



KARBONSUZ GELECEK

Carbon Neutral Future

Muammer Akgün
Barbaros Batur
Özlem Yurtsever
M. Cem Çelik

ÖZET

2015 Paris Anlaşması sonrasında, Avrupa Birliği karbonsuz enerji kaynaklarının kullanımı konusunda ciddi bir çalışma içerisine girerek bu konuda hedefler belirledi. Genel olarak, iklim değişikliği ile mücadelede sera gazı emisyonlarının azaltılmasının etkisi belirgindir. Bu nedenle endüstride enerji tüketimi ve hammadde kullanımı ile ilgili sera gazı emisyonlarını azaltmak oldukça zor olmasına rağmen her geçen gün artan enerji ihtiyacını karbonsuz enerji kaynaklarından sağlamak oldukça önemlidir.

Özellikle Avrupa Birliği'nin gelişmiş ülkelerince, Avrupa Birliği endüstrisinin tutarlı ve sağlam bir enerji politikasına ve bu politikaları oluşturmak için yenilikçi ve sürdürülebilir teknolojilere ve bu teknolojilerle üretilen enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu nedenle mevcut politikalarda değişikliklerin yapılması için çözüm önerileri belirlenmektedir.

Avrupa Komisyonu, özellikle sanayi ve enerji sektörü arasında artan enerji talebine çözüm sağlamak amaçlı karbonsuz, güvenli ve küresel rekabete uygun enerji üretimi için yasal düzenlemelerle birlikte ticari bir çerçeveyi oluşturmaya çalışmaktadır. Son birkaç on yıllık periyot içinde, fosil yakıtların azaltılması yanında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışmada, karbonsuz geleceğe yönelik olası yollar ve çözümler için paralel olarak ele alınması gereken temalar açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Karbon nötr enerji, Yenilenebilir enerji elektrik üretimi, Yeni enerji kaynakları, Karbon tutumu ve depolama, Karbon tutumu ve kullanımı

ABSTRACT

Following the 2015 Paris Agreement, the European Union entered into a serious study on the use of carbon-free energy resources and set targets in this regard. Overall, the effect of reducing greenhouse gas emissions to combat climate change are evident. Therefore, although it is very difficult to reduce greenhouse gas emissions related to energy consumption and raw material use in the industry, it is very important to meet the increasing energy demand from carbon-free energy sources.

Especially developed countries of the European Union need a consistent and sound energy policy of the European Union industry and innovative and sustainable technologies and energy resources produced with these technologies to create these policies. Therefore, solution proposals are determined to make changes in existing policies.

The European Commission is trying to establish a commercial framework with legal regulations for carbon-free, reliable and globally competitive energy production to provide solutions to the increasing energy demand, especially between the industry and the energy sector. In the last few decades, the

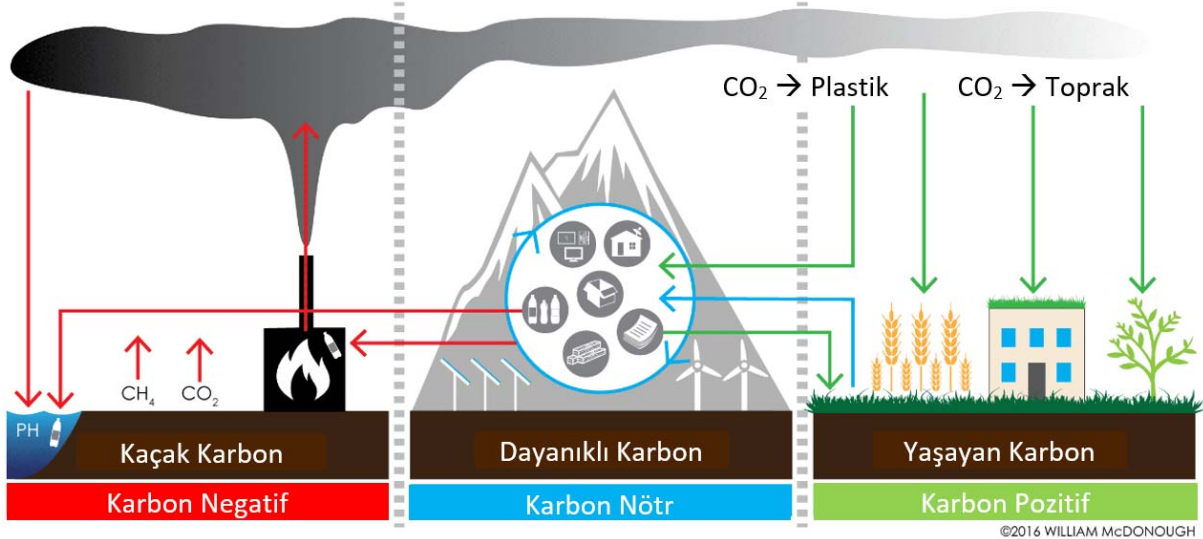
use of renewable energy sources has been increasing day by day, as well as the reduction of fossil fuels.

In this paper, issues that need to be addressed in parallel for possible ways and solutions for a carbon-free future are explained.

Keywords: Carbon Neutral Energy, Renewable Energy Electricity Production Carbon Capture And Storage, Carbon Efficiency, Carbon Economy

1. GİRİŞ

Karbon emisyonları ve küresel ısınma ile yapılan ve 1990' larda başlayan mücadelenin ilk evresi, karbon salımının sınırlandırılması ve çevre dostu uygulamalara dikkat çekmek olmuştur. Bu evreyi 2000' lerin ortalarında, hayat döngüsü ve karbon ayakizi hesaplamaları takip etti. İçinde bulunduğumuz üçüncü evrede artık görülüyor ki, iş modellerini sıfır karbon salımından çok daha ileriye taşımamız gerekiyor. Acilen çözüm bulunması gereken iki taraflı ve yaşamsal bir problem ile karşı karşıyayız. Hızla artan nüfusun belli bir hayat standardında yaşaması sağlanırken doğaya verdiğimiz zararında azaltılması gerekmektedir. Endüstri devriminden bu güne arttığı gözlenen küresel ısınmanın etkileri ve buna neden olan karbon salımının etkin bir şekilde azaltılması konusunda köklü değişikliklere gidilmesi gerekiyor [1]. Küresel ısınma ve iklim değişikliği küresel ölçekte ele alınması Birleşmiş Milletler bünyesinde yapılan çalışmalar başta olmak üzere pek çok uluslararası platformda bir problem olarak incelenmiştir. Gelişmiş ülkeler başta olmak üzere, sorunun doğru tanınması, çözüm yöntemleri ve iyileştirme taahhütleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılsa da, küresel kapsamlı bir çözüm stratejisi üretilmesinde başarısız olunmuştur. Son zamanlarda küresel ısınmanın verdiği zararları iyileştirirken aynı zamanda uzun vadeli farklı sorunlara yol açmadan ekonomik kalkınmayı sürdürebilmek adına umut verici çalışmalar ortaya çıkmaya başlamıştır. Söz konusu gelecek vadeden çalışmada, etkin olarak yeni kavramlarla problemin doğru tanımlanması ve çözümü için yapılan çalışmalar incelenmiştir [2]. Zorlu problemin çözümüne giden yola ışık tutacak, karşılaşılabilecek zorluklar ve olası çözüm yöntemleri tartışılarak güncel bir bakış açısı sunulmuştur.



Şekil 1. Karbonun yeni dili [3].

Kaçak karbon: Fosil yakıtların yakılmasıyla atmosfere salınan karbondioksiti, "atıktan enerji üreten" tesisleri, metan sızıntılarını, ormansızlaşmayı, büyük ölçüde endüstriyel tarımı ve kentsel gelişimi içerir. İstenmeyen bir noktaya gelmiştir ve insan sağlığı açısından zararlı olabilir.

Dayanıklı karbon: Kağıt ve kumaş gibi yeniden kullanılabilir elyaflardan, nesiller boyu dayanabilen ve daha sonra yeniden kullanılabilen bina ve altyapı öğelerine kadar uzanır. Kömür ve kireçtaşı gibi kararlı katı maddelerde kilitli veya kullanılan ve yeniden kullanılan geri dönüştürülebilir polimerlerdir.

Yaşayan karbon: Ekilen veya büyütülen organik, biyolojik çevrimle büyütülen taze gıdalar, sağlıklı ormanlar ve verimli topraklarda yetiştirilen bitkilerdir.

Problemin çözümünde atılacak ilk adım, kullanılan kavramların ve dolayısıyla temel anlayışın yeniden şekillendirilmesi olmalıdır. Küresel ısınma probleminin temelini oluşturan kavramlar ve karbon tanımların pozitif bir dille ifade edilmesi, kitlelerin algısında ve konuya dair psikolojik düzeyde farklılık yaratacaktır. Karbon ile ilgili türetilen tanımlar problemin ortaya konulmaya başlanmasından bu yana hep olumsuz kelime gruplarından oluşturulmuştur [3]. Bu bağlamda karbon mücadele edilmesi gereken bir düşman olarak hafızalarımızda yer etmiştir. Karbon elementi esasen düşmanımız değil bizzat hayatın yapıtaşıdır. Asıl sorun, gezegenin doğal karbon döngüsünün bizzat insan aktiviteleri sonucu bozulmasıdır. Karbonun yeni bir bakış açısıyla ele alınabilmesine olanak sağlayacak kavramsal yapı Şekil 1'de görülmektedir. Kavramların doğru bir bakış açısıyla ortaya konulmaması sonucu ortaya çıkan kafa karışıklığı, küresel ölçekte aynı dili konuşmamak ve olumsuz bir psikolojik yaklaşım bu konudaki çabaları sekteye uğratmaktadır.

Yenilikçi karbon yaklaşımlarında en önemli ifadelerden biri olan, karbon (iklim) pozitif tanımı, atmosferdeki karbon miktarını azaltan yapılar için kullanılmaktadır [2]. Yeni karbon ekonomisine geçişte, karbon (iklim) pozitif organizasyonlar, çevreye saldıklarından daha fazla karbonu (yok edileceklerdir) çevreden geri toplayacaklardır. Birbiri peşi sıra yaşanan dört endüstriyel devrim sürecinin doğal bir sonucu olarak karşımızda duran küresel çevre sorunları, sürdürülebilirlik ve çevre dengesinde bizleri bir çözüm bulmak zorunda bırakmıştır.

Dördüncü endüstri devriminin gelişim hızı, küresel ölçekte oluşu, karmaşıklığı ve değiştirme gücü açılarından daha önce yaşanmamış bir süreç olarak karşımızdadır [4]. Bu bağlamda, çağımız teknolojilerinin getirdiği yeniliklerin yanı sıra ortaya çıkan zorlukların da üstesinden gelinmesi aynı ölçüde karmaşık hale gelmiştir. İklim değişikliği acil ve kararlı adımlar atılarak çözülmesi gereken hayati bir tehdit olarak karşımızdadır. İnternet ve dördüncü endüstri devriminin sağladığı olanaklar sayesinde, kalkınma ve ekonomik büyüme sağlanırken, çevre üzerinde yarattığımız olumsuz etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir düzeye getirilmesi sağlanabilir [5, 6].

Kavramsal olarak karbon konusunda uluslararası düzeyde kabul görececek kavramlar ve pozitif algı yaratma konusunda, "Karbon Verimliliği" kavramı önemli bir değişim ögesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel ölçekte yapılması zorunlu köklü değişiklikler konusunda, hızla dijitalleşen geleceğin boyutları, iş modelleri ve ürünleri üzerinden düşünülmek zorundadır [2]. Karbon verimliliği, temel olarak üç temel prensibe dayanmaktadır. Bunlardan ilki, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca, üretiminde kullanılan enerji kaynaklarından ürünün çalışma sürecine ve hatta atık-geri kazanım evrelerine kadar, tüm karbon etkileşiminin dikkate alınmasıdır. İkincil olarak, ürünün üretiminde salınan karbon miktarı, karbon salımından kaçınılan miktar ve bu süreçte atmosferden çekilen karbon miktarı olarak, toplam karbon bütçesi ele alınmalıdır. Üçüncü olarak, finansal değer ve karbon etkilerinin birlikte ele alınarak eş zamanlı olarak optimize edilmesine dayanır.

Ekonomik büyüme ve kentleşmenin motoru olan sanayileşme, küresel nüfus ve zenginliğin artmasıyla bağlantılı olarak farklı sektörlerin gelişimini hızlandırdı [7,8]. 2020 yılında 7,8 milyar olan dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 9,9 milyara çıkması ve buna göre yaşam standartlarındaki artış dikkate alındığında %80 daha fazla enerji ve %70 daha fazla gıdaya ihtiyaç duyması bekleniyor[9,10]. Son iki yüzyılda, dünya ekonomisi büyük ölçüde doğal kaynakların aşırı kullanımına ve biyosferdeki yaşamı destekleyen biyo-kimyasal döngülerin ve süreçlerin değiştirilmesine bağlı olmuştur [11]. Petrol kaynaklarının kullanımındaki mevcut artan talep ve ormansızlaşma, artan enerji, gıda ve diğer emtia talebini karşılama baskısına bir yanittir [12,13].

Temel olarak enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarında beklenen %70'lik artış nedeniyle, sera gazı emisyonlarının 2050 yılına kadar %50 artması beklenmektedir [12,17].

Bu emisyonlar mevcut hızlarında artmaya devam ederse, karbon (C) döngüsünü dinamik dengesinin dışına itecek ve iklim sisteminde geri dönüşü olmayan değişikliklere yol açacaktır. Bu nedenle, çeşitli

sosyo-ekonomik ve teknolojik müdahaleler yoluyla karbon emisyonlarını azaltmak ve karbon tutumunu artırmak için uyumlu çabalar başlatılmalıdır [15, 16].

Sürekli artan küresel sera etkisine yanıt olarak, tüm ülkeler 12 Aralık 2015'te Paris'te sera gazı emisyonlarını ortaklaşa ele almak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için dönüm noktası niteliğindeki bir Birleşmiş Milletler iklim anlaşmasını imzaladı [17]. 2015 Paris anlaşması kapsamında, tüm ülkeler ısınmayı 2,0 °C' nin altında tutmayı ve 2050'ye kadar karbon nötrlüğüne ulaşarak küresel ısınmayı 1,5 °C' nin altında tutmak için çaba göstermeyi kabul etti. 2020'de küresel ortalama sıcaklık, sanayi devrimi öncesi sıcaklığa göre 1.2 °C daha sıcaktır. Bu ısınmanın etkileri küresel olarak hissedilmektedir [14, 15].

