



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KARBON EMİSYONU AÇISINDAN KÖMÜR YAKITLI TERMİK
SANTRALLER İLE PV GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

AHMET GÖK

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KARBON EMİSYONU AÇISINDAN KÖMÜR YAKITLI TERMİK
SANTRALLER İLE PV GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

AHMET GÖK

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı: Cuma ÇETİNER**

**Şanlıurfa
2025**



T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ONAY SAYFASI

Doç.Dr.Cuma Çetiner'in danışmanlığında, Ahmet Gök'ın hazırladığı **“Karbon Emisyonu Açısından Kömür Yakıtlı Termik Santraller ile PV Güneş Enerji Santrallerinin Karşılaştırılması ”** konulu bu çalışma 14 /10 /2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Harran Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

☒ Oybirliğiyle / ☐ Oy çokluğu ile

İmza

Danışman	: Doç. Dr. Cuma ÇETİNER	
Üye	: Prof. Dr. Refet KARADAĞ	
Üye	: Prof. Dr. Mehmet Fatih DİLEKOĞLU	

Bu tezin Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yapıldığını ve enstitümüz kurallarına göre düzenlendiğini onaylarım.

Dr.Öğr.Üyesi Sabri AKIN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma: Tarafından Desteklenmiştir. (Varsa)

Proje No :

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.



T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
TEZLİ YÜKSEK LİSANS
ORJİNALLİK RAPORU VE BEYAN FORMU

Doküman No: FRM-0072
Revizyon No: 03
Yayın Tarihi: 10.09.2020
Revizyon Tarihi: 30.01.2024
Sayfa No: 1 / 1

ÖĞRENCİNİN

Öğrenci No	225103010
Adı / Soyadı	AHMET GÖK
Anabilim Dalı/Programı	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ- ENERJİ ANABİLİM DALI / Tezli Yüksek Lisans
Tez Konusu	Kömür Yakıtlı Termik Santraller ile PV Güneş Enerji Santrallerinin Karbon Ayak İzinin ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Yukarıda başlığı belirtilen "Kömür Yakıtlı Termik Santraller ile PV Güneş Enerji Santrallerinin Karbon Ayak İzinin ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi" çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 92 sayfalık kısmına ilişkin 08/07/2025 tarihinde şahsım/ danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, benzerlik oranı % 11 dir. Ayrıca "Kömür Yakıtlı Termik Santraller ile PV Güneş Enerji Santrallerinin Karbon Ayak İzinin ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi" çalışması hiçbir blok kopyalama içermemektedir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç
- 3- Alıntılar hariç/dâhil
- 4- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi, Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini ve Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü "Kömür Yakıtlı Termik Santraller ile PV Güneş Enerji Santrallerinin Karbon Ayak İzinin ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi" çalışması Orijinallik Raporu alınması ve kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim. Etik ihlal tespiti halinde, Enstitü yönetim kurulunca, diplomamın iptal edilmesini kabul ediyorum.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

08/07/2025

Hazırlayan Öğrencinin

İmzası

Ahmet GÖK

Yukarıda yer alan raporun ve beyanın doğruluğunu onaylarım. / / 20...

Doç.Dr. Cengiz Setiner

Danışmanın Unvanı-Adı-Soyadı
(İmzası)

TEŐEKKÖR

Eğitim hayatım boyunca tüm maneviyatı ile yanımda ve ruhumda olan annem Elife GÖK'e sonsuz Őükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmamda bana destek olan, rehberlik eden danışman hocam Doç. Dr. Cuma Çetiner'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR.....	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Santrallerin Proses Akışı.....	1
1.1.1. Kömür Yakıtlı Termik Santraller.....	1
1.1.2. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Yakıt Hazırlığı	2
1.1.3. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerdeki Yanma İşlemi Sırasında Gerçekleşen Reaksiyonlar	3
1.1.4. Yanma Reaksiyonları Sonrası Oluşan Emisyonlar	3
1.1.5. Kömürün Yanması Sonucunda Ortaya Çıkan Bu Zararlı Emisyonlar ve Etkileri	4
1.1.6. Çevresel Etkiler ve Kontrol Önlemleri	5
1.1.7. Atmosferik Emisyonlar ve Hava Kirliliği.....	7
1.2. Araştırmanın Amaçları ve Hedefleri.....	8
1.3. Güneş Enerji Sistemleri (PV) Prosesi.....	10
1.3.1. Güneş Enerji Santralleri ve Karbon Ayak İzini Azaltma Potansiyeli	11
1.3.2. Güneş Enerjisi ve Çevresel Avantajları	11
1.3.3. Güneş Enerjisi ve Teknolojik Gelişmeler	12
1.3.4. Teknolojik İlerlemeler ve Verimlilik	12
1.3.5. Akıllı İzleme ve Analitik	13
1.3.6. Yapay Zeka ve Otomasyon.....	13
1.3.7. Uzaktan İzleme ve Yönetim Sistemleri	13
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	14
2.1. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerin Emisyonlarının Hava Kalitesi Üzerindeki Etkileri ve Yenilebilir Enerji Kaynaklarının Önemi	14
2.1.1. İstatiksel Veriler	15
2.1.2. Karbon Salımına Dair Veriler ve Atıflar	17
2.1.3. Uluslararası Enerji Ajansı ve Diğer Uluslararası Kuruluşlardan Atıflar.....	20
2.1.4. Sera Gazı Türleri ve Kaynakları	20
2.1.5. Ulusal ve Uluslararası Raporlama Standartları	21
2.1.6. Türkiye’de Kömür Kullanımı ve Karbon Ayak İzi Üzerine Veriler	24
2.1.7. Diğer Araştırmalara Atıf ve Bu Çalışmanın Farklılığı.....	29
2.2. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerin Karbon Ayak İzi.....	34
2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve PV Güneş Enerji Santrallerinin Karbon Ayak İzi.....	34
2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Yönelim	34
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	39
3.1. Metotlarda Kullanılan Yaklaşımlar ve Uygulama Yönergeleri	39
3.2. Kömürün Değerlendirilme Süreçleri.....	41
3.2.1. Kömürün Taşınması (Kategori 3).....	41
3.2.2. Kömürün Kırılması ve Öğütülmesi (Kategori 2).....	42
3.2.3. Kömürün Yakılması (Kategori 1).....	43
3.2.4. Ürün Emisyonları (Kategori 5).....	44
3.3. PV Güneş Enerji Santralleri Süreçleri	45
3.3.1. PV Panel Taşınması ve Lojistik (Kategori 3).....	46
3.3.2. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde Tüketilecek Elektrik (Kategori 2).....	47
3.3.3. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde Kullanılacak İş Makineleri (Kategori 1).....	48
3.3.4. Şebeke Kayıpları ve Entegrasyon (Kategori 5)	51
4. BULGULAR	53
4.1. Kömürün Değerlendirilme Süreçlerinin Bulguları	53

4.2. Kömürün Değerlendirme Süreçlerinde Kategorik Hesaplamalar	54
4.2.1. Linyit Taşınma Süreç Bulguları (Kategori 3).....	54
4.2.2. Kömürün Kırılması ve Öğütülme Bulguları (Kategori 2).....	55
4.2.3. Kömürün Yakılma Bulguları (Kategori 1).....	57
4.2.4. Ürün Emisyon Bulguları (Kategori 5).....	58
4.2.5. Kömür Santrali Toplam Emisyon Miktarları	59
4.3. PV Panel Güneş Enerji Santrali Bulguları	61
4.3.1. Panel Taşınması ve Lojistik Bulguları (Kategori 3).....	62
4.3.2. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde Elektrik Tüketim Bulguları (Kategori 2).....	63
4.3.3. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde İş Makinelerinden Kaynaklanan Emisyonların Bulguları (Kategori 1)	64
4.3.4. Ürün Emisyonları, PV Elektrik Satışı Sonrası (Kategori 5)	66
4.3.5. PV GES Toplam Emisyon Miktarları	67
5. TARTIŞMA.....	69
6. SONUÇLAR.....	71
6.1. Genel Değerlendirme	73
7. ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON EMİSYONU AÇISINDAN KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLER İLE PV GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

AHMET GÖK

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. CUMA ÇETİNER

Yıl: 2025, Sayfa : 81

Bu tezde, kömür yakıtlı termik santraller ile fotovoltaik (PV) güneş enerji santrallerinin emisyon oranları ve çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı, enerji üretiminde kullanılan iki farklı teknolojinin sera gazı salımları üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve sürdürülebilir enerji politikaları açısından değerlendirmektir. Analizlerde temel yıl olarak 2024 dönemi seçilmiş ve kömür santrali için işletme aşamasına, PV santrali için ise kurulum aşamasına ait veriler dikkate alınmıştır.

Metodoloji kapsamında hesaplamalar IPCC (2006) kılavuzları, GHG Protocol ve T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı MRV Yönetmeliği esas alınarak yapılmıştır. Emisyon faktörleri ise DEFRA (2023), ETKB-EVÇED (2024) ve Ecoinvent (2022) verilerine dayandırılmıştır. Çalışmada sera gazı emisyonları, doğrudan (Kategori 1) ve dolaylı (Kategori 2, 3 ve 5) kaynaklar altında değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, kömür santrallerinin toplam emisyon miktarının 1.221,5 tCO₂-eq, PV santralinin ise 167,67 tCO₂-eq olduğunu göstermektedir. Bu fark, kömürün yüksek karbon içeriği ve doğrudan yanma sürecinin baskınlığı nedeniyle ortaya çıkmıştır. PV sistemleri ise kurulum aşamasında sınırlı emisyon üretmekte, işletme sürecinde neredeyse sıfır doğrudan salım ile karbon nötr hedeflerine katkı sunmaktadır.

Bu sonuçlar, Türkiye'nin yüksek güneşlenme potansiyeli göz önüne alındığında, PV yatırımlarının karbon azaltımı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından stratejik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: PV Güneş Enerjisi, Kömür Santrali, Sera Gazı Emisyonu, Sürdürülebilir Enerji, Karbon Ayak İzi

ABSTRACT

MASTER THESIS

COMPARİSON OF COAL-FİRED THERMAL POWER PLANTS AND PV SOLAR POWER PLANTS İN TERMS OF CARBON EMISSIONS

AHMET GÖK

HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
MECHANICAL ENGINEERING

Thesis Supervisor: Doç. Dr. CUMA ÇETİNER

Year: 2025, Page : 81

In this thesis study, the emission rates and environmental impacts of coal-fired thermal power plants and photovoltaic (PV) solar power plants were comparatively analyzed. The main objective of the study is to identify the differences in greenhouse gas emissions between these two energy generation technologies and to evaluate their implications for sustainable energy policies. The base year of the analysis was set as 2024, considering the operational stage for the coal plant and the installation stage for the PV system.

The methodology was based on the **IPCC (2006) Guidelines**, the **GHG Protocol**, and the **MRV Regulation** of the Republic of Türkiye's Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. Emission factors were derived from **DEFRA (2023)**, **ETKB-EVÇED (2024)**, and **Ecoinvent (2022)** datasets. Emissions were classified into direct (Category 1) and indirect (Categories 2, 3, and 5) sources according to international reporting standards.

Results indicate that the total emissions from the coal-fired power plant amount to **1,221.5 tCO₂-eq**, whereas the PV solar power plant produces **167.67 tCO₂-eq**. This significant difference arises mainly from the direct combustion of fossil fuels in coal-based systems, which dominate total emissions. In contrast, PV systems generate minimal emissions during installation and operate with nearly zero direct emissions during their lifetime, supporting carbon-neutral energy goals.

These findings emphasize that, considering Türkiye's high solar potential, expanding PV investments plays a crucial role in national carbon reduction and sustainable development strategies.

KEYWORDS: PV Solar Energy, Coal Power Plant, Greenhouse Gas Emission, Sustainable Energy, Carbon Footprint

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kömür yakıtlı termik santral proses akışı.....	2
Şekil 2.1.	Enerji verileri raporu-elektrik verileri	24
Şekil 2.2.	Türkiye de kaynağa göre elektrik Üretimi.....	25
Şekil 2.3.	Elektrik üretiminde kullanılan kaynakların saatlere göre dağılımı.....	26
Şekil 2.4.	Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu 1990-2022	28
Şekil 2.5.	Sektörlere göre emisyon dağılımı.....	28
Şekil 2.6.	Türkiye'nin 1990-2019 yılları arasındaki enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi	32
Şekil 3.130.	GHG protokol faaliyet sınırları şeması.....	40
Şekil 4.295.	Kalyon PV panel özellikleri.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Kömürün yanması sonucu oluşan zararlı gazlar ve etkileri.....	4
Çizelge 2.1.	Emisyon hesaplama metodolojileri.....	20
Çizelge 2.2.	Elektrik üretiminin kaynaklara dağılımı.....	25
Çizelge 2.3.	Türkiye'de yıllık kömür tüketim dağılımı.....	27
Çizelge 2.4.	Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı.....	28
Çizelge 3.1.	Karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan tier yöntemlerinin özeti.....	39
Çizelge 3.1.	Toplam emisyon miktarı hesaplama tablosu	41
Çizelge 3.1.	Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri	45
Çizelge 4.1.	Kategori 3 Taşınma süreci emisyon hesaplama tablosu	54
Çizelge 4.1.	Kategori 2 Kömürün kırılması ve öğütülmesi sürecinde emisyon hesaplama	55
Çizelge 4.1.	Kategori 1 Kömürün yakılması sürecinde emisyon hesaplama	57
Çizelge 4.1.	Kategori 5 Ürün emisyonları	58
Çizelge 4.1.	Kömür yakıtlı termik santral emisyon hesaplama özeti.....	60
Çizelge 4.1.	Kategori 3 PV santral panel taşınması emisyon hesaplaması	63
Çizelge 4.1.	Kategori 2 PV kurulum ve montaj sürecinde elektrik tüketim emisyonu.....	64
Çizelge 4.1.	Kategori 1 PV santral kurulumunda iş makinelerinden kaynaklanan emisyonları	66
Çizelge 4.1.	Kategori 5 Satış emisyonları.....	67
Çizelge 4.1.	PV GES toplam emisyon hesaplama tablosu.....	68
Çizelge 6.1.	Kömür yakıtlı termik santral emisyon tablosu.....	71
Çizelge 6.2.	PV Güneş enerji santrali emisyon özeti.....	71
Çizelge 6.3.	Kategori bazında emisyon karşılaştırması	72
Çizelge 6.4.	Emisyon karşılaştırması	73

SİMGELER

CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
EF	Emisyon Faktörü
FV	Faaliyet Verisi
HCl	Hidrojen klorür
HF	Hidrojen Florür
kWh	Kilovatsaat
MWh	Megavat saat
NO_x	Azotoksitler
N₂O	Diazotmonoksit
PM	Partikül madde
SO₂	Sülfürdioksit

KISALTMALAR

CCS	Karbon Yakalama ve Depolama
DEFRA	İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı
EEA	Avrupa Çevre Ajansı
EPA	Çevre Koruma Ajansı
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli
PV	Fotovoltaik
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

1. GİRİŞ

1.1. Santrallerin Proses Akışı

Bu bölüm, kömür yakıtlı termik santrallerin ve PV güneş enerji santrallerinin işleyişini ele almaktadır.

Kömür yakıtlı termik santraller, uzun bir süredir enerji sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan bir enerji kaynağıdır. Ancak, bu santrallerin çevresel etkileri, atmosferik emisyonlar ve su kaynaklarına olan olumsuz etkileri nedeniyle giderek artan bir endişe kaynağı olmuştur. Diğer yandan hızla gelişen teknoloji ile güneş enerji santrallerinin de temiz enerji kaynağına alternatif oluşturması, bu iki enerji kaynağının karşılaştırılmasına ve proseslerinin incelenmesini gerektirmektedir (Çetin ve Avcı, 2020).

Ayrıca kömür yakıtlı termik santrallerin çevresel etkilerini azaltma potansiyeline sahip alternatif temiz enerji kaynaklarıyla karşılaştıran literatür çalışmalarını ele almaktadır. Güneş enerji santrali ile yapılan karşılaştırmalar, sürdürülebilir enerji dönüşümü açısından önemli bir perspektif sunacaktır.

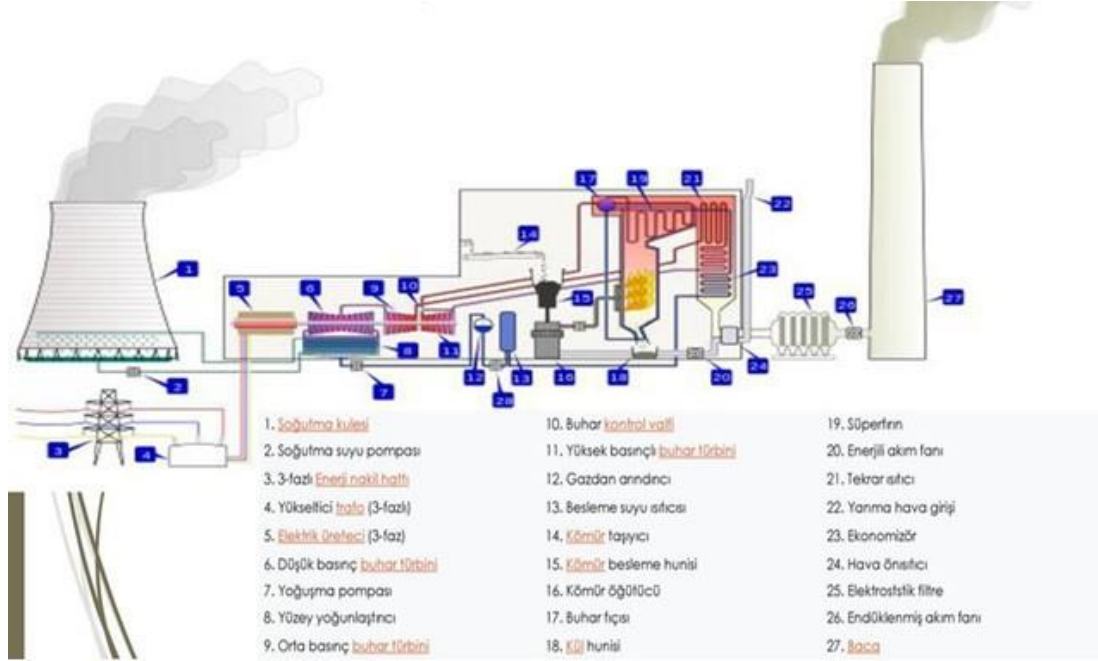
Kömür yakıtlı termik santrallerin çevresel etkilerini azaltma potansiyeline sahip alternatif temiz enerji kaynaklarına yönelik literatür çalışmalarını incelediğimizde, çeşitli araştırmaların bu konuda önemli bulgulara ulaştığını görülmektedir.

1.1.1. Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Bu bölümde, kömür yakıtlı termik santrallerin temel işleyiş prensipleri ve enerji üretim süreçleri incelenmiştir. Santrallerin içerdiği teknolojik bileşenler, yakıt kullanımı ve enerji dönüşüm süreçleri üzerinde durulmuştur.

Kömür yakıtlı termik santraller, elektrik enerjisi üretiminde geniş çapta kullanılan tesislerdir. Kömürün yanmasıyla elde edilen termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek güç üretirler. İşleyişleri oldukça karmaşık olup, termal enerji dönüşümü, buhar türbinleri ve jeneratörler gibi bir dizi teknolojik süreci içerir.

Bu tesisler genellikle şu temel adımlardan oluşan bir süreçle çalışır;



Şekil 1.1. Kömür yakıtlı termik santral proses akışı

1.1.2. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Yakıt Hazırlığı

Kömür Madeni ve Çeşitleri; Yakıt hazırlığı süreci, başlangıçta kullanılacak kömür madeninin özelliklerine bağlıdır. Kömür madeni, genellikle linyit, taşkömürü veya bitümlü kömür gibi farklı tiplerde olabilir. Her tür, içerdiği karbon miktarı, nem içeriği ve diğer özellikler açısından farklılık gösterir (Büzkan, 1987).

Yakıt hazırlığı süreci; kömür yakıtlı termik santrallerin temel aşamalarından biridir ve bu aşamada yapılan işlemler, santralin enerji verimliliği ve çevresel performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, kömür hazırlığı sürecinin doğru bir şekilde planlanması ve uygulanması, santralin genel performansını önemli ölçüde etkileyebilir.

Kömür Karıştırma ve Homojenizasyon; Farklı kömür yataklarından elde edilen kömürlerin özellikleri değişebilir. Bu nedenle, kömür karıştırma ve homojenizasyon adımları, kullanılan kömürlerin homojen bir karışımını sağlamak için önemlidir. Bu işlem, yanma sürecinde tutarlılık sağlamak için yapılır.

Kömür Taşıma Sistemi; Hazırlanan kömür, termik santralin farklı noktalarına taşınmalıdır. Bu amaçla, konveyör sistemleri veya kömür siloları kullanılır. Taşıma sistemi, kömürün yanma odasına doğru taşınması için tasarlanmıştır.

Yakıt Hazırlığı; Kömür, önceden belirlenmiş özelliklere göre öğütülerek toz haline getirilir. Kömür, daha etkili yanma sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak için öğütülür. Bu adım, kömür parçacıklarının küçültülmesini içerir. Tipik olarak, kömür madeni öğütülerek toz haline getirilir, bu da yanma sırasında daha fazla yüzey alanına sahip olmalarını sağlar. Kömür yakıtlı termik santrallerinde yakıt hazırlığı, kömürün daha etkili bir şekilde yanmasını sağlamak amacıyla bir dizi işlemi içerir. Bu süreç, kömürün belirli özelliklere sahip parçacıklara dönüştürülmesini, taşınmasını ve yanma odasında uygun koşullarda yanmasını sağlayacak bir şekilde işlenmesini içerir.

Kömürün Yanma Odasına Aktarılması; Yakıt hazırlığı sürecinin bu aşamasında, öğütülmüş ve homojenleştirilmiş kömür, yanma odasına aktarılır. Bu işlem, kömürün yanma odasında kontrollü bir şekilde yanmasını sağlar.

Yanma İşlemi İçin Kontrol ve Ayarlamalar; Kömürün yanma süreci, sıcaklık, basınç ve hava akımı gibi faktörlerin dikkatlice kontrol edilmesini gerektirir. Bu parametreler, yanma sürecinin verimli ve istikrarlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar.

Yakma İşlemi; Öğütülmüş kömür, kazanlarda yakılır. Bu işlemde, kömürün kimyasal olarak yanması gerçekleşir ve bu da yüksek sıcaklıklarda ısı üretir. Kömür yakıtlı termik santrallerdeki yakma işlemi, enerji üretiminin temel aşamalarından biridir. Bu işlem, kömürün yanmasıyla ortaya çıkan termal enerjinin buhar üretimi ve nihayetinde elektrik enerjisine dönüştürülmesini içerir.

1.1.3. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerdeki Yanma İşlemi Sırasında Gerçekleşen Reaksiyonlar

Yakma Odası ve Kazanlar; Yakma işlemi, genellikle özel bir bölümde gerçekleşen yanma odasında başlar. Bu odada, kömür yanma işlemine tabi tutularak yüksek sıcaklıklar ve basınçlar oluşturulur. Yanma odasından elde edilen ısı, içerisinde su geçirilen borular demetleri tarafından yakalanır.

Yakıtın Yanması ve Hava Beslemesi; Öğütülmüş kömür, yanma odasına taşındığında, yanma için gerekli olan hava ile karıştırılır. Bu karışım, yanma sürecinin kontrolü için özenle ayarlanan bir oranı korur.

1.1.4. Yanma Reaksiyonları Sonrası Oluşan Emisyonlar

Bu reaksiyonlar sonucunda (SO_x , NO_x , CO , CO_2 , HF , HCl ve toz emisyonları gibi) yanma ürünleri oluşur. Yanma işlemi şu ana reaksiyonlarla ifade

edilir: Bu zararlı maddeler, kömür yakıtlı termik santrallerin çevreye ve insan sağlığına olan etkilerini artırır.

Yanma işlemi, kömürdeki karbon ve hidrojenin oksijenle reaksiyona girmesiyle gerçekleşir.

Kömürün ana bileşeni karbon (C) ve az miktarda hidrojen (H) içerir. Kömür yandığında, karbon oksijenle reaksiyona girerek karbon dioksit oluşturur. Bu reaksiyonun aşağıdaki denklem ile (1.1) gösterilmiştir.



Bu tepkime ekzotermik olup, enerji açığa çıkarır. Bu enerji, santralin çalışmasını sağlayan buhar üretiminde kullanılır.

1.1.5. Kömürün Yanması Sonucunda Ortaya Çıkan Bu Zararlı Emisyonlar ve Etkileri

Çizelge 1.1. Kömürün yanması sonucu oluşan zararlı gazlar ve etkileri

Yanma Ürünü	Oluşum Mekanizması	Zararları
SO _x (Kükürt Oksitler)	Kömür içindeki kükürdün oksijenle birleşmesi sonucu oluşur.	Atmosferde asit yağmurlarına neden olur; solunum yolu hastalıklarına yol <u>açar</u> ; bitki örtüsünü ve yüzey sularını olumsuz etkiler.
NO _x (Azot Oksitler)	Yüksek sıcaklıkta kömür ve havadaki azotun oksijenle birleşmesi sonucu oluşur.	Hava kirliliğine katkıda bulunur, ozon oluşumuna neden olur; asit yağmurlarına sebep olur, solunum sorunlarına yol açar.
CO (Karbon Monoksit)	Yetersiz oksijen koşullarında tam yanma gerçekleşmediğinde oluşur.	Zehirli bir gazdır; yüksek seviyelerde solunduğunda ölümcül olabilir.
CO ₂ (Karbon Dioksit)	Kömürün tamamen yanması sonucu doğal bir yan ürün olarak oluşur.	Önemli bir sera gazıdır; küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine katkıda bulunur.
HF (Hidrojen Florür)	Kömür içindeki florin bileşiklerinin yanması sırasında oluşur.	Asidik özellik gösterir; toprak ve su kaynaklarına zarar verir, solunum yollarını etkileyerek insan sağlığına zarar verir.
HCl (Hidrojen Klorür)	Kömür içindeki klor bileşiklerinin yanmasıyla oluşur.	Atmosfere yayıldığında asidik özellik gösterir; solunum yollarında tahrişe neden olur, bitki örtüsünü olumsuz etkiler.
PM (Partikül Madde)	Yanma sırasında ayrılan kül ve yanmamış parçacıklar.	Solunum yollarına girerek akciğer hastalıklarına yol açar; atmosferde uzun süre kalabilir, çevre ve hava kalitesine olumsuz etki yapar.
Ağır Metaller	Kömür içindeki cıva, kurşun, kadmiyum gibi metaller yanma sırasında atmosfere salınır.	Kalıcı ve zehirleyici etkilere sahiptir; toprak ve su kirliliği oluşturur, insan sinir sistemi üzerinde olumsuz etkiler yapabilir.

