



İklim değişikliğinin azaltılması için stratejiler: bir inceleme

Samer Fawzy¹ - Ahmed I. Osman¹ - John Doran² - David W. Rooney⁽¹⁾

Alındı: 4 Temmuz 2020 / Kabul Edildi: 17 Temmuz 2020 / Çevrimiçi yayımlandı: 30 Temmuz 2020
© Yazar(lar) 2020

Özet

İklim değişikliği, esas olarak doğal sistemlerden ve insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının neden olduğu iklim modellerindeki değişim olarak tanımlanmaktadır. Bugüne kadar insan kaynaklı faaliyetler, sanayi öncesi seviyenin yaklaşık 1.0 °C üzerinde küresel ısınmaya neden olmuştur ve mevcut emisyon oranlarının devam etmesi halinde bu değerin 2030-2052 yılları arasında 1.5 °C'ye ulaşması muhtemeldir. 2018 yılında dünya, büyük ölçüde iklimle ilgili olan 315 doğal afet vakasıyla karşılaşmıştır. Yaklaşık 68,5 milyon insan etkilenmiş ve fırtınalar, seller, orman yangınları ve kuraklıkların yaklaşık %93'ünü oluşturduğu 131,7 milyar dolarlık ekonomik kayıp meydana gelmiştir. Sadece 2018 yılında orman yangınlarına atfedilen ekonomik kayıplar, neredeyse son on yılda meydana gelen orman yangınlarından kaynaklanan toplu kayıplara eşittir ve bu oldukça endişe vericidir. Ayrıca gıda, su, sağlık, ekosistem, insan habitatu ve altyapı, iklim saldırısı altında en hassas sektörler olarak belirlenmiştir. 2015 yılında, küresel sıcaklık artışının 2100 yılına kadar 2 °C ile sınırlandırılması ve artışın 1,5 °C ile sınırlandırılmasına yönelik çabaların sürdürülmesi temel hedefiyle Paris Anlaşması yürürlüğe girmiştir. Bu makale, iklim değişikliğini azaltmaya yönelik ana stratejileri, yani geleneksel azaltım, negatif emisyonlar ve ısınmsal zorlama jeomühendisliğini gözden geçirmektedir. Geleneksel azaltım teknolojileri fosil bazlı CO₂ emisyonlarını azaltmaya odaklanmaktadır. Negatif emisyon teknolojileri, karbondioksit seviyelerini azaltmak için atmosferik karbonu yakalamayı ve tutmayı amaçlamaktadır. Son olarak, radyatif zorlama jeomühendislik teknikleri, küresel sıcaklıkları dengelemek veya azaltmak için dünyanın radyatif enerji bütçesini değiştirmektedir. Geleneksel azaltım çabalarının Paris Anlaşması'nda öngörülen hedeflere ulaşmak için tek başına yeterli olmadığı açıktır; bu nedenle alternatif yolların kullanılması kaçınılmaz görünmektedir. Sunulan çeşitli teknolojiler henüz gelişimin erken aşamalarında olsa da, biyojenik temelli tutma teknikleri bir dereceye kadar olgunlaşmıştır ve hemen uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler İklim değişikliğinin azaltılması - Negatif emisyon teknolojileri - Karbondioksit giderimi - Dekarbonizasyon teknolojileri - Radyatif zorlama jeomühendislik teknolojileri

Kısaltmalar

Bio-DME	Biyo-dimetil eter
BECCS	Biyoenerji karbon yakalama ve depolama
Bil ₃	Bizmut triiyodür
Ca	Kalsiyum
CO ₂	Karbondioksit
CO ₂ e	Karbondioksit eşdeğeri
CRED	Afet Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi
DACCS	Doğrudan hava karbon yakalama ve depolama

Gt	Gigaton
GW	Gigawatt
HFC'ler	Hidroflorokarbonlar
H ₂	Hidrojen
INDC'ler	Niyet edilen ulusal olarak belirlenmiş katkılar
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli IAEA
	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
ITMO'lar	Uluslararası olarak aktarılan azaltım sonuçları
Fe	Demir
CaO	Kireç
CaCO ₃	Kireçtaşı
CH ₄	Metan
Mha	Megahektar
Mt	Milyon ton
N ₂ O	Azot oksit
NHRE	Hidro olmayan yenilenebilir enerji

✉ Ahmed I. Osman aosmanahmed01@qub.ac.uk

¹ Kimya ve Kimya Mühendisliği Fakültesi, Queen's Üniversitesi Belfast, David Keir Binası, Stranmillis Yolu, Belfast BT9 5AG, Kuzey İrlanda, Birleşik Krallık

² The Bryden Centre, Letterkenny Institute of Technology, Letterkenny, İrlanda

OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
PFC'ler	Perflorokarbonlar
ha ⁻¹	Hektar başına
yıl ⁻¹	Yıl başına
REDD+	Ormansızlaşma ve orman bozulmasından kaynaklanan emisyonların azaltılması
SO ₂	Sülfür dioksit
SF ₆	Sülfür hekzaflorür
PFC'ler	Perflorokarbonlar
t	Ton
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNFCCC	Birleşmiş Milletler Çerçeve Sözleşmesi
	İklim Değişikliği
W/m ⁽²⁾	Metrekare başına Watt
Mg	Magnezyum

Giriş

İklim değişikliğinin durumu

İklim değişikliği, esas olarak sera gazı emisyonlarının neden olduğu iklim modellerindeki değişim olarak tanımlanmaktadır. Sera gazı emisyonları ısının dünyanın atmosferi tarafından hapsedilmesine neden olur ve bu da küresel ısınmanın arkasındaki ana itici güç olmuştur. Bu tür emisyonların ana kaynakları doğal sistemler ve insan faaliyetleridir. Doğal sistemler arasında orman yangınları, depremler, okyanuslar, permafrost, sulak alanlar, çamur volkanları ve yanardağlar yer alırken (Yue ve Gao 2018), insan faaliyetleri ağırlıklı olarak enerji üretimi, endüstriyel faaliyetler ve ormancılık, arazi kullanımı ve arazi kullanım değişikliği ile ilgilidir (Edenhofer vd. 2014). Yue ve Gao, doğal sistemlerden ve antropojenik faaliyetlerden kaynaklanan küresel sera gazı emisyonlarını istatistiksel olarak analiz etmiş ve dünyanın doğal sisteminin kendi kendini dengeleyen bir sistem olarak düşünülebileceği ve antropojenik emisyonların dünya sistemine fazladan bir önkoşul eklediği sonucuna varmıştır (Yue ve Gao 2018).

Sera gazı emisyonlarına genel bakış

Literatürde yaygın olarak tartışılan ve Kyoto protokolü tarafından tanımlanan sera gazları karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), azot oksit (N₂O) ve hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve sülfür hekzaflorür (SF₆) gibi florlu gazlardır (UNFCCC 2008). Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından 2019 yılında hazırlanan emisyon açığı raporuna göre, 2018 yılında toplam sera gazı emisyonları 55,3 GtCO₂e olup, bunun 37,5 GtCO₂'si enerji üretimi ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan fosil CO₂ emisyonlarına atfedilmektedir. Geçtiğimiz on yıl boyunca her ikisi için de yıllık %1,5'lik artışa kıyasla 2018'de %2'lik bir artış kaydedilmiştir.

toplam küresel sera gazı ve fosil CO₂ emisyonları. Fosil CO₂ emisyonlarının 2018'deki artışı temel olarak artan enerji talebinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, arazi kullanımı değişikliği ile ilgili emisyonlar 2018 yılında 3,5 GtCO₂ olarak gerçekleşmiştir (UNEP 2019). Fosil kaynaklı ve arazi kullanımına bağlı CO₂ emisyonları 2018 yılında birlikte toplam küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %74'ünü oluşturmuştur. Bir diğer önemli sera gazı olan metan (CH₄), son on yıldaki yıllık %1,3'lük artışa kıyasla 2018'de %1,7'lik bir emisyon oranı artışına sahip olmuştur. Esas olarak tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerden etkilenen azot oksit (N₂O) emisyonları, son on yıldaki yıllık %1'lik artışa kıyasla 2018'de %0,8'lik bir artış göstermiştir. Bununla birlikte, florlu gazlarda son on yıldaki yıllık %4,6'lık artışa kıyasla 2018'de %6,1'lik önemli bir artış kaydedilmiştir (UNEP 2019). Bu rakamları bir perspektife oturtmak gerekirse, yakın tarihli bir Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporu, insan kaynaklı faaliyetlerin şimdiye kadar sanayi öncesi seviyenin üzerinde tahminen 1.0 °C'lik bir küresel ısınmaya neden olduğunu ortaya koymuş ve 0.8 ila 1.2 °C arasında muhtemel bir aralık belirtmiştir. Küresel ısınmanın aşağıdaki değerlere ulaşmasının muhtemel olduğu belirtilmektedir 2030 ve 2052 yılları arasında 1,5 °C'ye ulaşması durumunda mevcut emisyon oranları devam etmektedir (IPCC 2018).

İklim değişikliğinin etkileri, riskler ve kırılganlıklar

İklim değişikliğinin doğal ve beşeri sistemler üzerindeki ciddi etkilerinin yanı sıra riskler ve bunlara bağlı kırılganlıkların anlaşılması, iklim acil durumunun mevcut durumunun kavranmasında önemli bir başlangıç noktasıdır. Sıcaklık, yağış, deniz seviyesinin yükselmesi, okyanus asitlenmesi ve aşırı hava koşulları gibi iklim göstergelerindeki değişiklikler, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sekretaryası (UNCCS) tarafından yakın zamanda yayınlanan bir raporda vurgulanmıştır. Rapor edilen iklim tehlikeleri arasında kuraklıklar, seller, kasırgalar, şiddetli fırtınalar, sıcak hava dalgaları, orman yangınları, soğuk hava dalgaları ve toprak kaymaları yer almaktadır (UNCCS 2019). Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi'ne (CRED) göre, dünya 2018 yılında çoğu iklimle ilgili 315 doğal afet vakasıyla karşılaşmıştır. Bu vakalar arasında 16 kuraklık, 26 aşırı sıcaklık, 127 sel, 13 toprak kayması, 95 fırtına ve 10 vahşi yangın vakası yer almaktadır. 2018'de doğal afetlerden etkilenen insan sayısı 68,5 milyon olup, sel, fırtına ve kuraklık etkilenen toplam sayısının %94'ünü oluşturmaktadır. Ekonomik kayıplar açısından, 2018 yılında doğal afetler nedeniyle toplam 131,7 milyar dolar kayıp yaşanmış olup, fırtınalar (70,8 milyar dolar), seller (19,7 milyar dolar), orman yangınları (22,8 milyar dolar) ve kuraklıklar (9,7 milyar dolar) toplam maliyetin yaklaşık %93'ünü oluşturmuştur. CRED ayrıca son on yılda meydana gelen afetlere ilişkin veriler de sunmaktadır; bu veriler, orman yangınları hariç neredeyse tüm alanlarda daha da yüksek yıllık ortalamalar göstermektedir. Sadece 2018 yılında orman yangınlarına atfedilen ekonomik kayıplar yaklaşık olarak toplam kayıplara eşittir

Son on yılda meydana gelen orman yangınları oldukça endişe vericidir (CRED 2019). Dahası, orman yangınları doğrudan bir CO₂ emisyonu kaynağıdır. Orman yangınları doğal sistemin bir parçası olsa da, insan kaynaklı emisyonların doğal sistem emisyonlarına doğrudan müdahale ettiği ve etkisini artırdığı açıktır. İnsan kaynaklı iklim değişikliğinin, küresel olarak meydana gelen birçok doğal afetin arkasındaki önemli bir itici güç olduğu açıktır.

Ayrıca, sıcaklık değişimleri, yağış değişkenliği, değişen mevsimsel modeller, hastalık dağılımındaki değişiklikler, çölleşme, okyanusla ilgili etkiler ve toprak ve kıyı bozulması gibi iklim riskleri, birçok ülkede birden fazla sektörde kırılganlığa katkıda bulunmaktadır (UNCCS 2019). Sarkodie ve arkadaşları, 192 Birleşmiş Milletler ülkesinin iklim değişikliğine karşı kırılganlığını ve uyum hazırlığını ampirik olarak incelemiş ve gıda, su, sağlık, ekosistem, insan habitatu ve altyapının iklim saldırısı altında en kırılgan sektörler olduğu sonucuna varırken, Afrika'nın iklim değişkenliğine karşı en kırılgan bölge olduğuna işaret etmiştir (Sarkodie ve Strezov 2019). Bu sektörlerin birbiriyle bağlantılı doğasına ve ilişkili etkilerine dikkat etmek de önemlidir.

Dünya Ekonomik Forumu tarafından hazırlanan 2020 Küresel Riskler Raporu'nun 15^{inci} baskısı, iklim gerçeklerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuş ve büyük ölçüde etkilenen alanları belirlemiştir. Bu riskler arasında sağlık tehlikeleri ve doğal afetlerden kaynaklanan can kayıplarının yanı sıra ekosistemler, özellikle de su/deniz sistemleri üzerindeki aşırı stres de yer almaktadır. Ayrıca, gıda ve su güvenliği de yüksek oranda etkilenen diğer alanlardır. Aşırı hava koşulları ve afetlerin yanı sıra yükselen deniz seviyeleri nedeniyle göçün artması beklenmektedir. Ülkeler su ve kara sınırları boyunca kaynak çıkarmayı hedefledikçe jeopolitik gerilimlerin ve çatışmaların ortaya çıkması muhtemeldir. Raporda ayrıca sistematik riskler arttıkça sermaye piyasaları üzerindeki olumsuz finansal etkiler de tartışılmaktadır. Son olarak, ticaret ve tedarik zincirleri üzerindeki etki sunulmaktadır (WEF 2020).

Kısa bir süre önce Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) özel raporunda sunulan bir değerlendirme, 1,5 °C ve 2 °C olmak üzere iki küresel ısınma seviyesiyle ilişkili etkileri ve öngörülen riskleri ele almıştır. Raporda küresel ısınmanın tatlı su kaynakları, gıda güvenliği ve gıda üretim sistemleri, ekosistemler, insan sağlığı, kentleşme, yoksulluk ve toplumların değişen yapıları üzerindeki olumsuz etkileri incelenmiştir. Raporda ayrıca iklim değişikliğinin turizm, enerji ve ulaşım gibi kilit ekonomik sektörler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Değerlendirilen etkilerin çoğunun, 2 °C ısınma seviyesine kıyasla 1,5 °C'de daha düşük ilişkili risklere sahip olduğu açıktır. Muhtemelen ulaşacağız. Önemizdeki 30 yıl içinde 1,5 °C ve bu noktanın ötesindeki seviyelerindeki artışlar risk etkilerini artıracaktır; örneğin, su stresi 2 °C seviyesinde 1,5 'ye kıyasla iki kat daha fazla risk taşıyacaktır. Akarsu taşkınlarından etkilenen nüfusta 2 °C senaryosunda 1,5 'ye kıyasla %70'lik bir artış öngörülmektedir, özellikle ABD, Avrupa ve

Asya. Karasal ekosistemlerde türlerin yok olma oranının, 1,5 °C'ye kıyasla 2 °C seviyesinde iki veya üç katına çıkacağı öngörülmektedir (IPCC 2018). Basitçe şu sonuca varılabilir ki, dünya şu anda iklim açısından acil bir durumdadır.

Küresel iklim eylemi

İklim değişikliği gerçeğinin kabul edilmesi 1979 yılında Cenevre'de ilk dünya iklim konferansının düzenlenmesiyle başlamıştır. Dünya iklim konferansı, Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından önceki on yıl boyunca gözlemlenen iklim olaylarına yanıt olarak başlatılmıştır. Ana amaç, teknik ve bilimsel uzmanları davet ederek doğal ve beşeri sistemlerin neden olduğu iklim değişikliği ve değişkenliği hakkındaki en son bilgileri gözden geçirmek ve ileriye dönük tavsiyeler formüle etmek için gelecekteki etkileri ve riskleri değerlendirmektir (WMO 1979). Bu muhtemelen iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin tartışıldığı türünün ilk örneği olan bir konferanstır. 1988 yılında, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ile işbirliği içinde, hükümetlere ve resmi kurumlara iklimle ilgili politikaların oluşturulmasında kullanılabilecek bilimsel bilgi ve enformasyon sağlamak amacıyla kurulmuştur (IPCC 2013). Eylem anlamında atılan belki de en kritik adım, 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) kabul edilmesi ve ardından 1994 yılında yürürlüğe girmesi olmuştur. O tarihten bu yana BMİDÇS, küresel iklim eyleminin ana itici gücü ve kolaylaştırıcısı olmuştur. Sözleşmenin temel amacı, iklim sistemi üzerindeki ciddi etkileri önlemek için atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının istikrara kavuşturulmasıdır. Sözleşme, ilgili tüm taraflara taahhütler getirmiş ve gelişmiş ülkelere insan kaynaklı emisyonları sınırlandırmak ve sera gazı yutaklarını geliştirmek için ulusal politikalar uygulama konusunda büyük sorumluluklar yüklemiştir. Hedef, 2000 yılına kadar emisyonların önceki on yılda ulaşılan seviyelere indirilmesiydi. Ayrıca, geliGmiG ülke taraflarına, hassas durumdaki geliGmekte olan ülke taraflarına iklim eylemi gerçekleştirmelerinde mali ve teknolojik olarak yardımcı olma taahhüdünde bulunulmuştur. Sözleşme, küresel iklim politikasının temelini oluşturan yapıyı, raporlama gerekliliklerini ve mali kaynak mekanizmasını oluşturmuştur (BM 1992). Sözleşme

şu anda 197 ülke tarafından onaylanmıştır (UNCCS 2019).

1997'deki üçüncü BMİDÇS taraflar konferansı (COP-3) sırasında Kyoto protokolü kabul edilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Kyoto protokolü, gelişmiş ülkeler için 2008-2012 yılları arasında beş yıllık bir taahhüt dönemi için emisyon azaltım taahhütleri getirmiştir. Protokol, ilgili tüm politikaları, izleme ve raporlama sistemlerini ortaya koymuş ve bu hedeflere ulaşmak için üç piyasa temelli mekanizma getirmiştir. Protokol iki proje bazlı mekanizma getirmiştir, temiz

kalkınma mekanizması ve ortak uygulama mekanizması. Temiz kalkınma mekanizması, gelişmiş ülke taraflarının, ev sahibi ülkede sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek ve yatırım yapan tarafın karbon emisyonlarını dengelemek için geliştirmekte olan ülkelere yatırım yapmasına ve emisyon azaltma projeleri geliştirmesine olanak tanır. Ortak uygulama projeleri, gelişmiş ülke taraflarının protokole taraf olan diğer gelişmiş ülkelerde benzer projeler geliştirmesine ve yatırım yapan tarafın fazla emisyonlarını dengelemesine olanak tanır. Ayrıca protokol, protokol üyeleri tarafından tasarruf edilen yıllık emisyonların, sınırlarını aşanlarla ticaretini kolaylaştırmak için bir platform olarak bir emisyon ticareti mekanizması getirmiştir (UNFCCC 1997). Emisyon azaltımı esas olarak yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve ağaçlandırma/reforestation ile ilgili projelerin hayata geçirilmesiyle sağlanmıştır.

Kyoto protokolü, her biri bir metrik ton CO₂ eşdeğerini temsil eden ve ticareti yapılabilen dört emisyon tasarruf birimi tanımlamaktadır (UNFCCC 2005).

- 1 Temiz kalkınma mekanizması projeleri aracılığıyla elde edilen sertifikalı emisyon azaltım birimi.
- 2 Ortak uygulama projeleri yoluyla elde edilen emisyon azaltım birimi.
- 3 Protokol tarafları arasında kullanılmayan tahsis edilmiş emisyonların ticareti yoluyla elde edilen tahsis edilmiş miktar birimi.
- 4 Ağaçlandırma ile ilgili projeler yoluyla elde edilen kaldırma birimi.

Kyoto birimleri ve getirilen genel çerçeve, bir karbon emisyon piyasasının ve karbon fiyatlandırması kavramının yapısal temelini atmıştır. Birçok ulusal ve bölgesel hükümet emisyon ticareti planlarını uygulamaya koymuştur; bazıları zorunlu iken diğerleri gönüllülük esasına dayanmaktadır. Bazı durumlarda, bu tür programlar Kyoto taahhütleri ve yönetmelikleri ile bağlantılıdır. Şimdiye kadar uygulamaya konulan en büyük emisyon ticareti programı Avrupa emisyon ticareti programıdır (Perdan ve Azapagic 2011). Villoria-Saez ve diğerleri, sera gazı emisyon ticareti planının uygulanmasının gerçek emisyon azaltımları üzerindeki etkinliğini altı büyük emisyon bölgesini kapsayacak şekilde ampirik olarak araştırmıştır. Araştırma bir dizi bulgu sunmuştur; ilk olarak, planın uygulanmasıyla sera gazı emisyonlarını yılda yaklaşık %1,58 oranında azaltmak mümkündür. Ayrıca, 10 yıllık uygulama sonrasında, uygulamama senaryosuna kıyasla yaklaşık %23,43 oranında emisyon azaltımı sağlanabilmektedir (Villoria-Saez . 2016). Literatürde yaygın olarak tartışılan bir diğer emisyon azaltma aracı da karbon vergilendirmesidir. Karbon vergilendirmesinin sera gazı emisyonlarının azaltılmasında etkili bir araç olduğuna dair bilimsel kanıtlar giderek artmaktadır; ancak kamu ve endüstrinin siyasi muhalefeti, birçok ülkenin bu mekanizmayı benimsemesini geciktiren ana nedendir (Wang vd. 2016).

2012 yılında, Kyoto protokolüne ilişkin Doha değişikliği kabul edilmiş ve esas olarak 2013'ten 2020'ye kadar ikinci bir taahhüt dönemi önerilmiş ve emisyon azaltım hedefleri güncellenmiştir. Değişiklik, sera gazı emisyonlarının 1990 seviyelerinin en az %18 altına indirilmesi hedefini ortaya koymuştur. Değişiklik, bu tarihe kadar gereken asgari sayıda tarafça onaylanmadığı için henüz yürürlüğe girmemiştir (UNFCCC 2012).