Mevcut iklim verilerine dayanarak, küresel iklim değişikliğini tersine çevirmek için atmosferik sera gazı konsantrasyonlarını azaltma çabalarımızı hızlandırmaya acil bir ihtiyaç vardır[18].

Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, eğer dünya 2050 yılına kadar Karbon nötr hale gelecekse, yeni ham petrol, doğal gaz ve kömürün çıkarılması ve geliştirilmesi 2021'de durdurulmalıdır [20].

Net sıfır CO₂ emisyonu söylemi ve gerçekliği arasındaki uçurumu kapatmak için karbon içermeyen kaynaklardan (yani güneş ışığı, gelgit, rüzgar, su, dalga, yağmur ve jeotermal enerji). ve biyokütleden (yani bitkilerden veya hayvanlardan elde edilen organik maddeler). yenilenebilir enerjinin araştırılmasına ve benimsenmesine yatırım yapılması zorunludur.

Yenilenebilir kaynaklar, mevcut küresel enerji talebinin 3.000 katından fazlasını sağlayabilir [21].

Yenilenebilir enerjiye (elektrik, ısı ve biyoyakıt şeklinde) yönelik küresel talep son on yılda önemli ölçüde arttı ve yenilenebilir enerjinin küresel elektrik üretimindeki payı 2019'da %27'den 2020'de %29'a yükseldi [22].

Yenilenebilir enerji kullanımındaki bu ilerlemeye rağmen, geleneksel enerjiden yenilenebilir enerjiye geçiş yeterince hızlı değil ve dünya, 2050 yılına kadar karbon nötr ve sürdürülebilir kalkınmaya ulaşması zor görünüyor.

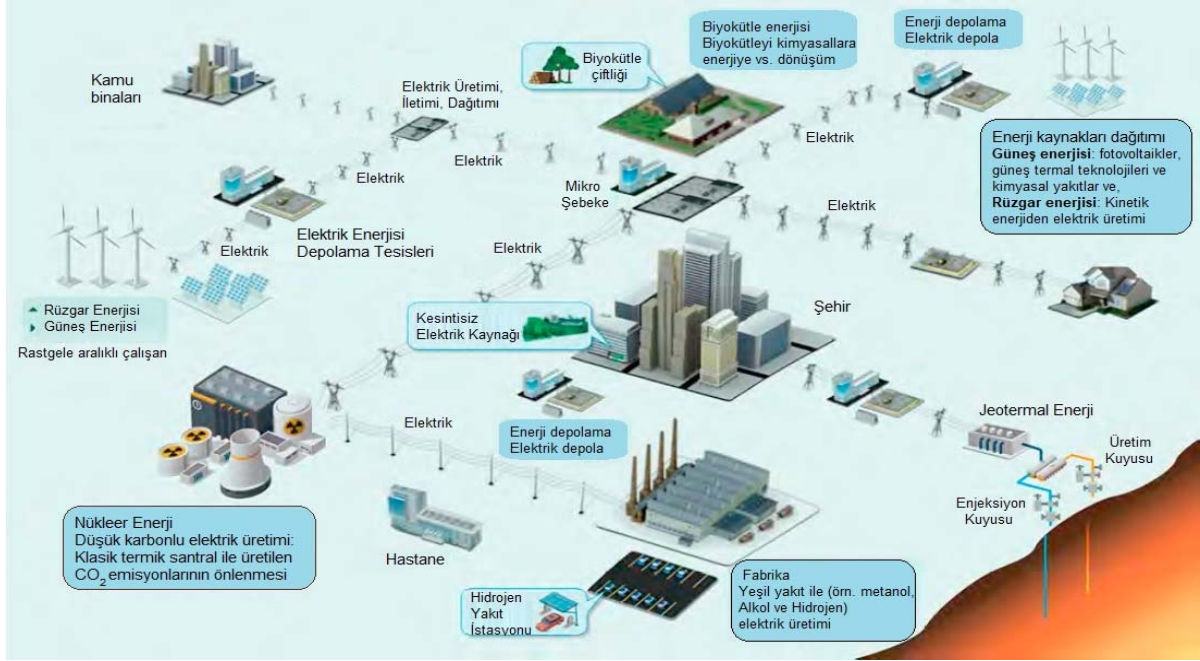
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİ

Yenilenemeyen kaynaklardan aşırı enerji tüketimi, enerji kıtlığını, sera gazı emisyonlarını, iklim değişikliğini ve çevresel bozulmayı artırarak insanlığı tehdit etmektedir.

Sonuç olarak, insanlığın ekolojik farkındalığı ve düşük karbonlu veya karbonsuz enerjiye geçiş, geçmişte olduğundan daha fazla endişe vericidir.

Temiz enerjiler arasında, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve okyanus enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, karbon nötr elde etmenin en önemli ve verimli yollarından bazıları olarak kabul edilmektedir. Düşük kaynak tüketimi ve düşük kirlilik riski avantajlarına sahip olan ve ulusal enerji güvenliğini sağlamak ve "Karbon nötr " hedefine ulaşmak için stratejik yaklaşım olarak tanımlanan nükleer ve H₂ enerjisi ya da H₂ den elde edilen metana ek olarak, biyoenerji de enerji arzı ve tüketiminin yapısını yeniden yapılanma için anahtardır.

Yenilenebilir enerji için temel teknolojiler (Şekil 2) ve bu teknolojilerin Karbon nötrü gerçekleştirme üzerindeki etkileri aşağıda tartışılmaktadır.



Şekil 2. Yenilenebilir enerji üretimi için temel teknolojiler

2.1. Güneş enerjisi:

Güneş enerjisi tükenmez bir kaynaktır. Temiz, yenilenebilir ve her yerde bulunabilen doğası nedeniyle güneş enerjisi, küresel yenilenebilir enerji arzında önemli bir rol oynayabilir [23].

Şu anda, fosil kaynaklar (örneğin, petrol, kömür ve doğal gaz) hala dünya çapında toplam enerji tüketimine hakimdir. Buna karşılık, Karbon emisyonu oluşturmayan güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgar enerjisi ve gelgit enerjisi, enerji tüketiminin yalnızca küçük bir bölümünü oluşturmaktadır.

Karbon nötrü elde etmek için, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak esastır. Bu nedenle, geleneksel fosil yakıtlar yerine güneş ışığından elde edilen yenilenebilir enerji ile değiştirmek, CO₂ emisyonlarını azaltmak ve enerji sistemlerini karbon nötre doğru karbondan arındırmak için çok önemlidir.

Hızla gelişen fotovoltaik teknolojisi, güneş enerjisinden yararlanmak için güçlü bir yöntem olarak kabul edilmiştir [24].

Güneş enerjisi, düşük karbonlu ve karbonsuz bir toplumda enerji taleplerini karşılamak için ideal bir çözümü temsil eder.

Düşük işletme maliyetleri nedeniyle, güneş enerjisi tekniklerine dayalı bir dizi yararlı önlem, Karbon emisyonlarını azaltmak ve CO₂'yi temiz enerji depolamak için kullanmak için iyi adaylardır ve böylece Karbon nötrlüğünün gerçekleştirilmesinde yeri doldurulamaz bir rol oynar.

Önümüzdeki yıllarda gelişmiş enerji dönüştürme/depolama teknolojilerinin hızlandırılmış gelişimini ve Karbon-nötr enerji sistemlerine giden entegre yolları teşvik etmek için temiz kaynaklarla birlikte güneş enerjisinin büyük ölçekli dağıtımını gerektirecektir.

2.2. Rüzgar enerjisi

Rüzgar, Dünya yüzeyinin Güneş tarafından eşit olmayan şekilde ısınması nedeniyle havanın hareketinden kaynaklanır. Bu da, rüzgar enerjisinin dolaylı güneş enerjisi olarak kabul edilebileceği anlamına gelir [25].

Güneş enerjisi gibi, rüzgar enerjisi de "Karbon zirvesi ve Karbon nötrü" gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynayacaktır.

Dünya, çoğunlukla çayırardan, çöllerden, kıyı bölgelerinden ve adalardan dağıtılan bol miktarda rüzgar kaynağına sahiptir [26]. Uygulama sahasının konumunun rüzgar enerjisinin ekonomisi, teknik özellikleri ve uygulanması üzerinde önemli bir etkisi vardır. Dünya rüzgar enerjisinin gelişimine büyük önem vermekte ve ciddi anlamda desteklemektedir.

Ancak rüzgar enerjisinden yararlanmayı engelleyen konulardan biri de rüzgar türbinlerinin ürettiği gürültüdür. Rüzgar türbinlerinin ürettiği gürültüyü azaltmak veya en aza indirmek için rüzgar kaynaklarından daha fazla faydalanmak için stratejilere acilen ihtiyaç vardır. Rüzgar enerjisinden faydalanılan alanlar karalardan denizlere doğru kaymaktadır.

Rüzgar enerjisi üretimiyle ilgili bir başka sorun da, rüzgar türbinlerinin uygun olmayan bir şekilde yerleştirilmeleri durumunda kuşların çarpmalarından kaynaklanan aksamalara veya habitat tahribatı gibi olumsuz bir etkilere sahip olabilmektedir.

Dünya üzerindeki rüzgar kaynağı bol olmasına rağmen, rüzgar kaynaklarının arazi boyunca eşit olmayan dağılımı, rüzgar türbinleri tarafından üretilen elektrik enerjisinin taşınması zorlaştırmaktadır. Rüzgarların hız ve yön açısından sürekli değişimi, elektrik üretimi için değişken ve kararsız bir faz, genlik ve frekans ile sonuçlanır ve bu da şebekeye entegre olmayı zorlaştırarak rüzgar enerjisinin boşa harcanmasına neden olabilecektir.

Bir rüzgar türbini kurmanın maliyeti şu anda oldukça yüksektir ve bu da bu teknolojinin yaygın olarak kullanımını engellemektedir.

2.3. Okyanus enerjisi

Okyanus enerjisi, okyanustaki su kütlelerinde bulunan ve hem yenilenebilir hem de temiz olan enerjiyi ifade eder. Okyanus enerji rezervi dünya çapında muazzamdır ve tüm dünyaya güç sağlamaya yeterlidir.

Okyanus enerjisinin tipik olarak beş farklı enerji formu vardır: gelgit enerjisi, dalga enerjisi, okyanus akıntısı enerjisi, termal enerji ve ozmotik enerji.

Gelgit, dalga ve akıntı enerjileri mekanik enerjidir. Okyanus enerjisinden yararlanma araştırması birkaç on yıl önce başladı. Coğrafi dağılım, farklı enerji formları için geniş ölçüde değişir ve uygulama teknolojileri de oldukça farklıdır. Gelgit enerjisi, su seviyesiyle ilgili potansiyel enerji ve gelgit akıntısının kinetik enerjisi de dahil olmak üzere gelgitte bulunan enerjidir.

Gelgit, denizlerin Ay veya Güneş ile yerçekimi etkileşiminden kaynaklanır. Gelgit enerjisinin potansiyeli yılda yaklaşık 1.200 TWh olduğu tahmin edilmektedir.

Dalga enerjisi, geniş bir dağılıma sahip olan su dalgalarındaki kinetik ve potansiyel enerjidir. Esas olarak, kinetik enerjisinin bir kısmını okyanus yüzeyindeki suyu ileten rüzgardan kaynaklanmaktadır.

Küresel olarak dalga enerjisinin potansiyeli yılda 29.500 TWh'dir [27].

Okyanus akıntısı enerjisi, küresel olarak deniz suyunun sirkülasyonlarında saklıdır. Enerjinin kaynağı, su akışındaki kinetik enerjidir. Bu enerji ile türbinler kullanılarak enerji üretilmektedir. Türbinler derin denizde ve kıyından uzakta konumlandırılması gerekmesi nedeni ile bu tür enerjiyi kullanmak için çok cazip değildir.

Termal enerji, deniz suyunun üst katmanını ısıtan ve sıcaklığını derin denizdeki sudan farklı kılan Güneş ışınlarından kaynaklanır. Bu tür sıcaklık farkları, esas olarak termal çevrimlere dayalı elektrik üretimi için kullanılabilir. Bu enerjinin potansiyelinin yılda 44.000 TWh olduğu tahmin edilmektedir [28]. Bu enerji formunun kullanımı üniversiteler ve araştırma enstitüleri tarafından halen araştırma aşamasındadır.

Tuzluluk gradyan enerjisi olarak da adlandırılan ozmotik enerji, farklı tuz konsantrasyonlarına sahip su kütleleri arasında var olan enerjidir. Deniz suyunun tuzluluğu dünya çapında homojen değildir; örneğin, tatlı suyun tuzlu suyla bulunduğu nehir ağızlarında bir tuzluluk gradyanı oluşur. Ozmotik enerji hala kavramsal bir enerji kaynağıdır ve ticarileştirmeye hazır değildir. Okyanus enerji rezervi dünya çapındadır ve tüm dünyaya güç sağlamaya yeterlidir.

Gelgit ve dalga enerjisini toplayan teknolojiler ticarileşmenin eşiğindedir. Okyanus akıntısı enerjisi, termal enerji ve ozmotik enerjiyi toplamaya yönelik teknolojiler henüz erken gelişim aşamasındadır.

Okyanus enerjisinden yararlanmanın başlıca zorlukları, şiddetli okyanus ortamlarında ekonomik maliyet-rekabetçilik ve teknolojik güvenilirlikte yatmaktadır. Okyanus enerjisi, bu zorlukların üstesinden gelerek dünyaya bol miktarda temiz enerji sağlayacaktır. Afrika, Avustralya gibi dünyada büyük enerji tüketmeyen buna karşı yüksek okyanus enerjisi potansiyeli olan yerler gibi potansiyel ve tüketimin uzak yerlerde olması okyanus enerjisi için sorun çıkartabilir.

2.4. Biyoenerji

Biyokütle, bitkilerden elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyokütlenin en önemli kaynakları, tarım ve ormancılık kalıntıları, kentsel katı atıklardaki biyogenik maddeler, hayvan atıkları, insan kanalizasyonu ve endüstriyel atıklardır. Biyokütle, yıllık küresel enerji tüketiminin %13-%14'ünü sağlar [29].

Biyokütleyi enerjiye dönüştürmek için aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli işlemler kullanılır. Biyokütlenin termokimyasal dönüşümü gazlaştırma, piroliz ve yakmayı içerir.

Yakma, biyokütleden elde edilen toplam yenilenebilir enerjinin yaklaşık %90'ını üretir [30].

