



TÜRKİYE TEKNOLOJİ GELİŞTİRME VAKFI



ÖNCÜL PROJE PROGRAMI

EKONOMİK DEĞER YARATMA POTANSİYELİNE SAHİP KARBON YAKALAMA KULLANIM DEPOLAMA (KYKD) VE KARBONDİOKSİT GİDERİM (KDG) ÇÖZÜMLERİ

DERİN ANALİZ RAPORU **ÖZET**

Aralık 2024





www.ttgvt.org.tr

MERKEZ

ANKARA

Cyberpark B Blok Kat: 5-6, Bilkent Ankara

Telefon: 0312 265 02 72

Faks: 0312 265 02 62

Dr. E. Serdar Gökpinar

Dr. Ayşe Sever Akdağ

Dr. Güniz Gürel

Dr. Selin Özokcu

Bu çalışma TTGV tarafından yaptırılmıştır. Çalışmanın tümü ya da bir bölümü TTGV'nin izni olmadan kopya edilemez ancak kaynak göstermek kaydı ile alıntı yapılabilir.

Bu kitapçık içerisinde yer alan tasarımlar, yazılar, logolar, grafikler de dahil olmak üzere, tüm yazılı ve görsel materyale ilişkin her türlü mali, manevi ve ticari haklar yahut bunları kullanma yetkisi TTGV'ye aittir. Sözü edilen içeriğin kişisel ve ticari olmayan kullanım dışında herhangi bir amaçla kullanılması, kopyalanması, işlenmesi, herhangi bir şekil veya yöntemle, tamamen veya kısmen, doğrudan veya dolaylı, geçici veya sürekli olarak çoğaltılması, kiralınması, ödünç verilmesi, satışa çıkarılması veya diğer yollarla dağıtılması kesinlikle yasaktır.

Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5 inci maddesinin ikinci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir.



1. Giriş

Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV), 2023 yılından itibaren, iklim değişikliğinin getirdiği uluslararası gerekliliklere uyum sağlamak ve Türkiye sanayisinin küresel rekabet gücünü artırmak amacıyla odağını iklim teknolojilerine yöneltmiştir. Bu doğrultuda, ölçeklenebilir ve yenilikçi iklim teknolojisi projelerine yatırım yapılmasını amaçlayan **“Öncül Proje Programı”** hayata geçirilmiştir. Program, farklı fazlardan oluşan kapsamlı bir yapıdadır. İlk fazda, belirlenen öncelikli iklim teknolojisi özelinde derin analiz çalışması yürütülmektedir. Bu süreçte, kapsamlı bir literatür taramasının yanı sıra, yurt içi ve yurt dışındaki paydaşlarla bir araya gelinerek teknolojinin mevcut durumu değerlendirilmekte ve sektörel ihtiyaçlar detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Derin analiz çalışması sonucunda, teknoloji hakkında temel bilgileri, paydaş yaklaşımlarını ve yatırım yapılabilirliğine dair değerlendirmeleri içeren bir bilgilendirme raporu hazırlanmaktadır. Derin analiz raporu kapsamında, erken aşama teknoloji potansiyeli taşıyan çalışmalar yapan araştırmacılar ve ürün/hizmet demosu geliştirebilecek girişimler de belirlenmekte ve bu araştırmacılara/ girişimlere öncül proje programının **“Öncül Tohum ve Demo”** fazları kapsamında destek sağlanmaktadır. Programın **“Öncül Yatırım”** fazında ise, derin analiz çalışması yapılan ilgili iklim teknolojisinin – ticari ölçekte ya da ticari ölçek öncesinde – türünün ilk örneği olarak sahada uygulanması yoluyla kapasite artışı sağlanması, sektörün gelişimine katkıda bulunulması, yerileştirme ve sanayileşme fırsatlarının tetiklenmesi hedeflenmektedir.