Paris'te 2015 yılında düzenlenen yirmi birinci BMİDÇS taraflar konferansı (COP-21) sırasında Paris anlaşması kabul edilmiş ve 2016 yılında yürürlüğe girmiştir. Paris anlaşması, mevcut iklim değişikliği ile mücadele çerçevesine ilave hedefler, taahhütler, gelişmiş uyumluluk ve raporlama düzenlemelerinin yanı sıra destek mekanizmaları eklemiştir. Anlaşmanın temel amacı, küresel sıcaklık artışını 2100 yılına kadar 2 °C ile sınırlandırmak ve artışı 1,5 °C ile sınırlandırma çabalarını sürdürmektir. Anlaşma, 2050 ve 2100 yılları arasında insan kaynaklı emisyon kaynakları ile sera gazı yutakları ve rezervuarları arasında bir denge kurarak mümkün olan en kısa sürede sera gazlarının küresel zirvesine ulaşmayı hedeflemektedir. Anlaşma ayrıca yeni bağlayıcı taahhütler getirerek tüm taraflardan ulusal olarak belirlenmiş katkıları sunmalarını ve bu taahhütlere ulaşmak için ulusal tedbirleri uygulamalarını ve bu taahhütleri aşmaya çalışmalarını istemiştir. Anlaşma kapsamında gelişmiş şeffaflık, uyum ve açış raporlama ve iletişim savunulmaktadır. Ayrıca anlaşma, zorunlu girişimlerin ötesinde taraflar arasında gönüllü işbirliğini teşvik etmektedir. Ayrıca, mali destek ve teknolojik desteğin yanı sıra geliştirmekte olan ülkeler için kapasite geliştirme girişimleri de anlaşma tarafından zorunlu kılınmıştır. Bu tür yükümlülükler, sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek ve hassas ülkelerde yeterli azaltım ve uyum destek önlemleri oluşturmak için gelişmiş ülke taraflarca üstlenilmelidir. Belki de anlaşma kapsamında belirlenen en önemli hedeflerden biri, sıcaklık hedefiyle ilgili olarak uyum ve adaptasyon kapasitesinin (BM 2015).

Anlaşmanın 6. maddesi uyarınca, iki uluslararası market mekanizmaları, işbirliğine dayalı yaklaşımlar ve sürdürülebilir kalkınma mekanizması getirilmiştir. Bu mekanizmalar tüm taraflarca ulusal olarak belirlenmiş katkıları karşılamak için kullanılacaktır. İşbirlikçi yaklaşımlar, tarafların ulusal olarak belirlenen katkı hedeflerini karşılamak ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek için uluslararası olarak aktarılan azaltım sonuçlarını (ITMOs) kullanmalarına olanak tanıyan bir çerçevedir. Sürdürülebilir kalkınma mekanizması ise azaltım ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik eden yeni bir yaklaşımdır ve temiz kalkınma mekanizmasının halefi olarak algılanmaktadır. Bu tür mekanizmalar üzerinde halen çok sayıda tartışma ve müzakere devam etmektedir (Gao vd. 2019).

Nieto ve , Paris Anlaşması politikalarının etkinliğine ilişkin derinlemesine sistematik bir analiz gerçekleştirmiştir.

188 ülkeyi temsil eden 161 ulusal olarak belirlenmiş katkı niyetinin (INDC) değerlendirilmesi. Çalışma, bu ülkelerin her birindeki sektörel politikaları incelemiş ve bu INDC'ler kapsamındaki emisyonları sayısallaştırmıştır. Analiz, en iyi durum senaryosunun 2030 yılında baz döneme (2005-2015) kıyasla yıllık küresel emisyon artışının yaklaşık %19,3 olacağı sonucuna varmıştır. Buna karşılık, hiçbir önlem alınmaması durumunda küresel emisyonlarda %31,5'lik bir artış öngörülmektedir. Tahmin edilen en iyi durum emisyon seviyesinin 2030 ve 2050 yılları arasında korunması halinde en az 3 °C'lik bir sıcaklık artışının gerçekleşeceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yıllık emisyonlar artmaya devam ederse 4 °C'lik bir artış garanti altına alınacaktır (Nieto ve ark. 2018).

IPCC, yüzyılın sonuna kadar 1,5 °C hedefine ulaşmak için 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarının 25-30 GtCO₂e yıl⁻¹ seviyesinde tutulması gerektiğini belirtmiştir. Buna karşılık mevcut koşulsuz ulusal olarak belirlenmiş katkılar 2030 yılı için 52-58 GtCO₂e yıl⁻¹ olarak tahmin edilmektedir. 1,5°C ısınma senaryosuna yönelik yol modellemesine göre, 2030 yılına kadar insan kaynaklı sera gazı emisyonlarında 2010 yılı seviyelerine kıyasla %45'lik bir düşüş ve 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşılmalıdır. Yüzyılın sonuna kadar 2 °C küresel ısınma seviyesini korumak için, emisyonların 2030 yılında 2010 seviyelerine kıyasla yaklaşık %25 oranında azalması ve 2070 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşılmaması gerekmektedir (IPCC 2018). Mevcut azaltım çabalarının ve gelecekteki emisyon taahhütlerinin Paris anlaşması tarafından belirlenen sıcaklık hedeflerine ulaşmak için yeterli olmadığını doğrulayan kanıtlar giderek artmaktadır (Nieto ve ark. 2018; Lawrence ve ark. 2018). Bu hedeflere ulaşmaya çalışılacaksa, daha fazla önlem ve yeni azaltım yolları araştırılmalıdır.

İklim değişikliği azaltım stratejileri

Giriş

Literatürde tartışılan üç ana iklim değişikliği azaltım yaklaşımı bulunmaktadır. İlk olarak, geleneksel azaltım çabaları, yenilenebilir enerji, yakıt değişimi, verimlilik artışları, nükleer enerji ve karbon yakalama depolama ve kullanımı gibi CO₂ emisyonlarını azaltan karbonsuzlaştırma teknolojilerini ve tekniklerini kullanmaktadır. Bu teknolojilerin çoğu iyi kurulmuş olup kabul edilebilir düzeyde yaşlılık riski taşımaktadır (Ricke vd. 2017; Victor vd. 2018; Bataille vd. 2018; Mathy vd. ; Shinnar ve Citro 2008; Bustreo vd. 2019).

İkinci bir yol, yakın zamanda önerilen yeni bir dizi teknoloji ve yöntemi oluşturmaktadır. Bu teknikler potansiyel olarak atmosferdeki CO₂'yi yakalamak ve tutmak için kullanılmaktadır ve karbondioksit giderme yöntemleri olarak da adlandırılan negatif emisyon teknolojileri olarak adlandırılmaktadır

(Ricke . 2017). Literatürde yaygın olarak tartışılan başlıca negatif emisyon teknikleri arasında biyoenerji karbon yakalama ve depolama, biyokömür, gelişmiş ayrıştırma, doğrudan hava karbon yakalama ve depolama, okyanus gübreleme, okyanus alka- litesini artırma, toprak karbon tutma, ağaçlandırma ve yeniden ağaçlandırma, sulak alan inşası ve restorasyonunun yanı sıra mineral karbonatlama ve inşaatla biyokütle kullanımı gibi alternatif negatif emisyon kullanım ve depolama yöntemleri yer almaktadır (Lawrence . 2018; Palmer 2019; McLaren 2012; Yan . 2019; McGlashan vd. 2012; Goglio vd. 2020; Lin 2019; Pires ; RoyalSociety 2018; Lenzi 2018).

Son olarak, üçüncü bir yol da güneş ve karasal radyasyonun yönetilmesi yoluyla dünyanın radyasyon dengesinin değiştirilmesi ilkesi etrafında dönmektedir. Bu tür teknikler ısınım sal zorlama jeomühendislik teknolojileri olarak adlandırılır ve temel amaç sıcaklığın dengelenmesi ya da azaltılmasıdır. Negatif emisyon teknolojilerinin aksine bu, atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarını değiştirmeden elde edilir. Literatürde tartışılan başlıca ısınım sal zorlama jeomühendislik teknikleri arasında stratosferik aero- sol enjeksiyonu, deniz gökyüzünün aydınlatılması, sirus bulutunun inceltilmesi, uzay tabanlı aynalar, yüzey tabanlı aydınlatma ve çeşitli radyasyon yönetimi teknikleri yer almaktadır. Tüm bu teknikler halen teoriktir ya da çok erken deneme aşamalarında ve pratik büyük ölçekli uygulama açısından çok belirsizlik ve risk taşımaktadır. Şu anda, ısınım sal zorlama jeomühendislik teknikleri politika çerçevelerine dahil edilmemiştir (Lawrence vd. 2018; Lockley vd. 2019).

Geleneksel azaltım teknolojileri

Daha önce de tartışıldığı gibi, enerjiyle ilgili emisyonlar atmosferdeki sera gazı konsantrasyon seviyelerinin artmasının arkasındaki ana itici güçtür; bu nedenle, geleneksel azaltım teknolojileri ve çabaları enerjinin hem arz hem de talep tarafına odaklanmalıdır. Literatürde öncelikli olarak tartışılan azaltım çabaları, arz tarafında enerji ve talep tarafında sanayi, ulaşım ve binalar olmak üzere dört ana sektörde uygulanan teknoloji ve teknikleri kapsamaktadır. Enerji sektöründe, yenilenebilir enerji, nükleer enerji, karbon yakalama ve depolamanın yanı sıra doğal gaz ve yenilenebilir gibi düşük karbonlu yakıtlara arz yönlü yakıt geçişi yoluyla karbonsuzlaştırma sağlanabilir. Ayrıca, talep tarafındaki azaltım çabaları, enerji tüketimini azaltan enerji verimli süreçlerin ve sektöre özgü teknolojilerin yaygınlaştırılmasıyla elde edilen verimlilik kazanımlarının yanı sıra fosil bazlı yakıtlardan yenilenebilir yakıtlara son kullanım yakıt geçişi ve dahası, yenilenebilir enerji teknolojilerinin bu tür sektörlerin enerji matrisine entegrasyonunu içerir (Mathy ve ark. 2018; Hache 2015). Bu bölümde karbonsuzlaştırma ve verimlilik teknolojilerine ilişkin literatür gözden geçirilecektir

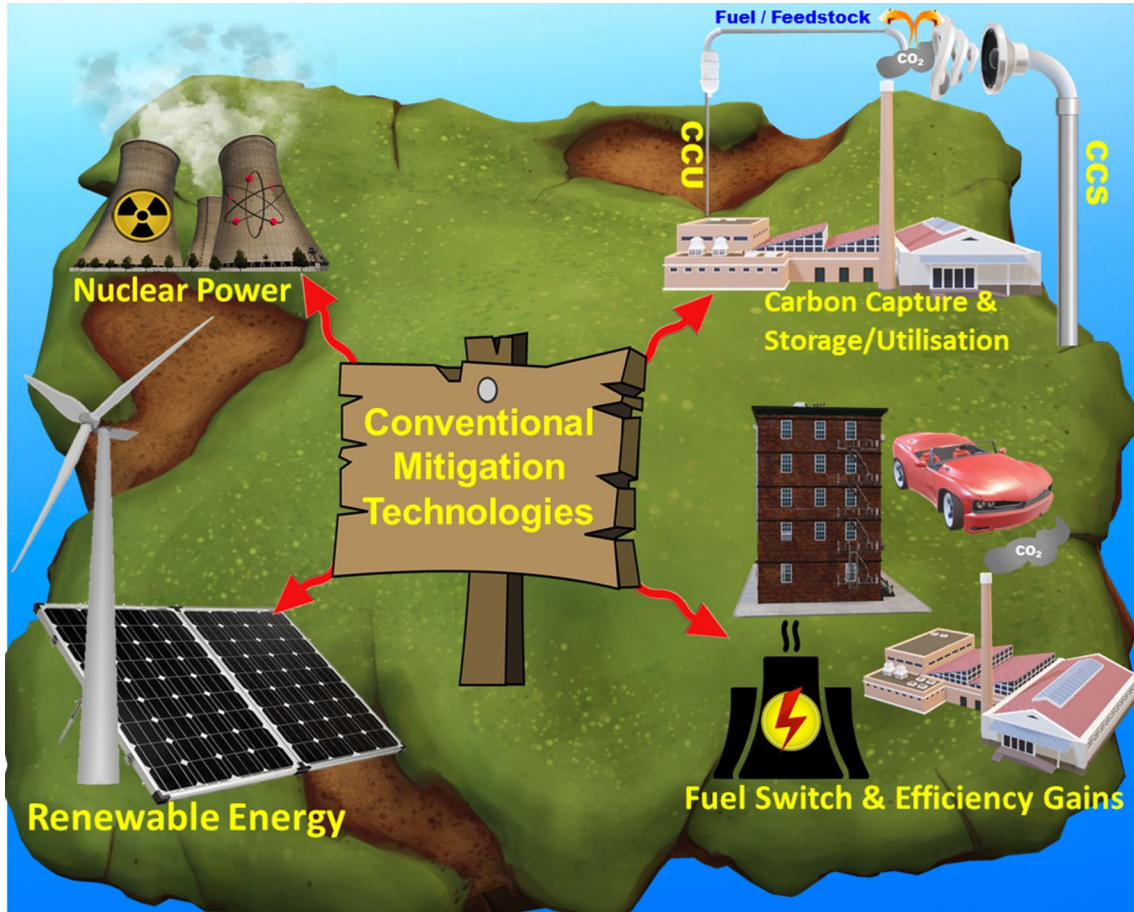
ve bu dört ana sektörü kapsayan teknikler tanıtılmıştır. Şekil 1, literatürde tartışılan ve bu makalede eleştirel olarak incelenen geleneksel azaltım teknolojilerini ve tekniklerini göstermektedir.

Yenilenebilir enerji

Yenilenebilir enerjilere ilişkin yakın tarihli bir küresel durum raporuna göre, yenilenebilir enerjinin küresel olarak toplam nihai enerji tüketimindeki payının 2017 yılında %18,1 olduğu tahmin edilmektedir (REN21 2019). Literatürde bir dizi modern yenilenebilir enerji teknolojisi tartışılmaktadır. En öne çıkan teknolojiler arasında fotovoltaik güneş enerjisi, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, ısıtma ve soğutma uygulamaları için güneş termal enerjisi, kara ve deniz rüzgar enerjisi, hidroelektrik, deniz, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi ve biyoyakıtlar yer almaktadır (Mathy vd. 2018; Shinnar ve Citro 2008; Hache 2015; REN21 2019; Hussain vd. 2017; Østergaard vd. 2020; Shivakumar vd. 2019; Collura vd.

2006; Gude ve Martinez-Guerra 2018; Akalın vd. 2017; Srivastava vd. 2017).

Elektrik üretimi açısından bakıldığında, 2018 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji küresel elektrik yaklaşık %26,2'sini oluşturmaktadır. Hidroelektrik enerjinin payı %15,8 iken, rüzgâr enerjisinin payı %5,5, fotovoltaik güneş enerjisinin payı %2,4, biyoenerjinin payı %2,2 ve jeotermal, konsantre güneş enerjisi ve deniz enerjisinin payı ise %0,46 olmuştur (REN21 2019). Büyük ölçekli hidroelektrik enerji, üretim kapasitesinin yanı sıra üretim açısından da başı, son on yılda fotovoltaik güneş enerjisi ve karasal rüzgar enerjisinde önemli bir kapasite artışı olmuştur. Fotovoltaik güneş enerjisi için 2008 yılında 15 GW olan küresel kurulu kapasite 2018 yılı sonu itibarıyla 505 GW'a ulaşmıştır. Rüzgar enerjisinde ise 2008'de 121 GW olan küresel kurulu kapasite 2018'de 591 GW olarak kaydedilmiştir. Küresel biyoenerji kapasitesinin 2018 yılında 130 GW olduğu ve bu yıl içinde toplam 581 TWh üretim yapılacağı tahmin edilmektedir. Çin, biyoenerjide



Şekil 1 Enerjinin arz ve talep taraflarıyla ilgili CO₂ emisyonlarının azaltılmasına odaklanan başlıca dekarbonizasyon teknolojileri. Geleneksel azaltım teknolojileri arasında yenilenebilir enerji, nükleer, karbon yakalama ve depolama (CCS) ve

kullanımı (CCU), yakıt değişimi ve verimlilik kazanımları. Bu teknoloji ve teknikler ağırlıklı olarak enerji, sanayi, ulaşım ve bina sektörlerinde kullanılmaktadır

güneş, rüzgar ve biyokütle kaynaklarından en büyük yenilenebilir enerji üreten ülke konumundadır. Yenilenebilir enerjinin küresel elektrik kapasitesindeki toplam payı 2018 yılında yaklaşık %33'e ulaşmıştır (REN21 2019).

Enerji sektörünün yanı sıra, yenilenebilir enerji sanayi, ulaşım ve bina sektörlerinde de kullanılabilir. Fotovoltaik ve termal güneş enerjisinin yanı sıra birleşik termal ve enerji üretimi için katı, sıvı ve gaz biyoyakıtlar gibi yenilenebilir yakıtlara endüstriyel son kullanım yakıt geçişi, yenilenebilir enerjiler yoluyla karbonsuzlaştırma çabalarına örnektir. Binalar da enerji, ısıtma ve soğutma gereksinimleri için güneş enerjisinin yanı sıra biyokütle bazlı teknolojilerden faydalanabilir. Ulaşım sektörü ile ilgili olarak, son kullanım yakıt değişimi sektörün karbonsuzlaştırılmasında belirleyici bir unsurdur. Biyoyakıtlara örnek olarak biyodizel, birinci ve ikinci nesil biyoetanol, biyo-hidrojen, biyo-metan ve biyo-dimetil eter (biyo-DME) verilebilir (Srivastava vd. 2020; Chauhan vd. 2009; Hajilary vd. 2019; Osman 2020). Ayrıca, yenilenebilir enerji kullanılarak elektroliz yoluyla üretilen hidrojen, sektörün karbonsuzlaştırılması için potansiyel bir yenilenebilir yakıttır. Yenilenebilir enerji kullanımı yoluyla sektörün karbonsuzlaştırılmasına bir başka örnek de yenilenebilir enerji kullanan elektrikli araçlardır (Michalski . 2019). Bu sektörlerdeki diğer azaltım önlemleri bir sonraki bölümde daha ayrıntılı olarak alınacaktır.

Güneş ve rüzgar gibi değişken yenilenebilir enerji kaynakları, kilit teknolojilerdir.

önemli karbonsuzlaştırma potansiyeline sahip teknolojiler.

Bununla ilgili temel teknolojik zorluklardan biri, enerji üretimindeki kesintili yapı/değişkenliktir. Bu zorluk, bu tür teknolojilerin depolamanın yanı sıra diğer yenilenebilir temel yük ve şebeke teknolojileriyle entegre edilmesiyle aşılmıştır.

Sin- sel ve diğerleri, değişken yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili dört özel zorluk alanını tartışmaktadır: kalite, akış, istikrar ve denge. Ayrıca, dağıtık ve merkezi sistemler için şebeke teknolojilerinin yanı sıra esas olarak esneklik etrafında dönen bir dizi çözüm sunmaktadırlar (Sinsel . 2020). Ekonomik, sosyal ve politik boyutlar, yenilenebilir enerji teknolojisi inovasyonu ve dağıtımında etkili bir rol oynamaktadır. Pitelis ve arkadaşları, 1994-2014 yılları arasında 21 Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) ülkesi için politika araçlarının seçimini ve yenilenebilir enerji teknolojisi inovasyonunu teşvik etmedeki etkinliğini araştırmıştır. Çalışma, yenilenebilir enerji politikalarını üç kategoriye ayırmıştır: teknoloji itici, talep çekici ve sistemik politika araçları. Ayrıca çalışma, her bir politika sınıflandırmasının çeşitli yenilenebilir enerji teknolojilerinin (güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal ve hidro) inovasyon faaliyetleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma, tüm politika araçlarının yenilenebilir enerji teknolojileri üzerinde aynı etkiye sahip olmadığı ve her teknolojinin uygun politikalar gerektireceği sonucuna varmıştır. Bununla birlikte, çalışma talep-çekme politika araçlarının yenilenebilir enerji inovasyonunu teşvik etmede daha etkili olduğunu öne sürmüştür.

alternatif politika türlerine yönlendirmektedir (Pitelis vd. 2019). Yenilenebilir enerji dağıtımının önündeki engeller ve itici güçler konusunda Shivakumar ve diğerleri, yenilenebilir enerji projelerinin geliştirilmesini engelleyebilecek veya mümkün kılacak çeşitli boyutların altını çizmiştir. Vurgulanan ana noktalar politika, finansal erişim, hükümet istikrarı ve uzun vadeli niyetler, idari prosedürler ve destek çerçevesi veya bunların eksikliği ile yenilenebilir enerji yatırımlarının kârlılığı etrafında dönmektedir (Shivakumar ve ark. 2019). Seetharaman ve arkadaşları, çeşitli engellerin yenilenebilir enerji dağıtımı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Araştırma, düzenleyici, sosyal ve teknik engellerin yenilenebilir enerjinin yaygınlaştırılmasında önemli bir rol oynadığını doğrulamaktadır. Araştırma, ekonomik engeller ile proje yayılımı arasında anlamlı bir doğrudan ilişki bulamamıştır; ancak ekonomik boyut ile düzenleyici, sosyal ve teknolojik engeller arasındaki karşılıklı ilişki, yayılımı dolaylı olarak da olsa etkilemektedir (Seetharaman . 2019).

Finansal erişilebilirlik ve yenilenebilir enerji kullanımı arasındaki ilişki açısından Kim ve diğerleri, 2000-2013 yılları arasındaki 13 yıllık dönemde 30 ülkeden oluşan bir panel veri setini analiz ederek bu ilişkiyi ampirik olarak araştırmıştır. İstatistiksel kanıtlar, gelişmiş finansal piyasaların yenilenebilir enerji dağıtımı ve sektör büyümesi üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. Ayrıca çalışma, temiz kalkınma mekanizması gibi piyasa temelli mekanizmalar ile yenilenebilir enerji dağıtımı arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki olduğunu doğrulamaktadır. Fotovoltaik güneş ve rüzgar teknolojileri üzerinde güçlü bir etki varken, biyokütle ve jeotermal teknolojiler altında etki marjinaldir (Kim ve Park 2016).

