

THE PLACE OF CARBON CAPTURE, UTILISATION AND STORAGE TECHNOLOGIES IN THE "NET ZERO" TARGET

Ayşe SEVER AKDAĞ - Gülen GÜLLÜ

ABSTRACT

The Paris Climate Agreement has set the goals of "net-zero" carbon dioxide emissions in the second half of the century and limiting the global temperature rise to 1.5°C above pre-industrial levels. For this target, it is necessary to stay within a certain carbon budget. Although increasing renewable energy utilization and energy efficiency are vital for combating climate change, it may not be enough to stay within the carbon budget and limit the temperature increase to 1.5°C. At this point, carbon capture, utilisation, and storage technologies will play an important role in achieving the "net zero" carbon dioxide emission target. This article gives a brief description of what carbon capture, utilization and storage is, the current status of carbon capture, utilization and storage technologies, and the importance of their use in industry.

Keywords: Paris Agreement, Net Zero, Carbon Budget, Carbon Capture, Carbon Utilisation.

Arş. Gör., Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
Mail: akdaga@hacettepe.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6695-8295>

Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
Mail: ggullu@hacettepe.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7866-3275>

Makale Atıf Bilgisi: Akdağ, A. S.- GÜLLÜ, G. (2022). "Net Sıfır" Hedefinde Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama Teknolojilerinin Yeri", *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*. Yıl: 1. Sayı: 1. ss. 62-79.

Makale Türü: Derleme
Geliş Tarihi: 30.01.2022
Kabul Tarihi: 03.02.2022
Yayın Tarihi: 20.02.2022
Yayın Sezonu: Ocak 2022

“NET SIFIR” HEDEFİNDE KARBON YAKALAMA, KULLANIM VE DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN YERİ

Ayşe SEVER AKDAĞ - Gülen GÜLLÜ

ÖZ

Paris İklim Anlaşması, uluslararası hukukta, yüzyılın ikinci yarısında “net sıfır” karbondioksit salımı ve küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyeye kıyasla 1,5°C ile sınırlama hedefini belirlemiştir. Bu hedef için, belirli bir karbon bütçesinin içinde kalınması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji verimliliğindeki artışın sağlanması iklim değişikliği ile mücadele için çok önemli olsa da bu, karbon bütçesinin içinde kalabilmek ve sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamak için yeterli olmayabilecektir. Bu noktada, karbon yakalama, kullanım ve depolama teknolojileri, “net sıfır” karbondioksit salımı hedefine ulaşmada önemli bir role sahip olacaktır. Bu makalede, karbon yakalama, kullanım ve depolamanın kısaca ne olduğuna, karbon yakalama, kullanım ve depolama teknolojilerinin mevcut durumuna ve sanayide kullanımının önemi-ne yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Paris Anlaşması, Net Sıfır, Karbon Bütçesi, Karbon Yakalama, Karbon Kullanımı.

Giriş

1850'den beri ortalama atmosferik sıcaklıkları kaydeden Dünya Meteoroloji Örgütü (DMÖ), en sıcak on sekiz yılın son yirmi yılda ölçüldüğünü açıklamıştır. Bununla birlikte, atmosferik CO₂ konsantrasyonu 1960 ile 2020 yılları arasında 310 ppm'den 409,8 ppm'e yükselmiştir (Lindsey R., 2020). Antropojenik karbondioksit (CO₂) salımları, atmosferik CO₂ konsantrasyonundaki bu artışın en büyük kaynağı ve ortalama küresel sıcaklığın yükselmesinin nedeni olarak gösterilmektedir. İnsan faaliyetlerinden kaynaklı bu sıcaklık değişiminin, 2017 yılında, endüstri öncesi seviyenin yaklaşık 1°C üzerinde olduğu (muhtemelen 0,8°C ve 1,2°C arasında) ve sıcaklığın her on senede bir de 0,2°C arttığı (muhtemelen 0,1°C ve 0,3°C arasında) ortaya konulmuştur (IPCC, 2014). Sıcaklıktaki artış; sel, kasırga, kuraklık, sıcak hava dalgaları gibi aşırı hava olaylarının sıklığının ve şiddetinin artmasına, buzulların erimesine ve deniz seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca, okyanus ve karadaki karbon yutaklarının atmosferdeki CO₂ birikimini yavaşlatmada daha az etkili olacağı tahmin edilmektedir. Bu durum, doğrudan veya dolaylı olarak yeryüzündeki insan hayatını ve ekolojik sistemleri tehlikeye atmaktadır (IPCC, 2021; Kenarsari vd., 2013).

Küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyeye kıyasla 2°C'nin altında tutmak hatta 1,5°C ile sınırlamak ve buna bağlı olarak küresel ısınmanın risk ve etkilerini azaltmak amacıyla Türkiye'nin de içinde bulunduğu 200'e yakın ülke, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamında düzenlenen Paris İklim Anlaşması'na imza atmıştır. En son Glasgow'da düzenlenen 26. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP26) ile 1,5°C hedefi yinelenmiştir.

İnsan kaynaklı küresel ısınmayı belirlenen bu seviyelerde sınırlamak için, nötr bir karbon dengesine ve bu yüzyılın ikinci yarısında "net sıfır" CO₂ salımlarının elde edilmesine ihtiyaç vardır. "Net sıfır" hedefi için enerji ve endüstri sektörlerinin çok hızlı ve kapsamlı bir dönüşümü gerekmektedir. Neredeyse tüm geçiş senaryoları, belirlenen 1,5°C küresel sıcaklık artışı hedefine ulaşmak için, dünyanın bir çok bölgesinde en azından önümüzdeki on yıllık süreçte devam edecek olan fosil yakıtı dayalı enerji üretimini, çimento, demir çelik ve kimyasal üretimi gibi temel endüstriyel süreçler ile büyük ölçeklerde üretilecek hidrojeni karbonsuzlaştırmak için CO₂ Yakalama, Kullanma ve Depolama (KYKD) teknolojilerinin uygulamaya konmasının gerekli olduğu konusunda hem fikirdir (Mai Bui, 2020). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Beşinci Değerlendirme Raporu'nda, KYKD içermeyen iklim modellerinin, salım azaltma hedeflerine ulaşmada yetersiz olduğu belirtilmiştir. Daha da önemlisi, KYKD içeren senaryolara göre azaltım maliyetlerinin de yaklaşık %138 arttığı ortaya konmuştur. Bu, yenilenebilir enerjilerin ve nükleer enerjinin tek başına