TTGV Öncül Projeler Yatırım Programı kapsamında, V. Derin Analiz konusu olarak “**Ekonomik Değer Yaratma Potansiyeline Sahip Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (KYKD) ve Karbondioksit Giderim (KDG) Çözümleri**” belirlenmiştir. Bu kapsamda, karbonsuzlaşma sürecinde enerji verimliliği ve yenilenebilir enerjinin ardından önemli bir rol üstlenmesi beklenen KYKD ve KDG teknolojilerinin uluslararası ve ulusal ölçekteki gelişimi ve mevcut durumları analiz edilmiştir. Nisan – Kasım 2024 döneminde yürütülen bu kapsamlı çalışmada, 75 sektör uzmanı ve kuruluş ile irtibata geçilmiş, teknoloji uygulamaları, politikalar ve karbon piyasaları gibi farklı boyutlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Tekno-ekonomik bir perspektifle hazırlanan bu derin analiz raporu, KYKD teknolojilerinin ve KDG çözümlerinin karbonsuzlaşma planlarındaki potansiyelini, uygulanabilirliğini ve iş modellerine entegrasyon süreçlerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışma ile, bu teknolojilerin sunduğu fırsatların anlaşılmasına, ülkemiz için öneriler geliştirilmesine katkı sağlanmıştır. Geniş versiyondan türetilmiş olan elinizdeki [bu özet rapor](#), KYKD teknolojileri ve KDG çözümlerinin ülkemizdeki gelecekteki uygulamalarına yönelik bir rehber ve harekete geçirici bir güç olmayı hedeflemektedir.

Aşağıda bu çalışmada elde edilen sonuçlara dair özet bulgu ve değerlendirmeler yer almaktadır:

1. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (*İng. International Energy Agency [IEA]*), Net Sıfır Emisyon (*İng. Net Zero Emission [NZE]*) Senaryosu’na göre, 1,5°C hedefine ulaşmak için **2030 yılına kadar yaklaşık 1 Gigaton (Gt) CO₂’nin KYKD teknolojileriyle yakalanması ve depolanması gerekmektedir** (2023 yılı itibari ile yalnızca 49 Mt CO₂/yıl yakalanıp depolanmaktadır). KYKD pazarı, küreselde %12,2 yıllık bileşik büyüme oranı (*İng. Compound Average Growth Rate [CAGR]*) ile Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Kanada, Almanya, Hollanda, Danimarka ve Japonya gibi KYKD alanında öncül ülkelerin de katılımıyla hızla büyüme gösteriyor olsa da **teknolojik riskler, finansal riskler ve mevzuat eksikliği** sebebiyle bugün itibariyle bu alanda **iyi işleyen, olgun bir pazar bulunmamaktadır**.
2. Bazı karbon yakalama ve depolama yöntemleri **ticari hale gelmiş olsa da**, bu genellikle teknolojinin **ekonomik bir değer sunduğu** alanlarda olmuştur (Doğalgaz işleme tesislerinde karbondioksitin kolayca yakalanıp, geliştirilmiş petrol geri kazanımı (EOR) süreçlerinde kullanılması; hidrojen üretimi sırasında karbondioksitin yakalanıp, üre üretiminde kullanılması gibi). Bu uygulamaların, iklime olan faydalarını maksimize

etmek gibi bir amaçları yoktur. Öte yandan, KYKD teknolojilerinin geliştirilmesinin iklim açısından zorunlu olduğu uygulamalar (**çimento, çelik, petrokimya, enerji ve doğrudan havadan yakalama gibi**) genellikle **büyük ölçekli testlerden yoksundur**. Bu sektörlerde, KYKD teknolojilerinin **ticari olarak uygulanabilir olabilmesi için büyük ölçekli projelere ve yatırımlara** ihtiyaç duyulmaktadır. Büyük ölçekli uygulamaların finansal olarak sürdürülebilir olabilmesi için politika ve düzenlemeler gerekmektedir ve şu an için, KYKD teknolojilerinin gelişmesi için **devlet desteği** şarttır.