Pfeiffer ve arkadaşları 1980'den 2010'a kadar 30 yıllık bir dönem boyunca 108 gelişmekte olan ülkede hidro olmayan yenilenebilir enerji (NHRE) teknolojilerinin yayılımını incelemiştir. Sonuçlara göre, NHRE'nin yaygınlaşmasında ekonomik ve düzenleyici politikaların yanı sıra hükümet istikrarı, yüksek eğitim seviyesi ve kişi başına düşen gelir de önemli bir rol oynamıştır. Öte yandan, enerji talebindeki büyüme, yardımlar ve yüksek yerel fosil yakıt üretimi NHRE'nin yaygınlaşmasını engellemiştir. Kim ve diğerlerinin aksine, bu çalışma uluslararası finansman mekanizmalarının ve finansal piyasa gelişiminin yayılımı olumlu yönde etkilediğini gösteren zayıf bir destek bulmuştur (Pfeiffer ve Mulder 2013). Bunun nedeni analizin nasıl kurgulandığı, farklı veri setleri, dönemler ve istatistiksel yöntemlerle ilgili olabilir.

Yenilenebilir enerji kullanımı yoluyla karbonsuzlaştırma son derece önemlidir. Yenilenebilir enerji projelerinin geliştirilmesi en önemli öncelik olarak görülmelidir. Yenilenebilir enerji yoluyla yönlendirecek ve politika yapımcılar, finansörler ve piyasa katılımcıları tarafından odaklanılması gereken alanlar arasında politika araçları, finansal destek ve erişilebilirlik ve proje geliştiricileri teşvik etmek için piyasa temelli mekanizmalar yer almaktadır.

Ayrıca, hükümet destek çerçeveleri, toplumsal kabul için kamu eğitiminin yanı sıra teknolojik ilerlemeler ve gelişmiş verimlilik için araştırma ve geliştirme çabaları önemli odak alanlarıdır.

Nükleer enerji

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından hazırlanan son rapora göre, 2018 yılı itibarıyla 450 nükleer enerji santrali faaliyettir ve toplam küresel kurulu kapasite 396,4 GW'tır. Kurulu kapasitede 2030 yılına kadar %30'luk bir artışın gerçekleşeceği öngörülmektedir (2017'deki 392 GW'lık baz durumdan). Düşük durum projeksiyon senaryosu olarak, 2017 rakamlarına göre 2030 yılına kadar %10'luk bir düşüş gerçekleşebileceği tahmin edilmektedir. Uzun vadede, yüksek durum senaryosu olarak küresel kapasitenin 2050 yılına kadar 748 GW'a ulaşabileceği öngörülmektedir (IAEA 2018). Pravalie ve diğerleri nükleer enerjinin durumuna ilişkin ilginç bir inceleme sunmaktadır. Araştırma, nükleer enerjinin küresel enerji üretimine katkısı ve küresel enerji sistemindeki karbonsuzlaştırma potansiyeli açısından oynadığı önemli rolü ortaya koymaktadır. Çalışma yaklaşık olarak şu tahminleri sunmaktadır

1,2–2,4 Gt CO₂ emisyonu, alternatif olarak kömür veya doğal gazın yakılmasıyla üretilen enerji nedeniyle nükleer devreye sokulmasıyla engellenmektedir. Çalışmada, Paris Anlaşması'nın öngördüğü 2 °C hedefiyle uyumlu olması için nükleer santral kapasitesinin 2050 yılına kadar yaklaşık 930 GW'a çıkarılması ve toplamda yaklaşık 4 trilyon dolar yatırım yapılması gerektiği belirtilmektedir (Prävlie ve Bandoc 2018).

Nükleer enerji iklim değişikliğinin azaltılması için düşük karbonlu bir çözüm olarak görülse de, bir dizi önemli dezavantajı da beraberinde getirmektedir. İlk olarak, nükleer enerjinin geliştirilmesiyle ilgili sermaye harcamaları ve işletme maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca, çevresel radyoaktif kirlilik riski nükleer enerjiyle ilgili önemli bir sorundur; bu da esas olarak reaktör kazaları tehdidinin yanı sıra nükleer atık bertarafıyla ilgili tehlikeden kaynaklanmaktadır (Prävlie ve Bandoc 2018; Abdulla vd. 2019). Geleneksel fisyon temelli nükleer santrallerin gelecekte aşamalı olarak kapatılması önerilirken, gelişmiş füzyon temelli nükleer teknolojinin devreye girmesi yüz yılın ikinci yarısında azaltım çabalarına olumlu katkıda bulunabilir. Füzyon gücü, geleneksel fisyon temelli teknolojiden daha verimli olan ve geleneksel fisyon temelli nükleer teknolojiyle ilişkili tehlikeli atık bertaraf riskini taşımayan yeni nesil bir nükleer güçtür. Dahası, füzyon gücü sıfır emisyonlu bir teknoloji olarak nitelendirilmektedir (Prävlie ve Bandoc 2018; Gi . 2020).

Karbon yakalama, depolama ve kullanma

Karbon yakalama ve depolama, enerji ve sanayi sektörlerine uygulanabilecek potansiyel bir dekarbonizasyon yaklaşımı olarak literatürde tartışılan umut verici bir teknolojidir. Bu teknoloji, kömür, petrol veya gaz gibi fosil yakıtlara dayanan proseslerden CO₂ gazlarının ayrıştırılması ve yakalanmasından oluşmaktadır. Yakalanan CO₂ daha sonra taşınır ve çok uzun süreler boyunca jeolojik rezervuarlarda depolanır. Temel amaç, fosil kaynakları kullanırken emisyon seviyelerini azaltmaktır. Literatürde üç yakalama teknolojisinden bahsedilmektedir: yanma öncesi, yanma sonrası ve oksijen-yakıt yakma. Her bir teknoloji, CO₂'nin çıkarılması ve yakalanması için belirli bir süreci beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, yanma sonrası yakalama teknolojileri ret- rofit projeleri için en uygun olanlardır ve geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. CO₂ başarılı bir şekilde yakalandıktan sonra sıvılaştırılır ve boru hatları veya gemiler aracılığıyla uygun depolama taşınır. Literatüre göre, depolama seçenekleri arasında tükenmiş petrol ve gaz sahaları, kömür yatakları ve içme suyu için kullanılmayan yeraltı tuzlu su akiferleri bulunmaktadır (Vinca ve ark. 2018). Karbon yakalama ve depolamanın başlıca dezavantajları arasında güvenli depolama ile ilgili güvenlik ve sızıntı olasılığı yer almaktadır. Kazara sızıntıya maruz kalan kara depolama yerlerinden kaynaklanabilecek olumsuz çevresel etkiler Ma ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Araştırma, sızıntının tarım arazileri üzerindeki etkisine odaklanmıştır (Ma ve ark. 2020). Sızıntı riski ve buna bağlı olumsuz etkiler Vinca ve diğerleri (2018) tarafından da belirtilmiştir. Bu teknolojiyle ilgili diğer sorunlar arasında halkın kabulü (Tcvetkov vd. 2019; Arning vd. 2019) ve ilgili yüksek dağıtım maliyetleri (Vinca vd. 2018) yer almaktadır. Karbon yakalama sonrası bir diğer yol, yakalanan CO₂'nin kimyasallar, yakıtlar, mikroalgler ve beton yapı malzemeleri üretiminde ve ayrıca geliştirilmiş petrol geri kazanımında kullanılmasıdır (Hepburn ve ark. 2019; Aresta ve ark. 2005; Su ve ark. 2016; Qin ve ark. 2020).

Karbon yakalama depolamanın büyük ölçekli dağıtımı ve kullanım teknolojileri henüz kanıtlanmamıştır. Uluslararası enerji ajansına göre, 2018 yılı itibarıyla faaliyette sadece 2 karbon tutma ve depolama projesi bulunmaktadır ve bunların toplam yıllık tutma kapasitesi 2,4 MtCO₂'dir. Geliştirme aşamasında olan ve 2025 yılına kadar kapasiteyi 11 MtCO₂'ye çıkarması öngörülen 9 karbon yakalama projesi daha bulunmaktadır; ancak uluslararası enerji ajansı tarafından 2040 yılı için hedeflenen 1488 MtCO₂ kapasiteli sürdürülebilir kalkınma senaryosundan önemli bir sapma söz konusudur (IEA 2019a).

Yakıt değişimi ve verimlilik kazanımları

Elektrik sektöründe kömürden gaza yakıt geçişi, kısa vadede, literatürde kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır

ekonomik olarak düşük karbonlu ve gelecekte sıfır karbonlu bir ekonomiye geçiş için potansiyel bir yaklaşımdır (Vic- tor vd. 2018; Wendling 2019; Pleßmann ve Blechinger 2017). Doğal gaz geçiş sanayi, ulaşım ve bina sektörleri için de geçerlidir; ancak daha önce de tartışıldığı gibi yenilenebilir yakıtlara geçiş, bu sektörlerde daha fazla karbonsuzlaştırma potansiyeli yaratan daha sürdürülebilir bir yaklaşımdır.

Yakıt değişimine ek olarak, verimlilik kazanımları azaltım çabaları içinde son derece önemlidir. Enerji sektöründeki verimlilik kazanımları, termik santrallerde yakıt yanma verimliliğinin artırılması ve türbin jeneratör verimliliğinin iyileştirilmesi yoluyla elde edilmektedir. Ayrıca, ek termal ve elektrik üretimi için atık ısı geri kazanımı verimliliği artırmaktadır. Gaz yakıtlı enerji santrallerinde, kombine çevrim teknolojisinin kullanılması verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Kombine ısı ve güç üniteleri de verimlilik kazanımlarında ilginç bir rol oynamıştır. İletim ve dağıtım şebekelerindeki teknolojik gelişmeler de kayıpları azaltarak verimliliği artırmaktadır (REN21 2019).

Sanayide, verimlilik kazanımlarının gerçekleştirilebileceği birçok potansiyel alan vardır. Örneğin, çelik ve çimento uygulamalarında, atık ısı, egzoz gazlarından gelen atık ısıyı kullanan atık ısı tahrikli enerji santrallerinin kurulumu yoluyla yerinde güç ve ısı üretimi için geri kazanılabilir. Proses buharı kullanan endüstrilerde, yerinde kullanım için elektrik enerjisi üretmek veya dönen ekipmanı tahrik etmek amacıyla atık buhar basıncından yararlanmak için mükemmel bir fırsat vardır. Buhar basıncının düşürülmesinin gerekli olduğu alanlarda geri basınçlı buhar türbinlerinin uygulanması enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Aynı yaklaşım, gaz basıncının düşürülmesinin gerekli olduğu uygulamalarda da turbo genleştiriciler kullanılarak uygulanabilir. Endüstriyel süreçlerden kaynaklanan atık gazlar da mikro ve küçük gaz türbinleri kullanılarak yerinde ısı ve güç üretmek için kullanılabilir. Buna ek olarak, gelişmiş makine kontrollerinin çok sayıda proseste ve endüstriyel sektörde kullanılmasıyla daha fazla verimlilik kazanımı elde edilebilir.

Binalarda enerji verimliliğini etkileyen bir dizi faktör bulunmaktadır; bunların başında bina tasarımı ve inşaatla kullanılan yalıtım ve cam gibi malzemeler gelmektedir. Ayrıca, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri ve aydınlatma gibi binalarda kullanılan cihazlar, aygıtlar ve sistemler de enerji tüketiminde önemli bir rol oynamaktadır. Enerji verimli sistemler ve cihazların yanı sıra geliştirilmiş inşaat malzemeleri kullanılarak verimlilik kazanımları elde edilebilir (REN21 2019; Leibowicz ve ark. 2018).

Ulaşım sektöründe, gelişmiş ve daha verimli termal motorların, hibrit ve elektrikli araçların yanı sıra hidrojen (H_2) araçlarının piyasaya sürülmesiyle verimlilik kazanımları gerçekleştirilebilir (Hache 2015). Ayrıca, teknolojik ilerlemeler yoluyla verimlilik kazanımları elde edilebilir

Havacılık, denizcilik ve demiryollarında, demiryolu şu anda en enerji verimli modlardan biri olmasına rağmen. Ulaşım sektöründe verimlilik önlemleri başka şekillerde de alınabilir. Örneğin, seyahat sıklığını ve mesafesini azaltmak için seyahat talep yönetimi ilginç bir yaklaşım olabilir. Dahası, elektrikli demiryolu gibi mümkün olan yerlerde seyahatin en verimli modlara kaydırılması ve yüksek yoğunluklu seyahat yöntemlerine bağımlılığın azaltılması verimliliğin artırılmasında ilginç bir rol oynayabilir (IEA 2019b).

Negatif emisyon teknolojileri

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından araştırılan iklim yollarının çoğu, Paris anlaşması tarafından zorunlu kılınan hedeflere ulaşmanın fizibilitesini değerlendirmek için geleneksel dekarbonizasyon teknolojilerinin yanı sıra negatif emisyon teknolojilerinin kullanımını da içermektedir. IPCC değerlendirmelerine şimdiye kadar sadece iki negatif emisyon teknolojisi dahil edilmiştir: biyoenerji karbon yakalama ve depolama ile ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma (IPCC 2018).

Gasser ve arkadaşları, küresel ısınmayı $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında sınırlamak için gereken potansiyel negatif emisyonları ampirik olarak araştırmıştır. Analizde, ısınmayı bu seviyede tutma olasılığı en yüksek olan IPCC yolu kullanılmış ve gerekli potansiyel negatif emisyon çabalarını ölçmek amacıyla geleneksel azaltım varsayımlarına dayalı bir dizi senaryo oluşturulmuştur. Sonuçlar, en iyi senaryoda, yani geleneksel azaltım çabalarına ilişkin en iyi varsayımlar altında, $0,5\text{--}3\text{ Gt C yıl}^{-1}$ negatif emisyon ve $50\text{--}250\text{ Gt C}$ depolama kapasitesi gerektiğini göstermiştir. En kötü durum senaryosuna göre, $7\text{--}11\text{ Gt C yıl}^{-1}$ negatif emisyon ve $1000\text{--}1600\text{ Gt C}$ depolama kapasitesi . (1 Gigaton Karbon= $3.6667\text{ Gigaton CO}_2\text{e}$) Sonuçlar, geleneksel azaltım çabalarının çok yüksek oranlarında bile negatif emisyonlara kaçınılmaz olarak ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışma, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hedefine ulaşmak için tek başına negatif emisyonlara güvenilmemesi gerektiğini öne sürmektedir. Araştırmada, negatif emisyon teknolojileri henüz gelişme aşamasında olduğundan, iklim politikasında geleneksel azaltım teknolojilerine odaklanılmaya devam edilmesi ve negatif emisyon teknolojilerinin gelişimini hızlandırmak için daha fazla mali kaynağın seferber edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır (Gasser vd. 2015).

Negatif emisyon teknolojilerinin aşağıdakileri sağlaması gerektiği savunulmaktadır

tüm geleneksel karbonsuzlaştırma çabaları en üst düzeye çıkarıldıktan sonra kalan emisyonları gidermek için kullanılmalı ve bu yaklaşım geleneksel yöntemlerle ortadan kaldırılması zor olan emisyonları gidermek için kullanılmalıdır (Lin 2019). Negatif emisyonların, geleneksel karbonsuzlaştırma yöntemlerinin yerine değil, tamamlayıcı bir teknoloji ve teknik paketi olarak görülmesi gerektiğini belirtmek önemlidir (Pires 2019).

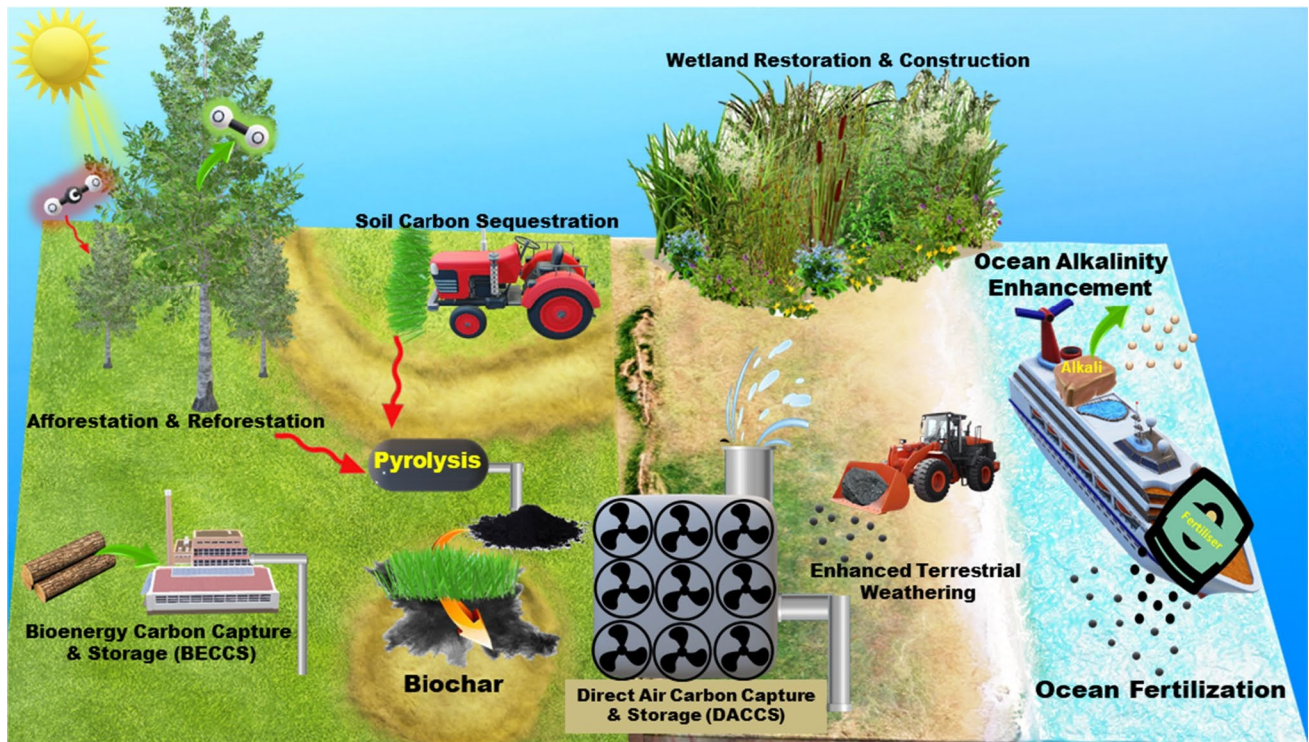
Negatif emisyonların müşteri hedeflerine ulaşmadaki önemli rolü akademisyenler, bilim insanları ve politika yapımcılar arasında anlaşılmış ve takdir edilmiştir; ancak sosyal, ekonomik ve teknik fizibilitenin yanı sıra büyük ölçekli dağıtım ile ilgili riskler konusunda tartışmalar devam etmektedir (Lenzi 2018). Bu bölümde, başlıca negatif emisyon teknolojileri ve teknikleri, bunların mevcut gelişim durumları, algılanan sınırlamalar ve risklerin yanı sıra sosyal ve politik etkileri hakkında kapsamlı bir literatür taraması yapılacaktır. Şekil 2, literatürde tartışılan ve bu makalede eleştirel olarak incelenen başlıca negatif emisyon teknolojilerini ve karbon giderme yöntemlerini göstermektedir.

Biyoenenerji karbon yakalama ve depolama

BECCS olarak da adlandırılan biyoenenerji karbon yakalama ve depolama, literatürde yaygın olarak tartışılan önde gelen negatif emisyon teknolojilerinden biridir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), sıcaklık hedeflerine ulaşmak için potansiyel bir yol olarak değerlendirmelerinde biyoenenerji karbon yakalama ve depolamaya büyük ölçüde güvenmiştir (IPCC 2018). Bu teknoloji, daha önce tartışılan biyoenenerji ve karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin basit bir entegrasyonudur. Teknolojinin arkasındaki temel prensip oldukça

doğrudan. Biyokütle, büyüme sırasında fotosentez yoluyla atmosferik CO_2 'yi biyolojik olarak yakalar ve daha sonra yanma yoluyla enerji üretimi için kullanılır. Yanma sonucu ortaya çıkan CO_2 emisyonları daha sonra yakalanır ve uygun jeolojik rezervuarlarda depolanır (Pires 2019; Roy- alSociety 2018). Bu teknoloji, CO_2 'yi atmosferden uzaklaştırarak sera gazı konsantrasyon seviyelerini önemli ölçüde azaltabilir. Bu teknolojinin karbondioksit giderme potansiyeli literatürde farklılık göstermektedir; ancak Fuss ve arkadaşları tarafından yapılan bir değerlendirme, 2050 yılına kadar tahmini 0,5-5 GtCO_2 yıl^{-1} aralığını sunmaktadır (Fuss et al. 2018). Depolama kapasitesi için küresel tahminler açısından, literatür 200 ila 50.000 GtCO_2 arasında geniş bir aralık sunmaktadır (Fuss et al. 2018). Biyoenenerji karbon yakalama ve depolama yoluyla karbondioksit giderimi için maliyet tahminleri şu aralıktadır 100-200\$/ tCO_2 (Fuss ve ark. 2018).

Bu yaklaşım için kullanılan biyokütle hammaddeleri, özel enerji bitkileri veya tarımsal ya da ormancılık kaynaklarından elde edilen atıklar olabilir. Ayrıca, bu tür hammaddeler ya özel biyo-bazlı hammaddeler olarak kullanılabilir ya da birlikte ateşlenen enerji santrallerinde fosil bazlı yakıtlarla birleştirilebilir (Roy- alSociety 2018). Standart yanma yolunun yanı sıra, literatür CO_2 'nin fermantasyon sırasında olduğu gibi biyo-bazlı güç dışı uygulamalarda da yakalanabileceğini göstermektedir



Şekil 2 Atmosferden karbonu yakalamak ve tutmak için kullanılan başlıca negatif emisyon teknolojileri ve teknikleri. Bu yaklaşım biyoenenerji karbon yakalama ve depolama, ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma, toprak karbonu, geliştirilmiş

karasal ayrışma, sulak alan restorasyonu ve inşası, doğrudan hava karbonu yakalama ve depolama, okyanus alkalinitesinin artırılması ve okyanus gübrelemesi

etanol üretiminde veya kağıt hamuru üretiminde odun hamuru atıklarının, örneğin siyah likörün gazlaştırılmasında kullanılır (McLaren 2012; Pires 2019).

