
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ELEKTRİK ÜRETİMİNDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE KARŞI SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMLARI

Sercan KÖÇER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE BİLİMLERİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sercan KÖÇER

08/01/2024

ELEKTRİK ÜRETİMİNDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE KARŞI SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMLARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Sercan KÖÇER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Günümüzde daha sık ifade edilen sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği kavramları, yalnızca iş yaşamında yer alan profesyoneller için değil, günlük rutinde hayatını devam ettirmekte olan kişiler için de dikkat çekici konular haline gelmeye başlamıştır. Bu kapsamda sürdürülebilirlik yaklaşımlarının temel ayaklarından olan çevre konusunda da, iklim değişikliği ve bu hususu tetikleyen karbon salımı ile ilgili olarak uluslararası topluluklar ve ülkeler nezdinde durum tespitleri yapılarak, küresel ölçekte meydana gelen olumsuz etkilerin giderilmesine yönelik faaliyetler artmaya devam etmektedir. İklim değişikliğinin temel gerekçelerinden olan karbon salımının azaltılması ve sıfırlanmasına yönelik olarak başta enerji sektörü olmak üzere, enerji yoğun ve salım potansiyeli yüksek sektörlerde, karbonsuzlaştırma yolunda gerçekleştirilebilecek çalışmalara hız verilmiştir. Enerji sektörü oldukça büyük bir kümeyi kapsamaktadır. Bu sebeple elektrik enerjisi üretimi özelinde, sektörün iklim değişikliği üzerine etkisinin tanımlanması ve bu doğrultuda karbonsuzlaştırma için gerçekleştirdiği çalışmalar ile, iklim değişikliğine karşı ele aldıkları uygulama, eylem ve yaklaşımlar araştırılarak bir araya getirilmiştir. Elde edilen bu bilgiler, konu özelinde sonraki dönemlerde gerçekleştirilecek araştırmalar için de kaynak oluşturacaktır.

Bilim Kodu	:	90313
Anahtar Kelimeler	:	Elektrik, enerji, sürdürülebilirlik, iklim değişikliği, sera gazları, dekarbonizasyon
Sayfa Adedi	:	98
Danışman	:	Doç. Dr. Gülbin FERİDUN

SUSTAINABILITY APPROACHES OF ELECTRICITY GENERATION AGAINST CLIMATE CHANGE

(M. Sc. Thesis)

Sercan KÖÇER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

The concepts of sustainability and climate change, which are more frequently expressed today, have begun to become remarkable issues not only for professionals in business life, but also for people who continue their lives in their daily routine. In this context, with regard to the environment, which is one of the main pillars of sustainability approaches, activities to eliminate the negative impacts on a global scale continue to increase by making due diligence in the presence of international communities and countries regarding climate change and the carbon emission that triggers this issue. In order to reduce and zero carbon emissions, which is one of the main reasons for climate change, efforts to be carried out towards decarbonization have been accelerated in energy-intensive and high-emission potential sectors, especially in the energy sector. The energy sector covers a fairly large cluster. For this reason, in particular, the effects of the electricity generation on climate change and the studies it has carried out for decarbonization in this direction, and the practices, actions and approaches they have taken against climate change have been researched and brought together. This information obtained will also be a source for researches to be carried out in the next periods.

Science Code	:	90313
Key Words	:	Electricity, energy, sustainability, climate change, greenhouse gases, decarbonisation
Page Number	:	98
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Gülbin FERİDUN

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında anlayışını ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, değerli vaktini ayıran tez danışman hocam; Sayın Doç. Dr. Gülbin FERİDUN'a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde ve eğitim hayatım boyunca bana en büyük desteği veren aileme ve kıymetli dostlarıma fedakârlıklarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ 5

2.1. Sürdürülebilirlik Kavramı 5

2.1.1. Kavramın tanım ve tarihi 5

2.1.2. Sürdürülebilirliğe uluslararası yaklaşımlar 6

2.2. Çevresel Sürdürülebilirlik 11

2.2.1. Sudaki yaşam 12

2.2.2. Karasal yaşam 13

3. ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ 15

3.1. Sera Gazları ve İklim Değişikliği Üzerine Etkileri 19

3.2. İklim Değişikliğine Dair Projeksiyonlar 21

3.2.1. IEA GEC modelleri 22

3.2.2. IPCC RCP senaryoları 24

4. ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ 29

4.1. Sektör Bilgisi 29

4.1.1. Türkiye’de mevcut durum 29

Sayfa

4.1.2. Dünyada mevcut durum 32
4.2. Elektrik Üretiminin İklim Etkisi 34
4.2.1. İklim değişikliği etkisinde elektrik enerjisi üretimi 37
5. KARBONSUZLAŞTIRMA 41
5.1. Karbonsuzlaştırmanın Gerekliliği 41
5.2. Karbonsuzlaştırma Yöntemleri 44
5.2.1. İklim değişikliği etkisinde elektrik enerjisi üretimi 44
5.2.2. Alternatif enerji yatırımları 53
5.2.3. Karbon yakalama ve değerlendirme teknolojileri 58
5.3. Günümüzde Karbonsuzlaştırma Yöntemlerinin Kullanımı 64
6. BULGU VE TARTIŞMA 67
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR 75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Stokholm Deklerasyonu İlkeleri ve İlkelere Bağlı İfadelerin Özü 7

Çizelge 2.2. Sürdürülebilirlik Düşüncesinin Uluslararası Gelişimi 11

Çizelge 3.1. AB Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlaması Direktifi'ne Göre İfade Edilmesi Beklenen Çevresel, Sosyal ve Yönetişim Hususları 16

Çizelge 3.2. IEA GEC modellemelerinde yer alan senaryoların tanımları ve senaryo sonucunda beklenen hedefler 23

Çizelge 4.1. Türkiye'de üretilen toplam elektrik miktarının kaynaklara göre dağılımı.. 29

Çizelge 4.2. Türkiye'de toplam elektrik üretimi kurulu gücü ve kaynaklara göre dağılımı (2022) 30

Çizelge 5.1. IPCC AR6 raporuna göre ortalama sıcaklık artışlarının farklı kademelerdeki etkileri..... 43

Çizelge 5.2. Bazı CO_2 yakalama teknikleri..... 62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma İlkeleri 10

Şekil 2.2. Kuzey Pasifik'te CO_2'nin zamana göre atmosfer ve okyanustaki miktarı 13

Şekil 3.1. Sürdürülebilir Kalkınma ve bileşenleri..... 15

Şekil 3.2. BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Madde 13: İklim Eylemi ve alt amaçları 18

Şekil 3.3. Yıllara göre CO_{2e} cinsinden sera gazı salımı (Dünya) 20

Şekil 3.4. Yıllara göre atmosferdeki sera gazı konsantrasyonları..... 20

Şekil 3.5. Yıllara göre küresel yüzey sıcaklığındaki artış miktarı 21

Şekil 4.1. Kurulu güç bakımından kaynakların yıllar içindeki görünümü..... 32

Şekil 4.2. Yıllar içinde brüt elektrik üretimi (Dünya)..... 33

Şekil 4.3. OECD ülkelerinde kaynaklara göre elektrik üretiminin yıllar içindeki gelişimi 34

Şekil 4.4. 1965'ten günümüze fosil yakıt kullanımının değişimi 35

Şekil 4.5. Petrol türevleri, gaz ve kömürden elektrik üretim miktarları (1990-2022 yılı)..... 36

Şekil 4.6. Sera gazı salımlarının sektörlere göre dağılımı (yıllar içindeki gelişimi) 36

Şekil 4.7. Sektörlere göre CO_2 salımı (1990-2019) 37

Şekil 4.8. Bir termik santralin temel elemanları ve suyun kullanıldığı noktalar 39

Şekil 5.1. 1961-1990 ortalamasına göre ortalama sıcaklık anomalisi 41

Şekil 5.2. Güneş enerjisinin toplam küresel elektrik üretimindeki payı 45

Şekil 5.3. Farklı fotovoltaik hücrelere ait dönüşüm faktörlerinin yıllar içinde değişimi 46

Şekil 5.4. IEA'ya göre kaynak türüne göre elektrik enerjisi üretimi öngörüleri 47

Şekil 5.5. Güneş enerjisi kaynaklı doğrudan ya da dolaylı toplam salınan emisyon 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.6. Rüzgar enerjisinin toplam küresel elektrik üretimindeki payı..... 48

Şekil 5.7. Rüzgar enerjisi kaynaklı doğrudan ya da dolaylı toplam salınan emisyon 49

Şekil 5.8. Dünya'da bölgelelere göre hidroelektrik santral yaşları..... 51

Şekil 5.9. Renk kodlarına göre Hidrojen türleri..... 55

Şekil 5.10. Hidrojen türlerinin üretim metodlarının şematik anlatımı..... 56

Şekil 5.11. Rüzgar ve güneş temelli hibrit sistemlerle hidrojen üretim maliyet öngörüsü..... 58

Şekil 5.12. Karbon Yakalama ve Kullanma Süreçlerine Ait Değer Zinciri Gösterimi... 61

Şekil 5.13. Karbondioksitin kullanım alanları 63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
W	Vat
kW	Kilovat
MW	Megavat
GW	Gigavat
kWh	Kilovatsaat
MWh	Megavatsaat
GWh	Gigavatsaat
TWh	Teravatsaat
kg	Kilogram
Gt	Gigaton
gr	Gram
ppm	Milyonda bir birim
sn	Saniye
sa	Saat
m2	Metrekare
CO_{2e}	Karbondioksit eşdeğeri
GtC	Gigaton karbon
^{o}C	Derece santigrat
dB	Desibel
%	Yüzde

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AB	Açıklamalar bir satırdan uzun olmamalıdır
AR6	IPCC 6. Değerlendirme Raporu
BM	Birleşmiş Milletler

BP	British Petroleum
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama
CCUS	Karbon Yakalama, Değerlendirme ve Depolama
ÇSY	Çevre, Sosyal ve Yönetişim
GEC	Küresel Enerji ve İklim Modeli
GHG	Seragazı
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
NDC	Ulusal Katkı Beyanı
OECD	Ekonomik Kakınma ve İş Birliği Örgütü
PV	Fotovoltaik
RCP	Temsili Konsantrasyon Yolu
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNSDG	BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü
yy.	Yüzyıl
$	Amerika Birleşik Devletleri Doları

1. GİRİŞ

Endüstrileşme, nüfus ve tüketim oranlarının artışı ile birlikte sürdürülebilirlik kavramı çok fazla önem kazanmıştır. Sürdürülebilirlik ya da sürdürülebilir kalkınma; Bugünün ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılayan kalkınma olarak ifade edilmiştir [1].

Son dönemde çok üzerinde durulmaya başlayan ve pek çok konuyla da ilişkilendirilebilen sürdürülebilirlik kavramı, özellikle sanayi devrimi sonrasında artan hammadde ihtiyacı ve hızla artan dünya nüfusu arasındaki bağıntı ile birlikte değerlendirilmektedir.

İlk olarak 1798 yılında, İngiliz nüfus bilimci ve iktisat teorisyeni olan Thomas Robert Malthus, bu ilişkiyi ifade etmiş ve artan nüfus ihtiyaçlarının ve buna bağlı taleplerin dünya kaynaklarını aşabileceğini belirtmiştir [2]. Sonraki yıllarda, bir düşünce kuruluşu olan Club of Rome da, 1972 yılında yayımladıkları "The Limits of Growth" raporunda, süregelen eğilimlerin değişmemesi halinde insanlığın, büyüme ve gelişme sınırlarına 100 yıl sonrasında ulaşacağı görüşü benimsenmiştir [3].

Sürdürülebilirlik kavramı, bireysel ve küçük toplulukların ele aldığı bir konu olmaktan çıkmış, Birleşmiş Milletler gibi global kuruluşlar ile devlet teşkilatları ve büyük ölçekli sivil toplum kuruluşlarının ele almaya başladığı küresel bir kavram haline gelmiştir [1]. Bu kavram temelde çevre, sosyal ve yönetişim alt dallarından oluşmakla birlikte, kavramın temelinde bu üç ilgi noktası yer almaktadır [4].

Sürdürülebilirlik başlığı altında kısa ve orta vadede küresel ölçekte gerçekleştirilmesi amaçlanan hedefler için, 2015 yılında bir çok ülke lideri ve üst düzey temsilcisinin katılımı ile düzenlenen ve kabul edilen Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (UNSDG) doğrultusunda, biyoçeşitlilik, sucul ve karasal yaşam ortamları, iklim eylemi başlıkları~~;~~ çevresel sürdürülebilirlik hedefleri olarak belirlenmiştir [5].

UNSDG'nin kabulü sonrasında Birleşmiş Milletlere üye ülkelerin çoğunluğu tarafından imzalanan Paris İklim Anlaşması ile, sanayi öncesi dönemlere göre küresel ortalama sıcaklık artışının 1.5 ^{o}C ile sınırlandırılması, iklim eylemi amacının temeli olmuştur. Paris İklim

anlaşması, tüm taraf ülkelere iklim değişikliğine yönelik önlemleri kendi ulusal politikalarına entegre etme hedefi vermektedir [6].

İklim değişikliğine yönelik yapılan çalışmaların temeli, sebep-sonuç ilişkisine dayanmaktadır. Bu bağlamda yapılan bilimsel araştırmalar neticesinde, sera gazları ve bunların salınımının, iklim değişikliğine en fazla etkiyi gerçekleştiren kaynaklar olduğu görülmüştür [7].

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine göre günümüzde yedi ayrı gaz türevi, sera gazı olarak değerlendirilmektedir. Bunların arasında her birinin farklı küresel ısınma potansiyeli olmaklar birlikte, miktar olarak en büyüğü CO_2'dir [8].

World Research Institue tarafından yapılan araştırmada, 2016 verilerine göre enerji sektörünün, toplam küresel sera gazı salımlarının %73,2'sinden sorumlu olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu miktar, rafinasyon gibi diğer enerji faaliyetlerini de kapsar. Yalnızca elektrik enerjisi üretim ve iletimi için bu oran %41,7 olarak hesaplanmıştır. Bunun üzerine elektrik üretimi için kullanılan doğalgaz ve kömür gibi yakıt türevlerinin çıkarılması sırasında salınan dolaylı emisyon miktarının eklenmesiyle oran daha da büyümektedir [9].

Elektrik enerjisi üretiminde temelde yenilenebilir ve konvansiyonel kaynaklar olarak değerlendirilen fosil yakıtların kullanıldığı yöntemlerden yararlanılmaktadır. Fosil yakıt kullanımında ise, mutlak sera gazı emisyonu oluşumuna dair katkı bakımından kömür ve türevleri ile doğalgaz kullanımı ilk sıralarda gelmektedir [10].

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik kavramıyla bağlantılı olarak iklim değişikliğine sebep olan etkenleri, Elektrik Enerjisi Üretim faaliyeti özelinde değerlendirerek durum tespitinin yapılması, ülkemizde ve dünyada enerji sektörünün iklim değişikliğine karşı yaklaşımlarının (fosil yakıtların bırakılması, düşük karbonlu enerji vb.) değerlendirilmesi ve bu kapsamda gerçekleştirilebilecek uygulamaların ele alınması hususları araştırılmıştır. Bu doğrultuda Birleşmiş Milletler, Avrupa Birliği, Avrupa Çevre Ajansı, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı gibi resmi kurum ve kuruluşlar ile, Uluslararası Çevre Ajansı gibi büyük ölçekli örgütlerin önümüzdeki dönem için geliştirdikleri iklim eylemleri ve önerileri incelenmiş ve iklim değişikliği ile buna bağlı olarak karbonsuzlaştırma ve sürdürülebilirlik yaklaşımlarının ülkemiz elektrik enerjisi üretiminde uygulanabilirliği

araştırılmıştır. Buna bağlı olarak, iklim değişikliğine karşı yöntemlerin mevcut koşullar altında uygulanabilirliğine dair öneri ve öngörülerde bulunulmuştur.

2. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

2.1. Sürdürülebilirlik Kavramı

2.1.1. Kavramın tanım ve tarihi

Sürdürülebilirlik kelimesinin temeli Latince korumak, devam ettirmek anlamına gelen "Sustinere"den gelir. Kavramın İngilizce'deki karşılığı "Sustainability"dir [11]. Bu bağlamda ele alındığında sürdürülebilirlik, kelime olarak, devam ettirebilme yeteneği olarak da ifade edilmektedir.

Sürdürülebilirlik kavramı, endüstrileşmenin başladığı 20. yy ile birlikte kullanılmaya başlasa da , ilk uygulamaları çok daha eski dönemlere dayanır. Sürdürülebilirlik yaklaşımlarına örnek olacak, bilinen ilk uygulama, 17. yy sonu ile 18. yy başlarında Almanya sınırlarında yer alan Saksonya'da görülmüştür. Bölgenin temel geçim kaynağı olan madencilik faaliyetlerinin yapılabilmesi için çıkarılan cevherlerin işlenmesinde, yakıt olarak keresteler kullanılmıştır. Madenlerin ihtiyacı için kesilen ormanlar sebebiyle yeterli kereste temini sağlanamaz duruma geldiğinde, daha uzak bölgelerden karşılanmaya çalışılmıştır. Ancak bu durum, sorunun çözümünü ertelemiş ve sonrasında maden işletmelerinin iflasına ve kapanmasına sebep olmuştur [12]. Saksonya'nın madencilik faaliyeti ve bununla ilgili olarak ormanlık alanlardaki azalmanın önüne geçebilmek için, bölgede yaşayan Hans Carl von Carlowitz bir kaç çözüm yolunun uygulanması gerektiğini ifade etmiş ve bunları 1713'te yayımladığı Sylvicultura Oeconomica kitabında yayımlamıştır. Bunlar;

- Kullanılan fırınlar ve binalarda enerji verimliliğini artıracak yalıtımların yapılması,
- Sistematik olarak fidan dikilerek yeniden ormanlaştırmanın yapılması,
- Odun yerine geçebilecek bir malzemenin kullanılması olmuştur [13].

Carlowitz'in, günümüzün modern sürdürülebilirlik yaklaşımında da yer bulan önerilerileri ötesinde, 1972 yılında Roma Klübü tarafından yayımlanan Büyümenin Sınırları (The Limits to Growth) raporunda, mevcut kaynak kullanımı ile ihtiyaçların karşılanmaya devam edilmesi durumunda, limitlere bir asır içinde ulaşılacağı belirtilerek, sürdürülebilirlik kavramına değinilmiştir [3].

1972 yılında İsveç'in başkenti Stocholm'de 'İnsan Çevresi Üzerine Birleşmiş Milletler Konferansında' (United Nations Conference on Human Environment) "Doğal kaynakların korunması", "Dünya'nın yenilenebilir kaynakları üretebilme kapasitesinin devam ettirilmesi" gibi temel sürdürülebilirlik ilkelerine yer verilmiştir. Bu bildiri aynı zamanda Stokholm Deklerasyonu olarak da bilinmektedir [14]. Bu deklerasyonun yayımlanmasıyla, sürdürülebilirlik kavramı, temel prensipleriyle ilk kez bir resmi bildiride yer almıştır.

Sürdürülebilirlik kavramı, bugünkü haline en yakın biçimde ilk olarak, Birleşmiş Milletler tarafından 1987'de yayımlanan Ortak Geleceğimiz (Our Common Future) ya da bilinen diğer adıyla Brundtland Raporu içerisinde ifade edilmiştir. Buna göre, raporda geçen şekliyle sürdürülebilirlik ya da sürdürülebilir kalkınma; *"Bugünün ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılayan kalkınma"* olarak ifade edilmiştir [15]. Bu tanım aynı zamanda Birleşmiş Milletler'in kabul ettiği ve resmi dokümanlarında kullandığı tanım olmuştur [16].

2.1.2. Sürdürülebilirliğe uluslararası yaklaşımlar

Sürdürülebilirlik, tarihi ve gelişiminden de görülebildiği üzere, köken olarak eski bir kavramdır. Bununla birlikte kapsadığı konuların odak noktaları ve bu konuların kendi arasındaki ilişkilerinin ifade edilmesi açısından oldukça yeni bir alandır. Günümüzde temel alınan sürdürülebilirlik yaklaşımının şekillenmesi yıllar içerisinde farklı raporlar, görüşmeler, deklerasyonlar ve konferansların sonucu olarak zaman içerisinde gerçekleşmiştir. Bu sebeple, sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma amaçlı yapılan çalışmalara dair uluslararası yaklaşımları kronolojik olarak incelemek, mevcut yaklaşımların dayanaklarını ve gelişimini irdeleyebilmek adına önemlidir.

Sürdürülebilirlik kavramının çağdaş yaklaşımına ilk örnekler, 1972 yılındaki İnsan Çevresi Üzerine Birleşmiş Milletler Konferansı sonrasında yayımlanan bildiri içerisinde yer alan ifadeler olmuştur. Bildirinin 2. Bölümü altında, ilkelerin açıklandığı kısımdaki 2 ve 3. ilkeler, doğrudan günümüz sürdürülebilirlik yaklaşımının temelini de oluşturan "Dünya'nın yenilenebilir kaynakları üretebilme kapasitesinin devam ettirilmesi ve doğal kaynaklar ile ekosistemlerin korunması" prensiplerinin resmi olarak belirtildiği, konu özelinde Birleşmiş Milletler tarafından kabul görmüş ilk resmi ifadelerdir [14].

1972 Stokholm Deklerasyonunu oluşturan 26 ilke içerisinde, doğrudan sürdürülebilir kalkınma ve çevre ile bağlantılı olanlar Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Stokholm Deklerasyonu İlkeleri ve İlkelere Bağlı İfadelerin Özü [14]

İlke	İlke'nin ifade ettiği metnin özü
1	İnsan, çevrenin korunması ve iyileştirilmesi için sorumluluk taşımalıdır.
2	Dünyanın doğal kaynakları ile hava, su , toprak, sucul ve karasal yaşam ile özellikle ekosistemi oluşturan türler korunmalıdır.
3	Dünyanın yenilenebilir kaynakları üretebilme kapasitesi devam ettirilmelidir.
4	Tehlike altındaki doğal hayat ve habitatın korunması gerekmektedir. Yaban hayatı dahil doğanın korunması, ekonomik gelişmelerin planlanmasında da dikkate alınmalıdır.
5	Yenilenemeyen kaynakları tüm insanlıkla paylaşılmalı ve tükenmelerinden sakınılacak biçimde kullanılmalıdır.
6	Kirlilik, doğanın ve çevrenin kendini temizleme kapasitesini aşmamalıdır.
7	Sucul yaşam ile denizlerin kirliliği önlenmelidir.
8	Çevreyi daha iyi hale getirmek için ekonomik ve sosyal gelişme gereklidir.
9	Gelişmekte olan ülkelere çevreyi iyileştirmek adına destek olunmalıdır.
10	Gelişmekte olan ülkeler çevre yönetimi ile ekonomik dengeleri makul seviyede tutabilmelidir.
11	Çevre politikası, kalkınmaya engel teşkil etmemelidir.
12	Çevrenin korunması ve iyileştirilmesi için kaynakları ulaşılabilir olmalıdır.
13	Çevrenin iyiletirilmesi için devletlerce bütünleşik bir kalkınma planı uygulanmalıdır.
14	Çevre ve ekonomik kalkınma arasındaki çatışmalar kaldırılmalıdır.
15	Şehirleşme ve yerleşim alanları, çevreye yan etkileri en az olacak şekilde planlanmalıdır.
16	Çevreye etkisi olacak biçimde nüfus ve yoğunluk olan yerlerde hükümetler, nüfus planlamalarını yapmalıdır.
17	Ulusal enstitüler, devletlerin doğal kaynak kullanımlarını planlamalıdır.
18	Bilim ve teknoloji çevreyi iyileştirme yönünde kullanılmalıdır.
19	Çevre konusunda eğitim verilmesi mutlak gereklidir.
20	Özellikle gelişmekte olan ülkelerde çevre araştırmaları teşvik edilmelidir.
21	Ülkeler, uluslararası hukuk ve kendi çevre politikaları doğrultusunda doğal kaynakları istedikleri gibi kullanabilirler.
22	Kendi yetki sınırları dışında çevreye etki eden ülkelere yaptırım uygulanmalıdır.

Çizelge 2.1. (devamı) Stokholm Deklerasyonu İlkeleri ve İlkelere Bağlı İfadelerin Özü [14]

23	Ülkeler kendi ulusal standartlarını oluşturmalıdır.
24	Ülkeler çevrenin korunması ve iyileştirmesi konusunda uluslararası işbirliği gerçekleştirmelidirler.
25	Uluslararası kuruluşlar çevrenin korunmasına yardımcı olmalıdır.
26	Kitle imha silahları en kısa sürede ortadan kaldırılmalıdır.

Bu 26 ilkenin büyük bir kısmı, günümüzde de çevrenin korunması ve iyileştirmesi adına mutlak gereklilikleri olan prensiplerin temelini yansıtmaktadır. Bu açıdan bakıldığında Stokholm Deklerasyonu, sürdürülebilirlik ve çevre konularındaki uluslararası yaklaşımların baz aldığı, BM çerçevesinde metne dökülen ilk dokümandır.

Stokholm Deklerasyonu sonrasında, 1988 yılında, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ile Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından oluşturulan Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) ile birlikte, sonraki yıllarda sürdürülebilirlik bağlamında önemli bir yeri olacak olan iklim değişikliğine ve bunun olası sonuçlarına dair bilimsel temelli yaklaşımlar gerçekleştirilmeye başlanmıştır.

IPCC, düzenli olarak yayımladığı raporlar, yaptığı çalışmalar ve analizlerle birlikte, bilimsel temelli yaklaşımlarla iklim değişikliği etkileri, bu değişikliğin gelecekte ortaya çıkaracağı riskleri, uyum ve etki azaltımı konularında çalışan BM kuruluşudur [17].