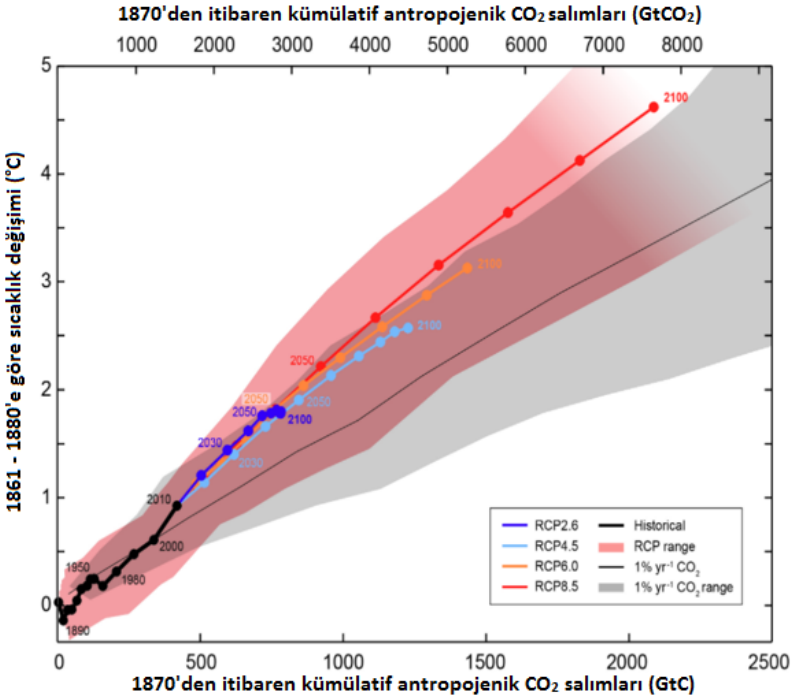
1,5°C sıcaklık artışı hedefine ulaşmada yeterli olmayacağı anlamına gelir. Bu nedenle, KYKD teknolojileri, belirlenen hedefe en az maliyetle ulaşmak için kilit bir rol oynamaktadır (Bui vd., 2018; GCCSI, 2016)

9 Kasım 2021 tarihi itibari ile Ulusal Katkı Beyanlarını (NDCs) sunan 123 ülkeden 18'i KYKD teknolojilerine yer vermiştir. Aynı tarihte, Uzun Vadeli Düşük Sera Gazı Salımı Geliştirme Stratejileri'ni (LTSs) açıklayan 44 ülkenin, 33'ü KYKD teknolojilerini salım azaltım hedeflerinde kullanacaklarını beyan etmiştir. Ayrıca, COP26 ile nihai haline ulaşan Paris kurallar kitabında, 6. Madde'nin uygulama ayrıntıları büyük ölçüde tamamlanmıştır. Ülkeler arasındaki emisyon ticareti ile ilgili olan Madde 6.2 ve Temiz Kalkınma Mekanizmaları (TKM) akreditasyon standartlarının ve uygulamalarının gözden geçirilmesi ve TKM'nin yerini alacak mekanizmalar için yeni prosedürler ve metodolojilerin oluşturulması ile ilgili olan Madde 6.4, teknolojiler açısından tarafsızlardır ve KYKD teknolojilerini işaret ettiklerini söylemek çok yanlış olmayacaktır. Ayrıca, COP 26'da, kömürden (diğer fosil yakıtlar kapsamamıştır) "aşamalı olarak çıkış" kararının alınması da KYKD uygulamalarına fırsat verecektir.

Bu makalenin amacı, "net sıfır" karbon salımı hedefine ulaşmada KYKD teknolojilerinin katkısını açıklayan bir özet sunmaktır. İlk olarak, küresel sıcaklık artışını, sanayi öncesi seviyeye kıyasla 2°C'nin altında tutmak için kalan karbon bütçesi gösterilmiştir. Sonrasında, KYKD teknolojisinin ne olduğu ve "net sıfır" hedefine nasıl katkı sunacağı açıklanmıştır. Ardından, salım azaltımının zor olduğu sanayi kollarında, KYKD teknolojilerinin yeri ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Son olarak, şu anki ve gelecekteki KYKD tesislerinin atmosferden CO₂'yi uzaklaştırma kapasitesilerine yer verilerek, KYKD teknolojilerinin nötr karbon dengesine ulaşmadaki önemi vurgulanmıştır.

Küresel CO₂ Salımları

Küresel ısınmayı belirli sıcaklık sınırının altında tutabilmek için dünyanın salabileceği yalnızca sabit bir miktarda karbon olduğu belirtilmektedir. Bu durum, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan Şekil 1'de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

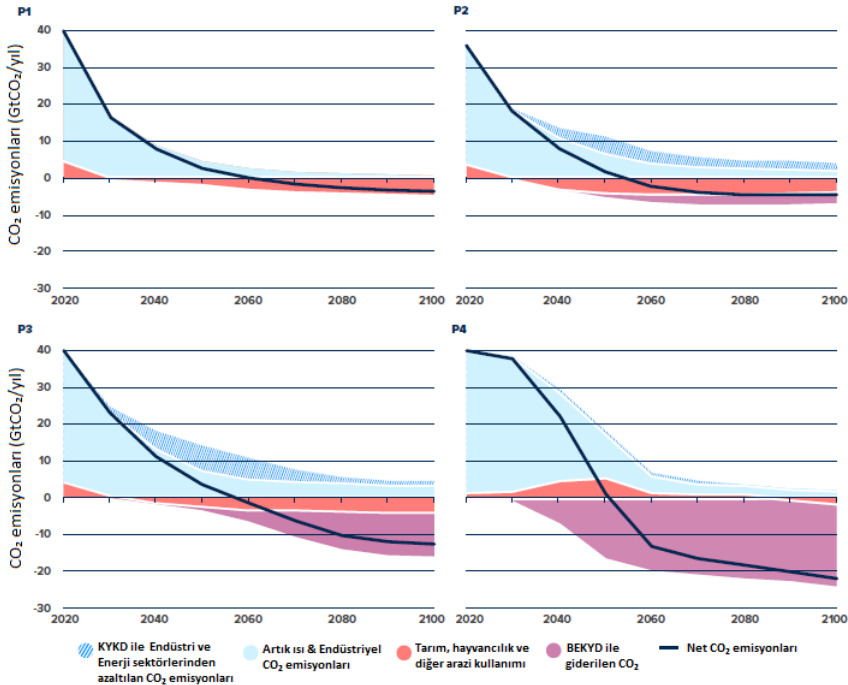


Şekil 1: Kümülatif antropojenik CO₂ salımları ve sanayi öncesi dönemden itibaren küresel sıcaklık artışı (IPCC, 2014)