1.1.6. Çevresel Etkiler ve Kontrol Önlemleri

Yanma ürünleri arasında bulunan CO₂ ve H₂O genellikle atmosfere salınır. Ancak, CO₂ bir sera gazıdır ve küresel ısınmaya katkıda bulunur. Bu nedenle, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri gibi yöntemlerle CO₂ emisyonlarını azaltmak için çeşitli önlemler alınır.

Kömür yakıtlı termik santrallerde karbon ve hidrojenin oksijenle reaksiyona girmesi sonucu CO₂ ve H₂O oluşur. Bu reaksiyonlar sırasında açığa çıkan enerji, elektrik üretiminde kullanılır. Ancak, çevresel etkileri minimize etmek için çeşitli kontrol önlemleri gereklidir.

Yüksek Sıcaklık ve Basınç: Yanma reaksiyonları, yüksek sıcaklıkları ve basınçları beraberinde getirir. Bu yüksek sıcaklık ve basınç, suyu buharlaştırmak için kullanılır. Elde edilen buhar, bir türbinin dönmesini sağlayacak enerjiye dönüştürülür.

Buhar Üretimi: Yüksek sıcaklıktaki buhar, kazanlar tarafından üretilir. Kazanlar, yanma odasında üretilen ısıyı absorbe eder ve bu ısıyı suyu buharlaştırmak için kullanır.

Türbin İşleyişi: Kazanda üretilen yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıktaki buhar, kazanı terk eder ve türbine doğru yönlendirilir. Yüksek basınçlı buhar, türbine girer ve burada dönme hareketi oluşturur. Türbin, üzerinde kanatçıklar bulunan bir mil şeklindedir; bu kanatçıklara çarpan buhar, türbini döndürmeye başlar. Buharın kanatçıklara çarpması sonucu, türbin milinde dönme hareketi meydana gelir. Bu dönme hareketi, buharın enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesini sağlar. Türbin miline bağlı olan jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Türbin döndükçe jeneratör de döner ve elektromanyetik indüksiyon prensibiyle elektrik üretilir. Türbinden geçen buhar, yoğunlaştırıcıda soğutularak tekrar sıvı suya dönüştürülür. Bu su, kapalı devre bir sistem içinde tekrar kazana yönlendirilir ve yeniden ısıtılarak buhara dönüştürülür. Bu sayede su sürekli bir döngüde kullanılır.

Bu süreç, kömür yakıtlı termik santrallerin temel enerji dönüşüm mekanizmasını temsil eder. Ancak, bu süreçlerin verimliliği, kullanılan teknoloji ve santralin tasarımına bağlı olarak değişebilir.

Enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla modern kömür yakıtlı termik santraller, gelişmiş teknolojiler kullanmaya yönelmektedir. Ancak, bu santrallerin çevresel etkileri ve emisyonlarını değerlendirmek için tüm süreçlerin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi önemlidir. Yüksek enerji üretim kapasitesine sahip olmalarına rağmen, kömür yakıtlı santrallerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için daha sürdürülebilir teknolojilere geçiş yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji sektörünün çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilecek önemli bir çözüm sunmaktadır.

1.1.7. Atmosferik Emisyonlar ve Hava Kirliliği

Karbonsuzlaştırma teknolojileri, atmosfere salınan CO₂'yi azaltma potansiyeline sahiptir. Bu teknoloji, CO₂'yi yakalar ve depolar, böylece atmosferik emisyonları azaltır (Durmaz, 2019)

İleri Emisyon Kontrol Sistemleri; ileri emisyon kontrol sistemleri, sülfür dioksit, azot dioksit ve partikül madde emisyonlarını kontrol etmek için tasarlanmıştır. Elektrostatik filtreler (ESP), kükürt oksit absorpsiyon sistemleri ve selektif katalitik redüksiyon (SCR) gibi teknolojiler, emisyonları azaltmada etkili olur.

Hava Kalitesi İzleme ve Raporlama; santrallerin çevresel etkilerini değerlendirmek için hava kalitesi izleme ve raporlama sistemleri kullanılır. Bu sistemler, çevredeki hava kalitesini düzenli olarak izleyerek çevresel performansı değerlendirmeye yardımcı olur (Özden, 2017).

Toprak ve Su Kirliliği; atmosferik emisyonların yanı sıra, kömürün yakılması sonucu oluşan cüruf ve külün toprağa karışması, yağmur suları ile temas ederek kontrolsüz bir şekilde doğaya karışması, kömür madenlerinden kaynaklanan erozyon ve sızıntılar nedeniyle toprak ve su kirliliği de söz konusu olabilir. Bu, çevre ve ekosistem sağlığı üzerinde ek etkiler oluşturacaktır.

Bu tanımlamalar kömür yakıtlı termik santrallerin atmosferik emisyonlar ve hava kirliliği ile ilgili çeşitli etkilerini anlamak için geniş bir bakış sunmaktadır. Modern teknolojiler ve düzenlemeler, bu etkileri azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmekte önemli bir rol oynar.

Kömür Atıklarının Yönetimi; kömür yakıtlı termik santraller, küller ve diğer yan ürünlerin oluşmasına neden olur. Bu atıkların uygun bir şekilde yönetilmemesi, toprak kirliliğine ve yer altı su kaynaklarının etkilenmesine yol açar.

Termik Santral Suyu Kullanımı; soğutma amaçlı kullanılan su, termik santrallerin çevresel etkilerini belirler. Büyük su tüketimi, su kaynaklarını azaltabilir ve sıcak su deşarjları, su ekosistemlerini etkiler.

Enerji Verimliliği İyileştirmeleri; enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli önlemler almak, kömür yakıtlı termik santrallerin emisyonlarını azaltabilir. Bu, daha fazla enerji üretimi için daha az kömür tüketimini içerir.

Çevre Duyarlılıklı Teknolojilerin Kullanımı; temiz teknolojilere yatırım yapmak, kömür yakıtlı termik santrallerin çevresel etkilerini azaltmaya yardımcı olabilir. Örneğin, karbon yakalama ve depolama (CCS) gibi teknolojiler, CO₂ emisyonlarını azaltır.

İşletme ve Bakım Pratikleri; iyi işletme ve bakım uygulamaları, termik santrallerin daha temiz ve verimli işlemesine olanak tanır. Düzenli bakım, ekipmanların daha uzun süreli ve daha verimli çalışmasını sağlar.

Toplum ve Çevre ile Etkileşim Analizi; santralin çevresel etkileri, yerel topluluklar ve çevre üzerindeki etkileri değerlendiren bir sosyal etki analizi içermelidir. Bu analiz, toplumun ve çevrenin karar süreçlerine daha fazla dahil olmasına yardımcı olur.

Sürdürülebilir Enerji Geçişine Uyum; santrallerin sürdürülebilir enerji geçişine nasıl uyum sağlayabileceği ve temiz enerji kaynaklarına nasıl entegre olabileceği de değerlendirilmelidir.

1.2. Araştırmanın Amaçları ve Hedefleri

Bu çalışmanın temel amacı, kömür yakıtlı termik santraller ile fotovoltaik (PV) güneş enerji santrallerinin emisyon miktarları ve çevresel etkiler açısından karşılaştırılmasını yaparak, sürdürülebilir enerji üretimine yönelik stratejiler geliştirmektir.

Bu kapsamda araştırmanın hedefleri şunlardır:

Kömür yakıtlı termik santrallerin çevresel etkilerini ve emisyon değerlerini analiz etmek.

PV güneş enerji santrallerinin çevresel avantajlarını ve emisyon değerlerini incelemek.

Kömür ve güneş enerji santrallerinin potansiyellerini vurgulamak.

Sürdürülebilir enerji üretimine yönelik yenilikçi stratejiler geliştirmek.

Problem tanımı ise;

Kömür yakıtlı termik santraller, enerji sektöründe sürdürülebilirlik ve çevresel

etki bağlamında önemli bir sorun kaynağıdır. Bu santrallerin işleyiş mekanizması, kömürün yanması sonucu buhar üretilmesi ve bu buharın türbinleri döndürerek elektrik üretmesi prensibine dayanır. Yüksek enerji kapasitesi sunmalarına rağmen, kömür yakıtlı termik santraller, çevreye yayılan emisyonlar ile doğal ekosistemleri ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir.

Kömür santralleri tarafından atmosfere salınan CO₂, SO₂, NO_x ve PM gibi zararlı gazlar, hava kirliliği, asit yağmurları, su kaynaklarının kirlenmesi ve toprak kirliliğine yol açmaktadır. Bu durum, yalnızca ekosistemlere zarar vermekle kalmayıp, yerel halkın sağlığını da tehdit etmektedir. Özellikle santrallerin soğutma sistemlerinin ihtiyaç duyduğu yüksek su tüketimi, su ekosistemlerini bozmakta ve proses sonucu çıkan atık sularda içme suyu kaynaklarını kirletmektedir. Bu etkiler, enerji sektöründe sürdürülebilirlik çabalarını zorlaştırmakta ve kömür bazlı enerji üretiminin çevresel maliyetlerini artırmaktadır.

Bu sorunlar, enerji sektöründe yenilikçi ve çevre dostu teknolojilere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Güneş enerji santralleri, bu sorunlara alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Sıfır karbon salınımı hedefiyle çalışan bu sistemler, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlamaları

Bu çalışma, kömür yakıtlı termik santrallerin çevresel etkilerini ve emisyon değerlerini inceleyerek, güneş enerji santrallerinin çevresel avantajlarını ve bu iki enerji üretim modelinin karşılaştırmasını kapsamaktadır. Detaylar şu başlıklar altında ele alınmıştır:

Kapsamında ise;

Kömür Yakıtlı Termik Santraller: Kömür santrallerinin emisyon verileri, işleyiş bilgileri ve çevresel etkilerini analiz edecektir.

PV Güneş Enerji Santralleri: Güneş enerji santrallerinin emisyon değerlerini, enerji üretim süreçleri ve çevresel avantajları değerlendirilecektir.

Çevresel Analizler: Bu iki enerji üretim sisteminin çevresel etkilerinin analizi ile sürdürülebilir enerjiye katkılarını kıyaslayacaktır.

Sınırlamalarında ise;

Teknolojik Sınırlamalar: Güneş enerji santralleri ve kömür santralleri mevcut teknoloji bağlamında ele alınmıştır. Araştırma, santrallerin inşaat süreçlerini kapsamamaktadır.

Yerel ve İklimsel Faktörler: Belirli bir coğrafi bölgede yapılan analizlere dayanarak yerel ve iklimsel faktörlerin performansa etkisini inceleyecektir.

Bu kapsam ve sınırlamalar çerçevesinde, çalışma enerji sektöründe sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda güneş enerji santrallerinin emisyon değerlerinin azaltımına yönelik çözüm potansiyellerini analiz etmeyi hedeflemektedir. Araştırmanın sonuçlarının, sürdürülebilir enerji politikaları ve uygulamaları için önemli bir rehber sunması beklenmektedir.

1.3. Güneş Enerji Sistemleri (PV) Prosesi

Güneş enerji santralleri, fosil yakıt kullanımının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Fotovoltaik (PV) teknolojilere dayanan bu sistemler, enerji üretimi sırasında fosil yakıtların yakılmasını gerektirmediğinden atmosfere zararlı gazların salınımını engeller. Güneş enerjisi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda emisyon değerlerini düşürmeyi ve enerji üretim süreçlerini daha çevre dostu hale getirmeyi hedefleyen stratejilerde kritik bir rol oynar.

Güneş enerji santrallerinin temel prensibi, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu dönüşüm, güneş panelleri üzerinde bulunan yarı iletken malzemeler aracılığıyla gerçekleştirilir. Güneş enerjisi, doğal ve yenilenebilir bir kaynak olarak, enerji üretiminde sonsuz bir potansiyel sunar. Bu özellikleriyle, fosil yakıt kaynaklı enerji üretiminin çevresel etkilerini ortadan kaldırmak için sürdürülebilir bir alternatif oluşturur.

Güneş enerjisi sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, enerji üretimi sırasında atmosferik emisyonların sıfıra yakın olmasıdır. Bu santraller, enerji üretim sürecinde su tüketimi, hava kirliliği ve karbon salınımını minimum seviyeye indirerek çevreye olan olumsuz etkileri azaltır. Güneş enerji santrallerinin kurulumu sırasında çevresel etkiler oluşabilse de bu etkiler santralin işletme ömrü boyunca sağladığı çevresel faydalarla dengelenebilir.

Güneş enerji sistemleri, enerji üretim süreçlerinde sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmeye yönelik en verimli araçlardan biridir. Bu santrallerin emisyon

değerlerinin düşürülmesi ve enerji arz güvenliğinin artırılması gibi çevresel ve ekonomik faydaları, gelecekte enerji sektörünün daha yeşil ve yenilikçi bir yapıya kavuşmasında önemli bir katkı sağlar.

1.3.1. Güneş Enerji Santralleri ve Karbon Ayak İzini Azaltma Potansiyeli

Güneş enerji santralleri, karbon emisyonlarının azaltılmasında sağladığı faydalar nedeniyle temiz enerji dönüşümünde öncü bir rol üstlenmektedir. Fotovoltaik sistemler, enerji üretimi sırasında fosil yakıt kullanımını tamamen ortadan kaldırır ve atmosfere sera gazı salınımını engeller. Bu özellik, emisyon değerlerinin azaltılmasında güneş enerji santrallerini diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha çevre dostu bir çözüm haline getirir.

Güneş enerjisi sistemleri, yalnızca işletim sırasında değil, üretim ve kurulum süreçlerinde de çevresel etkileri minimum seviyede tutmayı hedefler. Fotovoltaik panellerin üretiminde kullanılan malzemelerin büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir ve uzun ömürlüdür. Bu özellik, güneş enerjisi sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine uygun olmasını sağlar. Ayrıca, kurulum ve işletme aşamalarındaki düşük karbon emisyonu oranları, güneş enerji santrallerinin toplam çevresel etkisini azaltır (Enerji Rehberi, 2024).

Güneş enerjisi sistemleri, enerji depolama teknolojileri ile birleştirildiğinde, güneş ışığının az olduğu dönemlerde bile kesintisiz enerji üretimi sağlayabilir. Bu durum, enerji üretim süreçlerinin daha esnek ve güvenilir hale gelmesini mümkün kılar. Aynı zamanda, enerji üretiminin talebe göre düzenlenebilmesi, karbon salınımını azaltma hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırır.

Güneş enerji santralleri, yerel enerji üretimini artırarak enerji bağımsızlığına katkıda bulunur ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır. Bu santrallerin kullanımı, çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir enerji geleceği sunar.

1.3.2. Güneş Enerjisi ve Çevresel Avantajları

Güneş enerjisi, sıfır karbon emisyonu, düşük su tüketimi ve hava kirliliğinin önlenmesi gibi çevresel avantajlarıyla enerji üretiminde sürdürülebilir bir alternatif sunar. Güneş panelleri, enerji üretimi sırasında fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırarak, karbon dioksit, kükürt dioksit ve azot oksit gibi zararlı gazların salınımını engeller. Bu, hava kalitesinin korunmasına ve atmosferik kirliliğin azaltılmasına önemli bir katkı sağlar.

Su tüketiminin düşük olması, güneş enerji santrallerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantajıdır. Kömür yakıtlı termik santraller gibi büyük miktarlarda suya ihtiyaç duymayan güneş enerji santralleri, doğal su kaynaklarının korunmasına ve su kirliliğinin önlenmesine yardımcı olur. Bu durum, özellikle su sıkıntısının yaşandığı bölgelerde güneş enerjisini daha cazip bir seçenek haline getirir.

Güneş enerjisi projelerinde kullanılan fotovoltaik panellerin çatı veya kullanılmayan arazilere kurulumu, doğal yaşam alanlarının korunmasına olanak tanır. Bu yöntem, arazi kullanımını optimize ederek çevresel etkileri azaltır. Ayrıca, panellerin geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilmesi, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar ve atık miktarını en aza indirir.

Enerji güvenliğini artırma potansiyeline sahip olan güneş enerjisi, ülkeler arasındaki enerji bağımlılığını azaltarak enerji arzını daha istikrarlı hale getirir. Bu, yerel düzeyde enerji üretiminin artırılmasını ve küresel ölçekte sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırır.

1.3.3. Güneş Enerjisi ve Teknolojik Gelişmeler

Güneş enerji sistemlerinde kullanılan teknolojilerin sürekli gelişmesi, bu sistemlerin hem verimliliğini artırmış hem de kurulum maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüştür. Yüksek verimlilikteki paneller, daha az alanda daha fazla enerji üretebilir, bu da hem ekonomik hem de çevresel açıdan avantaj sağlar.

Enerji depolama teknolojilerindeki ilerlemeler, güneş enerji santrallerinin enerji üretim süreçlerinde devrim niteliğinde değişikliklere olanak tanımıştır. Bu teknolojiler sayesinde, güneş ışığının az olduğu gece saatlerinde veya bulutlu günlerde bile kesintisiz enerji sağlanabilir. Enerji üretimi ile tüketim arasındaki dengenin sağlanması, karbon salınımının azaltılmasında ve enerji üretim süreçlerinin daha sürdürülebilir hale gelmesinde önemli bir rol oynar (Taşkesen vd., 2023).

1.3.4. Teknolojik İlerlemeler ve Verimlilik

Güneş enerjisi santralleri, sürekli gelişen teknolojiler sayesinde verimliliklerini artırarak sürdürülebilir enerji üretimi alanında öne çıkmaktadır. Bu santrallerdeki teknolojik yenilikler, enerji üretiminin yanı sıra işletim maliyetlerini düşürmek, çevresel etkileri en aza indirmek ve sürdürülebilirliği artırmak gibi birçok alanda büyük katkılar sunmaktadır.

1.3.5. Akıllı İzleme ve Analitik

Günümüzde enerji santralleri, akıllı izleme ve analitik sistemlerle donatılmaktadır. Bu teknolojiler, santralin tüm çalışma süreçlerini gerçek zamanlı olarak takip ederek operasyonel verimliliği artırır. Büyük veri ve yapay zekâ tabanlı sistemler, güneş panellerinin performansını sürekli analiz eder, hava durumu değişikliklerini ve diğer çevresel faktörleri dikkate alarak enerji üretimini optimize eder. Bu teknolojiler, arızaları önceden tespit ederek bakım süreçlerini kolaylaştırır ve maliyetleri düşürür

1.3.6. Yapay Zeka ve Otomasyon

Yapay zeka ve otomasyon teknolojileri, güneş enerjisi santrallerinde operasyonel verimliliği artırmaktadır. Yapay zeka tabanlı sistemler, panellerin performansını analiz eder, bakım süreçlerini iyileştirir ve enerji üretim miktarını tahmin edebilir. Örneğin, otomatik panel temizleme sistemleri, tozlanma ve kirlilik nedeniyle oluşan verim kaybını minimize eder.

1.3.7. Uzaktan İzleme ve Yönetim Sistemleri

Uzaktan izleme teknolojileri, güneş enerjisi santrallerinin performansını anlık olarak takip etme ve kontrol etme imkânı sunar. Bu sistemler, işletme maliyetlerini düşürür ve sorunların hızlı bir şekilde çözülmesini sağlar. Ayrıca, uzaktan izleme yazılımları, enerji üretim raporlarını düzenli olarak analiz ederek gelecekteki iyileştirme alanlarını belirler.

Sonuç olarak, güneş enerji santralleri, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği hedeflerine ulaşmada önemli bir araçtır. Teknolojik yenilikler ve düşük çevresel etkileriyle güneş enerjisi, temiz enerji dönüşümünün temel taşlarından biri olmaya devam edecektir. Bu santrallerin yaygınlaşması, yalnızca karbon emisyonlarının azaltılmasına değil, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına ve sürdürülebilir ekonomik büyümeye de katkıda bulunacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerin Emisyonlarının Hava Kalitesi Üzerindeki Etkileri ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi

Enerji üretimi, modern ekonomilerin temel yapı taşı olarak kabul edilmekle birlikte, bu süreç aynı zamanda küresel iklim değişikliğinin başlıca itici güçlerinden biridir. Özellikle kömürle çalışan termik santraller, dünya genelinde en yaygın kullanılan fosil yakıt bazlı enerji kaynakları arasında yer almakta ve yüksek karbon emisyonlarıyla öne çıkmaktadır. Bu durum, hava kirliliği ve iklim değişikliği açısından ciddi çevresel sorunlar doğurmaktadır (Bayazit vd., 2021).

Kömür yakıtlı termik santrallerin atmosfere saldıgı emisyonlar, hava kalitesi üzerinde ciddi olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, bu emisyonların çeşitlerini, miktarlarını ve hava kirliliği üzerindeki potansiyel etkilerini detaylı bir şekilde ele almaktadır (Demirpolat, 2022).

Son yıllarda, bu sorunlara karşılık, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmıştır. Özellikle fotovoltaik (PV) güneş enerjisi gibi çevre dostu enerji çözümleri, sürdürülebilir bir geleceğe geçiş için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu alandaki yatırımlar hızla büyümekte ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanım oranı artmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, kömürle çalışan termik santrallerin emisyon değerleri, PV güneş enerji santrallerinin çevresel etkileriyle karşılaştırılacak ve literatürdeki bulgular ışığında emisyon azaltım stratejileri değerlendirilecektir. Araştırma, emisyon değerlerini azaltma ve sürdürülebilir enerji politikaları geliştirme açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini vurgulamaktadır.

Türkiye bağlamında ele alındığında, yenilenebilir enerji politikalarının güçlendirilmesi ve bu alandaki yatırımların artırılması, uzun vadede çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlayacaktır. Bu doğrultuda, kömür yakıtlı termik santrallerin emisyonlarının etkilerinin ve yenilenebilir enerji alternatiflerinin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Bu bölüm, hem kömür bazlı enerji üretiminin çevresel maliyetlerini hem de yenilenebilir enerjiye geçişin potansiyel faydalarını bilimsel temeller üzerinden değerlendirmektedir. Bu çerçevede, mevcut literatür analiz edilerek, Türkiye gibi enerji politikalarında önemli dönüşümler yaşayan ülkeler için uygulanabilir çözüm önerileri sunulacaktır.

2.1.1. İstatiksel Veriler

Kömür yakıtlı termik santraller, dünya genelindeki elektrik üretiminde önemli bir rol oynamakta ve bu santrallerin karbon salınımı ve emisyon değerlerinin artması yönündeki üzerindeki etkisi bu yüzden büyüktür.

Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency - IEA) verilerine göre, kömür, dünya genelinde enerji üretiminde önemli bir paya sahip olup, bu pay %38 seviyesindedir. Kömür, elektrik üretimi gibi yoğun enerji ihtiyacı olan endüstrilerde yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, kömür kullanımının çevresel etkileri oldukça ciddi boyutlardadır (International Energy Agency, 2023).

Yapılan araştırmalarda kömür kaynaklı enerji üretiminin, tüm küresel karbon dioksit (CO₂) emisyonlarının %40'ını oluşturduğu belirtilmiştir. Bu oran, kömürün fosil yakıtlar arasında en yüksek karbon emisyon yoğunluğuna sahip olması ve dünya genelinde enerji talebini karşılamak için yaygın bir şekilde kullanılmasıyla ilişkilidir. Kömürden enerji üretimi sırasında atmosfere büyük miktarlarda sera gazı salınımı gerçekleşmekte, bu da iklim değişikliğine önemli ölçüde etki etmektedir. Türkiye'de benzer bir durum söz konusudur. Yapılan çalışmalar da 2000-2004 yılları arasında elektrik üretiminde kömürden doğal gaza geçişin emisyon faktörünü 0,65'ten 0,50 seviyesine düşürdüğü, ancak sonrasında artan kömür tüketimiyle 2008'e kadar hızlı bir artış gösterdiği ve dalgalanarak devam ettiği görülmüştür. (Dulkadiroğlu vd., 2018a).

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) verileri, kömürün enerji üretimindeki baskın rolünün, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyüme ve enerji talebinin artışıyla yakından bağlantılı olduğunu da ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, birçok ülke, bu yüksek emisyon oranlarını azaltmak ve iklim değişikliği ile mücadele etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmaktadır. Ancak, kömürün enerji üretimindeki payı hala yüksek seviyelerde seyretmekte, bu da emisyon azaltımı çabalarını daha karmaşık hale getirmektedir.