Bu teknolojiyle ilgili temel zorluk, etkili bir emisyon azaltma yaklaşımı olması için gereken önemli miktarda biyokütle hammaddesidir. Büyük ölçekli, özel mahsuller kullanıldığında kaynak talebi oldukça önemli olacak, arazi, su ve besin kaynakları üzerinde yüksek baskı oluşacaktır. Önemli bir sorun, arazi, tatlı su ve besin maddeleri için gıda ve yem bitkileri ile doğrudan rekabet olacaktır (RoyalSociety 2018; GNASL 2018). Heck ve arkadaşları, iklim değişikliğinin azaltılması için biyoenerji karbon yakalama ve depolamanın büyük ölçekli dağıtımını ampirik olarak araştırmış ve tatlı su kullanımı, arazi sistemi, biyosfer bütünlüğü ve biyojeokimyasal akışlar üzerindeki etkisini göstermiştir. Ayrıca araştırma, bu boyutların her biri arasındaki karşılıklı ilişkiyi ve herhangi bir boyuta öncelik verildiğinde ortaya çıkan etkileri de tanımlamıştır (Heck ve ark. 2018). Arazi kullanımına sürdürülebilir bir yaklaşım, biyoenerji karbon yakalama ve depolama yaklaşımında oldukça kritiktir. Ekilebilir araziler için gıda ile rekabet etmenin ve orman arazilerini özel plantasyonlara dönüştürmenin ciddi olumsuz sosyal ve çevresel etkileri vardır. Harper ve arkadaşları, bu teknolojinin negatif emisyonlara ulaşmadaki etkinliğinin, önceki arazi örtüsü, arazi kullanım değişikliği nedeniyle başlangıçtaki karbon kazancı veya kaybı, biyoenerji mahsulü verimi ve nihayetinde tutulan hasat edilmiş karbon miktarını içeren çeşitli faktörlere dayandığını savunmaktadır. Yaptıkları ampirik araştırma, özel plantasyonlar karbon yoğun ekosistemlerin yerini aldığı arazi biyoenerji karbon yakalama ve depolamanın olumsuz etkisini vurgulamaktadır (Harper et al. 2018). Literatürde tartışılan bir diğer konu da biyokütle yetiştiriciliğinin albedo etkileridir. Bu durum, biyokütlenin kar örtüsünün yerini aldığı ve radyasyon yansıtma potansiyelini azaltarak azaltım çabalarını dengelediği yüksek enlemlerde geçerlidir (Fuss ve ark. 2018). Teknoloji hazırlığı açısından, biyoenerji teknolojileri bir dereceye kadar iyi gelişmiştir; ancak karbon tutma ve depolama hala erken bir aşamadır. Teknoloji riski temel olarak depolama bütünlüğü ve daha önce karbon yakalama ve depolama konusunda tartışıldığı gibi sızıntı potansiyeli ile ilişkilidir. Ayrıca, Mander ve diğerleri kısa bir süre içinde yaygınlaştırmanın ölçeklendirilmesindeki teknik zorlukları tartışmaktadır. Ayrıca, bu teknolojinin öngörülen zaman dilimi içerisinde azaltım potansiyelini sağlayıp sağlayamayacağını sorgulamaktadırlar. Politika açısından, teknolojiyi düzgün bir şekilde ilerletmek için güçlü bir çerçevenin yanı sıra yeterli teşviklerin de mevcut olması gerektiği savunulmaktadır (Mander ve ark. 2017). Ticari mantık, küresel dağıtımı ilerletmek için yeterli olmayabilir. Bu tür projelerin finansal uygulanabilirliği, negatif emisyonları karşılayan faydacı bir karbon piyasasının yanı sıra dağıtımı teşvik eden uygun bir karbon fiyatına bağlı olacaktır (Hansson ve ark. 2019). Bu nedenle politika, karbon fiyatlandırma mekanizmalarını güçlendirmenin yollarını aramalı ve

negatif emisyonları yeni bir takas edilebilir kredi sınıfı olarak tanıtmak (Fajardy vd. 2019).

Ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma

Ağaç büyümesi sırasında CO₂ atmosferden yakalanır ve canlı biyokütle, ölü organik madde ve toprakta depolanır. Dolayısıyla ağaçlandırma, iklim değişikliğini azaltma çabalarında önemli bir rol oynayan biyojenik bir negatif emisyon teknolojisidir. Ağaçlandırma, ya ağaçlandırma olarak adlandırılan yeni ormanların kurulması ya da yeniden ağaçlandırma olarak adlandırılan ormansızlaşma veya bozulmaya uğramış eski orman alanlarının yeniden tesis edilmesi yoluyla uygulanabilir. Ağaç türlerine bağlı olarak, ormanlar kurulduktan sonra CO₂ alımı, ağaçlar olgunluğa erişene kadar 20-100 yıl sürebilir ve daha sonra tutma oranları önemli ölçüde yavaşlar. Bu aşamada, orman ürünleri hasat edilebilir ve kullanılabilir. Orman yönetimi faaliyetlerinin ve uygulamalarının çevresel bir etkisi olduğu ve dikkatli bir şekilde planlanması gerektiği savunulmaktadır (RoyalSociety 2018). Harper ve arkadaşları orman temelli azaltımla ilişkili biyoçeşitlilik, sel kontrolü ve toprak, su ve hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi çeşitli avantaj ve yan faydaları tartışmaktadır (Harper ve ark. 2018).

Karbon ormanlarda çok uzun süre depolanabilir; ancak bu kalıcılık doğal ve insan kaynaklı bozulmalar nedeniyle kırılabilir. Yangın, kuraklık ve hastalık gibi doğal afetler veya insan kaynaklı ormansızlaştırma faaliyetleri depolama bütünlüğünü olumsuz etkileyen risklerdir. Genel olarak biyojenik depolama, biyoenerji karbon yakalama ve depolama örneğinde olduğu gibi jeolojik oluşumlarda depolamaya göre çok daha kısa bir ömre sahiptir (Fuss ve ark. 2018). Ağaçlandırma ile ilgili bir diğer konu da arazi gereksinimi ve diğer arazi kullanımlarıyla rekabettir. Etkili azaltım sonuçları elde etmek için önemli miktarda arazi gerekmektedir (RoyalSociety 2018). Fuss ve arkadaşları bir başka konuyu daha tartışmaktadır; bu da albedo etkisidir. Yüksek enlemlerdeki ormanlar aslında ters etki yaratarak yerel ısınmanın yanı sıra buz ve kar örtüsü kaybını da hızlandıracaktır. Tropikal bölgelerin ağaçlandırma projelerine ev sahipliği yapmak için en uygun bölgeler olacağını savunmaktadırlar. Ancak arazi için tarım ve diğer sektörlerle rekabet başka bir sorun olacaktır. Küresel tropik sınır dayanarak, tahmini toplam 500 Mha alanın ağaçlandırma için uygun olduğu savunulmaktadır. Bu, 2050 yılına kadar 0,5-3,6 GtCO₂ yıl⁻¹ küresel karbondioksit giderim potansiyeline olanak sağlayacaktır. Giderim maliyetleri 5-50 \$/tCO₂ olarak tahmin edilmektedir. (Fuss ve ark. 2018).

Teknoloji hazırlığı açısından, ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma halihazırda küresel düzeyde yaygın olarak benimsenmiş ve 1990'lardan bu yana Kyoto protokolünün temiz kalkınma mekanizması programı aracılığıyla iklim politikalarına entegre edilmiştir. Protokol, orman temelli azaltım çabalarını ilerletmek için, ağaçlandırma projelerinin ticarete konu olabilecek

krediler. İlk politika önlemlerine rağmen, orman temelli azaltım çabaları o dönemde emisyonların küçük bir bölümünü oluştuyordu. Orman temelli azaltım projeleri, ulusal düzenlemelerin yanı sıra 2008 yılında Birleşmiş Milletler tarafından uygulamaya konulan Ormansızlaşma ve Orman Bozulmasından Kaynaklanan Emisyonların Azaltılması (REDD+) programı gibi gönüllü sistemler aracılığıyla da uygulamaya konulmuştur. Ancak, 2013 yılında ticareti yapılan toplam karbonun yalnızca %0,5'ini oluşturduğu için ağaçlandırma yoluyla karbon tutulması önemsiz kalmıştır (Gren ve Aklilu 2016). REDD+ programının etkinliği, uygulamaya konulmasının üzerinden 10 yıldan fazla bir süre geçtikten sonra literatürde tartışılmaktadır. Hein ve diğerleri, programın emisyon azaltma amacına ulaşmadaki zayıf sicili ile ilgili bir dizi argüman sunmaktadır. Bununla birlikte, tartışılan belirsizlik ve zayıflıklara rağmen, REDD+ uygulama niyetleri 56 ülke tarafından Paris anlaşması kapsamında INDC sunumlarında belirtilmiştir (Hein ve ark. 2018). Kalıcılık, sekestrasyon belirsizliği, etkili finansman mekanizmalarının yanı sıra izleme, raporlama ve doğrulama sistemlerinin mevcudiyeti, orman temelli azaltım projeleri ile ilgili zorluklardır (Gren ve Aklilu 2016).

Biyokömür

Biyokömür son zamanlarda karbon yakalama ve kalıcı depolama için uygun bir yaklaşım olarak önemli ölçüde kabul görmüştür ve gelecek vaat eden negatif emisyon teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Biyokömür, biyokütleden, örneğin özel mahsullerden, tarımsal kalıntılardan ve ormancılık kalıntılarından termokimyasal bir dönüşüm süreciyle üretilir. Oksijen yokluğunda ısıtma işlemi olan pirolizin yanı sıra gazlaştırma ve hidrotermal karbonizasyon yoluyla da üretilir (Matovic 2011; Oni vd. 2020; Osman vd. 2020a, b). Bitki büyümesi sırasında CO₂ alımı yoluyla biyokütle tarafından yakalanan karbon daha sonra işlenerek uzun süre topraklara uygulanabilen kömür haline getirilir. Dönüşüm süreci, biyokütle karbonunu çok kararlı ve ayrışmaya dirençli bir biçimde depolar. Topraktaki kararlılık, biyokömürün katı karbon giderme teknolojisi olmasını sağlayan belki de en önemli özelliğidir. Toprak organik karbonundan daha kararlı olduğu düşünülse de, kullanılan hammaddeye ve kullanılan işlem koşullarına bağlı olarak çeşitli biyokömür türlerinin ayrışma oranlarıyla ilgili bazı belirsizlikler vardır (Osman ve ark. 2019; Chen ve ark. 2019). Kullanılan hammaddeye bağlı olarak, bu teknolojinin potansiyel olarak 2,1 ila 4,8 tCO₂/ton biyokömürü ortadan kaldıracak tahmin edilmektedir (RoyalSociety 2018). Karbon giderme potansiyelinin yanı sıra maliyetler de literatürde büyük farklılıklar göstermektedir; ancak Fuss ve arkadaşları tarafından kon- servatif bir aralık verilmiştir. 2050 yılına kadar biyokömür yoluyla elde edilen küresel karbon azaltma giderme potansiyelinin 0,3-2 Gt CO₂/yıl⁻¹ aralığında olabileceği ve maliyetlerin 90 ila 120 \$/tCO₂ arasında değişebileceği tahmin (Fuss ve . 2018).

Kaynak gereksinimleri açısından biyokömür üretimi, sera gazı konsantrasyon seviyeleri üzerinde etkili bir etkiye sahip olmak için büyük miktarda arazi gerektirecektir. Arazi, hammadde yetiştiriciliğinin yanı sıra karbon yutağı görevi gören biyokömürün yayılması için de gereklidir. Özel biyokütle ekimi için arazi, biyoenerji karbon yakalama ve depolama örneğinde olduğu gibi tarım ve diğer arazi kullanım sektörleri ile rekabet sorunları yaratabilirken, biyokömür dağıtımı için gerekli alanlarda herhangi bir sorun olmayacaktır. Bu durum, biyokömür teknik olarak ürün türü, toprak ve belirli ürün yetiştirme sistemiyle ilgili yetiştirme koşullarıyla eşleştirildiği sürece geçerli olacaktır. Schmidt ve arkadaşları, toprağın yanı sıra, ürün yaşam döngüsü boyunca termal olarak bozunmadığı veya oksitlenmediği sürece, biyokömür için inşaat malzemeleri, atık su arıtma ve elektronik gibi diğer karbon yutak uygulamalarını da tanıtmıştır (Schmidt ve ark. 2019). Ayrıca, literatürde marjinal ve bozulmuş arazilerin potansiyel olarak özel plantasyonlar için kullanılabileceği ve böylece başka amaçlar için kullanılabilecek araziler üzerindeki baskının hafifletilebileceği savunulmaktadır. Dahası, atık biyokütle kullanımı arazi ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve atık bertarafı için bir çözüm sunmaktadır; ancak diğer amaçlar için atık üzerindeki rekabet, hammadde bulunabilirliği riskinin yanı sıra fiyat değişkenliğini de artırmaktadır. Biyokütle mevcudiyeti, biyokömür projelerinin başarılı bir şekilde geniş ölçekte yaygınlaştırılması için sınırlayıcı faktörlerden biridir (RoyalSociety 2018).

Yakalama ve depolamanın faydalı etkisine ek olarak Atmosferden CO₂'nin uzaklaştırılmasının yanı sıra, literatürde biyokömürün CH₄ ve N₂O gibi diğer sera gazı emisyonları üzerinde de etkisi olduğuna dair kanıtlar giderek artmaktadır. Literatür birçok durumda emisyonların azaltılması açısından olumlu bir etki gösterse de, Semida ve diğerleri biyokömür uygulamasının CH₄ ve N₂O emisyonları üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkileri olduğu karışık sonuçlar sunmaktadır. Bu durum, ekim sistemine, kullanılan biyokömür türüne ve işleme koşullarına özgüdür (Semida ve ark. 2019). Xiao ve arkadaşları da biyokömür uygulamasına ilişkin çelişkili sonuçlar sunmakta olup, bu durum biyokömür ile değiştirilen toprakların durumuna çok özeldir (Xiao ve ark. 2019). Bu nedenle, sera gazı emisyonları üzerindeki etki her bir vaka bazında incelenmelidir.

Literatürde yaygın olarak tartışılan bir diğer fayda da topraklara biyokömür uygulamasıyla ilişkili olumlu etkilerdir. Toprak kalitesi ve verimliliğinin önemli ölçüde arttığı ileri sürülmektedir. Besin döngüsünde iyileşme, topraktan besin sızıntısında azalma, su ve besin tutulumunda artışın yanı sıra toprak mikrobiyal aktivitesinin uyarılması biyokömür uygulamasıyla ilişkili yan faydalardır. Ancak, bu esas olarak biyokömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler, kullanılan hammadde türüne, piroliz koşullarına ve diğer işleme koşullarına göre tanımlanır. Ayrıca, biyokömürün bitki büyümesini olumlu yönde etkilediğine dair genel algıya rağmen

Biyokömür uygulamasının belirli ekim sistemlerinde bitki büyümesini engelleyebileceğine dair kanıtlar bulunmaktadır. Bu durum biyokömürün türüne, uygulanan miktara, yetiştirilen belirli ürünlere ve bazen de yönetim uygulamalarına bağlıdır. Kanıtlar karışıktır ve bu nedenle biyokömürü uygun karbon yutaklarıyla başarılı bir şekilde eşleştirmek için dikkatli analizler yapılmalıdır (Oni ve ark. 2020; Semida ve ark. 2019; El-Naggar ve ark. 2019; Maraseni 2010; Purakayastha ve ark. 20192019; Xu ve ark.).

Büyük ölçekli dağıtımla ilgili risklere ilişkin olarak, literatürde albedo etkisinden bahsedilmektedir. Toprak yüzeyine 30–60 ton/ha gibi yüksek biyokömür uygulama oranlarında, yüzey yansıtıcılığındaki azalmanın toprak sıcaklığını artıracığı ve bunun da bu yolla karbon tutulumunun faydalı etkisini azaltacağı ileri sürülmektedir (RoyalSociety 2018; Fuss ve ark. 2018). Diğer riskler ve zorluklar arasında tersine çevrilebilirlik riski ve izleme, raporlama ve doğrulamadaki zorluklar yer almaktadır. Ayrıca, sınırlı politika teşvikleri ve desteğinin sıra biyokömür yoluyla CO₂ giderimini içeren karbon fiyatlandırma mekanizmalarının eksikliği (Ernsting ve ark. 2011), bu teknolojinin büyük ölçekli ticarileştirme potansiyelini engellemektedir. Pourhashem ve arkadaşları, biyokömürün benimsenmesini hızlandırmada hükümet politikasının rolünü incelemiş ve ABD’de biyokömür dağıtımını teşvik etmek için kullanılabilecek üç tür mevcut politika aracı belirlemiştir: ticari finansal teşvikler, finansal olmayan teşvikler ve araştırma ve geliştirme finansmanı (Pourhashem et al. 2019). Başta blok zinciri olmak üzere mevcut teknolojik gelişmelerle birlikte, dizi start-up, tüketiciler ve şirketler için gönüllü karbon denkleştirmelerini ilerletmek için karbon giderme platformları geliştirmektedir. Finlandiyalı bir start-up olan Puro.earth, biyokömürü net-negatif bir teknoloji olarak tanıtmıştır. Şirketin doğrulama sistemi aracılığıyla doğrulandıktan sonra, biyokömür üreticileri tarafından üretilen karbon giderme sertifikaları potansiyel denkleştirme taraflarına açık artırımla satılmaktadır. Ancak, karbon giderimi yeterince parasallaştırılmadıkça ve yeterli politika araçlarıyla desteklenmedikçe, biyokömür projelerinin geliştirilmesi muhtemelen uluslararası politikanın zorunlu kıldığı zaman dilimi içinde derin bir etki yaratmak için gereken ölçeğe ulaşamayacaktır.

Toprakta karbon birikimi

Toprakta karbon tutulması, toprak karbon içeriğini artırmak için arazi yönetimi uygulamalarının değiştirilmesi yoluyla atmosferik CO₂’nin tutulması sürecidir. Topraktaki karbon konsantrasyonu seviyesi, girdilerin dengesi tarafından belirlenir, Örneğin kalıntılar, altlık, kökler ve gübre ve esas olarak toprağın bozulmasından etkilenen solunum yoluyla gerçekleşen karbon kayıpları. Girdileri artıran ve/veya kayıpları azaltan uygulamalar toprakta karbon birikimini artırır (RoyalSociety 2018; Fuss et al. 2018). Literatürde, toprağın karbon salınımını

karbon birikimi, toprak verimliliğini ve sağlığını artırmanın yanı sıra topraklarda organik karbon birikimi nedeniyle mahsul verimini de artırır (Fuss ve ark. 2018). Toprakta karbon birikimini teşvik eden çeşitli arazi yönetimi uygulamaları literatürde tartışılmaktadır; bunlar arasında ekim sistemi yoğunluğu ve rotasyon uygulamaları, sıfır toprak işleme ve koruyucu toprak işleme uygulamaları, besin yönetimi, malçlama ve ürün artıkları ve gübre kullanımı, biyokömür eklenmesi, organik gübre kullanımı ve su yönetimi yer almaktadır (Royal- Society 2018; Srivastava 2012; Farooqi et al. 2018). Ayrıca, çok yıllık ekim sistemlerinin toprakta karbon birikimi üzerindeki etkisi literatürde iyi bir şekilde belgelenmiştir. Agostini ve arkadaşları, otsu ve odunsu çok yıllık ekim sistemlerinin toprak organik karbonu üzerindeki etkisini araştırmış ve toprak organik karbon seviyelerinde

Otsu bitkiler için 1,14–1,88 tCha⁻¹ yıl⁻¹) ve odunsu bitkiler için 0,63–0,72 tCha⁻¹ yıl⁻¹). Bu değerlerin, biyoyakıt dönüşürüldükten sonra mahsulü karbon nötr hale getirmek için önerilen tutma gereksiniminin (0,25 tCha⁻¹ yıl⁻¹) oldukça üzerinde olduğu bildirilmektedir (Agostini ve ark. 2015). Çok yıllık ekim sistemlerinin toprak karbon tutumu üzerindeki olumlu etkisi, literatürde başka birkaç araştırma tarafından da desteklenmekte ve belgelenmektedir (Nakajima ve ark. 2018; Sarkhot ve ark. 2012).

Bu yaklaşımla ilgili temel sorunlar kalıcılık, yutak doygunluğu ve diğer sera gazı emisyonları üzerindeki etki etrafında dönmektedir. Fuss ve diğerlerine göre, toprakta karbon tutma yoluyla karbon giderme potansiyeli zamanla sınırlıdır. Topraklar bir doygunluk seviyesine ulaştığında, artık daha fazla tutma sağlanamaz. Bu, toprak türüne ve iklim koşullarına bağlı olarak 10–100 yıl sürebilir. Ancak Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 20 yıllık varsayılan bir doygunluk süresi tanımlamıştır (Fuss ve ark. 2018). Doygunluğa ulaşıldığında, tersine dönüşü azaltmak için arazi yönetimi uygulamalarının süresiz olarak sürdürülmesi gerekir. Bunun bir dezavantajı, daha fazla kaldırma faydası olmaksızın devam eden maliyetler olacaktır. Tersine dönülebilirlik riskleri önemlidir ve bu yaklaşımın depolama bütünlüğünü zayıflatır. Literatürde tartışılan bir diğer olumsuz etki de toprak karbonu birikiminin başta CH₄ ve N₂O olmak üzere diğer sera gazı emisyonları üzerindeki etkisidir; ancak bu etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu bildirilmektedir (Fuss ve ark. 2018).

2050 yılına kadar, literatürde tartışılan küresel karbondioksit giderme potansiyelinin 0 ila 100 \$ t/CO₂ arasında değişen maliyetlerle 2,3 ila 5,3 GtCO₂ yıl⁻¹ arasında olduğu tahmin edilmektedir (Fuss ve ark. 2018). Toprakta karbon birikimi hazır olsa da Bu tür uygulamaların birçoğu halihazırda kullanıldığından, bilgi eksikliği, değişime karşı direnç, politika ve mali teşviklerin eksikliği ölçeklenebilirliğin önündeki engeller olarak tanımlanmaktadır. İzleme, raporlama ve doğrulama ile ilgili zorlukların yanı sıra yutak doygunluğu ve potansiyel tersine çevrilebilirlik ile ilgili endişeler, yavaş politika eyleminin arkasındaki ana nedenler olmuştur. Bununla birlikte, iklim dışı

politikaları temel olarak toprak kalitesini, verimliliğini ve üretkenliğini artırmanın yanı sıra arazi bozulmasını önlemeye yönelik arazi yönetimi uygulamalarını teşvik etmiştir (RoyalSociety 2018). Bu yaklaşımı ilerletmek için politika ve piyasa temelli mekanizmalara ihtiyaç duyulurken, uluslararası gönüllü karbon giderme platformları da ortaya çıkmaktadır. ABD merkezli bir platform (Nori), toprakta karbon tutulması kavramına dayanmakta ve karbon ayak izlerini dengelemek isteyen tüketicileri ve işletmeleri, bağımsız bir doğrulama partisi tarafından denetlenmiş karbon giderme sertifikaları sunan çiftçilerle ilişkilendirerek çalışmaktadır. Blok zinciri teknolojisini kullanan bu şirket, izleme, raporlama ve doğrulama sistemleriyle ilgili zorluklarla mücadelede bir adım daha ileri gidiyor.

