

İklim Değişikliğinin Kronolojik Analizi ve Nükleer Enerjiye Bir Bakış

Nergin Günay^{1,*}, Sevilay Hacıyakupoğlu²

¹Beykent Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Odyoloji Bölümü, 34500, İstanbul.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, 34469, İstanbul.

Özet

İklim değişikliği, 21. yüzyılda insanlığın küresel ölçekte karşılaştığı en büyük tehdittir. Gezegenimizin yaşanabilir kalması için, tüm dünyada iklim değişikliği üzerine olumlu etki yaratacak eylemlerin yürürlüğe girmesi gerekmektedir. Bu sadece bilim dünyasının çalışmalarını değil, aynı zamanda bireysel davranışları, toplumların enerji ve doğal kaynakları kullanma biçimlerini ve hükümetlerin politikaları da dahil olmak üzere, yerel düzeyden küresel düzeye uzanan etkili bir iklim değişikliği eylemini kapsamaktadır. Modern yaşam tarzımızın dayandığı ekonominin sürdürülebilir olması, kullandığımız enerji türünün seçimine bağlı olduğundan, enerji tedariki önümüzdeki yıllarda insanlığın en önemli konularından birisini oluşturacaktır. Hızlı sanayileşme, enerji rezervlerinin tükenmesi, petrol ve gaz ihraç eden ülkelerdeki siyasi istikrarsızlık, bununla birlikte fosil yakıtlardan elde edilen geleneksel enerji kaynaklarının sera gazı emisyonları açısından çevreye zarar vermesi yenilikçi enerji üretim teknolojilerine ihtiyacı gerekli kılmaktadır. İnsanlığın iklim felaketlerinden kurtulmasına ve temiz enerji sağlamasına yardımcı olabilecek yüksek teknolojiler içerisinde bugünün ve geleceğin enerjilerinden biri nükleer enerjidir. Bu çalışmada, iklim değişikliğini kontrol altına almak amacıyla ortaya konulan irade, iklim değişikliğine bağlı olarak artan afetler, iklim değişikliğinin hayatımız üzerindeki etkileri, nükleer enerjiye dair yapılan çalışmalar ve nükleer enerji kullanımının iklim değişikliğini önlemedeki rolü üzerine olan girişimler kronolojik olarak inceleme konusu haline getirilmiştir. Ayrıca, nükleer enerjiyle ilgili önyargıların enerji politikaları oluşturulmasının önündeki mevcut engellere etkileri ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler

İklim Değişikliği, Doğal Afetler, Enerji Politikaları, Nükleer Enerji

Chronological Analysis of Climate Change and an Overview of Nuclear Energy

Abstract

The greatest threat to humanity on a global scale in the twenty-first century is climate change. To keep our planet habitable, actions that will have a positive impact on climate change must be put into effect all over the world. This encompasses not only the work of the scientific community, but also effective climate change action from the local to the global level, including individual behaviour, the life way of societies using energy and natural resources, and the policies of governments. Since the sustainability of the economy on which our modern lifestyle is based, depends on the choice of the type of energy we use, energy supply will be one of the most important issues of humanity in the coming years. Rapid industrialization, depletion of energy reserves, political instability in oil and gas exporting countries, as well as the environmental damage caused by greenhouse gas emissions from traditional energy sources obtained from fossil fuels necessitate the need for innovative energy production technologies. Among the high technologies that can help humanity recover from climate disasters and provide clean energy sources, one of the best energy sources today and in the future is nuclear energy. In this study, the willpower expressed to control climate change, the increasing disasters due to climate change, the effects of climate change on our lives, studies on nuclear energy and initiatives on the role of nuclear energy use in preventing climate change have been examined chronologically. In addition, the effects of nuclear energy-related prejudices on existing barriers to energy policy formulation have been revealed.

Keywords

Climate Change, Natural Disasters, Energy Policy, Nuclear Energy

1. Giriş

Günümüzün en dikkat çekici meselelerinden biri olan küresel iklim değişikliğinin gerçek olup olmadığı, önemli olup olmadığı ve insanlık adına ne anlama geldiği konularında henüz fikir birliğine varılabilmemiş değildir. İklim değişikliği üzerine gerçekleştirdiği çalışmalarıyla, 2018 yılında Nobel Ekonomi Ödülü'ne layık görülen William Nordhaus'a göre, insanlar ve doğal dünya adına ciddi bir tehdit oluşturan bu konuda "İklim Kumarı" oynanmaktadır. Bu metaforla, ekonomik büyümenin iklim ve dünya sistemlerinde istenmeyen; ama tehlikeli değişiklikler yarattığını kasteden Nordhaus, bu değişikliklerin öngörülemeyen ve muhtemelen tehlikeli sonuçlara yol açacağını belirtmektedir (Nordhaus 2013).

* Sorumlu Yazar: +90 (212) 4441997 Faks: +90 (212) 8675577

Gönderim Tarihi / Received : 23/11/2022

E-posta: neringunay@beykent.edu.tr (Günay N), haciyakup1@itu.edu.tr (Hacıyakupoğlu S)

Kabul Tarihi / Accepted : 09/02/2023

Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization, WMO), yayımladığı raporunda gezegendeki en hızlı ısınan bölgelerden biri olan Antartika'da 6 Şubat 2020'de 18.3°C ile sıcaklık rekoru kırıldığını açıklamıştır (Francelino vd. 2021). WMO Genel Sekreteri Prof. Petteri Taalas, Antartika Yarımadası'nın Güney Amerika'ya yakın kuzeybatı ucunun, son 50 yılda neredeyse 3°C ile gezegenin en hızlı ısınan bölgeleri arasında olduğunu belirterek, bu rekor sıcaklık kaydının gözlemediğimiz iklim değişikliği ile tutarlı olduğunu ifade etmiştir (WMO 2021). WMO Kıdemli Başkan Yardımcısı ve Arjantin Meteoroloji Servisi Başkanı Celeste Saulo ise, bu yeni gelişmenin iklim değişikliği hakkında acil önlemler gerektirdiğini bir kez daha gösterdiğini vurgulamıştır (WMO 2021). Hükümetlere, iklim politikalarını geliştirmeye yönelik kullanabilecekleri bilimsel verileri sunmak üzere 1988 yılında kurulan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) beşinci değerlendirme raporu (The Fifth Assessment Report, AR5), gözlenen iklim değişikliğinin önemli oranda insan kaynaklı olduğunu önceki raporlardan daha net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu rapora göre, 1951-2010 döneminde küresel ortalama yüzey sıcaklıklarda gözlemlenen artışın yarısından fazlasının, insan etkinliklerinden kaynaklanmış olması (%95-100) son derece muhtemeldir ve bu sebeple, iklim değişikliği kontrolden çıkmadan bir an önce müdahale edilmesi gerekmektedir (IPCC 2014). Alınabilecek önlemler arasında enerji ve sanayi ile ilgili yapılmalarda düzenlemeler, düşük karbon salınım teknolojilerinin uygulanması ve orman bölgelerinin artırılması yer almaktadır.

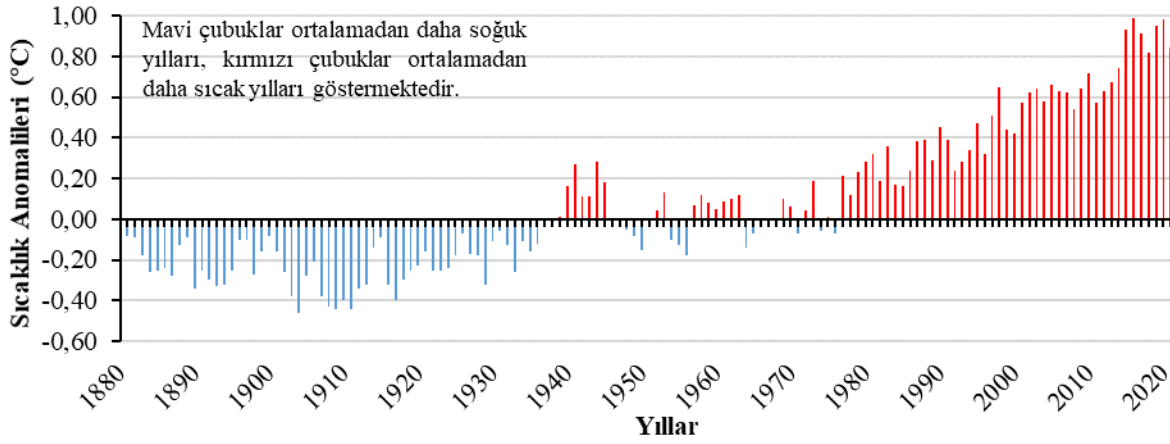
Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu'nun (International Atomic Energy Agency, IAEA) 2022 yılı raporuna göre, 31 Aralık 2021 tarihi itibarıyla, dünya genelinde toplam 389.5 GW_e kapasiteli 437 nükleer güç reaktörü işletme halindedir ve 19 ülkede toplam 58.1 GW_e kapasiteli 56 reaktörün yapım süreci devam etmektedir. 2021 yılı itibarıyla dünya genelinde elektrik üretimi 2653.1 TW_e·h ile nükleer santrallerden sağlanmıştır. Elektrik ihtiyaçlarının önemli bölümünü nükleer enerjiden sağlayan ülkelerden bazıları ABD, Fransa, Çin, Kore Cumhuriyeti ve Rusya'dır (IAEA 2021). Çevre sorunlarının temel nedeni kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar olmasına rağmen, işletmeleri diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına oranla ucuz olan nükleer santrallerin (NEA 2020) inşaat maliyetlerinin yüksekliği (WNA 2022a), Kıştım, Three Mile adası, Çernobil ve Fukushima nükleer reaktör kazalarında olduğu gibi güvenlik sorunları ve ortaya çıkan nükleer atıklara yapılan diğer harcamalara gereksinimleri şeklinde kendilerine özgü dezavantajları vardır. Bütün bunlara karşın, henüz gerçekleştirilememiş olsa da, enerjinin fiyatlandırılmaya değmeyecek kadar ucuz olacağı bir nükleer gelecek olasılığı iddia edilmektedir (Hultman 2011).

2. İklim Değişikliği

Benzersiz gezegenimizin sahip olduğu atmosfer, hem canlıları güneşin zararlı ışınlarından korurken, hem de uzaya yayılabilecek ısıyı muhafaza etmektedir. Yüksek enerjili (kısa dalga boyu: morötesi) güneş ışınları atmosferden geçerek Dünya'nın yüzeyine ulaşmaktadır ve bu ışınlar ile transfer edilen enerji yeryüzünde soğurularak, daha sonra bir kısmı düşük enerjili (uzun dalga boyu: kırmızıaltı) ışınlar halinde yayınlanmaktadır. Bu ışınlar atmosferden doğrudan geçememektedirler ve enerjilerinin çoğu havadaki gazlar tarafından soğurulmaktadır. Bu gazlar, uzun dalga boyu ışınların atmosferik pencereler vasıtasıyla uzaya kaçan kısmından geri kalan kısmını Dünya'nın yüzeyine geri göndermekte ve böylece gezegenin yüzeyini daha sıcak tutmaktadırlar. Bu özellik, sera etkisi olarak, bu etkiden sorumlu gazlar da sera gazları olarak bilinmektedir. Sera gazlarının en önemlileri su buharı, metan, nitroz oksit, karbondioksit ve ozon olarak sayılabilir. Canlıların hayatta kalabilmesi için sera etkisi gereklidir; ancak artan sera etkisi küresel iklimi çarpıcı şekilde değiştirerek küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir (Kweku vd. 2018).

İklim değişikliği ve küresel ısınma terimleri birbirinin yerine kullanılıyor olsa da, küresel ısınma, iklim değişikliğinin bir unsurudur ve atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının artması nedeniyle küresel sıcaklıklardaki uzun vadeli artış anlamına gelmektedir. Küresel sıcaklıklar, 20. yy.'ın başlarından ve en önemlisi 1970'lerin sonlarından beri artış göstermektedir. Ulusal Çevresel Bilgi Merkezleri (National Centers for Environmental Information, NCEI) verilerine göre, dünyada 1900'lerden beri ortalama yüzey sıcaklığı, 20. yy.'ın ortalarına göre (1951-1980) yaklaşık 1°C yükselmiştir. Dünya genelinde uzun vadeli küresel kara ve okyanus yüzeyi sıcaklıkları anomalileri Şekil 1'de görülmektedir (NCEI 2022). NOAA'nın 2021 Küresel İklim Raporuna göre, 2013-2021 yılları, kayıtlara geçen en sıcak on yıl arasında yer almıştır. Genel olarak, Dünya'nın sıcaklığı 1880 yılından bu yana her on yılda ortalama 0.08°C yükselmiştir ve son 40 yıldaki ısınma oranı, 1981'den bu yana iki katından fazla artış göstermiştir (NOAA 2022a).

İklim değişikliği kavramı, yağış, sıcaklık ve rüzgar düzenleri dahil olmak üzere, yükselen deniz seviyeleri, küçülen dağ buzulları ve çiçek/bitki çiçeklenme zamanlarındaki kaymalar gibi iklim değerlerinde meydana gelen daha geniş çaplı değişiklikleri de ifade etmektedir ve küresel ısınmayı da kapsamaktadır. IPCC ise, iklim değişikliğini, onlarca yıl veya daha uzun bir zaman içinde, iklimde meydana gelen değişiklik olarak tanımlamaktadır (IPCC 2007). Bu tanım, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nden (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) farklıdır; burada karşılaştırılabilir zaman dilimleri boyunca gözlemlenen doğal iklim değişkenliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin yapısını değiştiren insan faaliyetlerine atfedilen bir iklim değişikliğine atıfta bulunmaktadır (UNFCCC 1992). Diğer bir deyişle, atmosferik bileşimi değiştirebilen sanayi, ulaşım, vb. gibi insan faaliyetlerine atfedilebilen iklim değişikliği ve doğal nedenlere atfedilebilen iklim değişkenliği arasında bir ayrım yapılmaktadır. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan küresel ısınmanın iklim değişikliği üzerine etkisine yönelik uluslararası ilk çevre sözleşme olan UNFCCC, 1992 yılında BM Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda imzaya açılmıştır ve 1994 tarihinde yürürlüğe girmiştir.



Şekil 1: 1880-2021 yılları arası 20. yy. ortalamasına göre küresel kara ve okyanus yüzeyi sıcaklıkları anomalileri (NCEI 2022 kaynağından derlenmiştir)

Türkiye'nin de dahil olduğu 190'dan fazla ülkenin yanı sıra, Avrupa Birliği (AB) de sözleşmeye taraftır. Konferansta, ayrıca yol haritası niteliğindeki Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi (United Nations Convention on Biological Diversity, UNCBD) ve Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi (United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD) de kabul edilmiştir. Bu sözleşmede üç ilke kabul edilmektedir:

- Ortak ancak farklılaştırılmış sorumluluk ilkesi (Madde 3.1): İmzalayan her ülke, sera gazı emisyonlarının küresel ısınma üzerindeki etkilerini kabul eder. Sanayileşmiş ülkeler, daha önceki gelişimleri ve tarihsel olarak daha yüksek emisyon seviyeleri nedeniyle daha büyük bir sorumluluk taşırlar.
- İhtiyatlılık ilkesi (Madde 3.3): Bilimsel kesinliğin olmaması, iklim değişikliğine ilişkin maliyet etkinliği önlemlerinin ertelenmesi için bir gerekçe olarak kullanılmayacaktır.
- Kalkınma hakkı ilkesi (Madde 3.4): Önlemler her ülkenin ekonomik kalkınma hakkını dikkate alacaktır.

UNFCCC sözleşmesinin yürürlüğe girmesinden itibaren gezegenimizin karşılaştığı iklim değişikliği sorununu ele almak üzere, üye devletler her yıl iki hafta boyunca Taraflar Konferansları (Conference of the Parties, COP) adı altında toplanmaktadır. COP Konferanslarında ulaşılan en önemli kilometre taşları Tablo 1'de gösterilmiştir (Tablo 1).