Şekil 1'deki dikey eksen, sanayi öncesi seviyelere göre küresel ortalama sıcaklıktaki artışı, alt yatay eksen Sanayi Devrimi'nden beri atmosferde biriken toplam karbon miktarını, üst yatay eksen bunun CO₂ cinsinden değerini göstermektedir. Şekildeki siyah çizgi, hâlihazırda atmosfere salınan CO₂ miktarını; diğer renkli çizgiler, küresel sıcaklık artışı için 4 farklı öngörü uzatımını göstermektedir. Bu grafikte 2100 yılında sanayi öncesi döneme göre 2°C'lik bir sıcaklık artışının altında kalabilmek için, toplam 3000 Gigaton (Gt)'un altında antropojenik CO₂ salımının yapılabileceği görülmektedir. Şimdiye kadaryaklaşık 1900 Gt CO₂ salımı yaptığımız gerçeğini ve mevcut durumda, dünyada yılda yaklaşık 40 Gt antropojenik CO₂ salımı yapıldığı düşünüldüğünde, yaklaşık 27 yıl içinde karbon bütçesinin tamamının harcanmış olacağı hesaplanabilir. 1,5°C taahhüdü için CO₂ bütçesinin elbette çok daha küçük olduğu da anlaşılabilir. Bu nedenle kümülatif CO₂ salımlarının sınırlandırılması için çözümlerin ve eylemlerin hızla uygulamaya konulması oldukça kritik bir durum arz etmektedir.

KYKD Nedir? "Net Sıfır" Hedefine Nasıl Katkı Sağlar?

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) "1,5°C'lik Küresel Isınma" konulu özel raporu, küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamak için CO₂ gideriminin gerekli olduğu dört senaryo ortaya koymaktadır ve bunların üçü yoğun Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) teknolojilerinin kullanımını içermektedir (bkz. Şekil 2). KYD içermeyen senaryo ise insan davranışında en radikal değişiklikleri gerektirir (IPCC, 2018). Ek olarak, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından hazırlanan ortak bir rapora göre, 2050 yılı için belirlenen senaryolarda, KYD'nin, enerji verimliliği iyileştirmelerinden sonra sera gazı salımlarının azaltılmasına en büyük ikinci katkısı sağlaması beklenmektedir (OECD/IEA, 2016; Philibert, 2007) Ayrıca, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) enerji teknolojisi perspektifleri 2020 raporunda, KYD'nin, yenilenebilir enerji temelli elektrifikasyon, biyoenerji ve hidrojenin yanı sıra küresel enerji geçişlerinin dört temel taşından biri olarak oynaması gereken merkezi rol vurgulanmaktadır.



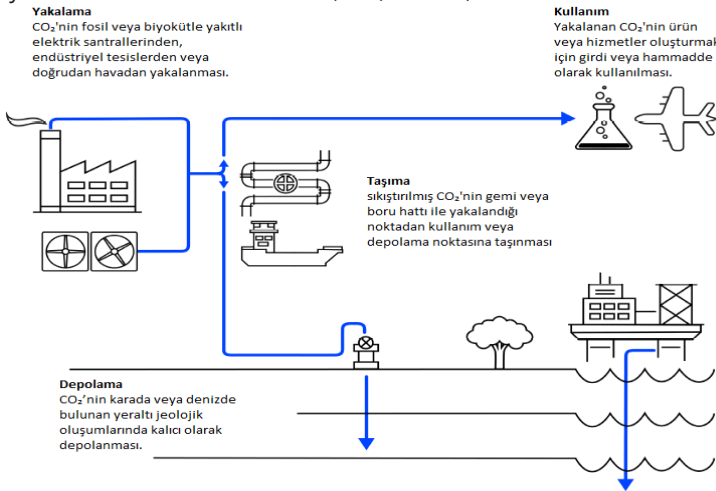
Şekil 2: IPCC'nin "1,5°C Küresel Isınma" özel raporundaki gösterici yollar

KYKD, kısaca fosil yakıt veya biyokütle kullanan enerji üretim tesisleri ve endüstriyel tesisler gibi büyük nokta kaynaklarından çıkan karbondioksitin atmosfere girmesini engelleyen düşük karbonlu bir teknolojidir. KYKD'nin Şekil 3'te gösterilen üç aşaması vardır: yakalama, taşıma, ve kullanım veya güvenli depolama.

Yakalama – İlk olarak, elektrik üretimi, demir çelik, gübre, çimento, kimyasallar ve rafinaj gibi endüstriyel tesislerden kaynaklanan CO₂ yakalanır. CO₂'yi yakalamanın ön-yanma, yanma sonrası ve oksijen-yakıt yanma olmak üzere üç ana yolu vardır. Bu yöntemler ile CO₂'nin %95'inden fazlası yakalanabilir. En gelişmiş ve yaygın olarak benimsenen yakalama teknolojileri, kimyasal absorpsiyon ve adsorpsiyondur; diğer teknolojiler arasında membranlar ve kalsiyum döngüsü bulunur. Belirli bir uygulama için en iyi yakalama teknolojisinin ne olacağı, baca gazının bileşimi ve içeriğindeki CO₂ konsantrasyonu, debisi, çalışma basıncı, sıcaklığı, orjinal tesise entegre edilip edilemeyeceği ve maliyeti gibi birden çok faktöre bağlıdır (GCCSI, 2021b; Leung, Caramanna, ve Maroto-Valer, 2014).

Taşıma – Yakalanan CO₂ sıkıştırılır ve uygun bir depolama alanına veya kullanım tesisine nakledilir. Taşıma, genellikle boru hatları ve gemiler ile yapılır.

Depolama/Kullanım – CO₂ tipik olarak yerin birkaç bin metre (0,8-3 km) derinliğine, tükenmiş petrol ve gaz sahası veya tuzlu su akiferi gibi özenle seçilmiş bir jeolojik hazneye enjekte edilerek Dünya'nın atmosferik karbon döngüsünden kalıcı olarak izole edilir. Ya da yakalanan CO₂ endüstriyel bir amaç için kullanılabilir. Yakalanan CO₂'nin büyük çoğunluğu uluslararası yazında "Enhanced Oil Recovery (EOR)" olarak bilinen Gelişmiş Petrol Geri Kazanımı (GPGK) için petrol şirketlerince kullanılmaktadır; fakat sentetik yakıtların, kimyasalların ve yapı malzemelerinin üretimi için bir hammadde olarak veya temiz havacılık yakıtı üretiminde kullanılması gibi birçok başka potansiyel kullanım alanı da vardır (IEA, 2020a).