Doğrudan hava karbon yakalama ve depolama

Literatürde DACCS olarak da adlandırılan doğrudan hava karbon yakalama ve depolama, potansiyel bir sentetik CO₂ giderme teknolojisi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu teknolojinin altında yatan prensip, atmosferik CO₂'yi doğrudan havadan uzaklaştırmak ve daha sonra jeolojik rezervuarlarda depolamak veya kimyasalların veya mineral karbonatların üretimi başka amaçlar için kullanmak için kimyasal bağların kullanılmasıdır. CO₂, ortam havasının sorbent olarak bilinen kimyasallarla temas etmesini sağlayarak havadan yakalanır. Ayrıca, sorbentler daha sonra CO₂'yi depolama veya kullanım için serbest bırakmak üzere ısı veya su uygulanarak rejenere edilir. Sorbentlerin çalıştığı başlıca iki süreç vardır: birincisi, CO₂'nin sorbent malzemesinde çözündüğü, tipik olarak potasyum hidroksit veya sodyum hidroksit gibi sıvı sorbentlerin kullanıldığı absorpsiyon yoluyla; ikincisi, CO₂'nin sorbente yapıştığı, tipik olarak aminler gibi katı malzemelerin kullanıldığı adsorpsiyon yoluyla (Pires 2019; GNASL 2018; Gambhir ve Tavoni 2019; Liu ve ark. 2018). Her iki süreç de sorbenti yeniden oluşturmak ve CO₂'yi serbest bırakmak için enerji gerektirir; ancak adsorpsiyon rotası altında daha az enerji gerektiğine dikkat etmek önemlidir (Gambhir ve Tavoni 2019). Literatürde yaygın olarak tartışılan önemli bir konu, doğrudan hava karbon yakalama ve depolama tesislerinin ihtiyaç duyduğu önemli enerjidir. Sorbent rejenerasyonu için gereken enerjinin yanı sıra, CO₂'nin basınçlandırılması için fanlar, pompalar ve kompresörler için de enerji gereklidir. Operasyonu yürütmek için düşük karbonlu enerji kaynaklarının, tercihen yenilenebilir enerjinin ve atık ısı kaynaklarının kullanılması elbette çok önemlidir (Fuss et al. 2018). Literatürde vurgulanan bir diğer önemli dezavantaj, doğrudan hava karbon yakalama ve depolama projelerinin geliştirilmesiyle ilişkili önemli maliyetlerdir (Fuss ve ark. 2018). Bu teknolojiyle ilişkili en büyük risk, karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji karbon yakalama ve depolamaya benzer şekilde CO₂ depolama bütünlüğüdür (RoyalSociety 2018).

Gambhir ve , doğrudan hava karbon yakalama ve depolamayı karşılaştır-
ve karbon yakalama ve depolamadan farklı olduğunu ve ilkinin

teknolojisi, ortam havasından CO₂ yakalamasının yüksek konsantrasyonlu baca gazı akışlarından CO₂ yakalamaya kıyasla çok daha zor olması nedeniyle daha enerji ve malzeme yoğunudur. Doğrudan havadan karbon yakalama, uzaklaştırılan bir ton CO₂ başına geleneksel karbon yakalamaya kıyasla üç kat daha enerji yoğunudur (Gambhir ve Tavoni 2019). Bununla birlikte, doğrudan hava karbon yakalama ve depolama tesisleri daha esnektir ve düşük karbonlu enerji ve yeterli taşıma ve depolama olanaklarının mevcut olması koşuluyla her yere yerleştirilebilir. Teknoloji hazırlığı açısından, şu anda birçok süreç geliştirilmektedir ve ya laboratuvar ölçeğinde ya da pilot ölçekli aşamalarda. Teknoloji geliştiriciler esas olarak enerji gereksinimlerini azaltma üzerinde çalışmaktadır, çünkü bu dağıtım ve ölçeklendirme önündeki ana zorluklardan biridir (RoyalSociety 2018).

Küresel karbondioksit giderme potansiyelinin 2050 yılına kadar 0,5-5 GtCO₂ yıl⁻¹ aralığında olacağı Fuss ve diğerleri tarafından tahmin edilmiştir ve bu potansiyel 40 GtCO₂ yılı kadar çıkabilir.

GtCO₂ yıl⁻¹ yüzyılın sonunda eğer beklenmedik büyük ölçekli dağıtımla ilgili zorlukların üstesinden gelinmiştir. Ayrıca, CO₂ giderme maliyetlerinin başlangıçta 600-1000\$/tCO₂ olduğu ve teknoloji olgunlaştıkça 100-300\$/tCO₂ aralığına indiği tahmin edilmektedir (Fuss vd. 2018). Şu anda, tartışılan negatif emisyon teknolojilerinin çoğunda olduğu gibi, bu teknolojiyi destekleyecek herhangi bir politika aracı bulunmamaktadır (RoyalSociety 2018).

Okyanus gübrelemesi

Okyanus gübrelemesi, biyolojik aktiviteyi teşvik ederek CO₂ alımını artırmak için okyanusun üst yüzeyine fosfor ve nitrat gibi makro ve demir gibi mikro besin maddelerinin eklenmesi işlemidir. Okyanusların yüzey tabakasında bulunan ve fitoplankton olarak adlandırılan mikroskobik organizmalar, okyanuslarda karbon tutulması kavramına önemli bir katkı sağlamaktadır. Organik deniz biyokütlesi şeklinde tutulan CO₂ doğal olarak derin okyanusa taşınır; bu süreç "biyolojik pompa" olarak adlandırılır. Aşağıya doğru olan bu akışın belli bir ölçüde okyanus karbon solunumu ile dengelendiğine dikkat etmek önemlidir. Karada yaşayan bitkilere benzer şekilde fitoplankton da büyümek için ışık, CO₂ ve besin maddelerini kullanır. Doğal sistemde, deniz yaşamının ölümü ve ayrışmasının bir sonucu olarak okyanusta besin maddeleri mevcuttur. Bu nedenle, deniz üretimi geri dönüştürülmüş besin maddelerinin mevcudiyeti ile sınırlıdır. Okyanus gübrelemesinin arkasındaki fikir, biyolojik üretimin büyüklüğünü artırmak için ek besin maddeleri eklemektir; bu da doğal solunum oranına kıyasla CO₂ alım oranını artırarak karbon-negatif bir atmosferik denge yaratır (RoyalSociety 2018; Williamson ve ark. 2012). Karbon giderme potansiyeline ilişkin literatürde çok fazla bilgi olmamasına rağmen, okyanus gübrelemesinin potansiyel olarak 3,7'ye kadar karbon tutabileceği tahmin edilmektedir.

70-300 GtCO₂ toplam küresel depolama kapasitesi ile 2100 yılına kadar GtCO₂/yıl⁻¹ (RoyalSociety 2018). Potansiyel azaltım maliyetleri açısından, literatürde 2 ila 457 \$/tCO₂ arasında bir aralık tahmin edilmiştir (Fuss et al. 2018).

Okyanus gübrelemesinin literatürde tartışılan yan etkileri arasında okyanus asitlenmesi, derin ve orta su oksijeninin azalması veya tükenmesi, diğer sera gazlarının üretiminde artış, gıda döngüleri üzerinde öngörülemeyen etki, toksik alg patlamalarının yanı sıra deniz tabanı ve üst okyanus ekosistemleri üzerindeki karışık etkiler yer almaktadır (Fuss ve ark. 2018; Williamson ve ark. 2012). Ayrıca, çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerin yanı sıra gübre üretimi, nakliyesi ve dağıtımıyla ilişkili enerji ve malzeme kaynakları da önemlidir. Dahası, Fuss ve diğerlerine göre, geçirgenlik konusundaki belirsizlik büyük bir dezavantajdır. Kalıcılık, organik formda tutulan karbonun okyanusun farklı katmanlarında çözünmüş halde kalıp kalmadığına ya da sedimantasyonun uzun süreli okyanus bölmelerine yerleşmesine izin verip vermediğine bağlıdır (Fuss et al. 2018). Geçirgenlik sorunu, ekosistemler üzerindeki etki, düşük tutma verimliliği ve yeterli izleme, raporlama ve doğrulama sistemlerinin eksikliği, okyanus gübrelemesinin etkili bir iklim değişikliği azaltma yaklaşımı olduğu kavramını desteklememektedir (Fuss ve ark. 2018; Williamson ve ark. 2012).

Gelişmiş karasal ayrışma

Doğal sistemde, silikat kayalar ayrışır; bu ayrışma olarak adlandırılan bir süreçtir. Bu kimyasal reaksiyon atmosferik CO₂'yi toplar ve metal iyonlarının yanı sıra karbonat ve/veya bikarbonat iyonlarını serbest bırakır. Çözünmüş iyonlar yeraltı suları aracılığıyla nehirlerle taşınır ve sonunda okyanusa ulaşarak burada alkalinite olarak depolanır ya da kara sisteminde karbonat mineralleri olarak çökelir. Geliştirilmiş ayrışma, çok daha kısa bir zaman ölçeğinde CO₂ alımını artırmak için bu ayrışma sürecini hızlandırabilen bir yaklaşımdır. Bu, reaktif yüzeyini arttırmak ve mineral çözünme oranını yükseltmek için silikat kayaların öğütülmesi yoluyla elde edilir. Öğütülmüş malzeme daha sonra çok sayıda yan fayda sağlayarak ekili alanlara uygulanır (RoyalSociety 2018; Bach ve ark. 2019). Kantola ve arkadaşları bu yaklaşımın biyoenerji ekim sistemlerine uygulanma potansiyelini tartışmaktadır (Kantola et al. 2017). Fuss ve göre, gelişmiş ayrışma atmosferik karbonun inorganik ve organik olmak üzere iki şekilde tutulmasını teşvik eder. İnorganik karbon, yukarıda tartışıldığı gibi alkalinite ve karbonat üretimi yoluyla tutulur. Organik karbon ise, kayalardan doğal olarak salınan besin maddelerinin bir sonucu olarak fotosentez yoluyla artan biyokütle üretiminden ek karbon tutulması gerçekleştiğinde tutulur (Fuss ve ark. 2018).

Gelişmiş ayrışma ile ilişkili karbon giderme potansiyelinin yanı sıra, literatür bir dizi olumlu yan etkiyi de ortaya koymaktadır. Bunlar arasında toprağın hidrolojik özellikleri üzerinde olumlu etki, geleneksel gübrelere daha az bağımlılık sağlayan bir bitki besin kaynağı, su pH'ında artış, gelişmiş toprak sağlığı, biyokütle üretiminde artış ve geleneksel pestisitlere bağımlılığı azaltma fırsatı yer almaktadır. Bu faydalar kaya türüne ve uygulama oranına, iklime, toprağa ve ekim sistemine bağlıdır (RoyalSociety 2018; Fuss et al. 2018; de Oliveira Garcia et al. 2019; Streffer et al. 2018).

Teknoloji hazırlığı açısından, geliştirilmiş ayrışma şu anda pratik olarak uygulanabilir. Mevcut arazi yönetimi uygulamaları, kireç gibi granül malzemelerin uygulanmasını içermektedir. Mevcut ekipman, ekipman veya altyapıya ek yatırım yapılmadan kullanılabilir. Taş ocaklığı, kırma ve öğütme ile ilgili teknolojiler iyi gelişmiştir ve ölçeklendirme ile ilgili sorunlar yaşanmayacaktır. Bununla birlikte, büyük ölçekli kullanımda, çıkarma, üretim ve nakliye için gereken enerji oldukça önemli olacaktır (RoyalSociety 2018). Gerçek tutma potansiyelini değerlendirmek için gelişmiş hava koşullandırma operasyonlarının karbon ayak izine dikkat edilmelidir. Lefe- bevre ve arkadaşları, Sao Paulo'daki tarım arazilerinde bazalt kullanarak karbon giderme potansiyelini belirlemek için bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yaparak Brezilya'da EW yoluyla karbon birikimini araştırmıştır. Araştırma birkaç önemli bulgu ortaya koymuştur: İlk olarak, işletme, gelişmiş ayrışma yoluyla uzaklaştırılan her bir ton CO₂'başına 75 kg CO₂ ve karbonasyon yoluyla uzaklaştırılan her bir ton CO₂'başına 135 kg CO₂ salmaktadır. Bu, üretim sahası ile zemin kayasının uygulandığı saha arasındaki 65 km'lik mesafeye dayanmaktadır. Sonuçlar, karbonatlaşma için 540 km'lik ve gelişmiş ayrışma için 990 km'lik bir maksimum karayolu seyahat mesafesine işaret etmekte olup, bunun üzerinde emisyonlar bu tür faaliyetlerden elde edilen potansiyel faydaları dengelemektedir. Ulaşımın, bu teknolojinin potansiyel uygulanabilirliğine sınırlamalar getiren önemli bir dezavantaj olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sonuçlar, uygulanan bazaltik kayanın yaklaşık 0,11-0,2 tCO₂e/tonluk bir yakalama oranına işaret etmektedir (Lefebvre vd. 2019).

Kaynaklar üzerindeki baskıyı azaltmaya yönelik bir başka yaklaşım

çıkarılması için gerekli olan, çeşitli endüstrilerden gelen silikat atıklarının kullanılmasıdır. Potansiyel malzemeler arasında madencilik operasyonları, çimento, çelik, alüminyum ve kömür veya biyokütle yakma faaliyetlerinden kaynaklanan atıklar yer almaktadır (Renforth 2019). Ancak, uygun olmayan malzemelerin kullanılması halinde potansiyel olarak ağır metallerin toprağa salınması riski bulunduğundan bu durumun dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Fuss ve ark. 2018). Gelişmiş ayrışma ile ilişkili bir diğer risk de, ince öğütülmüş kaya malzemelerinin üretimi ve uygulanmasında ince tozun solunmasından kaynaklanan potansiyel sağlık riskidir (Streffer ve ark. 2018). Ayrıca, gelişmiş ayrışmanın etkileri hakkındaki belirsizlikler

mikrobiyal ve deniz biyoçeşitliliği üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırılması gerekmektedir (RoyalSociety 2018).

Kalıcılık açısından, tutulan CO_2 çeşitli yeryüzü havuzlarında depolanabilir. Başlangıçta, CO_2 çözünmüş inorganik karbon, alkalinite, toprakta ve yeraltı suyu depolanabilir. Koşullara bağlı olarak, topraktaki karbonat minerallerinin çökmesi gerçekleşebilir ve bu tür mineraller uzun bir süre boyunca (10^6 yıl mertebesinde) depolanabilir (Fuss ve ark. 2018). Yağış gerçekleşmezse, çözünmüş inorganik karbon su akıntıları yoluyla okyanusa taşınacak ve burada alkalinite olarak depolanarak okyanus havuzuna bir dizi ek fayda ve zorluk sağlayacaktır. Kapsamlı bir literatür değerlendirmesine dayanarak, Fuss ve arkadaşları 2050 yılına kadar 2-4 GtCO_2 yıl⁻¹ küresel karbon giderme potansiyelini aşağıdaki maliyetlerle tahmin etmektedir

50 \$ ila 200 \$/t CO_2 (Fuss ve ark. 2018). Strefler ve ark.

iki kaya türü (dunit ve bazaltik kaya) kullanarak karbon giderme potansiyeli ve gelişmiş ayrışma maliyetleri üzerine tekno-ekonomik bir araştırma yürütmüştür. Sonuçlar hem giderim potansiyeli hem de maliyetler açısından Fuss ve diğerleri tarafından sunulan tahminleri destekler niteliktedir. Ayrıca, araştırma giderim potansiyelini ve maliyetini etkileyen boyutları, özellikle de kaya tane boyutu ve ayrışma oranlarını vurgulamıştır. Son olarak, çalışma, yeterli besin maddelerinden yoksun topraklara sahip sıcak ve nemli iklimlerin gelişmiş ayrışma faaliyetleri için en uygun alanlar olduğunu göstermiştir (Strefler et al. 2018).

Şu anda, gelişmiş ayrışma herhangi bir karbon piyasasına dahil edilmemiştir ve herhangi bir politika desteğine sahip değildir. Bu yaklaşımın ilgi görmesi için sosyal ve çevresel etkilerin yanı sıra yeterli izleme, raporlama ve doğrulama sistemlerine ilişkin daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir (RoyalSociety 2018). Ayrıca, karbon piyasalarına entegrasyon ve yeterli karbon fiyatlandırması, dağıtımı teşvik etmek için gereklidir.

Okyanus alkalinitesinin artırılması

Okyanus alkalinitesinin artırılması, okyanus içinde inorganik karbon yakalama ve depolamaya yönelik potansiyel bir yol olarak literatürde tartışılmaktadır. Okyanus halihazırda, esas olarak iki yolla, yıllık olarak önemli miktarda atmosferik CO_2 absorbe etmektedir. Birincisi, atmosfer ve okyanus arasındaki CO_2 kısmi basınç farklarına bağlı olarak atmosferden suya CO_2 difüzyonu yoluyla. İkinci yol ise daha önce tartışılan fitoplank- ton fotosentezidir. Bu bölüm esas olarak CO_2 'nin okyanus kısmi basıncı tarafından yönetilen difüzyon yoluyla CO_2 okyanus alımına odaklanacaktır. CO_2 atmosferden okyanusa geçtiğinde, gaz su ile reaksiyona girerek karbonik asit oluşturur ve bu da çözünmüş inorganik karbonun depolandığı bikarbonat ve karbonat iyonlarına ayrışır. Bu reaksiyon aynı zamanda hidrojen serbest bırakır, bu da

okyanusun asitliği (Renforth ve Henderson 2017). Literatürde okyanus pH'sının, karbonik asit, karbonat ve bikarbonat iyonlarındaki karbon konsantrasyonlarının toplamı olan belirli bir inorganik karbon içeriği için CO_2 kısmi basıncı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tartışılmaktadır (Khesghi 1995). Okyanus alkalinitesinin artmasının okyanus yüzeyindeki kısmi basıncı düşürerek okyanus asitlenmesini azaltma gibi önemli bir olumlu yan etkiyle birlikte daha fazla okyanus CO_2 alımını teşvik ettiği ileri sürülmektedir. Alkalinite arttıkça, daha fazla karbonik asit bikarbonat ve karbonat iyonlarına dönüştürülür ve daha fazla miktarda karbon inorganik formda depolanır (Renforth ve Henderson 2017).

Okyanus alkalinitesinde artışın nasıl sağlanabileceği konusunda literatürde tartışılan çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Geliştirilmiş ayrışma kavramı, okyanuslardaki alkaliniteyi artırmaya yönelik ilk yaklaşımdır. Daha önce tartışıldığı gibi, bikarbonat ve karbonat iyonları şeklindeki çözünmüş inorganik karbon, gelişmiş karasal hava koşullarının bir ürünüdür. Yağış meydana gelmezse, bikarbonat ve karbonat iyonları su akıntıları yoluyla taşınır ve okyanusa ulaşarak alkalinitesini artırır. Diğer bir yaklaşım ise alkali silikat kayaların doğrudan okyanusa eklenmesidir; bu sayede ince öğütülmüş kayalar, bikarbonat ve karbonat iyonları şeklinde CO_2 alımı ve karbon depolanması için deniz suyuna eklenerek alkaliniteyi daha da artırır ve ek atmosferik CO_2 emilimini tetikler (Bach ve ark. 2019). Alkaliniteyi artırmaya yönelik bir diğer yaklaşım 1990'ların ortalarında Khesghi tarafından ortaya atılmıştır ve bu yaklaşım okyanus yüzeyine kireç (CaO) eklenmesidir. Bu yaklaşımın temel dezavantajı, kireç taşının kalsinasyonu için gereken enerji ve gerçekleşen CO_2 emisyonlarıdır (Khesghi 1995). Literatürde tartışılan bir diğer yaklaşım ise kireçtaşının hızlandırılmış ayrışmasıdır. Bu konsept, bir reaktörün kullanılmasını ve kireçtaşının (CaCO_3) deniz suyu ve mineral çözünmesini kolaylaştırmak için CO_2 konsantrasyonu yüksek bir gaz akışı ile reaksiyona sokulmasını içerir. Bu yaklaşımın ana dezavantajı aşırı su gereksinimidir (Renforth ve Henderson 2017). Son olarak, alkaliniteyi artırmaya yönelik son yaklaşım House ve arkadaşları tarafından elektrokimyasal bir yöntemle bir alka-line çözeltisinin üretilmesiyle ortaya konmuştur (House ve ark. 2009). Sunulan yaklaşımların her biriyle ilgili zorlukların yanı sıra, alkalinite artırımının okyanus ekosistemi üzerindeki etkisiyle ilgili zorluklar hala daha fazla araştırılması gereken bir alandır. Ayrıca, okyanus modifikasyonlarına ilişkin izleme ve düzenlemelerle ilgili sorunlar da gündeme gelmektedir (Renforth ve Henderson 2017).

Kalıcılık açısından, karbon aşağıdaki süreler boyunca depolanabilir

çözünmüş inorganik karbon şeklinde 10^4 yıl gibi uzun süreler boyunca depolanabilir. Okyanus şu anda yaklaşık 140.000 GtCO_2 depolamaktadır ve kimyasındaki bazı değişikliklerle trilyonlarca ton CO_2 depolayabilir (Renforth ve Henderson 2017). Bununla birlikte, mineral çökmesi durumunda işaret edilen bir tersine dönme riski vardır

gerçekleşir ve suyun karbon taşıma kapasitesi azalır (RoyalSociety 2018). Renforth ve göre, okyanus alkalinitesinin arttırılması yoluyla CO₂'nin giderilmesinin maliyeti, alkali malzemenin üretilmesi, taşınması ve dağıtılmasında kullanılan yaklaşıma bağlı olarak 10 ila 190 \$/tCO₂ arasında tahmin edilmektedir (Renforth ve Henderson 2017). Halihazırda, hiçbir politika veya karbon fiyatlandırma mekanizması bu teknik yoluyla iklim değişikliğini azaltma arayışını teşvik etmemektedir ve bu tür bir yaklaşıma büyük ölçekte önce saha denemelerine hala ihtiyaç vardır.