Piroliz, oksijen yokluğunda yaklaşık 400 °C –1.000 °C sıcaklıklarda termal ayrışma yoluyla biyokütleyi katı, sıvı veya gazlı ürünlere dönüştürerek asitler, esterler ve alkoller gibi bileşenler üretebilir. Gazlaştırma, karbon içeren malzemeleri, hava, oksijen veya buharı 500 °C'nin üzerinde, tercihen 700 °C'nin üzerinde bir sıcaklıkta reaksiyona sokarak H₂,CO ve CH₄ gibi gazlar vererek yanıcı veya sentetik gaza dönüştürür [31, 32].

Kimyasal dönüşüm, biyo-dizel üretmek için bitkisel ve hayvansal yağları esterleştirme ve/veya trans esterleştirme yoluyla yağ asidi esterlerine dönüştürür.

Biyokimyasal dönüşüm ile biyokütleyi sıvı yakıtlara (örneğin, alkoller ve alkanlar), doğal gaza (örneğin, hidrojen ve metan), farklı biyo ürünlere (örneğin, karotenoidler, omega-3 ve omega-6 yağ asitleri) ve ayrıca katalizör olarak mikropları ve enzimleri kullanan diğer kimyasal yapı taşlarına dönüştürülür. (örn. asetik asit ve laktik asit) [33].

Biyokütlenin çeşitli dönüştürme süreçleri yoluyla biyoenerji üretimi için sahaya taşınmasının yüksek maliyeti ve biyoenerji hammaddelerinin üretiminin sürdürülebilirliğidir.

2.5. Hidrojen enerjisi

Hidrojen, son iki yüz yıldır endüstriyel kullanılmaktadır. Hidrojen talebi (şu anda yılda >80 Mt) 1975'ten bu yana üç kattan fazla arttı ve artmaya devam etmektedir. Şimdiye kadar, H₂ neredeyse tamamen fosil yakıtlardan üretiliyor, küresel doğal gazın yaklaşık %6 'sını ve küresel kömürün %2 'sini tüketiyor ve yılda yaklaşık 830 Mt CO₂ emisyonuyla sonuçlanmaktadır [34].

Son zamanlarda hidrojen enerjisi büyük ilgi görmektedir çünkü yeşil enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Yenilenebilir bir enerji sisteminde hidrojen yakıt kullanımı mevcut elektrik şebeke sistemine entegre etmek ve son kullanıcıya karbonsuz enerji sağlamak mümkündür [35].

Hidrojen üretimi yapılarak yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanmak, hem teknolojik hem de ekonomik açıdan yakın gelecekte uygulanabilir olacaktır. Elektroliz yoluyla H₂ üretiminden sonra

güvenli ve düşük maliyetli hidrojen depolama ve taşıma teknolojisinin geliştirilmesi gerekmektedir. Hidrojen gaz, ve sıvı halde depolanabilir [36, 37].

H₂ enerjisinin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamak için enerji kullanımı/dönüşüm verimliliğini artırmamız ve kullanılan H₂ maliyetleri düşürmemiz gerekiyor.

2.6. Nükleer enerji

Nükleer enerji, dünya çapındaki düşük karbonlu elektrik üretiminin %40 'ını oluşturan temiz enerjiye önemli bir katkı sağlar ve dünya genelinde yılda yaklaşık 1,7 Gt CO₂ emisyonunu önler. Bu nedenle nükleer enerji, ulusal enerji güvenliğini sağlamak ve karbon nötrü sağlamak için stratejik bir yaklaşımdır.

Nükleer enerji, ağırlıklı olarak nükleer fisyon yoluyla üretilirken, nükleer füzyon teknolojisi halen Ar-Ge aşamasındadır. Bununla birlikte, nükleer fisyon enerjisinin gelecekteki gelişimi birkaç nedenden dolayı son derece belirsizdir: artan maliyetler, kullanılmış radyoaktif yakıtın bertaraf edilmesiyle ilgili zorluklar, tesis güvenliği ve nükleer silahların yayılması riskleri vardır. Üzerinde çalışılan Toryum yakıtlı reaktörlerin daha güvenilir olacağı iddia edilmektedir.

2.7. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, kararlılık, süreklilik ve yüksek kapasite avantajlarıyla birlikte, Dünya'nın iç kısımlarından sağlanan karbon bazlı olmayan ısı enerjisidir [38].

Gelecekteki enerji yapısında kararlı ve sürekli bir temel yükün sağlanmasında önemli rol oynayacaktır. Jeotermal enerjinin birincil kullanım şekli, jeotermal enerji üretimidir. Elektrik enerjisi üretmek üzere bir türbini çalıştırmak için doğal jeotermal buhar (veya jeotermal sıvı ile ısıtılan düşük kaynama noktalı çalışan sıvı buharı) kullanır[39].

Jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı, genellikle orta ila düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklara uygulanabilen termal enerji şeklinde gerçekleşir. Günümüzde, doğrudan jeotermal kullanım teknolojileri temel olarak yer kaynaklı ısı pompaları, jeotermal ısıtma, jeotermal soğutma, jeotermal seralar ve jeotermal kurutma proseslerini içermektedir [40].

Türkiye, 2020 itibarıyla 1.549 MW jeotermal enerji üretim kapasitesi ile jeotermal enerjide en hızlı büyüyen ülkelerden biridir [41].

2020 yılında, küresel jeotermal kullanımı yıllık yaklaşık 300 milyon ton CO₂ emisyon azaltılmasına katkı sağlamıştır.

2.8. Enerji depolama

Çoğu yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik, rastgele ve kesintili olması yenilenebilir enerjinin yaygın olarak uygulanmasını engellemektedir [41]. Bu nedenle, gelişen enerji depolama teknolojisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin güvenilirliğini ve istikrarını sağlaması açısından çok önemlidir [42].

Enerji depolama teknolojileri mekanik, elektromanyetik, elektrokimyasal ve faz değişimli enerji depolama olarak ayrılabilir.

Akışkanın pompalanması ve basınçlı hava enerji depolaması {gibi mekanik enerji depolama teknolojileri, şu anda elektrik enerjisi depolama için tercih edilen ana akım teknolojilerdir [43,44]. Akışkanın pompalanması, büyük ölçekli enerji depolama için en uygun teknoloji olmasına rağmen, kullanımı saha mevcudiyeti ve büyük ilk yatırım maliyetinden dolayı sınırlıdır [45,46].

Basınçlı hava enerji depolama, en düşük maliyetli depolama teknolojisi olarak kabul edilir, ancak genel proje maliyetlerini azaltmak için doğal olarak oluşmuş mağaraların varlığı önemlidir.

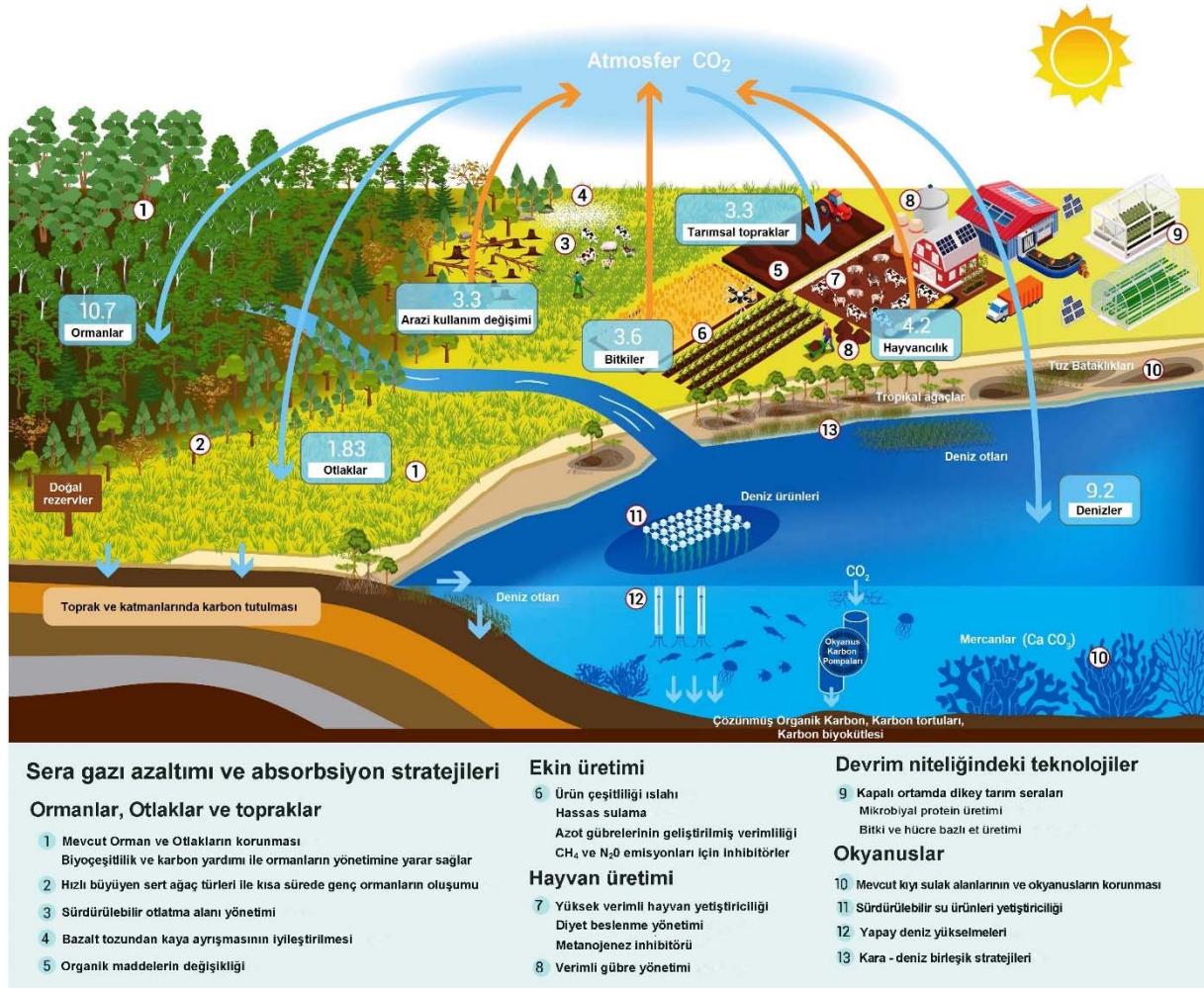
Elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri, yüksek verimlilikleri ve esnek tasarımları nedeniyle en umut verici elektrik enerjisi depolama uygulamalarından biridir.

Farklı enerji depolama teknolojileri farklı güvenilirlik, maliyet, verimlilik, ölçek ve güvenliğe sahiptir. Bu teknolojiler birbirini tamamlar ve uygulamaları, enerji depolama süresi, saha gereksinimleri ve çevresel kaygılar gibi birçok hususa bağlıdır.

Yenilenebilir kaynaklarla birleştiğinde, enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, CO₂ emisyonlarının azaltılmasına ve karbon nötrlüğünün sağlanmasına katkıda bulunacaktır.

Daha önce bahsedilen H₂ ve H₂ den elde edilen metan depolama sistemleri de depolama sorununun çözümüne alternatif getirebilir.

3. KÜRESEL EKOSİSTEMLERDE GELİŞTİRİLMİŞ KARBON YUTAKLARI İÇİN TEKNOLOJİLER



Şekil 3. Küresel sera gazı akışına genel bakış (Gt CO₂ eş yıl⁻¹) ve küresel ekosistemlerde sera gazı azaltımını ve emilimini teşvik etmeye yönelik stratejiler

Küresel ekosistemler, CO₂, metan (CH₄) ve azot oksitini (N₂O) salınmasına ve tutulmasına katkıda bulunur (Şekil 3) ve atmosferik sera gazı bileşimini ve iklimi etkilemektedir. Son 50 yılda, sera gazı emisyonlarının yaklaşık üçte birinin azaltılması karasal ekosistemler tarafından sağlanmıştır [47].

Artan varlıklı bir nüfus için yüksek kaliteli ve büyük miktarda gıda üretme sürecine girmiştir. Küresel gıda sistemleri önemli sera gazı kaynaklarından biridir ve %71'i tarımsal ürünler ile hayvancılık üretim sistemleri ve arazi kullanım değişikliği faaliyetlerinden gelen küresel sera gazı emisyonlarının üçte birinden fazlasını oluşturmaktadır [48].

Orman ekosistemleri en önemli küresel karbon yutaklarından biridir ve orman ekosistemlerinde üretilen karasal biyokütlenin %85-90'ı ile antropojenik (insanların etkisiyle oluşan veya yapılan) sera gazı emisyonlarının %45'ini emer [49].

Okyanus, Dünya yüzeyinin %70'inden fazlasını kaplar ve atmosferden CO₂ tutulmasında önemli bir rol oynar. Şu anda, insan faaliyetlerinden yayılan yıllık CO₂'nin %22,7'si okyanus ekosisteminde tutulmaktadır [50].

Küresel iklim değişikliğinden geri dönüşü olmayan bozulmayı önlemek için biyosfer, biyokütle üretimini arttırmalı daha düşük sera gazı emisyonları ile gıda arzını azaltmalı, CO₂'yi atmosferden uzaklaştırmalı ve biyosferde organik karbon olarak depolamalı ve karbon nötre katkıda bulunmalıdır. Bu anlamda, bitkisel-hayvancılık üretim sistemlerini optimize etmeye, toprakta karbon tutma ile orman ekosistemi sağlığını geliştirmeye, toprak ve deniz ekosistemlerini doğal karbon yutakları olarak kullanmaya önem verilmelidir.

Bunlar, karasal ve deniz ekosistemlerinde (Şekil 3) karbon azaltma ve sabit tutmak için çığır açan teknolojiler sağlayabilir ve aşağıdaki alt bölümlerde daha ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

3.1. Tarımsal gıda üretim sistemlerinde karbon salınımının azaltılması

Tarımsal gıda üretim sistemlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, son 20 yılda yaklaşık üçte bir oranında artmıştır.

Emisyonlar temel olarak bitkisel ve hayvansal üretimdeki artıştan kaynaklanmaktadır [51]. Fermantasyon, gübre ve mera yönetimi ve hayvancılık üretiminde yakıt kullanımından 4,2 Gt CO₂ yıl⁻¹, sentetik azotlu gübre uygulanarak insan yiyeceği ile hayvan yemi üretiminden 3,6 Gt CO₂ yıl⁻¹ ve tarımsal ürün-hayvancılık üretim sistemleri için arazi kullanımındaki değişikliklerden 3,3 Gt CO₂ yıl⁻¹ emisyon oluşmaktadır [52].