Şekil 3: KYKD şeması (IEA, 2020a)

KYKD teknolojileri, küresel "net sıfır" salımına geçişte önemli bir stratejik değere sahiptir ve bunu dört ana yol ile sağlayabilir:

I. Salım azaltımının zor olduğu endüstrilerde karbondan arınmayı sağlamak:

Elektrifikasyonun uygulanabilir bir çözüm olmadığı, gerekli olan yüksek ısı veya kimyasal tepkimelerin karbonun varlığına bağımlı olduğu çimento, demir çelik ve kimya sektörleri, endüstriyel süreçlerinin doğası nedeniyle "karbondan arındırılması zor" sektörlerdir. Enerji Geçiş Komisyonu ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın da ortaya koyduğu raporlar, azaltımın zor olduğu endüstrilerde, "net sıfır" salım elde etmenin KYKD olmadan imkânsız veya en iyi ihtimalle daha pahalı olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle KYKD, bu endüstrilerde en uygun ve uygun maliyetli seçeneklerden biridir (IEA, 2020a).

II. Düşük karbonlu hidrojen üretimini sağlamak:

Sera Gazı Salımı (SGS) azaltımının zor olduğu sektörleri karbondan arındırmak ve "net sıfır" salıma ulaşmak için, bugün yılda 70 Megaton (Mt) olan küresel hidrojen üretiminin yüzyılın ortasına kadar, yılda 425-650 Mt'a çıkarılması beklenmektedir (GCCSI, 2020). Hidrojen üretiminin neredeyse tamamı doğal gaz (%76) ve kömürden (%23), geri kalanı ise petrol ve elektrikten sağlanmaktadır. Hidrojen üretimi sırasında, doğal gaz kullanıldığı durumda 9 tCO₂/t H₂ SGS açığa çıkar, kömür kullanıldığı durumda 20 tCO₂/t H₂ SGS açığa çıkar. KYKD donanımlı kömür gazlaştırma ve "steam methane reforming (SMR)" yolları ile H₂ üretimi (mavi hidrojen), yenilenebilir kaynaklardan elektroliz yolu ile H₂ üretmekten çok daha düşük maliyetlidir (IEA, 2020a).

III. Mevcut enerji tesislerinden, düşük karbonlu enerji sağlamak:

Enerji üretiminin karbondan arındırılması, "net sıfır" salım elde etmek için çok önemlidir. KYKD donanımlı enerji santralleri ile sevk edilebilir ve düşük karbonlu elektriğin yanı sıra atalet, frekans kontrolü ve voltaj kontrolü gibi, güneş fotovoltaikleri (PV) veya rüzgâr ile üretimden sağlanamayan şebeke dengeleme hizmetleri de sağlanmış olur (IEA, 2020a).

IV. Negatif salım sağlamak:

KYKD teknolojileri, sıfır salıma ulaşmanın ekonomik veya teknik olarak mümkün olmayabileceği sektörlerden kaynaklanan salımları dengelemek için atmosferden CO₂'yi uzaklaştırabilir. Örneğin, biyoenerji ile KYD birleştirilerek (Karbon Yakalama Depolama ile Biyoenerji (BEKYD)), enerji üretmek için biyokütlelenin yakıldığı süreçlerden CO₂ yakalanabilir veya CO₂ bir nokta kaynağın aksine doğrudan atmosferden yakalanabilir (Doğrudan Havadan Yakalama (DHY)) ve sonrasında yakalanan CO₂'nin kalıcı olarak yeraltında depolanması ile negatif salım eldesi sağlanır (IEA, 2020a).

Sanayide KYKD'nin Önemi

Küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlayan senaryolarda, günümüzde yıllık 8 Gt olan sanayi kaynaklı CO₂ salımlarının, 2050'de 2010 yılına göre yaklaşık %65-90 (çeyrekler arası aralık) daha düşük olması gerektiği tahmin edilmektedir. COP 26 kapsamında, Avusturya ve Avustralya'nın ortaklaşa liderlik edeceği "net sıfır" endüstriler misyonu ile sanayi CO₂ salımlarının yaklaşık %70'inden sorumlu olan demir çelik, çimento ve kimya gibi ağır sanayi olarak isimlendirilen endüstrilerden, 2050 yılına kadar yaklaşık 60 Gt CO₂ salımının önlenerek, "net sıfır" salım hedefine katkıda bulunmaları beklenmektedir. Enerji ve süreç verimliliği ya da yenilenebilir enerji seçenekleri ile bu salım azaltımını sağlayabilmek mümkün görünmemektedir. Bu ancak, elektrifikasyon, hidrojen, sürdürülebilir biyo-tabanlı hammaddeler, ürün ikamesi ve karbon yakalama, kullanım ve depolama dahil olmak üzere yeni ve mevcut teknolojilerin kombinasyonları ile sağlanabilir (IPCC, 2018).

Ağır sanayi tesislerinde, aşırı yüksek sıcaklıklara ulaşma gerekliliğinden dolayı fosil yakıtlara alternatif üretmek (elektirifikasyon gibi) hem çok pahalıdır hem de pratik değildir. Ayrıca, bu sektörlerden kaynaklı CO₂ salımlarının bir kısmı, hammaddelerin işlenmesinden kaynaklı kaçınılmaz olan işleme salımlarıdır. Ek olarak, ağır endüstrilerdeki tesislerin genellikle 30-40 yıl kadar uzun bir ömrü vardır. Alternatif teknolojilere geçmek için, onları erken emekli etmek çok büyük maliyetlere yol açacaktır. Bu sebeple, bu sektörlerde hâlihazırda var olan tesislere çok fazla revizyon ihtiyacı duymayan KYKD teknolojilerini eklemek, küresel "net sıfır" salıma ulaşmada büyük önem arz eder (IEA, 2020b).

Bu noktada, küresel CO₂ salımlarının yaklaşık %8'ini kapsayan çimento sektörü önemli bir örnektir. Dünyada, her yıl 4 milyar tondan fazla çimento üretilmektedir ve üretilen ton çimento başına yaklaşık 800 kilogram CO₂ salınmaktadır. Bunun, gezegendeki her insanın yıllık ortalama salımının beşte birine denk geldiğini söyleyebiliriz. Çimento üretimi kısaca; hammadde olarak kullanılan kireçtaşının, kimyasal tepkimeler ile diğer minerallerle birleştirilip yeni bir kaya benzeri mineral meydana getirilmesi ve öğütülerek çimento olarak adlandırdığımız ince bir toza dönüştürülmesidir. Bu kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için çok yüksek sıcaklıklarda - 1400°C'ye kadar - ısı gerekmektedir. Bunun için, çimento fırınlarının alt ucunda kömür, petrol veya doğal gazın hassas bir şekilde kontrollü yakılmasıyla üretilen kükreyen alev patlamasına ihtiyaç vardır. Çimento sektöründe salımların yaklaşık %35'i, hammaddenin işte bu aleve doğrudan maruz kalmasını sağlamak için döner fırınlarda yakılan fosil yakıtlardan kaynaklıdır. SGS'lerin yaklaşık %65'i ise hammadde olarak kullanılan ve esas olarak kalsiyum karbonattan oluşan kireç taşının doğasından gelir. Kalsiyum karbonat (CaCO₃) çimento fırınında 1.100°C civarı bir sıcaklıkta kalsiyum oksit (CaO) ve karbondioksit'e (CO₂) ayrışır. CaO, bahsedilen kimyasal tepkimelere girerek nihai çimento ürününü ortaya