Sulak alan restorasyonu ve inşaatı

Sulak alanlar, fotosentez yoluyla atmosferik karbon birikimini kolaylaştıran ve daha sonra toprak üstü ve toprak altı biyokütleinin yanı sıra toprak organik maddesinde depolanan yüksek karbon yoğunluklu ekosistemlerdir (Villa ve Bernal 2018). Sulak alanlara örnek olarak turbalıkların yanı sıra mavi karbon ekosistemleri olarak da adlandırılan mangrov ormanları, gelgit bataklıkları ve deniz çayırları gibi kıyı habitatları verilebilir. Ayrıca, inşa edilmiş sulak alanlar literatürde atık su arıtımı için geçerli bir çözüm olarak tartışılmıştır. Turbalık alanlar ve kıyı sulak alanlarının dünyadaki karasal biyolojik karbonun %44 ila 71'ini depoladığı tahmin edilirken, bu karbon stokları habitat bozulması nedeniyle bozulmaya karşı savunmasızdır. Ormanlara benzer şekilde karbon kaybına yol riskler, doğal afetlerin yanı sıra antropojenik faaliyetlerden de kaynaklanmaktadır. Restorasyon çabaları genellikle ekosistemlerin yeniden ıslatılmasının yanı sıra uygulanabilir diğer önlemler etrafında dönmektedir (RoyalSociety 2018). Literatürde tartışılan önemli bir dezavantaj, sulak alan habitatlarıyla ilişkili CH₄ ve N₂O gibi CO₂ olmayan sera gazlarının önemli miktarda salınımıdır. Bir dizi araştırma, belirli bir alan net karbon yutağı veya sera gazı kaynağı olabileceğinden, belirli bir sulak alan restorasyonu veya inşaat projesi ile ilişkili tutma faydalarının değerlendirilmesinde CO₂ olmayan sera gazlarının olumsuz etkisinin dahil edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu, çeşitli çevresel ve habitat yönetimi koşullarına dayanmaktadır (de Klein ve van der Werf 2014; Gallant ve ark. 2020). Pindilli ve arkadaşları, turbalık restorasyonu ve yönetiminin 50 yıllık bir süre boyunca 54.000 hektarlık korunan bir habitatın karbon tutma potansiyeli üzerindeki etkisi üzerine ampirik bir araştırma yürütmüştür. Araştırmada dört senaryo modellenmiştir: ilk senaryo hiçbir yönetim içermemekte, ikincisi hiçbir yönetimin olmadığı bir felaket yangınının etkisini eklemekte, üçüncüsü mevcut uygulamalarını içermekte, son senaryo ise artan yönetim faaliyetlerini desteklemektedir. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar, ilk iki senaryo altında turba arazisinin net bir CO₂ emisyonu kaynağı olarak ilan edildiğini ve Sırasıyla 2,4 MtCO₂ ve 6,5 MtCO₂. Üçüncü ve dördüncü senaryolar kapsamında, turbalık alanın net karbon

ve 9,9 MtCO₂'lik önemli sekestrasyon oranları ile yutak Tüm çalışma dönemi boyunca sırasıyla 16,5 MtCO₂. Bu durum, yönetim faaliyetlerinin sulak alan habitatlarının karbon tutma potansiyeli üzerindeki yüksek etkisini göstermektedir (Pindilli ve ark. 2018).

Karbon tutma ve depolama potansiyeli farklı sulak alan türleri arasında farklılık gösterir; örneğin, tahmini karbon tutma oranı mangrovlar için 6.3± 4.8 tCO₂e ha⁻¹ yıl⁻¹, tuzcul bataklıklar için 8.0± 8.5 tCO₂e ha⁻¹yıl⁻¹ ve 4.4± Deniz çayırları için 0.95 tCO₂e ha⁻¹ yıl⁻¹. Bu habitatlar içinde, en üstteki bir metrede biriken toprak organik karbonu mangrovlar, tuzlu bataklıklar ve deniz çayırları için sırasıyla 1060 tCO₂e ha⁻¹, 917 tCO₂ha⁻¹ ve 500 tCO₂ha⁻¹ olmuştur (Sapkota ve White 2020). Sulak alan restorasyonu ve inşası yoluyla karbon azaltımının tahmini maliyeti 10 ila 100 \$/tCO₂ arasında değişmektedir (RoyalSociety 2018). Sapkota ve diğerlerine göre, sulak alanlarla ilgili denkleştirmeleri, protokollerin ve metodolojilerin geliştirilmesi dahil olmak üzere mevcut gönüllü ve uyumlu karbon piyasalarına dahil etmek için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. ABD'de çeşitli gönüllü piyasalar tarafından bir dizi metodoloji halihazırda sertifikalandırılmıştır. Ancak, çabalara rağmen, şimdiye kadar çok az sayıda sulak alan restorasyonu karbon denkleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir (Sapkota ve White 2020).

Alternatif negatif emisyon kullanım ve depolama teknikleri

Mineral karbonatlaşma, CO₂'nin minerallerle kimyasal olarak reaksiyona girerek toprak altında güvenli bir şekilde depolanabilen veya birçok uygulamada kullanılabilen kararlı karbonatlar oluşturduğu bir süreçtir (Olajire 2013; Wang ve ark. 2020). Silikat kayaların karbonatlara dönüştürüldüğü doğal ayrışma sürecine çok benzer, ancak çok daha hızlıdır. Literatürde mineral karbonasyonu için iki ana yol tartışılmaktadır: öğütme ve reaksiyon öncesi minerallerin ön işleminden geçirilmesini içeren yer üstünde ex situ endüstriyel bir süreç veya yer altındaki silikat kayalara doğrudan CO₂ enjeksiyonu ile in situ bir süreç (RoyalSociety 2018; Olajire 2013; Galina et al. 2019). Yüksek konsantrasyonlarda kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg) ve demir (Fe) içeren silikat kayalar, kararlı karbonatlar oluşturmak üzere CO₂ ile reaksiyona girmek için en uygun elementlerdir. Dahası, çelik tesislerinden gelen cüruf ve kömür yakma tesislerinden gelen uçucu kül gibi bu tür elementlerin konsantrasyonlarını içeren endüstriyel atıklar da karbonasyon işlemi için kullanılabilir uygun malzemelerdir (Galina . 2019). Ex situ karbonasyon kapsamındaki maliyet tahminleri 50 ila 300 \$/tCO₂ arasında değişirken, in situ karbonasyonun yaklaşık 17 \$/ tCO₂ olduğu tahmin edilmektedir (RoyalSociety 2018). Mineral karbonatların ilginç bir kullanım yolu da beton üretiminde geleneksel agregaların yerini almasıdır. Kürleme sürecini hızlandırmak ve daha yüksek mukavemetli beton elde etmek için CO₂ kürleme ile birlikte agregaların mineral karbonatlarla ikame edilmesi

malzemesi, yapılı çevrede CO₂'nin tutulması için umut verici bir yaklaşımdır (RoyalSociety 2018). Doğrudan hava karbonu yakalama veya biyoenerji karbon yakalama sistemleri yoluyla yakalanan CO₂'nin kullanıldığı mineral karbonasyonu, CO₂) atmosferden uzaklaştırıldığı ve jeolojik oluşumlarda karbonat formunda veya karbonatların inşaatta kullanılması halinde yapılı çevrede güvenli bir şekilde depolandığı için karbon-negatif bir süreç olarak değerlendirilebilir. Mineral karbonasyonun karbon yakalama ve depolama teknolojileriyle de birleştirilebileceğini, ancak kullanılan CO₂ fosil bazlı ise negatif emisyon tekniği olarak değerlendirilmeyeceğini belirtmek de önemlidir.

Literatürde tartışılan bir diğer yaklaşım da biyokütle malzemelerinin inşaatta kullanılmasıdır; bu yeni bir kavram olmamakla birlikte, termal ve kimyasal işlemlerdeki teknolojik ilerlemeler esas olarak yapı endüstrisindeki farklı uygulamalarda kullanılabilecek malzemelerin çeşitliliğini ve sayısını artırmaya odaklanmıştır. Bu yaklaşımın arkasındaki temel ilke, karbonun fotosentez yoluyla tutulması ve elde edilen biyokütleinin daha sonra inşaatta kullanılarak karbonun bina yapıları, yalıtım ve mobilya gibi yapılı çevrede on yıllar boyunca depolanabilmesidir. Potansiyel CO₂ gideriminin yaklaşık 0,5-1 GtCO₂ yıl⁻¹ olduğu tahmin edilmektedir. geleneksel inşaat malzemelerinin yerini alıyor (RoyalSociety 2018). Giderim potansiyelinin yanı sıra, çelik ve çimento gibi geleneksel yapı malzemelerinin değiştirilmesiyle, bunlar karbon yoğun olduğu için daha fazla emisyon azaltımı gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşımla küresel CO₂ emisyonlarında %14-31 ve küresel fosil yakıt tüketiminde %12-19 oranında azalma sağlanabileceği tahmin edilmektedir (Royal- Society 2018). Ancak, önemli sürdürülebilir ağaçlandırma projeleri gerekmektedir.

Radyatif zorlama jeomühendislik teknolojileri

Radyatif zorlama jeomühendislik teknikleri, küresel sıcaklıkları dengelemek veya azaltmak için dünyanın radyatif enerji bütçesini değiştirmeyi amaçlayan bir dizi teknolojidir. Bu, ya uzaya yansıyan kısa dalga güneş radyasyonunu artırarak, güneş radyasyonu yönetimi olarak adlandırılan, dünyanın yansıtıcılığını artırarak ya da karasal radyasyon yönetimi olarak adlandırılan, dünyanın yüzeyleri tarafından uzaya yayılan uzun dalga radyasyonu elde edilir (Lawrence ve ark. 2018). Bu bölümde, literatürde tartışılan çeşitli radyasyon zorlayıcı jeomühendislik teknikleri kısaca açıklanmaktadır. Şekil 3, literatürde tartışılan ve bu makalede incelenen ana teknikleri göstermektedir.

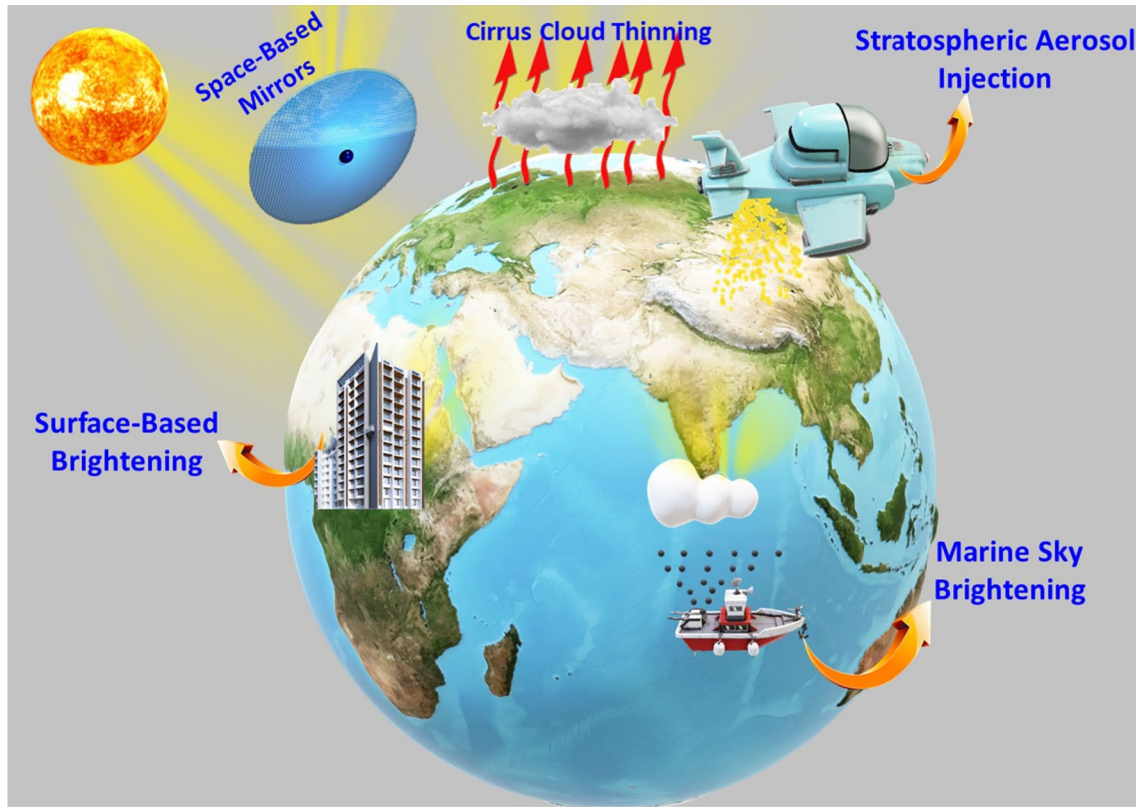
Stratosferik aerosol enjeksiyonu

1991 yılında Filipinler'de (Pinatubo Dağı) çok büyük bir volkanik patlama meydana geldi. Patlama sırasında, bir

Çok büyük miktarda sülfür dioksit gazı (SO₂) 15 ila 30 milyon ton arasında püskürtülerek güneş ışığını yansıtıcı olarak indüklemiş ve küresel sıcaklıkları 0,4-0,5 °C azaltmıştır (Zhang . 2015). Stratosferik aerosol enjeksiyonu, stratosfere yapay olarak yansıtıcı aerosol partikülleri enjekte ederek volkanik patlamanın neden olduğu soğutma etkisini taklit etmeyi amaçlayan bir güneş radyasyonu yönetim teknolojisi (Lawrence vd. 2018; Zhang vd. 2015). Modelleme ve geçmiş volkanik patlama verileri aracılığıyla, bu yaklaşımdan kaynaklanan maksimum potansiyel soğumanın 2 ila 5 W/m² arasında olduğu tahmin edilmektedir (Lawrence . 2018). Smith ve arkadaşları, 2033'ten başlayarak ilk 15 yıl boyunca teknolojinin taktiklerini ve maliyetlerini . Potansiyel dağıtım tekniklerini incelediler ve uçak tabanlı bir dağıtım sisteminin stratosferik aero-sol enjeksiyonunu dağıtmak için en verimli yöntem olduğu sonucuna vardılar. Bununla birlikte, mevcut modeller modifikasyonlarla bile yeterli olmayacağından, bu amaç için yeni bir amaca yönelik yüksek irtifa uçağının geliştirilmesi gerekecektir. Smith ve arkadaşları, antropojenik kaynaklı radyatif zorlama oranını yarı yarıya azaltma girişiminde, dağıtım için başlangıç maliyetlerini 3,5 milyar dolar aralığında, ortalama yıllık işletme maliyetlerini ise 2,25 milyar dolar olarak hesaplamıştır (yaklaşık 1500 \$/t SO₂ enjekte edilmiştir) (Smith ve Wagner 2018). Bu tekniğin arkasındaki temel sorun, hidrolojik döngü ve stratosferik ozon tabakasının incelmesi üzerinde belirli bir olumsuz etkiye sahip olan yan etkilerin ve zararlı sonuçlarının belirsizliğidir (Zhang vd. 2015). Bu yaklaşımın geçici bir sıcaklık düşüşü sağlayacağını ancak uzun vadeli bir çözüm olarak düşünülmemesi gerektiğini belirtmek önemlidir. Bu yaklaşım henüz araştırma ve geliştirme sürecinin çok erken bir aşamasındadır (Lawrence ve ark. 2018).

Deniz gökyüzü aydınlanıyor

Deniz bulutu veya bulut albedosunun artırılması olarak da bilinen deniz gökyüzü parlatması, bulut yansıtıcılığını artırarak küresel sıcaklıkları korumayı veya azaltmayı amaçlayan bir başka güneş radyasyonu yönetim teknolojisi. Bu, deniz suyu partikülleri veya kimyasallarla bulut tohumlama yoluyla elde edilir (Zhang ve ark. 2015). Bu tekniğin arkasındaki ana fikir, deniz suyunun havaya püskürtülerek küçük damlacıklar oluşturması ve bunların kolayca buharlaşarak geride okyanusların üzerindeki alçak irtifa bulut yansıtıcılığını artıran tuz kristalleri bırakmasıdır (Ming vd. 2014). Potansiyel soğutma etkisi, belirsizlik, sınırlı bilgi ve mekânsal değerlendirmeler nedeniyle 0,8 ila 5,4 W/m² arasında tahmin edilmiştir (Lawrence et al. 2018). Bu teknik basit ve anlaşılır görünmekle birlikte, Latham ve deniz gökyüzünün aydınlatılmasıyla ilgili bir dizi sorunun altını çizmiştir. Bu sorunlar arasında, gerekli boyut ve miktarlarda deniz suyu partikülleri üretebilecek bir püskürtme sisteminin bulunmaması ve bu yaklaşımın fiziksel sonuçlarıyla ilişkili diğer teknik sorunlar yer almaktadır.



Şekil 3 Küresel sıcaklıkları dengelemek veya azaltmak için dünyanın ışımsal enerji bütçesini değiştirmeyi amaçlayan başlıca ışımsal zorlama jeomühendislik teknolojileri. Bu teknolojiler arasında stratosferik aerosol

enjeksiyonu, deniz gökyüzü aydınlatması, sirrus bulut inceltmesi, uzay tabanlı aynalar ve yüzey tabanlı aydınlatma

bulut özelliklerinin doğası. Bir diğer zorluk da kapsamlı denemeler yapmak ve potansiyel yan etkileri doğru bir şekilde anlayıp üstesinden gelmek olacaktır (Latham ve ark. 2012). Yine, bu yaklaşım henüz emekleme aşamasındadır ve ileriye dönük kapsamlı saha araştırmaları ve geliştirmeleri gerektirecektir.

Uzay tabanlı aynalar

Uzay tabanlı aynaların kullanıldığı güneşlik, küresel sıcaklıkları azaltmak için gelen güneş radyasyonunun bir kısmını yansıtmayı amaçlayan ve literatürde tartışılan bir güneş radyasyonu yönetim tekniğidir. Bu yaklaşımın teknik olarak uygulanabilmesi için uzay aynalarının ya da reflektörlerin dünya etrafındaki yörüngeye aktarılması ya da dünya ile güneş arasındaki Lagran- gian L1 konumuna, yerçekimi alanlarının reflektörlerin sabit kalmasını sağlayacak şekilde dengede olduğu bir yere yerleştirilmesi gerekmektedir (Zhang et al. 2015; Kosugi 2010). Bu yaklaşım, model simülasyonlarına dayalı olarak önemli bir soğutma etkisine sahip olsa da, bu tür teknolojinin geliştirilmesi henüz çok yeni bir aşamadır. Bu yaklaşımla ilgili en büyük dezavantaj, malzemelerin uzaya taşınmasının ekonomik fizibilitesidir. Bu teknolojinin ekonomik olarak uygulanabilir olması için malzeme taşıma maliyetlerinin

yaklaşık 10.000 \$/kg'dan daha düşük bir seviyeye düşürülecektir.

100 \$/kg (Lawrence vd. 2018). Ayrıca, uzay enkazı ve asteroit çarpışmaları veya teknik ve iletişim arızalarıyla ilişkili riskler gibi risklerin de uygun şekilde karşılanması gerekmektedir (Lawrence ve ark. 2018).

Yüzey bazlı parlatma

Literatürde tartışılan bir diğer güneş radyasyonu yönetimi yaklaşımı, dünyanın albedosunu artırmak ve böylece küresel sıcaklıkları düşürmek için dünya yüzeyinin aydınlatılmasıdır. Bu amaçla kent çatılarının ve yolların beyaza boyanması, çöllerin ve buzulların yüksek yansıtıcılığa sahip plastik levhalarla kaplanması ve daha da ileri gidilerek su kütlelerinin üzerine yansıtıcı yüzer paneller yerleştirilmesi önerilmektedir (Ming vd. 2014). Lawrence ve diğerlerine göre, kapsamlı bir literatür taramasına dayanan bu yaklaşımın soğutma potansiyeli çok sınırlıdır. Ayrıca, çöl eko sistemlerinin bozulması gibi önemli olumsuz yan etkiler de söz (Lawrence vd. 2018).

Cirrus bulut incelmesi

Cirrus bulutlarının inceltilmesi, küresel sıcaklıkları dengelemek veya azaltmak için dünya yüzeyinden uzaya yayılan uzun dalga artırmayı amaçlayan bir karasal radyasyon yönetimi tekniğidir. Cirrus bulutları, dünyanın radyasyon bütçesinde önemli bir rol oynayan, dünyanın hidrolojik döngüsü ve yüzey sıcaklıkları üzerinde etkisi olan yüksek irtifa buz bulutlarıdır. Cirrus bulutları, gelen güneş radyasyonunu yansıtanın yanı sıra karasal radyasyonu da emer; ancak genel olarak, gelen ve giden radyatif zorlamalar arasındaki ortalama bir net ısınma etkisi yaratırlar (Kärcher 2017). Bu tekniğin arkasındaki temel prensip, aerosollerin cirrus bulutlarına enjekte edilerek optik kalınlıklarının ve yaşam sürelerinin azaltılması ve böylece uzaya karasal radyasyon emisyonunun artırılmasıdır. Bu yaklaşım düzenli bulut enjeksiyonu gerektirecektir, bu nedenle verimli ve uygun maliyetli bir dağıtım yönteminin özel uçaklar veya dronlar yerlerde olması gerekir. Bizmut triiyodür (BiI_3) etkili bir bulut tohumlama materyali olarak önerilmiştir; ancak toksisitesinin dikkate alınması gerekmektedir. Deniz tuzu da önerilen bir diğer seçenektir ancak BiI_3 kadar etkili (Lawrence vd. 2018). Model simülasyonlarına dayanarak, bu yaklaşımla maksimum soğutma etkisinin 2-3,5 W/m^2 aralığında olduğu tahmin edilmektedir (Lawrence ve ark. 2018). Law- rence ve arkadaşlarına göre, cirrus bulutu inceltme için yayınlanmış bir maliyet yoktur ve bu yaklaşım, yan etkileri anlamak ve potansiyel dağıtım yöntemleri üzerinde uygun araştırmalar yapmak için hala daha fazla araştırma gerektirmektedir (Lawrence et al. 2018).