Kyoto Protokolü, emisyon verilerinin kalitesinin yükseltilmesi, çevre dostu teknoloji transfer teşviği, iklim değişikliği eğitimi ve toplumsal bilinç oluşturma desteklenmesi gibi UNFCCC'nin bazı hedeflerinin hayata geçirilmesi bakımından büyük bir adım olmuştur (Finus 2010); fakat protokolde yer alan, onaylayan ülkelerin 1990 yılındaki karbondioksit emisyonlarının, toplam emisyonun %55'ini temsil eden, en az 55 ülke tarafından onaylanmış olması ön koşulu, protokolün yürürlüğe girmesini geciktirmiştir. Protokolün, ilk taahhüt dönemine (2008-2012 yılları arasında) ilişkin hedefler, sanayileşmiş ülkelere ((UNFCCC 1997) Ek B'de listelenmiştir), altı ana sera gazı (karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), azot oksit (N₂O), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve sülfür hekzaflorür (SF₆)) emisyonlarını ((UNFCCC 1997) Ek A'da listelenmiştir), 1990 yılı seviyesinden ortalama %5.2 azaltmayı kapsamaktadır; ancak hedef yükümlülükler, ülkeler arasında farklılık göstermektedir. Protokolün, raporlama zorunluluğu gibi bazı uygulamalar getirmesi ve farklı sera gazlarının önem derecelerini hesaplamaya yönelik bir yöntem geliştirmesi dışında getirdiği en önemli yenilik, ülkeler arasında politikaları düzenlemek düşüncesince, uluslararası bir emisyon üst sınırı ve ticaret sistemi getirmiş olmasıdır. Protokolde, her bir ülkenin emisyonları 5 kategoriye ayrılmıştır: Enerji, Endüstriyel Süreçler, Çözücülerin ve Diğer Ürünlerin Kullanımı, Tarım ve Atık ((UNFCCC 1997) Ek A'da listelenmiştir).

2000 yılı sonrası sera gazı salınımlarını azaltmaya yönelik yasal yükümlülüklerin düzenlendiği Kyoto Protokolü'nün geçerliliği, 2012 yılında (COP 18, Doha (COP18 2012)) varılan uzlaşmayla 2020 yılına dek uzatılmıştır. Taahhütler bakımından başarı sağlanamayan Kyoto Protokolü'nün sona ermesinin ardından, 2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması (COP 21, Paris (COP21 2015)) ile 2020 yılı sonrası iklim değişikliği rejimi oluşturulmuştur.

Küresel sera gazı emisyonlarının %55'inden sorumlu, en az 55 ülke tarafından onaylanmış olması ön koşulunun sağlanmasıyla, 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Anlaşması (UNFCCC 2016), kabul edilmesinden henüz bir yıl geçmemişken yürürlüğe giren ilk küresel anlaşma olması sebebiyle dikkat çekicidir (MFA 2022).

Bu anlaşma, iklim değişikliğinin risklerini ve etkilerini önemli ölçüde azaltacağını kabul ederek küresel ortalama sıcaklığı sanayi devrimi (1850-1900) öncesi seviyelere göre 2.0°C'nin oldukça altına düşürmeyi ve hatta 1.5°C'de sabitlemeyi (Madde 2, 1.a) hedeflemektedir (COP21 2015).

Tablo 1: İklim değişikliğiyle mücadele konusunda yapılan başlıca zirveler

Yıl	Oturum	İklim Zirvesi Adı	Gerçekleştiği Yer	Amaç, Başarı	Kaynak
2022	COP 27	BM İklim Değişikliği Konferansı	 Şarm El-Şeyh Mısır	Sera gazı azaltımı, iklim değişikliğine uyum ve finansman iş birliği konuları konferansın temel başlıkları olacaktır.	(COP27 2022)
2021	COP 26	BM İklim Değişikliği Konferansı	 Glasgow İskoçya	Glasgow İklim Paketi Glasgow Orman ve Arazi Kullanımı Bildirgesi	(COP26 2021)
2018	COP 24	Katowice İklim Değişikliği Konferansı	 Katowice Polonya	Paris Antlaşması'nın Kural Kitabı kabul edilmiştir.	(COP24 2018)
2016	COP 22	Marakeş İklim Değişikliği Konferansı	 Marakeş Fas	Marakeş Ortaklığı Paris Anlaşması yürürlüğe girmiştir.	(COP22 2016)
2015	COP 21	Paris İklim Değişikliği Konferansı	 Paris Fransa	20 yıllık müzakereler sonunda, küresel ısınmanın 2.0°C'nin altında tutulması ve 1.5°C ile sınırlandırma çabalarının sürdürülmesi amacıyla Paris Anlaşması oybirliğiyle kabul edilmiştir.	(COP21 2015)
2014	COP 20	Lima İklim Değişikliği Konferansı	 Lima Peru	İlk kez tüm ülkeler sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda kararlılıklarını geliştirmeyi ve paylaşmayı kabul etmiştir.	(COP20 2014)
2013	COP 19	Varşova İklim Değişikliği Konferansı	 Varşova Polonya	Uluslararası Varşova Mekanizması	(COP19 2013)
2012	COP 18	Doha İklim Değişikliği Konferansı	 Doha Katar	Kyoto Protokolü'nün 2020 yılına kadar uzatılmasına karar verilmiştir. ABD, Çin, Rusya ve Kanada gibi ülkeler bu uzatmayı desteklememiştir.	(COP18 2012)
2011	COP 17	Durban İklim Değişikliği Konferansı	 Durban Güney Afrika	Durban Platformu	(COP17 2011)
2010	COP 16	Cancun İklim Değişikliği Konferansı	 Cancun Meksika	Cancun Anlaşmaları	(COP16 2010)
2009	COP 15	Kopenhag İklim Değişikliği Konferansı	 Kopenhag Danimarka	Küresel ısınmayı 2.0°C'nin altında tutma hedefi onaylanmıştır. Gelişmiş ülkeler uzun vadede gelişmekte olan ülkeleri finanse etme taahhüdünde bulunmuştur.	(COP15 2009)
2007	COP 13	Bali İklim Değişikliği Konferansı	 Bali Endonezya	Bali Yol Haritası	(COP13 2007)
1997	COP 3	Kyoto İklim Değişikliği Konferansı	 Kyoto Japonya	Kyoto Protokolü: Emisyon Azaltımı	(COP3 1997)
1992	Rio Zirvesi	BM Çevre ve Kalkınma Konferansı	 Rio de Janeiro Brezilya	Hükümetlerarası düzeyde iklim değişikliğine yönelik ilk çevre mutabakatı UNFCCC imzalanmıştır. Üye ülkeler iyi niyet göstergesi olarak sözleşmeyi desteklemiş olsalar da, yaptırım gücü zayıftır.	(UNCED 1992)

Paris Anlaşması taraflarının IPCC'yi bu küresel hedefi gerçekleştirecek ilgili emisyon yollarını değerlendirmeye davet etmesi üzerine, IPCC "1.5°C Küresel Isınma" adıyla özel bir rapor yayımlamıştır (IPCC 2018). Bu raporda yer alan bazı önemli noktalar aşağıda verilmiştir:

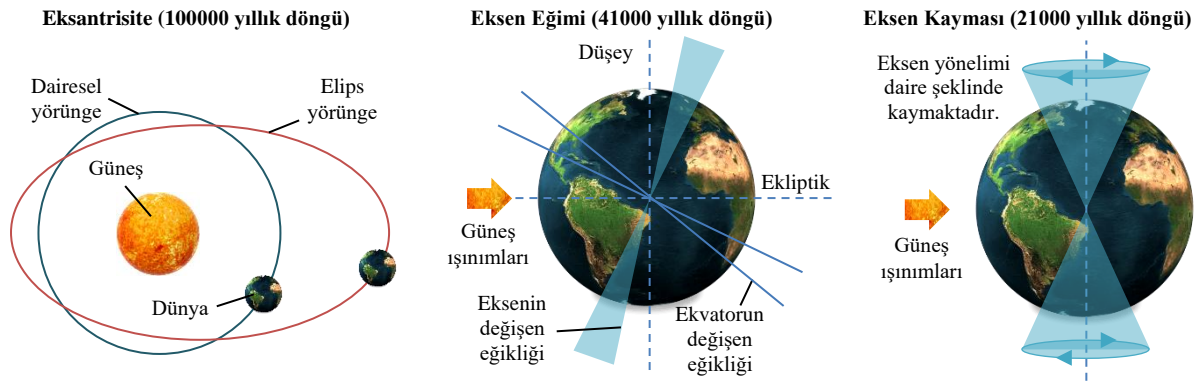
- Küresel ısınma, halihazırda birçok bölgede aşırı sıcaklık artışı, çeşitli bölgelerde yoğun yağış miktarında artış, bazı bölgelerde kuraklıkların yoğunluğunda veya sıklığında artış da dahil olmak üzere iklimde meydana gelen bölgesel değişiklikler şeklinde etkisini göstermeye başlamıştır.
- İnsan etkinliklerinden kaynaklanan küresel ısınma, 2017 yılında, sanayi öncesi seviyelerin yaklaşık $1.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ üzerine ulaşmıştır.
- Küresel ısınma mevcut hızla artmaya devam ederse, 2030-2052 yılları arasında 1.5°C 'ye ulaşması muhtemeldir.
- 1.5°C sınırını geçmemek üzere, küresel CO_2 emisyonlarının 2030 yılına kadar 2010 yılı seviyelerine göre %45 azaltılması ve 2050 yılı civarında da net sıfır emisyonu sağlanması gerekmektedir.
- Küresel ısınmayı 1.5°C ile sınırlandırmak, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğu önlemek konularında kritik bir öneme sahiptir. Bu sınırın deniz biyoçeşitliliği, balıkçılık, ekolojik sistemler ve yaşam alanları üzerine yönelik riskleri azaltacağı öngörülmektedir.
- Eşik değerin geçilmemesi için arazi ve şehir planlama uygulamalarındaki değişikliklerin yanı sıra ulaşım, binalar, enerji, taşımacılık alanlarında da emisyon azaltılmasına yönelik teknik önlemler alınması ve uygulamalar geliştirilmesi gerekmektedir.
- Paris Anlaşması kapsamında sunulan mevcut ulusal düzeydeki hedeflerin küresel emisyon sonuçlarına ilişkin tahminler, 2030 yılından sonra emisyon azalımı çok büyük artışlarla desteklense bile küresel ısınmayı 1.5°C ile sınırlamayacaktır. Bu aşımı önlemek, ancak küresel CO_2 emisyonlarının 2030'dan çok önce düşmeye başlamasıyla mümkün olabilir.

İskoçya'nın Glasgow kentinde gerçekleştirilen 2021 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda Glasgow İklim Paketi imzalanmıştır ve ülkelere 2022'nin sonuna kadar Paris Anlaşması'nın sıcaklık hedefleriyle uyumlu hale getirmek üzere 2030 hedeflerini "tekrar gözden geçirme ve güçlendirme" çağrısında bulunulmuştur (COP26 2021). Emisyon azaltılma hedefleriyle ilgili yeni bir çalışma programı oluşturulmuştur ve ülkeler 2030 hedefleriyle ilgili yıllık üst düzey bir etkinlik düzenlemeyi kabul etmişlerdir. Glasgow İklim Paketi uzun vadeli stratejiler ve bunları güncel tutma ihtiyacı konusunda daha fazla eyleme yön vermeyi vurgulayan bir anlaşmadır. Kasım 2022'de, iklim değişikliğinin gezegenimiz üzerindeki olumsuz etkilerinin ve gelecekteki iklim değişikliği ile mücadeleye yönelik hedeflerin değerlendirilmesi amacıyla Şarm El-Şeyh şehrinde 27. Taraflar Konferansı'na Mısır ev sahipliği yapmıştır (COP27 2022).

2.1. Doğal İklim Değişikliği

Geçmişte, insanoğlunun var olmasından önce de iklim değişiklikleri yaşanmıştır. Bu değişimlerin sebepleri, Dünya'nın Güneş çevresindeki yörüngesinde meydana gelen farklılaşmalar, bazı büyük yanardağ patlamaları, yerkabuğu plakalarının kayması, güneş ışınımının düzeylerindeki farklılıklar gibi doğa olaylarıdır. Dünya'nın Güneş'e göre konumundaki değişikliklerin dünyanın uzun vadeli ikliminin periyodik olarak değişmesine sebep olduğunu varsayan ve bu konudaki ilk hesaplamaları yapan bilim insanı Milutin Milankovitch olmuştur (Milankovitch 1941). "Milankovitch Döngüleri" denilen bu doğal yörünge salınımları şunlardır (Şekil 2):

- Dış merkezlik (eksantrisite) olarak bilinen Dünya'nın Güneş etrafındaki yörüngesinin şekli,
- Dünya'nın dönme ekseninin, Dünya'nın yörünge düzlemine göre eğildiği açı (eğiklik),
- Dünya'nın dönme ekseninin devinimi (presesyonu).



Şekil 2: Milankovitch eğrileri

Bu yörünge parametrelerindeki düzenli değişiklikler Dünya'nın güneş ışınımına maruziyetinde farklılıklara sebep olmakta ve bu değişiklikler sonucunda da dünyanın iklimi düzenli döngüler halinde değişmektedir (Berger 1988):

- Dünya yörüngesinin eksantrikliği yaklaşık 100000 yıllık döngü. Eksantriklik, gezegenlerin eliptik yörüngelerinin doğasını tanımlarken kullanılan, 0 ile 1 arasında değerler alabilen bir değişkendir. 0.02'den daha az eksantrisiteye sahip Dünya'nın yörüngesi dairesel olmaya çok yakın bir elipstir.

Gezegenin yörüngesinin çemberden elipse dönmesi yıllık sıcaklık aralığını değiştirmektedir. Büyük eksantriklik, Dünya'nın yörüngesinin uç noktalarında aldığı güneş enerjisi miktarında daha büyük bir fark olduğu anlamına gelmektedir.

- Dünya'nın dönme ekseninin eğikliği yaklaşık 41000 yıllık dönem. Dünya'nın dönme ekseninin eğikliği 21.6°-24.5° aralığındadır; şu andaki eğiklik 23.5°'dir. Eğiklikteki bu değişim güneş ışınımının kutuplarda ve tropikal bölgelerde kapladığı alanı değiştirmekte, dolayısıyla küresel hava dolaşımını etkilemektedir.
- Eksenel devrim yaklaşık 21000 yıllık bir periyot. Dünya'nın ekseninin yöneliminin değişimi, mevsimlerin zamanlarını değiştirmektedir. Şu anda Kuzey Kutbu, Kuzey Yıldızı olarak da bilinen Polaris'e yönelmişken, zamanla Dünya'nın eksenini boyunca yer alan başka yıldızlara yönelecek şekilde kayacaktır, dolayısıyla iklimin değişmesine neden olacaktır.

İklimi çarpıcı ölçüde değiştiren başka bir doğa olayı da, yanardağ patlamalarıdır. Bu patlamalar sonucunda atmosfere CO₂, su buharı ve sülfür dioksit gibi gazlar ile yüksek miktarda toz salınmaktadır. Atmosferde yüzyıldan daha uzun süre kalan CO₂ küresel ısınmaya sebep olmakta, su ve sülfür ise Güneş'i örterek küresel soğumaya sebebiyet veren sülfürik asit damlacıklarını oluşturmaktadırlar. Başka bir olay olan yerkabuğu plakalarının kayması süreci de, kıtaların hareket etmesine yol açmakta ve böylece iklimleri değiştirmektedir. Her ne kadar iklim daha önce doğa olayları sebebiyle değişmiş olsa da, hatta bu durum aynı şekilde yeniden yaşanabilecek olsa da, bugün dünya çapındaki birçok bilimsel kuruluş, iklim değişikliğinin önemli ölçüde insan etkinliklerinden kaynaklandığı görüşündedir (OPR 2022).