çıkarmak, CO₂ atmosfere salınır (PCA, 2022). Bu süreçte, kireçtaşı kullanmanın başka bir alternatifi yoktur ve fosil yakıt kullanımı ile ilişkili olmayan, işlem kaynaklı olan bu CO₂ salımları kaçınılmazdır. Elbette ki 1990 yılından bu yana atılan önemli adımlar (çimento fırınlarının verimliliğinin artırılması, atık biyokütle fraksiyonlu alternatif yakıtların kullanılması ve klinker ikamesi gibi), salımların %20'den fazla azaltılmasını sağlamıştır. Tüm bunlar "net sıfır" karbon salımına ulaşmak için gerekli olan derin CO₂ salım azaltımı için yeterli değildir. Sonuç olarak "net sıfır" hedefinde, çimento üretiminin kanıtlanmış başka bir alternatif yolu olmadığı için, çimento sektöründe bu CO₂ salımlarını yakalamak ve kalıcı olarak depolamak tek seçenektir. Çimento fabrikalarından çıkan baca gazlarının CO₂ konsantrasyonları %14-33 civarındadır ve KYKD için iyi adaylardır (Bosoaga, Masek, ve Oakey, 2009) Şu anda çimento endüstrisinde faaliyette olan ticari ölçekli bir tesis olmamasına rağmen, karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi için sektör içinde çalışmalar sürmektedir. En büyük araştırma ve geliştirme faaliyetlerinden biri Norveç'teki Norcem Brevik çimento fabrikasında yürütülmektedir ve 2024 yılında tesisin faaliyete geçerek, dünyanın ilk CO₂ yakalama tesisine sahip çimento fabrikası olması planlanmaktadır. Bu tesiste, CO₂ yakalamak için amin grubu kimyasallar ile solvent bazlı gaz-sıvı ayırma teknolojisi kullanılmakta, enerji yoğun olan desorpsiyon adımı için gereken enerji, çimento fabrikasındaki atık ısıdan karşılanmaktadır. Yakalanan CO₂ sıkıştırılıp, sıvı fazına geçirildikten sonra gemi ulaşımı ile Kallness depolama tesisine iletilecek ve açık denizde depolanacaktır. Kurulan KYD tesisi ile saatte 55 ton, yılda yaklaşık 0,4 Mt CO₂ yakalanıp, depolanacaktır (Norcem, 2022). Aynı çimento firması ayrıca fırınlarında hava yerine saf oksijen kullanarak, CO₂ konsantrasyonunu yüzde 70 veya daha yüksek bir seviyeye çıkardıkları bir oksiyakıtlı çimento fırını geliştirmektedir (Beumelburg, 2021). Daha yüksek CO₂ konsantrasyonları, herhangi bir CO₂ yakalamasını çok daha enerji verimli hale getirmekte ve baca gazı hacmini önemli ölçüde azaltarak sermaye maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Başka bir örnek, Avustralyalı şirket Calix'in, tescilli gelişmiş kalsinasyon reaktörü teknolojisini, Belçika'da bulunan düşük salım yoğunluklu kireç ve çimento (LEILAC) pilot tesisinde denemek için başlattığı projedir. Bu teknoloji, kalsinasyon yoluyla açığa çıkan CO₂'yi, hammaddeyi ısıtarak ve yanma gazlarından ayrı tutarak fiziksel olarak ayırır. Ham madde, bir iç reaksiyon borusunun içinden geçerken, dışarıdan ayrı bir ateşlemeli ısıtıcı veya elektrikli ısıtma kaynağı tarafından ısıtılır. Burada, kalsinasyon işleminden açığa çıkan CO₂, yanmadan kaynaklı hava veya nitrojenden her zaman ayrıdır. Sonuç olarak, Calix kalsinasyon reaktöründen gelen işlem CO₂'si kuru, yakalanmaya hazır ve neredeyse tamamen saftır. Calix reaktörü, yenilenebilir elektrik enerjisi veya biyoyakıtlarla ısıtılabilir (Beumelburg, 2021). Uluslararası Enerji Ajansı, 2050'de dünyada çimento üretim tesislerinin yaklaşık %30'unun KYKD içereceğini ve 2070 yılına kadar bu teknolojinin sektörel CO₂ salım azaltımına katkısının %61 olacağını öngörmektedir (IEA, 2020a).

Demir ve çelik endüstrisi, küresel CO₂ salımlarının yaklaşık %7'sini teşkil etmektedir. Karbondioksit, çelik yapımı için demir cevherini elementer demire dönüştüren doğrudan indirgenmiş demir (DRI) ünitesinde indirgeyici madde olarak işlev gören kömür veya doğal gaz tarafından üretilir. Sektörde, çelik geri dönüşümü, enerji verimliliği programları, hidrojenin fosil yakıt yerine kullanılması gibi seçenekler ile salım azaltımı için önemli çabalar sarf edilmektedir. Ayrıca, hidrojen-tabanlı doğrudan indirgenmiş demir (DRI) seçeneğinin de salımları önemli ölçüde azaltacağı düşünülmektedir. Fakat KYKD'ye dayalı üretim rotası, en düşük maliyetli olan düşük karbonlu seçenektir. KYKD donanımlı DRI ve yenilikçi eritme indirgeme süreçleri aracılığıyla bir ton çelik üretmek, günümüzün ana ticari üretim yollarından tipik olarak %8-9 daha pahalıdır ancak hidrojen-tabanlı DRI rotası genellikle maliyetleri yaklaşık %35-70 oranında artırır (IEA, 2020a). Demir çelik sektöründe faaliyet gösteren yalnızca bir KYKD tesisi (Abu Dabi'deki Emirates çelik tesisi) ve bir tane geliştirme aşamasında (Tata Steel'in Hollanda'daki Everest Projesi) bulunmaktadır. Abu Dabi'deki Emirates çelik tesisi, solvent bazlı, büyük ölçekli, ticari bir KYKD projesi olarak 2016'dan beri işletilmektedir. Emirates çelik tesisinde, yılda yaklaşık 0.8 Mt CO₂ yakalanmakta ve boru hattıyla taşınarak GPGK için kullanılmaktadır (GCCSI, 2020, 2021b).