Gıda üretim sistemlerinde Karbon tutma ve depolama teknolojilerinin geniş ölçekli uygulanmasını çevreleyen belirsizlikler göz önüne alındığında, tarımsal üretim sistemlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü azaltmak için alternatif teknolojilere veya yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Örneğin, beslenme alışkanlıklarımızı daha az hayvansal, daha çok bitkisel ağırlıklı beslenmeye çevirmeliyiz [51].

3.2. Bitkisel üretim yönetimi.

Tarım arazilerinde gübre ve su kullanımının optimizasyonu, mahsul üretim sistemlerinde sera gazı emisyonlarını büyük ölçüde azaltabilir [53].

Azot kullanım verimliliğini artırmak için yavaş ve kontrollü azot gübre kullanımı ve üre ile azot inhibitörleri içeren azot gübreleri gibi yeni sentetik azot gübre türlerinin geliştirilmesi gerekir [54].

Çiftçilerin ekinleri, toprağı, gübrelemeyi ve sulamayı daha etkili ve hassas bir şekilde yönetmesine olanak tanıyan çok sensörlü drone teknolojisinin kullanımı, daha iyi ekin sistemleri, gübreleme ve sulama uygulamaları ve gelişmiş dijital tarım teknolojilerinin kullanılması, azotlu gübre girdisini azaltılarak ve N₂O emisyonları azaltılabilir [55, 56].

Örneğin, aralıklı sulama CH₄ üretimini önemli ölçüde azaltabilir ve CH₄ oksidasyonunu artırabilir ve bu nedenle pirinç tarlalarından kaynaklanan CH₄ emisyonlarını azaltmak için bir yöntem olabilir [57, 58].

Diğer seçenekler arasında, mahsullerin azotu sabitlemesine yardımcı olmak için mikropların kullanılması, böylece azotlu gübrelerden tasarruf edilmesi ve azotlu gübre endüstrisinin ayak izinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır [49].

3.3. Hayvansal üretim yönetimi.

Fermentasyonun kontrol edilmesi ile geniş getiren hayvancılık üretim sistemlerinde CH₄ (Metan) emisyonlarını azaltmak mümkündür. Metan, fermentasyon sırasında hidrojenin doğal bir yan ürünüdür. Gübre yönetimi uygulamaları, otlak yönetimini optimize ederek, çiftliklerde enerji üreterek ve düşük emisyon faktörüne sahip organik gübreler üretmek suretiyle dolaylı sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir [59].

Karbon ve azot kayıplarını azaltmak için bir kap içerisinde kompostlaşma ve uzun mesafeli nakliye için sıvı gübreden azotu yoğunlaştırmak ve geri kazanmak için ters ozmoz gibi tüm gübre yönetim zincirini kapsayan teknolojilerin geliştirilmesi, gübreden karbon ve azotun geri dönüştürülmesi potansiyelini en üst düzeye çıkarabilir.

Böcek veya mantar proteinleri üretmek için gübre kullanmak, hayvan yemlerinde soya ve balık proteinlerinin yerini alabilecek ve yem üretimiyle ilişkili sera gazı emisyonlarını azaltabilecek başka bir katma değerli teknolojidir [60].

Hayvan yetiştirme teknikleri, daha az sera gazı emisyon yoğunluğuna sahip yüksek verimli hayvanları genetik olarak seçmek ve Böylece aynı miktarda gıdayı üretmek için gereken hayvan sayısını azaltmaktır [61].

3.4. Tarımsal gıda üretimi için devrim niteliğinde teknolojiler.

Biyo-teknolojinin, otomatik kontrol teknolojisinin ve yapay zekanın gelişmesi, fabrika ortamında sebze, meyve ve et üretmeyi mümkün kıldı.

Bitki bazlı et ve hücre bazlı et, hayvansal olmayan kaynaklardan yapay olarak üretilebilir. Yeni bitki bazlı etler, bitkiler veya mantarlardan ekstrakte edilen, daha sonra formüle edilen ve et yerine geçecek şekilde işlenen proteinleri içerir [36].

Hücre bazlı et, kök hücre ve büyük ölçekli hücre kültürü teknolojilerinin geliştirilmesiyle üretilir ve bu nedenle gerçekte ete benzer tat ve dokuya sahiptir [62].

Bununla birlikte, hücre bazlı etin ticarileştirilmesinin önündeki engeller; ölçeğin nasıl büyütüleceği, yasal onay gerekliliği ve yüksek üretim maliyeti gibi etkenlerdir.

Biyoteknolojideki mevcut gelişmeler, mantar, alg, maya ve bakteri hücresi biyokütlesi şeklinde protein açısından zengin yem veya gıda katkı maddelerinin üretimi için güçlü bir platform sağlar [63].

Bununla birlikte, kamuoyu bilincini artırmak ve mikrobiyal proteinlerin yem veya gıda katkı maddeleri olarak düzenleyici onayını almak, düşük karbon emisyonlu sürdürülebilir gıda tedarikini iyileştirmek için yakın zamanda harekete geçmeyi gerektiren büyük zorluklar teşkil etmektedir.

Bitki fabrikası, mevsim değişikliklerinden ve hava koşullarından etkilenmeden yıl boyunca sürekli gıda üretimine izin veren kapalı bir dikey tarım sistemidir.

Işık seviyesi, sıcaklık, nem ve hava bileşimi gibi tüm çevresel parametreler kapalı bir sistemde akıllı bir şekilde kontrol edilir.

Birkaç pilot tesis, tarım arazisi gerektiren büyük ölçekli üretimin fizibilitesini göstermektedir [64]. Sebze, meyve ve şifalı bitkilerin ticari üretimi için fabrikalar inşa edilmiştir.

Bu tür sistemler, geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında arazi kullanımı değişikliği yapmadan son derece yüksek üretkenlik ve düşük sera gazı emisyonları elde edebilir [65, 66].



Yüksek ilk yatırım, işletmeden elde edilen yüksek geri dönüş oranı sayesinde hızla geri kazanılabilir ve tesis fabrikasını çalıştırmak için yenilenebilir enerji kullanılıyorsa, işletmeden kaynaklanan çevresel etki en aza indirilebilir.

3.5. Karasal ekosistemlerde karbon yutağı

Karasal ekosistemler, Dünya üzerindeki hayati derecede önemli karbon yutaklarıdır.

Küresel orman net karbon yutağının 10,7 Gt CO₂-eşdeğeri yıl⁻¹ olduğu tahmin edilmektedir ve esas olarak ılıman bölgelerde dağıtılmaktadır [67].

Otlaklar, dünya üzerindeki buzsuz arazilerin yaklaşık %26'sını kaplar ve küresel karasal karbonun yaklaşık %34'ünü depolar [68].

Bu otlakların toprakları yaklaşık 343 Gt karbon depolar, bu da orman topraklarında depolanan miktardan yaklaşık %50 daha fazladır ve yılda yaklaşık 1,83 Gt CO₂-eşdeğeri yıl⁻¹ için bir yutak görevi görür. Büyük karbon stok boyutuna rağmen, yıllık karbon girdi oranı ve devir süreleri önemli ölçüde belirsizliğe tabidir [69].

Tarımsal gıda üretimi sera gazı emisyonları ile ilgili olsa da, tarım toprakları önemli bir karbon havuzu olabilir ve karbon tutulmasına yaklaşık 3,30 Gt CO₂-eşdeğeri yıl⁻¹ katkıda bulunabilir [70].

Karasal ekosistemler, bitki örtüsünü eski haline getirerek ve organik toprak değişikliklerini dahil ederek karbon tutulmasını kolayca artırabilir [71, 72].

Bu karasal ekosistemlere ek olarak, iç sular da CO₂ kaçırma olarak bilinen atmosfere CO₂ yayar. Küresel iç sulardaki CO₂ kaçak oranının 7,70 Gt CO₂-eşd. yıl⁻¹ aştığı tahmin ediliyor [73].

3.6. Karasal karbon yutağına neden olan faktörler.

Sıcaklık, yağış ve güneş radyasyonu, bitki fotosentezini ve dolayısıyla karasal ekosistemlerin karbon yutak boyutunu etkileyen üç temel iklim faktörüdür [74].

İklim değişikliğinin ve insan müdahalesinin etkisiyle doğal ekosistemlerden büyük miktarda toprak karbonu kayboldu [75].

Atmosferik CO₂ konsantrasyonu ve büyüme mevsimi gibi diğer faktörler de CO₂'nin karasal ekosistemler tarafından emilmesini etkiler [76].

Karasal bitkilerin büyümesi, topraktaki Azot ve Fosfor mevcudiyeti ile büyük ölçüde sınırlıdır. Bu nedenle, bu besin maddelerinin toprağa eklenmesi, bitki üretimini ve ekosistem karbon tutumunu artırabilir [77].

Ancak ekosistem karbon depolaması, üretim ve ayrışma arasındaki dengeye bağlıdır. Ayrışmanın uyarılması, gübrelemenin neden olduğu üretimden daha fazlaysa, sonuçta ekosistemden net bir karbon kaybı olacaktır [78].

Çayırlar en büyük karasal ekosistemlerden biridir ve otlatma, küresel olarak otlakların birincil arazi kullanımüdür [79].

Dünya çapındaki meraların büyük bir yüzdesi, arazinin aşırı kullanımına maruz kalmaktadır. Bu tür otlaklar azalan canlı hayvan sayısının artmasını sağlarken bu otlaklar tarafından desteklenen topluluklarda ekonomik ve sosyal sorunlar yaratılır[80].

3.7. Karbon yutaklarını geliştirmeye yönelik teknolojiler.

Karadaki doğaya dayalı faaliyetler, yeniden ağaçlandırma ve ağaçlandırma, sürdürülebilir orman yönetimi, topraktan karbon tutma ve biyokömüre dönüşüm gibi süreçlerle biyokütle karbon tutulmasını sağlar [19, 81].

Yapılan bir araştırma, orman örtüsündeki artış nedeniyle küresel CO₂ emisyonunda önemli bir azalma olduğunu, 1991 ile 2000 yılları arasında ortalama 4.3 'ten, 2016 ile 2020 yılları arasında 2.9 Gt CO₂-eşdeğeri yıl⁻¹ olduğunu ifade etmektedir [82].

Bu nedenle, ormanlık alanların korunması, karasal ekosistemlerin karbon yutaklarını geliştirmenin temelidir. Orman ekosistemlerinde karbon tutulması için, uygun ağaç türlerinin seçimi, rotasyon uzunluğu ve gübreleme rejimleri gibi orman yönetim stratejilerini optimize etmek, ormanların karbon tutma miktarını artırmanın etkili yollarıdır [83].

Ormanlarda daha hızlı büyümesi ve daha fazla karbon tutulmasına yol açacaktır [84].

Orman ve otlaklarda atmosferik azotun birikimine bağlı toprak asitlenmesi ve ekili alanlarda aşırı azot gübre uygulamasından da topraktaki inorganik karbon kaybını azaltmak için kaçınılmalıdır [85]. Büyük ölçekli CO₂ giderimi için ezilmiş kalsiyum ve magnezyum açısından zengin silikat kayaların toprağa uygulanması önerilir [86].

Bu teknoloji, toprak alkalinitesini artıran geliştirilmiş kaya ayrışması adı verilen ve böylece atmosferik CO₂, sonunda depolanan karbonun kara yüzeyi akışı yoluyla uzun bir ömre sahip olduğu okyanusa taşınmak üzere çözülmüş inorganik karbona dönüştürülebilir.

Turbalıklar, dünyadaki sulak alanların %60'ını oluşturur ve karbon döngüsünde çok önemli bir rol oynar. Turbalıklarda depolanan hayati karbonu korumak için su seviyelerinin yükseltilmesi ve turbalıkların kurutulmasından kaçınılmalıdır [87].

3.8. Deniz ekosistemlerinde karbon yutağı

Okyanusta depolanan toplam karbon miktarı, atmosferdekinden yaklaşık 44 kat daha fazladır ve depolanan karbonun ortalama kalış süresi birkaç yüz yıldır [49, 88].

Bu deniz ekosistemlerinde sabitlenen ve depolanan atmosferik karbon, mavi karbon olarak adlandırılır [89].

Okyanus karbonu ve kıyı mavi karbonunu yutar. Birkaç fiziksel ve biyolojik süreç, okyanus karbon yutak boyutunu belirler.

"Çözünürlük karbon pompası", hava üst okyanusla karışıp burada çözünürken atmosferik CO₂'yi uzaklaştırır.

"Biyolojik karbon pompası", atmosferdeki CO₂'nin okyanus mikroorganizmaları tarafından fotosentetik absorpsiyonudur [88]. ve derin okyanusa batan biyojenik parçacıklar veya çözülmüş organik maddeler taşınarak okyanus derinliklerinde karbonun uzun vadeli olarak tutulması sağlanır [90].

Kıyı ekosistemleri, atmosferik CO₂'yi fotosentetik olarak tutmada oldukça verimlidir [91]. ve değişen bir karbon fraksiyonu, gelgitle sular altında kalan alt toksik ve anoksik çökeltilere gömülür ve böylece atmosfere geri dönmesi büyük ölçüde engellenir [92].

Küresel olarak gelgit bataklıkları ve kıyılardaki ağaçlar, okyanus tabanında biriken organik karbonun %30'u olan yılda 196,72 Tg CO₂ tutar. Bu kıyı ekosistemlerinde mavi karbon olarak depolanan karbon, deniz seviyesindeki yükselmenin yol açtığı sürekli toprak ve tortu organik karbon birikimi ile birlikte bin yıl boyunca korunabilir, deniz ekosistemlerinde karbon tutma etkinliği karasal ekosistemlerden çok daha yüksektir [93].

Deniz çayı ekosistemlerinin yılda 176–411 Tg CO₂-eşdeğeri yıl⁻¹ biriktirdiği tahmin edilmektedir [91].

3.9. Mavi karbon yönetimi için uygulama.

Bu deniz ekosistemlerinin sürdürülebilir yönetimi, korunması ve restorasyonu, insanların bağımlı olduğu karbon tutma ve diğer ekosistem hizmetlerinin sağlanmasını desteklemek için hayati öneme sahiptir [94].

Mavi karbonu artırmanın olası bir yolu, karada kimyasal gübre uygulamasını azaltarak deniz ekosistemlerinde mikrobiyal karbon tutulmasını teşvik etmektir [95].