2.2. İklim Değişikliğinin Dünü ve Bugünü

Dünyanın uzak geçmişi göz önüne alındığında, iklimlerin zamanla yavaş bir değişim geçirdiği görülmüştür. Hatta bu değişimlerden bazıları, dinazorların neslinin tükenmesi gibi, canlılar üzerinde yıkıcı olmuştur. Son 540 milyon yılda yalnızca beş kez kitlesel yok oluş durumu yaşanmıştır (Tablo 2). Biyologlar, son birkaç yüzyıl ve bin yıl boyunca bilinen kayıp türler göz önüne alındığında, altıncı bir kitlesel yok oluşun yolda olabileceğini öne sürmektedirler (Barnosky vd. 2011).

Kretase Dönemi'nde, Meksika'daki Yucatán Yarımadası'na düşen bir gök taşının neden olduğunun düşünüldüğü kitlesel yok oluş, iklimi etkileyerek genel bir ölüme sebep olmuş ve dinazorların çağını sona erdirmiş olsa da (Engledew 2010), neredeyse 250 milyon yıl önce Permian Dönemi'ndeki yok oluş dünyadaki yaşamın tamamen yok olmaya en yakın olduğu zamandır. Permian Dönemi'ne ait bulgular üzerinde yapılan analizler, karbon izotoplarında olağandışı değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur (Payne vd. 2004). Permian Dönem'de meydana gelen yok oluş, atmosferdeki ani sera gazları artışıyla aynı zamana denk gelmiştir ve iklim modellerinde verilen üst değerlerin aralığına göre iklim duyarlılığı 5-6°C'dir (Cui ve Kump 2015). Bu değer, iklim öngörülerine göre sera gazı salınımlarının devam etmesi durumunda gezegenimizin ortalama küresel sıcaklığının bu yüzyılın sonunda bugünkünden 1.0 ila 5.7°C ısınabileceğini öngörüsüne (Madde B.1.1) yakındır (IPCC 2022).

Tablo 2: Dünyada görülen başlıca kitlesel yok oluşların sebep ve sonuçları

Tarih	Yok Oluş	Sebep	Sonuç
444 Myıl önce	Ordovisyen Yok Oluşu	Dünyanın bilinen en büyük üçüncü kitlesel yok oluşudur. CO ₂ 'nin olası düşüş sebebi olarak volkanik aktivite ya da gama ışını patlamasıyla ozon tabakasının zarar görmesi gibi teoriler yer almaktadır.	Tüm ailelerin %27'si, tüm cinslerin %57'si ve tüm türlerin %70'i yok olmuştur (Eicher 2015).
375 Myıl önce	Devonyen Yok Oluşu	Olası sebebi olarak kara bitkilerinin karaların tamamını işgal etmeye başlaması ve atmosferdeki CO ₂ 'nin büyük bir kısmını emmeleri gösterilmektedir. CO ₂ düzeyindeki bu hızlı düşüş, küresel soğumaya sebep olmuştur.	O dönemde bulunan tüm ailelerin %19'u, tüm cinslerin %50'si, tüm türlerin %70'i yok olmuştur (Eicher 2015).
252 Myıl önce	Permian Triyas Yok Oluşu (Büyük Ölüm)	Dünyanın bilinen en büyük kitlesel yok oluşudur. Olası nedenleri arasında bir veya daha fazla büyük meteor çarpması, muazzam yanardağ patlamaları, su altı CH ₄ veya CH ₄ üreten mikropların büyük salınımlarının sebep olduğu iklim değişikliği yer almaktadır.	Dünyada o zaman bulunan tüm ailelerin %57'si, tüm cinslerin %83'ü yok olmuştur (Eicher 2015). Tüm deniz türlerin %96'sının ve karasal omurgalı türlerin %70'inin nesli tükenmiştir (Raup 1979).
201 Myıl önce	Triyas-Jura Yok Oluşu	Sebep olarak Orta Atlantik Magmatik bölgesinin harekete geçmesi gösterilmektedir. Bu volkanik patlamalar sırasında 2×10 ¹⁵ m ³ lav yüzeye çıkmış ve 2×10 ¹⁵ kg kükürt havaya salınmıştır.	Kükürt, güneş ışınımını kapatmıştır ve küresel ısınma meydana gelmiştir. Ailelerin %23'ü, cinslerin %48'i, tüm türlerin ise %75'i yok olmuştur (Eicher 2015).
65 Myıl önce	Kretase-Tersiyer Yok Oluşu	Kretase dönemi, yerkürenin geçirdiği sıcak ve buzsuz bir dönem sonrasında gelen dinazorların altın çağıdır. Bu yok oluşa muhtemelen yıkıcı bir yanardağ etkinliği ile eş zamanlı yaşanan bir gök taşının gezegene çarpmasının neden olduğu inanılmaktadır.	Tür düzeyinde deniz biyoçeşitliliğinde %70-80 ve cins düzeyinde %50 azalma olmuştur (Jablonski ve Raup 1995). Yok oluştan en fazla etkilenenler sürüngenler ve dinazorlar olmuştur. Tüm kuşsal olmayan (non-avian) dinazor türleri ortadan kalkmıştır.

Son IPCC raporuna göre, iklim değişikliği etkilerinin kapsamı ve büyüklüğü, önceki değerlendirmelerde tahmin edilenden daha büyüktür. Yüzlerce yerel tür kaybının yanı sıra, karadaki ve okyanustaki toplu ölüm olayları ve yosun ormanlarının kaybı da aşırı sıcaklıkların büyüklüğündeki artışlardan (Madde B.1.2) kaynaklanmıştır (IPCC 2022). Karasal ekosistemlerdeki 1.5°C'lik küresel ısınma seviyelerinde, türlerin %3 ila %14'ü yok olma riskiyle karşı karşıya kalacaktır. Eğer sıcaklık artışı 3°C'ye ulaşırsa, özgün ve tehdit altındaki türlerde yok olma riski, 1.5°C ile sınırlandırmaya kıyasla 10 kat (%3-29) daha yüksek (Madde B.4.1) olacaktır (IPCC 2022). Amazon'da ve bazı dağlık bölgelerde, küresel ısınma 2°C ve ötesinde düzeylerde devam ederse, ekosistem servisleri ve biyolojik çeşitlilik geri döndürülemez ve ciddi kayıplarla (Madde B.5.2) karşı karşıya kalacaktır (IPCC 2022).

Günümüzde iklimler geçmiş ile kıyaslandığında oldukça farklıdır; öyle ki Dünya bazı dönemlerde buz tabakalarıyla kaplı iken, yaşanan bazı sıcak dönemlerde buz tabakalarının neredeyse tamamı yok olmuştur. Burada asıl sorun, insanlık tarihinin önemli bir kısmında yaşamın evrimleşmesi ve gelişmesi için sabit ve kararlı iklimlerin, yakın zamanda hızlı bir değişime geçmiş olmasıdır. Tablo 3, dünya iklimini etkileyen başlıca olayları sonuçları ile birlikte göstermektedir.

Tablo 3'de görüldüğü gibi son zamanlarda aşırı sıcak ve kuru hava dönemleri daha sık yaşanır hale gelmiştir. Avrupa Kıtası'nda, Haziran 2003'te başlayarak Ağustos ayı ortasına kadar devam eden sıcak hava dalgası esnasında, Birleşik Krallık'ta kaydedilen tüm zamanların en yüksek sıcaklığı 10 Ağustos 2003'te 38.1°C'ye ulaşmıştır; Fransa'da sıcaklıklar 40°C'ye yükselmiş ve iki hafta boyunca alışılmadık derecede yüksek kalmıştır. İsviçre'de 2003 yılının Haziran ayı, 250 yıllık arşivlerde kaydedilen en sıcak ay olmuş ve 11 Ağustos 2003'te 41.5°C ile rekor kırmıştır (UNEP 2004). 2003 yılında, Avrupa'yı vuran aşırı sıcaklardan ağır şekilde etkilenen Fransa'da, ölüm sayısındaki artış, sıcaklıklardaki artışla aynı yönelimi göstermiştir. 1-20 Ağustos 2003 tarihleri arasındaki ölümler 14800 (%60 oranında artış) olarak tahmin edilmiştir. Hayatını kaybedenler çoğunlukla 75 yaşından büyük yaşlı kadınlar olmuştur (Pirard vd. 2005).

Günümüzün iklim değişikliği tartışmalarının konusu dünyadaki doğal sera etkisi ile ilgili değildir; insan kaynaklı (antropojenik) sera gazları emisyonlarının neden olduğu veya neden olmadığı gelişmiş sera etkisi ile ilgilidir. Myers vd. (2021) tarafından hazırlanan iklim değişikliği araştırmalarına ilişkin nicelleştirme çalışmasında, insan faaliyetlerinin Dünya'nın yüzeyini ve okyanus havzalarını ısıttığını ve bunun da dünyanın iklimini etkilemeye devam ettiğini gösterdiği konusunda bilimsel fikir birliğine varıldığı ifade edilmektedir (Myers vd. 2021). Ayrıca, dünya çapında önde gelen bilimsel kuruluşların çoğu da, bu durumu onaylayan açıklamalar yayımlamaktadırlar. Tablo 4, iklim üzerine etki gösteren olayların incelenmesinde temel rol oynayan dönüm noktalarını ve literatürde yer alan bazı önemli çalışmaları göstermektedir.

Tablo 3: Dünya iklimine etki gösteren başlıca olaylar ve bu olayların sonuçları

Tarih	Olay	Sonuç
55 Myıl önce	Uzun sürecek bir küresel soğuma başlamıştır ve zamanla günümüzden yaklaşık 20000 yıl önce maksimum noktasına ulaşan buzul çağları yaşanmıştır.	Yaşadığımız dönem buzul çağının nispeten sıcak bir evresidir.
15.000 yıl önce	Buzul çağının son soğuk evresi sona ermiştir.	Kuzey Amerika, Avrupa ve Güney Asya'nın büyük bölümünü kaplayan geniş buz örtüleri erimeye başlamıştır.
13.000 yıl önce	Yüksek miktarda ergime suyu Atlantik Okyanusu'nun kuzeyine karışmıştır (Genç Dryas Dönemi).	Okyanus akıntılarının işlevinin bozulmasıyla 1300 yıl sürecek bir yerel sıcaklık düşüşü yaşanmıştır.
6.000 yıl önce	Kuraklık sebebiyle, Afrika'nın kuzeyinde 8000 yıl boyunca yaşanan muson iklimi sona ermiştir.	Bölgedeki tropik çayırılar, bugün Sahra Çölü olarak bildiğimiz çöle dönüşmüştür.
MS 1000	Günümüzdeki kadar sıcak bir iklim yaşanmıştır (Orta Çağ Sıcaklık Dönemi).	Meksika'da yaşanan uzun süreli kuraklık yüzünden, birçok Maya kenti terk etmiştir.
1430	Artan yanardağ etkileri yüzünden ortaya çıkan kül bulutlarının güneş ışınlarını kısmen yansıtması sonucu bu soğuk dönemin yaşanmış olabileceği düşünülmektedir (Küçük Buzul Çağı Başlangıcı).	Kışın nehirler ve kanallar donmuştur. Düşük sıcaklıklar ekinleri tahrip etmiştir ve açlığa sebebiyet vermiştir.
1815	Kayıtlara geçmiş en büyük yanardağ patlaması Endonezya'da Tambora Yanardağı'nda gerçekleşmiştir (Yazı Yaşamayan Yıl).	Havadaki küller dünyayı gölgelemiştir.
1931	Tarihteki en yıkıcı iklim olayı olarak geçmektedir. Çin'de 1928-1930 tarihleri aralığında gerçekleşen üç yıllık kuraklık sonrasında, sağanak yağışlar ve kar fırtınaları meydana gelmiştir. Bunun sonucunda Yangtze Nehri yükselmiştir ve yıkıcı sel dizileri yaşanmıştır (Orta Çin Selleri).	Ölü sayısının yaklaşık olarak 3.7 milyon kişiye ulaştığı tahmin edilmektedir. Hasar maliyetleri korkunç yıkım yüzünden hesaplanamamıştır.
1932	Uzun süren kuraklık sonrası, Kuzey Amerika Büyük Ovaları'nın geniş alanlarındaki kuru topraklar rüzgarla uçmaya başlamıştır ve toz fırtınaları yaşanmıştır (Toz Çanağı Dönemi).	1939 yılına kadar devam eden fırtınalar çok sayıda ölüme ve bölgede eşi görülmemiş ölçekte göçe sebebiyet vermiştir.
1948	ABD tarihindeki en kötü endüstriyel hava kirliliği felaketlerinden biri Donora, Pennsylvania'da meydana gelmiştir. Olaya, bölgede bulunan çelik tesislerinde çinko eritme işleminden kaynaklanan florür emisyonlarının neden olduğu açıklanmıştır (Donora Ölüm Sisi).	14000 kişilik kasaba sakinlerinden yaklaşık olarak 5000 ila 7000 kişi hastalanmış, 20 kişi ise hayatını kaybetmiştir.
1968-80	1968 yılından başlayarak, Batı Afrika'dan Etiyopya'ya kadar Sahel bölgesini bir dizi kuraklık vurmuştur (Sahel Kuraklığı).	1974-75 yıllarında bir miktar iyileşme olsa da, 1980'lere kadar devam etmiştir. Çok sayıda insan açlıktan hayatını kaybetmiştir.
1970	Kaydedilen en ölümcül tropikal siklon, Bangladeş'te yaşanmıştır (Büyük Bholá Siklonu).	Fırtınada en az 300000 kişi hayatını kaybetmiştir.

Tablo 3'ün devamı

Tarih	Olay	Sonuç
1982-83	Avustralya, kısa vadeli yağış eksiklikleri ve bunların genel etkileri açısından 20. yy.ın en kötü kuraklığını yaşamıştır.	60'dan fazla kişinin ölümüyle sonuçlanan orman yangınlarını tetiklemiştir.
1987	Güney İngiltere'de muhtemelen 1703 yılından bu yana bölgeyi vuran en şiddetli fırtına gerçekleşmiştir.	Fırtınada 15 milyon kadar ağacın yok olduğu, birçok ormanlık alanın neredeyse tamamen düzleştiği tahmin edilmektedir.
1991	1912 yılında Alaska'daki patlamadan bu yana, 20. yüzyılda gerçekleşen en büyük ikinci volkanik patlama Filipinler'deki Pinatubo Yanardağı'nda gerçekleşmiştir.	Atmosfere yükselen toz bulutu, iki yıl boyunca ortalama küresel sıcaklıkları düşürmüştür (Parker vd. 1996).
1995	Antarktika Yarımadası'ndaki Larsen-A buz sahanlığı parçalanıp kopmuştur. Temmuz ayının ortalarında ABD'nin orta ve doğusunda kısa; ancak yoğun bir sıcaklık dalgası gelişmiştir ve yüzlerce ölüme sebep olmuştur.	Larsen-A, 1977-1989 yılları arasında ortalama 14.2 km geri çekilmiş iken, 1989'dan 1995 yılına kadar kalan buz sahanlığı parçalandığında, buz cephesindeki ortalama geri çekilme 48 km olmuştur (Ferrigno vd. 2006). Yoğun sıcaklıkların etkisiyle, çoğunluğu yaşlı insanlardan oluşan 525 kişi Chicago'da, 830 kişi ülke genelinde hayatını kaybetmiştir (Changnon vd. 1996).
1997	Endonezya'da başlayan orman yangınları, Malezya ve Singapur'u da etkisine alarak, geniş ormanlık alanları yok etmiştir	1998'de tespit edilen atmosferik CO ₂ konsantrasyonlarındaki keskin artışa büyük katkıda bulunmuştur (Page vd. 2002).
2002	Antarktika Yarımadası'nda bulunan yaklaşık 220 m kalınlığındaki Larsen-B buz sahanlığı, 35 günlük bir sürede yok olmuştur.	3250 km ² buzul eriyerek okyanusa karışmıştır (Scambos vd. 2004).
2003	En az 1540'tan bu yana Avrupa'da kaydedilen en aşırı sıcak hava dalgası yaşanmıştır (Avrupa Sıcak Hava Dalgası).	40°C'nin üzerine çıkan sıcaklıklardan dolayı, ölü sayısının 70000'den fazla olduğu tahmin edilmektedir (Robine vd. 2007).
2005	27 tropik fırtına ve 1 subtropikal fırtına dahil olmak üzere 28 fırtına meydana gelmiştir. Fırtınaların 15'i kasırgaya dönmüştür, bunlardan 7 tanesi aralarında Katrina Kasırgası'nın da yer aldığı büyük kasırgalardır (Atlantik Kasırga Sezonu).	Fırtınalar doğrudan yaklaşık 1700 ölüme yol açmıştır. Buna, 1928'den bu yana en ölümcül ABD kasırgası olan Katrina Kasırgası'ndaki yaklaşık 1500 kişi de dahildir (Beven II vd. 2008).
2017	A68 buzdağı, Antarktika Yarımadası'nda kalan en büyük buz sahanlığı olan Larsen-C'den kopmuştur.	A68 koptuğunda alanı yaklaşık 5800 km ² idi (Benn ve Åström 2018) ve bu, Larsen-C buz sahanlığının yaklaşık %10'unu oluşturuyordu (Hogg ve Gudmundsson 2017).