Sürdürülebilirlik konusunun gelişimi ile ilgili bir başka önemli adımın, 1992 yılında gerçekleştirilen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı ile gerçekleştiği görülmektedir. Bunun sebebi ise, Rio Deklerasyonu olarak da bilinen ve konferans sonrasında yayımlanan bildirge ile, çağdaş sürdürülebilir kalkınma prensiplerinin ilk hedeflerinin de açıklanmış olmasıdır. Bunun yanısıra, sonraki yıllarda sürdürülebilirlik kavramı ile ilintili biçimde iklim değişikliği ve küresel ısınmaya yönelik gerçekleştirilecek eylemleri içeren BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Framework Convention of Climate Change – UNFCCC), konferans sonrasında imzaya açılmıştır [18].

1997 yılında kabul edilen ancak, 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ise

sürdürülebilirlik kavramının iklime yönelik yaklaşımları için çok önemli bir protokoldür. Bunun sebebi, Kyoto Protokolünde sera gazlarına yer verilmesi ve endüstrileşmiş ülkeler ile gelişmekte olan ülkelerin, sera gazı emisyonlarını belirlenen hedefler çerçevesinde sınırlandırma ve azaltma taahhüdü vermeleridir [19]. Kyoto Protokolü ile birlikte ülkeler ilk defa, sera gazlarının azaltılmasına yönelik taahhütler vermişler ve bu doğrultuda 1990 yılı baz alınarak, 2008 - 2012 yılları arasındaki dönemde emisyon salımlarında %'5lik bir azaltım hedeflemişlerdir [19].

2002 yılında gerçekleştirilen Johannesburg Sürdürülebilir Kalkınma Dünya Zirvesi ise sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma için bir başka önemli dönüm noktası olmuştur. Bu zirvede sürdürülebilirlik için altı konu ifade edilmiştir. Bunlar;

- Sağlık,
- Barınma
- Enerji
- Su,
- Tarım ve besin güvenliği ile
- Biyoçeşitlilik

konularıdır [20]. 2015 yılında, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (UN Sustainable Development Goals) yayımlanarak, 2030 yılına kadar refahın sağlanması, yoksulluğun sonlandırılması, ve gezegenin korunması amacıyla eyleme geçilmesi çağrısında bulunulmuştur [21]. Aynı yıl içerisinde iklim değişikliğine karşı küresel ölçekte atılan en ciddi adım olarak ifade edilen Paris İklim Anlaşması kabul edilmiş ve yayımlanmıştır.

Sürdürülebilir kalkınmanın sınırlarını belirleyen ve bu doğrultudaki hedeflerle, yapılacakları açıklayan BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları; 2030 yılına kadar gerçekleştirilmesi amaçlanan 17 hedefle birlikte 2015 yılında ABD New York şehrinde gerçekleştirilen BM Sürdürülebilir Kalkınam Zirvesi'nde benimsenmiştir. 17 kalkınma amacı, günümüzde sürdürülebilirlikle ilgili yapılacaklar ve eylemler için referans alınan en önemli uluslararası kabuldür. Benimsenen 17 kalkınma amacı Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma İlkeleri [21]

BM sürdürülebilir kalkınma amaçları içerisinde, iklim değişikliği ve sera gazlarının salımının azaltılması konuları iki temel hedef başlığı altında dikkate alınmıştır. Bu başlıklar;

- Erişilebilir ve Temiz Enerji,
- İklim Eylemi

ilkeleridir [22]. Her iki hedefle ilgili detaylar, bu çalışmanın 2.2. Çevresel Sürüdrülebilirlik başlığı altında incelenmiştir.

2015 yılında BM'ye üye 196 ülkenin katılımıyla Paris'te yapılan BM İklim Değişikliği Konferansında 'Paris İklim Anlaşması' kabul edilmiş, 2016 yılında yürürlüğe girmiştir [6]. Paris İklim Anlaşması, ilk kez tüm ülkelerin iklim değişikliğine karşı birlikte mücadele etmesine sağladığı katkı bakımından çok önemlidir. Anlaşmanın temelinde, küresel sıcaklık ortalamasındaki artışın, sanayi öncesi döneme kıyasla 2 ^{o}C'nin oldukça altında tutulması ve mümkün olduğunca 1.5 ^{o}C ile sınırlandırılması yer almaktadır [6].

Tüm bu bilgiler ışığında sürdürülebilir kalkınma kavramının yıllar boyunca yaşadığı gelişim ve yenilikler; sürdürülebilirlik yaklaşımının şekillenmesine etki eden anlaşma ve yayımlar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Sürdürülebilirlik Düşüncesinin Uluslararası Gelişimi

Tarih, Başlık	Önemi
1972, Dünya Zirvesi, Stokholm, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)	Stokholm Deklerasyonu ile sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturan 26 ilke yayımlanmıştır.
1987, BM Çevre ve Kalkınma Üzerine Dünya Komisyonu, Ortak Geleceğimiz	Brundtland Raporu olarak da bilinen belge, sürdürülebilirlik kavramı tanımının ilk kez açık bir şekilde ifade edilmesi açısından önemlidir.
1988, IPCC Kuruluşu	İklim değişikliği için hükümetlerarası panelin (IPCC) kuruluşu, sürdürülebilirlik yaklaşımların incelenmesi için önemli bir adım olmuştur.
1992, Rio Deklerasyonu	Çağdaş sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin ilk sürümlerinin açıklanması sebebiyle önemlidir.
1998, Kyoto Protokolü	Kürsel sıcaklık artışına sebep olan sera gazlarının azaltılmasına yönelik taahhütlerin verilmesi sebebiyle önemlidir.
2002, Johannesburg Dünya Zirvesi	Sürdürülebilir kalkınmanın konuların belirlenmesi sebebiyle önemlidir.
2015, BM Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi	BM'nin sürdürülebilir kalkınma için 2030 yılına kadar gerçekleştirmeyi hedeflediği 17 kalkınma amacı kabul edilmiştir.
2015, Paris İklim Anlaşması	Anlaşma ile, ortalama sıcaklık artışının sınırlandırılması konusunda anlaşılmıştır.

2.2. Çevresel Sürdürülebilirlik

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları arasında da sosyal ve yönetişim konuları olduğu gibi, çevre özelinde ele alınan temel hedefler de bulunmaktadır.

Rio Deklerasyonu ve Johannesburg Sürdürülebilir Kalkınma Dünya Zirvesinde ifade

edildiği gibi; hava, toprak, biyoçeşitlilik, sucul ve karasal ortamlar gibi çevre konularını içeren hedefler, BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nda belirtilmiştir.

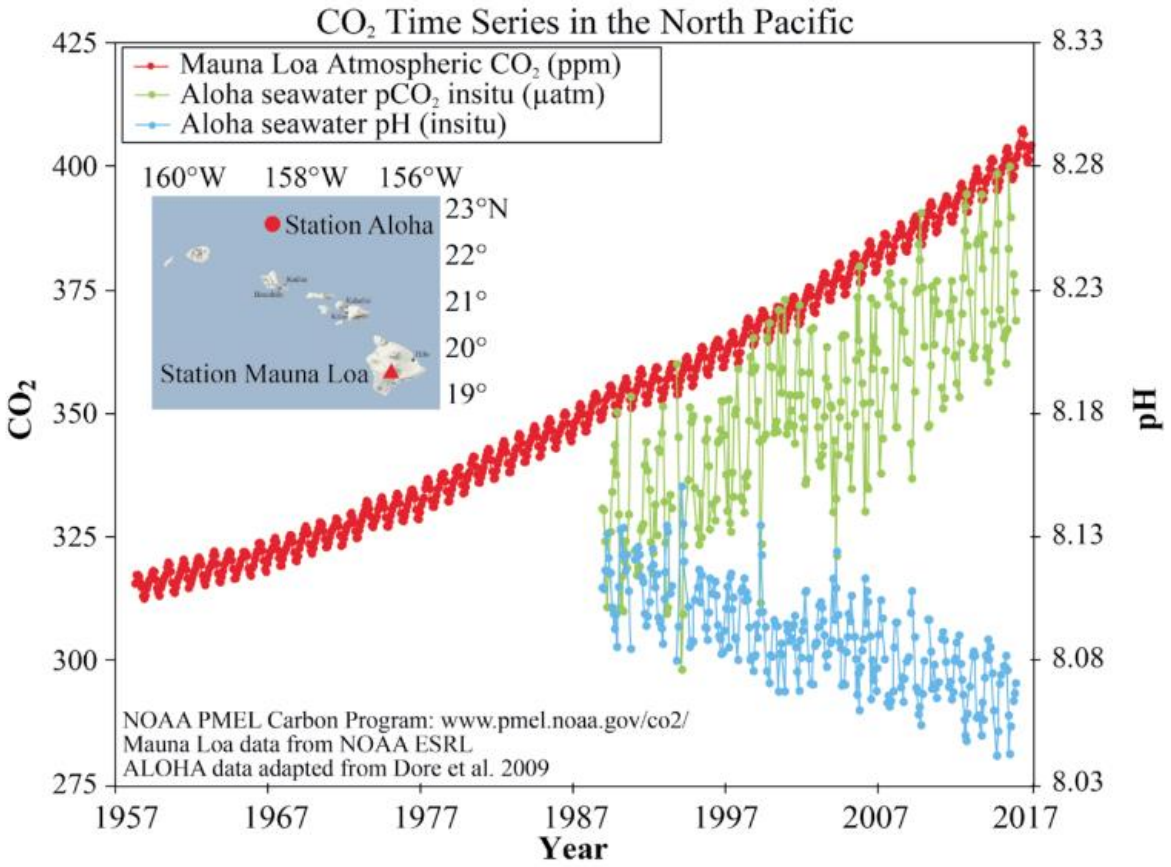
Şekil 2.1.' de verilen BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını oluşturan 17 hedef içinde, çevre ve çevre ile doğrudan bağlantılı aşağıdaki hedefler belirlenmiş ve 17 hedefin tümünde olduğu gibi 2030 yılına kadar bu konularda da eyleme geçilmesi amaçlanmıştır.

- Hedef 13: İklim Eylemi
- Hedef 14: Sudaki Yaşam
- Hedef 15: Karasal Yaşam

2.2.1. Sudaki yaşam

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları içerisinde yer alan ve denizlerle okyanusları korumak, bunlardan elde edilen kaynakların devamlılığını sağlamak yönünde yapılacaklar konusunda da alt hedefler barındıran sudaki yaşan ilkesi, temelinde sucul yaşam ortamlarındaki doğal hayatın korunmasına yönelik olsa da, okyanuslardaki asitliğin azaltılması alt hedefi ile de doğrudan iklim değişikliği konusuna etki eder amaçlardan birisi olarak değerlendirilebilmektedir [22].

Okyanuslar, önemli bir karbon yutağıdır ve atmosfere salınan karbondioksit emisyonlarının %27'si kadarını absorbe edebilmektedirler [23]. Atmosferdeki karbondioksit seviyesinin artmasıyla birlikte, okyanusların absorbsiyonu artmaktadır. Bu durum, Şekil 2.2.'de görüleceği biçimde okyanus asiditesindeki artışı tetiklemekte ve sucul yaşamın dengesini bozmaktadır. Sulardaki sıcaklığın artışı asiditenin artmasına neden olmaktadır. Asiditedeki artış karbondioksit absorbsiyonunu azaltmaktadır. Okyanus döngüsü ve akıntıları da değişmektedir [24]. Dengenin herhangi bir tarafında meydana gelen bozulma, diğer tarafa etki etmekte; etkilenen tarafsa dengenin diğer kısmının tekrar bu sürecin tesiri altında kalmasına sebep olmakta ve birbirlerini tetikleyen bir mekanizma oluşturmaktadır. Özetle küresel sıcaklık ortalaması artınca okyanus sıcaklıkları yükselmekte ve asidite buna bağlı olarak yoğunlaşmaktadır; okyanus sıcaklıkları arttıkça en önemli karbon yutaklarından olan okyanusların karbon soğurma kapasitesi düşmekte ve bunun neticesinde emilimi yapılamayan karbon emisyonları küresel sıcaklık ortalamalarına daha fazla etki etmektedir [24]



Şekil 2.2. Kuzey Pasifik'te CO_2'nin zamana göre atmosfer ve okyanustaki miktarı [23].

Ulusararası Doğa Koruma Birliği (International Union for Conservation of Nature – IUCN) tarafından 2017 yılında yayımlanan raporda, okyanusların 1000 metre derinliklerinde de ısınmanın başladığını ve buna bağlı olarak mevcut okyanus akıntılarının değiştiğini, oksijen yoksunluğu çeken bölgelerin arttığını belirtmiştir [24].

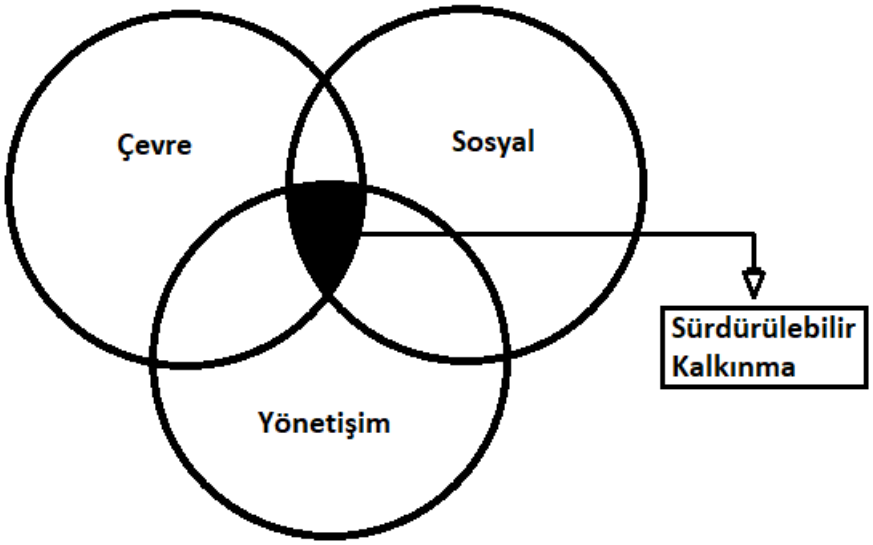
2.2.2. Karasal yaşam

BM'nin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri içerisinde 15. Başlık olan Karasal Yaşam da, benzer şekilde alt hedefleri ile birlikte doğrudan iklim değişikliğine ilişkin temas alanlarına sahip olarak değerlendirilebilir. Buna ilişkin olarak, bir alt hedef (UNSDG Hedef 15.2) olan ormansızlaşmanın durdurulması ve bozulmuş ormanların tekrar eski haline döndürülmesi de sera gazlarının atmosferden emiliminde çok önemli olan ormanların, ağaçlandırması ve sürdürülebilir yönetimler ile korunması amaçlanmaktadır.

3. ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

Sürdürülebilirlik yapısı ölçümlenebilir olmalıdır. Bu sebeple sürdürülebilirliği oluşturan üç ana başlığın bir arada değerlendirilmesi ve ortak paydada ele alınmasıyla birlikte oluşturulan planlamalar ve amaçlanan hedefler vasıtasıyla oluşturulur. Bunun için Avrupa Birliği başta olmak üzere konuya dair standartlar ve direktifler de yayımlanmaya başlanmıştır [25].

Dolayısıyla sürdürülebilir kalkınma bu üç konunun; çevre, sosyal ve yönetişim bileşenlerinin kesişimidir. Bu durum, Şekil 3.1.'de görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.1. Sürdürülebilir Kalkınma ve bileşenleri

Bu doğrultuda çevre, sosyal ve yönetişim (İngilizce literatürde geçen şekliyle ESG - Environmental, Social, Governance) konuları bir araya getirilerek değerlendirildiğinde, çevresel sürdürülebilirlik konuları içerisinde öne çıkan ve dikkat çekilmesi gereken konunun, iklim değişikliği olduğu görülmektedir.

AB kurumsal sürdürülebilirlik raporlaması direktifine göre, çevre, sosyal ve yönetişim konularında sürdürülebilirlik yaklaşımına uygun biçimde bazı temel bilgilerin paylaşılması gerekmektedir. Bu hususta direktifte geçen çevresel sürdürülebilirlik konuları, sosyal ve yönetişim başlıklarıyla birlikte Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. AB Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlaması Direktifi'ne Göre İfade Edilmesi Beklenen Çevresel, Sosyal ve Yönetişim Hususları [25]

Sürdürülebilirlik Konusu	Kapsanan Bilgiler
Çevre	▪ İklim değişikliğinin hafifletilmesine yönelik bilgiler (kapsam 1-2-3 emisyon bilgileri) ▪ İklim değişikliğine uyum ▪ Su ve deniz kaynakları ▪ Kaynak kullanımı ve döngüsel ekonomi ▪ Kirlilik ▪ Biyoçeşitlilik ve ekosistemler
Sosyal	▪ Cinsiyet eşitliği, gelir adaleti, engelli istihdamı ve çalışanlara eşit muameleye yönelik konular ▪ Çalışma koşulları, güvenli istihdam, çalışma süresi, yeterli ücretler, sosyal diyalog, örgütlenme özgürlüğü, iş konseylerinin varlığı, toplu sözleşmeler kapsamındaki işçilerin oranı dahil toplu pazarlık, işçilerin bilgi, danışma ve katılım hakları, çalışma-yaşam dengesi ve sağlık ve güvenlik, ▪ BM, Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) gibi kurumların ilke ve standartlarına uyum ve saygı
Yönetişim	▪ İdari, yönetim ve denetim organlarının sürdürülebilirlik konularıyla ilgili rolü ve bunların yapısı ▪ İç kontrol ve risk yönetimi sistemlerinin temel özellikleri ▪ Yolsuzlukla mücadele ve rüşvetle mücadele, muhbirlerin korunması ve hayvan refahı dahil olmak üzere iş etiği ve kurum kültürü ▪ Faaliyetlerden etkilenen müşteriler, tedarikçiler ve topluluklarla ilişkilerin yönetimi ve kalitesi

Çevresel sürdürülebilirlik konuları başta iklim değişikliği olmak üzere, sucul ve karasal yaşamı, kaynak kullanımını ve buna bağlı olarak atıkların azaltılmasıyla birlikte döngüsel ekonomi uygulamalarını, kirliliğin önlenmesini ve biyoçeşitlilik ile ekosistemlerin korunmasına yönelik faaliyetleri içerir.

Buna paralel olarak BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları arasında yer alan sürdürülebilirlik hedeflerinin 13. İklim Eylemi, 14. Sudaki Yaşam ve 15. Karasal Yaşam Maddeleri doğrudan çevresel sürdürülebilirlik hususlarını ele almaktadır.

Benzer şekilde aynı kalkınma hedeflerinin 7. (Erişilebilir ve Temiz Enerji) ve 12. (Sorumlu üretim ve tüketim) başlıkları da çevresel sürdürülebilirlik kapsamında ele alınabilecek başlıklardır.

Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma özelinde iklim değişikliği konusu, her geçen gün daha fazla değerlendirilen ve yapılan eylemler sonucunda önüne geçilmeye çalışılan bir olgudur.

IPCC'nin yayımlamış olduğu terimler sözlüğüne göre iklim değişikliği, iklimin durumundaki, özelliklerinin ortalamasındaki ve/veya değişkenliğindeki farklılıklarla tanımlanabilen (örneğin, istatistiksel testler kullanılarak) ve uzun bir süre (on yıllar veya daha uzun) devam eden bir değişikliği ifade eder [26].

İklim değişikliği, volkanik patlamalar, güneş döngülerindeki tabii değişimler gibi doğal süreçlerden ileri gelebileceği gibi, insan faaliyetler sonucu ortaya çıkan etkinin doğal koşullarda meydana getirdiği değişiklikler gibi yapay nedenlerle de ortaya çıkabilmektedir. Nitekim BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin ilk maddesi üzerinde iklim değişikliği "Karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, insan faaliyetleriyle doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini farklılaştıran iklimdeki değişimler." olarak ifade edilmektedir [27].

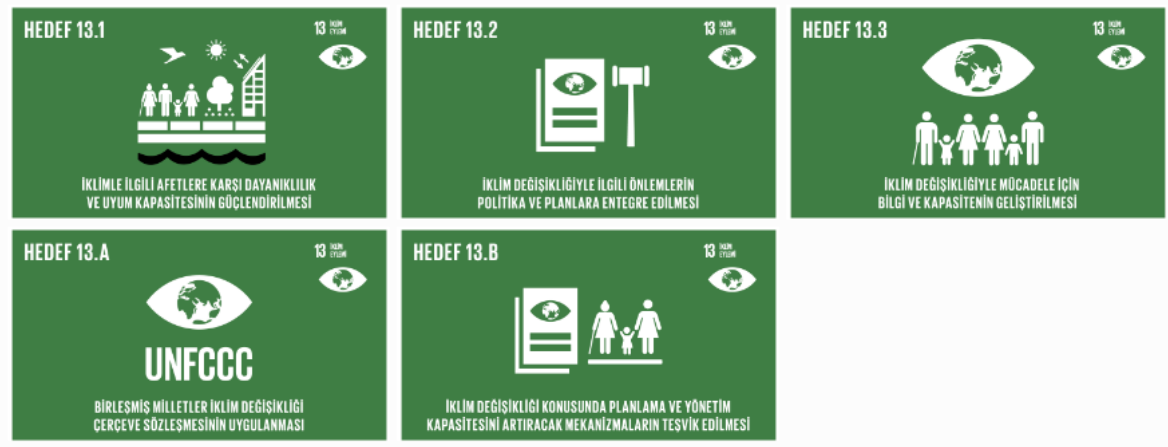
İnsan faaliyetleri kaynaklı iklim değişikliği, doğal süreçlerden ileri gelen iklim değişikliğinden ayrıştırılmaktadır. Bu doğrultuda BM'nin de üzerinde durduğu insan kaynaklı faaliyetler sonucu oluşan sera gazlarıyla ilgili olarak; İklim değişikliğiyle ilgili önlemlerin ulusal politikalara, stratejilere ve planlara entegre edilmesi ve iklim değişikliği azaltım, iklim değişikliğine uyum, etkinin azaltılması ve erken uyarı konularında eğitimin, farkındalık yaratmanın ve insani ve kurumsal kapasitenin geliştirilmesi konularında eyleme geçilmesi amaçlanmaktadır [22].

BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları içerisinde de bulunan "İklim eylemi" doğrudan ve

dolaylı sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması için, çözümüne dair ilerleme kaydedilmesi gereken önemli bir konudur.

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri çerçevesinde iklim değişikliği özelinde beklenilen amaçlar aşağıdaki gibidir [22]:

1- İklimle ilgili tehlikelere ve doğal afetlere karşı dayanıklılığın ve uyum kapasitesinin bütün ülkelerde güçlendirilmesi,
2- İklim değişikliğiyle ilgili önlemlerin ulusal politikalara, stratejilere ve planlara entegre edilmesi,
3- İklim değişikliği azaltım, iklim değişikliğine uyum, etkinin azaltılması ve erken uyarı konularında eğitimin, farkındalık yaratmanın ve insani ve kurumsal kapasitenin geliştirilmesi,
4- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne taraf olan gelişmiş ülkeler tarafından üstlenilen, anlamlı azaltım eylemleri ve uygulamada şeffaflık bağlamında, gelişmekte olan ülkelerin ihtiyaçlarını ele almak için 2020'ye kadar yıllık 100 milyar doların kullandırılması taahhüdünün uygulanması ve Yeşil İklim Fonu'nun sermayelendirme yoluyla olabildiğince kısa sürede tam olarak faaliyete geçirilmesi,
5- Kadınlara, gençlere, yerel topluluklara ve dışlanmış gruplara odaklanarak en az gelişmiş ülkelerde ve gelişmekte olan küçük ada devletlerinde iklim değişikliğiyle ilgili etkili planlama ve yönetim kapasitesini artıracak mekanizmaların desteklenmesi.



Şekil 3.2. BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Madde 13: İklim Eylemi ve Alt Amaçları [22].

3.1. Sera Gazları ve İklim Değişikliği Üzerine Etkileri

Sera gazı, Dünya'nın yüzeyinden yayılan kızılötesi radyasyonu (bir başka deyişle net ısı enerjisini) absorbe etme ve sonrasında yeniden Dünya yüzeyine yayma ve böylece sera etkisine katkıda bulunma özelliğine sahip herhangi bir gaz olarak tanımlanır [28].

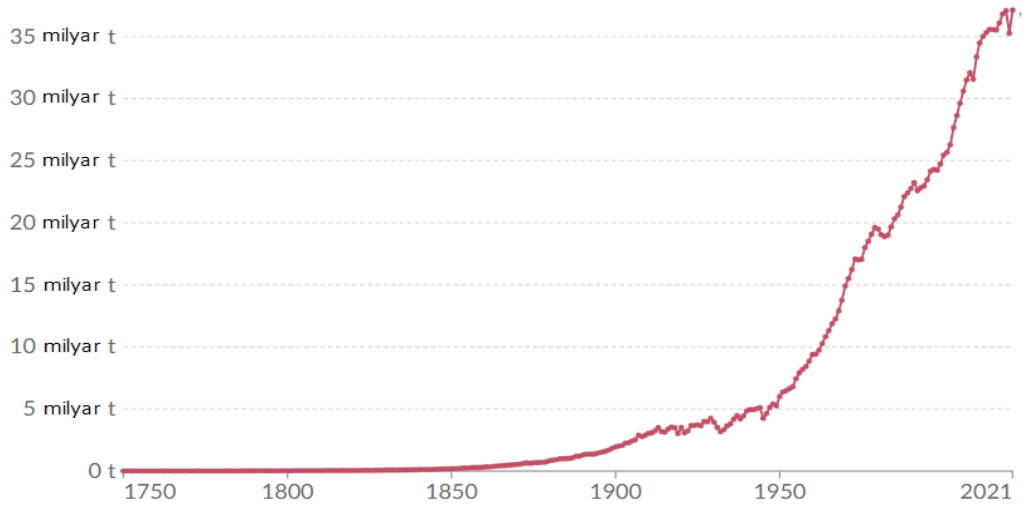
Atmosferin hem doğal hem de insan kaynaklı faaliyetlerinden ileri gelen gaz halindeki bileşenleri, dünya yüzeyinin, atmosferin kendisinin ve bulutların yaydığı radyasyon spektrumu içindeki belirli dalga boylarında radyasyonu emer ve yayar. Bu özellik sera etkisine neden olur. Su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), nitröz oksit (N_2O), metan (CH_4) ve ozon (O_3) Dünya atmosferindeki başlıca sera gazlarıdır. İnsan yapımı sera gazları arasında kükürt hekzaflorür (SF_6), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), kloroflorokarbonlar (CFC'ler) ve perflorokarbonlar (PFC'ler) yer alır; bunlardan birçoğu aynı zamanda O_3 tüketen maddelerdir [29].