Kömür kullanımının bu denli yüksek karbon emisyonlarına yol açması, küresel ölçekte iklim politikalarının oluşturulmasında kömürden uzaklaşmanın aciliyetini ortaya koymuş ve yenilenebilir enerjiye geçişi teşvik eden stratejileri hızlandırmıştır. Bu bağlamda, kömürün enerji üretimindeki rolü ve çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji politikaları geliştirmek için temel bir analiz konusu olarak öne çıkmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2023 raporuna göre, kömürle çalışan termik santrallerin yıllık karbon emisyonları 14 gigaton CO₂ düzeyindedir. Bu miktar, küresel karbon emisyonlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır ve kömür bazlı enerji üretiminin iklim değişikliği üzerindeki ciddi etkilerini açıkça ortaya koymaktadır (IEA ve AGENCY, 2023).

Bu durum, kömür santrallerinin emisyon değerlerini azaltılması gerektiğini göstermektedir. Kömürle çalışan santraller, genellikle eski teknolojiyle faaliyet gösterdiği için verimlilik açısından düşük seviyelerde kalmakta ve yüksek miktarda karbon salınımına neden olmaktadır. Ayrıca, bu emisyonlar sadece iklim değişikliğine katkıda bulunmakla kalmamakta, aynı zamanda hava kirliliğini de artırmaktadır.

Karbon emisyonlarını azaltmak için çeşitli stratejiler gereklidir. Bunlar arasında kömür santrallerinin modernize edilmesi, karbon tutma ve depolama teknolojilerinin uygulanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliğinin artırılması gibi önlemler bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle güneş ve rüzgar enerjisine geçiş, bu emisyonların büyük ölçüde azaltılmasını sağlayabilir. Bunun yanı sıra, enerji politikalarının bu geçişi destekleyecek şekilde düzenlenmesi de önemlidir.

Kömür santrallerinin yüksek karbon emisyonları, küresel iklim hedeflerine ulaşmak için önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu nedenle, kömür bazlı enerji üretiminin yerine temiz enerji kaynaklarına geçişin hızlandırılması, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

Türkiye’de ise kömürle çalışan santrallerin karbon salınımı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye’nin enerji üretiminde kömürün payı %35’tir. Bu, kömürün ülke enerji sisteminde hala önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. Ayrıca, Türkiye’nin toplam karbon salınımının %28’i kömürden kaynaklanmaktadır. Bu veriler, kömürün enerji üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmasının iklim değişikliği açısından önemli bir sorun oluşturduğunu göstermektedir. Bu veriler, kömürle çalışan santrallerin karbon özelliklerinin yüksek olduğunu da göstermektedir. Bu da kömürün hala enerji yaşamında önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB],2022); (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], n.d.).

Kömürden kaynaklanan yüksek karbon emisyonları, iklim değişikliği açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, Türkiye'nin enerji

politikalarında alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi ve temiz enerji üretimini artırması büyük önem arz etmektedir.

Türkiye’de kömürle çalışan santrallerin karbon emisyonlarının yüksek olması, enerji üretiminde kömür kullanımının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yaparak karbon salınımını azaltması, çevresel sürdürülebilirlik ve uluslararası iklim hedeflerine ulaşma açısından kritik bir öneme sahiptir.

2.1.2. Karbon Salımına Dair Veriler ve Atıflar

Kömürle çalışan termik santraller, enerji üretimi sırasında yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) salınımına neden olmaktadır. Bunun temel nedeni, kömürün yakılması sürecinde karbonun oksijenle birleşerek büyük miktarlarda CO₂ açığa çıkarmasıdır. Bu süreç, kömürün kimyasal yapısından kaynaklanmaktadır. Kömür, büyük oranda karbon içerdiği için yanma sırasında CO₂ salınımı açısından en yüksek yoğunluklu fosil yakıtlar arasında yer alır.

Kömür türüne bağlı olarak karbon salınım miktarları değişiklik gösterebilir. Örneğin, taş kömürü, yüksek karbon içeriği nedeniyle linyite kıyasla daha fazla emisyonu neden olur. Bununla birlikte, her tür kömür enerji üretiminde yüksek çevresel maliyetlere sahiptir.

Kömürün yanma süreci, denklem (2.1) deki gösterim ile temel kimyasal reaksiyonu içerir.



Bu süreç sırasında karbon molekülleri oksijenle birleşir ve karbondioksit açığa çıkar. Yanma sırasında üretilen enerji, elektrik üretiminde kullanılırken, ortaya çıkan CO₂ atmosfere salınır. Kömürün yüksek karbon yoğunluğu, enerji üretimi sırasında küresel karbon emisyonlarının artmasında önemli bir etkisi vardır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve IPCC gibi kuruluşlar, kömür bazlı enerji üretiminin küresel sera gazı emisyonlarına etkisini ayrıntılı olarak inceleyen raporlar yayımlamaktadır (Green ve Vallee, 2024)

Türkiye ve Avrupa da ki durumlar ise; 2000–2013 yılları arasında Avrupa

ülkelerindeki tüm yakıt türlerinden kaynaklanan emisyonlar azalırken, Türkiye'de fosil yakıtlardan kaynaklanan emisyonlarda %41 artış meydana geldi (Dulkadiroğlu vd., 2018b).

ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) yayımladığı raporlara göre, kömürle çalışan termik santraller, her bir kilovat-saat (kWh) enerji üretimi başına ortalama 0,94 kilogram CO₂ salınımına neden olmaktadır. Bu değer, kömür bazlı enerji üretiminin çevresel etkilerini diğer fosil yakıtlarla kıyaslamada önemli bir ölçüttür. Örneğin, doğal gazdan enerji üretimi sırasında kWh başına yaklaşık 0,45 kilogram CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Bu fark, kömürle çalışan santrallerin neden daha fazla tartışma konusu olduğunu ve azaltım stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini açıklamaktadır (Green ve Vallee, 2024).

Kömürle çalışan termik santrallerin yüksek karbon emisyonları, hem küresel hem de ulusal ölçekte enerji politikalarının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. IPCC tarafından sağlanan 2,4 ton CO₂ dönüşüm katsayısı ve EPA'nın kWh başına 0,94 kilogram CO₂ salınım oranı gibi veriler, enerji üretiminden kaynaklanan emisyon değerlerini doğru bir şekilde hesaplamaya olanak tanımaktadır. Bu tür bilgiler, sürdürülebilir enerji politikaları geliştirmek ve kömürün yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmasını sağlamak için kritik bir rehberdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, karbon salınımını azaltmak ve çevresel hedeflere ulaşmak için hayati bir adım olacaktır (Environmental Protection Agency [EPA], 2023).

Avrupa Çevre Ajansı'nın (European Environment Agency - EEA) yayımladığı rapora göre, Avrupa'daki kömürle çalışan termik santrallerin yıllık karbon salınımları toplamda 1,2 gigaton CO₂ seviyesindedir. Bu miktar, Avrupa Birliği'nin (AB) toplam karbon salınımının %20'sine denk gelmektedir. Bu veri, kömürle çalışan santrallerin Avrupa'nın karbon ayak izi üzerindeki önemli etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu tür veriler, Avrupa'daki emisyon azaltım hedeflerini anlamak ve değerlendirmek için kritik bir referans noktasıdır (European Environment Agency [EEA], 2024).

Avrupa, enerji üretiminde kömür kullanımı nedeniyle ciddi miktarda karbon emisyonu üretmektedir. Özellikle bazı Avrupa ülkeleri, enerji üretiminde kömüre büyük ölçüde bağımlıdır ve bu durum emisyon miktarlarını artırmaktadır. Avrupa Birliği, uzun vadede de karbon nötrlemeyi hedefleyen bir iklim politikası benimsemiştir. Ancak kömür santrallerinin halen yüksek emisyon miktarlarına neden

olması, bu hedefe ulaşmada önemli bir engel oluşturmaktadır.

Avrupa'daki kömürle çalışan termik santraller, Avrupa Birliği'nin (AB) toplam karbon salınımının önemli bir kısmını oluşturuyor. Özellikle, kömür kullanımındaki azalma ve değişen enerji artışıyla birlikte, AB'nin sera emisyon emisyonlarında %8 oranında bir düşüş sağlandı. Kömürle çalışan santrallerin Avrupa'nın emisyon değerleri üzerindeki gerilimi ve emisyon azaltma hedeflerinin güçlenmesini açıkça göstermektedir. Ayrıca bu tür veriler, Avrupa'daki emisyon azaltma hedeflerini değerlendirme ve değerlendirme için kritik bir referans noktasıdır.(Global Energy Monitor, 2024)

Kömür santrallerinin karbon emisyonları üzerindeki etkisini anlamak için bu araştırmalar büyük önem taşımaktadır. EEA, Avrupa'daki çevresel değişimleri izleyen ve raporlayan bir kurumdur. Kömür santrallerinin karbon emisyonlarına dair sağladığı veriler, AB ülkelerinin karbon ayak izi analizinde önemli bir rol oynamaktadır.

EEA'nın raporlarına göre, kömür santralleri yalnızca yüksek CO₂ emisyonlarına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda kükürtdioksit (SO₂) ve azotoksitler (NO_x) gibi diğer zararlı emisyonların da kaynağıdır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ise kömür santrallerinin küresel karbon emisyonlarındaki etkisini değerlendirirken, Avrupa'nın da bu alandaki rolüne dikkat çekmektedir. IEA verilerine göre, dünya genelinde kömürden kaynaklanan karbon emisyonlarının yaklaşık %10'u Avrupa'ya aittir (International Energy Agency [IEA], 2024)

Avrupa ülkeleri, kömürden uzaklaşarak yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmaktadır. Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS), kömürle çalışan santraller gibi yüksek emisyon kaynaklarını kontrol etmek için uygulanmaktadır. Bu sistem, santrallerin karbon emisyonlarını azaltmalarını teşvik etmek amacıyla maliyet yükümlülükleri getirmektedir. Ayrıca AB, 2030 yılına kadar enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklarına geçmeyi hedeflemektedir. Bu hedef, kömürden kaynaklanan emisyonları azaltmada önemli bir rol oynayacaktır.

IEA'nın sağladığı 1,2 gigaton CO₂ verisi, kömür santrallerinin Avrupa Birliği'ndeki karbon emisyonları üzerindeki etkisini doğrudan göstermektedir. Bu veri, Avrupa'nın iklim hedeflerine ulaşmak için karşı karşıya olduğu zorlukları ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, karbon salınımının yanı sıra kömür santrallerinin hava kirliliğine olan etkileri de kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. IEA'nın küresel raporları ise Avrupa'nın emisyon yoğunluğunu diğer bölgelerle

kıyaslayarak değerlendirir ve Avrupa'nın bu alandaki küresel sorumluluğunu vurgular (IEA, 2024)

Sonuç olarak, Avrupa'da kömürle çalışan santraller yüksek CO₂ salımıyla emisyon değerlerinin yüksek çıkmasında önemli bir pay sahibidir ve bu emisyonlar AB'nin toplam karbon salınımının %20'sini oluşturmaktadır. Bu veriler, Avrupa'nın kömürden uzaklaşarak yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırması gerektiğini göstermektedir. AB'nin 2050 karbon nötr hedefi doğrultusunda, kömür santrallerinin kapatılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması, bu hedeflere ulaşmak için kaçınılmaz adımlardır. EEA ve IEA gibi uluslararası kuruluşların sağladığı veriler, emisyon azaltım stratejilerinin bilimsel temellere dayanmasını sağlayarak bu geçiş sürecine ışık tutmaktadır ((IEA, 2024); (International Energy Agency [IEA], 2023).

2.1.3. Uluslararası Enerji Ajansı ve Diğer Uluslararası Kuruluşlardan Atıflar

Kömürle çalışan santrallerin emisyon değerlerini anlamak ve azaltmak için IEA, IPCC, EPA ve EEA gibi uluslararası kuruluşların sağladığı veriler, literatürde geniş yer bulmaktadır.

Bu çalışmalar, sera gazı kaynaklarının belirlenmesi, emisyonların doğru bir şekilde ölçülmesi ve ulusal düzeyde raporlanması için detaylı rehberlik sağlar. IPCC, raporlarında farklı sektörlerle özgü metodolojiler sunar ve enerji, endüstri, tarım, ormancılık ve atık yönetimi gibi sektörlerdeki emisyon kaynaklarını ayrı ayrı ele alır. Kömürle çalışan santraller gibi enerji üretim sektörlerinde, karbon dioksit (CO₂) salınımının hesaplanması, bu metodolojilerle uluslararası standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilir.

2.1.4. Sera Gazı Türleri ve Kaynakları

IPCC'nin raporları, yalnızca karbondioksit (CO₂) değil, aynı zamanda metan (CH₄), azot oksit (N₂O) ve diğer sera gazları için de hesaplama yöntemleri sunar. Bu, farklı sera gazlarının küresel ısınma potansiyelini (GWP) dikkate alarak daha kapsamlı bir envanter oluşturmayı sağlar.

Hesaplama Metodolojileri: Rapor, sera gazı salınımının doğrudan ölçülemediği durumlar için farklı seviyelerde (Tier 1, Tier 2 ve Tier 3) hesaplama yaklaşımları önerir:

Çizelge 2.1. Emisyon hesaplama metodolojileri

Tier 1	Temel düzeyde, genel emisyon faktörleri kullanılarak yapılan hesaplamalar.
Tier 2	Daha detaylı, ülkeye özgü emisyon faktörlerini içeren metodolojiler.
Tier 3	Gelişmiş modelleme ve ölçümlere dayalı en ayrıntılı hesaplama

Enerji sektöründe kömür kullanımı çalışmaları ise; IPCC'nin 2006 yılında yayımladığı "Ulusal Sera Gazı Envanterleri için Kılavuzlar" raporuna göre, kömürün yanması sırasında oluşan CO₂ emisyonları, kömürün türü ve karbon içeriğine bağlı olarak dağılmıştır. Örneğin, antrasit kömür için CO₂ emisyon faktörü 98,3 kg CO₂/GJ, bitümlü kömür için 94,6 kg CO₂/GJ ve linyit için 101,2 kg CO₂/GJ olarak belirtilmiştir.

Bu değerler, kömürün yanması sırasında açığa çıkan CO₂ miktarını hesaplamak için kullanılır. Örneğin, bitümlü kömürün alt ısı değeri yaklaşık 24 GJ/ton olarak kabul edilirse, 1 ton bitümlü kömürün yanması sonucu yaklaşık 2,27 ton CO₂ ($94,6 \text{ kg CO}_2/\text{GJ} \times 24 \text{ GJ/ton}$) salınımı meydana gelir. Bu programlama, kömürün yanması sırasında oluşan CO₂ emisyonlarının değerlendirilmesinde önemli bir referans sağlar. (Gómez, 2006)

2.1.5. Ulusal ve Uluslararası Raporlama Standartları

IPCC, UNFCCC'ye taraf olan ülkelerin emisyon raporlarını hazırlarken izlemesi gereken protokolleri detaylandırır. Bu standartlar, ülkelerin emisyon azaltımı hedeflerini izlemelerini ve karşılaştırılabilir veriler sağlamalarını mümkün kılar.

Raporun tarihi gelişiminde ise; ilk olarak "Sera Gazı Envanteri Kılavuzu" 1996 da yayımlandı. Bu rehber, temel emisyon hesaplama yöntemlerini içermektedir. 2006 da ise güncellenmiş versiyon yayımlandı. Bu versiyon, daha kapsamlı metodolojiler ve sektörler için özel detaylı hesaplama araçları sundu. Günümüzde de geniş ölçüde kullanılmaktadır. IPCC, ihtiyaç duyulduğunda sektörel yenilikleri ve iklim politikalarındaki gelişmeleri dikkate alarak metodolojilerini güncellemektedir.

IPCC'nin "Sera Gazı Envanteri" raporları, kömürle çalışan santrallerin emisyon değerlerini anlamak ve azaltmak için vazgeçilmez bir kaynak niteliğindedir. Bu raporlar, ülkelerin emisyonlarını doğru bir şekilde hesaplamalarını ve uluslararası standartlarla uyumlu bir şekilde raporlamalarını sağlar. Kömür gibi yüksek karbon

yoğunluğuna sahip enerji kaynaklarının emisyonları bu standartlarla hesaplanarak, ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadele stratejileri geliştirmesine rehberlik eder. 2006 yılı itibarıyla yayımlanan güncel versiyon, enerji sektöründen tarıma kadar tüm emisyon kaynakları için detaylı rehberlik sunarak iklim politikalarının temelini oluşturur. Bu raporlar hem ulusal hem de küresel ölçekte karbon ayak izinin azaltılması için kritik öneme sahiptir (Gómez, 2006).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), her yıl yayımladığı "Küresel Enerji Görünümü" (World Energy Outlook) raporlarıyla enerji sektörünün mevcut durumu ve geleceği hakkında kapsamlı analizler sunmaktadır. Bu raporlar, enerji talebi, arz güvenliği, teknolojik gelişmeler, politika senaryoları ve karbon emisyonları gibi konuları detaylı bir şekilde ele alır. Özellikle kömürle çalışan termik santrallerin karbon emisyonları, enerji talebi ve emisyon değerleri, raporun önemli odak noktalarından biridir. IEA, bu raporları ilk kez 1977 yılında yayımlamış ve yıllık olarak güncellemeye devam etmiştir. 2024 yılı raporu, enerji dönüşümü ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi konulara vurgu yapmaktadır (IEA, 2024).

"Küresel Enerji Görünümü" raporları, kömür santrallerine ilişkin üç temel başlık üzerinde yoğunlaşır: karbon emisyonları, enerji talebi ve karbon ayak izi. Kömür santrallerinin karbon emisyonları, enerji üretiminde atmosfere salınan büyük miktardaki karbondioksitin ana kaynağı olarak dikkat çeker. Özellikle Asya'daki gelişmekte olan ülkeler, enerji talebini karşılamak için kömüre büyük ölçüde bağımlı durumdadır. Hindistan ve Çin gibi ülkeler, kömür tüketiminde lider konumda olup, küresel emisyonların artmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Kömür santrallerinin emisyon değerleri araştırmalarına yoğunlaşılmasının en önemli nedeni kömürün enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtlar arasında en yüksek karbon yoğunluğuna sahip olmasıdır. Bu nedenle, IEA, kömürden kaynaklanan emisyon değerlerinin azaltılması için karbon tutma ve depolama (CCS) teknolojilerinin geliştirilmesinin önemine dikkat çekmektedir. Kömür kullanımını azaltmaya yönelik stratejiler, yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılmasını ve düşük karbonlu enerji üretim yöntemlerinin teşvik edilmesini içermektedir (IEA, 2024).

İlerleyen yıllarda karbonu nötrleyen bir dünyaya ulaşmanın mümkün olduğu, ancak bu hedefe ulaşmak için kömürden enerji üretiminin büyük ölçüde azaltılması gerektiğini açıkça görülmektedir. Ayrıca, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılmasının, enerji sektöründe karbon emisyonlarının düşürülmesi için kritik öneme sahip olduğu da bir gerçektir.

IEA'nın "Küresel Enerji Görünümü" raporları, kömür santrallerinin karbon emisyonları, enerji talebi ve karbon ayak izi gibi konulara yönelik kapsamlı bilgiler sunmaktadır. Raporlar, enerji sektöründeki değişen dinamikleri anlamak ve politika yapıcılar için uygun stratejiler geliştirmek açısından önemli bir referans niteliğindedir. Her yıl güncellenen bu raporlar, kömür kullanımının azaltılmasını ve enerji sektörünün sürdürülebilir bir geleceğe taşınmasını desteklemek için kritik bir rehber olarak işlev görmektedir.

ABD Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency - EPA), karbon emisyonlarını ölçmek ve yönetmek amacıyla çeşitli rehberler ve kılavuzlar yayınlamaktadır. Bu dokümanlardan biri olan "Karbon Eşdeğeri Hesaplama Kılavuzu" (Carbon Equivalency Calculation Guide), farklı enerji üretim süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını hesaplamak ve analiz etmek için detaylı yöntemler ve veriler sunmaktadır. İlk kez 2014 yılında yayımlanan bu kılavuz, enerji üretim süreçlerinin çevresel etkilerini anlamak ve yönetmek için uluslararası alanda önemli bir referans olarak kabul edilmektedir.(United States Environmental Protection Agency [EPA], n.d.)

EPA'nın kılavuzunda enerji verimliliği ve karbon azaltım stratejileri de ele alınmıştır. Daha yüksek verimli santrallerin kullanılması, emisyon yoğunluğunu önemli ölçüde azaltabilir. Bunun yanında, karbon tutma ve depolama (CCS) teknolojilerinin uygulanması, fosil yakıt santrallerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltmanın etkili bir yöntemi olarak sunulmaktadır. Kılavuz, enerji sektöründe karbon emisyonlarını azaltmak için uygulanabilecek çeşitli çözümleri ayrıntılı olarak açıklamaktadır.(EPA, n.d.)

"Karbon Eşdeğeri Hesaplama Kılavuzu", enerji sektöründeki gelişmeleri dikkate alarak zaman zaman güncellenmektedir. Bu güncellemeler, emisyon faktörlerinde yapılan değişiklikler, yeni enerji teknolojilerinin eklenmesi ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik gelişen politikaların uygulanmasını içermektedir. Ayrıca, kılavuz, uluslararası standartlarla uyumlu bir şekilde hazırlanmıştır ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) gibi küresel düzenlemelere uyum sağlamak isteyen ülkeler için kritik bir rehber niteliği taşımaktadır.

EPA'nın "Karbon Eşdeğeri Hesaplama Kılavuzu", farklı enerji üretim süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını ölçmek ve azaltmak için kapsamlı bir kaynak sağlamaktadır. Kömür, doğal gaz ve yenilenebilir enerji gibi enerji

kaynaklarının emisyon değerleri bu kılavuzda detaylı bir şekilde incelenmektedir. Kılavuz, karbon emisyonlarının azaltılması için stratejik rehberlik sunarken, aynı zamanda uluslararası iklim hedeflerine ulaşmak için önemli bir araç olarak işlev görmektedir. İlk kez 2014 yılında yayımlanan ve sürekli güncellenen bu doküman, enerji üretim süreçlerinin çevresel etkilerini analiz etmek için vazgeçilmez bir kaynak niteliğindedir (Kurnuç ve Çerçi, 2022).

Bu kuruluşlardan elde edilen veriler, karbon ayak izi hesaplamalarında doğru dönüşüm katsayılarını kullanmak ve metodolojik standartları sağlamak açısından önemlidir. Ayrıca, bu kuruluşlardan elde edilen veriler çalışmamıza rehberlik etmekte ve verilerin kıyaslanabilirliğini sağlamaktadır.

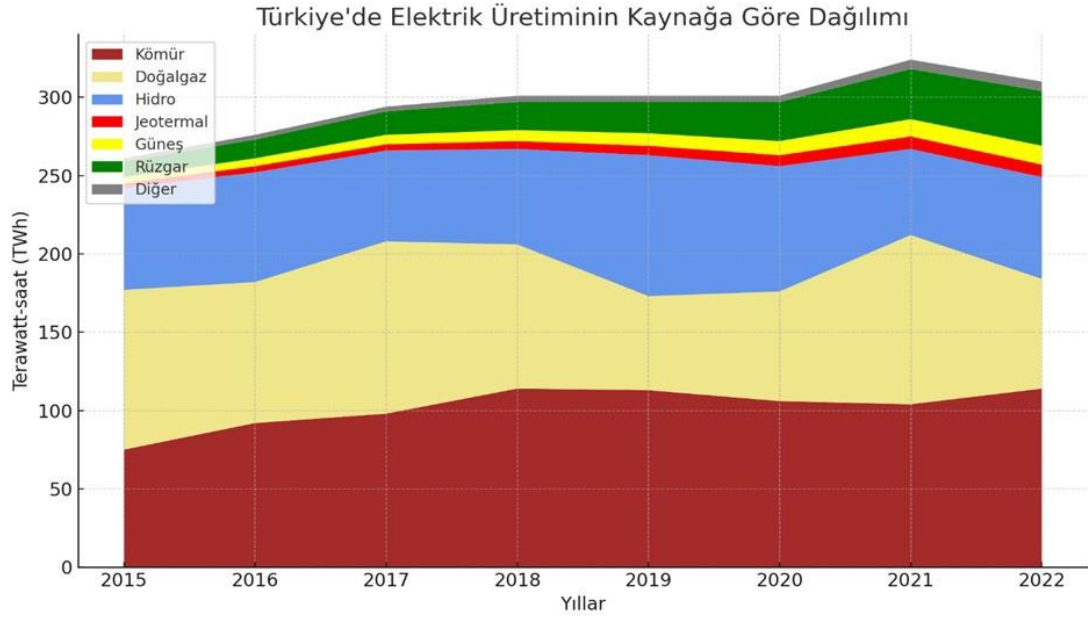
2.1.6. Türkiye’de Kömür Kullanımı ve Karbon Ayak İzi Üzerine Veriler

Türkiye, enerji üretiminde kömür kaynaklarını aktif olarak kullanan ülkeler arasındadır. Türkiye'nin enerji üretiminde kömürün payı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre %35 olarak belirtilmektedir. Bu oran, ülkenin enerji arzında kömürün önemli bir rol oynadığını göstermektedir (ETKB, 2022). Ancak, enerji üretiminde kullanılan kaynakların dağılımı yıllar içinde değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, 2023 yılı sonu itibarıyla Türkiye'nin toplam kurulu güç kapasitesi 106,7 gigavat (GW) seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasitenin %55'i yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. (Özenç, 2024)



Şekil 2.1. Enerji verileri raporu-elektrik verileri

Bu veriler, Türkiye'nin enerji üretiminde kömürün önemli bir paya sahip olduğunu, ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının da giderek artan bir oranda kullanıldığını göstermektedir. Enerji üretiminde kaynak çeşitliliğinin artırılması, enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Aşağıdaki grafik ve tablo, Türkiye'nin enerji üretiminde kullanılan kaynakların dağılımını daha ayrıntılı bir şekilde sunmaktadır.