Tablo 4: Dünya ikliminin incelenmesinde temel rol oynayan dönüm noktaları ve bazı önemli çalışmalar

Tarih	Teknik
1709	İngiliz sanayici Abraham Darby kömür kullanarak demir üretmenin yolunu bulmuştur. Böylece fosil yakıtların endüstride enerji kaynağı olarak kullanılmasının önu açılmıştır. Kömürün sanayide kullanılmaya başlanması sonucu gerçekleşen Sanayi Devrimi ile atmosferdeki CO ₂ düzeyi yükselmeye başlamıştır.
1885	Alman mühendis Karl Friedrich Benz petrole çalışan ilk arabayı geliştirmiştir.
1896	İsveçli kimyager Svante Arrhenius, fosil yakıtların potansiyel olarak önemli bir CO ₂ kaynağı olduğunu öne sürmüştür (Arrhenius 1896). Arrhenius, atmosferik CO ₂ konsantrasyonundaki değişikliklerin iklimdeki uzun vadeli değişikliklere katkıda bulunup bulunmadığı hakkında uyarı yapan ilk kişidir.
1938	İngiliz mühendis Guy Stewart Callendar küresel sıcaklıklardaki yükselişi, insan faaliyetlerinin yol açtığı CO ₂ emisyonlarına bağlamıştır (Callendar 1939). Yapay CO ₂ üretimi ile küresel ısınma arasındaki bağlantıyı tanımladığı bu yaklaşım, literatürde Callendar Etkisi olarak yerini almıştır (Callendar 1938).
1958	Amerikalı bilim insanı Charles David Keeling, atmosferdeki CO ₂ yoğunluklarını kaydetmeye başlamıştır. Bu, dünyanın doğal mevsimsel CO ₂ salınımlarının ilk nicel raporudur. Gözlemsel verilerden elde edilen, Keeling'in grafiği (Keeling Eğrisi), CO ₂ 'deki küresel artışın açık bir kaydı ve iklim değişikliğine antropojenik katkının ilk bilimsel doğrulamasıdır.
1961	Rus klimatolog Mikhail Ivanoviç Budyko, endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan küresel iklim değişikliğinin kaçınılmaz doğası konusunda insanlığa ilk uyarıyı yapmıştır.
1967	Syukuro Manabe ve Richard T. Wetherald hesaplamalı iklim modellemesine öncülük etmişlerdir. Atmosferik CO ₂ miktarının iki katına çıkması durumunda, küresel sıcaklığın 2°C artabileceğini ortaya koymuşlardır (Manabe ve Wetherald 1967). Manabe, iklim bilimi üzerine yapmış olduğu çalışmalarından ötürü 2021 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü Alman okyanus bilimci Klaus Hasselmann ile paylaşmıştır.
1982	İsviçreli iklim bilimci Hans Oeschger, Grönland buzullarını delerek antik buzullardaki atmosfer örneklerini incelemiştir. Atmosferdeki artan CO ₂ miktarı ile küresel ısınma arasındaki ilişkiyi göstermiştir (Nefel vd. 1982).
2007	Çin, sera gazları salım miktarını ilk sıradaki ABD'den alarak birinci sıraya gelmiştir. Bunun nedenleri arasında, Çin'deki ekonomik büyüme, çimento endüstrisi ve kömürle çalışan termik elektrik santralleri gösterilebilir.
2020	Dünya ısınmaya devam ettikçe, karaya vuran kasırgaların yıkıcı gücünün iç kısımlara doğru giderek genişleyeceği aktarılmıştır (Li ve Chakraborty 2020). Bu çalışma, iklim değişikliği ile karaya vuran kasırgalar arasında net bir bağlantı kurması bakımından bir ilktir.
2022	Kuzey Kutbu bölgesinin, son yıllarda dünyanın geri kalanının çoğundan daha büyük bir ısınma eğilimi yaşadığı, bundan dolayı 1970'ten bu yana, Kuzey Kutbu yüzey hava sıcaklığının, küresel ortalama sıcaklıktan birkaç kat daha hızlı yükseldiği saptanmıştır. Bu durum Kuzey Kutbu deniz buz örtüsünün azalmasına ve Grönland buz tabakasının ergimesine yol açmaktadır (Chylek vd. 2022).

2.3. İklim Değişikliğine Bağlı Artan Afetler ve Etkileri

Dünya üzerinde iklim değişiminden diğerlerine göre daha fazla zarar görebileceği öngörülen en hassas bölgeler Kuzey Kutbu Tundra Bölgesi ve Amazon ormanlarıdır. Kuzey Kutup dairesini kaplayan tundra, 1000 metreden bile daha kalın buz tabakalarının olduğu, tüm yüzeyin üzerinde ise çok az ağacın yetiştiği ince bir çim halı yapısına sahiptir.

Yılın tamamında toprak tamamen donmuş halde bulunduğundan Mikhail Ivanovich Sumgin tarafından 1920'lerin sonlarında "*vechnaya merzlot*" yani "*sürekli don (permafrost)*" terimi ortaya atılmıştır (Sumgin 1927). Permafrost, en az iki ardışık yıl boyunca 0°C'de veya altında kalan zemin olarak tanımlanan (IPA 1998) kar ve buz çökeltilerinin bütünüdür (kryosferin) bir bileşenidir. Dünya'nın açığındaki kara yüzeyinin yaklaşık 13.2-18.1x10⁶ km²'sinin (Gruber 2012), Kuzey Yarım Küre'nin ise yaklaşık %15'inin altını permafrost kaplamaktadır (Obu 2021). Permafrostun iklim değişikliğine karşı direnci ve kırılabilirliği, topografya, su, toprak, bitki örtüsü ve kar arasındaki karmaşık etkileşimlere bağlıdır; bu durum, permafrostun ortalama yıllık hava sıcaklığının +2°C kadar yüksek olduğu bölgelerde kalabilmesine ve -20°C civarında olduğu alanlarda bozulabilmesine izin vermektedir (Jorgenson vd. 2010). Eşi görülmemiş iklim değişikliğine paralel olarak (IPCC 2022), küresel permafrost sıcaklıkları önemli ölçüde artmıştır (Biskaborn vd. 2019). Gözlemlenen sıcaklıklar üzerinde yürütülen bir analiz, Kuzey Kutup Bölgesi'nin, ortalama küresel ısınma hızından en az dört kat daha hızlı ısındığını, bu ısınma eğiliminin son 50 yılda keskin bir yükseliş sergileyerek iki kat artmış olduğunu göstermiştir (Chylek vd. 2022).

2022 yılında yayımlanan bir araştırma, 2000'li yılların başlarından bu yana, Amazon yağmur ormanlarının direncinde belirgin bir kayıp olduğuna dair deneysel kanıtları ortaya koymaktadır (Boulton vd. 2022). Son 30 yılın gerçek uydu gözlemlerine dayanan değerlendirme, küresel ölçekte karbon depolama, iklim değişikliği ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki derin etkiler dolayısıyla, Amazon ormanlarının kritik eşiğe yaklaştığını ve yok olma riski taşıdığını gözler önüne sermektedir (Boulton vd. 2022). CO₂ emerek ve oksijen sağlayarak gezegenimizin iklimine fayda sağlayan Amazon yağmur ormanlarının bitki örtüsünün yok olması onarılamaz bir değişimdir (Kurnaz 2019).

Artan küresel sıcaklıklar karalarda ısı dalgaları, orman yangınları, eriyen buzullar şeklinde etkilerini gösterirken, okyanuslar karalara göre daha yavaş ısındığından okyanuslardaki etkiler daha az göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, su sıcaklığı verileri, hava sıcaklık verilerine göre daha zor elde edildiğinden bu konudaki çalışmalar özellikle önem teşkil etmektedir.










2019 yılında Uluslararası Okyanus Keşif Programı (International Ocean Discovery Program, IODP) tarafından yürütülen bir çalışmada, Antarktika deniz tabanının altında bugüne kadar keşfedilmiş en eski (yaklaşık 1 Myl) tortul antik mikroorganizmalara ait DNA izine rastlanmıştır (Armbrecht vd. 2022). İncelenen örneklerden elde edilen veriler, artan okyanus sıcaklıklarının ve buz örtüsündeki kayıpların diatomların büyümesini ve üremesini hızlandırdığını göstermesinin yanı sıra, okyanus ekosistemlerinin iklim değişikliğine nasıl tepki verdiğini anlayarak, gelecekteki değişimin değerlendirilmesine de yardımcı olacaktır (Armbrecht vd. 2022).

İklim değişikliği ile kaybolan ya da yaygın olarak küçülen ve geri çekilen buz tabakalarının altından insanlar ve doğa açısından önemli bilgiler sunan arkeolojik ve biyolojik kalıntılar ortaya çıkmaya devam etmektedir ve bu hüzünlü tablonun yanında beklenmedik keşifler de yerini almaktadır. 2022 yılında, haliçlerin iklim kaynaklı buzulların ergimesinde nasıl bir rol oynayabileceğini araştıran Yeni Zelanda'dan bir grup bilim insanı tarafından, Antarktika buz sahanlığının altında, bugüne dek saklı kalmış bir eklem bacaklı sürüsünden oluşan yeni bir sualtı yaşam alanı keşfedilmiştir (The Guardian 2022). Diğer taraftan, iklim değişikliğinin neden olduğu hızlı ergime sebebiyle buzullarda hapsolmüş, birçoğu insanlar tarafından bilinmeyen virüslerin (Lemieux vd. 2022) ve bakterilerin (Liu vd. 2022) serbest kalmasının salgınlar geliştirme potansiyeline sahip olabileceği düşünülmektedir (Yarzabal vd. 2021).

İklim değişikliği; deniz, tatlı su ve karasal sistemlerde buzullarla beslenen biyotada kapsamlı değişikliklere yol açmaktadır (Cauvy-Fraunié ve Dangles 2019). Öyle ki, önümüzdeki yıllarda, antropojenik iklim değişikliği sinyalleri daha belirgin hale geldikçe ve buzullar tamamen ortadan kalktıça, ekosistem işleyişinde ve insan topluluklarına yönelik bildirilerde belirsiz sonuçlarla birlikte, buzullarla beslenen sistemlerin biyolojik çeşitliliğinde önemli değişiklikler meydana gelecektir (Cauvy-Fraunié ve Dangles 2019). Yüksek sıcaklığa bağlı balık ölümlerine odaklanan araştırmacılar, gezegenimizin iklimi ısındıkça, artan sıcaklığa bağlı olarak toplu balık ölümlerinin yaygınlaştığını tespit etmişlerdir (Tye vd. 2022).

İnsan kaynaklı iklim krizi, gezegenimizin genelinde aşırı hava koşullarını şaşırtıcı bir hızla güçlendirmekte, insanlar, iklim krizinin tetiklediği daha ölümcül ve daha sık görülen sıcak hava dalgaları, seller, orman yangınları ve kuraklıklar nedeniyle hayatlarını ve geçim kaynaklarını kaybetmektedirler. Doğu Akdeniz ve Türkiye, küresel iklim değişikliği dolayısıyla gelecekte yaşanacak kuraklıklardan en çok etkilenecek alanların başında gelmektedir (Öztürk ve Ünlü 2022). Uluslararası Acil Durum Veri Tabanı'na (Emergency Events Database, EM-DAT) kaydedilen veriler ile oluşturulan 2022 yılı raporuna göre, 2021 yılında dünya çapında kaydedilen 432 doğal afet olayında 10492 insan hayatını kaybetmiştir, 101.8 milyon insan bu afetlerden etkilenmiştir ve yaklaşık 252.1 milyar Amerikan Doları (USD) ekonomik kayıp (Tablo 5) yaşanmıştır (CRED 2022a). Küresel olarak, ölüm sayısı ve etkilenen insan sayısı 20 yıllık ortalamaların altında kalmış olsa da, afet olaylarının sayısındaki artış ve büyük ekonomik kayıplar 2021 yılına damgasını vurmuştur. Tüm afet olaylarının %40'ına maruz kalan, toplam ölüm sayısının %48.7'sini ve etkilenen toplam insan sayısının %65.5'ini oluşturan Asya kıtası, afetlerden en ciddi şekilde etkilenen bölge olmuştur (CRED 2022b).

Tablo 5: 2021 yılı ve son 20 yılın ortalaması için afet, ölüm ve etkilenen insan sayıları ile ekonomik kayıplar (CRED 2022a-b)

Afet Türü	Kuraklık	Deprem	Aşırı Sıcaklar	Sel	Toprak Kayması	Kütle Hareketi (kuru)	Fırtına	Volkanik Aktivite	Yangın	Toplam
										
Afet Sayısı										
2021	15	28	3	223	14	0	121	9	19	432
2001-2020	16	27	21	163	18	1	102	5	11	347
Ölüm Sayısı										
2021	0	2742	1044	4143	474	0	1876	85	128	10492
2001-2020	1059	37942	8684	5185	884	37	10442	89	77	61212
Etkilenen İnsan Sayısı (milyon)										
2021	52.7	1.1	0	29.2	0	0	17.6	0.5	0.7	101.8
2001-2020	67.5	6.2	5.1	82.7	0.2	0	37.4	0.3	0.7	193.4
Ekonomik Kayıplar (milyar USD)										
2021	12.1	11.3	5.6	74.4	0.5	0	137.7	1.3	9.2	252.1
2001-2020	6.7	35.4	3.1	34.1	0.3	0	77.0	0.1	5.0	153.8

2021 yılında en ölümcül felaket türünün, ölümlerin %39.5'ini oluşturan sellerin olduğu, bunu %26.1 ile depremlerin, %17.9 ile fırtınaların ve %10.0 ile aşırı sıcakların izlediği görülmektedir. Ayrıca kuraklık, toplamın %51.8'ini oluşturarak en fazla insanı etkileyen doğal afet olmuştur; bunu %28.7 ile seller ve %17.3 ile fırtınalar izlemiştir. Muson mevsimi boyunca (Haziran-Eylül) Hindistan'da 1282 can kaybının yaşandığı bir dizi ölümcül sel felaketi yaşanmıştır. Temmuz ayında, Çin'deki Henan Seli 352 kişinin hayatını kaybetmesine, 14.5 milyon insanın etkilenmesine ve 16.5 milyar USD ekonomik kayba sebep olmuştur. Aynı zamanlarda, Afganistan'daki Nuristan Sel Felaketi 260 kişinin ölümüne yol açmıştır. Temmuz ayında gerçekleşen Orta Avrupa Taşkınları ve ardından gelen heyelanlar, yalnızca Almanya'da 40 milyar USD tutarında ekonomik maliyetle sonuçlanmış ve en maliyetli ikinci felaket olmuştur (CRED 2022a).

Sel ve fırtınaların aksine, 2001-2020 yılları arasındaki ortalama (21 olay) ile karşılaştırıldığında 2021'de (toplam üç olay) nispeten daha az aşırı sıcaklık olayı kaydedilmiştir; ancak bu aşırı sıcaklık olaylarının sonuçları önem arz etmiştir. Örneğin, 2021 yılı Nisan ayının başında Fransa'yı vuran soğuk dalgası özellikle üzüm bağlarında önemli tarımsal hasara neden olmuş, Haziran ve Temmuz aylarında Batı Kuzey Amerika Isı Dalgası, Kanada'da 815 ve ABD'de 229 ölüme sebebiyet vermiştir (CRED 2022a).