Sera gazları, geçmiş yıllar boyunca, özellikle de endüstri devrimi sonrasında artan kaynak ve enerji talebine bağlı olarak, artış göstermeye başlamış ve bu artış trendi günümüze kadar devam etmiştir. Bu trend Şekil 3.3. üzerinde net olarak izlenebilmektedir. Öte yandan artan sera gazı emisyonları ile birlikte, küresel ölçekte artan sıcaklara bağlı doğrudan ya da dolaylı iklim etkileri hissedilir ve gözle görülür hale gelmiştir. Bu bağlamda, atmosfere salınan seragazı miktarının artışıyla birlikte, küresel sıcaklık ortalamalarının da birbirine paralel şekilde arttığı, dolayısıyla sera gazlarının artması ile yükselen sıcaklık ortalamaları ve buna bağlı olarak meydana gelen iklim değişikliğinin birbirleriyle doğrudan ilişki içinde oldukları bilinmektedir. Bu ilişki, IPCC tarafından yayımlanan "Climate Change 2023 – Synthesis Report" içerisinde de ifade edilmiştir [30].

Aynı rapora göre, küresel sıcaklık ortalamaları, 1850-1900 yılları arasındaki ortalama değerle kıyaslandığında, 2011-2022 yılları arasında ortalamada 1.1 ^oC artmıştır. Benzer şekilde atmosferde sera gazı konsantrasyonları da artış eğilimini devam ettirerek 2019 yılı sonunda CO2 için 410 ppm seviyelerine ulaşmıştır [30].

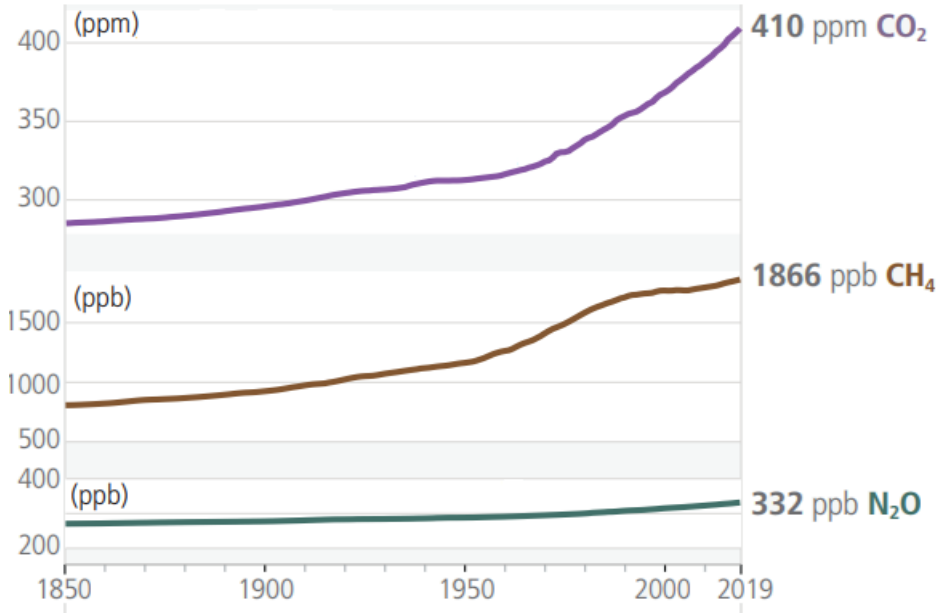
Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. üzerinde, artan sera gazı emisyonlarına bağlı olarak atmosferde yükselen farklı türden sera gazı konsantrasyonları ve buna bağlı olarak küresel ortalama sıcaklıklarda meydana gelen artış eğilimi özetlenmiştir. İki farklı veri içeren grafiklerin,

yıllar içerisinde birbirlerine paralel biçimde gelişen değişimleri, sera gazı konsantrasyonu ile küresel ortalama sıcaklık artışının aralarındaki bağlantıyı ifade etmek için önemli bir gösterge oluşturmaktadır.

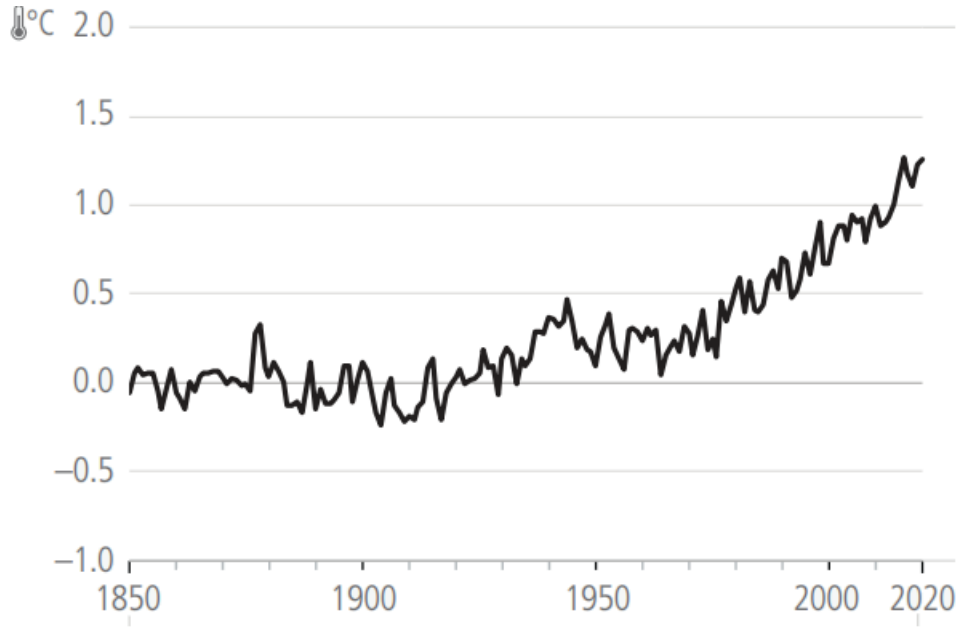


Şekil 3.3. Yıllara göre CO_{2e} cinsinden sera gazı salımı (Dünya) [31]

İklim değişikliği ile atmosferdeki sera gazı konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi incelemek için modellemeler yapılmıştır. Bu modellemelerde, küresel sıcaklıkların ve atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun ortak bir eğilimi paylaştığı gösterilmiştir [32].



Şekil 3.4. Yıllara göre atmosferdeki sera gazı konsantrasyonları [30]



Şekil 3.5. Yıllara göre küresel yüzey sıcaklığındaki artış miktarı [30]

Tüm bu veriler ışığında, sera gazları ve iklim değişikliği bağıntısı arasındaki korelasyon, uzun yılların istatistiki bilgileri ile de desteklenmektedir. Bu bağlamda hem kümülatif hem de yoğunluk olarak artan sera gazı miktarının küresel yüzey sıcaklığı ile doğrusal bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir.

3.2. İklim Değişikliğine Dair Projeksiyonlar

İklim değişikliği ile sera gazlarının birbirleri arasında olan ilişki, farklı kaynaklar ve metodlar eşliğinde oluşturulan çeşitli senaryolar altında incelenmektedir. Bu senaryoların bir kısmı emisyonlar özelinde çalışırken, bir kısmı atmosferik yoğunlukları ve bunların etkileri (IPCC RCP gibi) üzerinde çıktılar vermektedir. Bu bağlamda, özellik literatürde ve farklı sektörlerdeki firmaların, faaliyette bulundukları iş kolları ve alanları özelinde iklim etkileri ve risklerini değerlendirmek üzere kullandığı ve küresel ölçekte kabul gören iki farklı kuruluşun iklim senaryosu ve modellemelerinin açıklanması önem arz etmektedir.

Bunlar sırasıyla;

a) Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından hazırlanan küresel enerji ve iklim modelleri (GEC),

b) IPCC tarafından hazırlanan RCP

senaryoları olarak ifade edilebilir.

3.2.1. IEA GEC modelleri

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın ilk modellemeleri 1993 yılına kadar uzanmakla birlikte, yapılan bu modellemelerin temelinde enerji piyasaların işleyişini simüle etme amacıyla oluşturulan Dünya Enerji Modeli (WEM) ve Enerji Teknolojileri Perspektifleri (ETP) yer almaktadır [33].

Sonrasında ise IEA, global konjonktürde oluşan gelişmelere bağlı olarak net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmayı arzu edecek küresel enerji sisteminin, karbonsuzlaştırma sürecine nasıl geçiş yapacağı ve bu geçiş esnasında karşılaşacağı durumları açıklayarak her iki modelin de birleşimi ile melez bir model oluşturma yaklaşımını kabul etmiştir.

Buna istinaden 2022 yılı itibariyle ortaya koyduğu Küresel Enerji ve İklim Modeli (GEC) ile 1993 yılından bu yana enerji verileri ve gelişmelerini de içeren ve bir veri seti yardımıyla, sektörel olarak bölgesel ayrım yapılabilecek şekilde, orta ve uzun dönemli senaryolar oluşturabilecek bir araç tasarlamıştır.

Tasarlanan bu model sayesinde hem enerji sektörünün iklim dönüşümünü değerlendirebilme olanağı oluşmuş hem de sistemin çıktılarında sera gazı emisyonlarının miktar olarak değerlendirmesine de imkan verilmiştir.

3 farklı senaryo temeline dayanan GEC, her bir senaryonun kendine has denklemi içerisinde durum değerlendirmesi yaparak karbonsuzlaştırma ve sıfır emisyon hedeflerine ulaşma yolunda sektör öngörülerini sunmaktadır.

IEA GEC modelleri için temel senaryolar, açıklamaları ve senaryo hedefleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. IEA GEC modellemelerinde yer alan senaryoların tanımları ve senaryo sonucunda beklenen hedefler [33]

	2050 Net sıfır Senaryosu	Duyurulan Taahhüt Senaryosu	Açıklanan Politikalar Senaryosu
Tanımlar	Küresel enerji sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır CO2 emisyonuna ulaşması için bir yol belirleyen bir senaryo. Hedeflerine ulaşmak için enerji sektörü dışından kaynaklanan emisyon azaltımlarına dayanmıyor. 2030 yılına kadar elektriğe evrensel erişim sağlanacak.	Ulusal Katkı Beyanları (NDC'ler) ve uzun vadeli net sıfır hedeflerinin yanı sıra elektriğe erişim hedefleri de dahil olmak üzere dünya genelindeki hükümetler tarafından verilen tüm iklim taahhütlerinin tam olarak ve zamanında karşılanacağını varsayan bir senaryo.	Yürürlükte olan belirli politikaların yanı sıra dünya genelindeki hükümetler tarafından açıklanan politikaların sektör bazında ve ülke bazında değerlendirilmesine dayalı mevcut politika ayarlarını yansıtan bir senaryo.
Hedefler	Evrensel enerji erişimi gibi enerjiyle ilgili diğer sürdürülebilir kalkınma hedeflerini karşılarken, dünyanın 2050 yılına kadar net sıfır enerjiyle ilgili ve sıfır CO2 emisyonuna ulaşması için çeşitli taraflarca ana sektörlerde neye ve ne zaman ihtiyaç duyulduğunu göstermek.	Mevcut taahhütlerin küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlandırma hedefine ne kadar yaklaştırdığını göstermek için, 2015 yılında Paris'te kararlaştırılan hedeflere ulaşmak için kapatılması gereken "niyet aralığının" altını çiziyor. Aynı zamanda mevcut hedeflerle evrensel enerji erişiminin sağlanması arasındaki boşluğu da gösterir.	Enerji ve iklim politikasındaki son gelişmelerin potansiyel başarılarını (ve sınırlamalarını) değerlendirmek için bir kıyaslama sağlamak.

Paris İklim Anlaşması, küresel sıcaklık artış hedefilerine ulaşmak için, salımı yapılan emisyonların mümkün olan en kısa sürede zirveye çıkmasını ve daha sonra hızla azalmasını, bunun için de 2050 yılına kadar farklı kaynaklardan oluşan ve insan faaliyetlerinden ileri gelen emisyonlar ile yutaklar tarafından uzaklaştırılanlar (yani net sıfır emisyon) arasında bir denge kurulmasını istemektedir [6]. Bu koşullar ele alındığında, Paris İklim anlaşmasının talep ettiği gerekliliklerin tümü Net Sıfır Senaryosunda karşılanmaktadır. Paris İklim Anlaşması aynı zamanda iklim değişikliğini azaltma hedeflerinin sürdürülebilir kalkınma çabaları bağlamında yerine getirilmesi gerektiğini de açıkça ortaya koymaktadır. Bu gözle ele alındığında ise Net sıfır senaryosu, özellikle enerji erişimi ve daha temiz hava kalitesi boyutları aracılığıyla, kalkınma çabalarını da destekleyen çıktılar sunabilmektedir.

IEA Net sıfır senaryosuna göre; Dünya enerji portföyünde kömürün payını 2030 yılına kadar %12'ye indirilmesi gerekmektedir; bu da 2022'deki paya (%36) göre en az 24 puanlık bir düşüş anlamına gelmektedir. IEA net sıfır senaryosu, kömürün 2021'den 2030'a kadar her yıl %8,3 oranında azalmasını gerektirirken, 2015'ten bu yana tam aksi şekilde kömürün payı yıllık %1,5 oranında artmıştır. IEA gerekliliklerini karşılamak için, OECD ülkelerinin 2030 yılına kadar kömürü aşamalı olarak bırakması gerekmektedir ve dünyanın geri kalanı da 2040 yılına kadar bunu takip etmek durumunda olacaktır [34].

3.2.2. IPCC RCP senaryoları

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), Birleşmiş Milletler bünyesinde 1988 yılında ve insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan iklim risklerinin değerlendirilmesi amacıyla kurulmuş bir örgüttür [17].

IPCC, hükümetleri iklim değişikliği konusundaki riskler ve gelişmeler hakkında belirli periyotlarda yayımladığı raporlar ve yaptığı çalışma sonuçları ile bilgilendirmektedir. Kendi içerisinde bilimsel araştırma yapmayan örgüt, bunu, konuyla ilgili tüm bilimsel literatürü inceleyerek yapar. Buna doğal, ekonomik ve sosyal etkiler ve riskler de dahildir [35].

IPCC tarafından oluşturulan Representative Concentration Pathway (RCP), atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun gidişatını ele alan yörüngeyi temsil eden senaryoları ifade etmektedir. RCP senaryolarında mutlak emisyon değil, konsantrasyonlar dikkate alınmaktadır.

Temel olarak RCP senaryoları dörde ayrılarak ele alınmakta ve tanımlanan farklı iklim değişikliği senaryoları ile bunların, önümüzdeki yıllarda salınacak sera gazı (GHG) miktarına bağlı değişkenlik göstereceğini ve birbirleriyle bu anlamda bağlı olduklarını değerlendirmektedir. Bu bağlantıdan yola çıkarak, her bir senaryonun toplam sera gazı konsantrasyonuna olan etkisi ya da tersi, öngörülebilmektedir. Orijinal senaryolar;

- RCP 2,6
- RCP 4,5
- RCP 6 ve
- RCP 8,5

olarak ifade edilmektedir [36].

Orijinal senaryolar dışında, RCP 1,9, RCP 7 gibi ara senaryolar da bulunmakla birlikte; genel anlamda ara senaryolar, iklim değişikliği senaryolarının sosyoekonomik göstergeler üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır.

IPCC'nin RCP senaryolarının dayandığı radyoaktif ışıma temelinde, pozitif ışımaların dünya yüzeyini ısıtma, negatif ışımaların ise soğutma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Işıma konusunda önemli değişikliklerin doğal nedenleri arasında güneş parlaklığındaki değişiklikler veya büyük bir volkanik patlamanın ardından sülfat aerosollerinin konsantrasyonları sayılabilir. İnsanlardan ileri gelen nedenler arasında ise sera gazlarının atmosferik konsantrasyonlarındaki değişiklikler yer almaktadır [37].

RCP senaryolarını oluşturan rakamlar, 2000 yılından 2100 yılına kadar, yüzey alan (m^2 cinsinden) başına düşen ışıma (W cinsinden) miktarından yola çıkarak tahminlerde bulunmaktadır. Örneğin RCP 8,5 senaryosunda yer alan rakamsal ifade, 8,5 W/m^2 'yi temsil etmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, RCP 8,5 senaryosu, RCP 4,5 senaryosuna kıyasla, daha yüksek sera gazı emisyonlarını ve dolayısıyla da daha yüksek küresel ortalama sıcaklığı ve buna bağlı olarak belirgin iklim değişikliklerini ifade etmektedir. Aksi durumda ise, RCP değerinin düşmesi için iklim değişikliğine yönelik etki azaltım çabalarının gerçekleşmesi amacıyla daha sıkı önlemlerin alınması gerektiğini işaret etmektedir [36].

RCP temel senaryoları aşağıdaki biçimde incelenebilmektedir:

a) RCP 1.9 senaryosu: RCP 1.9, Paris Anlaşması'nın arzu edilen hedefi olan küresel ısınmayı 1,5 °C'nin altında sınırlandıran bir yönelimi temel alır.

b) RCP 2.6 senaryosu: IPCC'ye göre RCP 2.6, karbondioksit (CO_2) emisyonlarının 2020 itibarıyla azalmaya başlamasını ve 2100 itibarıyla sıfıra inmesini gerektirmektedir Bunun dışında metan (CH_4) emisyonlarının 2020'deki CH_4 seviyelerine göre yaklaşık %50 altına inmesini ve kükürt dioksitin (SO_2) emisyonları 1980-1990'dakilerin yaklaşık %10'una kadar gerileyeceğini öngörmektedir. Diğer tüm RCP'ler gibi, RCP 2.6 da negatif CO_2 emisyonları (ağaçların CO_2 emilimi gibi) gerektirmektedir. RCP 2.6 için bu negatif emisyonlar yılda ortalama 2 Gigaton CO_2 ($GtCO_2$/yıl) olarak öngörülmüştür. RCP 2.6, 2100 yılına kadar küresel sıcaklık artışının 2 °C'nin altında tutulmasının muhtemel olduğu senaryodur [38].

c) RCP 4.5 senaryosu: RCP 4.5, IPCC tarafından diğer senaryolar içierisinde ortalama durumu temsil eden senaryo olarak tanımlanmaktadır.

   Buna göre, RCP 4.5'teki emisyonlar 2045 civarında zirveye ulaşmasının ardından, düşüşe geçmeye başlayarak, 2100 yılına kadar 2050 seviyesinin yaklaşık olarak yarısına inmesi öngürlmektedir. Bu açıdan ele alındığında, RCP 4.5, herhangi bir iklim politikası olmadığı durumda, yenilenemeyen yakıtların tükenebilir karakterini dikkate alan en olası temel senaryodur [39].

   Diğer tüm RCP'ler gibi, RCP 4.5 de negatif CO2 emisyonları (ağaçların CO_2 emilimi gibi) gerektirmektedir. RCP 4.5 için bu negatif emisyonlar tıpkı 2,6 senaryosunda olduğu gibi, yılda 2 Gigaton CO_2 ($GtCO_2$/yıl) olarak senaryolaştırılmıştır.

   RCP 4.5 senaryosunda, 2100 yılına kadar deniz seviyesinde ortalama sıcaklığın RCP 2,6'ya göre %35'in üzerinde olması ve bunun sonucunda da ortalama küresel sıcaklığın 2 ile 3 °C arasında olma ihtimali öngörülmektedir. Bu değer dikkate alındığında, RCP 4,5 ve üzeri değerleri dikkate alan senaryolarda, pek çok bitki ve hayvan türünün ortalama sıcaklık artışına uyum sağlayamayacağı düşünülmektedir [38].

d) RCP 6 senaryosu: Bu senaryoya göre emisyonların 2080 yılında zirve yaptıktan sonra düşmeye başlayacağı ön görülmektedir. Bu senaryoda 2100 yılı için birim alan başına ışınım miktarı 6 W/m2 olarak ele alınır ve sıcaklık projeksiyonları da bu doğrultıda 2100 yılına kadar sürekli bir ısınmayı öngörür. RCP 6 senaryosunda küresel sıcaklık ortalaması 2100 yılına kadar 3–4 °C artacak şekilde ele alınmıştır.

Bu senaryoların dışında RCP 3,4, RCP 7 ve RCP 8,5 gibi farklı senaryolar da IPCC senaryoları arasında yer almaktadır. Ancak bu senaryolar, doğrudan iklim değişikliği ve etkilerinden ziyade, sosyal etkileri değerlendirmektedirler.

4. ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ

4.1. Sektör Bilgisi

Enerji sektörü; elektrik enerjisi, doğal gaz, sıvılaştırılmış gaz ve petrole dayalı faaliyetleri ifade eden büyük bir kümeyi temsil etmektedir. Bu sebeple sektör terimi kullanılırken, yalnızca elektrik enerjisi ve üretimiyle ilintili faaliyetleri tanımlamak adına elektrik enerjisi üretimi ifade edilmektedir.

4.1.1. Türkiye'de mevcut durum

Ülkemizde ilk olarak 1888 yılına dayanan eletkrik enerjisi, Cumhuriyet'in kurulmasının ardından çağdaş hayat standartlarının bir temel ihtiyacı olarak, hidroelektrik, kömür gibi farklı kaynaklardan faydalanılarak üretilmeye devam etmiştir [40].

2022 yıl sonu itibariyle ülkemizdeki elektrik enerjisi üretimi toplam 324 517 682 MWh seviyesine çıkmıştır [41]. Üretilen toplam elektrik enerjisinin kaynaklara göre dağılımı Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Türkiye'de üretilen toplam elektrik miktarının kaynaklara göre dağılımı (2022) [41]

Kaynak türü	Toplam üretim* (mwh)	Oran (%)
Hidrolik	67.194.934,69	20,71
Rüzgâr	35.140.858,14	10,83
Güneş	15.435.661,31	4,76
Jeotermal	10.918.764,88	3,36
Biyokütle	9.080.038,21	2,80

Çizelge 4.1. (devamı) Türkiye'de üretilen toplam elektrik miktarının kaynaklara göre dağılımı (2022) [41]

Yenilenebilir	137.770.257,22	42,45
Doğal gaz	70.827.228,33	21,83
Linyit	44.745.695,96	13,79
İthal kömür	63.259.657,34	19,49
Taş kömürü	3.242.363,27	1,00
Asfaltit	1.568.085,50	0,48
Fuel oil	718.653,16	0,22
Nafta	0,00	0,00
Lng	0,00	0,00
Motorin	2.385.741,41	0,74
Termik	186.747.424,97	57,55
Toplam	324.517.682,20	100,00

Toplam elektrik enerjisi kurulu gücüne bakıldığında ise ülkemiz 2022 yıl sonu itibariyle toplam 103 809 MW'lık bir değere ulaşmıştır [41]. Kurulu güç bakımından kaynakların kırılımları ise Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Türkiye'de toplam elektrik üretimi kurulu gücü ve kaynaklara göre dağılımı (2022) [41]

Kaynak türü	Toplam kurulu güç* (mw)	Oran (%)
Hidrolik	31.571,48	30,41
Rüzgâr	11.396,17	10,98
Güneş	9.425,44	9,08

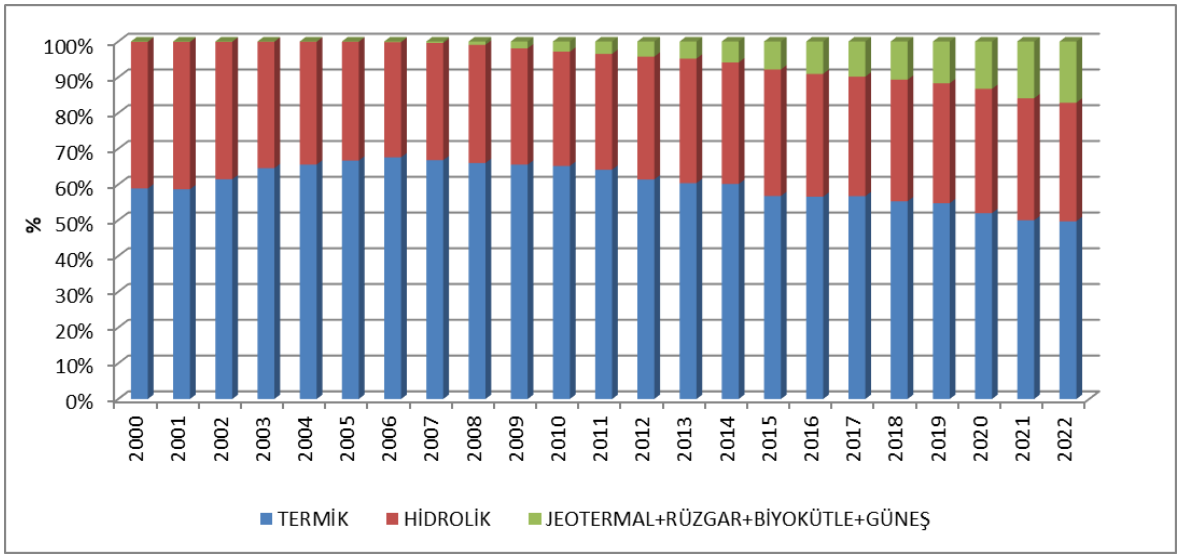
Çizelge 4.2. (devamı) Türkiye'de toplam elektrik üretimi kurulu gücü ve kaynaklara göre dağılımı (2022) [41]

Jeotermal	1.691,34	1,63
Biyokütle	1.921,31	1,85
Yenilenebilir	56.005,73	53,95
Doğal gaz	25.732,79	24,79
Linyit	10.191,52	9,82
İthal kömür	10.373,80	9,99
Taş kömürü	840,77	0,81
Asfaltit	405,00	0,39
Fuel oil	251,93	0,24
Nafta	4,74	0,00
Lng	1,95	0,00
Motorin	1,04	0,00
Termik	47.803,53	46,05
Toplam	103.809,26	100,00

Yukarıdaki bilgiler değerlendirildiğinde, ülkemizde 2022 yıl sonu itibariyle toplam elektrik üretiminin %42,45'lik kısmı yenilenebilir kaynaklardan olmuş, öte yandan termik santrallerden elde edilen üretim %57,55'lik bir oranda gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, toplam kurulu gücün %53,95'lik kısmını yenilenebilir kaynaklar oluşturmaktadır. Bu noktada termik elektrik santrallerinin payı %46,05 düzeyinde olmuştur. Dolayısıyla 2022 itibariyle kurulu güçte en büyük pay yenilenebilir kaynaklarda olmasına rağmen, toplam üretimde termik elektrik santralleri daha fazla katkı vermiştir. Termik elektrik santrallerinde ise en büyük payın sırasıyla doğalgaz, yerli kömür (linyit) ve ithal kömür şeklinde olduğu görülmektedir.