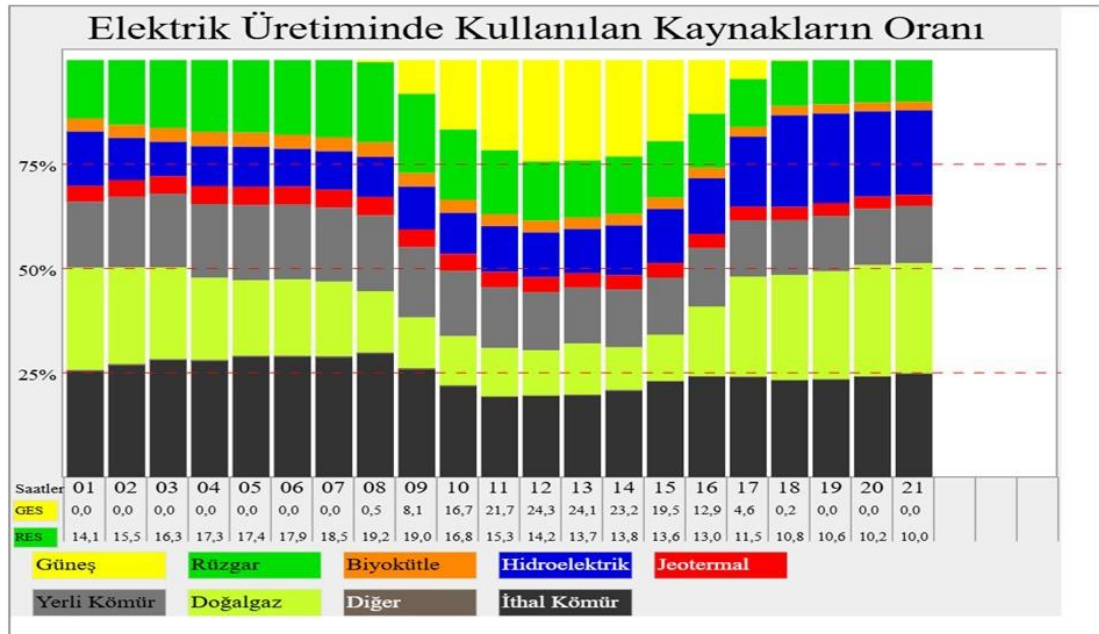


Şekil 2.2. Türkiye de kaynağa göre elektrik Üretimi

Çizelge 2.2. Elektrik üretiminin kaynaklara dağılımı

2023 Yılı Elektrik Üretiminin Kaynaklara Dağılımı				
Kaynak			Üretim (MWh)	Oran (%)
İthal	Fosil	İthal Kömür	72.123.040	22,21
İthal	Fosil	Doğalgaz	68.562.811	21,11
Yerli	Yenilenebilir	Hidroelektrik	63.854.222	19,66
Yerli	Fosil	Linyit, Taş Kömürü ve Asfaltit	46.168.575	14,21
Yerli	Yenilenebilir	Rüzgar	34.069.728	10,49
Yerli	Yenilenebilir	Güneş	18.606.601	5,73
Yerli	Yenilenebilir	Jeotermal	10.997.593	3,39
Yerli	Yenilenebilir	Biyogaz	9.706.500	2,99
İthal	Fosil	Fuel-Oil ve Motorin	704.781	0,22
Yerli	-	Toplam	183.403.219	56,47
İthal	-	Toplam	141.390.632	43,53
-	Yenilenebilir	Toplam	137.234.644	42,26
-	Fosil	Toplam	187.559.207	57,74

Bu grafik ve tablo, Türkiye'nin elektrik üretiminde farklı enerji kaynaklarının katkılarını görselleştirmektedir. Kömürün yaklaşık %36'lık payı, enerji üretiminde önemli bir rol oynadığını, ancak doğal gaz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının da dikkate değer oranlarda kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 2.3. Elektrik üretiminde kullanılan kaynakların saatlere göre dağılımı

Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın Elektronik Veri Dağıtım Sistemi

(EVDS) istatistiklerine göre, Türkiye'nin yıllık toplam kömür tüketimi yaklaşık 90 milyon ton civarındadır. Bu tüketimin %60'ı yerli kömürden, %40'ı ise ithal kömürden karşılanmaktadır.

Bu veriler, Türkiye'nin enerji arzında kömürün önemli bir rol oynadığını ve enerji güvenliği açısından yerli kömür kaynaklarının stratejik önemini vurgulamaktadır. Ancak, ithal kömürün de enerji üretiminde kayda değer bir paya sahip olması, enerji politikalarında dışa bağımlılığın azaltılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Aşağıdaki grafik ve tablo, Türkiye'nin yıllık kömür tüketiminin yerli ve ithal kaynaklara göre dağılımını göstermektedir.

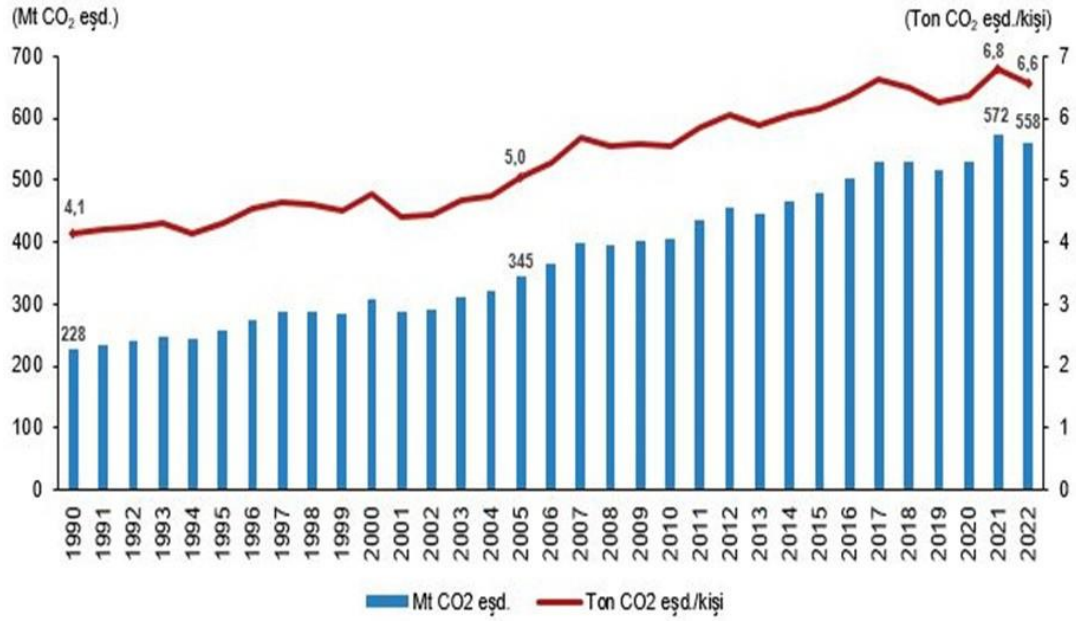
Çizelge 2.3. Türkiye'de yıllık kömür tüketim dağılımı

Kömür Türü	Tüketim Miktarı (Milyon Ton)	Oran (%)
Yerli Kömür	54	60
İthal Kömür	36	40

Bu grafik ve tablo, Türkiye'nin kömür tüketiminde yerli kaynakların ağırlıklı olduğunu, ancak ithal kömürün de enerji üretiminde önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından, yerli kömür kaynaklarının etkin kullanımı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artırılması önem taşımaktadır.

Türkiye'de kömürden elde edilen enerji, diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, karbon salınımı bakımından en yüksek değere sahiptir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan 2022 yılı Sera Gazı Emisyon İstatistiklerine göre, 2022 yılı toplam sera gazı emisyonlarının bir önceki yıla göre %2,4 azalarak 558,3 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplandığı görülmektedir. Kişi başı toplam sera gazı emisyonu 1990 yılında 4,1 ton CO₂ eşd., 2021 yılında 6,8 ton CO₂ eşd. ve 2022 yılında 6,6 ton CO₂ eşd. olarak hesaplandığı görülmektedir. (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2022)



Şekil 2.4. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu 1990-2022



Şekil 2.5. Sektörlere göre emisyon dağılımı

Bu enerji kaynaklı emisyonların büyük bir kısmı, kömür tüketiminden kaynaklanmaktadır. Özellikle elektrik ve ısı üretiminde kömür kullanımı, enerji sektöründeki karbon salınımının başlıca nedenidir. 2022 yılında Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonu 558,3 milyon ton CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. (TÜİK, 2022)

Bu emisyonların yaklaşık %28'inin kömür tüketiminden kaynaklandığı göz önüne alındığında, kömür kullanımının Türkiye'nin emisyon değerlerinin yüksek çıkmasında önemli bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 2.4. Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı

(Milyon ton CO ₂ eşd.)											
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	1990-2022 değişim (%)	2021-2022 değişim (%)
Toplam emisyon	228,0	256,5	306,4	344,8	405,3	480,1	530,2	572,0	558,3	144,9	-2,4
Enerji	143,1	170,0	219,8	247,7	290,9	344,0	369,5	406,5	400,6	179,8	-1,4
Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	22,7	25,4	26,1	34,0	48,6	59,2	67,2	74,7	69,9	208,1	-6,4
Tarım	51,8	49,0	46,0	46,3	47,7	59,2	76,4	75,4	71,5	37,9	-5,1
Atık	10,3	12,1	14,5	16,9	18,1	17,7	17,0	15,4	16,3	57,7	5,5

Tablodaki rakamlar, yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.

2.1.7. Diğer Araştırmalara Atıf ve Bu Çalışmanın Farklılığı

Kömürle çalışan termik santrallerin çevresel boyutları hakkında yapılan ulusal ve uluslararası akademik çalışmalar incelendiğinde ise;

Türkiye'deki kömür tabanlı enerji üretiminin emisyon değerlerinin hesaplanmasına dair yapılan akademik araştırmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Nuray Tokgöz'ün 2010 tarihli çalışması, kömür ve diğer fosil yakıtların enerji planlaması, ekonomik kalkınma ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Araştırmada, fosil yakıtların enerji arzı üzerindeki etkileri incelenmiş ve özellikle kömürün coğrafi dağılım açısından daha dengeli bir kaynak olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle kömür, enerji kaynakları sınırlı olan veya tükenmekte olan ülkeler için önemli bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır.

Çalışma, 2005 yılına ait veriler üzerinden toplam birincil enerji arzı (TPES) ile karbon dioksit (CO₂) emisyonu arasındaki ilişkiyi değerlendirmiştir. Ayrıca kişi başına düşen enerji tüketimi ve ton CO₂ salımı gibi göstergeler ele alınarak, CO₂ emisyonlarının 2030 yılı için potansiyel artışına dair tahminler yapılmıştır. Bu bağlamda, enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımı ve bunların iklim değişikliği üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Türkiye özelinde ise fosil yakıtlarla çalışan termik santrallerin coğrafi dağılımı, bu bölgelerdeki orman varlığı ve yıllık ortalama sıcaklık artışları arasındaki ilişki meteorolojik verilere dayalı olarak değerlendirilmiştir. 1975-1992 ve 1993-2006 yılları arasındaki sıcaklık artışı farkları, Türkiye'nin toplam 133 meteoroloji istasyonundan alınan verilerle analiz edilmiştir.

Ayrıca, çevre dostu teknolojilerin enerji üretimine entegre edilmesinin önemine dikkat çekmiştir. Termik santrallerdeki yakma ve CO₂ depolama teknolojilerindeki yenilikler, sürdürülebilir kalkınma ilkeleriyle uyumlu bir şekilde

kömürün enerji kaynağı olarak önemini artırabileceği belirtilmiştir. Bu durum, kömürün hem Türkiye'de hem de dünya genelinde sınırlı bir ölçekte de olsa gelecekte birincil enerji kaynağı olmaya devam edeceğini göstermektedir.

Bu kapsamlı analiz, hem Türkiye'deki kömür bazlı enerji üretiminin emisyon değerleri üzerindeki etkilerini hem de küresel ölçekte CO₂ emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki etkilerini detaylandırmaktadır. Araştırma hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji politikaları açısından önemli bulgular ortaya koymaktadır (Tokgöz, 2010).

Özer Ören ve Cem Şensöğüt'ün 2019 tarihli çalışması, Türkiye'nin enerji üretiminde kömürün oynadığı kritik rolü ve bunun iklim değişikliği üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Çalışma, Türkiye'deki enerji üretiminde kömürün yaklaşık %41'lik bir paya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu oran, kömürün hala enerji arzında önemli bir yer tuttuğunu ve enerji politikalarının şekillenmesinde etkili bir faktör olduğunu göstermektedir.

Araştırmada, kömür bazlı enerji üretiminin çevresel etkilerine dikkat çekilmiştir. Özellikle sera gazı emisyonlarının artışı ve bunun iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri vurgulanmıştır. Kömür kullanımının çevresel zararlarını azaltmak ve sürdürülebilir bir enerji sistemi kurmak adına yenilenebilir enerjiye geçişin önemine değinilmiştir. Araştırma, yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılmasının hem emisyon değerlerini azaltmak hem de enerji arz güvenliğini sağlamak için önemli bir strateji olduğunu belirtmiştir. Bu bağlamda çalışma, kömür bazlı enerji üretiminin ekonomik ve çevresel maliyetlerini tartışmakta ve yenilenebilir enerjiye geçiş hızının artırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Türkiye'nin enerji politikalarında yenilikçi ve çevre dostu çözümlere yönelmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Türkiye'deki kömürün enerji üretimindeki etkisi ve yenilenebilir enerjiye geçişin çevresel faydalarını ele alan önemli bir referans olarak değerlendirilebilir. (Şensöğüt vd., 2019)

Hamza Çeştepe'nin 2018 yılında yaptığı çalışma, 1965-2016 yılları arasında Türkiye'deki kömür tüketimi, gelir düzeyi ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Çalışma, kömürün tarih boyunca enerji kaynağı olarak önemli bir yere sahip olduğunu, ancak çevresel sorunların kömür bazlı enerji politikalarını tartışmalı hale getirdiğini vurgulamaktadır. Araştırmada zaman serisi analizi kullanılarak, Türkiye'deki kömür tüketimi ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişki incelenmiş ve gelir seviyelerine bağlı olarak Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC)

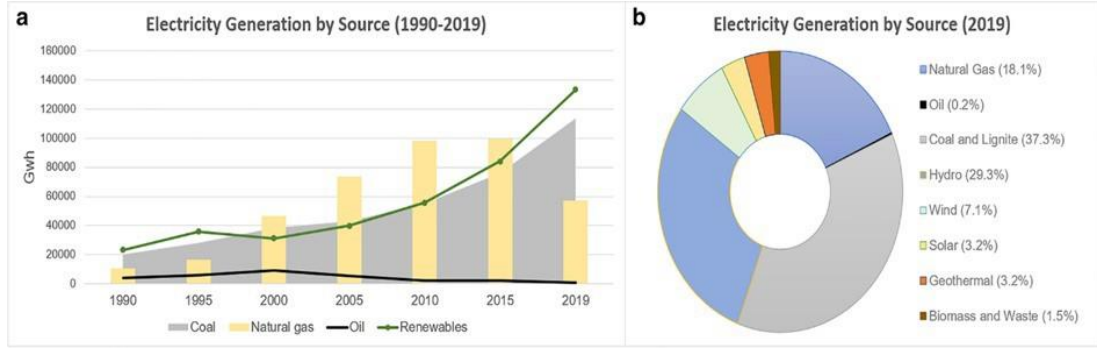
hipotezine destek bulunmuştur. EKC hipotezi, çevresel bozulma ile ekonomik büyüme arasında bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin gelir seviyesine bağlı olarak ters "U" şeklinde bir eğri oluşturduğunu öne sürmektedir. Bu bağlamda, Türkiye'nin uzun dönem enerji politikaları ile ekonomik büyümesinin çevresel etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Sonuçlar, uzun dönemde Türkiye'nin enerji politikalarının EKC hipotezini desteklediğini ve ekonomik büyüme ile çevresel bozulma arasındaki ilişkinin gelir düzeyine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Aynı zamanda enerji tasarrufu hipotezine de destek sağlamış ve bu bağlamda kömür tüketiminin sürdürülebilir enerji politikaları açısından yeniden ele alınması gerektiğini önermiştir (Çeştepe vd., 2018).

Suat Vardar ve ekibinin 2022 yılında yayımlanan çalışması, Türkiye'deki kömürle çalışan termik santrallerin (CFPP) çevresel ve ekonomik etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Termik santrallerin sera gazı emisyonları, partikül kirliliği, kül ve ince toz salınımı gibi çevreye verdiği zararlar ele alınmıştır. Ayrıca, kömür madenciliği, kül depolama ve su kullanımının çevresel kalite üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Bu süreçlerin, yalnızca çevreyi değil, aynı zamanda halk sağlığını da olumsuz etkilediği belirtilmiştir.

Türkiye'deki enerji politikalarının analiz edildiği çalışmada, kömür sektörüne sağlanan sübvansiyonların ve çevre düzenlemelerinden yapılan muafiyetlerin, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi yavaşlatabileceği ifade edilmiştir. Bu politikaların, kömüre bağımlılığı artırarak Türkiye'nin küresel iklim değişikliği hedeflerini baltalayabileceği öne sürülmüştür. Kömür bazlı enerji üretiminin sürdürülebilirlik açısından büyük zorluklar içerdiğini ve enerji sektöründe ciddi bir dönüşüm gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Araştırmada, kömürle çalışan santrallerin iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkileri detaylandırılmış ve bu santrallerin sera gazı emisyonlarının, küresel ısınmayı 1,5°C veya 2°C ile sınırlandırma hedeflerini ciddi şekilde tehdit ettiği vurgulanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması, bu sorunların çözümünde önemli bir rol oynayabileceği belirtilmiş ve Türkiye'nin hem kısa hem de uzun vadede karbon azaltımını hedefleyen stratejiler benimsemesi gerektiği ifade edilmiştir (Vardar vd., 2022).



Şekil 2.6. Türkiye'nin 1990-2019 yılları arasındaki enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi

Netice itibariyle kömürle çalışan santrallerin çevreye ve halk sağlığına verdiği zararları somut örneklerle açıklamış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılmasının önemine dikkat çekmiştir. Bu durum, Türkiye'nin hem enerji güvenliğini sağlama hem de iklim değişikliği ile mücadele hedeflerini gerçekleştirmesi için kritik bir adım olarak görülmektedir.

O. Kincay'ın 2003 yılında yayımladığı çalışma, Türkiye'deki termik santrallerin enerji üretimindeki rolünü ve temiz kömür teknolojilerinin çevresel etkilerin azaltılmasındaki potansiyelini ele almaktadır. Araştırma, 2000 yılı sonu itibarıyla Türkiye'nin enerji üretiminde termik santrallerin durumunu kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Termik santraller, Türkiye'nin elektrik üretiminin %75'ini sağlamaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan toplam kurulu kapasitenin yaklaşık %60'ı termik kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu kaynaklar arasında doğal gaz %49.2 ile ilk sırada yer alırken, kömür %40.65 ve sıvı yakıt %9.9 oranında kullanılmaktadır. Türkiye'deki düşük kaliteli linyit rezervleri, linyitle çalışan termik santrallerin inşasını destekleyen bir faktör olmuştur. Araştırma, kömür kullanımının Türkiye'nin ekonomik büyümesinin sürdürülebilirliği açısından çok önemli olduğunu belirtmiştir. Ancak, kömürün çevresel etkilerini azaltmak amacıyla ileri düzey temiz kömür teknolojilerinin uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu teknolojiler, kömürün yakılması sırasında oluşan zararlı emisyonları ve çevresel etkileri en aza indirmek için büyük bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, Türkiye'nin enerji üretiminde kömürün uzun vadeli rolü ve sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi gerekliliği tartışılmıştır. Temiz kömür teknolojilerinin kullanımı hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Bu çalışma, Türkiye'nin enerji politikaları ve termik santrallerin çevresel performansını artırmaya yönelik stratejiler açısından önemli bir kaynak niteliği taşımaktadır (Kincay ve Ozturk, 2003).

A. Alola ve Ulrich Tiamgne Donve'nin 2021 tarihli çalışması, Türkiye'de kömür ve petrol enerjisinin çevresel etkilerini ve ekonomik büyüme üzerindeki sürdürülebilirlik zorluklarını ele almaktadır. Araştırma, 1965-2017 yılları arasındaki dönemde kömür ve petrol enerjisi tüketiminin, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyüme ile ilişkisini incelemiştir.

Kömür ve petrol tüketiminin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini hem kısa hem de uzun vadede ortaya koymuştur. Özellikle kömür tüketiminin çevresel sürdürülebilirlik açısından petrol tüketiminden daha zararlı olduğu tespit edilmiştir. Fosil yakıtların, özellikle kömür ve petrolün, enerji karışımındaki baskın rolü, çevresel bozulmaya önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Araştırma, ekonomik büyüme ile çevresel bozulma arasındaki ilişkinin Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezi ile uyumlu olmadığını göstermiştir. EKC hipotezine göre, ekonomik büyümenin belirli bir aşamasında çevresel bozulma azalmalıdır; ancak Türkiye'de kömür ve petrolün baskın enerji kaynakları olmaya devam ettiği sürece bu eğri gerçekleşmemektedir. Araştırma, Türkiye'nin enerji sektöründe daha agresif bir enerji dönüşüm stratejisine ihtiyaç duyduğunu vurgulamaktadır.

Araştırmada, enerji geçişi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin başarılması için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması gerektiği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden sosyoekonomik ve makroekonomik politikaların uygulanması gerektiği ifade edilmiştir. Çalışmanın sonucu, Türkiye'nin enerji karışımındaki kömür ve petrol ağırlığının, sürdürülebilir kalkınma ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını zorlaştırdığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerjiye geçiş ve fosil yakıtların kullanımını azaltmaya yönelik politikaların hızla hayata geçirilmesi gerektiği önerilmektedir (Alola ve Donve, 2021).

Bu tez çalışmasının literatürdeki diğer örneklerinden farkı, kömürle çalışan termik santralin emisyon değerleri hesaplamasını daha teknik bir düzeyde ele almasıdır. Bu tezde, santralde kullanılan kömürün kimyasal analiz değerleri, emisyon ölçüm teknikleri ve kullanılan ölçüm cihazlarının teknik özellikleri detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Bu özellikler, çalışmayı diğer araştırmalardan ayırmakta ve daha uygulamalı bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu kapsamda, mevcut çalışmanın daha detaylı teknik bir analiz sunduğu, emisyonların hangi süreçlerden kaynaklandığını tespit etmeye odaklandığı ve

emisyona azaltım önerilerini bu doğrultuda şekillendirdiği söylenebilir.

2.2. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerin Karbon Ayak İzi

Kömür Yakıtlı Termik Santraller enerji üretiminde en yaygın kullanılan tesisler arasında yer almakla birlikte, yüksek miktarda karbon salınımına yol açmaktadır. Kömür, yanma sırasında büyük miktarda karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x) ve partikül madde (PM) gibi kirleticiler üretir. Türkiye gibi kömür rezervlerine dayalı enerji politikaları uygulayan ülkelerde, bu santrallerin çevresel etkileri oldukça belirgindir

Kömürle çalışan termik santrallerin emisyon değerleri, doğrudan kömür yakılmasıyla oluşan emisyonları, dolaylı olarak ise kömür madenciliği, taşınması ve santralin inşası gibi süreçleri kapsar. GHG Protokolü'ne göre bu emisyonlar Kapsam 1 (doğrudan emisyonlar), Kapsam 2 (satın alınan enerji kaynaklı dolaylı emisyonlar) ve Kapsam 3 (diğer dolaylı emisyonlar) olarak sınıflandırılmaktadır.

2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve PV Güneş Enerji Santrallerinin Karbon Ayak İzi

Yenilenebilir enerji, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Fotovoltaik (PV) güneş enerjisi, kömürle çalışan santrallere kıyasla çok daha düşük emisyon değerlerine sahiptir. Ancak, PV panellerin üretimi sırasında kullanılan enerji kaynakları ve malzemeler nedeniyle bazı dolaylı emisyonlar oluşmaktadır.

Örneğin Çin'de üretilen PV panellerin emisyon değerleri, ABD veya Avrupa'da üretilenlere göre daha yüksektir. Bunun temel nedeni, üretim sürecinde kullanılan elektrik kaynaklarının büyük ölçüde fosil yakıtlara dayanmasıdır (Vitta, 2021).

2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Yönelim

PV güneş enerji santralleri, kömür bazlı enerji üretimine kıyasla daha düşük emisyon değerleri ve çevresel etki profili sunmaktadır. Bununla birlikte, fotovoltaik panellerin üretim süreçlerinde ortaya çıkan dolaylı emisyonlar da literatürde ele alınmaktadır (Arcos-Vargas ve Riviere, 2018).