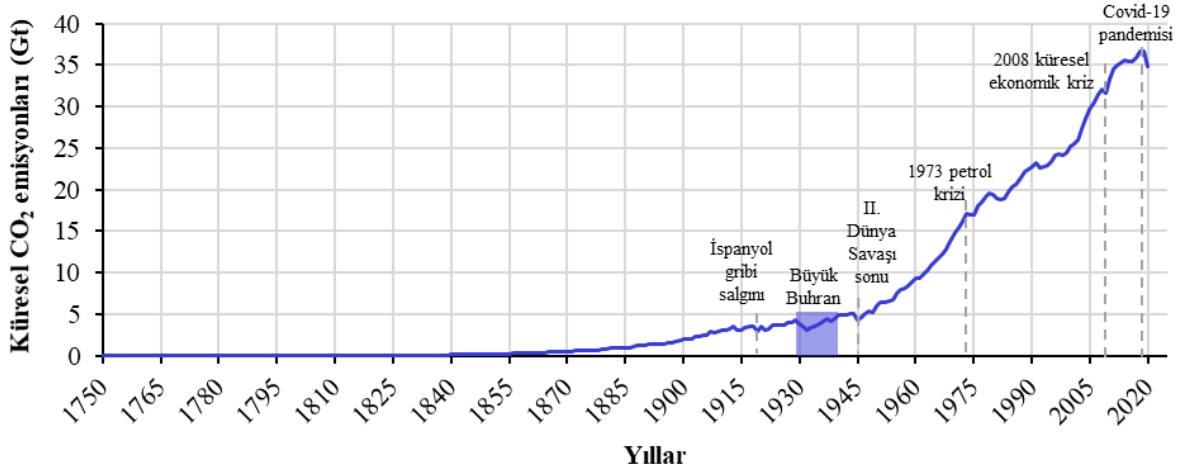
Son yirmi yılda EM-DAT'ta kaydedilen en zararlı dördüncü yıl 252 milyar USD tutarındaki ekonomik zararlar 2021 yılı olmuştur; tek başına 65 milyar USD maddi zarara mal olan İda Kasırgası ise en çok zarar veren 6. felaket olarak kayıtlara geçmiştir. 2001-2020 ortalaması olan 27 olayla uyumlu olarak, 2021 yılında 28 deprem felaketi bildirilmiştir. Haiti'de Ağustos ayında meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki deprem, 2575 ölüme sebebiyet vererek 2021 yılındaki en ölümcül felaket olarak en üst sırada yer almıştır. Buna ek olarak, Şubat ayındaki Fukushima Depremi (7.1 büyüklüğünde) 2021'de en maliyetli ilk on afet arasında yerini almış ve tahmini olarak 7.7 milyar USD tutarında ekonomik maliyete sebep olmuştur; ancak 2021 yılında daha büyük depremler (mega deprem) olmaması dolayısıyla, depremlerden etkilenen ve ölenlerin sayısı ile küresel ekonomik zararlar son 20 yılın ortalamasından daha düşük olmuştur (CRED 2022a).

Gezegemimizin iklim değişikliğine dair açık ve ikna edici kanıtlar, küresel ısınma tehdidini yavaşlamak, hatta durdurmak üzere, gerekli önlemlerin alınmasına dair gereken verimli ve etkin politikaların uygulanması gerektiğini göstermektedir. Dünya için büyük bir tehdit haline gelen iklim değişikliğinin üstesinden gelmek üzere, enerji ve doğal kaynakların etkin bir şekilde kullanıldığı, atıkların geri dönüştürüldüğü, çevreye zararsız ve sürdürülebilir gelişmeye katkı sağlayan dögüsel ekonomi modeli ön plana çıkmaktadır (Yılmaz 2022). Doğrusal ekonomik modelden dögüsel ekonomik modele dönüşüm hedefiyle Avrupa Birliği tarafından 2019 yılında hazırlanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal), Avrupa Birliği'ne üye ülkelerde 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarının sonlandırılması, ekonomik büyümenin kaynak kullanımından bağımsız kılınması ve AB ülkeleri ile ticari ilişkilerde bulunan ülkelerin de bu kapsamda yer alması şeklindeki amaçlarla hazırlanan stratejik bir eylem planıdır (Mirici ve Berberoğlu 2022; Yılmaz 2022).

3. Enerji Kaynakları

Küresel iklim değişikliğinin nihai kaynağı, CO₂ emisyonuna yol açan kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yakılmasıdır. 2020 yılında küresel CO₂ emisyonları büyük bir düşüş (%5.4 ile küresel mali krizi izleyen 2008-2009 düşüşünden neredeyse beş kat daha fazla) göstermiş ve yaklaşık 2 Gt azalmıştır. Her ne kadar, Covid-19 pandemisi petrol ve kömür talebini diğer enerji kaynaklarından daha fazla etkilemiş ve 2020'de CO₂ emisyonları düşmüş, küresel enerjiyle ilgili CO₂ emisyonları 34.81 Gt'de kalmış olsa da, toplam CO₂ artmaya devam etmiş ve bu da CO₂'in 414 ppm ile atmosferde şimdiye kadarki en yüksek ortalama yıllık konsantrasyonuna – sanayi devriminin başladığı zamana göre yaklaşık %50 daha yüksek – ulaşmasına neden olmuştur.

Fosil yakıtlardan ve endüstriden kaynaklanan küresel CO₂ emisyonlarının yıllara göre değişimi Şekil 3’de görülmektedir (Ritchie vd. 2020). Grafikte, Sanayi Devrimi’nden önce emisyonların oldukça düşük olduğu, 18. yy.ın ortalarından günümüze oldukça arttığı görülmektedir. Emisyonlardaki artış, 20. yy. ortalarına kadar nispeten yavaş olsa da (1950’de 6 milyar ton CO₂), 1990 yılına gelindiğinde yaklaşık dört kat artarak 22 milyar tonun üzerine çıkmıştır ve bu büyüme hızla devam etmiştir.



Şekil 3: 1750-2020 yılları arası küresel CO₂ emisyonları (Ritchie vd. 2020 kaynağından derlenmiştir)

Oduna göre daha avantajlı olan ve Sanayi Devrimi’ni mümkün kılan kömürün çevreyi kirletmek gibi ciddi dezavantajları olması ve üretilen enerjinin yeni endüstriyel süreçleri desteklemekte yetersiz kalması petrol çağının başlangıcını getirmiştir. Şu anda petrolün yerini alabilecek en uygun aday fazlasıyla bulunabilen ve çevreyi çok daha az kirleten doğalgazdır; fakat sorun şudur ki doğalgaz petrolden çok daha pahalıdır ve üretim alanlarından taşınması da oldukça zordur. Diğer alternatifler, her ikisi de tertemiz; ancak verimi az ve işlenebilirliği zor güneş ve rüzgar enerjileridir. Öte yandan ne güneş ne de rüzgar sürekli değildir, her zaman enerji vermezler; rüzgar durduğunda rüzgar türbinleri elektrik üretmeyi durdurur ve aynı şey geceleri ve gökyüzü bulutlu olduğunda güneş santrallerinde de geçerlidir. Dahası maliyetleri de yüksektir. Bu kaynakların kesinlikle kendine göre rolleri vardır; fakat dünya ekonomisine bir destek görevi görebileceklerini düşünmek ihtimali azdır. Bütün bunlar dikkate alındığında, CO₂ emisyonu artışına neden olmayan nükleer enerji, iklim değişikliği ile mücadelede anahtar görevi olabilecek bir teknoloji olarak görülmektedir (NEA 2015).

Başka bir ikincil enerji kaynağı olan hidrojenin kullanım potansiyeli, William Robert Grove tarafından keşfedilmiştir (Moru 2017) ve John Burdon Sanderson Haldane ise “hidrojen ekonomisi” kavramını ortaya atarak hidrojenle çalışan bir uygarlığın ana hatlarını çizmiştir. Oksijenle karıştırılıp yakıldığında sadece enerji ve su buharı elde edilmesi, su buharının da yoğunlaştırılarak suya dönüştürülmesi yoluyla sera gazına dönüşmesinin engellenmesi, hidrojeni temiz bir enerji kaynağı yapmaktadır. Hidrojen; yenilenebilir enerji, fosil yakıtlar ve su dahil olmak üzere farklı kaynaklardan üretilmekte ve bazıları halihazırda ticari olarak mevcut ve bazıları ise geliştirilmekte olan çeşitli tekniklerle elde edilebilmektedir. Bir yakıt olarak hidrojene olan talebin artması, kaynağını sınıflandırmayı önemli kılmaktadır; çünkü hidrojeni işlemek için kullanılan yöntemlerin farklı karbon ayak izleri bulunmaktadır. Hidrojen üretimi için mevcut ve önerilen teknolojilerin %80’den fazlası çevre kirliliğine en büyük katkıyı sağlayan fosil yakıtlara dayanmaktadır (Amin vd. 2022). Hidrojenin doğada tek başına bulunmaması ve hidrojen içeren diğer moleküllerden ayrıştırılmasında birincil enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulması, hidrojen ile havadaki oksijenin yanmasının gerçekleştiği yakıt hücrelerinin ve hidrojen yakıt pillerinin maliyeti ve bu yakıtın depolanmasıyla ilgili sorunlar hidrojenin bir enerji kaynağı olarak kullanımı için gerekli teknolojinin geliştirilmesinin önündeki engellerdir (Ball ve Wietschel 2009).

Gelecek için düşünülebilecek birkaç alternatiften bir diğeri biyoyakıtlardır. Biyoyakıtların kendileri çevre dostu olsa da, biyoyakıt ekinlerinin yetiştirilmeleri sırasında güçlü bir sera gazı olan nitroz oksit salmaları fosil yakıtlara kıyasla biyoyakıtların kullanılmasını sera gazı salınımları açısından dezavantajlı kılmaktadır (Smith vd. 2012).

İklim değişikliğine yol açan fosil yakıtları kullanmadan, enerji ihtiyacımızın tümünün olmasa da bir kısmının karşılanabileceği teknolojilerden biri, karalarda akan suların elektrik jeneratörlerine bağlı türbinleri çalıştırmak için kullanıldığı hidroelektrik enerji santralleridir. Hidroelektrik santrallerin çoğunda, dengeli bir akış sağlamak amacıyla su, büyük barajların meydana getirdiği su haznelerinde depolanmaktadır. Ne var ki, hidroelektrik santrallerin ekolojik etkileri büyüktür; çünkü bazı hayvanların yaşam alanlarının su altında kalmasına ek olarak, bitki örtüsündeki doğal su yollarını ve vahşi yaşamın hareket yollarını değiştirerek ekosistemi etkilemektedirler (Vezmar vd. 2014). Norveç ve Kanada gibi bazı ülkelerde, elektrik üretimi çoğunlukla hidroelektrik enerjisine dayanmaktadır. Hidroelektrik santrallerde kullanılan türbinlerin benzerlerinin kıyı şeridindeki bir gelgit girintisine kurulduğu sistemler de mevcuttur (Chowdhury vd. 2021).

Bu sistemlerde, suların yükselmesiyle baraj kapakları açılmakta, su en yüksek seviyeye ulaştığında kapaklar kapatılmaktadır ve su alçalmaya başladığında kapaklar açılarak, suyun çıkışı sağlanmaktadır; böylece bu gelgitlerin kabarması ve alçalması elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 1966 yılında inşa edilen ve günümüzde halen kullanılmakta olan Fransa'daki Rance Nehri'nin halindeki La Rance Gelgit Enerji Santrali işletilmekte olan en eski gelgit santralidir. İskoçya'da bulunan toplam 398 MW potansiyel kapasiteli MeyGen Gelgit Enerji Projesi ise dünyadaki en büyük gelgit akıntısı projesi olarak karşımıza çıkmaktadır (SAE 2023). Gelgit barajları temiz enerji üretmektedir; fakat kıyı şeridindeki yaban hayatı yaşam alanlarına zarar verebilmektedirler ve bu enerjiden elektrik üretim maliyeti konvansiyonel enerji kaynaklarından çok daha fazladır (Melikoğlu 2018).

Elektrik üretiminin pek çok yolundan biri de zincirleme çekirdek tepkimeleri sonucunda açığa çıkan büyük miktardaki ısıdır, nükleer santrallerde kullanılmasıdır. Tepkime, nükleer reaktörde meydana gelmektedir ve ortaya çıkan ısı Rankine buhar çevrimiyle çalışan nükleer santrallerde buhar oluşturmada kullanılmaktadır (Lamarsh 2002; Duderstadt ve Hamilton 1976). Nükleer enerji, sera gazı salmayan güçlü bir enerji kaynağıdır; ancak uranyum madenciliği ve nükleer enerji santrallerinin inşa edilmesi sırasında büyük miktarlarda enerji tüketilmesi sebebiyle dolaylı da olsa bütünüyle karbonsuz bir yöntem değildir. Nükleer enerji, iklim değişikliğine bağlı yaşanabilecek yıkıcı felaket riskini azalmaya yönelik tartışılmalı bir alternatiftir; ancak güneş enerjisinin, asla fosil yakıtların yerini alabilecek birincil enerji kaynağı olamayacağına inanan bazı bilim insanlarına göre, uygarlığımızın en iyi son umudu olarak görülmektedir (Ayres 2021).

3.1. Nükleer Enerjinin Dünü ve Bugünü

Bilim insanlarının nükleer fisyon ve füzyon olaylarından büyük miktarda enerji elde edebileceğinin bulunması, yaşadığımız dünyayı büyük ölçüde değiştiren, tartışılmalı nükleer teknoloji uygulamalarındaki bilimsel atılımları beraberinde getirmiştir. Radyoaktif izotopların tıp (radyoloji, nükleer tıp, radyoterapi), tarım (zararlı böceklerle mücadele), gıda güvenliği (sebze ve meyvelerin olgunlaşmasını geciktirmek, etteki bakterileri yok etmek), endüstri (kalite kontrol), sanayi (ölçüm aygıtlarında), uzay araştırmaları (uzay gemilerine enerji sağlamak), jeoloji ve arkeoloji (yaş tayini) vb. olmak üzere birçok kullanım alanı vardır. Dahası, nükleer teknolojinin II. Dünya Savaşı'ndan bu yana ulusal güvenlik ve jeopolitik açıdan politik etkisi de söz konusudur (Karaosmanoğlu 1996). Bir atomun merkezindeki çekirdekte saklı bulunan muazzam miktardaki enerji, çekirdek bölünmesi (fisyon) ve çekirdek kaynaşması (füzyon) yollarıyla elde edilebilmektedir.