Bu, karbon depolama ve sürdürülebilir kalkınmayı başarmak için kara ve deniz entegre stratejilerinin benimsenmesi ihtiyacını akla getiriyor.

Artırılmı ş kanalizasyon akışını nehirlerle durdurmanın yanı sıra, tarımda kimyasal gübrelemenin azaltılması, deniz ekosistemlerine antropojenik besin akışını en aza indirebilir, böylece çözünmüş organik karbonun bozunma ve solunum için mobilizasyonunu azaltabilir [96].

Bu süreç, nehirlerde ve okyanuslarda ötrofikasyonu ve gelgitleri azaltabilir ve mikrobiyal karbon pompası yoluyla derin okyanus karbon tutulmasını artırabilir.

Kıyı ekosistemlerinin büyük miktarlarda karbon depolama ve diğer ekolojik işlevleri sağlamadaki önemi nedeniyle, kıyı ve açık su ekosistemlerini korumaya ve eski haline getirmeye yönelik politikaların güçlendirilmesi gerekmektedir [96, 97].

Bu ekosistemlerin başka arazi kullanımlarına dönüşmesini önlemek ve bozulmuş kıyı sulak alanlarını eski haline getirmek karbon tutulmasını artırabilir [98, 99].

Kıyı sulak alanları ve açık sular da dahil olmak üzere deniz ekosistemleri, Dünya üzerindeki en büyük karbon yutağı olarak kabul edilir. Mavi karbon üreten kıyı ekosistemleri, karbonu çökeltilere gömmek için en etkili doğal ekosistemlerden bazılarıdır. Bu deniz ekosistemlerinin karbon tutma veya negatif karbon emisyon kapasitesinin iyileştirilmesi, karbon nötre ulaşmak için temel bir fırsattır. Deniz ekosistemlerinin korunması ve restorasyonu, karbon tutulmasını artırmanın ilk adımı ve en hızlı yoludur.

3.10. Küresel atığın karbon ayak iziyle mücadele

Karbon nötr bir araç olarak sıfır atık biyokömürdür.

Gıda, kentsel ve endüstriyel sistemlerin geniş çapta genişlemesiyle, her yıl küresel olarak milyarlarca ton katı atık üretiliyor. 2050 yılına kadar dünyada her yıl üretilen atık miktarının 2016 yılındaki 2,01 milyar tondan 3,4 milyar tona çıkacağı tahmin ediliyor [100].

Dünya nüfusunun sadece %16'sına sahip olmasına rağmen, yüksek gelirli ülkeler dünyadaki atıkların %34'ünü üretmektedir. Atıkları arıtmanın en yaygın yolu, sera gazı, kanserojen bileşikler ve diğer toksik maddelerin emisyonunu artıran ve dolayısıyla çevre ve insan sağlığı için uzun vadeli tehditler oluşturan açık atık yakmadır [101].

Atık depolama alanları ve açık atık yakma ile ilgili bu sorunları ele almak, güvenli atık yönetim sistemleri oluşturup işletmekten çok daha pahalıdır. Bu nedenle, sürekli artan katı atık hacmiyle başa çıkmak için alternatif yöntemler bulmak ve geliştirmek önemlidir.

Bu nedenle, sürekli artan katı atık hacmiyle başa çıkmak için alternatif yöntemler bulmak ve geliştirmek önemlidir. Bu tür alternatifler, çevre dostu süreçlere dayalı, uygun maliyetli olmalı, iklim değişikliğinin azaltılmasına katkıda bulunmalı, sürdürülebilir kalkınmayı desteklemeli ve ekonomik ve ekolojik faydalara yol açmalıdır. Bu şekilde, katı atığın biyokömüre termokimyasal dönüşümü, iklim değişikliğinin hafifletilmesi ve karbon tutulmasına ek olarak döngüsel ekonomiye çok işlevli faydalar sağlayabilir.

Hammaddelerin biyokömüre termo-kimyasal ayrışması, piroliz, hidrotermal karbonizasyon, kavurma, gazlaştırma ve geleneksel karbonizasyon gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir [102].

Bu yöntemler arasında piroliz, biyo-yağlar ve yoğunlaşmayan gazlar üretirken aynı zamanda kalıcı biyokömür ürünleri olarak hammaddelerin üçte birini koruduğu için biyokömür üretmek için yaygın olarak kullanılır [103].

Tarımsal ürün kalıntıları, orman kalıntıları, hayvan gübresi, gıda atıkları, endüstriyel ve kentsel biyolojik atıklar gibi çok sayıda organik kaynak, farklı amaçlar için biyokömür üretmek için kullanılabilen hammaddelerdir [104].

Bazı araştırmacılar kömür üretimi için plastik atığın pirolizini araştırarak büyük ilerleme kaydederken, diğerleri organik materyallerin ve plastiklerin birlikte pirolizini incelediler [103, 105].

Fosil yakıt türevli malzemelerden kömür üretimi, ne atmosferden karbondioksiti çekmek ne de toprak düzenleyici olarak nitelendirildiği için ancak inşaat malzemesi olarak kullanılabilir.

Biyokömür büyük endüstriyel ölçekten küçük ev ölçeğine kadar birçok farklı ölçekte üretilebilir ve ayrıca tarım arazilerinde de üretilebilir [106].

Bu nedenle, yaygın olarak dağıtılan atıklardan biyo(kömür) üretimi, karbon nötrü elde etme yarışında sosyo-ekonomik ve çevresel öneme sahiptir. Birden fazla işleve sahip biyokömürü sürdürülebilir bir şekilde üretme olasılığı, biyokömür endüstrisini tüm insanlar ve çevre için daha sürdürülebilir ve müreffeh bir gelecek yaratmak için uygun bir merkez olarak konumlandırıyor [107].

3.11. Sürdürülebilir kalkınma için Biyo-kömür.

Biyo-kömür, atıkların temizlenmesine ek olarak, dögüsel bir ekonominin ve sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesinde çeşitli insan faaliyetlerinde de önemli bir rol oynar (Şekil 3).

Yüksek oranda yüklü bir yüzey ve çoklu fonksiyonel gruplar veya hidrofobik yüzeyler oluşturma olasılığından hareketle biyokömür, CO₂'yi yakalayabilen ve çeşitli organik kirleticileri (örn., poliklorlu bifeniller ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar) ve katı, sulu ve/veya gazlı ortamlardan inorganik kirleticiler (örn. fosfat, amonyak, sülfid ve ağır metaller) [108, 109].

Bir toprak düzenleyici olarak, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek bitki üretkenliğini ve fotosentez oranını artırabilir, böylece karasal ekosistemlerde karbon tutulmasına katkıda bulunur ve iklim değişikliğini hafifletir [110].

İnşaat ve inşaat malzemelerinin imalatında düşük maliyetli karbon bazlı bir katkı maddesi olarak biyokömür kullanılarak atık değerlendirme üzerine yapılan araştırmalar ümit verici sonuçlar vermiştir [111].

Biyo-kömür, ultra yüksek performanslı betonda çimentonun yerini alabilir ve çimento matrisi ile polipropilen elyaf arasındaki arayüz bağınyı güçlendirebilir [111].

Karbon negatif üretim sürecinin yardımıyla biyo-kömür, yeşil çimento ve beton üretiminde özel bir konuma sahiptir.

İnsan uygarlığının ilerlemesi için daha iyi bir dünya inşa etmek için önemli bir araç haline gelebilir.

Biyo-kömürün özellikleri ve uygulanabilirliği, farklı piroliz koşulları ve ham madde türleri nedeniyle önemli ölçüde farklı olduğundan, biyo-kömür optimizasyonunda gelecekteki gelişmeler, hammadde ön işleme, piroliz işleme, çalışma faktörlerine ve ürün verimine odaklanmalıdır.

Son olarak, biyo-kömür üretimi, karakterizasyonu ile yaşam döngüsü analizi sürecini optimize etmesi, ekolojik stratejileri entegre etmesi politika yapımcıların, biyo-kömür üreticilerinin, kullanıcıların ve diğer ilgili paydaşların birlikte çalışması karbon nötre doğru gidişi hızlandıracaktır.

3.12. Biyo bazlı ürünlerde karbon tutumu.

Tekrar kullanarak ve geri dönüştürerek Biyo-kütle kullanımı ile CO₂'yi dönüştürmek, iklim değişikliğini azaltmanın ve döngüsel bir biyoekonomiyi teşvik etmenin sürdürülebilir bir yoludur.

Potansiyel olarak, tüm fosil yakıt ürünleri biyo-kütleden üretilebilir. Biyoenerji sağlamanın yanı sıra yenmeyen biyo-kütle, plastik, yağlayıcı, tıbbi cihaz, boya ve diğer değerli ürünlerin endüstriyel üretiminde yenilenemeyen fosil yakıt kaynaklarının yerini alabilir [112].

Biyoteknoloji, Nanoteknoloji ve Nanobiyoteknoloji dahil olmak üzere çeşitli alanlardaki son bilimsel ve teknolojik gelişmeler, küresel üretim sistemlerinin gerçekten sürdürülebilir gelişimi için biyo-kütle kullanımının yolunu açmıştır. Örneğin, mikroorganizmalar, özellikle bakteriler, besin kaynağı olarak nişasta, yağ asitleri, selüloz, şekerler, proteinler ve diğer organik maddeler gibi çoğu biyolojik kaynağı kullanabilir ve bunları biyopolimer üretimi için uygun çeşitli monomerlere dönüştürebilir [113].

Fosil yakıtlardan elde edilen geleneksel polimerlerin aksine, biyopolimerler, doğrudan veya dolaylı olarak atmosferden CO₂ yakalayan fotosentetik bitkilerden üretildiklerinden, karbon nötre ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerimizle uyumludur.

Nişasta bazlı polimerler, biyobozunurlukları, biyouyumlulukları, gerilme mukavemetleri ve termal verimlilikleri nedeniyle en yaygın kullanılan ve uygun maliyetli biyomalzemelerdir ve küresel biyoplastik ve biyopolimer pazarının %50 ila %80'ini oluşturur [114].

Farklı biyokütle hammaddelerinden elde edilen plastikler, bunların kullanımları ve petrokimyasal plastiklerle karşılaştırıldığında çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde belgelenmiştir [115].

Kuşkusuz, biyomalzemelerin gücünden yararlanmak, petrol bazlı polimerlerin karbon ayak izini ve çevresel etkisini azaltabilir ve geleneksel polimerlerden daha geniş bir uygulama yelpazesi sunar.

Ahşap bazlı malzemeler, enerji depolama, güneş-buhar destekli tuzdan arındırma, su arıtma ve hafif yapısal malzemeler, plastik, elektronik, cam ve iyonik cihazlar üretimi dahil olmak üzere çeşitli ileri teknolojilerdeki büyük ölçekli uygulamalarda nanomalzemeler kullanılabilir [116].

Döngüsel bir biyoekonominin geliştirilmesi ile karbon biyo-bazlı ürünlerde depolanması sonucu, karbon nötre doğru umut verici bir yoldur.

4. CO₂ YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA İÇİN TEKNOLOJİLER

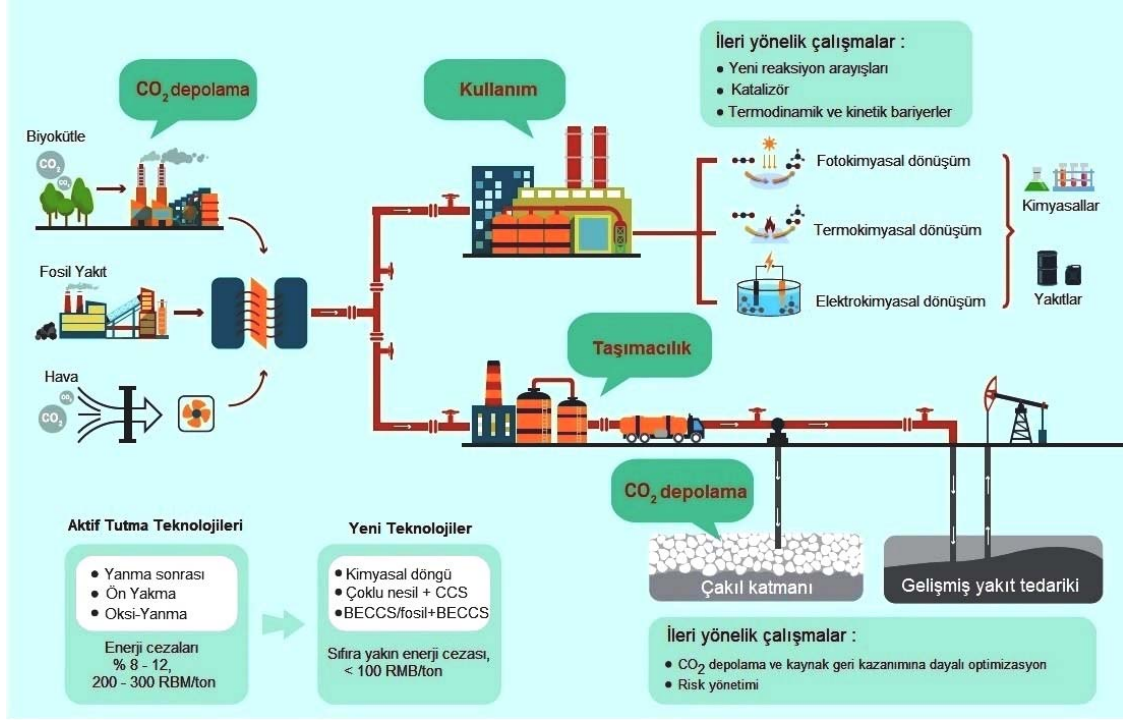
CO₂ yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojisi üç farklı süreçten oluşur:

Bunlar: CO₂'yi emisyon kaynaklarından ayırma, CO₂ dönüşümü ve kullanımı, taşıma ve atmosferden uzun süreli izolasyonla yeraltında depolama.

CCUS, CO₂ emisyon azaltma hedefini gerçekleştirmek için gerekli bir teknolojidir [117].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), emisyonları azaltma görevinin yalnızca enerji kullanım verimliliğini artırarak ve enerji yapısını ayarlayarak gerçekleştirilemeyeceğini, aynı zamanda küresel sıcaklık artışını 2050 ye kadar 2 °C'nin altında tutmak için CO₂ emisyonlarının %19'unun yakalanması ve depolanması gerektiğini ifade etmektedir. CCUS olmadan, CO₂ azaltmanın toplam maliyeti 2050'ye kadar %70 artacaktır [118].