PV güneş enerji santrallerinin emisyon değerleri üzerine yapılan çeşitli akademik çalışmalar, bu yenilenebilir enerji teknolojisinin çevresel faydalarını ve

üretim süreçlerinden kaynaklanan sınırlamalarını ortaya koymaktadır

Bu konuda (Pamponet, Maranduba, Almeida Neto ve Rodrigues, 2022) yapılan çalışmalar, Brezilya'daki büyük ölçekli bir fotovoltaik enerji santralinin (VLS-PVPP) emisyon değerlerini ve enerji performansını değerlendirmektedir. Çalışma, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemi ile ISO 14040/44 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Santralin emisyon değerleri, Brezilya'nın farklı bölgelerinde değişen güneş radyasyonu seviyelerine bağlı olarak 38.3 ile 44.8 kgCO₂eq/kWh arasında değişiklik göstermektedir. Bu durum, bölgesel faktörlerin enerji üretimi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, santralin enerji geri ödeme süresi (EPBT) 4,5 ile 5,3 yıl arasında hesaplanmış ve bu, enerji üretimi açısından önemli bir sürdürülebilirlik göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, fosil enerji ikame oranı analiz edilmiştir. Sonuçlar, sistemin inşasında kullanılan fosil enerjinin 7,7 katı kadar temiz enerji ürettiğini göstermiştir. Bu oran, santralin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif olduğunu göstermektedir. Fotovoltaik modül teknolojileri üzerinde yapılan analizde, çok kristalli silikon teknolojisinin, tek kristalli silikona kıyasla çevresel maliyeti %20 oranında azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, fotovoltaik modüllerin üretim yerinin emisyon değerleri üzerinde sadece %1 gibi düşük bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, yerel üretim veya ithalat tercihlerinin çevresel etkiler üzerindeki sınırlı önemini ortaya koymaktadır. Duyarlılık ve belirsizlik analizleri, güneş radyasyonundaki değişikliklerin santralin performans göstergeleri üzerindeki belirgin etkisini göstermiştir. Ancak, modül üretim yerinin bu göstergeler üzerindeki etkisi minimal düzeyde kalmıştır. Netice itibarıyla büyük ölçekli fotovoltaik enerji santrallerinin hem çevresel hem de enerji performansı açısından sürdürülebilirlik sağladığını ve Brezilya gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek ülkelerde bu tür projelerin değerini vurgulamaktadır. Bu araştırma, yenilenebilir enerji politikaları için güçlü bir bilimsel temel sunmaktadır (Pamponet vd., 2022).

Á. Arcos-Vargas ve Laureleen Riviere'nin 2019 tarihli çalışması, fotovoltaik (PV) enerji sistemlerinin emisyon değerleri ve enerji geri ödeme süresini (EPBT) değerlendiren önemli bir araştırmadır. Çalışma, PV sistemlerinin çevresel etkilerini anlamak için bu sistemlerin üretim süreçlerinden kaynaklanan enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Araştırma, PV modüllerinin elektrik üretiminde doğrudan karbon emisyonu üretmediğini, ancak üretim aşamasında önemli miktarda enerjiye ihtiyaç duyulduğunu ve bunun ciddi miktarda sera gazı (GHG) salınımına neden olduğunu ortaya koymuştur. Üretim süreci, PV sistemlerin enerji yoğun bir teknoloji olduğunu ve bu süreçlerin çevresel

etkilerinin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Çalışmada, PV sistemlerinden kaynaklanan karbon emisyonları ulusal elektrik şebekesinin karbon emisyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, PV sistemlerinin üretim sürecinde daha yüksek enerji tükettiğini ancak operasyon sırasında sıfır emisyon sağladığını göstermektedir. Bu bulgu, PV sistemlerinin uzun vadede çevresel avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Araştırma ayrıca, PV sistemlerinin enerji geri ödeme süresini (EPBT) hesaplamış ve bu sürenin, üretim sırasında tüketilen enerjinin telafisini sağladığını göstermiştir. Bu, PV sistemlerin sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynadığını kanıtlamaktadır. Sonuç olarak, çalışma, PV sistemlerinin genel olarak "yeşil enerji" olarak sınıflandırılmasına rağmen, üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. PV teknolojilerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalar, bu enerji kaynağının gelecekteki potansiyelini artırmada kritik bir öneme sahiptir. Bu araştırma, PV enerji sistemlerinin çevresel etkilerini ve emisyon değerlerini anlamak için değerli bir bilimsel katkı sunmaktadır (Arcos-Vargas ve Riviere, 2019).

Bu konuda yapılan çalışmalar (Liu, Guo, Sun, Lei ve Zeng, 2022). dağıtılmış fotovoltaik (PV) sistemlerin emisyon değerlerini azaltmadaki etkilerini ve enerji tüketimi yönetiminde nasıl daha sürdürülebilir bir yapı oluşturulabileceğini incelemiştir. Çalışma, bu sistemlerin enerji şebekelerine entegrasyonu ve yerel tüketim stratejilerinin çevresel etkilerini değerlendirmiştir.

Dağıtılmış PV sistemler, enerji şebekesine entegrasyonlarıyla birlikte birincil enerji kaynakları arasında fosil yakıtların oranını düşürmüş ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Çalışma, bu sistemlerin yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda enerji tüketimi yönetiminde de önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

PV sistemlerinin şebekeye entegrasyonu, geleneksel tek yönlü enerji akışını çift yönlü aktif ağlara dönüştürerek enerji altyapısında önemli değişikliklere neden olmuştur. Bu dönüşüm, hat güç akışını, voltaj seviyelerini ve ağ kayıplarını etkileyerek enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından yeni fırsatlar sunmaktadır.

Araştırma, yerel tüketim stratejilerinin, enerji kayıplarını en aza indirmede etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. PV sistemlerin şebekeye bağlanma noktalarının, enerji altyapısının entegrasyon kapasitesine göre dikkatlice planlanması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, dağıtık kurulum yöntemlerinin karbon emisyonlarını

azaltmada daha etkili olduğu ifade edilmiştir.

Çalışma, yerel yönetimlerin ve politika yapıcılarının, PV sistemlerin kurulumunu teşvik eden politikalar geliştirmesi gerektiğini önermiştir. Bu öneriler arasında basınç düzenleme cihazlarının şebekelere entegrasyonu ve merkezi olmayan PV sistem kurulumlarının desteklenmesi bulunmaktadır. Bu stratejiler, daha düşük emisyon değerlerine sahip enerji sistemlerinin oluşturulmasına katkıda bulunabilir.

Sonuç olarak, dağıtılmış PV sistemlerin karbon emisyonlarını azaltmada ve enerji sistemlerini daha sürdürülebilir bir yapıya dönüştürmede kritik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Yerel tüketim ve stratejik şebeke bağlantıları, enerji tüketiminde düşük karbon stratejilerini desteklemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu bulgular, gelecekteki enerji politikaları ve altyapı planlamaları için önemli bir rehber sunmaktadır (Liu vd., 2022).

Bu çalışmalar, PV güneş enerji santrallerinin emisyon değerlerini anlamak ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir kaynak sunmaktadır.

Türkiye'de enerji sektörü, sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Tüm bu veriler incelendiğinde, toplam sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmının enerji sektöründen kaynaklandığını ve bu sektör içinde kömür tüketiminin önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Kömürle çalışan termik santraller, yüksek karbon yoğunlukları nedeniyle Türkiye'nin emisyon değerlerine ciddi bir yük getirmektedir. Bu durum, enerji sektöründeki kömür kullanımını azaltma gerekliliğini ve enerji üretiminde daha sürdürülebilir çözümlere geçişin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Özellikle elektrik ve ısı üretiminde kömür kullanımı, enerji sektöründeki karbon salınımının başlıca nedenini oluşturmaktadır. Bu veriler, kömürle çalışan santrallerin çevresel etkilerinin büyüklüğünü ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik stratejilerin önemini vurgulamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, Türkiye'nin karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşması için en etkili çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi düşük karbonlu enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılması, kömür tüketiminden kaynaklanan yüksek emisyonları azaltmak için kritik bir rol oynayacaktır.

Literatür araştırmaları değerlendirildiğinde, enerji üretiminde kömür kullanımının azaltılması, Türkiye'nin karbon emisyonlarını düşürme ve sürdürülebilir enerji politikaları geliştirme çabalarının merkezinde yer almaktadır. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırması hem enerji arz güvenliğini artıracak hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda, enerji sektöründe fosil yakıtlardan uzaklaşmayı teşvik eden politikalar, uzun vadeli çevresel ve ekonomik faydalar sağlayacaktır

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu tez çalışması, kömür yakıtıyla çalışan bir enerji üretim tesisini temel alarak hazırlanmıştır. Çalışmanın amacı, faaliyet halinde olan kömür yakıtlı termik santral ile kurulum aşamasındaki PV güneş enerji santrallerinin emisyon değerleri ve çevresel etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmektir. Analizler için temel yıl olarak 2024 yılı (1 Ocak – 31 Aralık) seçilmiş ve bu döneme ait veriler değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda 1 MWh lık bir PV GES tasarımı yapılarak faaliyette olan kömür yakıtlı termik santralin 1 MWh için ortalama değerlerinin hesapları ile bir kıyaslama yapılmasını amaçlanmaktadır.

3.1. Metotlarda Kullanılan Yaklaşımlar ve Uygulama Yönergeleri

Bu çalışmada emisyon değerleri hesaplamalarında kullanılan yöntemler, IPCC (2006) kılavuzları ve uluslararası standartlar doğrultusunda üç farklı detay seviyesinde (Tier 1, Tier 2, Tier 3) incelenmiştir. Her seviye, veri doğruluğu, uygulama kapsamı ve belirsizlik açısından farklılık göstermektedir (IPCC , 2006).

Çizelge 3.1. Karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan tier yöntemlerinin özeti

Tier Seviyesi	Açıklama	Emisyon Faktörleri	Avantajlar
Tier 1 (Genel Emisyon Faktörleri)	IPCC'nin varsayılan emisyon faktörlerine dayalı, en basit ve genel yöntemidir.	DEFRA (202x*) CO ₂ -eq faktörleri, IPCC 2006 Kılavuzu	Kolay veri toplama, Hızlı uygulama Genel Kabul görmüştük
Tier 2 (Bölgesel Enerji Emisyon Faktörleri)	Ülke veya bölgeye özgü emisyon faktörleri kullanılan, orta düzey doğruluk sağlayan yöntemidir.	Türkiye elektrik şebekesi emisyon faktörü Bölgesel yakıt karışımına dayalı katsayılar	Bölgesel özellikleri yansıtır Daha doğru sonuçlar verir
Tier 3 (Tesis Özelinde Hesaplamalar)	Tesis bazlı ölçüm ve modelleme verilerine dayanan, en ayrıntılı ve en doğru yöntemidir.	Kömür karbon içeriği ve yanma verimliliği (tesis ölçümleri) Tesis enerji kayıtları	En düşük belirsizlik, Tesis özelini yansıtır

Karbon ayak izi hesaplamalarında sera gazı salımları, uluslararası standartlara göre altı farklı kategori altında toplanır. Bu sınıflandırma, emisyonların kaynağını netleştirmek ve doğru değerlendirme yapmak için önemlidir.

Kategori 1 (Doğrudan SG Salımları): Kuruluşun faaliyetleri sırasında, yakıtların yanması gibi süreçlerden doğrudan ortaya çıkan emisyonlardır.

Kategori 2 (İthal Edilen Enerjiden Dolaylı SG Salımları): Dışarıdan temin edilen elektrik, ısı veya buhar üretiminden kaynaklanan emisyonlardır.

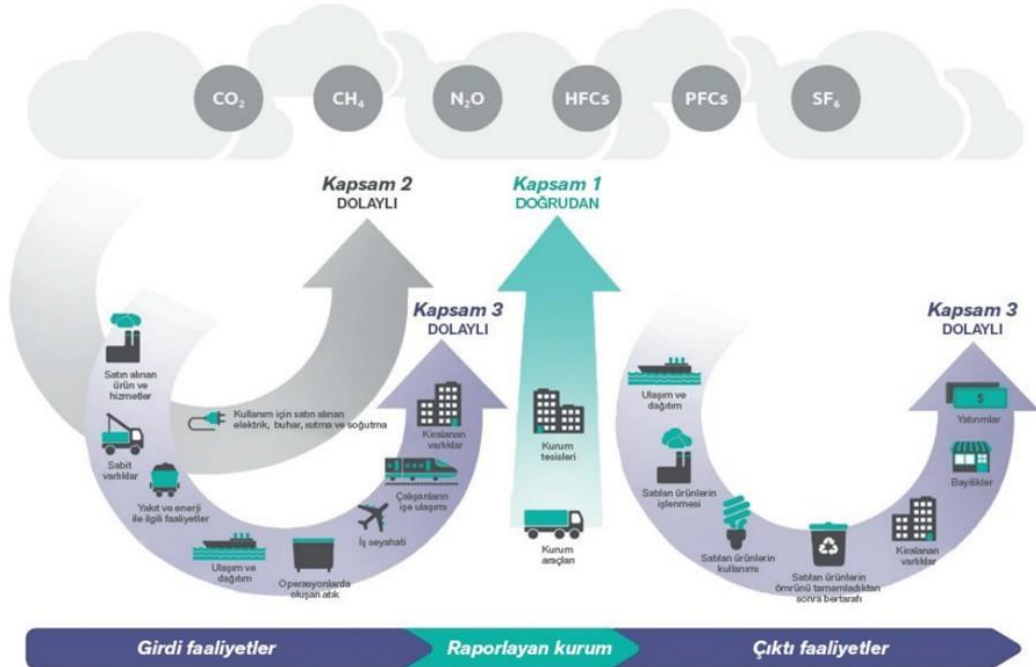
Kategori 3 (Ulaşımdan Dolaylı SG Salımları): Hammadde, ürün veya malzemelerin taşınması sırasında ortaya çıkan emisyonlardır.

Kategori 4 (Kullanılan Ürünlerden Dolaylı SG Salımları): Kuruluşun faaliyetlerinde kullandığı ürünlerin (örneğin hammadde ve malzemelerin) üretim aşamalarından ve atık ve su gibi kaynaklardan kaynaklanan emisyonlardır.

Kategori 5 (Üretilen Ürünlerin Kullanımıyla Bağlantılı Dolaylı SG Salımları): Kuruluşun ürettiği ürünlerin ve değerlerin kullanım aşamasında ortaya çıkan emisyonlardır.

Kategori 6 (Diğer Dolaylı SG Salımları): Elektrik şebekesi kayıpları ve sektör özgü kategorize etme durumlarında ortaya çıkan emisyon tipidir.

Bu altı kategori hem kömür yakıtlı termik santrallerin hem de PV güneş enerji santrallerinin emisyon değerleri profilini daha açık ve karşılaştırılabilir hale getirmektedir.



Şekil 3.130. GHG protokol faaliyet sınırları şeması

3.2. Kömürün Değerlendirilme Süreçleri

Çizelge 3.1. Toplam emisyon miktarı hesaplama tablosu

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO2	EF BİRİM	CH4 EF (kg/TJ)	N2O EF (kg/TJ)	TCO2	TCH4	TN2O	Toplam Emisyon Miktarı TCO2 eq
KATEGORİ numarası girilecek	Faaliyet süreci yazılacak	Emisyon kaynakları belirtilecek	Faaliyet verileri girilecek	Faaliyet veri birimi (ton*km)	-	Emisyon faktörü girilecek	Emisyon faktörü veri birimi (kg CO2e/ton*km)	-	-	-	-	-	Hesaplanan değerlerin toplamı

3.2.1. Kömürün Taşınması (Kategori 3)

Nakliye süreci dolaylı emisyonların önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Kömür, çıkarıldığı maden sahasından santral sahasına genellikle ağır vasıta kamyonlarla taşınmaktadır. Bu aşamada oluşan emisyonların büyüklüğü; taşınan kömür miktarına, kullanılan nakliye mesafesine ve araçların yakıt tüketim verimliliğine bağlıdır.

Kömür alınan ortalama mesafe işletmeye olan uzaklığı göz önünde bulundurularak hesaplanır. Bu hesaplamalar denklem (3.1) deki hesaplamalar ile bulunur.

$$TCO_{2eq} = \sum (Mesafe(km) \times Yuk(ton) \times EmisyonFaktoru(ton \times km)) \quad (3.47)$$

Linyit, santrale ortalama 10 km mesafeden karayolu ile taşınmaktadır. Taşımada kullanılan araçlar, DEFRA (2023) kılavuzunda tanımlanan “Heavy Goods Vehicle (HGV, diesel, rigid, average laden)” sınıfına dahil edilmiş ve hesaplamalarda bu sınıfa ait emisyon faktörü olan 0,1782 kgCO₂e/ton*km değeri kullanılmıştır.

Bu yaklaşım, IPCC (2006) ve DEFRA (2023) metodolojilerine uygun olarak, linyit taşınmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını sayısal olarak ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. Hesaplama sonuçları bu bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Kategori 3 de hesaplamalar sonucunda (3.1) deki denklem adımları

kullanıldığında ise;

$$\text{Kategori 3.1 Tco2eq} = \sum (10 \text{ km} \times 1,5 \text{ ton} \times 0,1782 \text{ kg CO}_2\text{e/ ton*km}/1000$$

$$\text{Kategori 3.1 Tco2eq} = 0,0027 \text{ tonCO}_2\text{eq}$$

Mesafe (km): Maden sahası–santral arası taşınma mesafesi (10 km)

Yük (ton): Santralin 1 MWh enerji üretimi için gerekli kömür miktarı üzerinden hesaplanan toplam tonaj (1,5x10 ton*km)

Emisyon faktörünün birim dönüşümlerinde ise (3.2) denklemi kullanılarak birim dönüşümü sağlanır.

$$EF\left(\frac{kgCO_2e}{ton \cdot km}\right) \quad (3.48)$$

DEFRA (2023) tarafından yayımlanan emisyon faktörünü ifade eder.

3.2.2. Kömürün Kırılması ve Öğütülmesi (Kategori 2)

Kömürün Kırılma ve öğütme işlemleri, maden sahasından gelen kömür parçalarının türbinlerde yakılabilecek inceliğe getirilmesi için yapılan mekanik işlemlerdir. Bu işlemler elektrik enerjisi yoğun uygulamalardır.

Enerji dolaylı sera gazı emisyonları elektrik tüketimi $\times$ şebeke emisyon faktörü ile hesaplanır.

İlgili süreçteki kömürün kırılması ve öğütülmesinde harcanan şebeke elektriğinin kullanım miktarında sayaçlar kullanılmıştır. Ölçüm sonuçlarında elde edilen değer faaliyet verisini oluşturmuştur.

Kömürün Kırılması ve Öğütülmesi aşamalarında Kategori 2 kömür işlenmesindeki enerji tüketimi değerlerinde denklem (3.3) kullanılır.

$$FV(\text{SurecinTuketimi}(kWh)) \times EF\left(\frac{tCO_2 - eq}{MWh}\right) \quad (3.49)$$

Kömürün kırılması ve öğütülmesi için tüketilen elektrik miktarı, santralin toplam tüketim miktarının 1MWh'a oranlanmasıyla yaklaşık 41.800 kWh olarak alınmıştır.

Elektrik tüketimi kaynaklı emisyonların hesaplanmasında, Türkiye ulusal elektrik şebekesi emisyon faktörü (0,442 tCO₂e/MWh) kullanılmıştır

Kömürün kırılması öğütülmesi süreçleri kategori 2 de değerlendirilir ve denklem (5) kullanılarak sırasıyla

Kömürün Kırılması-Öğütülmesi Kategori 2: 41.800 kWh x 0,442 kg CO₂e/MWh/1000

Kömürün Kırılması-Öğütülmesi Kategori 2: 18,48 TCO₂-eq

FV (kWh): Kırma ve öğütme sürecinde tüketilen elektrik miktarı

EF (tCO₂e/MWh): Türkiye elektrik şebekesi emisyon faktörü

ECO₂eq (tCO₂e): Sürecin toplam dolaylı sera gazı emisyonu

3.2.3. Kömürün Yakılması (Kategori 1)

Kömür yakıtlı termik santrallerde enerji üretiminin ana basamağı, kömürün kazanlarda yakılmasıdır. Bu süreçte kömürün kimyasal yapısında bulunan karbon ve hidrojen elementleri oksijen ile reaksiyona girerek karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) gibi sera gazlarını açığa çıkarır. Özellikle CO₂, doğrudan sera gazı emisyonlarının en büyük payını oluşturmaktadır.

Bu nedenle kömürün yakılması, Kategori 1 (Doğrudan Sera Gazı Emisyonları) altında değerlendirilir. Bu aşama, santralin emisyon değerleri açısından en kritik noktadır çünkü doğrudan yakıt tüketimine bağlıdır.

Yanma işlemi sırasında:

CO₂ → kömürün karbon içeriğinin oksitlenmesiyle oluşur.

CH₄ → tam olmayan yanma ve gaz çıkışlarından kaynaklanır.

N₂O → yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında, azotlu bileşiklerin yan ürünüdür.

Bu üç gazın küresel ısınma potansiyelleri dikkate alınarak toplam CO₂ eşdeğeri (tCO₂eq) hesaplanır.

Hesaplamalar IPCC (2006) standart yöntemleri ve Türkiye'deki MRV Yönetmeliği esas alınarak yapılmıştır.

Hesaplama, yakıt tüketimi × emisyon faktörü çarpımı ile yapılır. CO₂ Emisyon hesaplamasında formül (3.4) kullanılmıştır. CH₄ emisyon hesaplamasında (3.5) kullanılmıştır.

N₂O emisyon hesaplamasında denklem (3.6) kullanılmıştır. Tüm bu değerlendirme ve hesaplama basamakları sonrasında ise denklem (3.7) kullanılarak toplam eşdeğer emisyonlar bulunmuştur.

$$E(CO_2) = FV \times EF(CO_2) \quad (3.50)$$

$$E(CH_4) = FV \times EF(CH_4) \quad (3.51)$$

$$E(N_2O) = FV \times EF(N_2O) \quad (3.52)$$

$$t(CO_2)_{eq} = E(CO_2) + (GWP(CH_4) \times E(CH_4)) + (GWP(N_2O) \times E(N_2O)) \quad (3.53)$$

3.2.4. Ürün Emisyonları (Kategori 5)

Kömür yakıtlı termik santrallerin karbon ayak izi yalnızca üretim tesisinde oluşan doğrudan emisyonlarla sınırlı değildir. Üretilen elektrik enerjisinin ulusal şebekeye verilmesi ve son kullanıcılar tarafından tüketilmesi sonucunda da dolaylı emisyonlar meydana gelmektedir.

Bu emisyonlar, Kategori 5: Üretilen Ürünlerin Kullanımıyla Bağlantılı Dolaylı Emisyonlar kapsamında değerlendirilir.

Türkiye'de elektrik üretiminde kullanılan yakıt türlerine göre emisyon

faktörleri T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB, 2024) tarafından yayımlanmaktadır.

Bu faktörler, tCO₂eq/MWh biriminde olup, elektrik üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonların hesaplanmasında denklem (3.8) kullanılarak hesaplamalar yapılır.

Bu emisyonlar, üretilen enerji × şebeke emisyon faktörü ile hesaplanır.

$$FV(UretilenElektrik(kWh)) \times EF\left(\frac{tCO_2}{MWh}\right) \quad (3.54)$$

Bu çalışmada linyit kömürü için verilen güncel emisyon faktörü 1,188 tCO₂eq/MWh olarak alınmıştır.

FV (MWh): Satılan elektrik miktarı (bu çalışmada 1 MWh üzerinden normalize edilmiştir)

EF (tCO₂eq/MWh): Elektrik üretim emisyon faktörü (ETKB, 2022 – Linyit için 1,188 tCO₂eq/MWh)

Çizelge 3.1. Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri

 T.C. ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI	TÜRKİYE ELEKTRİK ÜRETİMİ VE ELEKTRİK TÜKETİM NOKTASI EMİSYON FAKTÖRLERİ BİLGİ FORMU			Doküman No	ETKB-EVÇED-FRM-042 Rev.01
				Revizyon / Yayın Tarihi	12.03.2024
Faktör Türü	Yılı	Yakıt Türü	Değeri (tCO ₂ /MWh)	Değeri (tCO ₂ -eşd./MWh)	
Elektrik Santralleri için Yakıtlara Göre Elektrik Üretim Emisyon Faktörleri	2022	Linyit	1,177	1,188	
		Taş Kömürü	1,007	1,011	
		Asfaltit	1,019	1,024	
		İthal Kömür	0,816	0,820	
		Doğalgaz	0,374	0,379	
		Fuel Oil	1,310	1,312	
		Motorin	0,947	0,948	

3.3. PV Güneş Enerji Santralleri Süreçleri

Bu bölümde, mevcut bir termik enerji santraline entegre edilmek üzere tasarım aşamasında planlanan 1 MWh kurulu güce sahip bir fotovoltaiik (PV) güneş enerji santralinin karbon ayak izi hesaplama süreci ele alınmaktadır. Çalışmada kullanılan PV paneller, belirli bir üretim kaynağından seçilen örnek ürünler arasından

belirlenerek analiz edilmiştir. Tasarım kapsamında; panel üretimi, taşınması, kurulumu, işletme dönemi ve bakım faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, Kategori 1: Doğrudan emisyonlar, Kategori 2: Enerji dolaylı emisyonlar, Kategori 3: Nakliye dolaylı emisyonlar, Kategori 5: Hammadde ve diğer dolaylı emisyonlar gibi sınıflandırmalar altında değerlendirilmiştir.

Hesaplama yöntemi; IPCC (2006) sera gazı envanteri kılavuzları, Ecoinvent (2022) yaşam döngüsü veri tabanı, NREL (2020) raporları ve ülkeye özgü resmî istatistikler temel alınarak yapılandırılmıştır.

3.3.1. PV Panel Taşınması ve Lojistik (Kategori 3)

PV santralının karbon ayak izi hesaplamasında dikkate alınması gereken aşamalardan biri de, fotovoltaiik panellerin üretim tesisinden kurulum sahasına taşınması sürecidir. Bu aşama, Kategori 3 – Ulaşımdan Kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar kapsamında değerlendirilir.

Lojistik faaliyetler, panel ve ekipmanların karayolu taşımacılığına uygun ağır vasıtalar aracılığıyla sevkiyatını kapsar. Bu süreçte emisyonlar; taşınan yükün kütlesi, taşınan mesafe, kullanılan taşıt türü ve yakıt türü gibi parametreler dikkate alınarak hesaplanır.

