-657p.
- Lo, K. Y., Yeoh, J. H. and Hsieh, I. Y. L.**, 2023, Towards Nearly Zero-Energy Buildings: Smart Energy Management of Vehicle-to-Building (V2B) Strategy and Renewable Energy Sources. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104941.
- Maslin, M.**, 2008, Global warming: a very short introduction, OUP Oxford, 65s.
- Microsoft**, 2024, Microsoft Building Footprints, <https://planetarycomputer.microsoft.com/dataset/ms-buildings>, (Erişim tarihi: 2 Şubat 2024).
- NASA**, 2024, *Global Climate Change Vital Signs of the Planet*. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>, , (Erişim tarihi: 27 Şubat 2024).
- Nazan, A. N., Turp, M. T. ve Kurnaz, L.**, 2021, İklim değişikliğine bağlı çevresel bozulmanın göç kararına etkisi: genel bir bakış, *Ege Coğrafya Dergisi*, 30(2), 386-388s.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory)**, 2016, Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States, 11p, <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65586.pdf>, (Erişim tarihi: 2 Ocak 2024).
- NREL (National Renewable Energy Laboratory)**, 2022, Annual Technology Baseline, <https://atb.nrel.gov/electricity/2022/definitions#o&m>, (Erişim tarihi: 6 Mayıs 2024).
- NREL (National Renewable Energy Laboratory)**, 2024, Sistem Danışmanı Modeli (System Advisor Model, SAM), <https://sam.nrel.gov/download.html>, (Erişim tarihi: 20 Şubat 2024).
- NREL Transforming Energy**, 2024, Temporal and Spatial Comparison of Gridded TMY, TDY and TGY Data Sets, <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/temporal-and-spatial-comparison-of-gridded-tmy-tdy-and-tgy-data-s>, (Erişim tarihi: 21 Şubat 2024).
- NSRDB**, 2024, Ulusal Güneş Radyasyonu Veri tabanı, National Solar Radiation Database, <https://nsrdb.nrel.gov/about/what-is-the-nsrdb>, (Erişim tarihi: 20 Şubat 2024).
- NZC (Net Zero Cities)**, 2024, Mission Cities, <https://netzerocities.eu/mission-cities/>, (Erişim tarihi: 15 Haziran 2024).
- O'Neill, D., Yildiz, B. and Bilbao, J. I.**, 2022, An assessment of electric vehicles and vehicle to grid operations for residential microgrids. *Energy Reports*, 8, 4104-4116p.
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development)**, 2024, <https://www.oecd.org/environment/tools-evaluation/emissiontradingssystems.htm>, (Erişim tarihi: 24 Nisan 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Oktik, Ş.**, 2001, Güneş-elektrik dönüşümleri fotovoltaik güneş gözeleri ve güç sistemleri. *Temiz Enerji Vakfı Yayınları*, Ankara.
- Olgun, E. ve Kantarlı, S.**, 2020, İklim Değişikliğinin Sağlık Üzerine Etkileri, *Doğanın Sesi*, (5), 15s.
- Osorio, G. J., Gough, M., Lotfi, M., Santos, S. F., Espassandim, H. M., Shafie-khah, M. and Catalão, J. P.**, 2021, Rooftop photovoltaic parking lots to support electric vehicles charging: A comprehensive survey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 133, 107274.
- Owens, J., Miller, I. and Gençer, E.**, 2022, Can vehicle-to-grid facilitate the transition to low carbon energy systems?. *Energy Advances*, 1(12), 984-998p.
- Önsöz O.**, 2023, GES Yatırımlarında İndirimli Kurumlar Vergisi ve Uygulamada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar, <https://kpmgvergi.com/blog/ges-yatirimlarinda-indirimli-kurumlar-vergisi-ve-uygulamada-dikkat-edilmesi-gereken-hususlar/1276>, (Erişim tarihi: 6 Mayıs 2024).
- Özel, M. ve Kılıç, S.**, 2006, Küresel bir sorun olarak iklim değişikliği ve iklim politikaları, *I.Ü. Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, 34, 146-147s.
- Özkaptan Alptekin, G. ve Kasapoğlu, E.**, 2015, Çatı Aralarının Kullanıma Kazandırılması. *Mimarlık*, 385, 69s.
- Öznazik, H. A.**, 2022, Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretimine Verilen Fiyat Desteklerinin İncelenmesi: Karşılaştırmalı Bir Analiz, *Fiscaoeconomia*, 6(1), 161-188.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... and Van Ypserle, J. P.** 2014, *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 54p.
- Petrol Ofisi**, 2024, Geçmiş Akaryakıt Fiyatları, <https://www.petrolofisi.com.tr/arsiv-fiyatlari>, (Erişim tarihi: 15 Haziran 2024).
- Philip, T., Whitehead, J. and Prato, C. G.**, 2023, Adoption of electric vehicles in a laggard, car-dependent nation: Investigating the potential influence of V2G and broader energy benefits on adoption. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 167, 103555.
- Piliougine, M., Carretero, J., Sidrach-de-Cardona, M., Montiel, D. and Sánchez-Friera, P.**, 2008, Comparative analysis of the dust losses in photovoltaic modules with different cover glasses. In *Proceedings of 23rd european solar energy conference*, Vol. 2008, 2698-2700p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Resmi Gazete**, 2024, Katma Değer Vergisi Genel Uygulama Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/04/20240427-16.htm>, (Erişim tarihi: 5 Mayıs 2024).