Çeşitli radyasyon yönetimi teknikleri

Ming ve arkadaşları, sera gazı yalıtım katmanını atlamak ve termal radyasyonu uzaya aktarabilmek için ter- mal köprüler oluşturarak karasal radyasyonu hedefleyen çeşitli teorik teknolojiler önermiştir. Araştırma makalesi, yüzeydeki sıcak havanın troposfere aktarılması, gizli ve hissedilebilir ısının troposferin tepesine aktarılması, yüzeydeki hissedilebilir ısının troposfere aktarılması ve soğuk havanın dünya yüzeyine aktarılmasını içeren çeşitli kavramlar sunmuştur. Her bir konsept için kavramsal teknolojiler önerilmektedir. Tartışılan teknolojilerden bazıları, yazarlar tarafından metrolojik reaktörler olarak adlandırılan, enerji üretirken ısıyı yeryüzü sisteminin ötesine aktaran sistemlerdir (Ming vd. 2014). Termal köprüleme fikri ilginç olmakla birlikte, sunulan teknoloji ve kavramlar daha fazla araştırma, geliştirme ve kapsamlı saha denemeleri gerektirmektedir.

İklim değişikliğinin azaltılmasına yönelik araştırmaların bibliyometrik analizi

Bibliyometrik analiz, literatürdeki boşlukları ve eğilimleri vurgulayarak bilimsel araştırmaların mevcut durumunu niceliksel olarak analiz etmek kullanılabilen istatistiksel bir araçtır. Bu analizde Web of Science (WoS) çekirdek koleksiyon veri tabanı kullanılmıştır. Daha ileri değerlendirme için ilgili araştırmaları elde etmek amacıyla aşağıdaki arama metodolojisi kullanılmıştır. Lütfen aramanın, 2015'teki Paris anlaşmasından sonra iklim değişikliğinin azaltılmasıyla ilgili bilimsel araştırma çabalarını özellikle değerlendirmek için 2015'ten 2020'ye kadar 5 yıllık bir zaman aralığına göre daraltıldığını unutmayın.

Arama Metodolojisi:

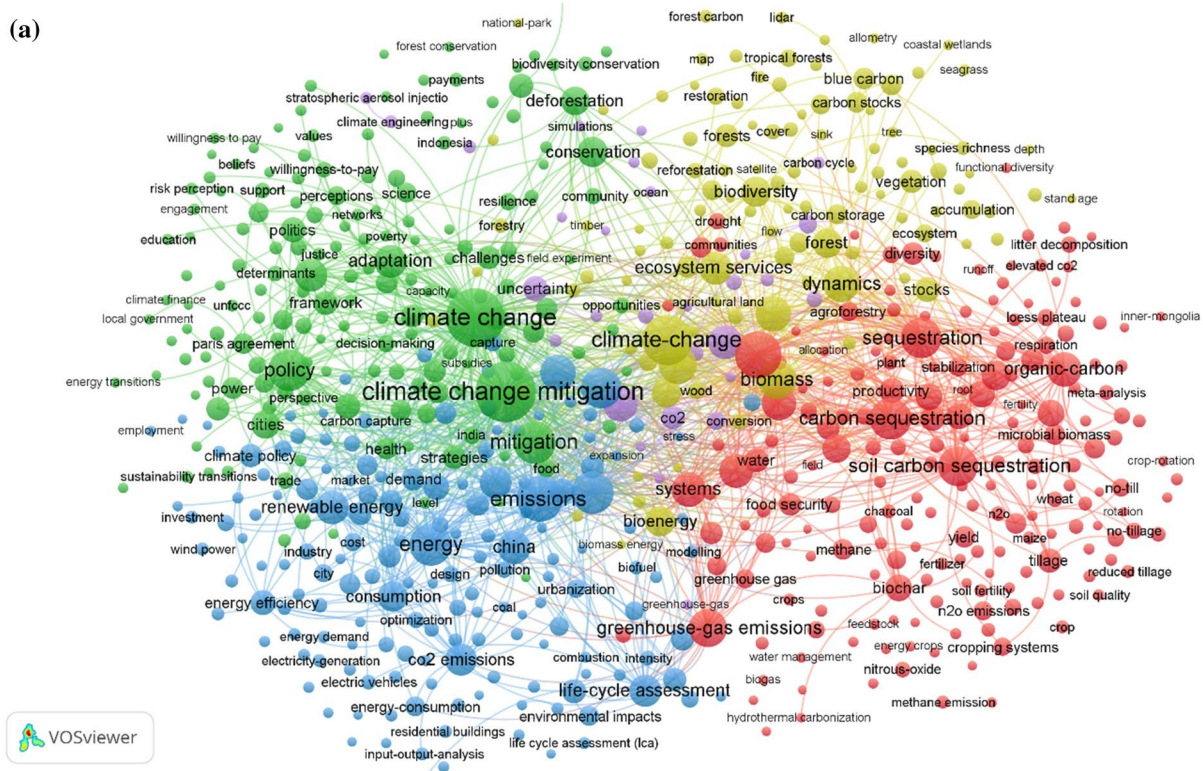
Sen aradın: KONU: ("İklim değişikliği azaltımı") VEYA KONU: ("iklim değişikliğinin azaltılması") VEYA KONU: ("Dekarbonizasyon Teknolojileri") VEYA KONU: ("Biyoenjerji Karbon Yakalama ve Depolama") VEYA KONU: ("Ağaçlandırma ve Yeniden Ağaçlandırma") VEYA KONU: ("Toprakta Karbon Tutulması") VEYA KONU: ("Doğrudan Hava Karbon Yakalama ve Depolama") VEYA KONU: ("Okyanus Gübrelemesi") VEYA KONU: ("Geliştirilmiş Karasal Ayrışma") VEYA KONU: ("Okyanus Alkalinitesinin Artırılması") VEYA KONU: ("Sulak Alan Restorasyonu ve İnşası") VEYA KONU: ("Stratosferik Aerosol Enjeksiyonu") VEYA KONU: ("Deniz Gökyüzünün Aydınlatılması") VEYA KONU: ("Uzay Tabanlı Güneşlik/Aynalar") KONU: ("Yüzey Tabanlı Parlatma") VEYA KONU: ("Cirrus Cloud Thinning") VEYA KONU: ("Karbondiyoksit Giderme Teknikleri") VEYA KONU: ("Radyatif Zorlama Jeomühendisliği")

Zaman aralığı: Son 5 yıl. İndeksler: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI.

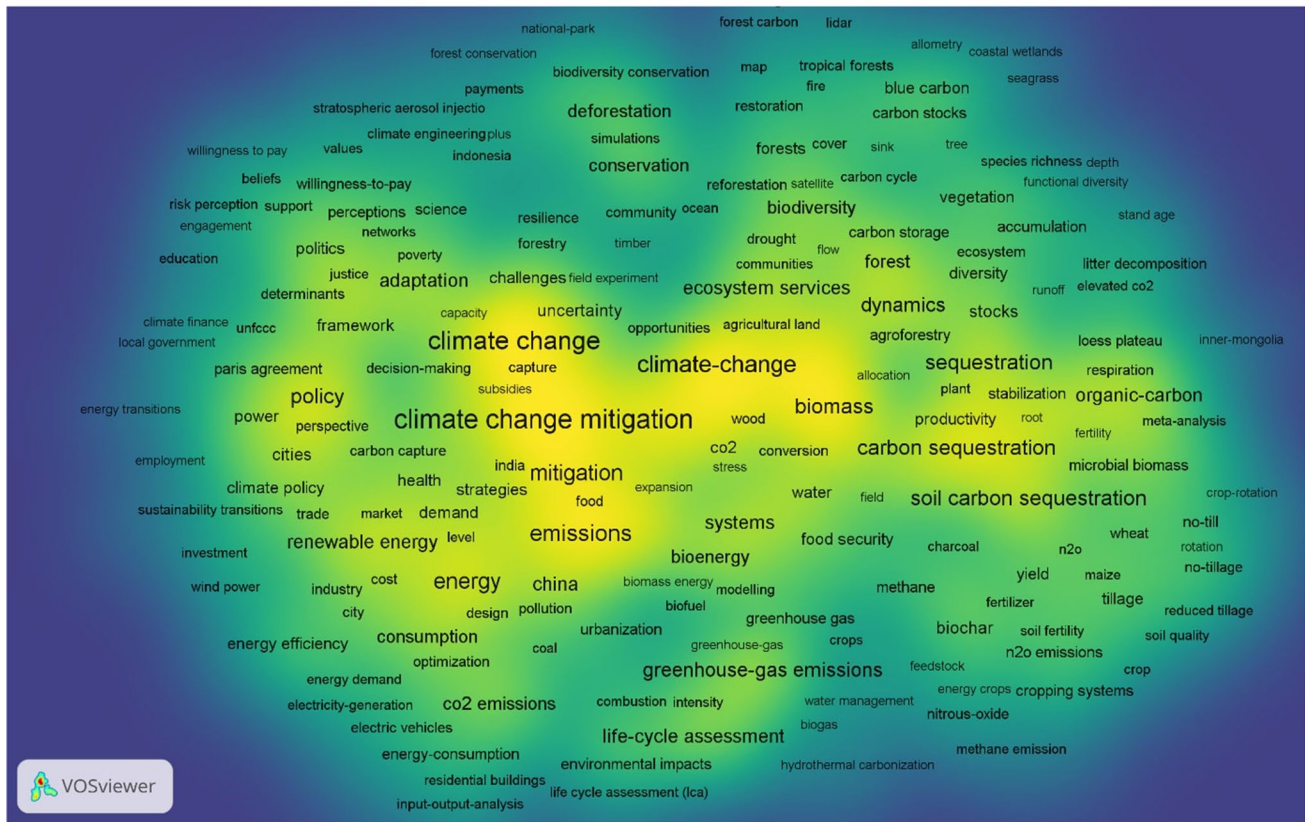
Sonuçlar: Toplam 3993 makaleye ulaşıldı (3386 makale, 362 derleme, 201 bildiri, 71 erken erişim ve 61 editöryal materyal)

Elde edilen sonuçlar daha sonra VOSviewer yazılımı kullanılarak Şekil 4'te gösterildiği gibi ağ ve yoğunluk görselleştirme haritaları çizilerek analiz edilmiştir. Haritalar anahtar kelime eş-oluşumlarına dayanmaktadır. Görselleştirme haritaları, biyokütle, karbon tutumu, özellikle toprak karbon tutumu ve biyokömür ile ilgili alanların son 5 yılda yüksek ilgi gördüğü iklim değişikliğinin azaltılmasıyla ilgili çeşitli eğilimlere ışık tutmaktadır. Ayrıca, politika, enerji ve özellikle yenilenebilir enerji ile ilgili araştırmalar da büyük ilgi görmüştür. İklim değişikliğinin azaltılmasına yönelik araştırmalar trend halinde olsa da, belirli azaltım teknolojileriyle ilgili araştırmalar konusunda literatürde bir boşluk olduğu vurgulanabilir. Radyatif zorlama jeomühendislik teknolojilerinin fazla ilgi görmediği de literatürden anlaşılmaktadır.

(a)



(b)



Şekil 4 İklim değişikliğinin azaltılmasına yönelik araştırmaların bibliyometrik analizi: **a** ağ görselleştirme haritası ve **b** yoğunluk görselleştirme haritası, iklim konusundaki bilimsel araştırmaların son durumunu göstermektedir

2015–2020 yılları arasındaki 5 yıl boyunca literatürdeki eğilimleri ve boşlukları vurgulayarak değişimin azaltılması

Sonuç

İklimdeki mevcut acil durum göz önüne alındığında, uygulanabilir azaltım ve uyum mekanizmalarının ivedilikle geliştirilmesi son derece önemlidir. Kapsamlı bir literatür taraması, iklim değişikliğiyle mücadelede üç ana stratejiyi, geleneksel azaltım teknolojilerini, negatif emisyon teknolojilerini ve radyatif zorlayıcı jeomühendislik teknolojilerini kapsamaktadır. İklim değişikliğiyle mücadelede nihai bir çözüm olmadığını ve teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir olması halinde bu incelemede ele alınan tüm teknoloji ve tekniklerin kullanılması gerektiğini açıklığa kavuşturmak önemlidir. Daha önce de tartışıldığı üzere, karbonsuzlaştırma çabaları Paris Anlaşması'nda öngörülen hedeflere ulaşmak için tek başına yeterli değildir; bu nedenle alternatif bir azaltım yaklaşımının kullanılması kaçınılmazdır. Dünyanın radyasyon bütçesini yönetmek açısından radyatif zorlama jeomühendisliği kavramı ilginç olsa da, sorunun temel nedenini çözmediği için uzun vadeli bir çözüm değildir. Bununla birlikte, sera gazı konsantrasyonları dengelenene ve azaltılana kadar biraz zaman kazandırabilir. Bununla birlikte, kullanılacak teknolojilerin hala geliştirilmesi, test edilmesi ve yan etkilerinin yeterince karşılanması gerekmektedir ki bu da uzun bir süreç olabilir. Negatif emisyon teknolojileri ise mevcut karbonsuzlaştırma çabalarıyla birlikte sağlam bir çözüm sunmaktadır. Literatür taramasında belirtilen negatif emisyon teknolojilerinden bazıları henüz gelişimin erken aşamalarında olsa da, biyojenik tabanlı tutma teknikleri bir dereceye kadar olgunlaşmıştır ve hemen uygulanabilir. Fotosentez yoluyla CO₂'nin yakalanması basit ve sağlam bir süreçtir; ancak, incelemede sunulduğu gibi teknolojik bir çerçeveye etkin bir şekilde entegre edilmesi gerekmektedir. Şu anda karşılaşılan zorluk, negatif emisyonlar için karbon fiyatlandırmasının çok yeni bir aşamada olması, esasen çok az sayıda karbon giderme yöntemi için gönüllü piyasalar aracılığıyla mevcut olması ve ele alınan teknolojilerin çoğu için teknik olarak mevcut olmamasıdır. Şu anda karbon fiyatlandırması, ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma projeleri için mevcut çerçeve dışında, karbon giderme projelerini ekonomik olarak sürdürmek için yetersiz kalacaktır. Karbon piyasaları olgunlaştıkça ve karbon giderimi için teşvikler sundukça, bu durum yakın gelecekte değişebilir. Negatif emisyon projelerini agresif bir şekilde teşvik etmek için, politika yapımcılar ve hükümetler karbon fiyatlandırmasına özel olarak odaklanarak uygun politika araçları ve destek çerçeveleri geliştirmelidir. Ayrıca, finans sektörü daha fazla finansal destek ve erişilebilirlik sağlamalı ve proje geliştiricilerini karbon giderme projeleri kurmaya teşvik etmek için etkin piyasa temelli mekanizmalar getirmelidir. Şu anda, biyojenik temelli tutma projeleri aşağıdaki hususlar için iyi bir konumdadır

İlgili teknolojilerin çoğu hemen uygulamaya konulabileceğinden, mali kaynaklar ve politika desteği verimli bir şekilde kullanılmalıdır; ancak karbon giderimine odaklanan etkili karbon fiyatlandırma mekanizmalarının agresif bir şekilde geliştirilmesi ve uygulamaya konulması gerekmektedir. Ayrıca, teknoloji araştırma ve geliştirme için fon sağlanması da ileriye dönük olarak çok önemli bir husustur.

Teşekkür Yazarlar, EPSRC projesi "Advancing Creative Circular Economies for Plastics via Technological-Social Transitions" (ACCEPT Transitions, EP/S025545/1) tarafından verilen desteğe **teşekkür** eder. Yazarlar, Avrupa Birliği'nin Özel AB Programları Organı (SEUPB) tarafından yönetilen INTERREG VA Programı tarafından verilen ve Kuzey İrlanda Ekonomi Bakanlığı ile İrlanda Cumhuriyeti İşletme, Girişim ve İnovasyon Bakanlığı tarafından eş finansman sağlanan Bryden Centre projesinin (Proje ID VA5048) desteğine teşekkür etmek istemektedir.

Etik standartlara uygunluk

Çıkar çatışması Yazar, rekabet eden herhangi bir finansal **çıkar** beyan etmemektedir.

Açık Erişim Bu makale Creative Commons Attribution 4.0 Uluslararası Lisansı altında lisanslanmıştır ve orijinal yazar(lar)a ve kaynağa uygun şekilde atıfta bulunduğunuz, Creative Commons lisansına bir bağlantı verdiğiniz ve değişiklik yapıp yapılmadığını belirttiğiniz sürece herhangi bir ortam veya formatta kullanım, paylaşım, uyarlama, dağıtım ve çoğaltmaya izin verir. Bu makalede yer alan görseller veya diğer üçüncü taraf materyalleri, aksi belirtilmedikçe, makalenin Creative Commons lisansına dahildir. Materyal, makalenin Creative Commons lisansına dahil değilse ve kullanım amacınız yasal düzenlemeler tarafından izin verilmeyorsa veya izin verilen aşırıyorsa, doğrudan telif hakkı sahibinden izin almanız gerekecektir. Bu lisansın bir kopyasını görüntülemek için <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> adresini ziyaret edin.

Referanslar

- Abdulla A ve diğerleri (2019) Karbonsuzlaştırma için nükleer enerjinin kullanımının sınırları: kamuoyunun görüşleri. *Enerji Politikası* 129:1339–1346. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.039>
- Agostini F ve diğerleri (2015) Çok yıllık enerji bitkileri tarafından karbon tutulması: jüri hala dışarıda mı? *BioEnergy Res* 8:1057–1080. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9571-0>
- Akalın MK ve diğerleri (2017) Biyokütleden biyoyakıtların süperkritik akışkan ekstraksiyonu. *Environ Chem Lett* 15:29–41. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0593-z>
- Aresta M ve diğerleri (2005) CO₂ kullanarak yenilikçi sentezler geliştirmek için biyoteknoloji. *Environ Chem Lett* 3:113–117. <https://doi.org/10.1007/s10311-005-0009-y>
- Arning K ve diğerleri (2019) Aynı mı farklı mı? Almanya'da karbon yakalama ve depolama veya kullanımına ilişkin kamuoyu algısı ve kabulüne dair içgörüler. *Enerji Politikası* 125:235–249. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.039>
- Bach LT ve diğerleri (2019) Gelişmiş ayrıştırma ve okyanus alkalinitesinin ile CO₂ giderimi: deniz pelajik ekosistemleri için potansiyel riskler ve ortak faydalar. *Front Clim*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00007>

- Bataille C ve diğerleri (2018) Enerji yoğun sanayi üretimini Paris Anlaşması ile uyumlu hale getirmek için teknoloji ve politika derin dekar- bonizasyon yolu seçeneklerinin gözden geçirilmesi. *J Clean Prod* 187:960–973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>
- Bustreo C ve diğerleri (2019) Füzyon gücü 2050'den sonra tamamen karbondan arındırılmış bir Avrupa enerji karışımına nasıl katkıda bulunabilir? *Fusion Eng Des* 146:2189–2193. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.150>
- Chauhan SK ve diğerleri (2009) Karayolu taşımacılığında biyoyakıtların çevresel yönleri. *Environ Chem Lett* 7:289–299. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0185-7>
- Chen H ve diğerleri (2019) Enerji ve ağır metal iyileştirme uygulamaları için gıda atığı sindirim suyunun ileri dönüşümü. *Resour Conserv Recycl* X 3:100015. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100015>
- Collura S ve diğerleri (2006) Sürdürülebilir yakıtlar olarak *Miscanthus*× *Giganteus* samanı ve peletleri. *Environ Chem Lett* 4:75–78. <https://doi.org/10.1007/s10311-006-0036-3>
- CRED (2019) Doğal afetler 2018. CRED, Brüksel. https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2018.pdf. Erişim tarihi 18 Ocak 2020
- de Klein JMM, van der Werf AK (2014) Yapılandırılmış bir sulak alanda karbon tutma ve sera gazı emisyonlarının dengelenmesi. *Ecol Eng* 66:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.060>
- de Oliveira Garcia W ve diğerleri (2019) Negatif emisyon teknolojileri ve toprak hidrolojisi için gelişmiş hava koşullarının biyokütle üretimi üzerindeki etkileri. *Biogeosci Discuss* 2019:1–35. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-386>
- Edenhofer ORP-M, Sokona Y, Kadner S, Minx JC, Brunner S, Agrawala S, Baiocchi G, Bashmakov IA, Blanco G, Broome J, Bruckner T, Bustamante M, Clarke L, Conte Grand M, Creutzig F, Cruz-Núñez X, Dhakal S, Dubash NK, Eickemeier P, Farahani E, Fischelndick M, Fleurbaey M, Gerlagh R, Gómez- Echeverri L, Gupta S, Harnisch J, Jiang K, Jotzo F, Kartha S, Klasen S, Kolstad C, Krey V, Kunreuther H, Lucon O, Masera O, Mulugetta Y, Norgaard RB, Patt A, Ravindranath NH, Riahi K, Roy J, Sagar A, Schaeffer R, Schlömer S, Seto KC, Seyboth K, Sims R, Smith P, Somanathan E, Stavins R, von Stechow C, Sterner T, Sugiyama T, Suh S, Ürges-Vorsatz D, Urama K, Venables A, Victor DG, Weber E, Zhou D, Zou J, Zwickel T (2014) Teknik özet. İçinde: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC (eds) *Climate change 2014: mitigation of climate change*. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin beşinci değerlendirme raporuna çalışma grubu III'ün katkısı. Cambridge University Press, Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY, ABD. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_technical_summary.pdf. Erişim tarihi 17 Aralık 2019
- El-Naggar A ve diğerleri (2019) Düşük verimli topraklara biyokömür uygulaması: mevcut durum ve gelecek beklentileri üzerine bir inceleme. *Geoderma* 337:536–554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- Ernsting A et al (2011) Biochar and carbon markets. *Biyoyakıtlar*. 2:9–12. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.78>
- Fajardy M ve diğerleri (2019) Negatif emisyonlar: araştırma ve politika tasarımı için öncelikler. *Front Clim*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00006>
- Farooqi ZU, Sabir M, Zeeshan N, Naveed K, Hussain MM (2018). *Enhancing utilization-re-utilization-and-sequestration/enhancing-carbon-seque carbon sequestration using agricultural stration-using-organic-amendments-and-agricultural-practorganic amendments and practices, carbon capture, and seques- tration*. <https://www.intechopen.com/books/carbon-capture-and-sequestration>. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79336>. Erişim tarihi 9 Şubat 2020
- Fuss S ve diğerleri (2018) Negatif emisyonlar-bölüm 2: maliyetler, potansiyeller ve yan etkiler. *Environ Res Lett* 13:063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Galina NR ve diğerleri (2019) Mineral karbonasyon ile karbon yakalama ve depolamanın evrimi: veri analizi ve temanın uygunluğu. *Miner Eng* 142:105879. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105879>
- Gallant K ve diğerleri (2020) Nova Scotian sulak alanlarında karbon birikiminin ölçümü ve ekonomik değerlemesi. *Ecol Econ* 171:106619. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106619>
- Gambhir A, Tavoni M (2019) Doğrudan hava karbonu yakalama ve tutma: nasıl çalışır ve iklim değişikliğinin azaltılmasına nasıl katkıda bulunabilir. *One Earth* 1:405–409. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>
- Gao S ve diğerleri (2019) Paris Anlaşması kapsamında uluslararası karbon piyasaları: temel biçim ve gelişme beklentileri. *Adv Clim Change Res* 10:21–29. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.03.001>
- Gasser T ve diğerleri (2015) Küresel ısınmayı 2 °C'nin altında tutmak için fiziksel olarak negatif emisyonlara ihtiyaç vardır. *Nat Commun* 6:7958. <https://doi.org/10.1038/ncomms8958>
- Gi K ve diğerleri (2020) Paris Anlaşması kapsamında füzyon enerji üretiminin düşük karbonlu kalkınmaya potansiyel katkısı ve buna bağlı belirsizlikler. *Energy Strategy Rev* 27:100432. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100432>
- GNASL (2018) Negatif emisyon teknolojileri: Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmada nasıl bir rol oynar? Alman Ulusal Bilimler Akademisi Leopoldina. https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_state_ments/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf. Erişim tarihi 28 Ocak 2020
- Goglio P ve diğerleri (2020) İklim değişiklikleriyle mücadele için sera gazı giderme teknolojilerinin yaşam döngüsü değerlendirmesindeki (LCA) ilerlemeler ve zorluklar. *J Clean Prod* 244:118896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118896>
- Gren I-M, Aklilu AZ (2016) Orman karbon tutumu için politika tasarımı: literatür incelemesi. *For Policy Econ* 70:128–136. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.008>
- Gude VG, Martinez-Guerra E (2018) Sürdürülebilir biyodizel üretimi için süreç yoğunlaştırılmalı yeşil kimya. *Environ Chem Lett* 16:327–341. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0680-9>
- Hache EN, Nathalie A-T, Criqui P, Lavergne J-G, Chevallet L, Gen- tier S, Le Net E, Menanteau P, Thiais F (2015) *Decarboniza- ds/2017/06/Decarbonization_Wedges_report_0.pdf* tion wedges. <https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploa . . . https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3040.1360> Erişim tarihi 4 Şubat 2020
- Hajilary N ve diğerleri (2019) Biyoyakıt türleri ve membran ayırma. *Environ Chem Lett* 17:1–18. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0777-9>
- Hansson A ve diğerleri (2019) Sahra-altı Afrika'da karbon tutma ve depolama (BECCS) ile biyoenerji için ön koşullar: Tanzania örneği. *Environ Dev Sustain*. <https://doi.org/10.1007/s10666-019-00517-y>
- Harper AB ve diğerleri (2018) Arazi kullanımı emisyonları, Paris iklim hedefleri için temelli azaltımda kritik bir rol oynamaktadır. *Nat Commun* 9:2938. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05340-z>
- Heck V ve diğerleri (2018) Biyokütle temelli negatif emisyonların gezegensel sınırlarla bağdaştırılması zor. *Nat Clim Change* 8:151–155. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0064-y>
- Hein J ve diğerleri (2018) Ormansızlaşma ve Paris iklim anlaşması: ulusal iklim eylem planlarında REDD+ üzerine bir değerlendirme. *For Policy Econ* 90:7–11. <https://doi.org/10.1016/j.forpo.2018.01.005>
- Hepburn C ve diğerleri (2019) CO₂ kullanımı ve uzaklaştırılması için teknolojik ve ekonomik beklentiler. *Nature* 575:87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
- House KZ ve diğerleri (2009) Karbon yakalama ve tutma için kimyasal ayrışmanın elektrokimyasal olarak hızlandırılması. *Energy Procedia* 1:4953–4960. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.327>