Bu çalışmada nakliye kaynaklı emisyonların belirlenmesi için, panel ve destek ekipmanlarının toplam tonajı ile üretim tesisi–kurulum sahası arasındaki mesafe üzerinden hesaplamaya dayalı bir yaklaşım benimsenmiştir. Emisyon faktörleri, IPCC (2006) kılavuzları ve ülkeye özgü taşımacılık emisyon katsayıları esas alınarak belirlenmiştir.

Böylece, taşımadan kaynaklanan sera gazı emisyonları, panel üretiminden bağımsız olarak ayrı bir süreç olarak ele alınmış ve kurulum öncesi lojistik faaliyetlerin yaşam döngüsü değerlendirmesine dahil edilmesi sağlanmıştır.

PV santralin karbon ayak izi hesaplamasında dikkate alınması gereken aşamalardan biriside lojistik kısmıdır. Panellerin üretim tesisinden (Konya/Karatay Kalyon PV) kurulacağı saha olan Aydın’a taşınması üzerine hesaplamalar yapılmaktadır. Taşıma işlemleri karayolu üzerinden, ağır vasıtalar (dizel kamyonlar) aracılığıyla yapılmaktadır.

Nakliye faaliyetleri Kategori 3 (Ulaşımdan Kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar) kapsamında değerlendirilir. Emisyon miktarı, taşınan yükün tonajı, mesafe ve

kullanılan taşıt türüne bağlı olarak hesaplanır. Bu taşıma işlemlerinin emisyonları denklem (3.9) de ki gibi hesaplanır.

$$TCO_{2eq} = \sum (Mesafe(km) \times Yuk(ton) \times EmisyonFaktoru(ton \times km)) \quad (3.55)$$

EF Kaynağı: (DEFRA 2023) – (Freighting goods HGV(all diesel) All Rigid tonne*km Average Laden)

Bu çalışmada, 1 MWh’lık PV santralin kurulumu için gerekli panel miktarının toplam taşımada 50.000 ton/km yük/mesafe karşılığı oluşturduğu varsayılmıştır. Ortalama mesafe yaklaşık 500 km, yük ise panel, destek yapıları ve yardımcı ekipmanların toplam ağırlığına karşılık gelmektedir.

Panel Verileri;

Ağırlık: 27 kg

Boyut: 2.27x1.13 = 2.65 m²

Kapasite:545

$$Tco_{2eq} = 500 \text{ km} \times (1835 \times 27) / 1000 \times 0,1782 \text{ kg CO}_2\text{e/ton*km}$$

$$Tco_{2eq} = 4,41 \text{ TCO}_2\text{-eq}$$

3.3.2. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde Tüketilecek Elektrik (Kategori 2)

PV güneş enerji santralinin kurulumu sırasında yürütülen inşaat ve montaj faaliyetleri, çeşitli elektrik tüketim kaynaklarını içermektedir. Bu aşama, Kategori 2 – İthal Edilen Enerjiden Kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar kapsamında değerlendirilir.

Montaj sürecinde; panellerin yerleştirilmesinde kullanılan kaldırma ve montaj ekipmanları, kazı ve temel hazırlığı için çalışan makineler ile çelik destek yapılarının ve beton temellerin montajı sırasında kullanılan elektrikli ekipmanların enerji tüketimi dikkate alınmıştır.

Bu kategorideki sera gazı emisyonları, tüketilen elektrik miktarı ile ulusal şebekenin emisyon faktörünün çarpılması yöntemiyle hesaplanmaktadır. Elektrik

tüketimi proje kurulum süresine özgü faaliyet verileri ile belirlenirken, emisyon faktörleri IPCC (2006) kılavuzları, Ecoinvent (2022) veri tabanı ve ülkeye özgü şebeke emisyon katsayıları temel alınarak seçilmiştir.

Böylece, PV santralının kurulum sürecinde kullanılan elektrik enerjisinin dolaylı sera gazı emisyonları sistematik olarak analiz edilerek, yaşam döngüsü değerlendirmesine dahil edilmiştir. Bu süreçte ise denklem (3.10) kullanılır.

Kurulum esnasında kullanılacak elektrik,

$$FV(SurecinTuketimi(kWh)) \times EF\left(\frac{tCO_2}{MWh}\right) \quad (3.56)$$

(ETKB, 2022)

Panellerin sahaya yerleştirilmesi için vinç ve montaj ekipmanlarının kullanımı, kazıcılar ve temel hazırlama makinelerinin enerji ihtiyacı, çelik destek yapıları ve beton temellerin montajı sırasında kullanılan elektrikli makineler, Kategori 2 (İthal Edilen Enerjiden Kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar) kapsamında ele alınır çünkü kullanılan elektrik enerjisi şebekeden sağlanmakta ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğuna bağlı olarak dolaylı sera gazı emisyonları oluşmaktadır.

Türkiye özelinde 1 MWh kapasiteli bir PV santral için yaklaşık 250.000 – 400.000 kWh elektrik eşdeğeri tüketim kabul edilebilir. Bu çalışmada, kurulum süreci boyunca 300.000 kWh elektrik tüketimi varsayılmıştır.

(NREL , 2024) (Joint Research Centre, 2020)

Kurulum esnasında kullanılacak elektrik:

$$tCO_{2eq} = 300000 \text{ (kWh)} \times 0,442 / 1000 \text{ (tCO}_{2eq}/\text{MWh)}$$

$$tCO_{2eq} = 132,6 \text{ (tCO}_{2eq}/\text{MWh)}$$

3.3.3. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde Kullanılacak İş Makineleri (Kategori 1)

PV güneş enerji santralının kurulum aşamasında kullanılan çeşitli iş makineleri ve ekipmanlar fosil yakıt (özellikle dizel) tüketmektedir. Bu durum, Kategori 1 – Doğrudan Sera Gazı Emisyonları kapsamında değerlendirilir.

İş makineleri; saha hazırlığı, temel kazısı, panel taşıma ve montaj gibi faaliyetler sırasında yoğun şekilde çalışmakta ve doğrudan yakıt yakarak sera gazı salımına neden olmaktadır. Bu nedenle kurulum sürecinde ortaya çıkan doğrudan emisyonlar yaşam döngüsü değerlendirmesi açısından dikkate alınması gereken önemli bir bileşendir.

Emisyonlar, kullanılan iş makinelerinin yakıt tüketim verileri (FV) ile ilgili yakıt türüne ait emisyon faktörlerinin (EF) çarpılması yöntemiyle hesaplanmaktadır. Emisyon faktörleri, IPCC (2006) kılavuzları ve ülkeye özgü yakıt emisyon katsayıları kullanılarak belirlenir.

Bu yaklaşım sayesinde, kurulum aşamasındaki doğrudan fosil yakıt kaynaklı sera gazı emisyonları nicel olarak hesaplanarak PV santralinin toplam karbon ayak izi değerlendirmesine dahil edilmiştir

Hesaplama, yakıt tüketimi $\times$ emisyon faktörü çarpımı ile yapılır. Bu emisyon değerlerinin hesaplanmasında denklem CO_2 değerlerinin bulunmasında denklem (3.11), CH_4 değerlerinin bulunmasında denklem (3.12), N_2O değerlerinin bulunmasında denklem (3.13) ve toplam eşdeğer salımlardaki değerlerinin bulunmasında ise denklem (3.14) kullanılır.

$$E(CO_2) = FV \times EF(CO_2) \quad (3.57)$$

$$E(CH_4) = FV \times EF(CH_4) \quad (3.58)$$

$$E(N_2O) = FV \times EF(N_2O) \quad (3.59)$$

$$t(CO_2)_{eq} = E(CO_2) + (GWP(CH_4) \times E(CH_4)) + (GWP(N_2O) \times E(N_2O)) \quad (3.60)$$

(MRV Yönetmeliği) (IPCC, 2021)

Bu kategorideki emisyonlar, kullanılan iş makinelerinin yakıt tüketim verileri

(FV) ile ilgili yakıt türüne ait emisyon faktörlerinin (EF) çarpılması yöntemiyle hesaplanmaktadır. Emisyon faktörleri, IPCC (2006) kılavuzları ve ülkeye özgü yakıt emisyon katsayıları kullanılarak belirlenmiştir.

İş makineleri, özellikle temel kazısı, taşıma ve montaj süreçlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu aşamadaki doğrudan emisyonlar göz ardı edilemez.

Hesaplama Yöntemi

Hesaplama iş makinelerinin tükettiği yakıt miktarı (FV) ve kullanılan yakıtın emisyon faktörleri (EF) dikkate alınır:

1 MWh PV GES kurulumunda iş makineleri için yaklaşık 10 ton dizel yakıt tüketimi baz alınmıştır. Bu veri Popua santrali için verilen 250 litre dizel/MWh değerinden (1 MWh başına) esinlenerek yapılmış bir kabuldür.

$$\text{Faaliyet Verisi} = 300000 \times 0,845 / 1000$$

$$\text{FV} = 8,45 \text{ ton}$$

$$\text{ECO}_2 = \text{FV} \times \text{EFCO}_2$$

$$\text{ECO}_2 = 8,45 \times 0,4333 \times 74100 / 1000$$

$$\text{ECO}_2 = 27$$

$$\text{ECH}_4 = \text{FV} \times \text{EF CH}_4$$

$$\text{ECH}_4 = 8,45 \times 0,4333 \times 4,15 / 1000$$

$$\text{ECH}_4 = 0,0015$$

$$\text{EN}_2\text{O} = \text{FV} \times \text{EF N}_2\text{O}$$

$$\text{EN}_2\text{O} = 8,45 \times 0,4333 \times 28,6 / 1000$$

$$\text{EN}_2\text{O} = 0,01$$

$$\text{tCO}_2 \text{ eq} = 27 + (0,0015 \times 27) + (0,01 \times 273)$$

$$tCO_2 \text{ eq} = 30,03 \text{ TCO}_2\text{-eq}$$

FV: Yakıt tüketimi (ton),

EF: Yakıtın emisyon faktörleri (IPCC, 2006),

GWP: Küresel ısınma potansiyeli (IPCC AR6 değerleri).

3.3.4. Şebeke Kayıpları ve Entegrasyon (Kategori 5)

PV güneş enerji santralinin karbon ayak izi hesaplamasında dikkate alınan aşamalardan biri de, üretilen elektriğin şebekeye aktarılması sonrasındaki kullanıcı taraflı dolaylı emisyonlardır. Bu süreç, Kategori 5 – Ürün Emisyonları / Şebeke Kayıpları ve Entegrasyon kapsamında değerlendirilir.

PV santral tarafından üretilen elektrik, şebekeye verildikten sonra nihai kullanıcılar tarafından tüketilirken ülke şebekesinin karbon yoğunluğu çerçevesinde dolaylı sera gazı emisyonlarının olduğu varsayılır. Bu yaklaşım, GHG Protocol Scope 3 – “Use of Sold Products” standardına dayanmaktadır ve PV santraller için de uygulanır.

Hesaplama, PV santral tarafından şebekeye verilen toplam elektrik miktarı ile ulusal şebeke emisyon faktörünün çarpımı esas alınır. Böylece elektrik iletim ve dağıtım sürecinde ortaya çıkan kayıplar ve kullanıcı taraflı tüketimden kaynaklanan dolaylı emisyonlar dahil edilmiş olur.

Bu yöntem, kömür yakıtlı termik santral için uygulanan hesaplama yaklaşımıyla uyumluluk sağlayarak, iki enerji üretim teknolojisinin emisyon değerleri açısından karşılaştırılabilirliğini güçlendirmektedir.

Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü, yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi ile sağlanacak sera gazı salım azaltım hesaplamalarına yönelik faktörlere yer vermektedir. Örneğin, söz konusu formda yer alan Birleşik marj emisyon faktörü (güneş, rüzgâr için= 0,6261 tCO₂/MWh) güneş veya rüzgârdan üretilen her 1 MWh’lık elektrik için 0,6261 ton CO₂ salınmaktadır anlamına gelmemektedir. Buradaki değer, yeni kurulacak bir güneş ya da rüzgâr enerji santrali ile üretilecek her 1 MWh’lık elektrik için 0,6261 ton CO₂ emisyonundan kaçınılacağı anlamına gelmektedir. (ETKB, 2022)

Bu hesaplama, tüketici tarafındaki kullanımın, ülke/şebeke emisyon

faktörüyle temsil edilmesine dayanır. Bu çalışmalar ise denklem (3.15) kullanılır. Kömür santrali için kullanılan yöntemle karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla PV için de aynı yaklaşımı uygular.

$$FV(UretilenElektrik(kWh)) \times EF\left(\frac{tCO_2}{MWh}\right) \quad (3.61)$$

FV: Satılan/teslim edilen elektrik (normalize: 1 MWh)

EFgrid: Türkiye elektrik şebekesi emisyon faktörü (tCO₂e/MWh)

4. BULGULAR

Bu bölümde, enerji üretiminde kullanılan iki farklı teknoloji olan kömür yakıtlı termik santral ile fotovoltaik (PV) güneş enerji santralinin emisyon değerleri ve çevresel etkileri, 2024 yılı temel alınarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. İnceleme sürecinde, kömür santraline ait faaliyet verileri doğrudan işletme koşullarına dayandırılmış ve tüm veriler 1MWh üretim kapasitesine göre oranlanmıştır. Enerji üretiminde kullanılan linyit 1800 kcal'dir. 1MWh elektrik üretimi için ise 1,5 ton linyit kullanılmaktadır. PV santrali için ise 1 MWh kapasiteli, Konya/Karatay'da Kalyon PV fabrikasında üretilen panellerin özelliklerine dayalı bir santral tasarımı oluşturulmuştur. Diğer referans noktalar ve değerler bölümler içinde vurgulanmıştır.

Bu bölümde, "3. Materyal ve Metot" kısmında tanımlanan yöntemler ve formüller kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Emisyonlar, IPCC (2006) ve GHG Protocol standartlarına uygun olarak dört farklı kategori (Kategori 1,2,3,5) kapsamında değerlendirilmiş, her iki sistem için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ayrıca elde edilen bulgular, karşılaştırmalı tablolar aracılığıyla görselleştirilmiş, sistemler arasındaki çevresel farkların daha net biçimde ortaya konulması hedeflenmiştir.

Santralin emisyonları, sera gazı emisyonlarının türlerine ve kaynaklarına göre 4 ana kategoride değerlendirilmiştir:

Kategori 1 (Doğrudan SG Salımları): Kuruluşun faaliyetleri sırasında, yakıtların yanması gibi süreçlerden doğrudan ortaya çıkan emisyonlardır.

Kategori 2 (İthal Edilen Enerjiden Dolaylı SG Salımları): Dışarıdan temin edilen elektrik, ısı veya buhar üretiminden kaynaklanan emisyonlardır.

Kategori 3 (Ulaşımdan Dolaylı SG Salımları): Hammadde, ürün veya malzemelerin taşınması sırasında ortaya çıkan emisyonlardır.

Kategori 5 (Üretilen Ürünlerin Kullanımıyla Bağlantılı Dolaylı SG Salımları): Kuruluşun ürettiği ürünlerin ve değerlerin kullanım aşamasında ortaya çıkan emisyonlardır.

4.1. Kömürün Değerlendirilme Süreçlerinin Bulguları

Termik santralin kömür tüketimi ve enerji üretimi ile ilgili veriler detaylı hesaplamalarla analiz edilmiştir. Enerji üretiminde kullanılan linyit 1800 kcal'dir.

1MWh elektrik üretimi için ise 1,5 ton linyit kullanılmaktadır.

4.2. Kömürün Değerlendirme Süreçlerinde Kategorik Hesaplamalar

Bu süreçlerde kömürün proses içinde ilerleyişi kategorilere uygun olarak hesaplanmıştır.

4.2.1. Linyit Taşınma Süreç Bulguları (Kategori 3)

Bu bölümde, referans yılı olan 2024 yılı için termik santralde kullanılan linyit kömürünün taşınma sürecine ait sera gazı emisyon hesaplamaları sunulmuştur. Nakliye faaliyetleri, yakıt tüketimine dayalı olarak Kategori 3 de Ulaşımdan Kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar kapsamında değerlendirilmiştir. Emisyon miktarının belirlenmesinde, taşınan linyit miktarı (ton) ile taşınan mesafe (km) değerlerinin çarpımından elde edilen faaliyet verisi (FV), söz konusu emisyon faktörü (EF) ile çarpılmıştır.

Bu değer, kömür tedarik zincirindeki lojistik faaliyetlerin, santral toplam emisyon değerleri içerisindeki payının dikkate değer olduğunu göstermektedir.

Kategori 3 kapsamında hesaplanan değerler tablo 11 de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Kategori 3 Taşınma süreci emisyon hesaplama tablosu

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 3	Linyit Taşınma Süreci	Ağır Vasıtalar	15,0	ton*km	-	0,1782	kg CO ₂ e/ton*km	-	-	0,00	-	-	0,0027

Linyit taşınma süreci kapsamında yapılan hesaplamalar, 1 MWh elektrik üretimi için taşımadan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının yaklaşık 0,0027 ton CO₂-eq düzeyinde olduğunu göstermektedir. Bu miktar, kömür yakıtlı termik santralin toplam emisyon değerleri içinde düşük bir paya sahip görünse de, dolaylı emisyonların sürekliliği açısından dikkat çekicidir. Linyit, genellikle santrale yakın sahalardan tedarik edilmesine rağmen, taşımada kullanılan dizel yakıtlı ağır vasıta kamyonlar nedeniyle doğrudan fosil yakıt kaynaklı karbon salımı oluşmaktadır.

Bu emisyonların temel nedeni, dizel motorlu araçların yüksek özgül yakıt tüketimi ve taşınan yükün yoğunluğu ile yakından ilişkilidir. Özellikle linyitin düşük enerji yoğunluğu (yaklaşık 1800 kcal/kg) nedeniyle, aynı miktarda enerji üretmek

için taşınması gereken kömür miktarı artmakta ve bu da nakliye kaynaklı emisyonları artırmaktadır. Ayrıca, kömür taşımacılığında kısa mesafelerde bile çok sayıda sevkiyatın yapılması, birim üretim başına emisyon miktarını yükseltmektedir.

Kömür sahalarının santral alanına yakın seçilmesi, bu emisyonların mutlak değerini düşürse de, taşımacılıkta kullanılan araç filosunun yaş ortalaması, motor verimliliği ve yakıt kalitesi gibi unsurlar toplam karbon etkisini belirleyen önemli faktörlerdir. Türkiye’de enerji üretiminde kullanılan linyit madenlerinin genellikle açık ocaklardan elde edilmesi, taşımacılığın yoğun biçimde karayolu taşımacılığına bağımlı olmasına neden olmaktadır. Bu durum, dolaylı emisyonların azaltılabilmesi için lojistik optimizasyonu ve alternatif yakıtlı taşıma teknolojilerinin değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, taşınma süreci emisyonlarının toplam sistem içindeki payı düşük olsa da, enerji arz zincirinin karbon yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, taşımacılık kaynaklı emisyonların azaltılması için daha kısa tedarik mesafeleri, elektrikli taşımacılık altyapısının geliştirilmesi ve yakıt verimliliği yüksek araçların tercih edilmesi, kömür santrallerinin çevresel etkilerini azaltma yönünde önemli bir adım olacaktır.

4.2.2. Kömürün Kırılması ve Öğütülme Bulguları (Kategori 2)

Kömür yakıtlı termik santrallerde enerji üretim sürecinin önemli adımlarından biri, maden sahasından çıkarılan kömür parçalarının öğütülerek türbinlerde yakılabilecek uygun boyuta getirilmesidir. Bu mekanik işlem sırasında doğrudan fosil yakıt yanması gerçekleşmez; ancak kullanılan yüksek miktardaki elektrik enerjisi, dolaylı sera gazı (SG) emisyonlarına yol açmaktadır.

Öğütme süreci, santral içerisindeki en yoğun elektrik tüketen aşamalardan biridir. İnce öğütme işlemleri, enerji tüketimini artırmakta ve dolayısıyla dolaylı emisyonları yükseltmektedir.

Çizelge 4.1. Kategori 2 Kömürün kırılması ve öğütülmesi sürecinde emisyon hesaplama

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 2	Linyitin kırılması ve parçalanması süreci [İç Tüketim]	Elektrik (kWh)	41800	kWh	Yok	0,442	kg CO ₂ e/MWh	-	-	18,48	-	-	18,48

Kömürün kırılması ve öğütülmesi süreci, termik santralin enerji tüketimi açısından en yoğun aşamalarından biri olup, dolaylı sera gazı emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda, 1 MWh elektrik üretimi için bu süreçten kaynaklanan toplam emisyon miktarı 18,48 tCO₂-eq olarak belirlenmiştir. Bu değer, doğrudan yanma emisyonlarına (Kategori 1) göre düşük olsa da, santral genelinde elektrik tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonların önemli bir bileşeni konumundadır.

Emisyonun yüksek çıkmasının temel nedeni, kömürün yakılabilir forma getirilebilmesi için uygulanan mekanik işlemlerin yüksek elektrik enerjisi gerektirmesidir. Özellikle ince öğütme işlemi, enerji tüketiminin büyük kısmını oluşturmakta ve bu enerji, Türkiye'nin ulusal elektrik şebekesinden sağlandığı için şebeke emisyon faktörünün (0,442 tCO₂e/MWh) etkisi doğrudan sonuçlara yansımaktadır.

Ayrıca, kullanılan ekipmanların (değirmen, kırıcı, elek vb.) verimlilik düzeyi ve işletme süreleri, bu kategorideki emisyon miktarını doğrudan etkileyen teknik parametrelerdir. Eski veya enerji verimliliği düşük ekipmanlarda elektrik tüketiminin artması, dolayısıyla dolaylı emisyon yükünün yükselmesine neden olmaktadır. Bunun yanında, Türkiye elektrik üretiminde hâlen fosil yakıtların önemli bir paya sahip olması, şebeke kaynaklı karbon yoğunluğunu artırmakta ve bu da Kategori 2 emisyonlarının büyüklüğünü dolaylı biçimde etkilemektedir.

Bu sonuçlar, termik santrallerde elektrik tüketen alt proseslerin toplam emisyon değerleri üzerindeki payını göstermesi açısından önemlidir. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler (örneğin yüksek verimli öğütme sistemleri, frekans kontrollü motorlar, atık ısı geri kazanımı gibi uygulamalar) sayesinde bu kategoriye ait emisyonların azaltılması mümkündür. Dolayısıyla, Kategori 2 emisyonlarının kontrolü, yalnızca işletme maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, santralin genel çevresel performansını da iyileştirecek stratejik bir adımdır. (ETKB-EVÇED 2023), (EVÇED-FRM-042 Rev.01)

4.2.3. Kömürün Yakılma Bulguları (Kategori 1)

Kömür yakıtlı termik santrallerde enerji üretimi yanma işlemi sırasında:

$\text{CO}_2 \rightarrow$ kömürün karbon içeriğinin oksitlenmesiyle oluşur.

$\text{CH}_4 \rightarrow$ tam olmayan yanma ve gaz çıkışlarından kaynaklanır.

$\text{N}_2\text{O} \rightarrow$ yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında, azotlu bileşiklerin yan ürünüdür.

Bu üç gazın küresel ısınma potansiyelleri (Global Warming Potential – GWP) dikkate alınarak toplam CO_2 eşdeğeri (tCO_2eq) hesaplanır.

Bu verilere göre, 1 MWh enerji üretimi için doğrudan emisyon miktarı yaklaşık 1.201,9 tCO_2eq olarak hesaplanmıştır.

((WRI ve WBCSD, 2015); (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (MRV Yönetmeliği))

Çizelge 4.1. Kategori 1 Kömürün yakılması sürecinde emisyon hesaplama

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO_2	EF Birim	CH_4 EF (kg/TJ)	N_2O EF (kg/TJ)	TCO_2	TCH_4	TN_2O	Toplam Emisyon Miktarı $\text{TCO}_2\text{-eq}$
KATEGORİ 1	Linyit Yanma Süreci	Kazanda yakılan kömür	1,5	Ton	0,00793	101000	EF (kg CO_2 /TJ)	1	1,5	1.202	0,00001	0,00002	1.201,9

Kömürün yakılması süreci, termik santralin emisyon değerlerinin en baskın ve belirleyici bileşenidir. Yapılan hesaplamalar, 1 MWh elektrik üretimi için doğrudan sera gazı emisyonlarının yaklaşık 1.201,9 $\text{tCO}_2\text{-eq}$ düzeyinde olduğunu ortaya koymuştur. Bu değer, santralin toplam emisyonunun yaklaşık %98'ini oluşturarak kömür temelli enerji üretiminin yüksek karbon yoğunluğunu açıkça göstermektedir.

Bu yüksek emisyon miktarının temel nedeni, linyit kömürünün düşük kalorifik değeri (0,00793 TJ/ton) ve yüksek karbon içeriğidir. Linyit, birim enerji başına daha fazla miktarda yakıt gerektirdiğinden, aynı miktarda elektrik üretmek için diğer kömür türlerine göre daha fazla karbon salımı gerçekleştirir. Ayrıca, yanma sürecinde tam oksidasyonun sağlanamaması, az da olsa metan (CH_4) ve diazot monoksit (N_2O) emisyonlarına yol açmaktadır. Bu gazların küresel ısınma

potansiyelleri (CH₄ için 27, N₂O için 273; IPCC AR6) CO₂'ye göre çok daha yüksek olduğundan, küçük miktarlarda bile toplam emisyon üzerindeki etkileri dikkate değerdir. Yanma sürecindeki emisyon miktarı, yalnızca yakıt kalitesiyle değil, aynı zamanda kazanın yanma verimi, yakma sıcaklığı, hava-yakıt oranı ve toz yakıt besleme sistemi verimliliği gibi işletme parametreleriyle de doğrudan ilişkilidir. Düşük yanma verimine sahip sistemlerde, yakıtın tam yanmaması sonucu CO₂ dışındaki sera gazları (özellikle CH₄) artış gösterebilir.