Yıllar içinde gelişim incelendiğinde ise, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisinin, toplam içerisindeki payının devamlı olarak arttığı, buna karşın, termik santrallerin üretimdeki payının 2006 içindeki tepe noktasından bu yana sürekli olarak azaldığı ifade edilebilmektedir. Buna rağmen, 2022 yıl sonu verilerine göre termik santrallerin toplam üretimdeki payı hala en büyük paya sahiptir [41].

Yıllara göre elektrik üretimi kurulu gücünün yıllar içerisindeki kaynak bazındaki dağılımı, Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

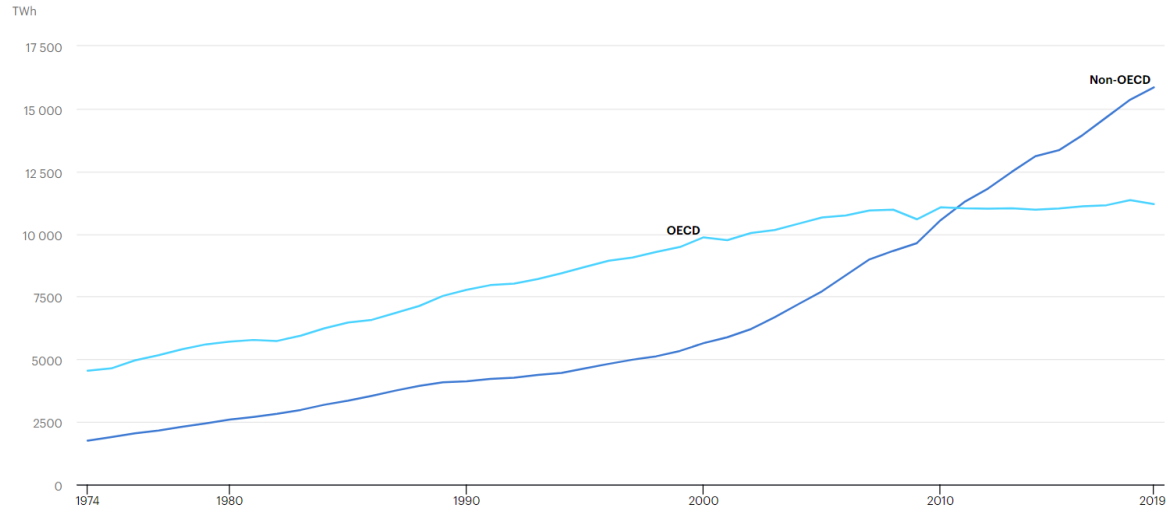


Şekil 4.1. Kurulu güç bakımından kaynakların yıllar içindeki görünümü [41]

4.1.2. Dünyada mevcut durum

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre dünya üzerinde toplam elektrik enerjisi üretimi 2019 yılı itibariyle 27044 TWh seviyelerine yükselmiştir [42]. Bu miktar, 2018 yılına kıyasla toplamda %1,3'lük bir artışı işaret etmektedir.

Aynı kaynağa göre elektrik enerjisi üretimi, 1974 yılından bu yana (2008-2009 küresel ekonomik krizi dışında) sürekli artış göstermektedir. Bu durum, Şekil 4.2. üzerinde göstermiştir.

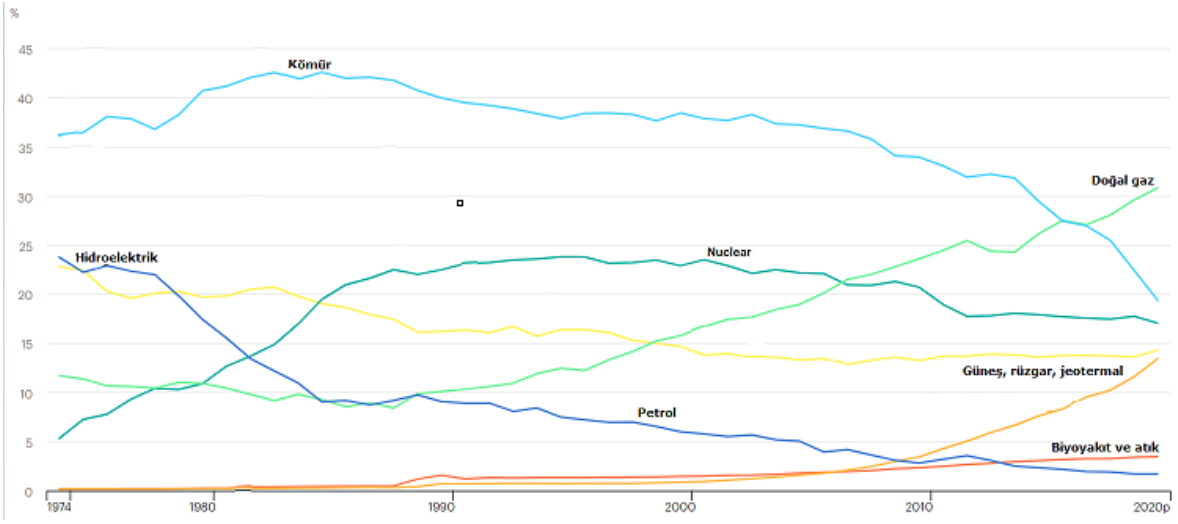


Şekil 4.2. Yıllar içinde brüt elektrik üretimi (Dünya) [42]

2019 yıl sonu itibariyle fosil kaynaklı yakıtları da içeren yanıcı yakıtlardan üretim, küresel brüt elektrik üretiminin %65,3'ünü oluşturmaktadır [42].

Yanıcı yakıtlar arasında kömür ve kömür ürünleri, petrol ve petrol ürünleri, doğal gaz, katı biyokütle ile hayvansal ürünler dahil biyoyakıtlar, biyokütleden elde edilen gaz/sıvılar, endüstriyel atıklar ve belediye atıkları yer almaktadır. Bunlar, en büyük oranlarda %36,7 ile kömür ve kömür ürünleri ile %23,5 pay oranına sahip doğalgazdan oluşmaktadır. OECD ülkelerinde ise bu oran aynı yıl için kömürde %22,4, doğalgazda %29,6 şeklindedir [42] Bununla birlikte fosil yakıtların toplam küresel elektrik enerjisi üretimindeki payı 2022 sonu itibariyle %61'e inmiştir [34]. 2018 ve 2019 yılları arasındaki iki yılda, rüzgar (+%11,8) ve güneş (+%22,5) gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen küresel elektrik üretimi güçlü bir büyüme kaydettiği görülmektedir. Diğer önemli bir veri ise, OECD ülkelerinde rüzgar, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen toplam üretimin, hidroelektrik üretimine yaklaşmasıdır.

Kömürden elektrik enerjisi üretimi 2022'de tüm zamanların en yüksek seviyesi olan 10186 TWh'ye ulaşmıştır. Çin kendi ihtiyacının %61'ine karşılık gelen 5.420 TWh elektriği kömürden üreterek en büyük pay sahibi ülke olmuştur. Bu değer, ikinci sırada gelen ve 1.363 TWh üretime sahip olan Hindistan'dan dört kat daha fazladır [34].



Şekil 4.3. OECD ülkelerinde kaynaklara göre elektrik üretiminin yıllar içindeki gelişimi [42]

Dünyada ikinci büyük fosil tabanlı elektrik kaynağı ise doğalgazdır ve küresel elektrik üretiminin %22'sinden sorumludur. ABD, 1.695 TWh (kendi portföyününün %39'u) ile gazdan en büyük elektrik üreten ülke konumundadır. Bu, bir sonraki en büyük üretici olan Rusya'nın üç katından daha fazladır (479 TWh) [34]

4.2. Elektrik Üretiminin İklim Etkisi

Modern çağın etkisiyle birlikte, hızla artan sanayileşme ve buna bağlı olarak lojistik, ham madde temini gibi konuların da önem arz etmesiyle birlikte enerji ihtiyacı günden güne artmış, buna karşılık bu ihtiyacı karşılayabilmek adına başta kömür ve petrol türevleri olmak üzere enerji kaynaklarına olan talep de benzer şekilde yükselmiştir.

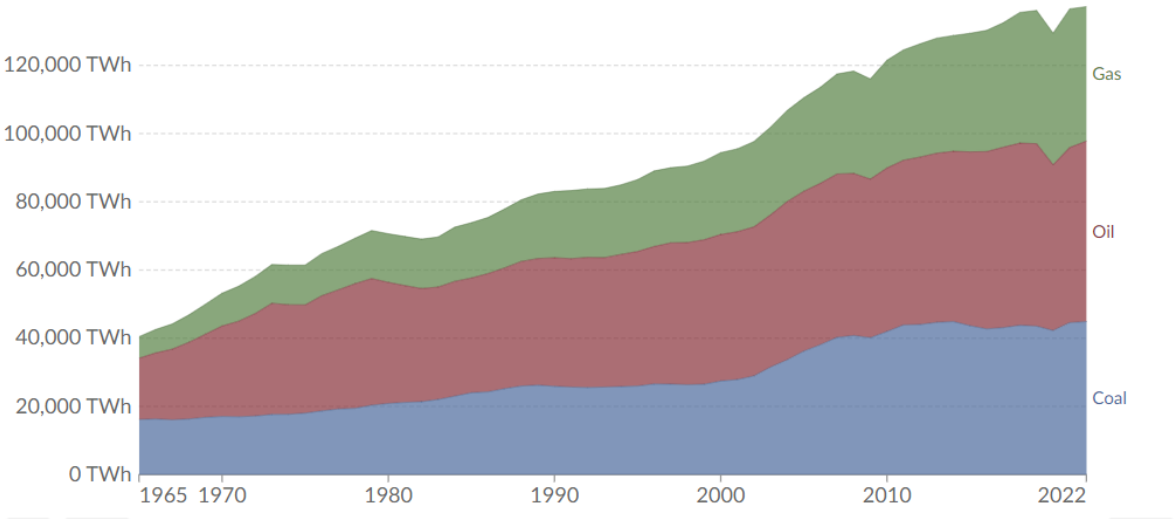
Enerji denildiğinde pek çok farklı alt sektörü de kapsayan bir tanım akla gelse de, temel ihtiyaç olan elektrik enerjisi bu kümenin içinde en önemlilerindendir. Yıllar içerisinde artan elektrik ihtiyacı da benzer şekilde fosil yakıt temelli kaynaklardan elde edilmiş ve bu durum, son yıllara kadar fosil yakıtların iklim etkisine olumsuz katkısı göz ardı edilerek süregelmiştir.

Paralel biçimde, karbon döngüsünü etkileyen karmaşık süreçlerin bilgisayar tabanlı modelleri, fosil yakıtların yakılmasının, geçmişte karbondioksit konsantrasyonlarındaki artışta önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuş, bu modeller ayrıca, büyük politika veya teknoloji değişiklikleri olmadan, gelecekteki CO_2 konsantrasyonlarının da büyük ölçüde

fosil yakıt yakılmasının bir sonucu olarak artmaya devam edeceğini öngörmede yardımcı olmuşlardır [37]. Bununla ilgili olarak, atmosferde artan sera gazı yoğunluğu ile birlikte küresel ortalama sıcaklıklığın benzer eğilimlerle yükseldiği ve iki kavram arasında doğrudan bir ilişki olduğuna dair araştırma sonuçları da paylaşılmıştır [32].

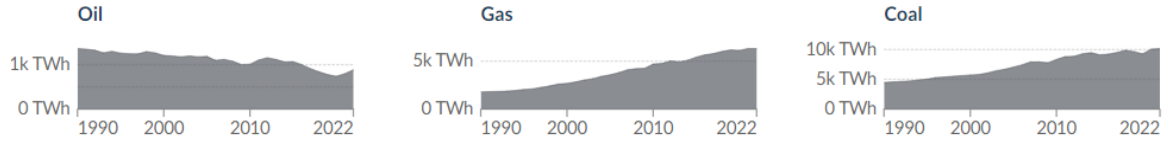
IPCC gibi kuruluşların yayımlamış olduğu yıllık raporlar da göstermektedir ki, iklim etkisine sebep olan sera gazlarının artan yoğunluğundan doğrudan fosil yakıtlar da sorumlu tutulmaktadır [37]. Fosil yakıt kullanımının neden olduğu emisyonların ilk olarak 1751 yılına kadar uzandığı düşünülmektedir. Fakat, 1863 yılına kadar bu tür emisyonların 0,1 GtC/yıl seviyesine kadar olduğu, 1995 yılında ise bu miktarın 6,5 GtC/yıl seviyesine ulaştığı bilinmektedir. Dolayısıyla bu bilgiler de göstermektedir ki, 250 yıllık periyotta fosil yakıt kaynaklarının da etkisiyle emisyonlar her yıl ortalama %3,5 seviyesinde büyümüştür [37].

Günümüzdeki durum değerlendirildiğinde ise 1965 sonrasında BP tarafından yıllık olarak yayımlanan Dünya Enerji İstatistikleri Raporları baz alınarak oluşturulan veri kümesi göstermektedir ki, fosil yakıt tüketimi son yıllarda hız kesmiş olsa da devamlı olarak bir artış trendi içerisinde olmuştur [43]. Şekil 4.4.'te bu trendin gelişimi ifade edilmiştir.



Şekil 4.4. 1965'ten günümüze fosil yakıt kullanımının değişimi [44]

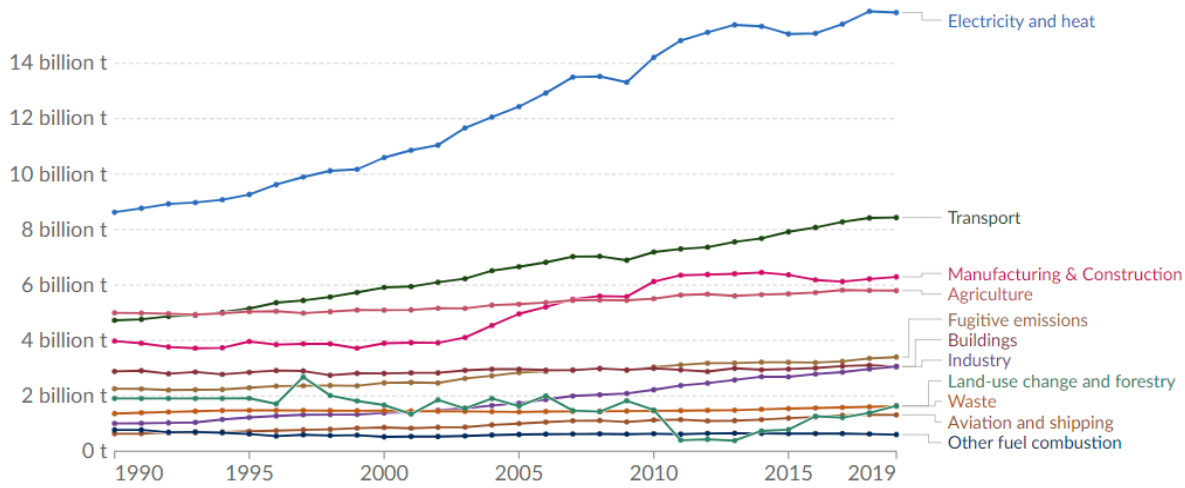
Bu toplam fosil yakıt tüketiminin içinde elektrik üretimi amaçlı kullanımı oldukça yüksek paya sahiptir. 1990- 2022 yılları arasında, sırasıyla Petrol türevleri, gaz ve kömür türevlerinden elde edilen elektrik enerjisi miktarları Şekil 4.5.'te verildiği gibidir.



Şekil 4.5. Petrol türevleri, gaz ve kömürden elektrik üretim miktarları (1990-2022 yılı) [45]

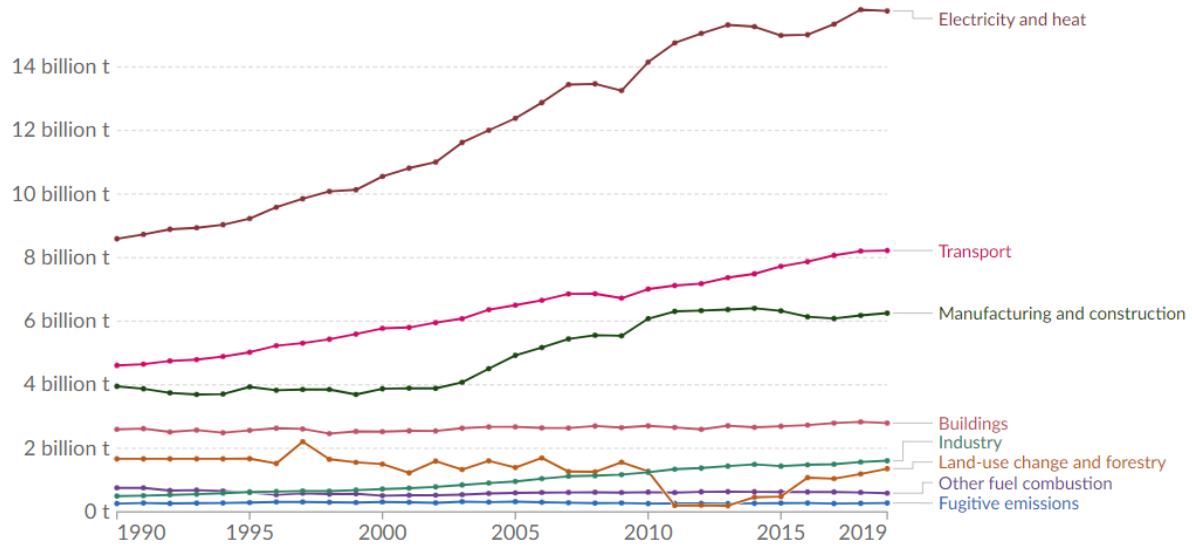
Bu noktada önemli bir gösterge, elektrik üretiminden kaynaklı olarak toplam emisyon miktarı dışında, birim elektrik üretimi başına salınan seragazı miktarını ifade eden emisyon yoğunluğudur. Dünya geneline bakıldığında, 1 kWh'lik elektrik enerjisi üretimi için salınan emisyon miktarı, son yıllarda fosil yakıtlar yerine yenilenebilir alternatiflerin tercih edilmesiyle birlikte hafif düşüş eğilimine girmiş ve 2022 yılı itibariyle 436 grCo_{2e} olmuştur [45].

Yukarıdaki tüm bilgilerle bağlantılı olarak küresel seragazı emisyon salımlarının sektörlere bağlı kırılımı incelendiğinde ise, en büyük payın elektrik enerjisi ve ısı üretimi olduğu ortadadır. Şekil 4.6.'de yer alan grafik, toplam sera gazlarının (ton karbondioksit eşdeğeri olarak ölçülen tüm sera gazlarının toplamı) sektörlere göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.6. Sera gazı salımlarının sektörlere göre dağılımı (yıllar içindeki gelişimi) [46]

Seragazları içinde salımı en yüksek gaz olan CO_2'nin en büyük kaynağı da elektrik enerjisi ve ısı ürtimidir. Diğer seragazları (CH_4, NO_x vb.) için elektirk enerjisi sektörünün katkısı daha düşük düzeydedir.



Şekil 4.7. Sektörlere göre CO_2 salımı (1990-2019) [46]

Tüm bu yukarıdaki bilgiler ışığında elde edilen veriler bir arada değerlendirildiğinde, yıllar içindeki fosil yakıtlı elektrik enerjisi üretimine paralel olacak biçimde, elektrik enerjisi üretim sektörü kaynaklı sera gazı salımlarının benzer eğilimle hareket ettiği görülmektedir. Dolayısıyla fosil yakıtların kullanımın miktarının, fosil yakıt kullanan sektörlerin ortaya çıkardığı iklim etkilerine doğrudan katkısı olmakla birlikte; elektrik enerjisi sektörünün de fosil yakıt ağırlıklı üretim portföyüne sahip olması, benzer şekilde iklim etkisine doğrudan etki etmesine sebep olmaktadır..

4.2.1 İklim değişikliği etkisinde elektrik enerjisi üretimi

İklim değişikliğine doğrudan etki gösteren sektörler arasında, fosil yakıt kullanımı kaynaklı olarak elektrik enerjisi üretimi en büyük sorumlu olarak kabul edilmektedir. Bunun yanında, son yıllarda elektrik enerjisi üretimi için tercih edilen kaynakların değerlendirilmesi ve fizibiliesinin yapılması noktasında, iklim değişikliğinin oluşturduğu etkiler önemli değerlendirme kriterlerinden birisi olmaya başlamıştır. Bunun temel sebebi, iklim değişikliği sonucunda oluşan mikro ve makro ölçekte atmosferik, hidrolojik ve meteorolojik değişimlerdir.

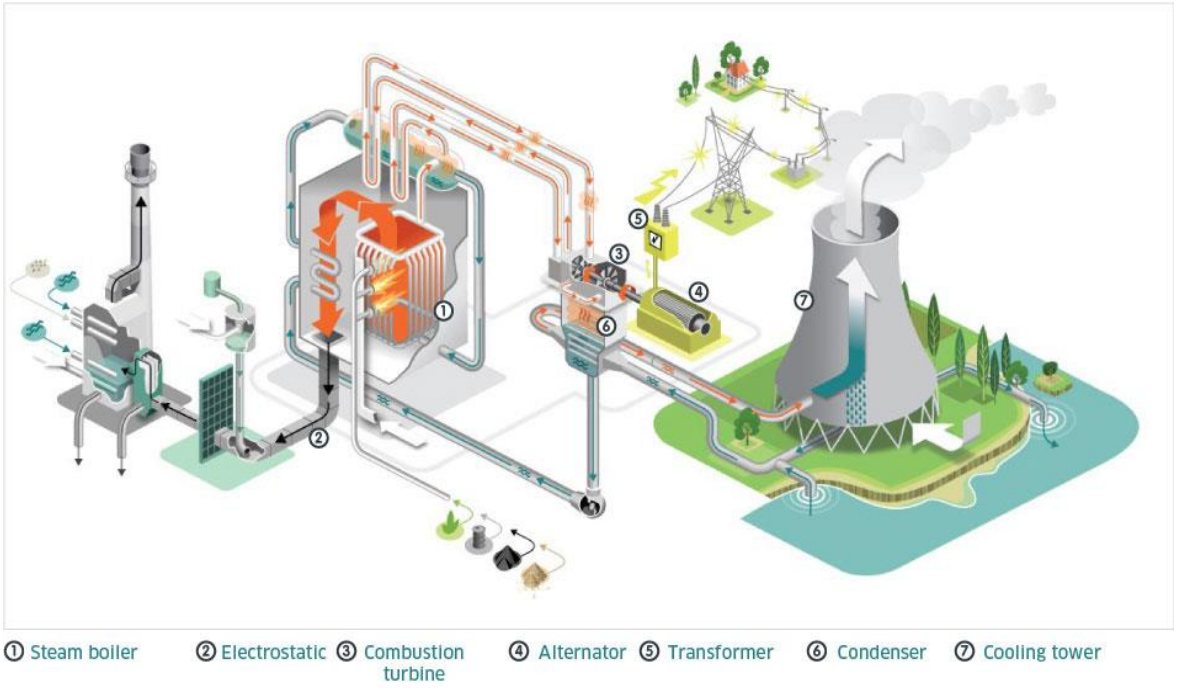
Tipik termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi temelde suyun doğrudan buhar fazına geçirilmesi sonucu türbinlerin harekete geçirilmesi ve buradan alternatör ve jeneratörler yardımıyla mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevrimi vasıtasıyla gerçekleştirilir. Burada

ihtiyaç duyulan buhar, tesisin bulunduğu bölgede yer alan su kaynaklarından temin edilir. Benzer şekilde sistemin soğutulması için hava ile birlikte su da en çok kullanılan kaynaklar arasındadır [47].