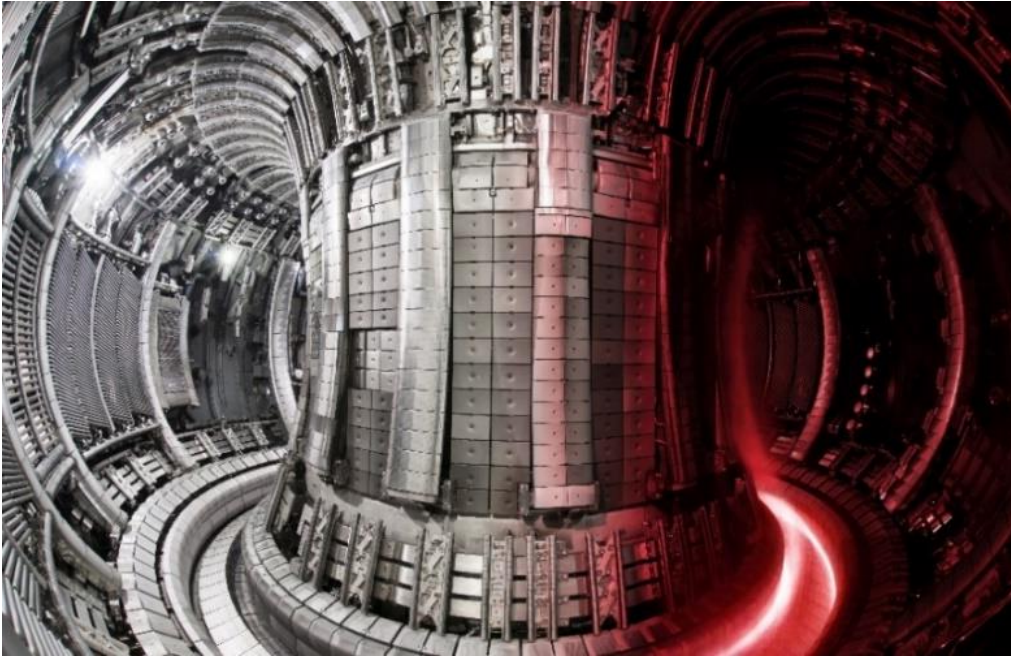
Çekirdekte bir değişime yol açan bu tepkimelerde (çekirdek tepkimeleri) açığa çıkan kinetik enerjiler oldukça büyüktür ve hatta bu tepkimeler hızlı bir şekilde gerçekleşirse şiddetli patlamalara bile yol açabilirken, yavaş ve kontrollü bir şekilde gerçekleşirse elektrik üretiminde kullanılabilirler. Uranyum-235, plütonyum-239 gibi ağır ve kararsız bir çekirdeğin, bir parçacıkla (genellikle nötronla) çarpışmasıyla büyük miktarda nükleer bağ enerjisinin serbest bırakılarak aynı olmayan iki daha hafif çekirdeğe bölünmesi ve bu sırada 2 veya 3 hızlı nötronun ve çeşitli radyasyon türlerinin serbest bırakılması nükleer fisyon reaksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Otto Hahn ve Fritz Strassmann 1938 yılında yayımladıkları makalede, nötronlarla bombardıman edilen uranyum çekirdeğinin parçalandığını (çekirdek fisyonu) sunmuşlardır (Hahn ve Strassmann 1938). Kısa süre sonra 1939 yılında ise, Lise Meitner ve Otto Robert Frisch bu reaksiyondan muazzam miktarda enerji açığa çıkacağını teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir (Meitner ve Frisch 1939; Frisch 1939). 1939 yılının başlarında, Bohr, yalnızca uranyum-235'in (doğal uranyumun yalnızca %0.7'sini oluşturan uranyum izotopu) yavaş nötronlarla etkileşerek parçalandığına inanmak için iyi bir teorik gerekçe olduğu sonucuna varmıştır (Angelo 2004). 1940 yılına gelindiğinde, John Ray Dunning ve Columbia Üniversitesi'ndeki ekibi, Bohr'un uranyum-235'e ilişkin hipotezini deneysel olarak doğrulamışlardır (Angelo 2004). Bu çalışma, uranyum kullanan yavaş bir nötron zincir reaksiyonunun mümkün olduğunu ima etmiştir, ancak bu yeterli miktarda uranyum-235'in çok daha bol bulunan izotop uranyum-238'den ayrılabilmesi ve daha sonra uygun şekilde yapılandırılmış kritik bir maddeye konsantre edilmesiyle mümkün olabilirdi (Angelo 2004). Hans von Halban, J.F. Joliot-Curie ve Lew Kowarski ise, eğer reaksiyonda çok sayıda bölünebilir çekirdek bulunuyorsa, bu durumda kullanılan daha fazla nötronun açığa çıktığını, tepkimeyi başlatan da nötron olduğundan açığa çıkan nötronların daha fazla bölünmeye ve nötrona yol açarak, fisyon bir kez başlatıldıktan sonra kendiliğinden sürüp giden bir zincir reaksiyon meydana getireceğini bildirmişlerdir (von Halban vd. 1939). Bu zincirleme tepkimeye fisyon reaktörlerinde kontrollü olacak şekilde izin verilirken, fisyon bombasında tepkime kontrolsüz olarak gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, bir nötronu soğuran uranyum çekirdeği, yaklaşık olarak iki eşit parçaya bölünmekte ve her bir fisyon olayında yaklaşık 200 MeV'lik enerji açığa çıkmaktadır. Bu gerçek, fizik tarihine yön vermiştir. 1942 yılına gelindiğinde, Enrico Fermi Chicago Üniversitesi'nde dünyanın ilk nükleer reaktörünü işletmek üzere küçük bir ekibe liderlik etmiştir (von Halban vd. 1939) ve ilk kontrol edilebilir fisyon reaktörü geliştirilmiştir.

İki hafif çekirdeğin, daha kararlı ve ağır bir çekirdek oluşturmak üzere çarpışıp kaynaşması ve buna ek olarak büyük bir enerji açığa çıkması füzyon olarak adlandırılmaktadır. Bu tür reaksiyonlarda, pozitif elektrik yüklü atom çekirdeklerinin birbirine kaynaşmasını sağlamanın yolu, elektrostatik itme kuvvetini yenebilecek kinetik enerjileri kazandırmak için bu kinetik enerjilere eşdeğer olan 20-30 milyon°C mertebelerinde yüksek sıcaklıklara çıkmakta yatmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle atomlar dış yörüngelerindeki elektronlarını kaybederek iyonlaşmakta, böylece pozitif iyonlar ve negatif elektronlar birbirlerinden bağımsız hale gelmektedirler. Füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesinde "plazma" denilen elektron ve çekirdeklerin toplamını içeren bu halin gerçekleşmiş olması gerekir.

Güneş'in yüzeyindeki 6000°C sıcaklık ve çekirdeğindeki 15 milyon°C sıcaklık doğal füzyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için gerekli koşulları yaratmaktadır. Yıldızlar ve Güneş için birincil enerji kaynağı olan nükleer füzyonda, proton-proton çevrimi olarak bilinen temel reaksiyonlar kademeli olarak dört hidrojen (H) atomunun önce iki döteryum (D) atomunu sonra da daha ağır bir element olan helyum (He) atomunu oluşturmak üzere birleşmesidir. Basit olsa da, yüksek basınç ve yoğunluk gerektirmesi sebebiyle $D + D = He$ füzyon reaksiyonu, en az kütlelden en fazla enerjiyi elde etme açısından en verimli reaksiyon değildir. En verimli füzyon reaksiyonu, iki ağır hidrojen izotopu, yani iki nötronlu D ile üç nötronlu trityum (T) arasındaki reaksiyondur. $D + T$ füzyon reaksiyonu, en düşük sıcaklıklarda en yüksek enerji kazancını üretmektedir. Reaksiyon sıcaklığını mümkün olduğunca düşük tutmak, bir reaktör tasarlamak ve reaktanları kontrol altında tutmak, yani patlamayı önlemek açısından önemli olsa bile, bu reaksiyon Güneş'te meydana gelen reaksiyonlardan on kat daha yüksek sıcaklık (150 milyon°C) gerektirmektedir.

Füzyon reaktörlerinde enerji kaynağının doğada bol miktarda bulunan hidrojen olması, füzyon reaktörlerine göre daha az radyoaktivite oluşturması gibi pozitif özelliklerinin yanında, reaksiyonu başlatan iki çekirdeğin pozitif yüklü olması durumunda itici Coulomb kuvvetini yenebilmek ve reaksiyonu başlatabilmek üzere büyük enerjilere ihtiyaç duyulması gibi sorunları da beraberinde getirmektedir (Serway ve Beichner 2000). Günümüzde füzyon reaksiyonundan enerji elde edilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan bir tanesi de uluslararası işbirliğiyle geliştirilen Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktörü (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) Projesidir. Bu proje, tıpkı Güneş'te ve yıldızlarda meydana gelen füzyon reaksiyonlarına benzer şekilde atomları birleştirerek enerji üretmeyi ve böylece, ticari enerji üretiminde füzyon enerjisinin bilimsel ve teknolojik fizibilitesini göstererek, füzyon santrallerine özgü teknolojileri test etmeyi amaçlamaktadır (Rebut vd. 1995). Güney Fransa'da 2010 yılından bu yana inşaatına devam edilen ITER nükleer füzyon tesisinin ilk plazmasını Aralık 2025 yılında üretmesi, D-T reaksiyonuna ise 2035 yılında başlaması planlanmaktadır. Eğer planlandığı gibi çalışırsa, ITER Tokamak (Toroidal Kamera Magnitnaya) 500 MW güç üretecek dünyanın en büyük ve en güçlü füzyon cihazı olacaktır (ITER 2022). Tokamak, 1950'lerin sonlarında Sovyetler Birliği'nde geliştirilmiş, yüksek sıcaklıktaki plazmayı sınırlamak ve kararlı kılmak için güçlü bir manyetik alan taşıyan, toroidal geometriye sahip bir cihazdır (Woods 2006). ITER tamamlandığında, dünyanın en büyük tokamağı olacaktır.

Bilim insanlarının 21 Aralık 2021'de yaptıkları bir deneyle, trityum ile çalışan yeni nesil tokamak reaktörü Birleşik Avrupa Torusu (Joint European Torus, JET) dünyanın en büyük füzyon deneyini gerçekleştirerek, 5 saniyelik bir füzyon darbesi ile 59 MJ enerji üretmiştir (Gibney 2022). Bu, 1997 yılında, yaklaşık 4 saniyede elde edilen 21.7 MJ'ün iki katından daha fazladır (Gibney 2022). Şekil 4'te JET nükleer füzyon reaktörünün karakteristik toroidal şeklindeki haznesi görülmektedir.



Şekil 4: İngiltere, Oxford yakınlarındaki JET tokamak reaktörünün reaksiyon odası (Gibney 2021)

2050 yılına kadar küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30 oranında artması ve elektrik üretiminin iki katına çıkması beklenmektedir (IEA 2021). Kömürün elektrik üretimindeki payı 1980'den bu yana çok az değişerek, 2021 yılında yaklaşık %36 ile dünya çapında baskın enerji kaynağı olmaya devam etmiştir. Nükleer, yenilenebilir ve doğal gazın payı ise son 40 yılda artmıştır (IAEA 2022). Bugün nükleer enerji, küresel elektrik üretiminin yaklaşık %10'una katkıda bulunmaktadır (IAEA 2022).

3.2. Dünyanın Nükleer Enerjiye Değişen Bakış Açısı

Covid-19 pandemisi ile birlikte yaşanan ekonomik kriz ve sonrasında gelen Ukrayna-Rusya savaşı ile başlayan doğalgaz ve petrol kıtlığı ile fosil yakıt fiyatlarındaki artış, enerji piyasalarının yeniden şekillenmesinde ve nükleer enerjiye olan ilginin canlanmasında olağanüstü derece etkili olmuş gibi görünmektedir. Japonya, Almanya, İngiltere ve ABD gibi nükleer enerjiye yatırım yapmayı bırakan ülkelerin liderleri, yeni nükleer santraller inşa etme veya mevcut santrallerin kapatılmasının ertelenmesini dile getirmektedirler (BBC 2022; Euronews 2022). Bilimsel araştırmalara göre, nükleer endüstride bir kaza sonucu hayatını kaybetme olasılığının, bir araba kazasından 100 kat, kalp rahatsızlığından 1000 kat daha az olması, nükleer enerji teknolojisine ve bu teknolojinin güvenlik riskleri konusuna bakışı olumlu yönde etkileyecektir (Basu ve Miroshnik 2019).

Dünya tarihine bakıldığında, nükleer olayları sınıflandırmak üzere tanımlanan Uluslararası Nükleer Olay Ölçeği'ne (International Nuclear and Radiological Event Scale, INES) göre, seviye 6 (ciddi kaza) ve seviye 7 (büyük kaza) düzeylerine karşılık gelen bir dizi nükleer reaktör kazası meydana gelmiştir (Oboni ve Oboni 2014). Bu kazalardan biri, 1957 yılında Rusya'nın Çelyabinsk Eyaleti'nde bulunan Mayak Nükleer Tesisi'ndeki radyoaktif sıvı atık depolama tankının soğutma sisteminin arızalanması nedeniyle, tankın içeriğinin aşırı ısınması sonucunda gerçekleşen büyük termal patlamadır (Akleyev vd. 2017). Kışım Kazası olarak anılan, seviye 6 derecesindeki bu nükleer kazayı dönemin yetkilileri gizli tutmaya çalışmış ve ancak 1989 yılına gelindiğinde olay hakkında ayrıntılı bilgiler içeren resmi bir rapor hazırlanmıştır (IAEA 1989). 1986 yılında kaydedilen Çernobil kazası, büyük ölçekli etkilerinin yanı sıra, radyoaktif serpinterin neden olduğu yüksek düzeydeki olumsuz etkileri dolayısıyla da dikkat çeken, tarihteki en büyük nükleer teknoloji kazasıdır. 2011 yılına gelindiğinde, Büyük Doğu Japonya depremini takip eden tsunami etkisiyle, Fukushima şehrine yakın sahil kenarına kurulmuş olan Fukushima Daiichi Nükleer Santrali'nde, tarihin bir diğer büyük nükleer santral kazası gerçekleşmiştir. Çernobil ve Fukushima nükleer kazaları INES ölçeğinde seviye 7 (en ciddi seviye) düzeyindeki kazalardır.

Fukushima olayı gerçekleşmeden önce, 2011 yılına kadar Japonya'nın elektrik üretim portföyü içerisinde nükleer enerjinin payı %30 oranındaydı ve o zamanki Japon Hükümeti ulusal nükleer güç üretimi payını 2017 yılına kadar en az %40 oranına kadar artırmayı planlamaktaydı (WNA 2022b). Suların çekilmesiyle, Japonya'nın nükleer enerjiye yaklaşımı değişmiş ve nükleer santrallerin çoğunun askıya alınması şeklinde bir politika izlenmiştir; fakat Japonya Başbakanı Fumio Kishida, bir politika değişikliğine giderek, felaketten bu yana kapatılan bir dizi atıl nükleer reaktörün canlandırılması ve yeni nesil nükleer teknolojiye yatırım yapılması ihtiyacı üzerinde durmuştur (BBC 2022). 2022 yılı itibarıyla, Japonya'da 19797 MW_e toplam kapasiteli 21 nükleer güç reaktörü çalışır durumdadır, 2653 MW_e net kapasiteli 2 nükleer güç reaktörü yapım halindedir ve 17128 MW_e kapasiteli 27 nükleer güç reaktörü kalıcı şekilde kapatılmıştır (PRIS 2022a). Japonya'nın 2021 yılında nükleer enerjiden elektrik üretim payı %7.17 (61223 GW_e-h) olmuştur (PRIS 2022a).

Nükleer enerjinin uzun yıllar önemli bir siyasi mesele olduğu Almanya'da, Fukushima olayından birkaç gün sonra Başbakan Angela Merkel, 1981'den beri faaliyette bulunan 17 reaktörden yedisini geçici olarak kapatırken, Almanya'nın mevcut nükleer santrallerinin daha önce ilan edilen uzatmalarına üç aylık bir moratoryum uygulamıştır. Haftalar sonra ise, Merkel Hükümeti, tüm nükleer santralleri 2022 yılına kadar aşamalı olarak kapatılacağını beyan etmiştir (Jorant 2011). Almanya'da, 2021 yılında elektrik üretiminin %11.87'sini (65444 GW_e-h) sağlayan 4055 MW_e kapasiteli 3 nükleer güç reaktörü çalışır durumdadır ve 22180 MW_e kapasiteli 30 nükleer güç reaktörü kalıcı şekilde kapatılmıştır (PRIS 2022b). 2022 yılının son ayları itibarıyla, Alman politikacılar, mevcut enerji krizini aşmak üzere 2022 yılı sonunda devre dışı kalması planlanan son üç nükleer santralin, sadece bir veya iki yıl geçici olacak şekilde, ömrünü uzatmayı işaret etmektedir. Bu durum, son 10 yılda, Almanya siyasi yaşamının ana odak noktasında önemli bir politika değişikliğidir.