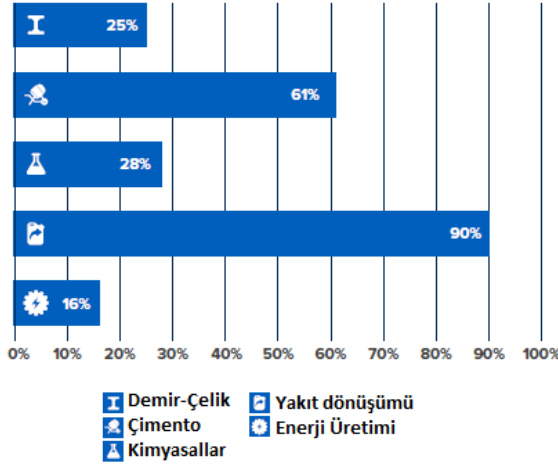
Kimya endüstrisinde KYKD teknolojileri, neredeyse saf CO₂ salımı açığa çıkaran çeşitli kimyasal üretim süreçleri nedeniyle düşük bir yakalama maliyetiyle uygulanabilir. Burada da salım azaltımı için amonyak ve metanol üretiminde hammadde olarak elektrolitik hidrojen kullanılması önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir ancak bu seçenek KYKD'yi mevcut veya yeni tesislere uygulamaktan daha pahalıdır. KYKD donanımlı amonyak ve metanol üretimi, maliyeti yaklaşık %20-40 oranında yükseltirken, elektrolitik hidrojen kullanımı maliyeti %50-115 yükseltmektedir (GCCSI, 2020; IEA, 2020a).

Bu noktada kısaca enerji sektörüne de değinilirse, küresel CO₂ salımlarının yaklaşık üçte birini kapsayan ve talebin her geçen gün arttığı elektrik üretiminin hızlı bir şekilde karbondan arındırılması, "net sıfır" salım hedefine ulaşmak için en önemli faktördür. Şu anda dünyada kömürle çalışan enerji santralleri toplam 2.000 GW güç üretmektedir ve 2030 yılı itibarı ile yaklaşık 500 GW kapasite artırımına gideceklerdir. Günümüzde, Asya'da doğal gaz filosunun ortalama yaşı 19, kömür santrallerinin ise sadece 12 yıldır ve daha onlarca yıllık ekonomik ömürleri vardır. Eğer bu tesisler kapatılmayacak ise, KYKD teknolojileri düşük karbonlu bir ekonomiye doğru ilerlerken, adil bir geçişi destekleyebilir (GCCSI, 2020).

KYKD aynı zamanda, doğal gazın önümüzdeki on yıllar boyunca enerji sistemi genelindeki yeri göz önüne alındığında, doğal gaz işlemeden kaynaklanan CO₂ salımlarını azaltmada önemli bir çözümdür. Doğal gaz

depoları büyük miktarlarda, %90'a kadar, CO₂ içerebilir ve bu CO₂'nin teknik nedenlerden ötürü gaz satılmadan veya sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) üretimi için işlenmeden önce uzaklaştırılması gereklidir. Uzaklaştırılan CO₂ tipik olarak atmosfere verilmektedir, ancak bunun yerine jeolojik oluşumlara yeniden enjekte edilebilir veya GPGK için kullanılabilir. Günümüzde, doğal gaz işleme sektöründen yakalanan ve çoğunlukla GPGK için kullanılan CO₂ miktarı yaklaşık 26 Mt/yıl'dır ve toplam yakalanan CO₂'nin yarısından fazlasını oluşturmaktadır (GCCSI, 2021b).

IEA Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu'na göre (bu senaryo, IEA Enerji Teknolojisi Perspektifleri (ETP) Modeli¹'nin odak noktasıdır ve "net sıfır" salıma ulaşmak için gerçekçi ve uygun maliyetli bir şekilde teknoloji ihtiyaçlarını belirlemek için kullanılmaktadır), 2070 yılına kadar, KYKD'nin demir çelik, çimento, kimyasallar, yakıt dönüşümü ve enerji üretimi sektörlerindeki salım azaltımlarına kümülatif katkısı %16 ila %90 arasında değişmektedir (bkz. Şekil 4) (IEA, 2020a). Şekilde gösterilen yakıt dönüşümü sektörü; biyoyakıt tesislerini ve fosil yakıtlardan hidrojen ve amonyak üretimi tesislerini kapsamaktadır.



Şekil 4: IEA Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu'nda, KYKD'nin sektörel CO₂ salım azaltımlarına katkısı (IEA, 2020a).

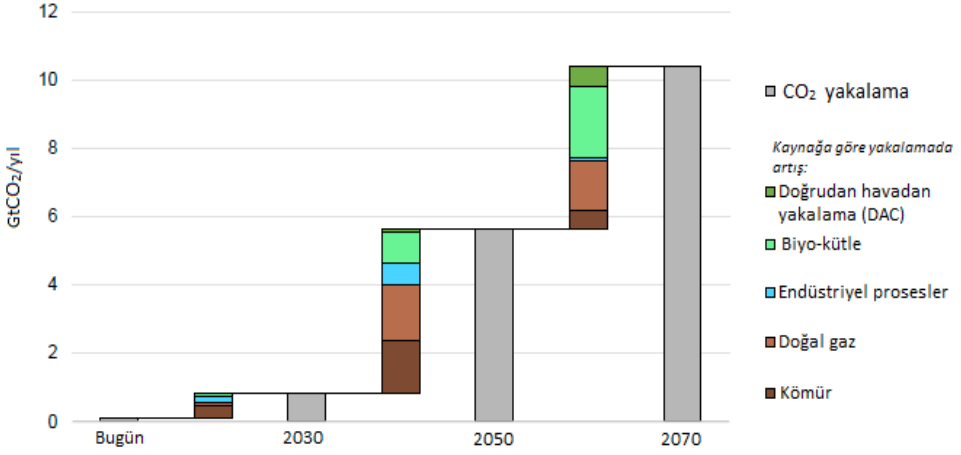
¹Modelin tam açıklamaları ve temel varsayımları şu adresten incelenebilir: www.iea.org/reports/energytechnology-perspectives-2020/etp-model