Bu bulgular, kömür yakıtlı santrallerin karbon salımının yalnızca enerji üretim aşamasında değil, aynı zamanda yakıt kalitesi ve yanma teknolojisi düzeyinde de büyük ölçüde şekillendiğini göstermektedir. Bu nedenle, doğrudan emisyonların azaltılmasına yönelik stratejiler arasında yüksek verimli kazan teknolojilerinin kullanılması, yakma optimizasyonu, karbon yakalama ve depolama sistemlerinin entegrasyonunun değerlendirilmesi öne çıkmaktadır.

Kategori 1 kapsamındaki doğrudan emisyonlar, termik santralin toplam emisyon değerlerini belirleyen kritik çevresel etken konumundadır. Linyit bazlı enerji üretiminin sürdürülebilir enerji hedefleriyle uyumlu olabilmesi için, bu aşamada ortaya çıkan emisyonların azaltılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

4.2.4. Ürün Emisyon Bulguları (Kategori 5)

Türkiye’de elektrik üretiminde kullanılan yakıt türlerine göre emisyon faktörleri T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanmaktadır. (ETKB, 2022)

Çizelge 4.1. Kategori 5 Ürün emisyonları

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -EQ
KATEGORİ 5	Elektrik Satış Süreci	Satılan Elektrik*	1,0	MWh	Yok	1,1880	kg CO ₂ e/MWh	-	-	1,188	-	-	1,188

Kömür yakıtlı termik santrallerde üretilen elektriğin ulusal şebeke üzerinden son kullanıcıya ulaştırılması, üretim tesisinde oluşan doğrudan emisyonların dışında ikincil (dolaylı) sera gazı emisyonlarını da beraberinde getirmektedir. Bu aşama, Kategori 5 – Ürün Kullanımıyla İlişkili Dolaylı Emisyonlar kapsamında değerlendirilmiş olup, üretilen elektrik miktarı ile Türkiye’nin güncel ulusal emisyon faktörü çarpılarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan emisyon faktörü, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB, 2024) tarafından yayımlanan “Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri” tablosundan alınmıştır. Linyit bazlı üretim için bu değer 1,188 tCO₂e/MWh olarak belirlenmiştir. 1 MWh’lik elektrik üretimi referans alındığında, toplam dolaylı emisyon miktarı 1,188 tCO₂-eq olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, doğrudan yakma emisyonlarına kıyasla oldukça düşük olsa da, üretilen elektriğin kullanım sürecinde oluşan dolaylı etkilerin, enerji sisteminin yaşam döngüsündeki toplam emisyon değerlerine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Türkiye’de elektrik talebinin büyük kısmı hâlen fosil yakıt temelli üretim kaynaklarına dayandığından, üretilen elektriğin nihai kullanımında da karbon yoğunluğu devam etmektedir.

Ayrıca, bu kategori enerji sisteminin tüketim tarafındaki çevresel yükünü temsil etmesi açısından önemlidir. Elektrik üretim ve tüketim zinciri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, kullanıcı tüketimi aşaması da sistemin toplam emisyon envanterinin önemli bir bileşenidir. Özellikle endüstriyel kullanıcıların elektrik tüketim profili yüksek olduğunda, bu dolaylı etkiler daha belirgin hale gelmektedir.

Dolayısıyla, Kategori 5 kapsamındaki emisyonların azaltılmasına yönelik temel yaklaşım, enerji üretim portföyünde yenilenebilir kaynakların payının artırılması ve şebeke karbon yoğunluğunun azaltılmasıdır. Bu doğrultuda, fosil yakıt temelli üretimden güneş ve rüzgâr enerjisine geçiş, yalnızca doğrudan üretim emisyonlarını değil, nihai kullanım aşamasındaki dolaylı emisyonları da önemli ölçüde düşürecektir.

Sonuç olarak, bu bulgu, kömür yakıtlı santrallerin çevresel etkilerinin yalnızca tesis sınırlarıyla sınırlı olmadığını, üretilen enerjinin tüketimi boyunca devam eden zincirleme bir karbon etkisi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji üretiminde kaynak dönüşümünün (transition) ve düşük karbonlu teknolojilere yönelimin önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

4.2.5. Kömür Santrali Toplam Emisyon Miktarları

Bu bölümde, linyit kömürünü yakıt olarak kullanan termik santral için gerçekleştirilen emisyon hesaplamalarının genel değerlendirmesi sunulmaktadır.. Analiz, 1 MWh elektrik üretimi referans alınarak dört ana kategori kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Toplam sera gazı emisyon miktarı 1.221,5 ton CO₂-eşdeğeri (tCO₂-eq) olarak belirlenmiştir. Bu değer, kömür yakıtlı termik santralin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan doğrudan (Kategori 1) ve dolaylı (Kategori 2, 3 ve 5) emisyonları içermektedir.

Elde edilen bulgular, kömür santrallerinde emisyon değerlerinin çok büyük oranda doğrudan yanma sürecinden (Kategori 1) kaynaklandığını açıkça göstermektedir.

Yanma işlemi sırasında kömürün kimyasal bileşimindeki karbonun oksidasyonu sonucunda oluşan karbondioksit (CO₂), toplam emisyonun yaklaşık %98,3'ünü oluşturmaktadır.

Bu durum, kömür santrallerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından en yüksek karbon yoğunluğuna sahip enerji üretim yöntemlerinden biri olduğunu doğrulamaktadır.

Bununla birlikte, Kategori 2 (Kömürün Kırılması ve Öğütülmesi), Kategori 3 (Taşımacılık) ve Kategori 5 (Elektrik Satış Süreci) gibi diğer süreçler, toplam emisyonlar içinde daha küçük oranlarda yer almakla birlikte, santralin genel çevresel etkisinin tamamlayıcı unsurlarını oluşturmaktadır.

Özellikle Kategori 2'deki elektrik tüketimi santral içi enerji yoğunluğunu yansıtmakta ve üretim sürecinde kullanılan elektriğin dolaylı emisyon katkısını göstermektedir.

Analiz sonucuna göre, kömürün taşınması ve satış süreci gibi yardımcı faaliyetlerin toplam içindeki payı oldukça sınırlı kalmıştır.

Ancak doğrudan yanma kaynaklı emisyonlar, santralin çevresel performansını belirleyen temel unsur olmaya devam etmektedir.

Kömür yakıtlı termik santrallerde enerji üretiminin doğrudan karbon salımına dayalı olması nedeniyle karbon yoğunluğu oldukça yüksek, enerji başına düşen çevresel etki ise sürdürülebilirlik hedefleri açısından olumsuz bir tablo çizmektedir.

Bu kapsamda aşağıda sunulan grafik, kömür santraline ait toplam emisyon dağılımını kategori bazında (tCO₂-eq) göstermekte olup, doğrudan ve dolaylı sera gazı salımlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.1. Kömür yakıtlı termik santral emisyon hesaplama özeti

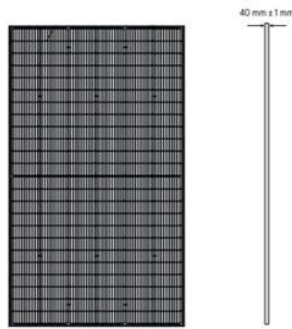
Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF Birim	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 3	Linyit Taşıma Süreci	Ağır Vasıtalar	15,0	Ton *km	-	0,1782	Kg CO ₂ e/ ton*km	-	-	0,00	-	-	0,0027
KATEGORİ 2	Linyitin kırılması ve parçalanması süreci [İç Tüketim]	Elektrik (kWh)	41.800	kWh	Yok	0,442	Kg CO ₂ e/ MWh	-	-	18,48	-	-	18,48
KATEGORİ 1	Linyit Yanma Süreci	Kazanda yakılan kömür	1,5	Ton	0,00793	101000	EF (kg CO ₂ /TJ)	1	1,5	1.202	0,00001	0,00002	1.201,9
KATEGORİ 5	Elektrik Satış Süreci	Satılan Elektrik*	1,0	MWh	Yok	1,1880	Kg CO ₂ e/ MWh	-	-	1,188	-	-	1,188
TOPLAM													1.221,5

4.3. PV Panel Güneş Enerji Santrali Bulguları

Bu güneş santrali tasarımı Konya Kalyon firmasında üretilen “M10-144 GLASS-BACKSHEET MONOFACIAL HALF CUT FRAMED MODULE” örnek alınmış ve bu panel verileri üzerinde hesaplamalar ve tasarımlar yapılmıştır.



M10-144 GLASS-BACKSHEET MONOFACIAL HALF CUT FRAMED MODULE



STRUCTURAL PARAMETERS

Cell	Type	Mono-C Silicon Bifacial PERC	Module Size	Length	2279 mm ± 2 mm
	Number	144 pcs. Half Cut		Width	1134 mm ± 2 mm
	Size	182 mm x 91 mm		Thickness	40 mm ± 1 mm
Junction Box	Bypass Diode	3 pcs	Mounting Holes	Number	12
	Degree of Protection	IP67/IP68		Size	9 mm x 14 mm Radius: 4.5 mm
	Cable Length	30 cm (Customized)		Mounting Hole Spacing (Long Side)	1676/1176/400 ± 1 mm
	Connector	Compatible with MC4		Mounting Hole Spacing (Horizontal Axis)	1088 mm ± 2 mm
	Rated Current	25 A		40 mm Frame	27 kg ± 5%
Glass	AR Coating Half Tempered, 3.2 mm Thickness		Grounding Holes	Number	8
				Size	Diameter: 4 mm

Şekil 4.295. Kalyon PV panel özellikleri

Panel Verileri;

Ağırlık: 27 kg

Boyut: $2.27 \times 1.13 = 2.65 \text{ m}^2$

Kapasite: 545 Watt

1 MWh için ihtiyaç duyulan toplam panel sayısı= 1835 adet

(Kalyon PV M10-144-GLASS-BACKSHEET)

4.3.1. Panel Taşınması ve Lojistik Bulguları (Kategori 3)

Fotovoltaik (PV) panellerin ve destek ekipmanlarının, üretim tesisi olan Konya/Karatay Kalyon PV fabrikasından kurulum sahası Aydın'a taşınması karayolu üzerinden, dizel yakıt kullanan ağır vasıtalar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu taşımalar, hem panel ağırlığı hem de mesafe açısından dikkate alınması gereken bir karbon bileşenidir.

Yapılan hesaplamada, taşıma faaliyetinde yaklaşık 50.000 ton·km yük–mesafe ilişkisi dikkate alınmış ve ortalama 500 km'lik taşıma mesafesi üzerinden hesaplama yapılmıştır. Her biri 545 W kapasiteye sahip 1.835 adet panelin ortalama 27 kg ağırlığında olduğu kabul edilmiştir.

Bu parametreler kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda toplam taşınan yük yaklaşık 49,545 ton, emisyon faktörü ise 0,1782 kgCO₂e/ton·km olarak alınmıştır (DEFRA, 2023).

Hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuç TCO₂eq = 4,41 tCO₂e dur. PV sistemin lojistik aşamasında ortaya çıkan emisyon miktarının 4,41 tCO₂e düzeyinde olduğunu göstermektedir. Bu değer, termik santrallerin yakıt taşımacılığı süreçlerinde ortaya çıkan emisyonlara kıyasla son derece düşük bir seviyededir.

Bu düşük emisyon seviyesi, yenilenebilir enerji teknolojilerinin tedarik zinciri verimliliğini ve fosil kaynaklı yakıt bağımlılığının olmamasını yansıtmaktadır. Ayrıca, taşımacılığın yalnızca kurulum öncesinde gerçekleşmesi nedeniyle bu kategoriye ait emisyonlar tek seferlik olup, santral işletmeye alındıktan sonra tekrar eden bir çevresel yük oluşturmaz.

Dolayısıyla, PV panel taşımacılığı aşamasındaki karbon salımı, sistemin toplam emisyon değerleri içinde ihmal edilebilir düzeyde bir paya sahiptir. Ancak, bu tür yaşam döngüsü analizlerinde taşımacılık emisyonlarının dikkate alınması, sistemlerin bütüncül sürdürülebilirlik değerlendirmesi açısından önem taşır.

Çizelge 4.1. Kategori 3 PV santral panel taşınması emisyon hesaplaması

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 3	PV Taşınması	Ağır Vasıtalar	24.773	ton*km	-	0,1782	kg CO ₂ e/ton*km	-	-	4,41	-	-	4,41

4.3.2. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde Elektrik Tüketim Bulguları (Kategori 2)

PV güneş enerji santralinin kurulumu sırasında çeşitli inşaat ve montaj faaliyetleri yürütülmektedir.

PV güneş enerji santrallerinde üretim sürecinde doğrudan yakıt kullanımı bulunmamakla birlikte, kurulum ve montaj aşaması, enerji tüketimine dayalı dolaylı sera gazı emisyonlarının olduğu önemli bir dönemdir. Bu emisyonlar, Kategori 2 – “İthal Edilen Enerjiden Kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar” kapsamında değerlendirilmiştir.

Kurulum aşamasında;

Panellerin yerleştirilmesi için kullanılan vinç, kaldırma sistemleri ve montaj ekipmanları,

Kazı ve temel hazırlama makinelerinin enerji ihtiyacı,

Çelik destek yapıların ve beton temellerin montajında kullanılan elektrikli aletler,

gibi çok sayıda enerji yoğun faaliyet bulunmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye koşullarında 1 MWh kapasiteli bir PV santral için kurulum aşamasında tüketilen elektrik miktarı literatürde yer alan NREL (2024) ve JRC (2020) çalışmalarına dayanarak 300.000 kWh olarak kabul edilmiştir.

Hesaplama, Türkiye’nin ulusal elektrik şebekesi emisyon faktörü olan 0,442 tCO₂e/MWh kullanılarak yapılmıştır (ETKB, 2022).

Hesaplamaya göre, PV kurulum aşamasında kullanılan elektrik enerjisi sonucu 132,6 ton CO₂ eşdeğeri dolaylı sera gazı emisyonu meydana gelmektedir.

Elde edilen bu değer, kurulum sürecinin geçici bir dönemle sınırlı olması

nedeniyle santralin tüm yaşam döngüsü içinde nispeten düşük bir paya sahiptir. Ancak, PV sistemlerinin çevresel etkileri değerlendirilirken sadece işletme aşamasının değil, kurulum sürecinde harcanan enerji ve kullanılan ekipmanların da dikkate alınması gerekmektedir.

Bu sonuçlar, PV sistemlerin toplam emisyon değerlerinin önemli bir kısmının inşaat ve üretim aşamalarında yoğunlaştığını göstermektedir. İşletme aşamasında ise, sistem yakıt kullanmadığı için sıfır doğrudan emisyonla çalışmaktadır.

PV kurulumunda ortaya çıkan dolaylı emisyonlar, sistemin toplam yaşam döngüsü emisyonları içinde önemli bir teknik gösterge olmakla birlikte, uzun dönemli elektrik üretimi göz önüne alındığında karbon geri ödeme süresi oldukça kısadır. PV sistemin ömrü boyunca üreteceği temiz enerji miktarı, bu kurulum aşamasında oluşan emisyonları fazlasıyla telafi etmektedir.

Çizelge 4.1. Kategori 2 PV kurulum ve montaj sürecinde elektrik tüketim emisyonu

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 2	PV Kurulumunda tüketilecek elektrik	Elektrik (kWh)	300000	kWh	Yok	0,442	Kg CO ₂ e/ MWh	-	-	132,6	-	-	132,6

4.3.3. PV Kurulum ve Montaj Sürecinde İş Makinelerinden Kaynaklanan Emisyonların Bulguları (Kategori 1)

PV santrallerin enerji üretim sürecinde doğrudan emisyon oluşmaz çünkü fotovoltaik sistemler yakıt yakmadan elektrik üretir. Ancak kurulum aşamasında kullanılan iş makineleri (örneğin kazıcılar, vinçler, dozerler ve taşıma araçları) fosil yakıt (dizel) tüketmektedir. Bu tüketim, Kategori 1 (Doğrudan Sera Gazı Emisyonları) kapsamında değerlendirilir.

Fotovoltaik (PV) enerji sistemleri, işletme aşamasında doğrudan emisyon üretmeyen temiz enerji teknolojileridir. Ancak sistemin kurulum ve montaj sürecinde kullanılan iş makineleri, özellikle dizel yakıt tüketimine bağlı olarak sınırlı miktarda doğrudan sera gazı emisyonu oluşturur. Bu nedenle, bu emisyonlar Kategori 1 – Doğrudan Sera Gazı Emisyonları kapsamında değerlendirilmiştir.

Kurulum süreci boyunca kullanılan ekipmanlar arasında;

Kazıcılar, dozerler, vinçler ve taşıma araçları,

Panel yerleştirme, temel kazısı ve taşıma operasyonlarında kullanılan dizel motorlu makineler,

yer almaktadır. Bu araçlar, hem yüksek yakıt tüketimi hem de uzun süreli çalışma döngüleri nedeniyle doğrudan CO₂, CH₄ ve N₂O salımına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, 1 MWh'lık PV santralin kurulumu sırasında yaklaşık 8,45 ton dizel yakıt tüketimi varsayılmıştır. Yakıt tüketimi, benzer ölçekli projelerden elde edilen Popua Santrali çevresel değerlendirme verileri (EIB, 2010) esas alınarak tahmin edilmiştir.

Hesaplama IPCC (2006) metodolojisine ve Türkiye MRV Yönetmeliği esaslarına göre yapılmıştır. Dizel yakıt için aşağıdaki emisyon faktörleri kullanılmıştır:

$$EF(CO_2) = 74.100 \text{ kg/TJ}$$

$$EF(CH_4) = 4,15 \text{ kg/TJ}$$

$$EF(N_2O) = 28,6 \text{ kg/TJ}$$

$$\text{Net Kalorifik Değer (NKD)} = 0,0433 \text{ TJ/ton}$$

Bu parametrelerle yapılan hesaplama sonucunda:

$$tCO_2eq = 30,03 \text{ ton CO}_2\text{-eq olarak bulunmuştur.}$$

Bu sonuç, PV kurulum sürecindeki toplam doğrudan emisyonların oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Bunun temel nedenleri şunlardır: İş makineleri yalnızca kurulum aşamasında (yaklaşık birkaç hafta-ay arası) çalışmaktadır. Yakıt tüketimi, kömür santrali gibi sürekli yakma faaliyetlerine kıyasla tek seferlik ve düşük yoğunlukludur.

Kullanılan enerji miktarı, santralin toplam ömrü boyunca üreteceği temiz enerjiye kıyasla ihmal edilebilir bir seviyededir.

Bu bulgular, PV sistemlerin emisyon değerlerinin en yüksek olduğu aşamanın üretim (panel üretimi) ve kurulum dönemleri olduğunu; işletme sürecinde ise yakıt bağımlılığının tamamen ortadan kalktığını göstermektedir.

PV sistemlerde iş makinelerinden kaynaklanan doğrudan emisyonlar, yaşam döngüsü analizine dâhil edilmesi gereken önemli bir unsur olmakla birlikte, toplam çevresel etki içindeki payı oldukça düşüktür. Bu durum, fotovoltaik sistemlerin fosil yakıt tabanlı enerji üretim yöntemlerine kıyasla çok daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1. Kategori 1 PV santral kurulumunda iş makinelerinden kaynaklanan emisyonları

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 1	Kurulum sırasında harcanan	İş Makinası	8,45	Ton	0,0433	74100	EF (kg CO ₂ /TJ)	4,15	28,6	27	0,0015	0,01	30,03

4.3.4. Ürün Emisyonları, PV Elektrik Satışı Sonrası (Kategori 5)

PV güneş enerji santralleri doğrudan yakıt tüketimi olmadan elektrik üretir; bu nedenle işletme sürecinde doğrudan sera gazı emisyonu meydana gelmez. Ancak, üretilen elektriğin ulusal şebekeye aktarılması ve sonrasında nihai tüketiciler tarafından kullanılması sürecinde dolaylı emisyonlar oluşur. Bu dolaylı etkiler, Kategori 5 – Ürün Emisyonları (Şebeke Kayıpları ve Entegrasyon) kapsamında değerlendirilir.

Bu yaklaşım, GHG Protocol Scope 3 – Use of Sold Products metodolojisine dayanmaktadır. Buna göre, PV santral tarafından şebekeye verilen elektrik, ülkenin mevcut enerji karışımına bağlı olarak belirli bir karbon yoğunluğuna sahip olur. Türkiye elektrik şebekesi halen fosil kaynaklardan da beslenmekte olduğu için, PV kaynaklı elektrik tüketimi dolaylı olarak az da olsa bir karbon emisyonuna neden olur.

Analizde, Türkiye ulusal elektrik şebekesi emisyon faktörü olan 0,626 tCO₂e/MWh dikkate alınmıştır (ETKB, 2022). Bu faktör, PV santralden şebekeye aktarılan 1 MWh elektriğin tüketimi sırasında ortaya çıkabilecek ortalama dolaylı sera gazı miktarını ifade etmektedir.

Bu kapsamda yapılan hesaplama sonucunda, 1 MWh enerji üretimi için 0,626 ton CO₂ eşdeğeri dolaylı emisyon olduğu belirlenmiştir. Bu değer, PV santralinin doğrudan üretim süreciyle ilişkili olmayıp, şebekenin mevcut karbon yoğunluğunun

bir yansımasıdır.

Elde edilen sonuç, PV santrallerin çevresel performansının sadece kurulum ve üretim aşamalarıyla değil, entegre oldukları enerji altyapısının karakteriyle de doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Türkiye’de şebekedeki yenilenebilir enerji payı arttıkça, PV kaynaklı dolaylı emisyonlar da doğal olarak azalacaktır.

Bu bulgu, PV teknolojilerinin karbon azaltım hedefleriyle tam uyumlu olduğunu ve gelecekte şebeke karbonsuzlaşmasıyla birlikte neredeyse sıfır net emisyonu ulaşabileceğini göstermektedir. Kısa vadede dahi, kömür yakıtlı termik santrallerle karşılaştırıldığında PV sistemlerin şebeke entegrasyonu sonrası emisyon etkisi daha düşük düzeydedir.

PV sistemlerde Kategori 5 kapsamındaki şebeke kaynaklı dolaylı emisyonlar düşük olmakla birlikte, şebeke modernizasyonu, kayıp-kaçak oranlarının azaltılması ve yenilenebilir payının artırılması ile bu etkiler daha da minimize edilebilir. Böylece PV sistemleri yalnızca üretim sürecinde değil, tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilir bir enerji çözümü sunmaktadır.

Çizelge 4.1. Kategori 5 Satış emisyonları

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF Birim	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 5	Elektrik Satışı	Satılan Elektrik*	1	MWh	Yok	0,626	Kg CO ₂ e/ MWh	-	-	0,626	-	-	0,6261

4.3.5. PV GES Toplam Emisyon Miktarları

Bu bölümde, fotovoltaik (PV) güneş enerji santraline ait tüm emisyon kategorilerinin toplam değerlendirilmesi sunulmaktadır. Analiz, PV sistemin yaşam döngüsünün kuruluma kadar olan aşamalarını ve şebeke entegrasyonu sonrasındaki dolaylı etkilerini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

PV santralinin 1 MWh kurulum kapasitesi üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda, dört ana kategori kapsamında elde edilen toplam emisyon miktarı 167,67 ton CO₂-eşdeğeri olarak belirlenmiştir.

Bu toplam değer; kurulum, taşımacılık, iş makinesi kullanımı ve şebeke entegrasyonu süreçlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı emisyonların bütünüdür.

temsil etmektedir.

Emisyon dağılımına bakıldığında, Kategori 2 (Kurulum Sürecinde Tüketilen Elektrik) en yüksek payı oluşturmakta (%79), onu Kategori 1 (İş Makineleri Yakıt Tüketimi) izlemektedir (%18). Buna karşılık Kategori 3 (Taşımacılık) ve Kategori 5 (Şebeke Entegrasyonu) oldukça düşük oranlarda katkı sağlamaktadır.

Bu durum, PV sistemlerin emisyon yoğunluğunun işletme sırasında değil, kurulum sürecindeki enerji tüketimine bağlı olduğunu göstermektedir.

Dolayısıyla, elektrik tüketiminin azaltılması, montaj süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir kaynaklı elektrik kullanımı, PV sistemlerin toplam emisyon değerlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir.

Aşağıdaki tablo, PV GES'in dört ana kategoriye göre emisyon dağılımını ton CO₂-eşdeğeri (tCO₂-eq) cinsinden göstermektedir. Grafik, PV santralinin karbon profiline dair genel bir bakış sunmakta ve emisyonların hangi süreçlerde yoğunlaştığını görsel olarak ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1. PV GES toplam emisyon hesaplama tablosu

Kapsam	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	NKD TJ/t	EF CO ₂	EF BİRİM	CH ₄ EF (kg/TJ)	N ₂ O EF (kg/TJ)	TCO ₂	TCH ₄	TN ₂ O	Toplam Emisyon Miktarı TCO ₂ -eq
KATEGORİ 3	PV Taşınması	Ağır Vasıtalar	24.773	Ton *km	-	0,1782	Kg CO ₂ e/ ton*km	-	-	4,41	-	-	4,41
KATEGORİ 2	PV Kurulumunda tüketilecek elektrik	Elektrik (kWh)	300.000	kWh	Yok	0,442	Kg CO ₂ e/ MWh	-	-	132,6	-	-	132,6
KATEGORİ 1	Kurulum sırasında harcanan	İş Makinası	8,45	Ton	0,0433	74100	EF (kg CO ₂ /TJ)	4,15	28,6	27	0,0015	0,01	30,03
KATEGORİ 5	Elektrik Satışı	Satılan Elektrik*	1	MWh	Yok	0,626	Kg CO ₂ e/ MWh	-	-	0,626	-	-	0,6261
TOTAL													167,67

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, kömür yakıtlı termik santraller ile fotovoltaik (PV) güneş enerji santrallerinin karbon emisyonları açısından gösterdiği temel farklılıkları açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bulguların değerlendirilmesi sonucunda, iki enerji üretim teknolojisinin hem doğrudan hem de dolaylı emisyon profilleri bakımından belirgin biçimde ayrıştığı görülmüştür.