Karbon yakalama ve kullanma teknolojileri Şekil 4'te özetlenmiştir.



Şekil 4. Endüstride CO₂ tutma teknolojisini geliştirmeye yönelik yol haritası

4.1. CO₂ tutma ve depolama

CO₂ tutma ve depolama (CCS) kavramı ilk olarak 1977'de geliştirildi ve şimdiye kadar üç geliştirme aşamasından geçti. 1977'den 1996'ya kadar olan ilk aşama, teknoloji geliştirme aşamasıydı. 1989'da Massachusetts Teknoloji Enstitüsü ilk CCS teknoloji projesini başlattı [119].

Norveç hükümeti, CCS projelerini mali olarak desteklerken, ülkenin iklim hedeflerine ulaşabilmesini sağlamak için 1991 yılında bir karbondioksit vergisi koydu. 1997'den 2018'e kadar olan ikinci aşama, teknolojinin büyük ölçekli tanıtım aşamasıydı. Üçüncü aşama 2018'de başladı ve CCS teknolojisi ticarileştirmenin ilk aşamalarına girdi.

CCS projeleri için 50 \$/ton CO₂'ye kadar bir vergi kredisi sağlayan ABD vergi değişikliğinden sonra büyük ölçekli ticari CCS projelerinin sayısı giderek arttı.

4.2. Karbon tutma teknolojilerinin mevcut durumu.

Günümüzde, CO₂ tutma teknik yolları, temel olarak yanma sonrası yakalama, yanma öncesi yakalama ve oksijen-yakıt yanmasını içerir. Yanma sonrası CO₂'i egzoz gazından ayırmak ve enerji sistemlerinde CO₂ geri kazanımının en basit yollarından biridir.

Yanma sonrası yakalama teknolojisinde kullanılan gaz ayırma teknolojileri, fiziksel absorpsiyon, kimyasal absorpsiyon, membran ayırma vb. oluşmaktadır.

Büyük miktarda yanma sonrası, baca gazı arıtılması ve kimyasal absorpsiyon yöntemi ile düşük CO₂ konsantrasyonu elde edilmesi, yanma sonrası CO₂ yakalama için en uygun ayırma teknolojisidir.

Yanma sonrası yakalamanın avantajı, kolayca çalıştırılabilmesi ve güç üretim sistemini çok fazla değiştirmeye gerek olmamasıdır.

Azotun seyreltilmesi nedeniyle, bir enerji sisteminin atık gazındaki CO₂ konsantrasyonu genellikle çok düşüktür (genellikle, kömürle çalışan elektrik santrallerinin atık gazındaki CO₂ konsantrasyonu %10-



15 ve doğal gazınki enerji santralleri daha da düşüktür, yaklaşık %3-%5) ve atık gaz arıtma miktarı fazladır.

Kömür yakıtlı enerji santrallerinin egzoz gazından CO₂ 'yi ayırmak için kimyasal absorpsiyon yöntemini kullanırken, enerji tüketimi yaklaşık 0,37–0,51 MWh/t CO₂'dir, bu da %90 CO₂ ayırımı anlamına gelirken enerji sisteminin verimliliğini yüzde 11,0–15,0 oranında azaltacaktır ve bir santralin yatırım maliyetini %50-%80 arasında artmaktadır.

Yakma sonrası ayırmanın mevcut araştırma odağı, verimli emiciler bulmak ve CO₂ ayırmanın enerji tüketimini azaltmak için ayırma sürecini optimize etmektir.

Ancak yakma sonrası ayırmanın yüksek enerji tüketiminin temel nedeni, bacadan atılan gazdaki düşük CO₂ konsantrasyonudur.

Yanmadan önce CO₂'yi ayırma yöntemine ön yakma denir.

Yakıt, sentez gazından (esas olarak CO ve H₂'den oluşur) gazlaştırılır. Ardından sentez gazda bulunan CO, CO₂ ve hidrojene dönüştürülür ve ardından CO₂, H₂'den ayrılır.

Kömür Gazlaştırılmalı Kombine Çevrim santralinde, ön yakma ile %90 oranında CO₂ tutulması durumunda net güç verimini yüzde 8,0-10,0 oranında azaltabileceğini göstermektedir [120].

Kömür Gazlaştırılmalı Kombine Çevrim santralinde, ön yakma için, hidrojen açısından zengin gazla çalışan gaz türbinleri ile daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

Yakıt, oksijen ve CO₂ ortamında yakılır ve baca gazının bir kısmı sirkülasyon için sisteme geri döndürülmesi durumunda baca gazındaki CO₂ konsantrasyonu %95'ten fazla olabilir.

Oksijen ile yakmanın avantajı, bacadan atılan duman gazının esas olarak CO₂ ve su buhardan oluşması nedeniyle CO₂ ayırmanın enerji tüketimi sifıra yakın olmasıdır.

Bununla birlikte, oksijen üretimi ihtiyacının artması, hava ayırma ünitesinin güç tüketimi yükseltir ve sistemin güç değerini %10-%25 civarında azalmaktadır. Ayrıca hava ayırma ünitesi kapasite artacağından ek yatırım maliyeti artacaktır.

Oksijen yanması ile %90 CO₂ tutulması durumunda net güç verimliliği yüzde 10,0–12,0 oranında azalacaktır. Oksijen ile yakma sisteminin verimliliğini artırmanın yolu, hava ayırma teknolojisinin verimini arttırmaktan geçmektedir [120].

4.3. CO₂ taşımacılığının mevcut durumu.

CO₂ nakliyesi, tutulan CO₂'nin kullanılmak üzere veya depolama alanına taşınması işlemi anlamına gelir.

CO₂ taşımacılığı, boru hatları, gemiler, demiryolları, yollar vb. içeren petrol veya gaz taşımacılığına benzer ve boru hattı taşımacılığı teknolojisinin uygulama potansiyeli yüksektir. Son yıllarda, dünya çapında CO₂ boru hattı taşımacılığı için birçok uygulama yapılmıştır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri 5.000 km'den fazla bir boru hattı ağı inşa etti.

Şu anda, Çin'de CO₂ taşımacılığı esas olarak karayolu taşımacılığı ile düşük sıcaklıkta depolama tanklarına dayanmaktadır.

Düşük basınçlı CO₂ taşımacılığı alanında, ham petrol ve doğal gaz boru hattı taşımacılığı deneyiminden öğrenebiliriz; bu arada, yüksek basınçlı, düşük sıcaklıkta ve kritik üstü CO₂ taşınmasına ilişkin araştırmalar daha yeni başlamıştır.

4.4. CO₂ depolamanın mevcut durumu.

CO₂ depolama, tutulan CO₂'nin mühendislik ve teknik yollarla jeolojik yapılarda depolanmasını ifade eder. CO₂ 'in atmosferden uzun vadeli izolasyonu sağlayabilir.

Farklı depolama jeolojik oluşumları temel olarak karadaki tuzlu çakıl katmanlarında depolanmasını, tuzlu çakıl katmanlarının deniz tabanında depolanmasını ve tükenmiş petrol ve gaz sahaları depolamasını ve diğer teknolojileri içerir.

CO₂ jeolojik depolama teknolojisi geliştirilmesinin önündeki ana engeller, uzun vadeli güvenlik ve güvenilirliktir.

4.5. Zorluklar ve gelecekteki teknoloji geliştirme yönergeleri.

Dünya çapında görülen ve ticarileştirilmekte olan CO₂ tutma teknolojileri, esas olarak yakma sonrası ayırma teknolojileridir. Ancak, bu tür teknolojilerin enerji tüketimi ve maliyeti yüksektir ve azaltma potansiyeli sınırlıdır.

CCS teknolojisi tanıtımının ilk aşamasında, yakma sonrası teknolojisi nispeten basittir ve teknik zorluğu düşüktür. Bu tür teknoloji genellikle CCS gösteri projelerinde kullanılır. Kısa vadede CO₂ emisyonu azaltma etkileri elde edebilir.

Ancak uzun vadede, bu tür teknolojilerin doğası CO₂ emisyon azaltımı karşılığında daha fazla enerji kullanması nedeniyle, uzun vadeli CO₂ emisyon azaltımı için bu ülkelerin daha fazla enerji maliyetine maruz kalacaktır.

Bu nedenle, CCS teknolojisinin uygulanmasının geniş ölçekte teşvik edilmesi gerekiyorsa, ülkeler yeni çoklu üretim teknolojisi gibi kömürün temiz kullanımı için geliştirmekte olan ülkelere uygun düşük enerjili, düşük maliyetli CCS teknolojileri geliştirmelidir. Kimyasal güç ile çoklu üretim teknolojisi, CO₂ tutma için düşük enerji tüketimine sahiptir.

Kimyasal güç ile çoklu üretimi, hem sentetik yakıtlar/kimyasal ürünler (metanol, dimetil eter ve diğer alternatif yakıtlar gibi) hem de elektrik üretme teknolojilerini ifade eder.

Kimyasal güç çoklu üretim teknolojisi, yalnızca kimya ve enerji endüstrilerinde önemli miktarda enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz. Aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltmak ve CO₂ emisyonlarını düşük maliyetle sağlamak için kömür bazlı alternatif yakıtlar da üretebilir [121, 122]

4.6. Alevsiz kimyasal döngülü yanma teknolojisi.

"Alevsiz" kimyasal döngülü yanma, geleneksel "alevli" yanmadan temel olarak farklıdır: Bu süreçte yakıt ve hava arasında hiçbir temas gerçekleşmez.

İşlem sonrasında, gaz ürünleri yüksek konsantrasyonda CO₂ ve H₂O'dur ve CO₂ ayırma işlemi olmadan geri kazanılabilir. Sıfır enerji tüketimi ile CO₂ ayrıştırılabilir.

"Alevsiz kimyasal döngülü yanma" kullanımı ile sera gazlarını kontrol etmek için yeni bir yoldur.

IPCC tarafından CO₂'nin yakalanması ve depolanmasına yönelik hazırladığı raporda, "Kimyasal döngülü yakma, CO₂'nin %100 tutulmasını sağlamanın bir yolu olduğunu ifade etmiştir [120].

1990'larda Çinli bilim adamları, kimyasal döngülü yanma ile yüksek konsantrasyonlu CO₂ zenginleştirmesini gerçekleştirmişlerdir [123].

Uluslararası Enerji Ajansı, gelecekte sıfır fosil enerji emisyonu için kimyasal döngülü yanmanın ilk sırayı alacağını ifade etmiştir.

4.7. Negatif emisyon teknolojisi

Biyokütle ve güneş enerjisi ile birleştirilmiş fosil enerjisi olarak tanımlanmaktadır.

Fosil enerji kullanımındaki kademeli düşüş ve yenilenebilir enerji tüketimi kullanımındaki artışla birlikte, CCS teknolojisi fosil enerji ve biyokütle-güneş enerjisi ile birleştiğinde negatif emisyonlar sağlayabilir.

4.8. CO₂ depolamanın güvenlik ve güvenilirlik değerlendirmesi.

CO₂ jeolojik depolama teknolojisinin önündeki ana engelleri, depolama potansiyeli ve uzun vadeli güvenlidir.

Çakıl taşı katmanlarının ve CO₂ depolamaya uygun petrol sahalarının mekansal dağılımları, teknolojilerin ve yorumların sınırlamaları nedeniyle ayrıntılı jeolojik veriler elde etmek için yeterli teknolojiden yoksundur ve ardından, CO₂ depolama kapasitelerinin değerlendirilmesi aşırı zorluklarla karşı karşıyadır.

Uzun vadeli risk ve güvenlik sorunları, mevcut anlayışların ve teknolojik zorluklarla karşı karşıyadır.

4.9. CO₂ kullanımı

CO₂ kimyasal kullanımı, belirli sıcaklık, basınç ve bir katalizör yardımıyla CO₂'yi diğer yüksek değerli kimyasal maddelere dönüştürmesini sağlar. CO₂ kimyasal kullanımı, CO₂'nin dönüşümünü ve kullanımını doğrudan gerçekleştirebilir ve belirli bir doğrudan emisyon azaltma etkisine sahiptir [124].

Bu teknolojik uygulama, fosil yakıtların veya ham maddelerin kullanımının yerini alacak yeni bir kimyasal sentez yolunu oluşturabilir.

Litosferden atmosfere karbon akışı ile dolaylı emisyon azaltma etkisine nedeniyle gelecekteki karbon nötr senaryolarına önemli bir katkı sağlayacaktır.

CO₂ dönüşümünü kolaylaştırmak için termokimyasal kataliz, fotokimyasal kataliz, elektrokimyasal kataliz ve diğerleri (enzimatik kataliz ve organometalik kataliz) gibi çeşitli prosesler geliştirilmiştir ve son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedildi.

4.10. Gelecekteki zorluklar ve CO₂ katalizinin temel teknolojileri.

CO₂'nin yakıtlara ve kimyasallara dönüştürülmesi, hem termodinamik hem de kinetik engellerin aşılmasında hala bir takım zorluklar vardır.

Fotokimyasal ve elektrokimyasal kataliz için CO₂ dönüşümünün büyük ölçekli uygulaması gerçekleştirilmemiştir.

Yenilenebilir enerjilere geçiş, mevcut fosil yakıtla dayalı enerji üretim, iletim ve tedarik sistemlerinin tamamen yeniden inşa edilmesi veya yenilenmesi gerektiği anlamına gelebilir ve bu çok büyük bir maliyettir.

CCUS, fosil yakıtlardan hidrojen üretimi gelecekte temiz yakıt üretimi için önemli bir rol oynayacaktır. Düşük maliyetli kimyasal döngülü yakma, yenilenebilir enerji çoklu üretimi ve hibrit yenilenebilir fosil yakıtlı enerji sistemleri, karbon nötr bir dünya inşa etmeye yardımcı olabilecek umut verici teknolojilerdir.

5. UYDU GÖZLEMİNE VE DİJİTAL DÜNYAYA DAYALI KARBON NÖTR

Uydu gözlemi ve Dijital Dünya teknolojisi alanında, karbon nötrleştirme desteği, küresel sera gazı konsantrasyonunun hızlı izlenmesini, toprak örtüsü değişikliğini ve küresel doğal karbon yutağının mekansal analizini içerir.

Bu, karbon emisyonlarının zirvesine ne zaman ulaşılacağı ve doğal bir karbon yutak potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir destekleyici rol oynar.