- Ritchie, H.**, 2020, “Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?”, *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>, (Erişim tarihi: 4 Mart 2024).
- Salaria, S., van der Kam, M. and Boström, T.**, 2024, Conceptualization of a vehicle-to-grid assisted nation-wide renewable energy system—A case study with Spain. *Energy Conversion and Management: X*, 100545.
- Sarı, V. ve Özyiğit, F. Y.**, 2020, Sivas ilinin farklı ilçelerinde şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerinin tasarımı ve analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 425-437.
- Sharma, V. and Chandel, S. S.**, 2013, Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 753-767.
- Secchi, M., Barchi, G., Macii, D. and Petri, D.**, 2023, Smart electric vehicles charging with centralised vehicle-to-grid capability for net-load variance minimization under increasing EV and PV penetration levels. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 35, 101120.
- Selbaş, R. ve Çetin, H.**, 2022, Fotovoltaik güneş santrallerinin verimlerinin değişiminin incelenmesi, *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 10-17s.
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi**, 2020, Binalarda Çatı Üstü Güneş Enerjisi Potansiyeli - Türkiye’de Çatı Üstü Güneş Enerjisi Sistemlerinin Hayata Geçmesi İçin Finansman Modelleri Ve Politikalar, <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/04/SHURA-2020-04-Binalarda-Cati-Ustu-Gunes-Enerjisi-Potansiyeli.pdf>, (Erişim tarihi: 20 Haziran 2024)
- Silkin, H.**, 2014, İklim Değişikliğine Uyum Özelinde Bazı Uygulamaların Türkiye Açısından Değerlendirilmesi, Orman ve Su İşleri Uzmanlık Tezi, TC Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, 7-8s.
- Solaredge**, 2023, Technical Note: Oversizing of SolarEdge Inverters, https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/inverter_dc_oversizing_guide.pdf, (Erişim tarihi: 15 Ocak 2024).
- Solar Enerjin**, 2023, Güneş Enerji Santralleri İşletme ve Bakım Rehberi, <https://www.solarenerjin.com/gunes-enerji-santralleri-isletme-ve-bakim-rehberi/>, (Erişim tarihi: 16 Mayıs 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı**, 2012, Türkiye'nin İklim değişikliği uyum stratejisi ve eylem planı, TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü İklim Değişikliği Dairesi Başkanlığı. Ankara.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı**, 2024a, İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi Ve Eylem Planı (2024-2030).
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**, 2024b, <https://csb.gov.tr/iklimi-korumanin-bedeli-makale>, (Erişim tarihi: 22 Nisan 2024).
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**, 2024c, Birim Fiyatlar, <https://yfk.csb.gov.tr/birim-fiyatlar-i-100468>, 490-495s., (Erişim tarihi: 19 Haziran 2024).
- T.C. Dışişleri Bakanlığı**, 2024a, Küresel Isınma BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve KYTO Protokolü, <https://www.mfa.gov.tr/kuresel-isinma-bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi-ve-kyto-protokolu.tr.mfa>, (Erişim tarihi: 14 Nisan 2024).
- T.C. Dışişleri Bakanlığı**, 2024b, Paris Anlaşması, <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>, (Erişim tarihi: 14 Nisan 2024).
- T.C. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)**, 1998, Yeni Ve Yenilenebilir (Alternatif) Enerji Kaynakları Komisyonu Raporu, 7s.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)**, 2022, Türkiye Ulusal Enerji Planı, 15s.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)**, 2024a, Bilgi Merkezi, Enerji-Elektrik, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, (Erişim tarihi: 22 Nisan 2024).
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)**, 2024b, Güneş, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>, (Erişim tarihi: 10 Şubat 2024).
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)**, 2024c, Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü, <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru>, (Erişim tarihi: 16 Haziran 2024).
- T.C. İzmir Valiliği**, 2024, Türkiye'nin Üçüncü Büyüğü, <http://www.izmir.gov.tr/demografik-bilgiler>, (Erişim tarihi: 15 Ocak 2024).
- T.C. Merkez Bankası**, 2024, Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları, <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/doviz+kurlari/gosterge+niteligindeki+merkez+bankasi+kurlarii>, (Erişim tarihi: 14 Haziran 2024).