Kömür yakıtlı termik santrallerde emisyonların yaklaşık %98'inin doğrudan yanma sürecinden kaynaklanması, bu sistemlerin karbon yoğun yapısını ve çevresel sürdürülebilirlik açısından dezavantajlı konumunu doğrulamaktadır. Linyit gibi düşük kalorifik değere sahip yakıtların kullanımı, aynı miktarda elektrik üretimi için daha fazla yakıt tüketimine neden olmakta, bu da CO₂ salımını doğrudan artırmaktadır. Ayrıca, kömürün çıkarılması, taşınması ve işlenmesi süreçlerinde ortaya çıkan dolaylı emisyonlar toplam değer içinde küçük bir paya sahip olsa da, enerji arz zincirinin genel karbon yoğunluğuna katkı sağlamaktadır. Bu sonuçlar, kömür bazlı enerji üretiminde yalnızca yakma aşamasına değil, tüm tedarik ve hazırlık süreçlerine yönelik verimlilik iyileştirmelerinin önemini göstermektedir.

PV güneş enerji santralleri için yapılan hesaplamalarda ise, toplam emisyon miktarının büyük oranda kurulum aşamasında gerçekleştiği, işletme aşamasında ise neredeyse sıfır doğrudan emisyon ortaya çıktığı belirlenmiştir. Kategori 2 (kurulumda tüketilen elektrik) ve Kategori 1 (iş makineleri kaynaklı doğrudan emisyonlar) PV sistemlerde toplam emisyonların yaklaşık %97'sini oluşturmaktadır. Ancak bu emisyonlar, yalnızca inşaat döneminde ortaya çıkan geçici değerlerdir. İşletme sürecinde, PV santralleri fosil yakıt kullanmadığından, karbon salımı devamlılık göstermez. Bu durum, PV sistemlerin yaşam döngüsü boyunca kömüre göre çok daha düşük karbon ayak izine sahip olmasını sağlamaktadır.

Her iki sistemin karşılaştırmalı analizi, yenilenebilir enerji teknolojilerinin iklim değişikliğiyle mücadeledeki stratejik rolünü desteklemektedir. 1 MWh enerji üretimi bazında yapılan hesaplamalarda, PV santrallerin toplam sera gazı emisyonlarının kömür santrallerine göre yaklaşık %85 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Bu fark, yalnızca doğrudan emisyonlardan değil, aynı zamanda tedarik zinciri ve enerji kullanım süreçlerindeki yapısal farklılıklardan da kaynaklanmaktadır.

Tartışma kapsamında ayrıca, enerji sistemlerinin uzun vadeli çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Kömür bazlı üretim; yüksek SO₂, NO_x ve partikül madde

salımları nedeniyle hava kalitesini olumsuz etkilerken, PV sistemlerde bu tür yanma kaynaklı kirleticiler bulunmamaktadır. Aynı şekilde, kömür madenciliği ve kül depolama süreçleri; toprak, su ve ekosistem bütünlüğü açısından önemli çevresel yükler yaratmaktadır. Buna karşılık, PV sistemlerin arazi kullanımı sınırlı olup, işletme döneminde su tüketimi neredeyse sıfır düzeyindedir.

Bu bulgular, Türkiye'nin enerji politikaları açısından değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji yatırımlarının yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik açısından da kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Ülkenin yüksek güneşlenme potansiyeli dikkate alındığında, PV sistemlerin yaygınlaştırılması enerji arz güvenliği, karbon nötrlüğü ve yeşil dönüşüm hedefleriyle tam uyum içindedir.

Kömür yakıtlı termik santraller yüksek enerji kapasitesi sunmasına rağmen, sürdürülebilir enerji sistemlerinin gerektirdiği düşük karbon yoğunluğuna ulaşmada yetersiz kalmaktadır. PV güneş enerji sistemleri ise gerek emisyon azaltımı gerekse uzun vadeli çevresel performans açısından, Türkiye'nin enerji dönüşümünde en güçlü alternatiflerden biri olarak öne çıkmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, kömür yakıtlı termik santraller ve PV güneş enerji santralleri arasındaki emisyon değerleri, enerji üretim süreçleri ve çevresel etkiler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler IPCC (2006), DEFRA (2023), Ecoinvent (2022), TEİAŞ (2023) ve Türkiye'nin güncel enerji verileri temel alınarak yapılmıştır. Çalışma, 2024 yılı için 1 MWh kapasiteli örnek tesisler üzerinden karşılaştırma yapmayı hedeflemiş ve elde edilen bulgular iki enerji kaynağı arasındaki çevresel farklılıkları açıkça ortaya koymuştur.

Çizelge 6.1. Kömür yakıtlı termik santral emisyon tablosu

Kategori	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	EF CO ₂	EF Birim	Toplam Emisyon (tCO ₂ -eq)
Kategori 3	Linyit Taşınma Süreci	Ağır Vasıtalar	15,0	ton*km	0,1782	kg CO ₂ -e/ton*km	0,0027
Kategori 2	Linyitin Kırılması ve Öğütülmesi	Elektrik (kWh)	41.800	kWh	0,442	kg CO ₂ -e/MWh	18,48
Kategori 1	Linyit Yanma Süreci	Kazanda Yakılan Kömür	1,5	ton	101000	kg CO ₂ /TJ	1.201,9
Kategori 5	Elektrik Satışı	Satılan Elektrik	1,0	MWh	1,188	kg CO ₂ -e/MWh	1,188
TOPLAM							1.221,5

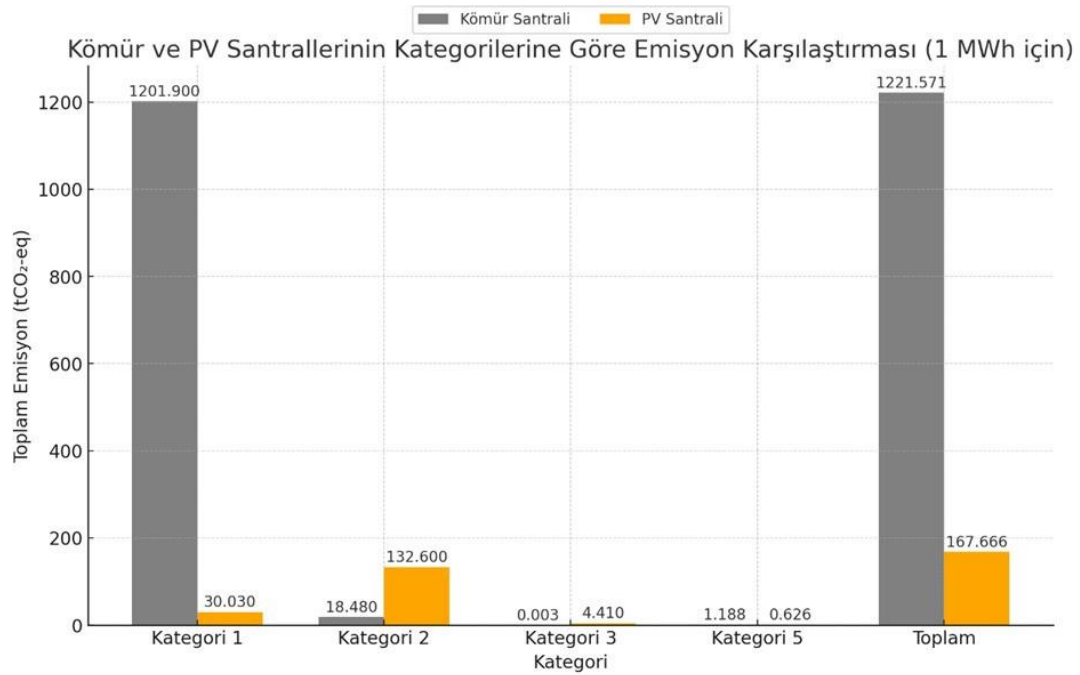
Kömür santralinde emisyonların %98'den fazlası doğrudan yanma sürecinden (Kategori 1) kaynaklanmaktadır. Bu durum, kömürün karbon yoğunluğunu ve çevresel sürdürülemezliğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Lojistik, kırma-öğütme ve satış kaynaklı emisyonlar düşük seviyede kalsa da toplam emisyon değerlerini artırmaktadır.

Çizelge 6.2. PV Güneş enerji santrali emisyon özeti

Kategori	Faaliyet	Emisyon Kaynakları	FV	FV Birim	EF CO ₂	EF Birim	Toplam Emisyon (tCO ₂ -eq)
Kategori 3	PV Taşınması	Ağır Vasıtalar	24.773	ton*km	0,1782	kg CO ₂ e/ ton*km	4,41
Kategori 2	Kurulum Elektrik Tüketimi	Elektrik (kWh)	300.000	kWh	0,442	kg CO ₂ e/ MWh	132,6
Kategori 1	Kurulum İş Makineleri	Dizel Yakıt	8,45	ton	74100	kg CO ₂ /TJ	30,03
Kategori 5	Elektrik Satışı	Satılan Elektrik	1,0	MWh	0,626	kg CO ₂ e/ MWh	0,626
TOPLAM							167,67

PV santrallerinde toplam emisyonların büyük kısmı kurulum aşamasındaki elektrik tüketimi ve iş makinelerinden kaynaklanmaktadır. Buna rağmen, işletme aşamasında neredeyse sıfır doğrudan emisyon üretilmekte ve toplam emisyon değerleri kömüre kıyasla yaklaşık %85 daha düşüktür. Bu sonuç, PV sistemlerinin uzun vadede sürdürülebilir enerji üretimi için avantajlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.3. Kategori bazında emisyon karşılaştırması



Çizelge 6.4. Emisyon karşılaştırması

Kategori	Kömür Santrali (tCO ₂ -eq)	PV Santrali (tCO ₂ -eq)
Kategori 1	1201.900	30.030
Kategori 2	18.480	132.600
Kategori 3	0.003	4.410
Kategori 5	1.188	0.626
Toplam	1221.571	167.666

6.1. Genel Değerlendirme

Kömür ve PV santrallerinin emisyon değerleri karşılaştırması, enerji politikaları için kritik sonuçlar ortaya koymaktadır. Kömür santralleri yüksek enerji kapasitesine sahip olsa da, doğrudan yanma emisyonlarının baskınlığı (%98) sistemin sürdürülemezliğini kanıtlamaktadır. Buna karşılık, PV santralleri kurulum sürecinde emisyon üretse de, işletme aşamasında neredeyse sıfır doğrudan emisyon ile çalışarak uzun vadede karbon nötr hedefler için stratejik bir alternatif sunmaktadır. Türkiye'nin yüksek güneşlenme potansiyeli dikkate alındığında, PV yatırımları karbon azaltımında ve sürdürülebilir kalkınmada önemli bir rol üstlenecektir.

PV güneş enerji sistemleri, yalnızca karbon salınımı açısından değil, genel çevresel etkiler bakımından da linyit kömürüne göre belirgin üstünlükler sunmaktadır. Linyit yakıtlı termik santraller, yüksek kül oranı, partikül madde (PM₁₀ ve PM_{2.5}), kükürt dioksit (SO₂) ve azot oksit (NO_x) salımları nedeniyle hava kalitesini olumsuz etkilerken, PV sistemlerde bu tür yanma kaynaklı kirleticiler bulunmamaktadır. Ayrıca kömür madenciliği; habitat tahribatı, toprak erozyonu ve yeraltı suyu kirlenmesi gibi uzun vadeli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Buna karşılık PV panellerin kurulumunda arazi kullanımı sınırlı olup, işletme aşamasında su tüketimi neredeyse sıfırdır—bu da Türkiye'nin kurak ve yarı kurak bölgelerinde ciddi bir avantaj sağlamaktadır. Güneş enerjisi teknolojileri ayrıca sessiz çalışmaları, atık oluşumunun düşük olması ve panel ömürleri sonunda geri dönüştürülebilir potansiyelleriyle çevresel sürdürülebilirlik açısından kömür santrallerine göre çok daha düşük ekolojik ayak izi bırakmaktadır. Dolayısıyla, PV sistemleri yalnızca karbon azaltımı açısından değil, ekosistem bütünlüğü, hava kalitesi ve doğal kaynakların korunması açısından da enerji geçişinin en çevreci alternatifi olarak değerlendirilebilir.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Türkiye'nin enerji dönüşüm politikaları açısından kömür yakıtlı termik santrallerden yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, ulusal düzeyde karbon emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir enerji üretimini teşvik etmek için aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

Yenilenebilir Enerji Payının Artırılması; enerji üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması amacıyla, ulusal enerji portföyünde güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların payı artırılmalıdır. Bu, hem karbon emisyonlarının düşürülmesine hem de enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Kömür Santrallerinde Karbon Yakalama Teknolojilerinin Uygulanması; mevcut termik santrallerin kısa vadede kapatılması mümkün olmadığından, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin devreye alınması tesislerin çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltabilir.

PV Teknolojilerinde Yerli Üretim ve Ar-Ge Teşvikleri; güneş paneli üretiminde yerli teknoloji kullanımının artırılması hem tedarik zinciri emisyonlarını azaltacak hem de ekonomik sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır. Devlet destekli Ar-Ge projeleri, panel verimliliğinin yükseltilmesine ve üretim süreçlerinin daha düşük karbonlu hale getirilmesine öncülük edebilir.

Enerji Verimliliği ve Elektrik Şebekesi Entegrasyonu; güneş enerjisi üretiminin yaygınlaşmasıyla birlikte, elektrik şebekesinin akıllı sistemlerle desteklenmesi gerekmektedir. Enerji depolama teknolojilerinin entegrasyonu, şebeke kayıplarının azaltılmasına ve sistem verimliliğinin artırılmasına olanak tanır.

Yaşam Döngüsü Perspektifinin Enerji Politikalarına Entegrasyonu; yeni enerji yatırımlarında yalnızca üretim aşamasındaki emisyonlar değil, tüm yaşam döngüsü (üretim, kurulum, işletme ve bertaraf) dikkate alınmalıdır. Böylece enerji projeleri çevresel etkileri açısından daha bütüncül bir şekilde değerlendirilebilir.

Kamu Farkındalığı ve Eğitim Programları; toplumun yenilenebilir enerji farkındalığını artırmak amacıyla, üniversiteler, belediyeler ve özel sektör iş birliğiyle eğitim ve bilgilendirme programları düzenlenmelidir. Bu, güneş enerjisi yatırımlarına yönelik sosyal kabulün artmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında yapılan karşılaştırmalar göstermektedir ki,

PV güneş enerji santralleri yalnızca karbon emisyonlarının azaltılması açısından değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik bakımından da kömür yakıtlı termik santrallere kıyasla çok daha avantajlıdır. Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşabilmesi için, bu tür bilimsel analizlerin politika geliştirme süreçlerinde temel referans olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- International Energy Agency, I. (2023). Coal 2023 - Analysis and forecast to 2026. www.iea.org
- Alola, A. A., & Donve, U. T. (2021). Environmental implication of coal and oil energy utilization in Turkey: is the EKC hypothesis related to energy? *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 32(3), 543–559. <https://doi.org/10.1108/MEQ-10-2020-0220/FULL/XML>
- Arcos-Vargas, Á., & Riviere, L. (2019). Grid Parity and Carbon Footprint. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06064-0>
- Bayazit, Y., Şeyh Edebalı Üniversitesi, B., & Mühendisliği Bölümü, İ. (2021). Hidroelektrik ve Termik Santrallerin Karbon Emisyonu Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması: Eskişehir İli Örneği. *BEU Journal of Science*, 10(2), 442–452.
- Büzkan, İ. (1987). Kömür Petrografisi Teknikleri ve Endüstriyel uygulamaları The Techniques and Industrial Applications of Coal Petrography. *Dergipark*, xxvi(4), 32–39.
- Çeştepe, H., Güdenoğlu, A. G. E., & Damla, A. G. (2018). Siyaset, Ekonomi Ve Yönetim Araştırmaları Dergisi The Relationship between Coal Consumption, Income Level and CO2 Emissions in Turkey. *Economics and Management*, 6(Nisan), 75–85. <https://doi.org/10.25272/j.2147-7035.2018.6.2.06>
- Çetin, B., & Avcı, H. (2020). Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 1027–1045. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.418417>
- Demirpolat, H. K. (2022). Termik Santral Kaynaklı Çevre Kirliliğini Önlemek İçin Baca Gazı Arıtma Teknolojisi: Örnek Çalışma Seyitömer Termik Santrali Uygulaması. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 34, 645–651. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1084072>
- Department for Environment, Food and Rural Affairs [DEFRA] & Department for Energy Security and Net Zero [DESNZ]. (2023). UK government greenhouse gas conversion factors for company reporting: Methodology paper for emission factors. London, United Kingdom: UK Government. <https://www.gov.uk/government/collections/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors>
- Dulkadiroğlu, H., Mühendisliği Bölümü, Ç., Fakültesi, M.-M., Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, N., & Geliş, T. (2018a). Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 7(1), 67–74. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.369948>
- Dulkadiroğlu, H., Mühendisliği Bölümü, Ç., Fakültesi, M.-M., Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, N., & Geliş, T. (2018b). Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 7(1), 67–74. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.369948>

- Durmaz, Tunç. (2019). Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş Ve Bu Geçişte Karbon Yakalama Ve Depolamanın Rolü. *Economy&Politics Special Issue*, 205–224. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/909118>
- Ecoinvent Association. (2022). ecoinvent database (Version 3.9): Life cycle inventory data for environmental assessments [Database]. Zürich, Switzerland: Ecoinvent Association. <https://www.ecoinvent.org>
- Enerji Atlası. (2013). Enerji atlası: Türkiye enerji santralleri ve üretim haritası. <https://www.enerjiatlası.com>
- Enerji Rehberi. (2024, July 18). Güneş enerjisi santrallerinin çevresel etkileri. <https://enerjirehberi.com.tr/2024/07/18/gunes-enerjisi-santrallerinin-cevresel-etkileri/>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB]. (2022). Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bilgi formu (ETKB-EVÇED-FRM-042 Rev.01). Ankara,Türkiye:ETKB.https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Faaliyet_Raporlari/2022/ETKB2022FR.pdf
- European Commission, Joint Research Centre [JRC]. (2020). Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems (PV) (EUR 30027 EN). Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu>
- European Environment Agency [EEA]. (2024). Trends and projections in Europe 2024. Copenhagen, Denmark: EEA. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2024>
- European Environment Agency [EEA]. (n.d.). Trends and projections in Europe 2024. Retrieved January 6, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2024>
- European Investment Bank [EIB]. (2010). Popua Power Plant—Environmental Impact Assessment (EIA): Pipeline document [Project document]. Luxembourg, Luxembourg: European Investment Bank. <https://www.eib.org>
- Gómez, D. R., *et al.* (2006). **Chapter 2: Stationary combustion**. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 2: Energy, pp. 9–47). Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- Global Energy Monitor. (2024). The OECD’s last coal plant proposals. San Francisco, CA: Global Energy Monitor. <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2024/12/GEM-OECD-coal-plants-Q32024-Dec-2024.pdf>
- Green, D., & Vallee, B. (2024). Measurement and Effects of Bank Exit Policies *.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). Climate change 2021: The physical science basis (Annex 7: Global warming potentials). Cambridge,

United Kingdom: Cambridge University Press.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- International Energy Agency [IEA]. (2023). World energy outlook 2023. Paris, France: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Energy Agency [IEA]. (2024). World energy outlook 2024. Paris, France: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- Kalyon PV. (2023). M10-144 glass-backsheet monofacial half-cut framed module [Datasheet]. Ankara, Türkiye: Kalyon PV. <https://kalyonpv.com/>
- Kincay, O., & Ozturk, R. (2003). Thermal power plants in Turkey. *Energy Sources*, 25(2), 135–151. <https://doi.org/10.1080/00908310390142190>
- Kurnuç, S., & Çerçi, M. (2022). IPCC Tier 1 ve DEFRA metotları ile karbon ayak izinin belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nin yakıt ve elektrik tüketimi örneği. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 26(3), 386–397. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1061021>
- National Renewable Energy Laboratory [NREL]. (2024). An updated life cycle assessment of utility-scale solar. Golden, CO: U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.nrel.gov>
- Özden, B. (2017). Yatağan termik santrali emisyon kontrol sistemi boyunca doğal radyonüklid zenginleşmesi. *Sakarya University Journal Of Science*, 1434–1440. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.298662>
- ÖZENÇ Bengisu, A. G. (2024). Adıl Dönüşüm Ve Bölgesel İstihdam: Türkiye İçin Politik Seçenekleri. 5–124. www.shura.org.tr
- Pamponet, M. C., Maranduba, H. L., de Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2022). Energy balance and carbon footprint of very large-scale photovoltaic power plant. *International Journal of Energy Research*, 46(5), 6901–6918. <https://doi.org/10.1002/ER.7529>
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. (2022). Raporlar. <https://shura.org.tr/raporlar/page/2/>
- Şensöğüt, C., Ören, Ö., & Kasap, Y. (2019). Garp Linyitleri İşletmesinde Son Yıllarda Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi. *Dergipark*, 1–7. www.gli.g
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Sera gazı emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanmasına (MRV) ilişkin rehber ve uygulama esasları. Ankara, Türkiye: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://iklim.cevre.gov.tr>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı [EVÇED]. (2024). Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bilgi formu (ETKB-EVÇED-FRM-042 Rev.01). Ankara, Türkiye: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr>
- Taşkesen, E., Alahmad, H., & Bilen, E. N. (2023). Geleceğin Enerji Depolama

- Teknolojileri, Sürdürülebilirlik Ve Enerji Dönüşümü. Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery <https://Dergipark.Org.Tr/Tr/Pub/Muhendismakina>, 7–21. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1260357>
- TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi [TOBB ETÜ]. (2017). GHG Protocol faaliyet sınırları şeması [Eğitim materyali/şema]. Ankara, Türkiye: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi. (Unpublished educational material)
- TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi [TOBB ETÜ]. (2017). TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi karbon ayak izi raporu 2017. Ankara, Türkiye: TOBB ETÜ. <https://tto.etu.edu.tr>
- Tokgöz, N. (2010). Numerical Analysis of Worldwide CO2 Emissions and Effects on Atmospheric Warming in Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(8), 769–783. <https://doi.org/10.1080/15567030802606137>
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (2022). Enerji hesapları 2022. Ankara, Türkiye: TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Enerji-Hesapları-2022-53654>
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (2022). Türkiye istatistikleri 2022. Ankara, Türkiye: TÜİK.
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (n.d.). Sera gazı emisyon istatistikleri, 1990–2022. Retrieved January 4, 2025, from <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701>
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (n.d.). Sera gazı emisyon istatistikleri, 1990–2022. Retrieved January 5, 2025, from <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701>
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (n.d.). GHG emission factors hub. Retrieved January 6, 2025, from <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>
- United States Environmental Protection Agency [EPA], Center for Corporate Climate Leadership. (2023). Greenhouse gas inventory guidance: Indirect emissions from purchased electricity (Scope 2). Washington, DC: U.S. EPA. <https://www.epa.gov/climateleadership/greenhouse-gas-inventory-guidance>
- Vardar, S., Demirel, B., & Onay, T. T. (2022). Impacts of coal-fired power plants for energy generation on environment and future implications of energy policy for Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(27), 40302–40318. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-19786-8/METRICS>
- Vitta, S. (2021). Environmental impact of terwatt scale Si-photovoltaics. <https://arxiv.org/abs/2105.13713v1>
- World Resources Institute [WRI] & World Business Council for Sustainable Development [WBCSD]. (2015). The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard (revised edition). Washington, DC: WRI and WBCSD. <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>

Xiang, Y., Guo, Y., Wu, G., Liu, J., Sun, W., Lei, Y., & Zeng, P. (2022). Low-carbon economic planning of integrated electricity-gas energy systems. *Energy*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123755>

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

İsim Soyisim : AHMET GÖK
Doğum Tarihi : 1983-02-21
Doğum Yeri : ANDIRIN
Telefon : 05321773240
E-Posta : ahmet.gok.00@gmail.com

T.C
YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
ULUSAL TEZ MERKEZİ

TEZ VERİ GİRİŞ FORMU

[Ljava.lang.String;@74fd0187

Referans No	10768009
Yazar Adı / Soyadı	AHMET GÖK
Orcid	0009-0000-9714-7102
T.C.Kimlik No	32582113342
Telefon	5321773240
E-Posta	ahmet.gok.00@gmail.com
Tezin Dili	Türkçe
Tezin Özgün Adı	KARBON EMİSYONU AÇISINDAN KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLER İLE PV GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN KARŞILAŞTIRILMASI
Tezin Tercümesi	COMPARISON OF COAL-FIRED THERMAL POWER PLANTS AND PV SOLAR POWER PLANTS IN TERMS OF CARBON EMISSIONS
Konu	Makine Mühendisliği = Mechanical Engineering
Üniversite	Harran Üniversitesi
Enstitü / Hastane	Fen Bilimleri Enstitüsü
Ana Bilim Dalı	Makine Ana Bilim Dalı
Bilim Dalı	Makine Bilim Dalı
Tez Türü	Yüksek Lisans
Yılı	2025
Sayfa	81
Tez Danışmanları	DOÇ. DR. CUMA ÇETİNER
Dizin Terimleri	
Önerilen Dizin Terimleri	PV, Kömür Santrali, Emisyon, Sürdürülebilir Enerji, Karbon Ayak İzi

03.12.2025

İmza:.....