5.1. CO₂ emisyonlarının uydu gözlemleri

Sera gazı gözlem yöntemleri yer tabanlı izleme ve uydu uzaktan algılamayı içermektedir.

Doğru sera gazı konsantrasyon verileri sağlamak için erken aşamada küresel bir sera gazı gözlem istasyonları ağı kuruldu [125].

Bununla birlikte, saha sayısındaki sınırlama nedeniyle, mekansal çözünürlük genellikle küresel karbon akısı hesaplama ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli değildir.

Japonya tarafından 2009'da fırlatılan GOSAT, ABD tarafından 2014'te fırlatılan OCO-2 ve 2016'da Çin tarafından fırlatılan TANSAT dahil olmak üzere üç CO₂ uydusu arka arkaya fırlatıldı ve bu da karbon akışı gözlemi yeteneğini önemli ölçüde geliştirdi [126].

5.2. Karbon nötr için Dijital Dünya

Dijital Dünya, esas olarak uydu gözlemlerinden elde edilen büyük miktarda veriyi entegre edecek ve modeller geliştirecek, mevcut veya gelecekteki küresel ekosistemleri uzay ve zamanda çoklu çözünürlüklerde simülasyon yapacak veya tahmin edecek ve ardından sonuçları görselleştirecek.

Bu yeni teknolojiler, karbon döngüsü birçok doğal ve beşeri faktörden dolayı karbon nötrü ve karbon ticareti için çok güçlü faydalar sağlayacaktır [127].

SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Karbon, Dünya'da yaşamın varlığına katkıda bulunan en önemli elementlerden biridir.

Sanayi Devrimi'nden bu yana, karbon bazlı kaynaklar; enerji, gıda ve diğer emtiaları üretmek için kullanıldı ve küresel ekosistemleri ciddi anlamda etkiledi.

Fosil yakıtların yaygın kullanımı ve ormansızlaşma, kentleşmenin teşvik edilmesi atmosferik CO₂ 'in artmasına ve sera etkisinden kaynaklanan küresel iklim değişikliğini tetiklemektedir.

Uluslararası topluluklar, karbon emisyonlarını en aza indirmek ve karbon tutulmasını teşvik etmek ve uygun maliyetli sürdürülebilir yöntemler geliştirmekle karşı karşıyadır.

İnsan sağlığını ve çevreyi korumak için yenilenemeyen kaynaklardan mevcut üretim sistemlerini sürdüren ve iklim değişikliğinin getirdiği zorunluluklar yenilenebilir kaynaklara geçmek zorunlu hale gelmiştir.

Enerji, gıda ve endüstriyel üretim sistemlerinde yenilenebilir kaynakların gücünden yararlanmak ve karasal ve deniz ekosistemlerinde karbon tutulmasını teşvik etmek, karbon nötre ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmaya yönelik olası yollar olarak görülmektedir.

Mevcut küresel üretim sistemlerinde sera gazı emisyonlarını azaltan uygulamaları benimsemek için bilimsel, sosyo-ekonomik ve teknolojik çözümler gerekiyor. Bunlar şunları içerir:

1. Küresel yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinin küresel enerji talebini aştığı göz önüne alındığında, sürdürülebilir kalkınmadaki en acil araştırma ihtiyaçları, fosil yakıtların kullanımını aşamalı olarak ortadan kaldırmak için mevcut yenilenebilir enerji üretim eğilimini geliştirmektir.
2. Kimyasal gübrelerin üretimi ve uygulanmasından atık depolama ve yakmaya kadar uzanan gıda sistemlerindeki sürdürülemez yönetim uygulamalarının sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü açıklamaya devam ettiği göz önüne alındığında, gıda sistemlerinden kaynaklanan emisyonları azaltmak ve yutakları iyileştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.
3. CCUS yaklaşımının karbon nötrü arayışımızda çok önemli bir rolü olmasına rağmen, mevcut CCUS teknolojilerinin benimsenmesi, yüksek enerji tüketimleri ve maliyetleri nedeniyle engellenmektedir. Enerji endüstrisinde karbon yakalama ve depolama, düşük ve hatta net sıfır enerji kullanımı elde etmek için bilimsel ve teknolojik yenilikler gerektirir.
4. Dünyanın iklim değişikliğini azaltma hedeflerini karşılama yolunda olduğundan emin olmak için uzaydan sera gazı emisyonlarını izlemenin son derece ilgili olduğu göz önüne alındığında, sera gazı emisyonunu izlemek için uydulardan sera gazı emisyonlarını izlemenin doğruluğu ve uzay-zamansal çözünürlüğü daha da güçlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] “Europe’s Energy Intensive Industries contribution to the EU Strategy for long-term EU greenhouse gas emissions reductions”
- [2] “OUR CARBON FUTURE Reversing global warming while delivering shared prosperity”
- [3] <https://www.nature.com/news/carbon-is-not-the-enemy-1.20976>
- [4] “The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges”
- [5] <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/its-time-for-the-first-green-industrial-revolution/>
- [6] XPRIZE, Carbon Conversion Landscape Analysis, <https://bit.ly/2KJKLgF>
- [7] AVTAR, R., TRIPATHI, S., AGGARWAL, A.K., AND KUMAR, P. (2019). Population–urbanization–energy nexus: a review. Resources 8, 136.
- [8] SARKODIE, S.A., OWUSU, P.A., AND LEIRVIK, T. (2020). Global effect of urban sprawl, industrialization, trade and economic development on carbon dioxide emissions. Environ. Res. Lett. 15, 034049.
- [9] IISD (2020). International institute for sustainable development: world population to reach 9.9 billion by 2050. <https://sdg.iisd.org/news/world-population-to-reach-9-9-billion-by-2050/>.
- [10] RABAEY, K., AND RAGAUSKAS, A.J. (2014). Editorial overview: energy biotechnology. Curr. Opin. Biotech. 27,V–VI.
- [11] LAMPERT, A. (2019). Over-exploitation of natural resources is followed by inevitable declines in economic growth and discount rate. Nat. Commun. 10, 1419.
- [12] RABAEY, K., AND RAGAUSKAS, A.J. (2014). Editorial overview: energy biotechnology. Curr. Opin. Biotech. 27,V–VI.
- [13] HOANG, N.T., AND KANEMOTO, K. (2021). Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. Nat. Ecol. Evol. 5, 845–853.
- [14] TILMAN, D., BALZER, C., HILL, J., and BEFORT, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A 108, 20260–20264.
- [15] MATHUR, M., AND AWASTHI, S. (2016). Carbon neutral village/cluster: a conceptual framework for envisioning. Curr. Sci. 110, 1208–1215.
- [16] WANG, R., XIONG, Y., XING, X., et al. (2020). Daily CO₂ emission reduction indicates the control of activities to contain COVID-19 in China. Innovation 1, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100062>.
- [17] ANDERSON, K., AND PETERS, G. (2016). The trouble with negative emissions. Science 354, 182–183.
- [18] UNFCCC (2015). Paris Agreement (United Nations Climate Change). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [19] CHEN, J.M. (2021). Carbon neutrality: toward a sustainable future. Innovation 2, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100127>.
- [20] World Meteorological Organization (2020). The state of the global climate 2020. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>.

- [21] IEA (2021). About CCUS (IEA). <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- [22] IEA (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector (IEA). <https://www.iea.org/events/net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-system>.
- [23] DUTTA, A., FAROOQ, S., KARIMI, I.A., AND KHAN, S.A. (2017). Assessing the potential of CO₂ utilization with an integrated framework for producing power and chemicals. *J. CO₂ Util.* 19,49–57.
- [24] KILKIS, S., KRAJACIC, G., DUIC, N., et al. (2020). Advances in integration of energy, water and environment systems towards climate neutrality for sustainable development. *Energ. Convers. Manag.* 225, 113410.
- [25] OLABI, A.G., WILBERFORCE, T., ELSAID, K., et al. (2021). Selection guidelines for wind energy technologies. *Energies* 14, 3244.
- [26] REN, K.P., TANG, X., WANG, P., et al. (2021). Bridging energy and metal sustainability: insights from China's wind power development up to 2050. *Energy* 227, 120524.
- [27] IRENA (2020). Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies (International Renewable Energy Agency). <https://irena.org/publications/2020/Dec/Innovation-Outlook-Ocean-Energy-Technologies>.
- [28] NIHOUS, G.C. (2007). A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources. *J. Energ. Resour.-Asme* 129,10–17.
- [29] STATISTICS, G.B. (2020). World bioenergy association. <http://www.worldbioenergy.org/uploads/201210%20WBA%20GBS%202020.pdf>.
- [30] TURSI, A. (2019). A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. *BRJ* 6, 962–979.
- [31] ALPER, K., TEKIN, K., KARAGOZ, S., AND RAGAUSKAS, A.J. (2020). Sustainable energy and fuels from biomass: a review focusing on hydrothermal biomass processing. *Sustain. Energ. Fuels* 4, 4390–4414.
- [32] SIVABALAN, K., HASSAN, S., YA, H., AND PASUPULETI, J. (2021). A review on the characteristic of biomass and classification of bioenergy through direct combustion and gasification as an alternative power supply. *J. Phys.* 1831, 012033
- [33] LIU, Y., WANG, H., JIANG, Z., et al. (2021). Genomic basis of geographical adaptation to soil nitrogen in rice. *Nature* 590, 600–605.
- [34] IEA (2019). The future of hydrogen. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [35] COUNCIL, H. (2017). How hydrogen empowers the energy transition. <https://hydrogencouncil.com/en/study-how-hydrogen-empowers/>.
- [36] HE, Z., QIAN, Q., MA, J., et al. (2016). Water-enhanced synthesis of higher alcohols from CO₂ hydrogenation over a Pt/Co₃O₄ catalyst under milder conditions. *Angew. Chem. Int. Edit.* 55, 737–741.
- [37] HE, Z., QIAN, Q., MA, J., et al. (2016). Water-enhanced synthesis of higher alcohols from CO₂ hydrogenation over a Pt/Co₃O₄ catalyst under milder conditions. *Angew. Chem. Int. Edit.* 55, 737–741.
- [38] WU, Y., AND LI, P. (2020). The potential of coupled carbon storage and geothermal extraction in a CO₂-enhanced geothermal system: a review. *Geotherm. Energy* 8,19.
- [39] LUND, J.W., AND TOTH, A.N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 world-wide review. *Geothermics* 90, 101915.
- [40] GOLDBRUNNER, J. (2020). Austria—country update. In *Proceedings World Geothermal Congress (Reykjavik, Iceland: EGEC)*, pp. 1–19.
- [41] LU, W.J., YUAN, Z.Z., ZHAO, Y.Y., et al. (2017). Porous membranes in secondary battery technologies. *Chem. Soc. Rev.* 46, 2199–2236.
- [42] YUAN, Z., YIN, Y., XIE, C., et al. (2019). Advanced materials for zinc-based flow battery: development and challenge. *Adv. Mater.* 31, 1902025.
- [43] BUENO, C., and CARTA, J.A. (2006). Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 10, 312–340.
- [44] REHMAN, S., AL-HADHRAMI, L.M., and ALAM, M.M. (2015). Pumped hydro energy storage system: a technological review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 44, 586–598.
- [45] BUDT, M., WOLF, D., SPAN, R., AND YAN, J. (2016). A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments. *Appl. Energ.* 170, 250–268.

- [46] SWIDER, D.J. (2007). Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation. *IEEE Trans. Energy Convers.* 22,95–102.
- [47] BALLANTYNE, A.P., ALDEN, C.B., MILLER, J.B., et al. (2012). Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* 488,70–72.
- [48] CRIPPA, M., SOLAZZO, E., GUIZZARDI, D., et al. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat. Food* 2,1–12.
- [49] WANG, X.J., BEI, Q.C., YANG, W., et al. (2020). Unveiling of active diazotrophs in a flooded rice soil by combination of NanoSIMS and $^{15}\text{N}_2$ -DNA-stable isotope probing. *Biol. Fert. Soils* 56, 1189–1199.
- [50] FRIEDLINGSTEIN, P., O'SULLIVAN, M., JONES, M.W., et al. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 3269–3340.
- [51] FRANK, S., HAVLIK, P., STEHFEST, E., et al. (2019). Agricultural non- CO_2 emission reduction potential in the context of the 1.5 degrees C target. *Nat. Clim. Change* 9,66–72.
- [52] POORE, J., AND NEMECEK, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360, 987–992.
- [53] SHANG, Z., ABDALLA, M., XIA, L., et al. (2021). Can cropland management practices lower net greenhouse emissions without compromising yield? *Glob. Chang. Biol.* 27, 4657–4670.
- [54] DAWAR, K., KHAN, A., SARDAR, K., et al. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and mulch on N_2O emission and fertilizer use efficiency using N-^{15} tracing techniques. *Sci. Total Environ.* 757, 143739.
- [55] MARESMA, A., LLOVERAS, J., AND MARTINEZ-CASASNOVAS, J.A. (2018). Use of multispectral airborne images to improve in-season nitrogen management, predict grain yield and estimate economic return of maize in irrigated high yielding environments. *Remote Sens.* 10, 543. *Remote Sens.* 10, 543.
- [56] SA, I., POPOVIC, M., KHANNA, R., et al. (2018). WeedMap: a large-scale semantic weed mapping framework using aerial multispectral imaging and deep neural network for precision farming. *Remote Sens.* 10, 1423.
- [57] ALI, M. (2020). Effect of water saving irrigation management practices on rice productivity and methane emission during rice cultivation. *J. Geosci. Environ. Prot.* 8, 182–196.
- [58] HIYA, H., ALI, M., BATEN, S., AND BARMAN, S. (2020). Effect of water saving irrigation management practices on rice productivity and methane emission from paddy field. *J. Geosci. Environ. Prot.* 8, 182–196.
- [59] HARINDINTWALI, J.D., ZHOU, J.L., MUHOZA, B., et al. (2021). Integrated eco-strategies towards sustainable carbon and nitrogen cycling in agriculture. *J. Environ. Manage.* 293, 112856.
- [60] BAI, Z., WANG, X., WU, X., et al. (2021). China requires region-specific manure treatment and recycling technologies. *Circular Agr. Syst.* 1,1–8.
- [61] KNAPP, J.R., LAUR, G.L., VADAS, P.A., et al. (2014). Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *J. Dairy Sci.* 97, 3231–3261.
- [62] LEE, H.J., YONG, H.I., KIM, M., et al. (2020). Status of meat alternatives and their potential role in the future meat market - a review. *Asian Austral. J. Anim.* 33, 1533–1543.
- [63] MATASSA, S., BOON, N., PIKAAR, I., AND VERSTRAETE, W. (2016). Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microb. Biotechnol.* 9, 568–575.
- [64] BAI, Z., SCHMIDT-TRAUB, G., XU, J., et al. (2020). A food system revolution for China in the post-pandemic world. *Res. Environ. Sustain.* 2, 100013.
- [65] PIKAAR, I., MATASSA, S., RABAEY, K., et al. (2017). Microbes and the next nitrogen revolution. *Environ. Sci. Technol.* 51, 7297–7303.
- [66] PIKAAR, I., MATASSA, S., BODIRSKY, B.L., et al. (2018). Decoupling livestock from land use through industrial feed production pathways. *Environ. Sci. Technol.* 52, 7351–7359.
- [67] PAN, Y., BIRDSEY RICHARD, A., FANG, J., et al. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–993.
- [68] FAO (2010). Food and Agriculture Organization: Global Forest Resources Assessment 2010 (FAO Forestry Paper).
- [69] MAHANTA, S.K., GARCIA, S.C., AND ISLAM, M.R. (2020). Forage based feeding systems of dairy animals: issues, limitations and strategies. *Range Manag. Agrofor.* 41, 188–199.