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı**, 2021, İklim Değişikliği Ve Tarım Değerlendirme Raporu, Ankara: Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, 19s.
- Talu N.**, 2019, Avrupa Birliği İklim Politikaları, İklim Değişikliği Eğitim Modülleri Serisi 3. Ankara, 36-37s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü)**, 2023, Türkiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu, <https://www.tedas.gov.tr/FileUpload/MediaFolder/25819eac-d024-4308-891a-d248db8c1e0a.pdf>, 20s, (Erişim tarihi: 13 Nisan 2024).
- The Emissions Database for Global Atmospheric Research**, 2024, GHG Emissions Of All World Countries 2023 Report, https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023?vis=ghgtot#emissions_table, (Erişim tarihi: 3 Mart 2024).
- Tian, X., Zha, H., Tian, Z., Lang, G. and Li, L.**, 2024, Carbon emission reduction capability assessment based on synergistic optimization control of electric vehicle V2G and multiple types power supply. *Energy Reports*, 11, 1191-1198p.
- TURMOB**, 2022, Amortisman Oranları-2022, 34s., https://www.turmob.org.tr/arsiv/mbs/pratikBilgiler/amortisman_oranlari-2022.pdf, (Erişim tarihi: 10 Nisan 2024).
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)**, 2024a, Motorlu Kara Taşıtları, Mart 2024, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Mart-2024-53455>, (Erişim tarihi: 17 Mayıs 2024).
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)**, 2024b, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2022.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)**, 2024c, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2023.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)**, 2024d, Motorlu Kara Taşıtları, Haziran 2024, Tablo 2 ve 6.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)**, 2024e, Taşıt-kilometre İstatistikleri, 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2022-53445>, (Erişim tarihi: 14 Haziran 2024).
- Türkeş, M.**, 2021, İklim Değişikliği Bilimine Giriş, İçinde: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, İklim Değişikliğine Uyum Konusunda Kurumsal Kapasitenin Geliştirilmesi Projesi, Modül 1, Ankara, 3- 32. https://iklimiduy.org/modul/iklimiduy_modul_1.pdf, (Erişim tarihi: 20 Şubat 2024).
- Ulrich, F., Mohammad, A. and Tobias, B.**, 2021, Temporal city-scale matching of solar photovoltaic generation and electric vehicle charging [J]. *Applied Energy*, 282.
- UNFCCC**, 2024, Summary of Global Climate Action at COP 28, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Summary_GCA_COP28.pdf, (Erişim tarihi: 17 Nisan 2024).
- United Nations (UN)**, 2022, COP27 Reaches Breakthrough Agreement on New “Loss and Damage” Fund for Vulnerable Countries, <https://unfccc.int/news/cop27-reaches-breakthrough-agreement-on-new-loss-and-damage-fund-for-vulnerable-countries>, (Erişim tarihi: 17 Nisan 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- U.S. Department of Energy**, 2024, Fuel Economy Information, <https://www.fueleconomy.gov/feg/byfuel/EV2021.shtml>, (Erişim tarihi: 16 Haziran 2024).
- Ülgen K.**, 2007, Güneş Kolektörleri için Optimum Eğim Açısı. *Enerji Kaynakları, Bölüm A: Geri Kazanım, Kullanım ve Çevresel Etkiler*, 28 (13), 1171–1180s.
- WCED (World Commission on Environment and Development)**, 1991, Our Common Future, 126p.
- World Health Organization (WHO)**, 2023, Climate Change and Health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>, (Erişim tarihi: 13 Şubat 2024).
- WWF-Türkiye (Doğal Hayatı Koruma Vakfı)**, 2010, Türkiye'nin Yarınları Projesi Sonuç Raporu.
- Yahlı, M.**, 2021, Lisanslı fotovoltaik güneş enerji santrali yatırımının finansal analizi: Van ili örneği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 1055-1074.
- Yeşil Akademi**, 2024, Yenilenebilir Enerji 111 / Fotovoltaik Sistemlerin Teknik ve Ekonomik Fizibilitesi, <https://yesilakademi.org/tr/topics/yenilenebilir-enerji111-fotovoltaik-sistemlerin-teknik-ve-ekonomik-fizibilitesi>, (Erişim tarihi: 11 Mart 2024).
- Yiğit, A. ve Arslanoğlu, N.**, 2021, Anlık Işınım Şiddeti Ve Çevresel Faktörlere Bağlı Optimum Pv Panel Açısı, Verim, Güç Üretiminin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(1), 301-314.
- Zengin, E.**, 2024, Güneş Pillerinin Enerji Dönüşüm Kalitesini Etkileyen Önemli Faktörler, https://www.emo.org.tr/ekler/6498f1f48b54a20_ek.pdf, (Erişim tarihi: 8 Ağustos 2024).
- Zeynel, B. A. Ş., Serhat, Z. I. B. A. ve Yılmaz, A. S.**, 2017, Fotovoltaik Üretim Sistemlerinin Şebekeye Ve Maliyetlere Etkisinin İncelenmesi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 72-78s.