Dünyanın en büyük nükleer enerji üreticilerinden biri olan Fransa'da, 56 nükleer güç reaktöründen 32 tanesi, 2021 yılının Aralık ayında ortaya çıkan korozyon sorunları ve gecikmiş rutin bakım-onarım işlemleri sebebiyle devre dışı bırakılmıştır. Fransa, benzer bir yaklaşım sergileyerek, bu santrallerden 27'sinin Aralık 2022'ye kadar, kalan 5'inin ise Ocak-Şubat 2023'te yeniden faaliyete geçirilmesini planlamaktadır (Euronews 2022). 2023 yılında Fransa, elektriğinin yaklaşık %69'unu (360700 GW_e-h), çalışmaya başlamasıyla hiç sera gazı salmayan, güvenilir ve güçlü bir enerji kaynağı olan nükleer enerjiden elde etmektedir (PRIS 2022c). Fransa'da faaliyet gösteren, nükleer santrallerden üretilen elektrik ile çalışan ünlü TGV (Train à Grande Vitesse) hızlı treni 320 km/h maksimum hıza ulaşabilmekte ve bunu sıfır karbon salınımı ile gerçekleştirmektedir. Endüstriyel üretim gücüne bakıldığında Fransa, düşük bir karbon ayak izi sergilemektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Ortalama küresel sıcaklıklarda zaman zaman düşüşler ve artışlar gözlenirse de, 1900'lerde sıcaklıklarda başlayan yükseliş özellikle 1970'lerden sonra modern sanayilerin büyümesi, şehirlerin genişlemesi ve fosil yakıt kullanımının yaygınlaşması ile hız kazanmıştır. Sanayi öncesi dönem incelendiğinde, 2022'deki küresel ortalama sıcaklıktaki yaklaşık 1.15°C artış (WMO 2022) çok yüksek değil gibi algılanabilmektedir; fakat son buzul çağından bu yana geçen yıllar boyunca artışın yaklaşık sadece 6°C olduğu dikkate alındığında (Tierney vd. 2020) bu farkın oldukça yüksek olduğu söylenebilmektedir.

Güney Avrupa'da 2003 ve 2007 yıllarında yaşanan aşırı sıcaklıkların, devasa yangınları beraberinde getirmesinin yanı sıra, tahıl hasadında düşümlere neden olarak fiyatları yükseltmesi gibi, iklimde meydana gelen küçük değişikliklerin dünyanın dengesinde düşünülenden çok daha büyük boyutlarda değişikliklere yol açtığı ortadadır. Yaşanan çölleşme ve toprak erozyonunun ekilebilir alanları azaltması sonucunda, gıda üretiminin baskı altına girmesi ve sosyal çatışmaların yaşanabilir olması da söz konusudur.

Paleoklimatik kanıtlara dayanan çalışmalar, geçmişte yaşanan termal değişimlerden sera gazı konsantrasyonlarının özellikle de CO₂'nin sorumlu olduğunu göstermektedir (Siegenthaler vd. 2005). Hawaii'nin en büyük yanardağında yer alan Mauna Loa Atmosferik Temel Gözlemevi'nde 2022 yılının Mayıs ayında ölçülen ortalama aylık atmosferik CO₂ seviyesinin 420 ppm değerini geçtiği bildirilmiştir (NOAA 2022b). Bu değer, insanlık tarihi boyunca herhangi bir noktada bu kadar yüksek olmamıştır ve buzul çağları boyunca minimum değeri yaklaşık 280 ppm olan CO₂ konsantrasyonunun çok üzerindedir. CO₂'nin binlerce yıl ile ölçülen atmosferde kalış süresinin son derece uzun olması (Archer vd. 2009), emisyonların azaltılmasını ve kontrolünü dikkate alınması gereken ciddi konular haline getirmektedir.

Fosil yakıtlara bağımlı modern toplumlar, muazzam miktarda CO₂'nin atmosfere salınmasına yol açmakta, böylece sera etkisi artarak, küresel ısınma oluşmaktadır. Tabii ki iklim değişikliğine sebep olan insan kaynaklı etkenler sadece fosil yakıtların kullanımı ile sınırlı değildir; ayrıca, CH₄, CO₂'den yaklaşık 300 kat daha güçlü nitroz oksit, kloroflorokarbonlar gibi yapay gazlar ve düşük seviyede olsa da ozon da ısınmaya neden olmaktadır. Hatta bütün bunların dışında, havadaki is Kuzey Kutbu'ndaki kar ve buzulların üzerine çökerek, renklerinin koyulaşmasına ve sonuçta güneş ışınımını yansıtma yerine enerjiyi soğurarak sıcaklıkların artmasına yol açmaktadır. Sıcaklıkların artması kıtasal buzulları eritmekte, buzulların erimesinden gelen tatlı su okyanus akıntılarını etkilemekte, derin su akıntılarının hızının değişmesi de küresel su dolaşımını düşürmektedir. Her ne kadar, sıcaklık değişimleri küçük görünüyorsa da, bu denli ufak değişimler, çok daha büyük değişimlere yol açacak bir zinciri başlatmaktadır. İklim etkileri ve riskleri konusunda artan kamusal ve siyasi farkındalık, en az 170 ülke ve birçok şehrin iklim politikalarına ve planlama süreçlerine yansımıştır (Madde C.1.1); lakin mevcut uyum seviyeleri ile iklim etkilerine yanıt vermek ve iklim risklerini azaltmak için gereken seviyeler arasında boşluklar (Madde C.1.2) bulunmaktadır (IPCC 2022). IPCC, günümüzdeki çabaların halen küçük ölçekli, sektöre özgü, mevcut etkilere veya yakın vadeli risklere yanıt vermek üzere tasarlanmış olduğunu ve uygulamadan ziyade planlamaya odaklanıldığını (Madde C.1.2) tespit etmiştir (IPCC 2022). Önümüzdeki yıllarda sürdürülebilir, yaşanılabilir bir geleceği gerçekleştirmek hedefiyle, emisyonları azaltmaya, dayanıklılık oluşturmaya, ekosistemleri korumaya, iklim değişikliğinden kaynaklanan kayıp ve hasar etkilerine uyum sağlamaya yönelik acil önlemlerin hükümetler, sivil toplumlar ve özel sektör tarafından alınması gerekmektedir.

İklim değişikliği ile bireysel mücadeleye, kullanılmadığında elektronik aletleri kapatmak, adaptörleri prize takılı bırakmamak, et ağırlıklı beslenme şeklini değiştirmek, eşyaları uzun süre kullanmaya çalışmak, onarılamayan eşyaları en azından geri dönüşüme göndermek, mümkün olduğunca ağaç dikmek gibi karbon ayak izi azaltmaya yönelik küçük değişiklikler yapılarak katkı sağlanabilir. Bütün bunların yanında, özellikle küresel sera gazı emisyon kaynaklarında 2019 yılı verilerine göre en büyük pay sahibinin %17 ile ulaşım sektörü olduğu dikkate alındığında (Ge vd. 2020), seyahat etme şeklinin kısa mesafelerde araba yerine bisiklet, daha uzun mesafelerde toplu taşıma sistemleri ya da tren tercih edilerek değiştirilmesi sera gazı salınımlarını azaltma yollarından biridir. Uzun vadede, fosil yakıt kullanan arabalar yerine daha az kirlilik yaratan elektrikli arabaları ya da hibrit araçları tercih etmek de bu duruma yardımcı olabilir.

İklim değişikliği ile küresel mücadelede 1990'lı yılların başından itibaren aralarında Kyoto Protokolü'nün ve Paris Anlaşması'nın da bulunduğu birçok önemli anlaşmayı beraberinde getiren müzakereler gerçekleştirilmektedir. İklim görüşmelerinde, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerden hangilerinin iklim değişikliğinden sorumlu olduğu ve bu sorumluluğun bölgeler, ülkeler arasında nasıl paylaşılacağı tartışma konusu olmuştur. Gelişmekte olan ülkeler ekonomilerini büyütme uğruna fosil yakıtlara ihtiyaç duymaktadırlar ve gelişmiş ülkelerin ekonomilerini herhangi bir kısıtlama olmaksızın büyütebildiklerini sebep göstererek, yükün daha fazlasını taşımaları gerektiğinin üstünde durmaktadırlar. 1751'den 2017 yılına kadar geçen zamana bakıldığında, ABD en fazla kümülatif CO₂ salınımı yapan ülke olarak tarihsel emisyonların %25'inden sorumlu olmuştur ve onu %22 ile AB ülkeleri izlemiştir (Ritchie vd. 2020). Gelişmiş ülkelere göre, 2021 yılında dünyanın yıllık en çok CO₂ emisyon salan ülkeler sıralamasında ilk sıralarda Çin (%30.90) ve ABD (%13.49) ile birlikte yer alan Hindistan (%7.30) (Ritchie vd. 2020) iklim değişikliğini ele alırken daha fazla çaba göstermelidir. Bu tartışmalar bağlamında, Kyoto Protokolü gelişmiş ülkelerin emisyon azaltmasını şart koşarken, Paris Anlaşması ortak bir sorun olması sebebiyle tüm ülkeleri emisyon hedeflerini belirlemeye çağırmıştır. Uzmanlar ise, mevcut taahhütlerin ısınmayı kritik eşğin altında tutmak veya sonuçlarına uyum sağlamak için yeterli olmadığını üstünde durmaktadırlar. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme, UNEP)'nin yayınladığı Emisyon Açığı 2022 Raporu'nda, uygulanmakta olan ve herhangi bir ek önlem alınmayan politikalarla 21. yy.da küresel ısınmanın 2.8°C artışla sonuçlanacağı öngörülmektedir (UNEP 2022). Bu durum, iklim değişikliği ile mücadelede yeni teknolojilerin tartışılması gerektiğini gündeme getirmektedir.

Fosil yakıtlardan elektrik üretimi, küresel ısınmada önemli ölçüde payı bulunan CO₂ gazı emisyonlarına artan bir katkı sağlamaktadır. Oysaki dünyanın enerji ihtiyaçlarını düşük maliyet ve çevresel olarak kabul edilebilir bir şekilde karşılamak üzere, önemli seçeneklerden biri olan nükleer enerjiyi sürdürülebilir kılmak değerlendirmeye alınabilir. Diğer teknolojilerin insan hayatı ve genel olarak doğa üzerindeki risk ve zararlı etkileri nükleer santraller söz konusu olduğunda daha fazla değildir.

Önümüzdeki yıllarda, elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltma yolunda elektrik üretiminde ve kullanımında verimliliği yükseltmek, rüzgar, güneş, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmayı arttırmak, nükleer enerji kullanımını yaygınlaştırmak gibi seçenekler söz konusudur. Bu kapsamda, nükleer enerjinin risk, maliyet ve faydaları ile bu konudaki teknokratik bakış açılarının kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmesi önem arz etmektedir. Bu yüzden, iklim değişikliğine yönelik genel bir karbon emisyon yönetim stratejisi oluşturulurken, seçenekleri karşılaştırıp sadece bir tanesini benimsemek yerine, tüm seçenekleri kullanmaya çalışmak daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Kaynaklar

- Akleyev A.V., Krestinina L.Y., Degteva M.O., Tolstykh E.I., (2017), *Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the 'Kyshtym Accident')*, Journal of Radiological Protection, 37(3), R19-R42, doi: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
- Angelo J.A., (2004), *Nuclear technology*, Greenwood Press, London, England, 639ss.
- Archer D., Eby M., Brovkin V., Ridgwell A., Cao L., Mikolajewicz U., Caldeira K., Matsumoto K., Munhoven G., Montenegro A., Tokos K., (2009), *Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 37(1), 117-134.
- Armbrecht L., Weber M.E., Raymo M.E., Peck V.L., Williams T., Warnock J., Kato Y., Hernández-Almeida I., Hoem F., Reilly B., Hemming S., Bailey I., Martos Y.M., Gutjahr M., Percuoco V., Allen C., Brachfeld S., Cardillo F.G., Du Z., Fauth G., Fogwill C., Garcia M., Glüder A., Guitard M., Hwang J-H., Iizuka M., Kenlee B., O'Connell S., Pérez L.F., Ronge T.A., Seki O., Tauxe L., Tripathi S., Zheng X., (2022), *Ancient marine sediment DNA reveals diatom transition in Antarctica*, Nature Communications, 13(5787), 1-14, doi: 10.1038/s41467-022-33494-4.
- Arrhenius S., (1896), *XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*, Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(5), 237-276.
- Amin M., Shah H.H., Fareed A.G., Khan W.U., Chung E., Zia A., Rahman Farooqi Z.U., Lee C., (2022), *Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change*, International Journal of Hydrogen Energy, 47(77), 33112-33134.
- Ayres R.U., (2021), *The history and future of technology: Can technology save humanity from extinction?*, Springer Nature, Cham, Switzerland, 830ss.
- Ball M., Wietschel M., (2009), *The hydrogen economy: Opportunities and challenges*, Cambridge University Press, New York, USA, 646ss.
- Barnosky A.D., Matzke N., Tomiya S., Wogan G.O.U., Swartz B., Quental T.B., Marshall C., McGuire J.L., Lindsey E.L., Maguire K.C., Mersey B., Ferrer E.A., (2011), *Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?*, Nature, 471(7336), 51-57.
- Basu D., Miroshnik V.W., (2019), *The political economy of nuclear energy: Prospects and retrospect*, Springer Nature, Cham, Switzerland, 275ss.
- BBC, (2022), *Japan should consider building new nuclear plants: Kishida*, BBC News, <https://www.bbc.com/news/world-asia-62659007>, [Erişim 26 Ekim 2022].
- Benn D.I., Åström J.A., (2018), *Calving glaciers and ice shelves*, Advances in Physics: X, 3(1), 1048-1076.
- Berger A., (1988), *Milankovitch theory and climate*, Reviews of Geophysics, 26(4), 624-657.
- Beven II J.L., Avila L.A., Blake E.S., Brown D.P., Franklin J.L., Knabb R.D., Pasch R.J., Rhome J.R., Stewart S.R., (2008), *Atlantic hurricane season of 2005*, Monthly Weather Review, 136(3), 1109-1173.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Eitzelmueller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel C., Lanckman J-P, Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H., (2019), *Permafrost is warming at a global scale*, Nature Communications, 10(264), 1-11, doi: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- Boulton C.A., Lenton T.M., Boers N., (2022), *Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s*, Nature Climate Change, 12(3), 271-278.
- Callendar G.S., (1938), *The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 64(275), 223-240.
- Callendar G.S., (1939), *The composition of the atmosphere through the ages*, Meteorological Magazine, 74(878), 33-39.
- Cauvy-Fraunié S., Dangles O., (2019), *A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat*, Nature Ecology & Evolution, 3(12), 1675-1685.
- Changnon S.A., Kunkel K.E., Reinke B.C., (1996), *Impacts and responses to the 1995 heat wave: A Call to action*, Bulletin of the American Meteorological Society, 77(7), 1497-1506.
- Chowdhury M.S., Rahman K.S., Selvanathan V., Nuthammachot N., Suklueng M., Mostafaeipour A., Habib A., Akhtaruzzaman Md., Amin N., Techato K., (2021), *Current trends and prospects of tidal energy technology*, Environment, Development and Sustainability, 23(6), 8179-8194.
- Chylek P., Folland C., Klett J.D., Wang M., Hengartner N., Lesins G., Dubey M.K., (2022), *Annual mean Arctic Amplification 1970-2020: Observed and simulated by CMIP6 climate models*, Geophysical Research Letters, 49(13), 1-8, doi: 10.1029/2022GL099371.
- COP3, (1997), *Third session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/kyoto-climate-change-conference-december-1997/cop-3>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP13, (2007), *Thirteenth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/bali-climate-change-conference-december-2007/cop-13>, [Erişim 05 Mayıs 2022].