- Hussain A ve diğerleri (2017) Gelişmekte olan yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji teknolojileri: durum. Yenilenebilir Sürdürülebilir Enerji Rev 71:12–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>
- IAEA (2018) IAEA yıllık raporu 2018, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı. <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/reports/2018/gc63-5.pdf>. Erişim tarihi 5 Şubat 2020
- IEA (2019a) İzleme raporu-CCUS in power. Uluslararası Enerji Ajansı. <https://www.iea.org/tcep/power/ccus>. Erişim 5 Şubat 2020
- IEA (2019b) Taşımacılığın izlenmesi. Uluslararası Enerji Ajansı. <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019>. Erişim 6 Şubat 2020
- IPCC (2013) IPCC bilgi sayfası: IPCC nedir? https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/FS_what_ipcc.pdf. Erişim tarihi 21 Ocak 2020
- IPCC (2018) 1,5 °C'lik küresel ısınma. İçinde: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T (eds) 1. 5 °C küresel ısınmanın etkileri üzerine IPCC özel raporu. İklim değişikliği tehdidine karşı küresel tepkinin güçlendirilmesi, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılmasına yönelik çabalar bağlamında sanayi öncesi seviyelerin 5 °C üzerinde ve ilgili küresel sera gazı emisyon yolları. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf. Erişim 22 Aralık 2019
- Kantola IB ve diğerleri (2017) Gelişmiş ayrışma için dağıtım yoluyla iklim değişikliğinin azaltılması için küresel ekim alanlarının ve biyoenerji bitkilerinin potansiyeli. Biol Lett 13:20160714. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0714>
- Kärcher B (2017) Cirrus bulutları ve antropo-genik faaliyetlere tepkileri. Curr Clim Change Rep 3:45–57. <https://doi.org/10.1007/s40641-017-0060-3>
- Kheshgi HS (1995) Okyanus alkalinitesini artırarak atmosferik karbondioksiti tutma. Energy 20:915–922. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00035-F](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00035-F)
- Kim J, Park K (2016) Yenilenebilir enerji teknolojilerinin finansal gelişimi ve yayılımı. Energy Econ 59:238–250. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.08.012>
- Kosugi T (2010) Bir iklim kontrol seçeneği olarak uzayda güneşliklerin rolü. Acta Astronaut 67:241–253. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.02.009>
- Latham J ve diğerleri (2012) Deniz bulutu parlaması. Phil Trans R Soc A Math Phys Eng Sci 370:4217–4262. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0086>
- Lawrence MG ve diğerleri (2018) Paris Anlaşması sıcaklık hedefleri bağlamında iklim jeomühendisliği önerilerinin değerlendirilmesi. Nat Commun 9:3734. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- Lefebvre D ve diğerleri (2019) Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yoluyla toprak karbonasyonu ve gelişmiş ayrışma potansiyelinin değerlendirilmesi: bir vaka
- Sao Paulo Eyaleti, Brezilya için çalışma. J Clean Prod 233:468–481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>
- Leibowicz BD ve diğerleri (2018) Kentsel konut binası enerji hizmetleri için optimum dekarbonizasyon yolları. Appl Energy 230:1311–1325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.046>
- Lenzi D (2018) Negatif emisyon etiği. Glob Sustain 1:e7. <https://doi.org/10.1017/sus.2018.5>
- Lin A (2019) Paris'ten sonra karbondioksit giderimi. Ecol Law Q 45:533. <https://doi.org/10.15779/Z386M3340F>
- Liu S ve diğerleri (2018) Amino modifiye biyo-küresel selüloz nanofiber aerogeller ile yüksek CO₂ adsorpsiyonu. Environ Chem Lett 16:605–614. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0701-8>
- Lockley A ve diğerleri (2019) Jeomühendislik ve blok zinciri: karbondioksit giderimi ve güneş radyasyonu yönetimini koordine etmek
- gelecekteki emisyonlarla mücadele etmek. Front Eng Manag 6:38–51. <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0010-y>
- Ma X ve diğerleri (2020) Karbon yakalama ve depolamadan CO₂ sızıntısının radyal difüzyonunun neden olduğu tarım arazisi bozulması. J Clean Prod 255:120059. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120059>
- Mander S ve diğerleri (2017) Karbon yakalama ve depolamalı biyo-enerjinin iklim azaltma sorununu karşılamadaki rolü: bütün bir sistem perspektifi. Energy Procedia 114:6036–6043. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1739>
- Maraseni TN (2010) Biochar: faydaların maksimize edilmesi. Int J Environ Stud 67:319–327. <https://doi.org/10.1080/00207231003612225>
- Mathy S ve diğerleri (2018) Paris Anlaşması'ndan sonra: ulusal enerji senaryolarından küresel dekarbonizasyon ölçülmesi. Ecol Econ 150:273–289. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.012>
- Matovic D (2011) Uygulanabilir bir karbon tutma seçeneği olarak biyokömür: küresel ve Kanada perspektifi. Enerji 36:2011–2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.031>
- McGlashan N ve diğerleri (2012) Negatif emisyon teknolojilerinin üst düzey tekno-ekonomik değerlendirmesi. Process Saf Environ Prot 90:501–510. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.004>
- McLaren D (2012) Potansiyel negatif emisyon teknolojilerinin karşılaştırmalı küresel değerlendirmesi. Process Saf Environ Prot 90:489–500. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.005>
- Michalski J ve diğerleri (2019) Gelecekte karbondan arındırılmış bir enerji sisteminde ulaştırma sektöründe yenilenebilir yakıt tedarikinin rolü. Int J Hydrog Energy 44:12554–12565. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.110>
- Ming T ve diğerleri (2014) İklim mühendisliği yoluyla küresel ısınmayla mücadele: Dünya radyasyon yönetimi ve güneş radyasyon yönetimi iklim değişikliğiyle mücadele için herhangi bir seçenek midir? Renew Sustain Energy Rev 31:792–834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.032>
- Nakajima T ve diğerleri (2018) *Miscanthus × giganteus* ve *Miscanthus sinensis*'in karbon tutma ve verim performansları. Carbon Manag 9:415–423. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1518106>
- Nieto J ve diğerleri (2018) 2 °C'den az mı? Paris Anlaşması'nın ekonomik-çevresel değerlendirilmesi. Ecol Econ 146:69–84. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.10.007>
- Olajire AA (2013) CO₂ sekestrasyonunda mineral karbonasyon teknolojisinin gözden geçirilmesi. J Pet Sci Eng 109:364–392. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>
- Oni BA ve diğerleri (2020) Biyokömür uygulamasının çevre ve ekonomi için önemi. Ann Agric Sci. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.12.006>
- Osman AI (2020) Metan par-tial oksidasyonundan katalitik hidrojen üretimi: mekanizma ve kinetik çalışma. Chem Eng Tech-nol 43:641–648. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900339>
- Osman AI ve diğerleri (2019) Patates kabuğu atıklarından aktif karbon ve karbon nanotüplerin üretimi, karakterizasyonu ve ağır metal gideriminde uygulanması. Environ Sci Pollut Res 26:37228–37241. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06594-w>
- Osman AI ve diğerleri (2020a) İki aşamalı aktivasyon yoluyla enerji ve diğer uygulamalar için bira fabrikasının kullanılmış tahıl atığının aktif karbon ve karbon nanotüplere dönüştürülmesi. J Chem Technol Biotechnol 95: 183–195. <https://doi.org/10.1002/jctb.6220>
- Osman AI ve diğerleri (2020b) Yüksek alkali silikatlı otsu biyokütleden karbon nanomalzemelerin üretimi ve uygulaması. Sci Rep 10:2563. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59481-7>
- Østergaard PA ve diğerleri (2020) Yenilenebilir enerji teknolojisi kullanarak sürdürülebilir kalkınma. Renew Energy 146:2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
- Palmer C (2019) İklim değişikliğinin azaltılması negatif emisyon teknolojilerine bağlı olacaktır. Engineering 5:982–984. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.006>

- Perdan S, Azapagic A (2011) Karbon ticareti: mevcut planlar ve gelecekteki gelişmeler. *Enerji Politikası*. 39:6040–6054. doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.003
- Pfeiffer B, Mulder P (2013) Gelişmekte olan ülkelerde yenilenebilir enerji teknolojisinin yayılımını açıklamak. *Energy Econ* 40:285–296. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.07.005>
- Pindilli E ve diğerleri (2018) Turbalık alan restorasyonu yoluyla karbondioksit tutulumunun toplumsal faydalarının tahmin edilmesi. *Ecol Econ* 154:145–155. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.08.002>
- Pires JCM (2019) Negatif emisyon teknolojileri: iklim değişikliğinin azaltılması için tamamlayıcı bir çözüm. *Sci Total Environ* 672:502–514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.004>
- Pitelis A ve diğerleri (2019) Yenilenebilir enerji teknolojilerinde inovasyonu teşvik etmek: politika araçlarının seçimi ve etkinliği. *Renew Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.100>
- Pleßmann G, Blechinger P (2017) AB sera gazı emisyon azaltım hedeflerine nasıl ulaşılır? Avrupa'nın elektrik tedarik sistemi için 2050 yılına kadar model tabanlı bir dekarbonizasyon yolu. *Enerji Stratejisi Rev* 15:19–32. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.003>
- Pourhashem G ve diğerleri (2019) Biyokömür için politika desteği: inceleme ve öneriler. *GCB Bioenergy* 11:364–380. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12582>
- Právělie R, Bando G (2018) Nükleer enerji: küresel elektrik talebi, dünya çapında dekarbonizasyon zorunluluğu ve gezegensel çevresel etkiler arasında. *J Environ Manag* 209:81–92. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.043>
- Purakayastha TJ ve diğerleri (2019) Biyokömürle module edilen toprak koşullarındaki iyileşmeler ve mahsul verimini ilgilendiren besin dinamikleri üzerine bir inceleme: iklim değişikliğinin azaltılması ve küresel gıda güvenliğine giden yollar. *Chemosphere* 227:345–365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.170>
- Qin Z ve diğerleri (2020) Nikel bazlı katalizörler üzerinde CH₄'ün sentez gazına CO₂ reformasyonu. *Environ Chem Lett* 18: 997–1017. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00996-w>
- REN21 (2019) Renewables 2019-global status report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf Erişim tarihi 4 Şubat 2020
- Renforth P (2019) Alkali matrislerin negatif emisyon potansiyeli. *Nat Commun* 10:1401. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5>
- Renforth P, Henderson G (2017) Karbon tutulması için okyanus alkalinitesinin değerlendirilmesi. *Rev Geophys* 55:636–674. <https://doi.org/10.1002/2016RG000533>
- Ricke KL ve diğerleri (2017) Küresel sıcaklık hedefinin aşılmasına ilişkin kısıtlamalar. *Sci Rep* 7:14743. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14503-9>
- RoyalSociety (2018) Sera gazı giderimi. <https://royalsocietypublishing.org/media/policy/projects/greenhouse-gas-removal/royal-society-greenhouse-gas-removal-report-2018.pdf>. Erişim 28 Ocak 2020
- Sapkota Y, White JR (2020) Amerika Birleşik Devletleri'nde kıyı sulak alan restorasyonu ve korunması için uygulanabilir karbon dengeleme piyasa metodolojileri: bir inceleme. *Sci Total Environ* 701:134497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134497>
- Sarkhot DV ve diğerleri (2012) Çok yıllık çim *Cynodon dactylon* (L.) Pers ve biyoenerji ürünü *Arundo donax* L. Biomass Bioenergy 41:122– altında toplam ve kullanılabilir toprak karbon fraksiyonları 130. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.015>
- Sarkodie SA, Strezov V (2019) İklim değişikliği riskinin azaltılması için ekonomik, sosyal ve yönetişimsel uyum hazırlığı: 192 ülkeden kanıtlar. *Sci Total Environ* 656:150–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.349>
- Schmidt H-P ve diğerleri (2019) Pirojenik karbon yakalama ve depolama. *GCB Bioenergy* 11: 573–591. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12553>
- Seetharaman ve diğerleri (2019) Yenilenebilir enerji dağıtımında engelleri aşmak. *Heliyon* 5:e01166. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01166>
- Semida WM ve diğerleri (2019) Sürdürülebilir tarım kültürü ve çevre için biyokömür etkileri: bir inceleme. *S Afr J Bot* 127:333–347. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>
- Shinnar R, Citro F (2008) Karbonsuzlaştırma: mevcut teknolojilerle neredeyse tamamen enerji bağımsızlığına ulaşmak ve sera gazı emisyonlarını neredeyse tamamen ortadan kaldırmak. *Technol Soc* 30:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2007.10.006>
- Shivakumar A ve diğerleri (2019) AB'de yenilenebilir enerji dağıtımının güçleri: geçmiş eğilimlerin ve projeksiyonların analizi. *Energy Strategy Rev* 26:100402. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100402>
- Sinsal SR ve diğerleri (2020) Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için zorluklar ve çözüm teknolojileri-bir inceleme. *Renew Energy* 145:2271–2285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>
- Smith W, Wagner G (2018) Dağıtımın ilk 15 yılında stratosferik aerosol enjeksiyon taktikleri ve maliyetleri. *Environ Res Lett* 13:124001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac98d>
- Srivastava P (2012) Toprakta karbon birikimi: atmosferik karbondioksit konsantrasyonunu azaltmak için yenilikçi bir strateji. *Biodivers Conserv* 21(5):1343–1358. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0229-y>
- Srivastava N ve diğerleri (2017) Lignoselülozik atık kullanarak biyoyakıt üretimi için nanomalzemeler. *Environ Chem Lett* 15:179–184. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0622-6>
- Srivastava RK ve diğerleri (2020) Biyoprosesler kullanılarak biyoyakıtlar, biyodizel ve biyohidrojen üretimi. Bir gözden geçirme. *Environ Chem Lett* 18:1049– 1072. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00999-7>
- Streffer J ve diğerleri (2018) Kayaların gelişmiş ayrışması yoluyla karbondioksit gideriminin potansiyeli ve maliyetleri. *Environ Res Lett* 13:034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- Su T-M ve diğerleri (2016) Karbondioksitin fotokatalitik indirgenmesindeki son gelişmeler. *Environ Chem Lett* 14:99–112. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0528-0>
- Tcvetkov P ve diğerleri (2019) Karbon yakalama ve depolamaya ilişkin kamuoyu algısı: son duruma genel bir bakış. *Heliyon* 5:e02845. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02845>
- BM (1992) Birleşmiş milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf Erişim tarihi 21 Ocak 2020
- BM (2015) Paris anlaşması. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf. Erişim tarihi 24 Ocak 2020
- UNCCS (2019) İklim eylem ve destek eğilimleri, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sekreteryası. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Climate_Action_Support_Trends_2019.pdf. Erişim 20 Aralık 2019
- UNEP (2019) Emisyon açığı raporu. BM Çevre Programı, Nairobi. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Erişim tarihi: 22 Aralık 2019
- UNFCCC (1997) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf>. Erişim tarihi 21 Ocak 2020
- UNFCCC (2005) Kyoto Protokolü Taraflar Toplantısı'nın ilk oturumuna ilişkin Taraflar Konferansı Raporu. <https://unfccc.int/resource/docs/2005/cmp1/eng/08a02.pdf>. Erişim tarihi 23 Ocak 2020
- UNFCCC (2008) Emisyonların ve tahsis edilen miktarın hesaplanmasına ilişkin Kyoto protokolü referans kılavuzu. https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf. Erişim tarihi 22 Aralık 2019

- UNFCCC (2012) Kyoto protokolüne Doha değişikliği. <https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2012/CN.718.2012-Eng.pdf>. Erişim tarihi 24 Ocak 2020
- Victor N ve diğerleri (2018) ABD enerji sektörünün karbonsuzlaştırılması: MARKAL dokuz bölge modeli ile teknoloji seçeneklerinin araştırılması. *Energy Econ* 73:410–425. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.021>
- Villa JA, Bernal B (2018) Bilimden uygulamaya sulak alanlarda karbon tutulması: biyojeokimyasal süreç, ölçüm yöntemleri ve politika çerçevesine genel bir bakış. *Ecol Eng* 114:115–128. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.037>
- Villoria-Sáez P ve diğerleri (2016) Sera gazı emisyon ticareti uygulanmasının etkinliği: mevzuat üzerine bir inceleme. *J Clean Prod* 127:49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.148>
- Vinca A ve diğerleri (2018) Karbon yakalama ve depolama elektriğinin 1,5 ve 2 °C'ye ulaşmadaki rolü. *Int J Greenh Gas Control* 78:148–159. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.07.020>
- Wang Q ve diğerleri (2016) Karbon vergilendirmesinin dağılımsal etkileri. *Applhttps ://doi.org/10.1016/j.apene* *Energy* 184:1123–1131. [rgy.2016.06.083](https://doi.org/10.1016/j.apene.2016.06.083)
- Wang B ve diğerleri (2020) CO₂ sekestrasyonu: ultrasonik karbonasyon alçıtmasının CaCO₃'e yüksek oranda dönüştürülmesi. *Environ Chem Lett* 18:1369–1377. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00997-9>
- WEF (2020) Küresel riskler raporu 2020, Dünya Ekonomik Forumu. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdfErişim tarihi 18 Ocak 2020
- Wendling ZA (2019) Yenilenebilir enerjinin ötesindeki köprüler: belirsizlik altında küresel elektrik sektörünü karbonsuzlaştırmak. *Energy Res Soc Sci* 48:235–245. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.020>
- Williamson P ve diğerleri (2012) Jeomühendislik için okyanus gübrelemesi: etkinlik, çevresel etkiler ve ortaya çıkan yönetim üzerine bir inceleme. *Process Saf Environ Prot* 90:475–488. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.007>
- WMO (1979) Proceedings of the world climate conference-a conference of experts on climate and mankind, World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8346. Erişim tarihi 21 Ocak 2020
- Xiao L ve diğerleri (2019) Biochar, anaerobik topraklarda yüksek asetat konsantrasyonlarında metan üretimini teşvik eder. *Environ Chem Lett* 17: 1347–1352. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00863-3>
- Xu M ve diğerleri (2019) Toprağa biyokömür ilavesi, P tutulmasını yüksek oranda artırır ve suların fosfatla kirlenme riskini azaltır. *Environ Chem Lett* 17:533–541. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0802-z>
- Yan J ve diğerleri (2019) Negatif emisyon teknolojileri NET'ler. *Appl Energy* 255:113749. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113749>
- Yue X-L, Gao Q-X (2018) Doğal sistemlerin ve insan faaliyetlerinin sera gazı emisyonlarına katkıları. *Adv Clim Change Res* 9:243–252. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>
- Zhang Z ve diğerleri (2015) İklim değişikliğini azaltmaya yönelik jeomühendislik yaklaşımlarının gözden geçirilmesi. *J Clean Prod* 103:898–907. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.076>

Yayıncının Notu Springer Nature, yayımlanan haritalardaki yetki iddiaları ve kurumsal bağlantılar tarafsız kalmaktadır.