Su kaynaklarının, sera gazlarının salımı ve bunun etkisinden ileri gelen iklim değişikliği tesiri ile birlikte karşı karşıya olduğu olumsuz sonuçlar sebebiyle gün geçtikçe daha az erişilebilir hale gelmeye başlamıştır. Bu sebeple, temel çalışma prensibi yukarıda açıklandığı şekliyle, bir termik santral için daha fazla önem arz etmeye başladığı da bir gerçektir. Zira, iklim değişikliği sebebiyle hızla artan yenilenebilir enerji yatırımlarına rağmen hem ülkemizde hem de dünyada fosil yakıtlı elektrik üretim santralleri önemli paya sahiptir. Arz güvenliği de dikkate alındığında, bu durum daha kritik bir konuma ulaşmıştır.

İklim değişikliğinin elektrik enerjisi üretimi üzerindeki etkisi yalnızca fosil yakıtlı tesisler için değil, yenilenebilir üretim yapan tesisler için de göz ardı edilemeyecek derecede önemlidir.
Yenilenebilir olarak değerlendirilen hidroelektrik santrallerin temel kaynağı sudur. İklim değişikliği sonucu, su kaynaklarını doğrudan etkileyen hidrolojik çevrimdeki sistemler ve süreçler arasındaki mevcut denge de olumsuz olarak etkilenecektir. Bu olumsuz etki neticesinde de yağış buharlaşma ve akış gibi süreçler üzerinde yer ve zamandan bağımsız olarak hem uzun hem de orta ve kısa vadeli değişimler gözlenmeye başlamaktadır. Dolayısıyla iklim değişikliği, yenilenebilir enerji kaynaklarından hidroelektrik santraller üzerinde doğrudan etki gösterebilmekte ve zincirleme olarak su kaynaklarına negatif etki gösterecek biçimde rol oynamaktadır [48].

Hidroelektrik santrallere benzer biçimde bir başka yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar santralleri için de iklim değişikliği bir tehdit oluşturmaktadır.



Şekil 4.8. Bir termik santralin temel elemanları ve suyun kullanıldığı noktalar [47]

Atmosferde artan sera gazı konsantrasyonu ile birlikte yükselen küresel ortalama sıcaklıklar sebebiyle kuzey kutbu, alt enlemlere göre daha fazla ısınmakta ve bunun sonucunda orta enlemler ile kutup bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır. Bu durum da kuzey yarımküredeki jet akımının yolunu değiştirerek kuzeye ve güneye doğru hareket etmesine sebep olmaktadır. Atmosfer ısınmaya devam ettikçe jet akışının yavaşlamasına, hatta tıkanmasına neden olacağı öngörülmektedir. Böylece, herhangi bir bölgede normal kabul edilenden çok daha uzun süre devam eden farklı hava durumu sistemlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sistemler de dünyada uzun yıllardır süregelen rüzgar akışlarının farklılaşmasına etki etmektedir [49].

Son yıllarda Avrupa'da karasal rüzgarlardaki azalma, iklim değişikliğiyle bağlantılı olan küresel karasal durgunluğun (karalarda rüzgarları ortalama şiddet ve hızının düşmesi) bir sonucu olarak düşünülmektedir. Araştırmalar, 1978'den 2010'a kadar dünya çapında rüzgarların azaldığını ve hızlarının on yılda yüzde 2,3 oranında düştüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, 2010'dan sonra küresel ortalama rüzgar hızlarının saatte 7 milden 7,4 mil'e yükseldiğine dair araştırma sonuçları da yayımlanmıştır [50]. Dolayısıyla son 50 yıllık bir zaman diliminde bile rüzgar hızlarının ve akışlarının içinde bulunduğu kararsızlık, rüzgar

enerjisi için elektrik enerjisi sektörü tarafından gerçekleştirilen projeksiyonları da zorlaştırmaktadır.

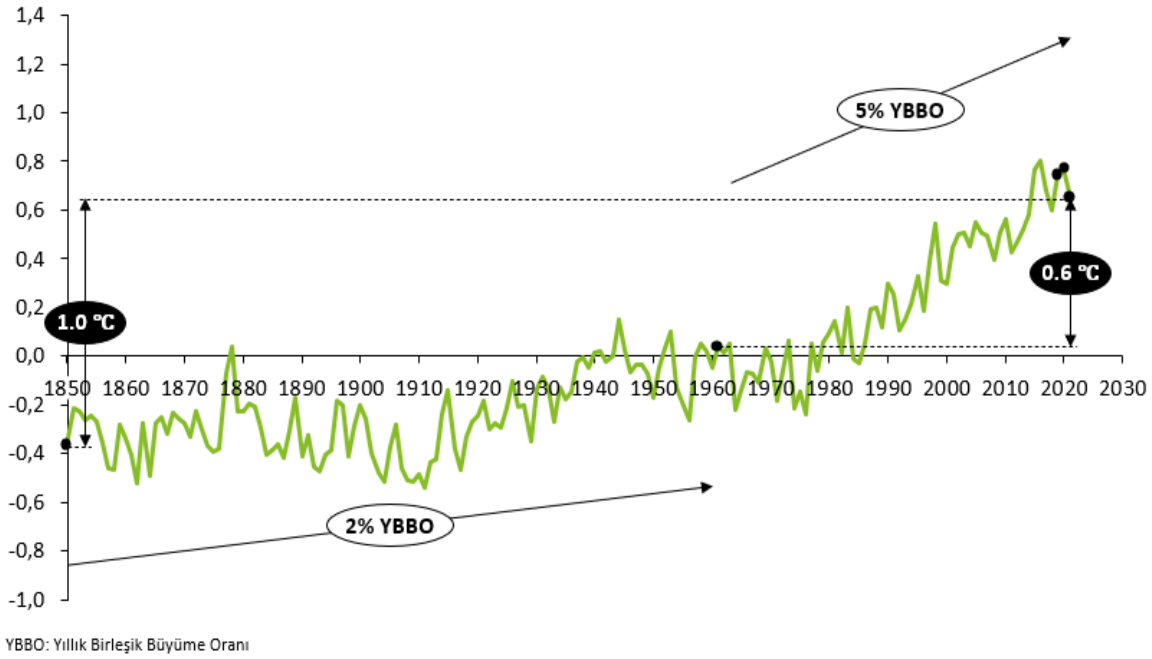
Tüm bunlardan ayrı olarak, iklim değişikliğinin daha az etki ettiği diğer yenilenebilir kaynaklara yatırım da gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin; rüzgar ve hidroelektrik teknolojilere göre daha az etki altında kalan güneş enerjisi, 2022 yılı sonu itibariyle, artan bir ivmeyle beraber, küresel ölçekte toplam elektrik enerjisi üretiminin %4,5'inin üzerinde bir paya sahip olmuştur [45].

5. KARBONSUZLAŞTIRMA

5.1. Karbonsuzlaştırmanın Gerekliliği

Son on yılda küresel sıcaklıklarda keskin bir şekilde artış meydana geldiği farklı pek çok araştırma sonucu olarak ortaya konulmuştur.

1850'den bu yana yaşanan küresel ortalama sıcaklık artışının neredeyse tamamı, insan kaynaklı faaliyetlerden ileri gelen emisyonlara bağlanabilir. Ekonomik büyüme ve nüfus artışı ile buna bağlı olarak yürütülen faaliyetlerdeki yükseliş eğilimi, gezegenimizin küresel ölçekte ortalama sıcaklığında artışa neden olan emisyonun ana etkenleri olarak görülmektedir [51].



Şekil 5.1. 1961-1990 ortalamasına göre ortalama sıcaklık anomalisi [51]

Şekil 5.1.'de yer alan grafikte, 1961-1990 yılları arasındaki ortalama sıcaklık anomalisi görülmektedir. Burada dikkate alınan modelleme, İngiltere Meteoroloji Ofisi, Hadley Merkezince hazırlanan ve küresel sıcaklık anomalilerinin bir veri kümesini temsil eden HadCRUT4 üzerinden oluşturulmuştur.

Sanayi öncesi dönemde sıcaklık artışında yıllık %2'lik bileşik büyüme oranı yaşanırken, bu oran son 60 yılda iki katından fazla artarak %5'civarlarına ulaşmıştır. Küresel ortalama sıcaklıklar 1961-1990 yıllarının temel alındığı tarih aralığına göre 0,6 ^{o}C yükselirken, sanayi öncesi dönemlere kıyasla 1 ^{o}C artış göstermiştir [51].

IPCC tarafından yayımlanan 6. Değerlendirme Raporu (AR6) içerisinde iklim değişikliğinin ne şekilde olumsuzluklara yol açtığı ve açacağı detaylarıyla ifade edilmiştir. Şimdiden 1,1 ^{o}C küresel sıcaklık artışıyla birlikte, iklim sisteminde oluşan ve eşi benzeri olmayan değişikliklerin, yükselen deniz seviyelerinden, daha aşırı hava olaylarına ve hızla yok olan okyanus buzullarına kadar dünyanın her bölgesinde meydana getirdiği etkileri ortaya koymaktadır [30].

Küresel ortalama sıcaklık artışıyla birlikte AR6 raporunda ifade edildiği şekliyle karşılaşılması beklenilen etkiler Çizelge 5.1. içerisinde özetlenmiştir. Burada ortalama küresel sıcaklıklarda farklı artış miktarlarının nasıl bir etki oluşturacağı görülmektedir. Rapor verilerinden görüleceği üzere, küresel iklim değişikliğindeki artışlar insan yaşamının temel gereklilikleri olan su ve yiyecek erişimine ve dünya üzerindeki karasal ve sucul biyoçeşitliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Çevresel boyuttaki etkileri yanı sıra, sosyolojik ve ekonomik etkileri de bulunmaktadır. Bu sebeple iklim değişikliğinin temel etmenlerinden birisi olan sera gazlarının salımının azaltılmasının ötesinde, daha ileri seviyede, öncesinde salınmış olan karbon emisyonlarının da tutulması önem arz etmektedir.

Günümüzde emisyon salımını azaltmak için enerji verimliliği, alternatif yakıt kullanımı gibi çeşitli yöntemlerden faydalanılan çalışmaları da içeren karbonsuzlaştırma faaliyetleri de hız kazanmıştır.

Çizelge 5.1. IPCC AR6 raporuna göre ortalama sıcaklık artışlarının farklı kademelerdeki etkileri [30]

	1.5 ^{o}C'de etki	2 ^{o}C'de etki	3 ^{o}C'de etki	1.5 – 2 ^{o}C farkı	1.5 – 3 ^{o}C farkı
Biyoçeşitlilik Kaybı – Risk altındaki türlerin maksimum yüzdesi	%14	%18	%29	1.3 kat daha kötü	2.1 kat daha kötü
Kuraklık – Su ve ısı stresi ile çölleşme riskiyle karşılaşabilecek nüfus	0,95 milyar	1,15 milyar	1,29 milyar	200 milyon fazla kişi	300 milyon fazla kişi
Aşırı Sıcaklık – Yıl içerisinde 35 ^{o}C ortalamasının üzerinde gün sayısı	45-58	52-68	68-87	1.2 kat daha kötü	1.5 kat daha kötü
Deniz Seviyesi Yükselmesi – 2100 yılında küresel yükseklik seviyesi	0,28-0,55 metre	0,33-0,61 metre	0,44-0,76 metre	1,1 kat daha kötü	1,4 kat daha kötü
Seller – Sellere maruz kalacak küresel nüfus yüzdesindeki artış	%24	%30		1,2 kat daha kötü	

Karbonsuzlaştırma ya da bazı kaynaklarda geçen şekliyle dekarbonizasyon, atmosfere karbondioksit (CO_2) çıkışının giderilmesi veya azaltılması için kullanılan terimdir. Düşük karbonlu enerji kaynaklarının kullanımına geçilmesiyle dekarbonizasyon sağlanabilmektedir. Öte yandan karbon yakalama, karbonun farklı kaynaklarda hammadde olarak kullanımı gibi çeşitli şekillerde karbonsuzlaştırma süreçleri de uygulanabilmektedir [52].

5.2. Karbonsuzlaştırma Yöntemleri

Özellikle elektrik enerjisi üretiminden ileri gelen yüksek miktarda sera gazı salımı sebebiyle, enerji sektöründe mevcut karbon emisyonlarını aşağı çekmek ve ilerleyen dönemlerde ise sıfırlayabilmek adına çalışmalar yapmaktadır.

Bu çalışmalar, temelde üç ayrı türden karbonsuzlaştırma metodu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bunlar;

1- Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş,
2- Alternatif enerji yatırımları (Hidrojen vb.),
3- Karbon yakalama ve değerlendirme teknolojileri

olgularından faydalanılması olarak sayılabilir.

Karbonsuzlaştırma süreçlerinde hem sektör özelinde, hem de genel anlamda bu üç yöntem bir arada kullanılacağı gibi, günümüzde daha çok tercih edildiği üzere yenilenebilir kaynaklara geçiş yapılarak emisyon yoğunluğunun azaltılması da tercih edilebilmektedir.

5.2.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş

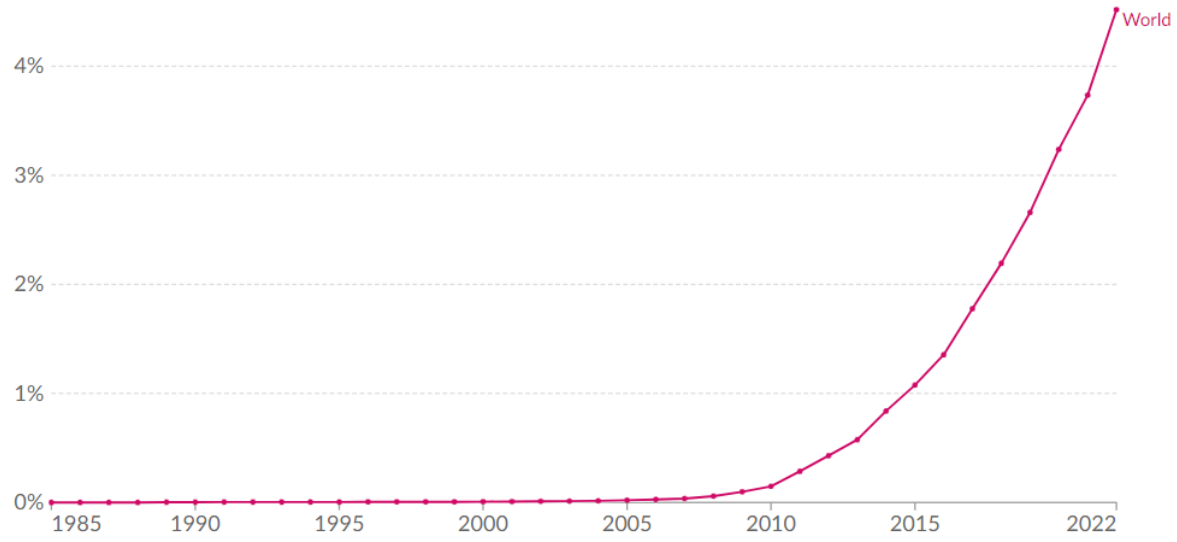
Hem fosil yakıtların yaratmış olduğu ve iklim üzerinde olumsuzluklar meydana geitren etkilerden uzaklaşmak hem de yenilenebilir yeşil enerji dönüşümüne katkı sağlayabilmek amacıyla, elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanımı son yıllarda hızla artmaya başlamıştır. Hem kurulu güç, hem de toplam üretimdeki pay bakımından yıldan yıla artan bir oranda yenilenebilir kaynaklar tercih edilmeye başlanmıştır.

Yenilenebilir kaynaklar olarak ilk akla gelen güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerjisinin dışında jeotermal, biyogaz, alg tabanlı yakıt ve deniz (su) üstü rüzgar santralleri de dikkat çekmektedir.

Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, fosil yakıtların kullanımının azaltılması amacıyla ilk başvurulan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Ancak verimlilik ve ilk yatırım maliyeti açısından, son 10 yıla kadar sınırlı şekilde faydalanılabilinen bir kaynak olmuştur.

Son yıllarda hem maliyetlerdeki düşüş hem de verimlilik artışı sebebiyle güneş enerjisinden elde edilen elektriğin payı sürekli bir artış trendine girmiş ve 2022 itibariyle %4,5'in üzerine çıkmıştır [45].

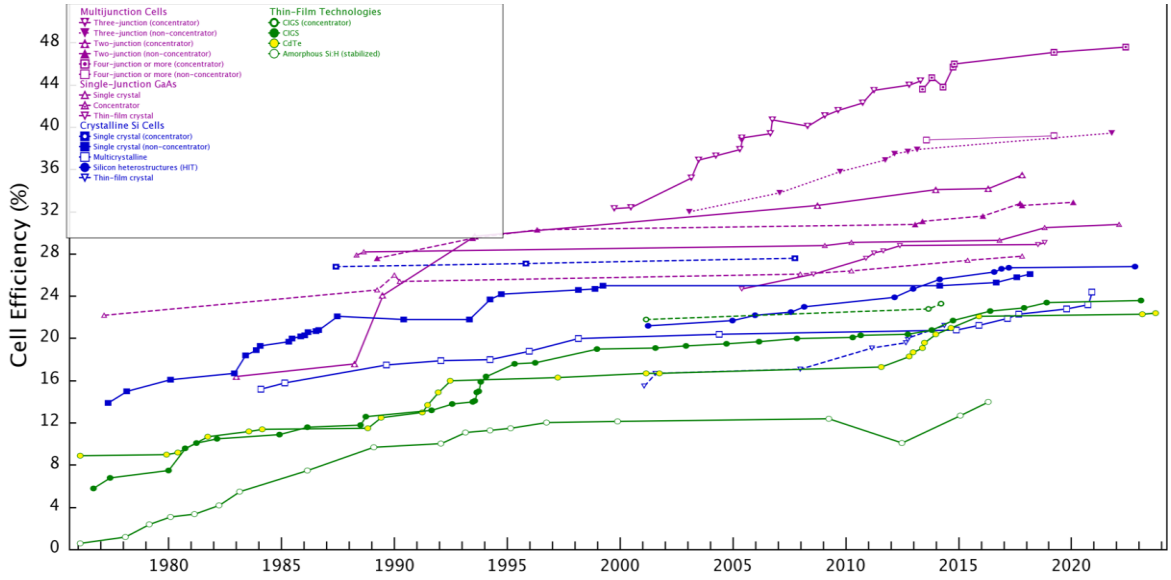


Şekil 5.2. Güneş enerjisinin toplam küresel elektrik üretimindeki payı [45]

Yıldan yıla artan verimlilik de güneş enerjisi kullanımını artıran en önemli etkendir. Sürekli artan ve yenilenen teknolojik gelişmeler ve araştırma-geliştirme çalışmalarıyla birlikte, güneş panellerinde yer alan fotovoltaik hücrelerin verimlilik miktarları da artmıştır. 2022 yılı itibariyle elektrik enerjisi eldesi için kullanılan fotovoltaik hücrelerin verimliliğini ifade eden dönüşüm faktörleri %47'ye kadar ulaşmıştır. Bu, daha küçük alan üzerinde, daha fazla miktarda güneş ışığından faydalanılarak, daha yüksek miktarda enerji eldesini ifade etmektedir [53].

Güneşten elektrik enerjisi üretimi, bir fotonun (ışığın temel birimi) silikon gibi bir yarı iletken yüzeye çarparak bir elektron salınımı ürettiği fotovoltaik etkiye dayanmaktadır. Buna göre güneş bir güneş panelinin üzerine düştüğünde, güneş ışığından gelen enerji paneldeki PV hücreleri tarafından emilmektedir. Bu enerji, hücredeki dahili elektrik alanına tepki olarak hareket eden ve elektriğin akmasına neden olan elektrik yükleri oluşturmaktadır [54].

Doğru akım (DC) elektriği adı verilen PV paneller tarafından toplanan elektrik, daha sonra bir invertöre taşınır ve burada alternatif akım (AC) elektriğine dönüştürülerek elektrik şebekesine gönderilir.

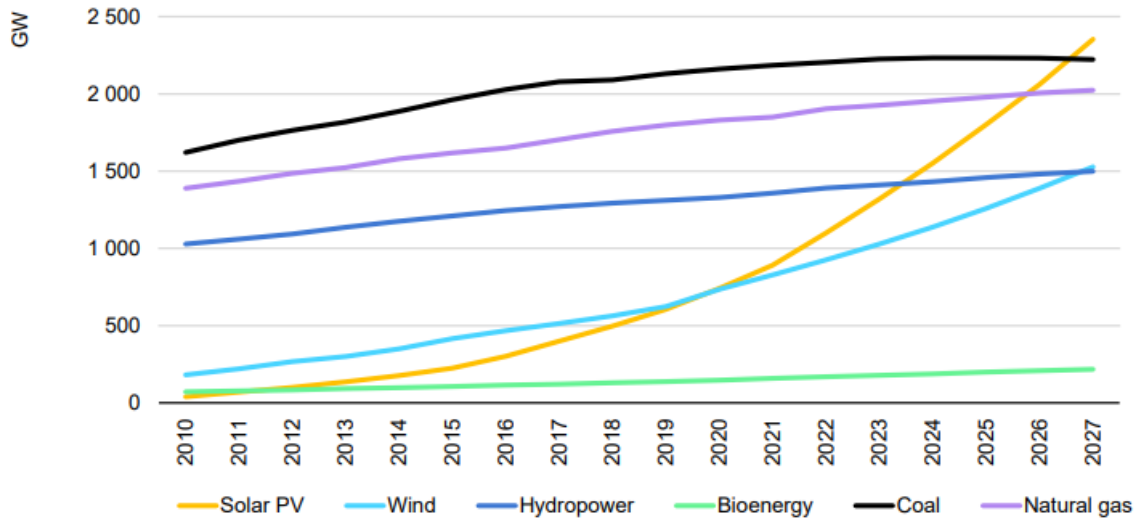


Şekil 5.3. Farklı fotovoltaik hücrelere ait dönüşüm faktörlerinin yıllar içinde değişimi [53]

IEA'ya göre güneş enerjisi, 2027 yılına kadar elektrik üretiminde kömür kullanımını aşarak en büyük paya sahip olacaktır. Bununla birlikte, şu an için emtia fiyatlarının yüksek seyretmesi nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinin de fazla olmasına rağmen güneş enerjisi, dünyadaki pek çok ülke için elektrik üretiminde en az maliyetli seçenek olmaya başlayacaktır. Öte yandan güneş enerjisinden elektrik eldesi için çatı üstü gibi çeşitli alanlardan faydalanılabilmesi de, yenilenebilir enerji içerisinde güneşin payının giderek artmasına katkı sağlamaktadır [55].

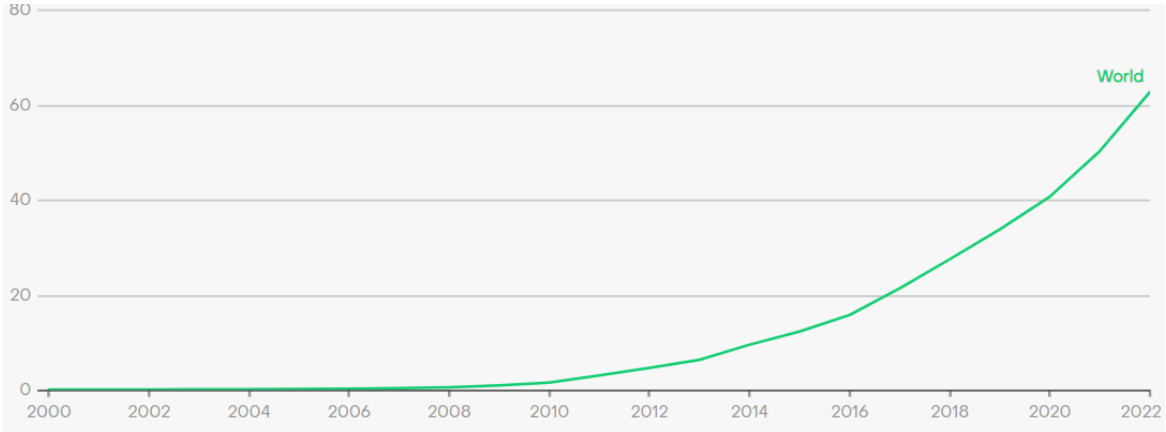
Son dönemde güneş enerjisine artan talebin en somut örneği olarak; Avrupa ülkelerinin fosil yakıtlara bağımlılığını ortadan kaldırmayı ve 2030 yılıyla birlikte toplam kapasitenin %69'unun yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi için başlatılan RePowerEU inisiyatifi ile

birlikte, 2030 yılı ile birlikte AB ülkelerinin 592 GW güneş kaynaklı kurulu güce ulaşması amaçlanmaktadır. Bu aynı zamanda 2022-2027 arası için yıllık 39 GW'lık bir büyümeye ihtiyaç duyulduğu anlamını taşımaktadır [55].



Şekil 5.4. IEA'ya göre kaynak türüne göre elektrik enerjisi üretimi öngörüleri [55]

Güneş enerjisi için verimlilik her geçen yıl artarken, daha da önemlisi üretilen elektrik enerjisinin emisyon salımına sebep olmadan gerçekleştirilebilmesidir. Sebep olduğu doğrudan emisyon olmasa bile, düşük miktarda dolaylı emisyona sebep olabilmektedir. Öte yandan düşük bakım ve işletme giderleri sebebiyle de cazip bulunmaktadırlar.