KYKD'nin Mevcut Durumu ve Zaman İçindeki Rolü

Şu anda, yılda yaklaşık 40 Mt CO₂ yakalanmakta ve depolanmaktadır. Paris Anlaşması'nın kritik hedeflerine ulaşabilmek için, bu miktarın 2030 yılına kadar en az 20 kat, 2050 yılına kadar 100 kat artırılması gerekmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından 2005 yılında yayınlanan ve KYD'nin küresel ısınmayı durdurmada potansiyel katkılarını tanımlayan "KYD Özel Raporu"ndan bu yana, KYKD teknolojilerinde ilerleme, yalnızca sınırlı politika ve mali destekle sağlanmıştır. KYKD teknolojileri yatırımı, temiz enerji ve verimlilik teknolojilerine yapılan küresel yatırımın %0,5'inden daha azını oluşturmaktadır (GCCSI, 2020; IEA, 2020a; IPCC, 2018; OECD/IEA, 2016)

Karbon yakalama teknolojilerinin henüz geniş çapta benimsenmemiş olmasının ana nedenlerinden biri, şu anda CO₂ salım maliyeti ile dengelenemeyen bu operasyonların karmaşıklığı ve maliyetleridir. Karbon yakalamanın maliyeti, üretim maliyetlerini neredeyse iki katına çıkardığı için özellikle çimento endüstrisi gibi sanayi kolları için bu özel bir sorundur. Teknoloji geliştikçe, maliyetler düştükçe ve bazı sektörlerde şu anda daha ucuz olan salım azaltım seçenekleri tükendikçe, KYKD'nin salım azaltım katkısının zamanla artması beklenmektedir. KYKD'nin ilk odak noktası, mevcut fosil yakıt bazlı enerji ve endüstri tesislerine kurulumlarının artmasının yanı sıra, temiz hidrojen üretiminin de yapılacağı daha düşük maliyetli CO₂ yakalama fırsatlarının güçlendirilmesidir. Zamanla, odak noktasının, diğer sektörlerden giderilemeyen salımları dengelemek için negatif salımlar üreten BEKYD ve DHY gibi teknolojilere kayması beklenmektedir. Bu teknolojiler ile yakalanan CO₂'nin depolanmasının yanı sıra, havacılıkta kullanılmak üzere sentetik yakıt üretiminde kullanılması planlanmaktadır (IEA, 2020a).

Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu'nda, KYKD'nin, küresel CO₂ salımlarının azaltımına katkısı, projeksiyon dönemleri boyunca artmaktadır. 2030, 2050 ve 2070 yıllarındaki tahmin edilen CO₂ yakalama miktarları ve bunların sektörlere göre dağılımını gösteren grafik, Şekil 5'te gösterilmiştir (IEA, 2020a).

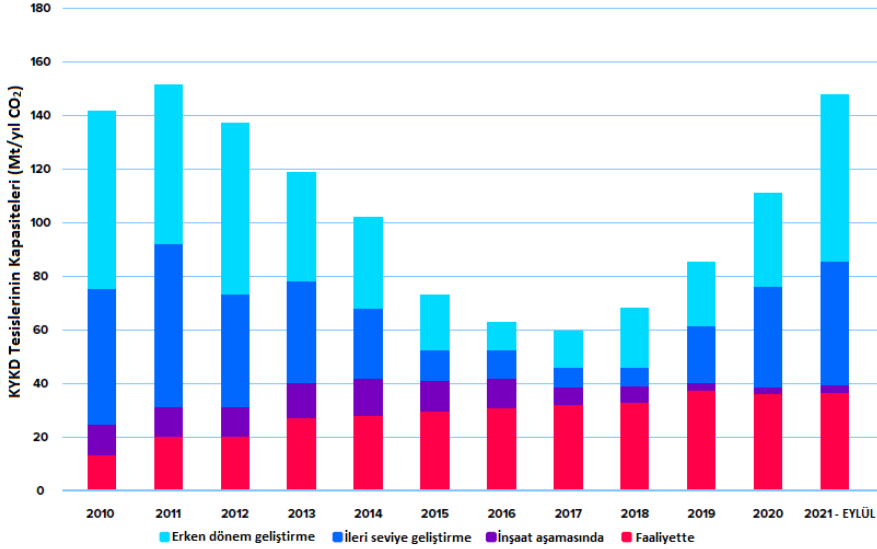


Şekil 5: Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu'nda kaynağa ve döneme göre küresel CO₂ yakalamadaki büyüme (IEA, 2020a)

Şekil 5'te görüleceği üzere, 2030 yılında CO₂ yakalama kapasitesinin 0,84 Gt CO₂, 2050 yılında 5,6 Gt CO₂ (5,2 Gt'sinin kalıcı depolanacağı, 0,4 Gt'sinin kullanılacağı), 2070 yılında ise 10,4 Gt CO₂ (9,5 Gt'sinin kalıcı depolanacağı, 0,9 Gt'sinin kullanılacağı) olacağı belirlenmiştir. Bu senaryoda, yaklaşık 2030'a kadar olan ilk aşamada, mevcut enerji santralleri ve fabrikalardan kaynaklanan salımların yakalanmasına odaklanılmaktadır. Enerji ve sanayi sektörlerinde, bu on yılda yakalanacak CO₂ salımlarının %85'inden fazlası var olan tesislere CO₂ yakalama ekipmanlarının modifiye edilmesi ile sağlanacaktır. Bu tesisler, kömürle çalışan enerji santralleri, kimyasal tesisler (esas olarak gübre tesisleri), çimento fabrikaları ve demir çelik fabrikalarıdır. 840 Mt (0,84 Gt)'a ulaşacak olan toplam yakalama, 2030 yılına kadar salım azaltımlarının kümülatif olarak %4'üne karşılık gelecektir. 2030'dan 2050'ye kadar olan ikinci aşamada, KYKD'nin kümülatif salım azaltımlarına katkısı %12'ye yükselecektir. Bu dönemde, çimento, çelik ve kimyasal sektörlerinde KYKD uygulamaları hızlı bir şekilde artacaktır. 2050'den 2070'e kadar olan son aşamada, yakalanan CO₂ miktarı %85 oranında artış gösterecektir fakat mevcut kapasitelerinin büyük kısmı kullanım ömrünün sonuna gelmiş olacağından ağır sanayilerin (var olan tesislerin modifiyesi ile CO₂ yakalama payları çok yüksek) CO₂ yakalama payı düşecektir. Temiz hidrojen ve elektrik üretimi sağlamak için doğalgaz kullanımından doğan CO₂'yi yakalama, fosil yakıtlardan CO₂ yakalama işlemleri arasında baskın olmaya devam edecektir. 2070 yılında, toplam yakalanan CO₂'nin yaklaşık %40'ının enerji sektöründen (yarısı biyoenerji ile bağlantılı

olarak), %25'inin ağır endüstri kollarından, %30'unun biyoyakıttan, hidrojen ve amonyak üretiminden ve %5'inin de DAC'tan sağlanması planlanmaktadır (IEA, 2020a).