3. **CO₂ yakalama teknolojileri** incelenecek olursa; **mevcut yanma öncesi/ yanma sonrası/ ve oksiyakıt teknolojileri arasında belirgin bir kazanan yoktur**. Çeşitli uygulamalar (kömür/doğal gaz santralleri, farklı endüstriyel tesisler) farklı yakalama teknolojileri portföyü gerektirmektedir: Burada, **yanma öncesi teknolojilerin** uygulama alanları genellikle enerji sektörü ve hidrojen üretimi ile sınırlı kalırken, **yanma-sonrası teknolojilerin** ise enerji sektörü ve çoğu sanayi sektörü dahil **daha geniş uygulama alanı vardır**. **Oksiyakıt yanma teknolojileri**, yüksek saflıkta CO₂ üretebilmesi ve çok yüksek yakalama verimliliğine sahip olmaları sebebi ile, yüksek maliyet ve enerji gereksinimlerine rağmen, özellikle çimento sektörü gibi sektörlerde ilgi çekmektedir ve endüstriyel uygulama sayılarının artması beklenmektedir. **Enerji tesislerinde**, kullanılacak karbon yakalama teknolojilerinin seçimi, yakıt türüne ve operasyon koşullarına bağlı olarak maliyet açısından büyük farklılıklar göstermektedir. **Kömürle çalıştırılan gazlaştırma kombine çevrim tesislerinde yanma öncesi yakalama teknolojileri daha uygun maliyetli olurken, doğalgaz tesislerinde yanma sonrası yakalama teknolojileri ekonomik bir avantaj sunmaktadır**. **Sanayi sektöründe ise yanma-sonrası teknolojiler** mevcut tesise kolay entegre edilebilirlikleri açısından şu an için en çok tercih edilen sistemlerdir.
4. **CO₂ ayırma prosesleri** incelendiğinde, kademeli iyileştirmelerle geliştirilmeye devam eden **amin bazlı solvent sistemler şu an için en umut verici karbondioksit ayırma teknolojisi olarak görülmektedir** ve birçok sektörde uygulanabilmektedir. En gelişmiş ve yaygın olarak benimsenen yakalama teknolojileri, kimyasal ve fiziksel absorpsiyon olsa da **2. ve 3. nesil teknolojiler (membranlar, adsorpsiyon teknolojileri, katı döngüleri vs.)** halihazırda geliştirilmekte olup, **mevcut teknolojileri geride bırakma potansiyeline sahiptir**. **Çimento sektöründe, gelişmiş amin absorpsiyon ve oksiyakıt yanma** yöntemleri en uygun teknolojik çözümler olarak karşımıza çıkarken; çelik sektöründe, farklı gaz akışına sahip birden fazla noktadan emisyon olduğu için **karbon**

yakalama ile ilgili ilerlemeler sınırlıdır. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi sırasında CO₂'nin yakalanması için (mavi hidrojen olarak isimlendirilir) **kimyasal/fiziksel absorpsiyon ve katı adsorbentler ile PSA/VSA (basınç/vakum salınımlı adsorpsiyon) teknolojileri** tercih edilmektedir. Alüminyum sektöründe ticari uygulamada olan bir karbon yakalama projesi bulunmamaktadır.

5. Dış hava ortamından veya seramik sektörü gibi seyreltilmiş kaynaklardan CO₂ yakalamak için **doğrudan havadan yakalama (İng. Direct Air Capture [DAC])** teknolojilerinin, enerji verimliliği, ölçeklenebilirlik ve maliyet düşürme odaklı geliştirilmeleri devam etmektedir. Bu teknolojilerin TRL seviyelerinin 6 – 7'ye yükseltilmesi hedeflenmektedir.
6. Yakalanan CO₂'nin kullanımı ve depolanması, karbon yönetimi için kritik bir çözüm alanıdır. Mevcut durumda, yakalanacak CO₂'nin yaklaşık **%5'inin kullanılması öngörülmüşken, %95'inin kalıcı olarak depolanması** gerekecektir. Mevcut kullanım alanları arasında **geliştirilmiş petrol geri kazanımı (İng. Enhanced Oil Recovery [EOR])** ve üretilimi gibi ticari odaklı uygulamalar öne çıkarken, CO₂'yi sentetik yakıt ve değerli kimyasallara dönüştürmek, karbon yakalama teknolojilerinin maliyetlerini telafi edebilecek umut verici bir yol olarak görülmektedir. Özellikle **sürdürülebilir havacılık yakıtı (İng. Sustainable Aviation Fuel [SAF])** gibi sentetik yakıtların üretimi, havacılık ve denizcilik sektörlerinde büyük bir potansiyele sahiptir.
7. **CO₂ depolama çözümleri**, iklim hedefleri doğrultusunda KYKD projelerinin **en kritik aşaması** olarak kabul edilmektedir. Küresel olarak, şu an için yakalanan CO₂'nin %79'u EOR yöntemiyle, %21'i ise özel jeolojik depolama alanlarında, depolanmaktadır. Bu oranların 2030 yılında, %80 özel jeolojik depolama alanları, %9 EOR ve %11 ise tanımlanmamış depolama yöntemleri olarak değişmesi hedeflenmektedir. **Türkiye'de henüz depolama alanlarının tespiti ile ilgili kamuoyuna yansımış kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır.**
8. KYKD teknolojilerinin **maliyetleri** yakalama/taşıma/depolama maliyetleri olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Yaklaşık olarak, **yakalama maliyetleri toplam maliyetlerin %60–%80'nini, taşıma maliyetleri %10–%20'sini, depolama maliyetleri %10–%20'sini oluşturmaktadır.** KYKD projelerindeki yakalama maliyetini; seçilen karbon yakalama teknolojisi, baca gazı özellikleri (CO₂'nin konsantrasyonu, diğer safsızlıklar), CO₂ yakalama verimi, elde etmek istenen CO₂ saflığı, operasyonun ne kadar esnek olacağı, projenin büyüklüğü (tesisin ölçeği) ve bölgesel ekonomik koşullar (enerji