Şekil 5.5. Güneş enerjisi kaynaklı doğrudan ya da dolaylı toplam salınan emisyon [56]

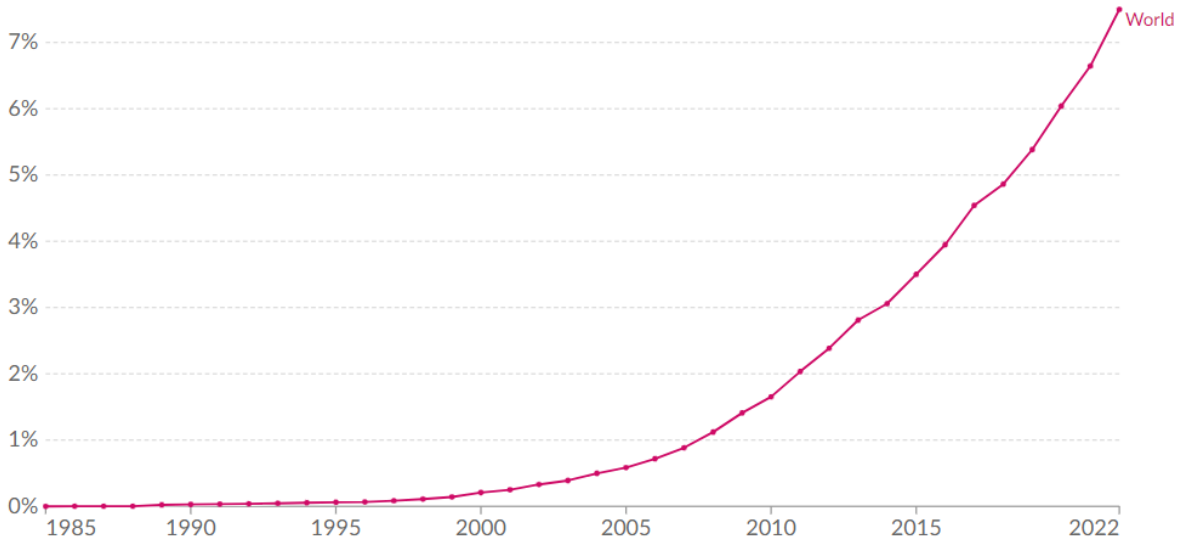
Bununla birlikte güneş enerjisi birim alandan elde edilen enerji yoğunluğu hala düşük seviyede olan bir enerji çeşididir. Kömür yakıtlı bir santral alansal olarak oranlandığında 500

kW/m2 enerji yoğunluğuna sahipken, güneş enerjisi için bu miktar 0,25 kW/m2 civarındadır [57].

Ayrı olarak güneş enerjisi, doğrudan paneller üzerine etki eden güneş ışığı ile bağlantılı biçimde üretim yeteneği artan ya da azalan bir enerji çeşididir. Kapasite faktörü olarak de ifade edilen bu durum, güneş panellerinin elektrik enerjisi üretebilme verimliliğine doğrudan etki eder. Güneş enerjisi, emreamadelik (her an enerji üretimine hazır olma) bakımından sürekli üretim sağlayan fosil temelli elektrik üretim santrallerinin gerisindedir. Ancak bu konunun, yakın gelecekte depolamalı sistemlerin artması ile birlikte, üretilen enerjisinin üretildiği anda değil, sonra da kullanılabilecek olmasıyla aşılması gereken bir problem olmaktan çıkması beklenmektedir.

Rüzgar Enerjisi

Yenilenebilir kaynakların en önemli çeşitlerinden olan rüzgar enerjisi, güneş enerjisine benzer şekilde ancak daha erken bir zaman diliminden itibaren toplam küresel elektrik üretimindeki payını sürekli artırma eğiliminde olmuştur. 2022 verilerine göre küresel elektrik üretiminin %7,5'inin üzerinde bir kısmı rüzgar kaynaklı olarak gerçekleşmiştir [34].

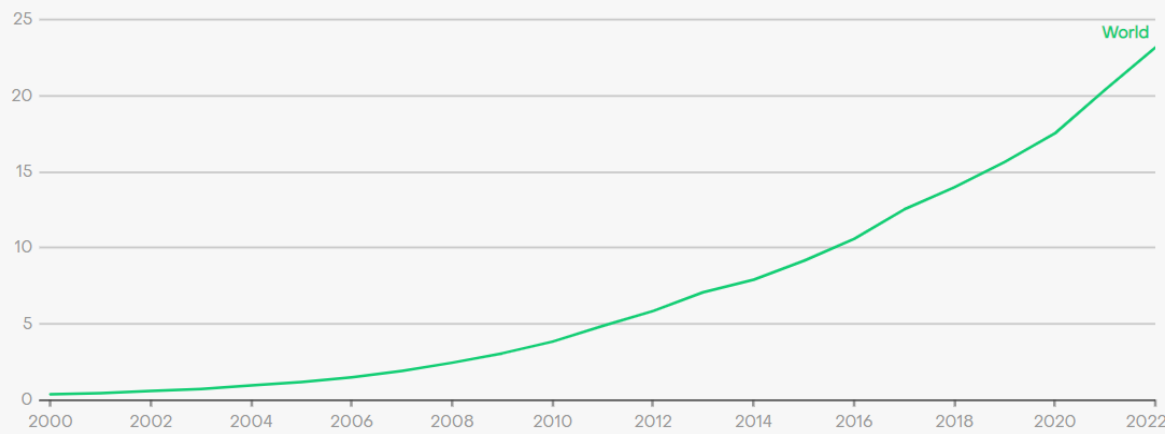


Şekil 5.6. Rüzgar enerjisinin toplam küresel elektrik üretimindeki payı [45]

Rüzgar türbinleri rüzgarın kinetik enerjisini toplamak için kanatlar kullanmaktadır. Rüzgar, kanatların üzerinden geçerek kaldırma kuvveti oluşturarak (uçak kanatlarındaki etkiye

benzer şekilde) kanatların dönmesine neden olmaktadır. Bıçaklar, elektrik üreten (üreten) bir elektrik jeneratörünü döndüren bir tahrik miline bağlanır. Buradan elde edilen mekanik enerji ise sonrasında alternatör gibi yardımcı ekipmanlar ile elektrik enerjisine çevrilmektedir.

Rüzgar enerjisi de tıpkı güneş enerjisinde olduğu gibi temiz ve doğrudan emisyon salımına sebep olmayan bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeple, karbonsuzlaştırma yolunda kullanılan önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. En önemli avantajı tükenmeyen ve hammadde ihtiyacı duymayan bir kaynak olan rüzgar ile üretim yapması olan rüzgar santralleri, yine de optimum üretim verimi sağlayabilmek adına bazı temel kabullere göre tasarlanarak inşa edilmektedir. Bu da 80 metre yükseklik için rüzgar hızının ortalama 6,5 m/sn olacak şekilde varsayımı ile gerçekleştirilmektedir. Daha yüksek hızlarda daha fazla güç üretilmektedir. Küresel ölçekte 90 metre ortalama yükseklik üzerinde rüzgar türbinleri ile ielde edilecek potansiyel elektrik enerjisi üretimi 872000 TWh olarak hespalanmıştır. Bu, 2020 yılı için toplam küresel elektrik tüketim oranı olan 23966 TWh'nin 36 katının da üzerinde bir potansiyel anlamı taşımaktadır [58].



Şekil 5.7. Rüzgar enerjisi kaynaklı doğrudan ya da dolaylı toplam salınan emisyon [56]

Rüzgar türbinlerinin en önemli katkısı iklim değişikliği ile mücadelede çok düşük emisyon yoğunluğu ile enerji üretebilme potansiyelidir. 2015 yılında yapılan bir araştırmaya göre, 2050 yılına kadar ABD elektriğinin %35'i rüzgardan üretilmiş olması durumunda, elektrik sektöründen ileri gelen sera gazı emisyonlarının %23 oranında azalacağı, yıllık 510 milyar kg CO_2 emisyonu veya 2013'e göre kümülatif olarak 12,3 trilyon kg CO_2 emisyonunun ortadan kaldırılacağı ve ayrı olarak su kullanımı da %15 azaltmış olacağı bulunmuştur [59].

Öte yandan rüzgar türbinleri, biyoçeşitliliğe etki anlamında kuş ölümlerine ve ayrıca gürültü oluşumuna sebebiyet vermesinden dolayı negatif çevresel etkilere de neden olabilmektedir. Ancak, inşaat öncesi dönemde gerçekleştirilen çevresel etki değerlendirme çalışmalarının bir kazancı olarak, rüzgar türbinleri sebebiyle yılda ölen kuş sayısı aşağılara çekilebilmektedir. Zira bu aşamada türbinler kuş göç yolları gibi parametreler dikkate alınarak reloke edilebilmektedir.

Ortalama bir rüzgar enerji çiftliği 350 metre ötesinde 35-45 dB arasında bir gürültü seviyesi oluşturmaktadır. Ancak bu miktarın insan sağlığına bir etkisi olmadığı farklı çalışmalarca ortaya konulmuştur [58].

Hidroelektrik Enerji

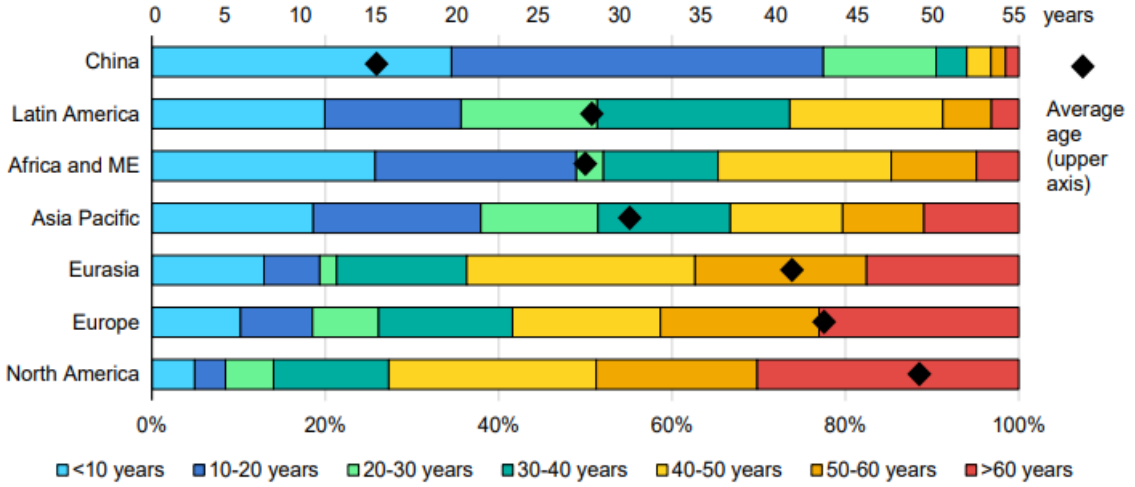
Rüzgar ve güneşe göre daha uzun sürelerdir faydalanılan bir yenilenebilir enerji türü olan hidroelektrik santraller, artan güneş ve rüzgar enerjisi kapasitesine rağmen hala en büyük yenilenebilir enerji kaynağı olmayı devam ettirmektedir. 2022 yılı itibariyle küresel elektrik tüketiminin %15'lik kısmı hidroelektrik kaynaklardan karşılanmıştır [45].

Geleneksel hidroelektrik projelerinde bir nehre baraj yapılarak kot farkı oluşturulmaktadır. Su, üst rezervuardan aşağıda kalan nehir bölümüne akarken, elektrik üreten jeneratörlere güç sağlayan türbinleri döndürmektedir.

Hidroelektrik, küresel elektrik üretim portföyünde önemli bir role sahiptir. Şu anda yalnızca en büyük temiz enerji kaynağı olmakla kalmamakta, aynı zamanda büyük rüzgar ve güneş enerji sistemlerindeki emreamadelik gerekliliklerini karşılamaya yardımcı olacak esnekliği de sağlamaktadır. Bu sebeple, dünyanın yeni hidroelektrik santrallerine ihtiyacı olsa da, birçok bölgede hidro kaynaklar halihazırda maksimum düzeyde inşa edilmiş ve operasyona geçirilmiştir. Bununla birlikte, potansiyelin olduğu diğer bölgelerde yeni projelerin ekolojik ve sosyal maliyetinin çok yüksek olacağı öngörülmekte, bu da yeni hidroelektrik santraller özelinde bundan sonrası için en büyük kısıtı oluşturmaktadır [34].

Öte yandan hiroelektrik santraller, yenilenebilir kaynaklar arasında geçmişi daha eskiye dayanan bir teknoloji içermesi sebebiyle de yıllardır kullanılmakta ve üretim sağlamaktadır. Ancak bu, aynı zamanda küresel hidroelektrik santrallerin ortalama yaşının diğer

yenilenebilir kaynaklara nazaran çok daha yüksek olmasına sebep olmakta (2020 yılı itibariyle ortalama hidroelektrik santral yaşı 32'dir), yaşlanan tesislerin yenilenmesi ve revizyonu için de ciddi yatırımlar gerekmektedir. Bu da önümüzdeki dönemde hidroelektrik santrallerin yenilenebilir enerji içindeki payı için olumsuz etki göstermesine neden olacaktır [60].



Şekil 5.8. Dünya'da bölgelelere göre hidroelektrik santral yaşları [60]

Hidroelektrik santraller, yenilenebilir üretim tesisleri içerisindeki payıyla doğru orantılı olarak, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir etki göstermektedir. Yukarıda bahsedilen bazı kısıtlar ve önümüzdeki dönemde yatırımları etkileyecek kısıtlara rağmen, IEA, 2030 itibariyle toplam hidroelektrik üretim kapasitesinin %17'nin üzerinde artarak 1555 GW'nin bir miktar üzerine çıkmasını öngörmektedir [60]. Yine de bu miktar, IEA'nin 2050 net sıfır senaryosu içerisinde değerlendirdiği durumlara ulaşılabilmesi açısından yeterli gelmemektedir. Buna göre hidroelektrik kapasitesinin 2030 yılında öngörülenden %45 daha fazla olması gerektiği hesaplanmaktadır.

Tüm bunlara rağmen, IEA'nın net sıfır emisyon dünyasında hidroelektrik, küresel elektrik güvenliğinin omurgası olarak değerlendirilmekte ve 2050 yılına kadar en uygun maliyetli, dağıtılabilir ve esnek düşük karbonlu elektrik teknolojisi seçeneği olduğu düşünülmektedir.

Diğer Yenilenebilir Kaynaklar

Jeotermal enerji, biyogaz, biyokütle gibi farklı yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlendirilse de, bu türler sahip oldukları farklı sınırlayıcı durumlar nedeniyle; rüzgar,

güneş ve hidroelektrik kaynakları kadar uygulama alanı bulamamış ve yaygınlaşamamıştır. Örneğin jeotermal enerji, 2019 yılı itibariyle dünyanın toplam üretiminde %0,5'lik bir paya sahiptir. Biyoenerji gibi diğer yenilenebilir yakıtlar ise bu oranın bir miktar üzerinde olsa da yine de düşük paylara sahiptirler [42]. Bununla birlikte, iklim değişikliği ile mücadele kapsamında ele alındığında, Jeotermal enerji santralleri elektrik üretmek için yakıt yakmamalarına rağmen, az miktarda kükürt dioksit ve karbondioksit açığa çıkarabilirler. Bu durum, onların diğer yenilenebilir kaynaklara göre iklim değişikliği ve yeşil enerji bağlamında dezavantajı olmaktadır. Yine de Jeotermal enerji santralleri, benzer büyüklükteki fosil yakıtlı enerji santrallerine kıyasla %97 daha az kükürt bileşikleri ve yaklaşık %99 daha az karbondioksit yaymaktadır [61]. Ayrıca, Jeotermal enerji santralleri, jeotermal rezervuarlarda doğal olarak bulunan hidrojen sülfürü uzaklaştırmak için yıkayıcılar kullanmaktadır. Çoğu jeotermal enerji santrali, kullandıkları jeotermal buharı ve suyu tekrar yeryüzüne enjekte etmektedir. Bu geri dönüşüm, jeotermal kaynağın yenilenmesine ve jeotermal enerji santrallerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu döngü aslında sürdürülebilir enerji tedariği için de önem arz etmektedir. Ancak, bu tip sürdürülebilir döngü iyi yönetilmediği durumda, jeotermal kaynağın devamlılığı sağlanamayabilir, bu da yenilenebilir bir kaynak olarak değerlendirilen jeotermal enerji için tükenme veya verim kaybı anlamına gelmektedir.

Jeotermal enerji santrallerinin bir diğer dezavantajı ise, belirli lokasyonlara inşa edilebilmeleridir. Jeotermal kaynaklardan faydalanan santraller için bu, lokasyon kısıtı olduğunu göstermektedir.

Biyogaz çeşitli atıkların (hayvansal ya da bitkisel) oksijensiz ortamda ayrışması sonucu ortaya çıkan bir gaz karışımıdır. Bileşiminde % 60-70 metan (CH_4), % 30-40 karbondioksit (CO_2), % 0-2 hidrojen sülfür (H_2S) ile çok az miktarda azot (N_2) ve hidrojen (H_2) bulunur [62]. Biyogaz işlemden geçirilerek biyometan elde edilmektedir. Ham biyogazın bu saflaştırılmış formu, doğal gaz yerine de kullanılabilmektedir. Biyometan üretimi sırasında CO_2, H_2O, H_2S ve diğer safsızlıklar giderilir ve geriye yüksek kalorili, saf bir gaz kalmaktadır. Bu yönüyle biyogaz ya da biyometan, fosil kaynak kullanımın olduğu doğalgaz yakıtlı santraller için de bir seçenek olabilmektedir. Bununla birlikte, büyük miktarlarda biyogaz eldesi için gerekli teknolojik gelişmeler hala olgunluğa erişmemiştir. Ancak, yeterli miktarda biyogaz ya da biyometan eldesi olması durumunda, bu yakıt, mevcut hatlar üzerinden halihazırda kurulu bulunan türbinlere iletilerek yüksek maliyetli yatırımlar

yapılmadan mevcut teknolojilerin kullanılabilmesine olanak sağlaması bakımından avantajlıdır.

5.2.2. Alternatif enerji yatırımları

Karbonsuzlaştıma ve iklim değişikliğinin bertarafı amacıyla elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan eldesi en önemli ve üzerinde yoğunlaşılan süreç olsa da, mevcut enerji kaynaklarının ötesinde alternatif kaynakların da elde edilmesi ve kullanılması için çalışmalar küresel ölçekte devam etmektedir. Bu alternatiflerin en önemlisi ise hidrojen eldesidir.

Hidrojen, düşük emisyonlu elektrik enerjisi üretimi için bir katkı sunsa da, asıl etkisi, dekarbonizasyon yolculuğunda özellikle enerji yoğun sektörlerin emisyon salımlarının azaltılmasına yardımcı olabilecek bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Bu bakımdan günümüzde çoğunlukla petrol rafinasyonunda ve gübre üretiminde kullanılan hidrojenin, temiz enerji geçişine önemli bir katkı sağlaması için ulaşım, bina ve enerji üretimi gibi şu anda neredeyse hiç bulunmadığı sektörlerde de benimsenebilecek potansiyelde olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, günümüzde düşük karbonlu enerji kaynaklarından hidrojen üretimi maliyetlidir. Bu sebeple halihazırda hidrojen üretimi için zorunlu olarak fosil yakıtlar tercih edilmekte ve bu da sürdürülebilirlik ve yeşil enerji yaklaşımı adına çelişki oluşturmaktadır. Benzer şekilde hidrojen kullanımı için gerekli altyapı kurulumu için geliştirmelerin hızı düşük devam etmektedir [63].

Hidrojen uzun dönemlerden bu yana bir enerji kaynağı olarak kullanılsa da, 2010'lu yılların sonundan itibaren, sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğine karşı verilen mücadelenin de etkisiyle dikkat çekmeye başlamıştır. Daha geniş ifade etmek gerekirse, hidrojenin iki şekilde daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Buna göre;

- Mevcut hidrojen kullanan uygulamalar için daha temiz ve alternatif hidrojen üretim metodlarının geliştirilmesi,
- Hali hazırda yakıta ihtiyaç duyan uygulama alanları için yeni bir seçenek olarak değerlendirilmesi, bu durumda hidrojenin saf haliyle ve yakıt hücresine dönüştürülerek kullanılabileceği ön görülmektedir.

Öte yandan hidrojen üretimi ile birlikte, yakıt hücresi biçiminde değerlendirilebileceğinden, yenilenebilir enerji kaynaklarının da uygulamalarda kullanılabilmesi daha olası hale gelecektir. Dolayısıyla hidrojen aslında bir enerji kaynağından çok enerji taşıyıcısı rolünü almaktadır [63].
Bu noktada dikkat edilmesi gereken nokta, hidrojenin elde edildiği metod ve bu metod için kullanılan enerjinin kaynağıdır. Bunun anlamlandırılabilmesi için de hidrojen renk spektrumu ortaya çıkmış ve hidrojen, kullanılan üretim türüne bağlı olarak hidrojene farklı renk isimleri verilmektedir. Ancak evrensel bir adlandırma kuralı yoktur ve bu renk tanımları zamanla, hatta ülkeler arasında bile değişebilmektedir.

Birkaç yıl önce ilk olarak yeşil ve gri hidrojen terimlerinin görünürlük ve kabul kazanmasının ardından, zamanla diğer renkler de bu dağarcığa eklenmişlerdir. Yeşil, temiz veya çevre dostu hidrojen terimleri birbirinin yerine kullanılmaktadır. Yeşil hidrojen yaygın olarak CO_2 emisyonu olmadan üretilen hidrojen olarak anılırken, gri hidrojen ise doğal gazdan gelen hidrojen olarak kabul görmektedir. Ancak Karbon Yakalama ve değerlendirme (CCUS) teknolojilerinin kullanıma sunulması, fosil yakıtlardan üretilse bile çok az veya neredeyse hiç CO_2 emisyonu olmadan hidrojen üretimini mümkün kılmış, sonrasında ise "Mavi hidrojen" terimi fosil yakıtlardan ve CCUS'tan üretilen hidrojeni ifade etmek için ortaya çıkmıştır [64].
Öte yandan sonrasında ortaya çıkan pembe, turuncu, mor, kırmızı gibi hidrojen renkleri için herhangi bir ortak fikir birliği olmamakla birlikte, bunların hem literatürde hem de pratikte kullanım alanları fazla değildir.

Burada üç önemli hidrojen rengi için açıklama yapmak gerekirse;

<u>Yeşil Hidrojen:</u>

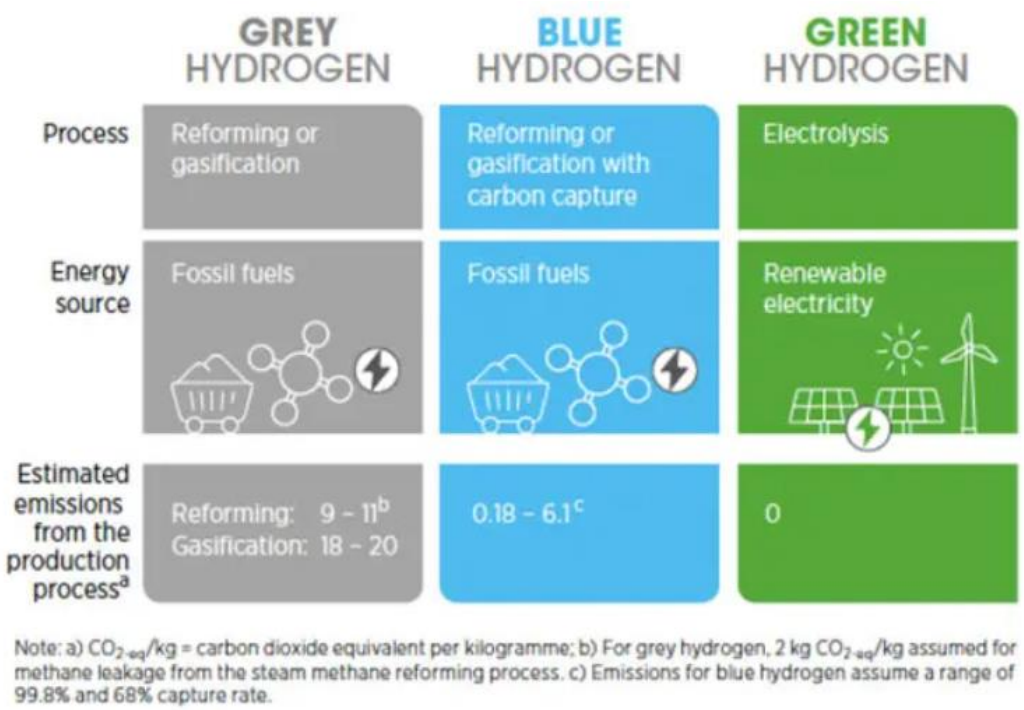
Yeşil hidrojen, suyu elektroliz etmek için,güneş veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen temiz elektriğin kullanılmasıyla elde edilmektedir. Elektrolizörler, suyu hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayırmak için elektrokimyasal bir reaksiyon kullanır ve bu süreçte karbon salımı gerçekleşmez.
Günümüzde üretilen hidrojenin oldukça küçük bir miktarı yeşil hidrojendir, zira üretimi için yalnızca yenilenebilir kaynakların kullanımı sebebiyle maliyetlidir. Ancak, önümüzdeki dönemde rüzgar ya da güneş enerjisinden elde edilen enerjinin fiyatının düşmesiyle, yeşil

hidrojenin maliyetinin de makul seviyelere geleceği öngörülmektedir. Öte yandan yeşil hidrojen, iklim değişikliği ile mücadele anlamında en önemli hidrojen türü olarak kabul görmektedir [65].