TEŞEKKÜR

Öncelikle güler yüzü, kibarlığı ve tecrübesiyle tezin seçilmesi ve sonraki tüm zorlu aşamalarda beni destekleyen sevgili tez danışmanım Doç. Dr. Mete Çubukçu'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışma süresi boyunca, tüm diğer iş yüklerini ve sorunları üzerimden alarak çalışmamı kolaylaştıran sevgili eşim Büşra Afacan, kardeşim Mete Afacan ve Doğukan Uzun, annem Canan Afacan ve Fatma Uzun'a ayrı ayrı gösterdikleri sabır ve anlayış için teşekkür ederim. Umarım, benim de sizlerin hayatını kolaylaştırmak ve korumak için içimde oluşan gayret başarılarla ulaşabilir.

02/09/2024

Mert AFACAN

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mert AFACAN

Eğitim Bilgileri

Lisans Öğrenimi : İstanbul Üniversitesi

Bölüm adı : Makine Mühendisliği

İş Deneyimi

- İzmir Büyükşehir Belediyesi - Makine Mühendisi (2015 – devam)
- İzmir Doğalgaz Dağıtım A.Ş. - Makine Mühendisi (2013 – 2015)
- Wilderness Resort in the USA - Cankurtaran (2012 – 2013)

Beceriler

AutoCAD, Solidworks, Excel, Matlab, Pascal, Fortran, Zetacad.

Sertifikalar

Fotovoltaik Enerji Sistemleri Tasarımı, Fizik Mühendisleri Odası, 2016.

İngilizce İleri Seviye Eğitimi, American House, 2015.