Şu anda çimento, çelik, hidrojen, enerji üretimi ve doğrudan hava yakalama dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde projelendirilen 28'i tamamen çalışır durumda olan 135 adet ticari KYKD tesisi bulunmaktadır. Projelendirilen KYKD sayısı güçlü bir artış göstermektedir. 2020 sonunda, 75 Mt/yıl olan geliştirme aşamasındaki projelerin kapasitesi, Eylül 2021'de 111 Mt/yıl'a yükselerek %48 artış göstermiştir (GCCSI, 2021b, 2021a). Mevcut KYKD tesislerinin durumlarını ve kapasitelerini gösteren grafik, Şekil 6'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 1'de bu tesislerin lokasyonları, sayıları ile birlikte gösterilmiştir (GCCSI, 2021b).



Şekil 6: 2010'dan, Eylül 2021'ye kadar ticari KYKD tesislerinin kapasiteleri

Tablo 1: Dünyadaki KYKD tesis sayıları

	Faaliyette	Geliştirme Aşamasında	Toplam
Kuzey Amerika	16	61	76
Çin	3	3	6
Avrupa	4	35	39
Körfez İşbirliği Konseyi	3	1	4
Diğer*	2	7	9
Toplam	28	107	135

* Avusturalya, Brezilya, Yeni Zelanda, Güney Kore

Sonuç

2021 Nisan sonunda 44 ülke ve Avrupa birliği "net sıfır" salım hedeflerini açıklamışlardır (IEA, 2021) COP 26 sonrası, Türkiye de "net sıfır" salım hedefini açıklayan ülkeler arasına girmiştir. 2050 yılında "net sıfır" karbon salımı taahhüdü bulunan bu ülkelerin, 2030 yılına kadar salım azaltım hedeflerini ayrıntılı bir şekilde belirlemesi gerekmektedir. Glasgow İklim Paketi'nin 17. maddesinde ülkelerin 2030 yılında, 2010 yılına göre en az %45 azaltıma ulaşmaları gerektiği belirtilmiştir. Bu hedefler doğrultusunda, KYKD teknolojilerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında, ülkeler ve özel şirketlerden gelen büyük iklim eylemi fonları yardımı ile dünya çapında önemli bir ilerleme kaydedileceği umulmaktadır.

KYKD'nin "net sıfır" salıma geçişe katkısının zamanla artması beklenmektedir ve 2070 yılına kadar kümülatif salım azaltımının yaklaşık altıda birinden sorumlu olacağı tahmin edilmektedir (GCCSI, 2021b). Ayrıca KYKD'nin, endüstrilerin net sifıra doğru ilerlerken, düşük karbonlu yeni endüstri kollarını yaratmasını ve yerel ekonomilere sürdürülebilir katkılarda bulunmasını sağlayarak adil bir geçiş kolaylaştıracağı düşünülmektedir. KYKD uygulamalarında gerekli olan sermaye yatırımları için karbon piyasaları iyi bir fırsat yaratabilir. Hızlı KYKD yatırımlarının teşvik edilmesi için, daha güçlü bir politikaya ihtiyaç olduğu da açıktır.

Tüm bunlar ve karbon ticaretinin ulaşacağı boyut düşünüldüğünde, 2022 sonunda 2030 yılı hedeflerini içeren Ulusal Katkı Beyanı'nı sunması ve sonrasında her 5 senede bir yenilemesi gereken Türkiye'nin de KYKD teknolojilerini kullanma konusunda bir değerlendirmede bulunması kıymetli olacaktır.

Kaynakça

- Beumelburg, C. (2021). HeidelbergCement' commitment to carbon abatement. Erişim tarihi: 26.01.2022. Erişim adresi: <https://www.heidelbergcement.com/en/pr-21-07-2021>
- Bosoaga, A., Masek, O., ve Oakey, J. E. (2009). "CO₂ Capture Technologies for Cement Industry". *Energy Procedia*, 1(1), 133–140. <https://doi.org/10.1016/J. EGYPRO.2009.01.020>
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., ... Mac Dowell, N. (2018). "Carbon capture and storage (CCS): The way forward". *Energy and Environmental Science*, 11(5), 1062–1176. <https://doi.org/10.1039/c7ee02342a>
- GCCSI. (2016). *Global CCS Institute. The Global Status of CCS: 2016. Summary Report, Australia*. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/the-global-status-of-ccs-2016-summary-report/>
- GCCSI. (2020). *Global CCS Institute. The Global Status of CCS: 2020. Australia. In Global CCS Institute*. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf>
- GCCSI. (2021a). CO₂RE - CCS Facilities. Erişim tarihi: 28.01.2022. Erişim adresi: <https://co2re.co/>
- GCCSI. (2021b). *Global CCS Institute. The Global Status of CCS: 2021. Australia*. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/11/Global-Status-of-CCS-2021-Global-CCS-Institute-1121.pdf>
- IEA. (2020a). *International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2020, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage*. <https://doi.org/10.1787/208b66f4-en>
- IEA. (2020b). *International Energy Agency. The challenge of reaching zero emissions in heavy industry*. <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry>
- IEA. (2021). *International Energy Agency. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IPCC. (2014). *Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I,*

II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf

IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change.*

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Cambridge University Press.* <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>

Kenarsari, S. D., Yang, D., Jiang, G., Zhang, S., Wang, J., Russell, A. G., ... Fan, M. (2013). "Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture". *RSC Advances*, 3(45), 22739–22773. <https://doi.org/10.1039/c3ra43965h>

Leung, D. Y. C., Caramanna, G., ve Maroto-Valer, M. M. (2014). "An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426–443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>

Lindsey R. (2020). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. Erişim tarihi: 18.12.202. Erişim adresi: NOAA Climate.gov website: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

Mai Bui, N. M. D. (2020). *Energy ve Environment Series- Carbon Capture and Storage* (N. M. D. Mai Bui, Ed.). https://play.google.com/store/books/details?id=thjBDwAAQBAJ&rdid=book-thjBDwAAQBAJ&rdot=1&source=gbs_vpt_read&pcampaignid=books_booksearch_viewport

Norcem. (2022). Heidelberg Cement Group, Carbon Capture and Storage (CCS). Erişim tarihi: 26.01.2022. Erişim adresi: <https://www.norcem.no/en/CCS>

OECD/IEA. (2016). *Carbon Capture and Storage-20 Years: Accelerating Future Deployment*. 115. www.iea.org/t&c/

PCA. (2022). The Portland Cement Association - America's Cement Manufacturer. Erişim tarihi: 26.01.2022. Erişim adresi: <https://www.cement.org/home-temp>

Philibert, C. (2007). *Technology penetration and capital stock turnover. Lessons from IEA scenario analysis.*