Mavi Hidrojen:

Mavi hidrojen, doğal gaz ile ısıtılmış suyu buhar formunda bir araya getiren özel bir işlem kullanılarak temelde doğal gazdan üretilmektedir. Bu işlem sonucu asıl çıktı hidrojen olmakla birlikte yan ürün olarak karbondioksit de üretilir. Dolayısıyla mavi hidrojenin tanımı, bu karbonu yakalamak ve depolamak için karbon yakalama ve depolamanın (CCS) kullanımını da içermektedir.

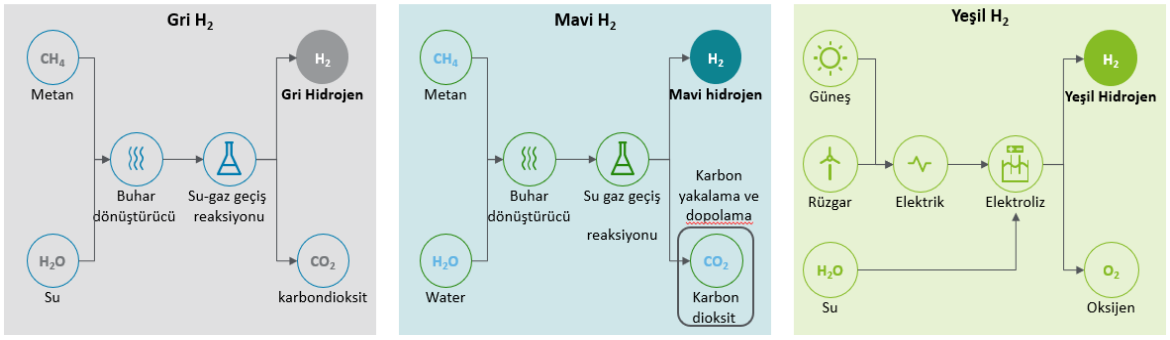
Bu özelliğinden dolayı mavi hidrojen, bazen 'düşük karbonlu hidrojen' olarak da tanımlanabilmektedir. Çünkü elde edildiği işlem sürecinde aslında sera gazlarının oluşumunu tamamen engelleyemez [65]



Şekil 5.9. Renk kodlarına göre Hidrojen türleri [66]

Gri Hidrojen:

Gri hidrojen, hidrojen üretiminin en yaygın şeklidir. Doğal gazdan veya metandan, buhar metan reformasyonu işlemi kullanılarak elde edilir ancak bu işlem esnasında oluşan sera gazları yakalanmadan salımı gerçekleşir. Dolayısıyla esasında gri hidrojen ve mavi hidrojen aynıdır ancak gri hidrojende karbon yakalama ve depolama kullanılmaz. Dolayısıyla elde edilen hidrojenin iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilirlik bağlamında yeterince katkısı olmamaktadır [65].



Şekil 5.10. Hidrojen türlerinin üretim metodlarının şematik anlatımı

Bu noktada hidrojen üretim tekniklerinin de açıklanması önem arz etmektedir.

Buhar metan reformasyonu (SMR), doğal gazın ana bileşeni olan metandan ve diğer hidrojen içeren kimyasallardan hidrojen üretme yöntemidir. SMR, hidrojen gazı, karbon monoksit ve karbon dioksit üretmek için metanın bir katalizör varlığında buharla reaksiyonu şeklinde gerçekleşmektedir.

Diğer bir hidrojen elde etme yöntemi ise elektrolizdir. Suyu elektrik kullanarak hidrojen ve oksijene ayırma işlemine elektroliz denilmektedir. Alkali elektroliz, polimer elektrolit membran (PEM) ve katı oksit elektroliz hücreleri (SOEC'ler), elektroliz teknolojilerinin örnekleri olarak sayılabilmektedir.

Alkali elektroliz, hidrojen üretmek için en eski ve en yaygın kullanılan elektroliz teknolojisidir. Yüksek sıcaklık ve basınçta bağımsız olarak çalışır ve verimi düşüktür fakat iyi bilinen bir teknolojidir ve uzun çalışma ömrüne sahiptir.

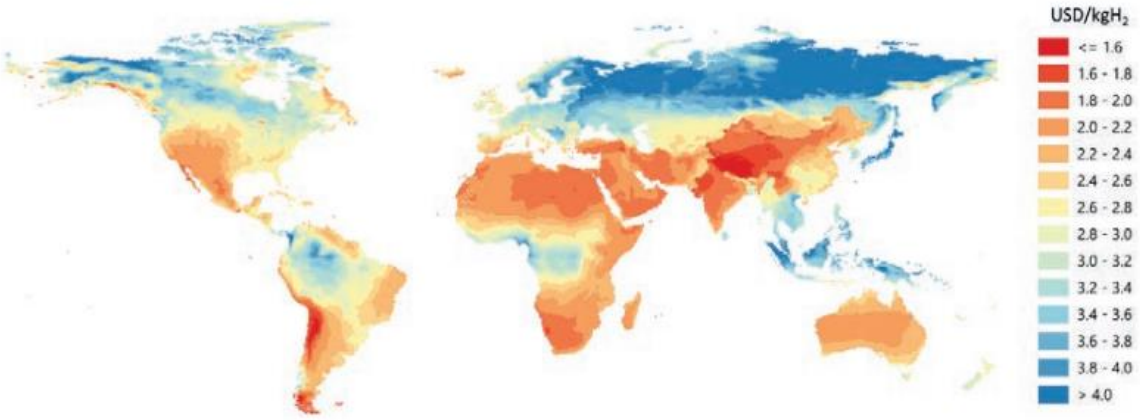
PEM elektrolizi ise, alkalin elektrolizden daha verimlidir ve daha düşük sıcaklık ve basınçlarda çalışmaktadır. Küçük ölçekli uygulamalar için idealdir. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birleştirilebilir.

SOEC'ler hem hidrojen üretimi hem de yakıt hücresi uygulamaları için kullanılabilen daha yeni bir yüksek sıcaklık olmakla birlikte enerji girdisi açısından büyük verimlilik ve esneklik sağlamakta ancak henüz gelişme aşamasındadırlar [67].

Genel olarak elektroliz, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre biçimde uygulamaya konulduğunda umut verici bir hidrojen üretim sürecidir. Bununla birlikte, elektroliz ekipmanının maliyeti ve verimliliği, hidrojenin sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak yaygın şekilde kullanılabilmesi için aşılması gereken temel engeller olmaya devam etmektedir, bu sebeple de yenilenebilir enerji maliyetlerinin düşmesi ve teknolojinin yaygınlaşması ile birlikte, hidrojen üretim maliyetleri de azalacak ve böylece daha fazla kullanım alanı bulunabilecektir.

Hidrojen eldesinin biyolojik olarak ilerletilmesi de mümkündür ve bu yöntem, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji çözümleri sunmaktadır. Organik substratların veya suyun hidrojen gazına dönüştürüldüğü proseslerde farklı mikroorganizmalar kullanılmaktadır. Ancak bu süreçler hala araştırma ve geliştirme aşamasındadır ve büyük ölçekli hidrojen üretimi için ekonomik olarak uygun hale getirilmeye henüz çok uzak bulunmaktadırlar. Hidrojen üretimine yönelik biyolojik teknikler büyük umutlar vaat etse de, organik materyallerin düşük hidrojen verimi ve kontaminasyon gibi çeşitli problemlerin ve sınırların, bunların hayata geçirilmesinden önce çözülmesi gerekmektedir [67].

Elektroliz sürecinde yeşil hidrojen üretimi için güneş ve rüzgar enerjisinden faydalanılacak ülkeler arasında Türkiye bulunduğu konum ve güneşlenme potansiyeli bakımından avantajlı bir noktada durmaktadır. Gelecek yıllar içinde birim hidrojen üretimi başına maliyetin 2 dolar altına düşeceği öngörülmektedir [63].



Şekil 5.11. Rüzgar ve güneş temelli hibrit sistemlerle hidrojen üretim maliyet öngörüsü [63]

Tüm bu bilgiler ışığında, iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilir enerji anlamında hidrojenin, hidrojeni potansiyel olarak kullanabilecek sektörlerin karbonsuzlaşma adımları için değerli bir kaynak olacağı açıktır. Bununla birlikte, farklı türde hidrojen üretim teknikleri göz önüne alındığında, özellikle karbonsuzlaşma hedefleriyle paralel biçimde yeşil hidrojen üretimine yoğunlaşılacağı beklenebilir. Fakat, mevcut durumda üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle kullanım potansiyelini yeterince sergileyemeyen hidrojen için, iklim taahhütlerinin de baskısıyla önümüzdeki dönemin çok daha parlak geçeceği açık şekilde görülebilmektedir.

5.2.3. Karbon yakalama ve değerlendirme teknolojileri

Yenilenebilir enerji sistemleri, hidrojen gibi alternatif yakıtların eldesi ve kullanımı gibi, sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği bağlamında fayda getirecek uygulamalar olsa da, pek çok durumda bu uygulamalar sera gazı salımını sıfırlamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması ya da giderilmesine yönelik uygulamalar için salınan karbonun yakalanması ve mümkünse değerlendirilebilmesi de iklim değişikliğine yönelik sürdürülebilirlik yaklaşımı açısından önemlidir. Sera gazlarının oluşturduğu emisyonlarla ilgili olarak karbon yakalama ve karbondioksitin uzaklaştırılması terimlerinin iki farklı yaklaşım olduğunu vurgulamak gerekmektedir.

Burada karbon yakalama denildiğinde bahsi geçen karbon salımı, endüstriyel prosesler ya da benzeri gerekçelerle salınan CO_2'yi temel almaktadır. Ancak karbondioksitin

uzaklaştırılması ya da giderilmesi, kaynağından bağımsız olarak atmosferde hali hazırda var olan CO2'yi ifade eder. Dolayısıyla her iki kavram birbirinden farklıdır [68].

CCS (Carbon Capture and Storage), CO_2 emisyonlarını "nokta kaynaklardan", yani fosil yakıt kullanımından veya endüstriyel proseslerden doğrudan yakalayan ve CO_2'nin daha sonra uzun bir süre boyunca depolandığı prosesleri ifade etmektedir. CCU (Carbon Capture and Utilization), CO_2'yi yakaladıktan sonra sentetik yakıtlar, kimyasallar ve malzemeler gibi ikincil işlemlerde kullanan süreçleri göstermektedir [69].

Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), küresel enerji ve iklim hedeflerine ulaşmada önemli ve çeşitli rol oynayabilecek bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. CCUS, yakıt olarak fosil yakıtlar veya biyokütle kullanan enerji üretimi veya endüstriyel tesisler de dahil olmak üzere büyük kaynaklarda gerçekleşen proseslerden ileri gelen CO_2'nin yakalanmasını içermektedir. Bunun ötesinde, CO_2 doğrudan atmosferden de yakalanabilmektedir. Elde edilen CO_2 yerinde kullanılmayacaksa; sıkıştırılmakta ve boru hattı, gemi, demiryolu veya kamyon gibi farklı iletim araçlarıyla çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere taşınabilmektedir. Ancak kullanımı yapılmayacaksa, kalıcı olarak depolanabilmesi adına derin jeolojik oluşumlara (tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları veya tuz oluşumları gibi) enjekte edilebilmektedir [70].

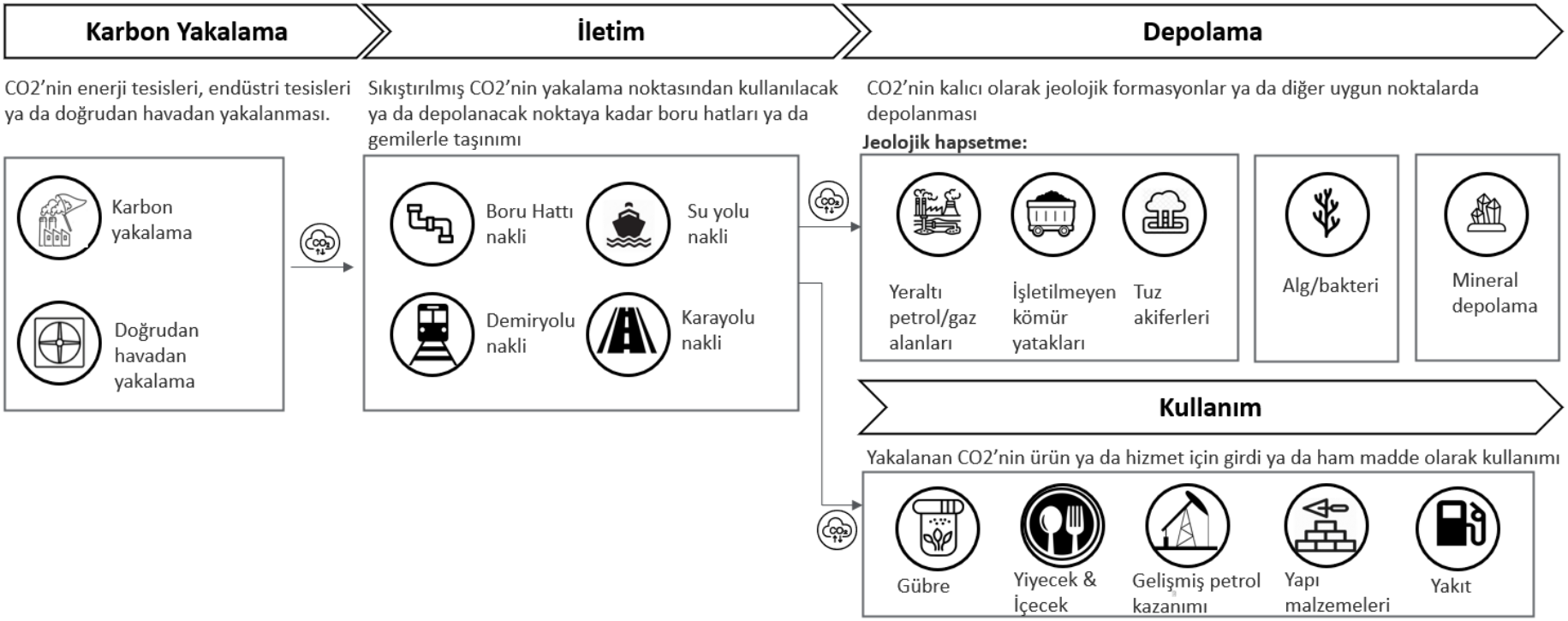
Bu şekilde karbonun yakalanması, sonrasında taşınması ya da iletilmesi ile son noktada depolanması veya kullanılacaksa, hammadde olarak değerlendirileceği noktada yeni ürün oluşumunda yer verilmesi ile oluşturulan değer zincirinin özeti, Şekil 5.12. üzerinde şematize edilmiştir.

Karbondioksitin Yakalanması

Seragazlarının en büyük kısmını oluşturan karbondioksitin yakalanabilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar, yanma süreçlerinin öncesinde ya da sonrasında kullanılabilmektedirler. Özetle ifade etmek gerekirse, yanma sonrasında ortaya çıkan karbondioksitin tutulması için solventler gibi bazı kimyasallardan yararlanılabilinmektedir. Yanma öncesinde ise yakıt gazlaştırılarak beslenir ve benzer şekilde kimyasallar yardımıyla CO_2 giderimi yapılabilir. Öte yandan, yanma sırasında fazlaca oksijen beslemesi yapılarak

CO_2 emisyon akışının daha kolay yakalanabilir hale getirilmesi de uygulanan yöntemlerdendir [68].

CO_2 yakalama, çeşitli endüstriyel proseslerin parçası haline gelmiş ve buna bağlı olarak, CO_2'yi baca gazı akışlarından ayırmaya veya yakalamaya yönelik teknolojiler, onlarca yıldır mevcut şekilleriyle ticari olarak da değerlendirilmektedirler. En gelişmiş ve yaygın olarak benimsenen yakalama teknolojileri, kimyasal emilim ve fiziksel ayırmadır; diğer teknolojiler arasında membranlar ve kimyasal döngü veya kalsiyum döngüsü gibi alternatifler de yer almaktadır [70].



Şekil 5.12. Karbon Yakalama ve Kullanma Süreçlerine Ait Değer Zinciri Gösterimi

Çizelge 5.2. Bazı CO2 yakalama teknikleri [70]

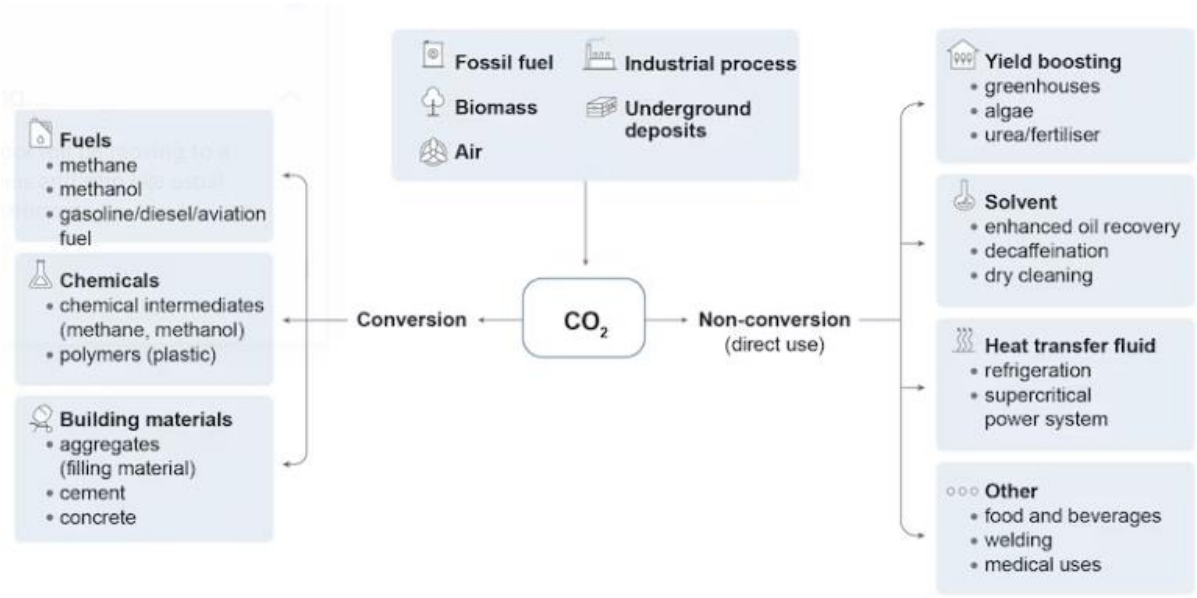
Yöntem	Açıklaması
Kimyasal Absorbsiyon	CO_2 ile kimyasal bir çözücü (etanolamin bileşikleri gibi) arasındaki reaksiyona dayanan işlemdir. En gelişmiş CO_2 ayırma tekniğidir.
Fiziksel Ayırma	Fiziksel adsorpsiyon katı bir yüzeyden (örneğin aktif karbon, alümina, metalik oksitler veya zeolitler) yararlanırken, fiziksel absorpsiyon sıvı bir çözücüden (örneğin Selexol veya Rectisol) yararlanır. Bir adsorban aracılığıyla yakalandıktan sonra CO2, artan sıcaklık veya basınç yoluyla ayrıştırılır.
Membran Ayırma	CO_2'nin geçmesine izin veren ancak diğer gazları gaz akışında tutmak için bariyer görevi gören, yüksek CO_2 seçiciliğine sahip polimerik veya inorganik membranlar ile gerçekleştirilir.
Kalsiyum Döngüsü	İki ana reaktör kullanarak yüksek sıcaklıkta CO_2 yakalamayı içerir. Birinci reaktörde kireç (CaO), kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşturmak üzere bir gaz akışından CO_2'yi yakalamak için sorbent olarak kullanılır. $CaCO_3$ daha sonra yeniden üretildiği ikinci reaktöre taşınır, böylece kireç ve saf bir CO2 akışı elde edilir. Kireç daha sonra ilk reaktöre geri gönderilir.

Karbondioksitin Taşınması, Kullanılması ve Depolanması

Karbondioksit, yakalanmasının ardından yeniden değerlendirileceği veya depolamasının yapılacağı yere doğru taşınmak zorundadır. Bunun için farklı alternatifler olsa da büyük ölçekte taşıma yapılabilmesi için boru hattı ya da gemilerle taşımacılık yapılabileceği gibi, daha küçük ölçekler için karayolu ya da demiryolu da kullanılabilmektedir.

CO_2'nin gemiyle taşınması, boru hatlarına göre daha kullanışlı bir seçenek olabilmektedir. Gemiyle taşıma durumunda elde edilecek esneklik aynı zamanda CO_2 hacimleri büyüdükçe daha sonra bağlanabilecek veya daha kalıcı bir boru hattı ağına dönüştürülebilecek CO_2 yakalama merkezlerinin gelişimini de kolaylaştırabilmektedir.

CO_2, pek çok farklı sektör için yeniden kullanılabilir bir kaynaktır. Buna göre Uluslararası Enerji Ajansı'nın yapmış olduğu derleme Şekil 5.13. üzerinde gösterilmiştir:



Şekil 5.13. Karbondioksitin kullanım alanları [70]

Bir diğer seçenek olan depolama konusunda ise, karbondiksitin yeniden kullanımı gibi geniş alternatifler bulunmamaktadır. Zira, karbondioksit depolmaası için kullanılacak alanın gazı hapsedebilecek bir tabaka ile kaplı jeolojik rezervuarlardan oluşması gerekmektedir. Bu rezervuar türleri, derin tuz oluşumları, tükenen petrol ya da gaz rezervuarları olabilir. CO_2, depolanmak üzere bir yere doldurulduğunda genellikle öncesinde sıvılaştırılır ve sonrasında

enjeksiyon işlemi yapılır. Bu sebeple karbondiksitin sıvı formda kalabilmesi için 800 metreden daha büyük derinliklerde depolanması önemlidir [70].

5.3. Günümüzde Karbonsuzlaştırma Yöntemlerinin Kullanımı

Yenilenebilir enerji kullanımı, alternatif yakıtlar ve karbon tutma sistemleri gibi metodlarla iklim değişimine yönelik çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımlarının uygulama alanları, gün geçtikçe daha fazla yer bulmaya başlamış ve uygulama alanları da genişlemiştir. Bunun en önemli etkisi, karbon yoğun sektör olan enerji sektörü ve bilhassa elektrik enerjisi üretimidir. Özellikle Paris iklim anlaşması sonrasında gündeme gelen net sıfır hedefleri ve görece kısa vadeli terminler, emisyon salımının azaltılması, mevcut emisyon yoğunluğunun düşürülmesi ve en nihayetinde sıfır emisyonlu faaliyetlere geçişi kapsamaktadır. Bununla birlikte, halihazırda bu geçiş sürecinde zamana ihtiyaç duyan alanlar ve konular için de karbon yakalama ve depolama sistemleri bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak, CO_2 yakalama çözümleri, özellikle çimento, çelik ve kimya endüstrileri için ve negatif emisyonlar (daha önce salınan emisyonların giderimi) sağlamak için gerekli olsa da, ancak ilerlemesi gereken hızın çok altındadır. Fakat, özellikle yenilenebilir enerjiye geçiş konusunda hızlı bir iyileşme olduğu açıktır. Zira 2000 yılı ile kıyaslandığında rüzgar, güneş, biyoenerji ve hidroelektrik üretimi dikkate alınırsa, küresel yenilenebilir enerji kullanımında büyük ilerleme olduğu görülebilir. 2000 yılında toplam 16,96 GWh'lik bir kurulu güce sahip olan rüzgar enerjisi, 2022 yılı sonu itibariyle 900 GWh'ye yaklaşan miktara ulaşmıştır. Benzer şekilde 2000 yılında yalnızca 1,23 GWh'lik kurulu güce sahip olan güneş enerjisi de, 2022 yılı itibariyle 1062 GWh'lik bir kurulu güce ulaşmıştır [56]. Fosil yakıtlarda ise durum tersidir. Küresel boyutta ele alındığında, kömür yakıtlı elektrik enerjisi üretim santrallerinin 2000 yılında toplam kurulu gücü 1085 GWh iken, 2022 sonu itibariyle 2 katından daha az bir artış ile 2108 GWh'ye ulaşmıştır [56]. Dolayısıyla yenilenebilir kaynakların payı, bu geçiş dönemi içerisinde artarak devam ederken, artan enerji talebine rağmen, kömür santrallerinin payındaki artış oldukça sınırlı kalmıştır. Bununla ilgili olarak enerji şirketlerinin büyük çoğunluğu, önümüzdeki dönemde fosil yakıt temelli teknolojilere yatırım yapmaktan kaçınarak, yalnızca yenilenebilir kaynaklardan oluşan bir yatırım stratejisi benimsemişlerdir. Bu durumun, mevcut ve yürürlüğe girecek pek çok mevzuatın da etkisiyle birlikte ivmelenerek artacağı ön görülebilir. Ülkemizde de benzer şekilde pek çok farklı enerji üretim şirketi, gelecek yıllarda yapacağı yatırımlar için yenilenebilir enerji kaynaklarını tercih edeceklerini beyan etmişlerdir.

Alternatif yakıtlara bakıldığında ise, karbon yakalama ve kullanma sistemlerine benzer şekilde sınırlı bir miktar göze çarpmaktadır. Özellikle hidrojenin değerlendirilmesi bu noktada önemli olmakla birlikte, küresel hidrojen kullanımı 2022 yılında bir önceki yıla nazarn %3'lük bir artışla 95 milyon ton civarına ulaşmıştır [69]. Henüz elektrik enerjisi üretimi için yeterince faydalanılamasa da, özellikle 2050 yılı itibariyle toplam hidrojen kullanımın 74 milyon tondan fazla bir miktarının yalnızca elektrik üretimi için tüketileceği değerlendirilmektedir. Bunun karşılığı olarak, küresel enerji ihtiyacının %1'lik kısmının hidrojen ile elde edileceği ön görülmektedir [71].