- [70] ZOMER, R.J., BOSSIO, D.A., SOMMER, R., AND VERCHOT, L.V. (2017). Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Sci. Rep.* 7, 15554.
- [71] FANG, J.Y., YU, G.R., LIU, L.L., et al. (2018). Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 115, 4015–4020.
- [72] SIEDT, M., SCHAEFFER, A., SMITH, K.E.C., et al. (2021). Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Sci. Total Environ.* 751, 141607.
- [73] RAYMOND, P.A., HARTMANN, J., LAUERWALD, R., et al. (2013). Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355–359.
- [74] ZHAO, J., MA, J., AND ZHU, Y. (2019). Evaluating impacts of climate change on net ecosystem productivity (NEP) of global different forest types based on an individual tree-based model FORCCHN and remote sensing. *Glob. Planet. Change* 182, 103010.
- [75] CROWTHER, T.W., TODD-BROWN, K.E.O., ROWE, C.W., et al. (2016). Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* 540, 104–108.
- [76] MCMAHON, S.M., PARKER, G.G., AND MILLER, D.R. (2010). Evidence for a recent increase in forest growth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 136, 3611–3615. 200912376. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912376107>.
- [77] CHOWDHURY, S., BOLAN, N., FARRELL, M., et al. (2021). Role of cultural and nutrient management practices in carbon sequestration in agricultural soil. In *Advances in Agronomy*, D.L. Sparks, ed. (Academic Press), pp. 131–196.
- [78] MACK, M., SCHUUR, E.G., BRET-HARTE, M., et al. (2004). Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature* 431, 440–443.
- [79] LI, Y., NIE, C., LIU, Y.H., et al. (2019). Soil microbial community composition closely associates with specific enzyme activities and soil carbon chemistry in a long-term nitrogen fertilized grassland. *Sci. Total Environ.* 654, 264–274.
- [80] DENG, L., SWEENEY, S., AND SHANGGUAN, Z.P. (2014). Grassland responses to grazing disturbance: plant diversity changes with grazing intensity in a desert steppe. *Grass Forage Sci.* 69, 524–533.
- [81] GOLL, D.S., CIAIS, P., AMANN, T., et al. (2021). Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nat. Geosci.* 14, 545–549.
- [82] TUBIELLO, F.N., CONCHEDDA, G., WANNER, N., et al. (2021). Carbon emissions and removals from forests: new estimates, 1990–2020. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 1681–1691.
- [83] DIOCHON, A., KELLMAN, L., AND BELTRAMI, H. (2009). Looking deeper: an investigation of soil carbon losses following harvesting from a managed northeastern red spruce (*Picea rubens* Sarg.) forest chronosequence. *For. Ecol. Manag.* 257, 413–420.
- [84] ALI, A. (2019). Forest stand structure and functioning: current knowledge and future challenges. *Ecol. Indic.* 98, 665–677.
- [85] WANG, Y.Q., BAI, R., DI, H.J., et al. (2018). Differentiated mechanisms of biochar mitigating straw-induced greenhouse gas emissions in two contrasting paddy soils.
- [86] BEERLING, D.J., KANTZAS, E.P., LOMAS, M.R., et al. (2020). Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248.
- [87] ZHONG, Y., JIANG, M., AND MIDDLETON, B.A. (2020). Effects of water level alteration on carbon cycling in peatlands. *Ecosyst. Health Sust.* 6, 1806113.
- [88] FARQUHAR, G.D., FASHAM, M.J.R., GOULDEN, M.L., et al. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, J.T. Houghton, Y. Ding, and D.J. Griggs, et al., eds. (Cambridge University Press), pp. 1–56.
- [89] MACREADIE, P.I., ANTON, A., RAVEN, J.A., et al. (2019). The future of blue carbon science. *Nat. Commun.* 10, 3998.
- [90] JIAO, N., HERNDL, G.J., HANSELL, D.A., et al. (2010). Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean. *Nat. Rev. Microbiol.* 8, 593–599.
- [91] DUARTE, C.M., LOSADA, I.J., HENDRIKS, I.E., et al. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Change* 3, 961–968.
- [92] BREITHAUPT, J.L., SMOAK, J.M., SMITH, T.J., et al. (2012). Organic carbon burial rates in mangrove sediments: strengthening the global budget. *Glob. Biogeochem. Cy.* 26, Gb3011.
- [93] WANG, F.M., SANDERS, C.J., SANTOS, I.R., et al. (2021). Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. *Natl. Sci. Rev.* 8, nwa296.

- [94] WEI, F. (2021). Towards post-2020 global biodiversity conservation: footprint and direction in China. *Innovation* 2, 100175. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100175>.
- [95] JIAO, N.Z., TANG, K., CAI, H.Y., AND MAO, Y.J. (2011). Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. *Nat. Rev. Microbiol.* 9,75.
- [96] CHEN, C.-T.A., AND BORGES, A.V. (2009). Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep-sea Res. Pt. 56*, 578–590.
- [97] WANG, F.M., EAGLE, M., KROEGER, K.D., et al. (2021). Plant biomass and rates of carbon dioxide uptake are enhanced by successful restoration of tidal connectivity in salt marshes. *Sci. Total Environ.* 750, 141566.
- [98] BOSSIO, D.A., COOK-PATTON, S.C., ELLIS, P.W., et al. (2020). The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nat. Sustain.* 3, 391–398.
- [99] BROWN, M.A., DWIVEDI, P., MANI, S., et al. (2021). A framework for localizing global climate solutions and their carbon reduction potential. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 118, e2100008118.
- [100] KAZA, S., YAO, L., BHADA-TATA, P., AND WOERDEN, F.V. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (The World Bank).
- [101] YADAV, I.C., AND DEVI, N.L. (2019). Biomass Burning, Regional Air Quality, and Climate Change.
- [102] WANG, J.L., AND WANG, S.Z. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. *J. Clean. Prod.* 227, 1002–1022.
- [103] SONI, B., AND KARMEE, S.K. (2020). Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust. *Fuel* 271, 117570.
- [104] BOLAN, N., HOANG, S.A., BEIYUAN, J.Z., et al. (2021). Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *Int. Mater. Rev.* <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1922047>.
- [105] OH, S.Y., AND SEO, T.C. (2019). Upgrading biochar via co-pyrolyzation of agricultural biomass and polyethylene terephthalate wastes. *RSC Adv.* 9, 28284–28290.
- [106] GHODAKE, G.S., SHINDE, S.K., KADAM, A.A., et al. (2021). Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: state-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. *J. Clean. Prod.* 297, 126645.
- [107] CHEN, W.F., MENG, J., HAN, X.R., et al. (2019). Past, present, and future of biochar. *Biochar* 1,75–87.
- [108] DISSANAYAKE, P.D., YOU, S.M., IGALAVITHANA, A.D., et al. (2020). Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: a critical review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 119, 109582.
- [109] SHAHEEN, S.M., NIAZI, N.K., HASSAN, N.E.E., et al. (2019). Wood-based biochar for the removal of potentially toxic elements in water and wastewater: a critical review. *Int. Mater. Rev.* 64, 216–247.
- [110] WOOLF, D., AMONETTE, J.E., STREET-PERROTT, F.A., et al. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.* 1,56.
- [111] CHEN, L., WANG, L., ZHANG, Y., et al. (2021). Roles of biochar in cement-based stabilization/solidification of municipal solid waste incineration fly ash. *Chem. Eng. J.* 132972.
- [112] DIXIT, A., GUPTA, S., PANG, S.D., AND KUA, H.W. (2020). Cement replacement and improved hydration in ultra-high performance concrete using biochar. In *3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers*, W.P. Boshoff, R. Combrinck, and V. Mechtcherine, et al., eds. (Springer, Cham), pp. 222–229.
- [113] FINNEGAN, G. (2015). All Products Based on Fossil Fuels Could Be Made from Biomass – Dr Philippe Mengal. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/all-products-based-fossil-fuels-could-be-made-biomass-dr-philippe-mengal>.
- [114] JIANG, T., DUAN, Q., ZHU, J., et al. (2020). Starch-based biodegradable materials: challenges and opportunities. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 3,8–18.
- [115] CHONG, J.W.R., KHOO, K.S., YEW, G.Y., et al. (2021). Advances in production of bio plastics by microalgae using food waste hydrolysate and wastewater: a review. *Bioresour. Technol.* 342, 125947.
- [116] BERGLUND, L.A., AND BURGERT, I. (2018). Bioinspired wood nanotechnology for functional materials. *Adv. Mater.* 30, e1704285.
- [117] ZHANG, L., DANG, Y., ZHOU, X., et al. (2021). Direct conversion of CO₂ to a jet fuel over CoFe alloy catalysts. *Innovation* 2, 100170. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100170>

- [118] EA (2013). Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage (OECD/IEA). <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2013>
- [119] MARCHETTI, C. (1977). On geoengineering and the CO₂ problem. Climatic change 1,59–68.
- [120] METZ, B., DAVIDSON, O., DE CONINCK, H., et al. (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (Cambridge University Press). <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>
- [121] GAO, L., JIN, H., LIU, Z., AND ZHENG, D. (2004). Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production. Energy 29, 2359–2371.
- [122] LI, S., GAO, L., AND JIN, H. (2017). Realizing low life cycle energy use and GHG emissions in coal based polygeneration with CO₂ capture. Appl. Energ. 194, 161–171.
- [123] HONGGUANG, J., TOSHIHIRO, O., AND ISHIDA, M. (1998). Development of a novel chemical-looping combustion: synthesis of a looping material with a double metal oxide of CoO-NiO. Energ. Fuel. 12, 1272–1277.
- [124] LÓPEZ-PACHECO, I.Y., RODAS-ZULUAGA, L.I., FUENTES-TRISTAN, S., et al. (2021) Phycocapture of CO₂ as an option to reduce greenhouse gases in cities: carbon sinks in urban spaces. J. CO₂ Util. 53, 101704. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101704>
- [125] TANS, P.P., FUNG, I.Y., AND TAKAHASHI, T. (1990). Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. Science 247, 1431–1438.
- [126] BUTZ, A., GUERLET, S., HASEKAMP, O., et al. (2011). Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT. Geophys. Res. Lett. 38, L14812.
- [127] PENG, D.L., ZHANG, B., WU, C.Y., ET AL. (2017). Country-level net primary production distribution and response to drought and land cover change. Sci. Total Environ. 574,65–7

ÖZGEÇMİŞ

Muammer AKGÜN

1990 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesinden, 1995 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine-Enerji Anabilim Dalından mezun olmuştur. 1992-1998 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Araştırma Görevlisi olarak, 1998-2013 yılları arasında kazan ve basınçlı kap sektöründe Ar&Ge, Tasarım, Üretim ve Şantiye montaj alanlarında çeşitli projelerde çalışmıştır. 2013-2022 yılları arasında, Bacader Genel Koordinatörü olarak görev yapmıştır. Halen MMO İstanbul Şubesinde Kazan ve Basınçlı Kaplar komisyon başkanlığı yapmaktadır. MMO İstanbul Şubesi bünyesinde yayınlanan “Kızgın Sulu, Kızgın Yağlı, Buharlı Isıtma Sistemleri” kitabının altı bölümünün yazarı ve son üç baskısının da editörü, ISKAV bünyesinde yayınlanan “Endüstri Kazanları” kitabının bir bölümünün yazarı ve “Sıcak Su Kazanları” kitabının üç bölümün yazarı ve kitabın son baskısının editörüdür. IMSAD Yapı Malzemeleri Komisyonu ile birlikte “Yapı Malzemeleri Yönetmeliği Rehber Kitap” ve Çevre Dostu Malzemeler Komisyonu ile “Sürdürülebilir İnşaat Malzemeleri Sözlüğü” çalışmalarına katkı sağlamıştır. Yayınlanmış pek çok makalesi, teknik yazıları bulunmaktadır.

Barbaros BATUR

1966 İstanbul doğumludur. 1990 yılında İTÜ Makine Fakültesini Makine Mühendisi olarak bitirmiştir. 1995 yılında Marmara Üniversitesinden Endüstri Yüksek Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2002 yılında YTÜ’de Makine Mühendisliği, Isı Proses Dalında doktorasını tamamlamıştır. 2005 yılından beri YTÜ, Makine Bölümünde Öğretim Görevlisi Dr. olarak ders vermektedir. Proses, enerji, ısıtma-havalandırma tesisat konularında çalışmaktadır.

Özlem Yurtsever

1983 İstanbul doğumludur. 2006 yılında Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversitede 2019 yılında Endüstri Mühendisliği alanında Doktor ünvanını almıştır. 2011-2022 yılları arasında Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu’nda öğretim görevlisi olarak görev yapmış olup 2022 yılından itibaren Dr. Öğretim Üyesi



olarak görevine devam etmektedir. Sürdürülebilirlik, karbon ayakizi, enerji, iş güvenliği konularında çalışmaktadır.

Mustafa Cem Çelik

1973 yılı Edirne doğumludur. 1995 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1999 yılında Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Yüksek Lisans derecesi olarak yüksek mühendis olmuştur. 2014 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Doktor unvanını almıştır. 1999 Yılından bu güne Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi / Öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Yenilenebilir enerji, hidroelektrik santraller, iç hava kalitesi, karbon ayak izi hesaplamaları konularında çalışmaktadır.