- COP15, (2009), *Fifteenth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/copenhagen-climate-change-conference-december-2009/cop-15>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP16, (2010), *Sixteenth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/cancun-climate-change-conference-november-2010/cop-16>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP17, (2011), *Seventeenth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/durban-climate-change-conference-november-2011/cop-17>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP18, (2012), *The eighteenth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/doha-climate-change-conference-november-2012/cop-18>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP19, (2013), *The nineteenth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/warsaw-climate-change-conference-november-2013/cop-19>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP20, (2014), *The twentieth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/lima-climate-change-conference-december-2014/cop-20>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP21, (2015), *The twenty-first session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/paris-climate-change-conference-november-2015/cop-21>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP22, (2016), *The twenty-second session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/marrakech-climate-change-conference-november-2016/cop-22>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP24, (2018), *The twenty-fourth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/katowice-climate-change-conference-december-2018/sessions-of-negotiating-bodies/cop-24>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP26, (2021), *The twenty-sixth session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/event/cop-26>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- COP27, (2022), *The twenty-seventh session of the Conference of the Parties*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://cop27.org/#/>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- CRED, (2022a), *2021 disasters in numbers*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf, [Erişim 14 Ekim 2022].
- CRED, (2022b), *Disasters year in review 2021*, The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, <https://www.emdat.be/cred-crunch-66-disasters-year-review-2021>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- Cui Y., Kump L.R., (2015), *Global warming and the end-Permian extinction event: Proxy and modeling perspectives*, Earth-Science Reviews, 149, 5-22, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.04.007.
- Duderstadt J.J., Hamilton L.J., (1976), *Nuclear reactor analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 650ss.
- Eicher D.J., Filippenko A., (2015), *The new cosmos: Answering astronomy's big questions*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 279ss.
- Engledew J., (2010), *The Tungus event or the great Siberian meteorite*, Algora Publishing, New York, USA, 166ss.
- Euronews, (2022), *France's EDF plans to restart nation's entire nuclear fleet by early next year*, Euronews, <https://www.euronews.com/2022/09/04/frances-edf-plans-to-restart-nations-entire-nuclear-fleet-by-early-next-year>, [Erişim 26 Ekim 2022].
- Ferrigno J.G., Cook A.J., Foley K.M., Williams R.S., Swithbank C., Fox A.J., Thomson J.W., Sievers J., (2006), *Coastal-change and glaciological map of the Trinity Peninsula area and South Shetland Islands, Antarctica: 1843–2001*, U.S. Geological Survey Geologic Investigations Series Map I-2600-A, Virginia, U.S., 32ss.
- Finus M., Engin B., (2010), *Kyoto Protokolü uygulama mekanizmaları: Kusurlu mu yoksa umut verici kavramlar mı?*, Sosyal Bilimler Dergisi, 0(2), 30-40.
- Francelino M.R., Schaefer C., Skansi M.d.L.M., Colwell S., Bromwich D.H., Jones P., King J.C., Lazzara M.A., Renwick J., Solomon S., Brunet M., Cerveny R.S., (2021), *WMO evaluation of two extreme high temperatures occurring in february 2020 for the Antarctic Peninsula region*, Bulletin of the American Meteorological Society, 102(11), E2053–E2061, doi: 10.1175/BAMS-D-21-0040.1.
- Frisch O.R., (1939), *Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment*, Nature, 143, 276, doi: 10.1038/143276a0.
- Ge M., Friedrich J., Vigna L., (2020), *4 charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors*, World Resources Institute, <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>, [Erişim 15 Kasım 2022].
- Gibney E., (2021), *Fuel for World's largest fusion reactor is set for test run*, Nature, 591(7848), 15-16.
- Gibney E., (2022), *Nuclear-fusion reactor smashes energy record*, Nature, 602(7897), 371, doi: 10.1038/d41586-022-00391-1.
- Gruber S., (2012), *Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation*, The Cryosphere, 6(1), 221-233.
- Hahn O., Strassmann F., (1938), *Über die Entstehung von Radiumisotopen aus Uran durch Bestrahlen mit schnellen und verlangsamten Neutronen*, Naturwissenschaften, 26(46), 755-756.
- Hogg A.E., Gudmundsson G.H., (2017), *Impacts of the Larsen-C Ice Shelf calving event*, Nature Climate Change, 7(8), 540-542.
- Hultman N.E., (2011), *The political economy of nuclear energy*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(3), 397-411.
- IAEA, (1989), *Report on a radiological accident in the southern Urals on 29 September 1957*, International Atomic Energy Agency, https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:20071898, [Erişim 26 Aralık 2022].

- IAEA, (2021), *Nuclear power reactors in the World*, International Atomic Energy Agency, <https://www.iaea.org/publications/14989/nuclear-power-reactors-in-the-world>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- IAEA, (2022), *Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050*, International Atomic Energy Agency, <https://www.iaea.org/publications/14786/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- IEA, (2021), *World energy outlook 2021*, International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- IPA, van Everdingen R.O. (ed.), (1998), *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*, International Permafrost Association, *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*, International Permafrost Association, https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf, [Erişim 26 Ekim 2022].
- IPCC, (2007), *Climate change 2007: Synthesis report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- 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, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- IPCC, (2018), *Global warming of 1.5°C*, Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report, <https://www.ipcc.ch/sr15/>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- IPCC, (2022), *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*, Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- ITER, (2022), *What is ITER?*, ITER Organization, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>, [Erişim 14 Kasım 2022].
- Jablonski D., Raup D.M., (1995), *Selectivity of end-Cretaceous marine bivalve extinctions*, *Science*, 268(5209), 389-391.
- Jorant C., (2011), *The implications of Fukushima: The European perspective*, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67(4), 14-17.
- Jorgenson, M.T., Romanovsky V., Harden J., Shur Y., O'Donnell J., Schuur E.A.G., Kanevskiy M., Marchenko S., (2010), *Resilience and vulnerability of permafrost to climate change*, *Canadian Journal of Forest Research*, 40(7), 1219-1236.
- Karaoğlu A.L., (1996), *Nükleer stratejinin ilk on yılı*, Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi, 51(01), 323-346.
- Kurnaz L., (2019), *Son buzul erimeden: İklim değişikliği hakkında öğrenmek istediğiniz her şey*, Doğan Egmont Yayıncılık, Şişli, İstanbul, Türkiye, 477ss.
- Kweku D.W., Bismark O., Maxwell A., Desmond K.A., Danso K.B., Oti-Mensah E.A., Quachie A.T., Adormaa B.B., (2018), *Greenhouse effect: Greenhouse gases and their impact on global warming*, *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(6), 1-9, doi: 10.9734/JSRR/2017/39630.
- Lamarsh J.R., (2002), *Introduction to nuclear reactor theory*, Addison-Wesley Publishing Company, Boston, USA, 572ss.
- Lemieux A., Colby G.A., Poulain A.J., Aris-Brosou S., (2022), *Viral spillover risk increases with climate change in High Arctic lake sediments*, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 289(1985), 1-11, doi: 10.1098/rspb.2022.1073.
- Li L., Chakraborty P., (2020), *Slower decay of landfalling hurricanes in a warming world*, *Nature*, 587(7833), 230-234.
- Liu Y., Ji M., Yu T., Zaugg J., Anesio A.M., Zhang Z., Hu S., Hugenholtz P., Liu K., Liu P., Chen Y., Luo Y., Yao T., (2022), *A genome and gene catalog of glacier microbiomes*, *Nature Biotechnology*, 40(9), 1341-1348.
- Manabe S., Wetherald R.T., (1967), *Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity*, *Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3), 241-259.
- Melikoğlu M., (2018), *Current status and future of ocean energy sources: A global review*, *Ocean Engineering*, 148(2018), 563-573.
- Meitner L., Frisch O.R., (1939), *Disintegration of uranium by neutrons: A new type of nuclear reaction*, *Nature*, 143(3615), 239-240.
- MFA, (2022), *Paris Anlaşması*, Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- Milankovitch M., (1941), *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*, Königlich Serbische Akademie, Belgrade, Serbia, 633ss.
- Mirici M.E., Berberoğlu S., (2022), *Türkiye perspektifinde yeşil mutabakat ve karbon ayak izi: Tehdit mi? Fırsat mı?*, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(1), 156-164.
- Morus I.R., (2017), *William Robert Grove: Victorian gentleman of science*, University of Wales Press, Cardiff, Wales, 172ss.
- Myers K.F., Doran P.T., Cook J., Kotcher J.E., Myers T.A., (2021), *Consensus revisited: Quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years later*, *Environmental Research Letters*, 16(10), doi: 104030.10.1088/1748-9326/ac2774.
- Neftel A., Oeschger H., Schwander J., Stauffer B., Zumbunn R., (1982), *Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40,000 yr*, *Nature*, 295(5846), 220-223.
- NCEI, (2022), *Climate at a glance: Global time series*, National Centers for Environmental Information, <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>, [Erişim 20 Nisan 2022].
- NEA, (2015), *Nuclear energy: Combating climate change*, Nuclear Energy Agency, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/009/47009672.pdf, [Erişim 14 Ekim 2022].
- NEA, (2020), *Projected costs of generating electricity 2020 edition*, Nuclear Energy Agency, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/007/52007078.pdf?r=1, [Erişim 15 Ocak 2023].
- NOAA, (2022a), *Global climate report for 2021*, National Centers for Environmental Information, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202112>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- NOAA, (2022b), *Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels*, National Centers for Environmental Information, <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>, [Erişim 19 Kasım 2022].
- Nordhaus W., (2013), *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*, Yale University Press, New Haven, London, USA, 378ss.
- Oboni F., Oboni C., (2014), *Pyramids, toxic wastes and nuclear reactors containments: A lesson drawn from history with a risk manager perspective*, *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 7: Education, Professional Ethics and Public*

- Recognition of Engineering Geology'in içinde, (Lollino G., Arattano M., Giardino M., Oliveira R., Peppoloni S., Ed.), Springer International Publishing, Switzerland, ss.191-194.
- Obu J., (2021), *How much of the Earth's surface is underlain by permafrost?*, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 126(5), 1-5, doi: 10.1029/2021JF006123.
- OPR, (2022), *List of worldwide scientific organizations*, Governor's Office of Planning and Research, <https://www.opr.ca.gov/facts/list-of-scientific-organizations.html>, [Erişim 24 Ekim 2022].
- Öztürk Y.D., Ünlü R., (2022), *Türkiye'de yapılan kuraklık analiz çalışmaları üzerine bir derleme*, Afet ve Risk Dergisi, 5(2), 669-680.
- Page S.E., Siegert F., Rieley J.O., Boehm H-D.V., Jaya A., Limin S., (2002), *The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997*, Nature, 420(6911), 61-65.
- Parker D. E., Wilson H., Jones P.D., Christy J.R., Folland C.K., (1996), *The impact of Mount Pinatubo on world-wide temperatures*, International Journal of Climatology, 16(5), 487-497.
- Payne J.L., Lehrmann D.J., Wei J., Orchard M.J., Schrag D.P., Knoll A.H., (2004), *Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction*, Science, 305(5683), 506-509.
- Pirard P., Vandentorren S., Pascal M., Laaidi K., Le Tertre A., Cassadou S., Ledrans M., (2005), *Summary of the mortality impact assessment of the 2003 heat wave in France*, Eurosurveillance, 10(7), 153-156.
- PRIS, (2022a), *Country statistics (Japan)*, Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=JP>, [Erişim 26 Ekim 2022].
- PRIS, (2022b), *Country statistics (Germany)*, Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=DE>, [Erişim 26 Ekim 2022].
- PRIS, (2022c), *Country statistics (France)*, Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FR>, [Erişim 18 Ocak 2023].
- Raup D.M., (1979), *Size of the permo-triassic bottleneck and its evolutionary implications*, Science, 206(4415), 217-218.
- Rebut P.-H., the ITER Joint Central Team and Home Teams, (1995), *ITER: The first experimental fusion reactor*, Fusion Engineering and Design, 27, 3-16.
- Ritchie H., Roser M., Rosado P., (2020), *CO₂ and greenhouse gas emissions*, Our World in Data, <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>, [Erişim 22 Mart 2022].
- Robine J.-M., Cheung S.L., Le Roy S., Van Oyen H., Herrmann, F.R., (2007), *Report on excess mortality in Europe during summer 2003*, EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114, https://ec.europa.eu/health/ph_projects/2005/action1/docs/action1_2005_a2_15_en.pdf, [Erişim 22 Mart 2022].
- SAE, (2023), *MeyGen*, Simec Atlantis Energy, <https://simecatlantis.com/tidal-stream/meygen/>, [Erişim 10 Ocak 2023].
- Scambos T.A., Bohlander J.A., Shuman C.A., Skvarca P., (2004), *Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica*, Geophysical Research Letters, 31(18), L18402, doi: 10.1029/2004GL020670.
- Siegenthaler U., Stocker T.F., Monnin E., Lüthi D., Schwander J., Stauffer B., Raynaud D., Barnola J.-M., Fischer H., Masson-Delmotte V., Jouzel J., (2005), *Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene*, Science, 310(5752), 1313-1317.
- Serway R.A., Beichner R.J., (2000), *Physics for scientists and engineers with modern physics*, Saunders College Publishing, Philadelphia, USA, 1551ss.
- Smith K.A., Mosier A.R., Crutzen P.J., Winiwarter W., (2012), *The role of N₂O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate*, Philosophical Transactions of the Royal Society B, 367(1593), 1169-1174.
- Sumgin M.I., (1927), *Vechnaya merzlota pochvy v predelakh SSSR (Permafrost Soils in the USSR)*, Far Eastern Geophysical Observatory, Vladivostok, Russian, 372ss.
- Tierney J.E., Zhu J., King J., Malevich S.B., Hakim G.J., Poulsen C.J., (2020), *Glacial cooling and climate sensitivity revisited*, Nature, 584(7822), 569-573.
- The Guardian, (2022), *'Hidden world' of marine life discovered in Antarctic 'river' under ice*, Guardian News and Media, <https://www.theguardian.com/world/2022/jun/06/hidden-world-of-marine-life-discovered-in-antarctic-river-under-ice>, [Erişim 26 Ekim 2022].
- Tye S.P., Siepielski A.M., Bray A., Rypel A.L., Phelps N.B.D., Fey S.M., (2022), *Climate warming amplifies the frequency of fish mass mortality events across north temperate lakes*, Limnology and Oceanography Letters, 7(6), 510-519.
- UNCED, (1992), *United Nations Conference on Environment and Development*, United Nations, <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>, [Erişim 05 Mayıs 2022].
- UNEP, (2004), *Impacts of summer 2003 Heat Wave in Europe*, United Nations Environment Programme, http://www.unisdr.org/files/1145_ewheatwave.en.pdf, [Erişim 14 Ekim 2022].
- UNEP, (2022), *Emissions gap report 2022: The closing window-climate crisis calls for rapid transformation of societies*, United Nations Environment Programme, <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>, [Erişim 20 Kasım 2022].
- UNFCCC, (1992), *United Nations Framework Convention on Climate Change*, United Nations, http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2853.php, [Erişim 23 Nisan 2022].
- UNFCCC, (1997), *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- UNFCCC, (2016), *The Paris Agreement*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/documents/184656>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- Vezmar S., Spajić A., Topić D., Šljivac D., Jozsa L., (2014), *Positive and negative impacts of renewable energy sources*, International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, 5(2), 15-23.
- von Halban H., Joliot F., Kowarski L., (1939), *Liberation of neutrons in the nuclear explosion of uranium*, Nature, 143(3620), 470-471.
- WMO, (2021), *WMO verifies one temperature record for Antarctic continent and rejects another*, World Meteorological Organization, <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-verifies-one-temperature-record-antarctic-continent-and-rejects-another>, [Erişim 14 Ekim 2022].

- WMO, (2022), *WMO provisional state of the global climate 2022*, World Meteorological Organization, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11359, [Erişim 15 Kasım 2022].
- WNA (2022a), *Economics of nuclear power*, World Nuclear Association, <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>, [Erişim 15 Ocak 2023].
- WNA, (2022b), *Nuclear power in Japan*, World Nuclear Association, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>, [Erişim 14 Ekim 2022].
- Woods L.C., (2006), *Theory of tokamak transport: New aspects for nuclear fusion reactor design*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 252ss.
- Yarzabal L.A., Salazar L.M.B., Batista-García R.A., (2021), *Climate change, melting cryosphere and frozen pathogens: Should we worry...?*, Environmental Sustainability, 4(3), 489-501.
- Yılmaz F., (2022), *Enerji yönetimi ve Türkiye: Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme*, Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi, 8(1), 19-37.