Karbon yakalama ve değerlendirme yöntemlerine bakıldığında ise, 2022 yılı itibariyle toplam 45 milyon ton CO_2'nin yakalandığı, ancak bunun yalnızca 1 milyon tonluk kısmının elektrik enerjisi üretiminden ileri geldiği tespit edilmiştir. Bu yöntem, daha ağırlıklı olarak diğer endüstriyel faaliyetlerde kullanılmakla birlikte, önümüzdeki yıllar içinde elektrik enerjisi üretiminden ileri gelen CO_2 yakalama miktarının artacağı düşünülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı öngörülerine göre 2030 yılı itibariyle toplam yakalanacak CO_2'nin 1 milyar tonu aşması, bunun %18'lik kısmının elektrik enerjisi üretimi için faaliyet gösteren tesislerden oluşacağı tahmin edilmektedir [70].

6. BULGU VE TARTIŞMA

Çalışma boyunca elde edilen veriler eşliğinde, çevresel sürdürülebilirlik açısından elektrik enerjisi üretimine ait sektör temsilcilerinin, farklı alternatiflerle beraber karbonsuzlaştırma çalışmalarını hızlandırmasının ve geçiş dönemi için bir yol haritası oluşturarak, önceliklendirme değerlendirmesini yapmalarının gerektiği bir gerçektir.

Ülkemizde ve dünyada enerji, diğer sektörlerden farklı olarak, hem temel ihtiyaç hem de zaruri olarak arzının aksamadan gerçekleştirilebilmesi gerekli bir kaynak olması sebebiyle, çeşitli kurum ve kuruluşlar ile karar alma mekanizmalarının bir arada yönlendirerek kontrol ettiği bir kaynaktır.

Bu bakımdan elektrik enerjisi üretimi için de gelecek öngörüsü içerisinde hareket edilirken, farklı mekanizmalar ve kısıtların ele alınarak değerlendirme yapılması gerekmektedir. Hem ulusal hem de uluslararası koşulların bir arada sağlanması gerektiği unutulmadan, stratejiler bu doğrultuda belirlenmelidir. Zira elektrik enerjisi üretimi, diğer sektörler için de temel kaynaktır. Bu sebeple, sektörün etkilenmesine neden olacak herhangi bir etken, dolaylı da olsa, diğer sektörleri de etkileyecektir.

Bu sebeplerden dolayı, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması adına, iklim değişikliğine yönelik alınacak tedbirler özelinde, elektrik enerjisi üretimine temelde etki edecek iki mekanizma olduğu söylenebilir.

Bunlar:
1- Yasal düzenlemeler,
2- Teknolojik gelişmeler'dir.

Çalışma kapsamında gerçekleşen araştırmalar neticesinde elde edilen bulgular ve bu bulgulardan elde edilen sonuçlar ile tartışma, mekanizmalar dikkate alınarak bu bölümde değerlendirilmiştir.

Türkiye, 2023 yılında, 26. Taraflar Konferansı'nda Tarafların Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ve Paris Anlaşması'na ek olarak kabul ettiği Glasgow İklim Mutabakatı bağlamında güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'nı

açıklamıştır [72]. Buna göre, 2012 yılı referans alınarak, 2053 yılında ülkemizin net sıfır karbon salımına sahip olacağını tahhüt etmiştir.Bu doğrultuda, pek çok politika belgesi yayımlamış ve mevzuat düzenlemeleri gerçekleştirmiştir.

Bunların en önemlileri aşağıda sıralanmıştır;

- On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)
- Çevre Kanunu (1983)
- Enerji Verimliliği Kanunu (2007)
- Florlu Sera Gazlarına İlişkin Yönetmelik (2022)
- Ozon Tabakasını İncelten Maddelere İlişkin Yönetmelik (2017)
- Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik (2014)
- Stratejik Çevresel Değerlendirme Yönetmeliği (2017)
- Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ (2014)
- Sera Gazı Emisyon Raporlarının Doğrulanması ve Doğrulama Kuruluşlarının Akreditasyonu Hakkında Tebliğ (2017)
- Orta Vadeli Program (2023-2025)
- Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi (2010-2023) ve Eylem Planı (2011-2023) (güncellenmekte)
- Ulusal İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2011-2023) (rgüncellenmekte)
- Enerji Verimliliği Stratejisi ve Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023)
- Ulusal Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı (2053)
- Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021)
- Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020 - 2035)
- İklim Şûrası Kararları (2022)
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023)

Öte yandan, Uzun Vadeli Düşük Emisyonlu Kalkınma Stratejisi (Uzun Vadeli Strateji), İklim Kanunu, Yerel İklim Değişikliği Eylem Planı Yönetmeliği, Uzun Vadeli İklim Değişikliği Stratejisi, Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı, Sürdürülebilir Tüketim ve Üretim Stratejisi, Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi ve Eylem Planı gibi plan ve mevzuatların da yakın zamanda yürürlüğe koyulması hedeflemektedir.

Yasal düzenlemeler dikkate alındığında, elektrik enerjisi üretiminin arz sürekliliğini sağlamak adına iklim risklerine karşı ve aynı zamanda karbonsuzlaştırma amacıyla olumsuz

iklim etkilerini en aza indirecek düzenlemelerle faaliyette bulunması için, bir denge stratejisinin güdülmesi gerektiği bir gerçektir. Nitekim, ülkemiz de, dünyadakine benzer biçimde, bu denge stratejisi ile hareket etmekte ve fosil yakıtlardan çıkılması yolunda, geçiş dönemi süresince yenilenebilir kaynakları teşvik etmektedir [72].

Bununla ilgili olarak, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destek Mekanizması (YEKDEM) ve Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) Yönetmeliği ile birlikte güneş ve rüzgar enerjisi öncelikli olmak üzere, yenilenebilir enerji yatırımlarına hız verilmesi için başlatılmış uygulamalardır [73].

Öte yandan, ihracat pazarlarımızdan olan Avrupa Birliği de iklim değişikliği ve çevresel sürdürülebilirlik adına öenmli mevzuatsal düzenlemelere gitmektedir. Bu durum, mevzuata uyum için ülkemizdeki yasal düzenlemeleri de etkilemektedir. Teknolojik gelişmeler ele alındığında ise çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği etkilerinin azaltılması adına son yıllarda önemli ilerlemelerin olduğu açıktır.

Fosil yakıtlardan çıkmak için ihtiyaç duyulan süre boyunca devam edecek olan geçiş döneminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve hidrojen gibi alternatif enerji kaynaklarının ilk kurulum ve operasyonel maliyetlerinde iyleşmeler dikkat çekmektedir. IRENA ve IEA gibi otorite raporlarından görüldüğü üzere, güneş temelli elektrik enerjisi için ihtiyaç duyulan fotovoltaik panel fiyatları, 2010 yılından bu yana %80 civarında düşüş göstermiştir. Benzer şekilde, panellerde kullanılan hücre verimlilikleri de 2000 yılındaki ortalama %32'lik değerden, %47'nin üzerine çıkmıştır [53]. Dolayısıyla güneş temelli elektrik enerjisi üretimi için hem maliyet avantajı hem de verimlilik artışının ortaya çıkmış olduğu görülmektedir. Rüzgar enerjisi için de benzer bir seyir görülmektedir. Avrupa için 2010 yılında rüzgar santrallerinden tedarik edilen elektriğin ortalama birim maliyeti 0,137 $/KWh iken, 2022 yılında bu değer 0,045 $/kWh'ye kadar gerilemiştir [74]. Buna en büyük etki, rüzgar türbini alanında görülen teknolojik gelişmelerdir. Teknolojik gelişmelerle birlikte rüzgar türbinlerinin üretim güçleri de artmış, 2023 yılı ortasında Çin'de devreye giren enerji tesisinde yer alan türbinler 16 MW kapasiteye kadar ulaşmışlardır [75].

Yalnızca 10 yıl öncesine kadar benzer bir kapasite için en az dört farklı türbin ihtiyacı olduğu göz önüne alındığında, ilerlemenin ne kadar hızlı olduğu da açıkça ortaya çıkmaktadır. Diğer yenilenebilir kaynaklarda da, maliyet anlamında aşağı yönlü eğilimler görülmektedir. Bu

maliyet düşüşü tıpkı rüzgar ve güneş temelli üretimlerde olduğu gibi, sürekli iyileşen ve olgunlaşan teknolojilerden ileri gelmektedir.

Hidrojen gibi alternatif yakıtların da gelişmesiyle çevresel sürdürülebilirlik özelinde önemli adımlar atılmaktadır. 2022 yılı itibariyle küresel ölçekte 95 milyon tonluk hidrojen kullanımı gerçekleşmiş olsa da, bunun çok az miktarı elektrik enerjisi üretimine katkı sağlayabilmiştir. Yine de hidrojen elektrik üretimi için kullanılan gaz türbinlerinde, doğalgaz gibi diğer yakıtlarla karıştırılarak kullanılmaya başlanmıştır. 2023 yılında Güney Kore'de 80 MW kapasiteye sahip gaz türbini için %60'lık hidrojen karışımı kulllanılarak üretim yapılabilmiştir [71].

Hidrojenin kömür ve doğalgaz kullanan elektrik üretim tesislerinde ana yakıtla birlikte kullanılmasıyla emisyon salımlarında önemli azalış meydana getireceği açıktır. Ancak, yeşil hidrojen üzerinden değerlendirildiğinde, enerji sektörü genelinde hidrojenin fayda-maliyet seviyelerinin makul düzeylere gelmesi zaman alacaktır.

Hidroelektrik santraller, potansiyelin değerlendirilmesi noktasında diğer yenilenebilir teknolojilere nazaran daha olgun seviyede bulunmaktadırlar. Öte yandan, teknolojik gelişmelerle birlikte kapasitelerinde artışlarının olabileceği değerlendirilebilir. Ancak, hidroelektrik santrallerin sürdürülebilirlik kapsamında sosyal ve biyoçeşitlilik etkisi, diğer yenilenebilir teknolojilere göre daha yüksektir ve bu onlar için bir dezavantaj da oluşturmaktadır.

Karbon yakalama ve değerlendirnme teknolojileri henüz gelişme aşamasında olsa da, önümüzdeki dönemde seragazlarının azaltılması için önemli araçlardan birisi haline geleceği beklenmektedir. IEA raporları da halihazırdaki 45 milyon ton CO2 yakalama kapasitesinin, küresel ölçekte 300 milyon ton CO2 değerini aşacağını ön görmektedir. Öte yandan yakalanan CO2'nin farklı sektörlere hammadde girdisi olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik kavramı için önemli bir konu olan döngüselliğe katkı sağlayacaktır. Elektrik enerjisi üretimi sonucu ortaya çıkan karbon salımının, karbon yakalama teknolojileri yardımıyla tutularak farklı sektörler için hammadde olarak kullanımı mümkündür. Bu durum yalnızca çevresel sürdürülebilirlik ya da iklim değişikliği için değil, sürdürülebilirliğin finansal ve yönetişim kısımları için de faydalı olabilecektir.

Dolayısıyla, tüm dünyada ve ülkemizde, çevresel sürdürülebilirlik ve iklim etkilerini en aza indirme amacıyla bir yol haritası ortaya konulmuş, bu doğrultuda yasal düzenlemeler yapılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda, ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ve yeni teknolojiler ile birlikte, elektrik enerjisi üretiminden kaynaklı seragazlarının en önemli sebebi olan fosil yakıtlardan çıkış için çalışmalar hız kazanmıştır.

Bu dönüşüm sürecinde, fizibilite, piyasa koşulları ve enerji güvenliğini gözeterek, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji potansiyelinin mümkün olan en üst düzeyde kullanılması önem arz etmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, büyük bir kümeyi temsil eden enerji sektörü içerisindeki elektrik enerjisi üretim faaliyeti ile, iklim değişimine yönelik çevresel sürdürülebilirlik çalışmaları arasındaki ilişki, birbirleriyle olan bağlantılar ve sektör bazlı olarak iklim değişikliğine yönelik pozitif katkı sağlayabilecek uygulamalar, farklı kaynaklardan elde edilen veriler ve istatistiki bulgular eşliğinde incelenmiştir.

Hem ülkemizde hem de dünyada, elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların payının giderek azaldığı, buna karşın düşük emisyonlu üretim temelinde yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminin hız kazandığı görülmektedir. Buna rağmen fosil yakıtların payının hala yenilenebilir kaynakların üzerinde olduğu da bir gerçektir. Bu durum, elektrik enerjisi üretimi özelinde iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı gösterilen çaba karşısında en büyük engeli oluşturmakla kalmayıp, sürecin çözümüne ulaşmayı daha da zorlaştırmaktadır. Çalışma içinde çeşitli kaynaklardan derlenen bilgilerden de görüldüğü üzere, fosil yakıtlar seragazlarının en büyük müsebbibi olmakla birlikte, sera gazları da iklim değişikliğine etki eden en önemli girdidir.

Paris iklim anlaşması gibi uluslararası regülatif temeller, kısa-orta dönemde seragazlarının azaltılmasına yönelik gösterilen çabanın en büyük destekçileridir. Zira, yerel ve bölgesel mevzuatların düzenlenmesinde, ülkeler üzeri anlaşmalar yol gösterici ve hedef belirleyici olmaktadır. Bu doğrultuda, Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerini yerine getirmek üzere ülkeler kendi stratejilerini belirleyerek uygulamaya geçirmek durumunda kalmışlardır. Ancak burada önemli olan, yapılacak uygulamaların terminleri ve alacağı süredir. Bu sebeple seragazlarının azaltılması hususunda ülkelerin bir an önce harekete geçmesi önemlidir.

Regülatif düzenlemelerden öte, teknolojik iyileştirmeler, yenilenebilir kaynaklara geçiş gibi inovatif ve sistematik değişiklikleri düşünerek, iklim değişikliğne karşı geniş bir perspektifle hareket edilmesi doğru olacaktır. Henüz gelişme aşamasında bulunan karbon yakalama ve depolama çözümlerinin orta vadede göstereceği gelişim de, kısa vadede enerji portföyünün yenilenebilir kaynaklara dönüştürülmesi kadar önemlidir.

Bu noktada, elde edilecek karbon türevlerinin, farklı biçimlerde ham madde olarak değerlendirlebilir olması da, sürdürülebilirlik perspektifinin döngüsellik kısmında yer alacak, iklim değişikliğine karşı katkı sağlanırken, yeni problemlerin yaratılmasının da önüne geçilecektir.

Arz-talep dengesinin önem arz ettiği ve regülatif hassasiyetin yüksek olduğu sektörde, karbonsuz üretime geçiş döneminde optimum noktanın yakalanması ve stratejik yol haritasının belirlenerek uygulamaya konulması elzemdir. Sürdürülebilirlik kavramı da göz önünde bulundurulduğunda, elektrik enerjisinin hem arz güvenliği hem de çıktısının diğer sektörlerde daimi olarak kullanılması gerekliliği, sistemin işleyişini mümkün olan en kesintisiz biçimde gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Bu da, temelde kaynakların korunması ve asgari iklim etkisi ile mümkün olabilecektir.

Günümüzde çok daha bağlı hale geldiğimiz ve rutin yaşam alışkınlarımızda daha fazla yer alan elektrik enerjisinin temiz ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesinin önemi tekrar vurgulanmalıdır. Öte yandan, karbon yakalama teknolojilerinden elde edilecek olan CO2'nin, ihtiyaç duyulan sektörlerde değerlendirilmesi, döngüsellik anlamında katkı sağlayacağı gibi, sektörler arasındaki sinerjinin de artmasına etki edecektir. Önümüzdeki dönemde devreye girmiş ve girecek olan emisyon ticaret sistemleri üzerinden, bir emtia olarak işlem görecek CO2'nin önemi daha da artacaktır.

Sonuç olarak, iklim değişikliğine karşı öncelikli olarak elektrik enerjisi elde edilen kaynaklar yeniden değerlendirilmeli, kısa vadede yapılabilecekler arasında yer alan yenilenebilir kaynaklara geçiş hızlandırılmalı; orta vadede karbon yakalama ve alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi daha da yükseltilerek, uygulanabilirlikleri, maliyet perspektifi de göz önünde bulundurularak arttırılmalıdır. Sürdürülebilirlik kavramı kapsamında arzın devamlılığı, döngüsel ekonomiye katkı anlamında, sektörün önünde yer alan potansiyellerin değerlendirilmesi ve diğer sektörler ile sinerjisinin de bu bağlamda yükselmesi hedeflenerek planlamalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: United Nations, (1987). Report of the World Commission on Environment and Development, Our Common Future. URL: https://www.are.admin.ch/dam/are/en/dokumente/nachhaltige_entwicklung/dokumente/bericht/our_common_futurebrundtlandreport1987.pdf.download.pdf/our_common_futurebrundtlandreport1987.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

2. Ashby, M. F. (2023). Materials and Sustainable Development (Second Edition). Birleşik Krallık: Butterworth-Heinemann, 3-22.

3. Meadows, D. L. (1972). The Limits to Growth. ABD: Universe Books, 3-22.

4. Imperiale. F., Pizzi. S., and Lippolis, S. (2022). Sustainability Reporting and ESG Performance in the Utilities Sector. *Utilities Policy*, vol 80

5. İnternet: United Nations. Sustainable Development Goals. URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

6. İnternet: United Nations Climate Change. The Paris Agreement. URL: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

7. IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

8. İnternet: Eurostat. Glossary: Greenhouse Gas (GHG). URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics8-explained/index.php?title=Glossary:Greenhouse_gas_(GHG), Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

9. İnternet: Ritchie. H., Rosado, P., and Roser, M. (2020). Emissions by Sector. URL: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

10. İnternet: IEA. (2022). Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021. IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

11. İnternet: Wikipedia. Sustainability. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainability, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

12. Grober, U. (1999). Der Erfinder der Nachhaltigkeit. Almanya. *Die Zeit*, 48/25.11.1999

13. Carlowitz., H., C. (1732). Sylvicultura Oeconomica (2009 yeniden basım). Almanya. *Verlag Kesser,* 5-17

14. İnternet: United Nations. (1972). Report of the United Nations Conference on the Human Environment. URL: https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/NL7/300/05/PDF/NL730005.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

15. İnternet: United Nations. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development, Our Common Future. URL: https://www.are.admin.ch/dam/are/en/dokumente/nachhaltige_entwicklung/dokumente/bericht/our_common_futurebrundtlandreport1987.pdf.download.pdf/our_common_futurebrundtlandreport1987.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

16. İnternet: United Nations Academic Impact. Sustainability. URL: https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

17. İnternet: IPCC. About the IPCC. URL: https://www.ipcc.ch/about/, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

18. İnternet: TC Dışişleri Bakanlığı. Çevre, İklim Değişikliği ve Suya Dair Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri. URL: https://www.mfa.gov.tr/surdurulebilir-kalkinma.tr.mfa, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

19. İnternet: United Nations. (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/l07a01.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

20. İnternet: United Nations. (2002). Report of the World Summit on Sustainable Development. URL: https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N02/636/93/PDF/N0263693.pdf, 1-5. Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

21. İnternet: Birleşmiş Milletler. Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlı Çalışmalarımız. URL: https://turkiye.un.org/tr/sdgs, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

22. İnternet: Birleşmiş Milletler. Sürdürülebilir Kalkınma İçin Küresel Amaçlar. URL: https://www.kureselamaclar.org, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

23. IUCN. (2017). *An Introduction to Ocean Acidification*. İsviçre. 6-7

24. İnternet: IUCN. (2017). The Ocean and Climate Change. URL: https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-07/the_ocean_and_climate_change_issues_brief-v2.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

25. İnternet: EU. (2022). Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022L2464 , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

26. IPCC. (2018). Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562,

27. İnternet: United Nations. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

28. İnternet: Mann, M., E. (2023). Greenhouse Gas. *Britannica*. URL: https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

29. IPCC. (2021). Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215–2256

30. IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. *IPCC*, Switzerland. 184 s.

31. İnternet: Ritchie. H., Rosado, P., and Roser, M. (2020). CO2 and Greenhouse Gas Emissions. URL: https://ourworldindata.org/co2-emissions , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

32. Chen, L., Gao, J., and Vahid, F. (2022). Global Temperatures and Greenhouse Gases: A Common Features Approach. Journal of Econometrics, Elsevier, 240-254

33. IEA. (2023). Global Energy and Climate Model. *IEA*, Paris.

34. EMBER. (2023). Global Electricity Review 2023. *Ember*. 163 s.

35. İnternet: IPCC. IPCC Procedures. URL: https://www.ipcc.ch/documentation/procedures/, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

36. İnternet: Columbia University. (2019). Data Distribution Center, Scenario Process for AR5. URL: https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

37. Wuebbles, D. J., Jain, A. K. (2022). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, 99-119

38. IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. *IPCC*, Switzerland. 151 s.

39. Höök, M., Sivertsson, A., Aleklett, K. (2010). *Validity of the Fossil Fuel Production Outlooks in the IPCC Emission Scenarios. Natural Resources Research*. 9(2):63-81

40. Vahdettin, E., Gülsoy, U. (2016). *Osmanlı'dan Cumhuriyet'e İstanbul'da Elektrik*. IETT Yayınları. 148

41. EPDK. (2023). *2022 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu*. EPDK, Ankara. 65 s.

42. IEA. (2021). Electricity Information: Overview, IEA, Paris

43. BP. (2022). 2022 BP Statistical Review of World Energy Report. BP, Birleşik Krallık.

44. İnternet: Ritchie. H., Rosado, P. (2017). Fossil Fuels. URL: https://ourworldindata.org/fossil-fuels, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

45. İnternet: Ritchie. H., Rosado, P. (2020). Electricity Mix. URL: https://ourworldindata.org/electricity-mix, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

46. İnternet: Ritchie. H., Rosado, P. and Roser, M. (2020). Emissions by Sector. URL: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

47. İnternet: Engie. Thermal Electricity. URL: https://www.engie.com/en/activities/thermal-energy/thermal-power-stations#:~:text=Traditional%20thermal%20power%20plants%3A%20also,an%20alternator%20to%20produce%20electricity, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

48. Karaman, S., Gökalp, Z. (2010). Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerine Etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3 (1), 59-66

49. İnternet: University of California. Understanding Global Change, URL: https://ugc.berkeley.edu/background-content/wind/#:~:text=As%20the%20atmosphere%20continues%20to,normal%20over%20any%20particular%20region, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

50. Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., et al. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production.. *Nat. Clim. Chang*., 9, 979-985

51. İnternet: Met Office. What is Climate Change, URL: https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate-change/what-is-climate-change, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

52. İnternet: Deloitte. What is Decarbonisation? URL: https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/energy-resources-industrials/articles/what-is-decarbonisation.html , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

53. İnternet: NREL. Inrteractive Best Research-Cell Efficiency Chart. URL: https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023.

54. İnternet: National Grid. How Does Dolar Power Work. URL: https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/how-does-solar-power-work#:~:text=Solar%20panels%20are%20usually%20made,and%20produces%20an%20electric%20charge, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

55. IEA. (2023). Renewables 2022 – Analysis and Forecast to 2027. *IEA*.

56. İnternet: EMBER. Electricity Data Explorer. URL: https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

57. Lakatos, L., Hevessy, G., and Kovacs, J. (2011). Advantages and Disadvantages of Solar Energy and Wind-Power Utilization. *World Futures*, 67:6, 395-408

58. Center for Sustainable Systems, (2023). Wind Energy Factsheet. University of Michigan, CSS07-09

59. Department of Energy, (2015). Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States, 58 s.

60. IEA. (2021). Hydropower Special Market Report – Analysis and Forecast to 2030. *IEA*, Fransa.

61. İnternet: EİA. Geothermal Explained. URL: https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-energy-and-the-environment.php , Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

62. Bilgin, N. (2003). *Biyogaz Nedir?* Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Ankara.

63. IEA. (2019). The Future of Hydrogen. IEA, Fransa.

64. Incer-Valverder, J., Korayem, A. et. al (2023). "Colors" of hydrogen: Definitions and Carbon Intensity. *Conversion and Management*, Elsevier, vol. 294

65. İnternet: National Grid. Energy Explained. URL: https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

66. İnternet: Bioenergy International, (2022). Green hydrogen could disrupt global trade and energy relations – IRENA. URL https://bioenergyinternational.com/green-hydrogen-could-disrupt-global-trade-and-energy-relations-irena/, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

67. Le, T. T., Sharma, P., Bora, B. J., et. al (2023). Fueling the Future: A Comprehensive Review of Hydrogen Energy Systems and Their Challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier

68. EDF (2022). Understanding the Differences Between Carbon Capture & Carbondioxide Removal. EDF

69. Lyons, M., Durrant, P., and Kochhar, K. (2021). Reaching Zero with Renewables – Capturing Carbon. *Technical Paper 4/2021*, IRENA.

70. IEA. (2021). About CCUS. IEA, Fransa.

71. IEA. (2023). Hydrogen. IEA, Fransa.

72. İnternet: Republic of Türkiye Updated First Nationally Determined Contribution. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-04/TÜRKİYE_UPDATED%201st%20NDC_EN.pdf, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

73. İnternet: Yenilenebilir Enerji Sektöründe YEKDEM, YEKA ve YEK nedir? URL: https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/yenilenebilir-enerji-sektorunde-yekdem-yeka-ve-yek-nedir, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023

74. IRENA. (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. IRENA, Abu Dabi.

75. İnternet: OffshoreWind.biz. Mingyang Commissions 16 MW Offshore Wind Turbine with 260-Metre Rotor Diameter in China. URL: https://www.offshorewind.biz/2023/07/18/mingyang-commissions-16-mw-offshore-wind-turbine-with-260-metre-rotor-diameter-in-china/, Son Erişim Tarihi: 17.11.2023



Gazili olmak ayrıcalıktır