maliyetleri vs.) belirlemektedir. **Tesisinin işletme ömrü, yük faktörü, yıllık yakalayacağı karbon oranı, mevcut altyapıya entegrasyonu, yakalanan CO₂'ye olan pazar talebi** gibi faktörler de maliyetleri etkilemektedir. **Coğrafi konumun ve enerji maliyetlerinin** KYKD projelerinin maliyeti üzerindeki etkisi oldukça yüksektir.

9. KYKD teknolojilerinin **maliyetleri** günümüzde hâlen **yüksek** olup, 2030 yılına kadar **ton başına €130 – 150** (yukarıda belirtilen çeşitli faktörlere bağlı ve sektörlerle göre oldukça değişkendir, ortalama olarak yazılmıştır) olması beklenmektedir, ki bu da mevcut **Avrupa Birliği (AB) Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)** fiyatlarının üstünde kalmaktadır. Bu maliyetleri karşılayabilmek için **devlet sübvansiyonları ve karbon kredisi gelirleri** potansiyel finansman kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Devlet teşviklerinin yanı sıra, **yüksek kaliteli teknik kredilerin** ülke hedeflerine ve ETS'lere entegre edilmesi önem taşımaktadır. KDG piyasalarının ise, ön ödemeli anlaşmalar olmaksızın henüz yeterince **likit** olmadığı görülmektedir. Başlangıç aşamasında, **gönüllü karbon piyasaları (GKP)** KYKD/KDG projelerini kolaylaştırıcı bir rol oynayabilir. Ancak uzun vadede, daha etkili **karbon kullanımı yaklaşımlarının** geliştirilmesine ihtiyaç duyulacaktır.
10. **DAC teknolojisi ile elde edilen CO₂**, depolama/mineralizasyon gibi yöntemlerle çok uzun süreli olarak (binlerce yıl) ortadan kaldırılabilceği gibi; özellikle özel pazarlarda (gazlı içecek üreticileri ve seralar gibi CO₂ kullanıcıları için yerinde tedarik sağlayabilir) ve **yenilenebilir yakıt üretiminde** kullanıma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, **KDG projelerinde** karbon sertifikaları oluşturmak amacıyla da değerlendirilmektedir.
11. **Endüstriyel KYKD kümelenmelerinin**, küçük ölçekli ve noktasal (<1 Mt CO₂/yıl) projelerden, daha büyük ve etkili (10 – 50 MtCO₂/yıl) projelere geçişi sağladığı görülmektedir. **Ortak taşıma ve depolama altyapısının kullanımı sayesinde maliyetler ve riskler azaltılabilmektedir.** Bu kümelenmeler sayesinde, daha küçük ölçekli emisyon kaynaklarından karbonun yakalanması sağlanabilmekte, depolama için ticari riskler düşürülebilmekte, ölçek ekonomileri yaratılabilmekte ve temiz hidrojen vadileriyle birleşme imkânları ve bölgesel diğer KYKD kümelenmeleriyle bağlantı kurma fırsatları oluşabilmektedir.
12. **Türkiye**, net sıfır emisyon hedefine ulaşmada KYKD teknolojilerini stratejik bir yöntem olarak tanımlasa da, bu teknolojiler mevzuat eksiklikleri, yüksek maliyetleri ve teknolojik riskleri nedeniyle henüz gelişim gösterememiştir. **KYKD projelerinin ekonomik getirilerindeki belirsizlikler**, uygulamayı sınırlamaktadır. ABD, Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) ve 45Q vergi kredisiyle; Avrupa Birliği ise Fit for 55 ve İnovasyon

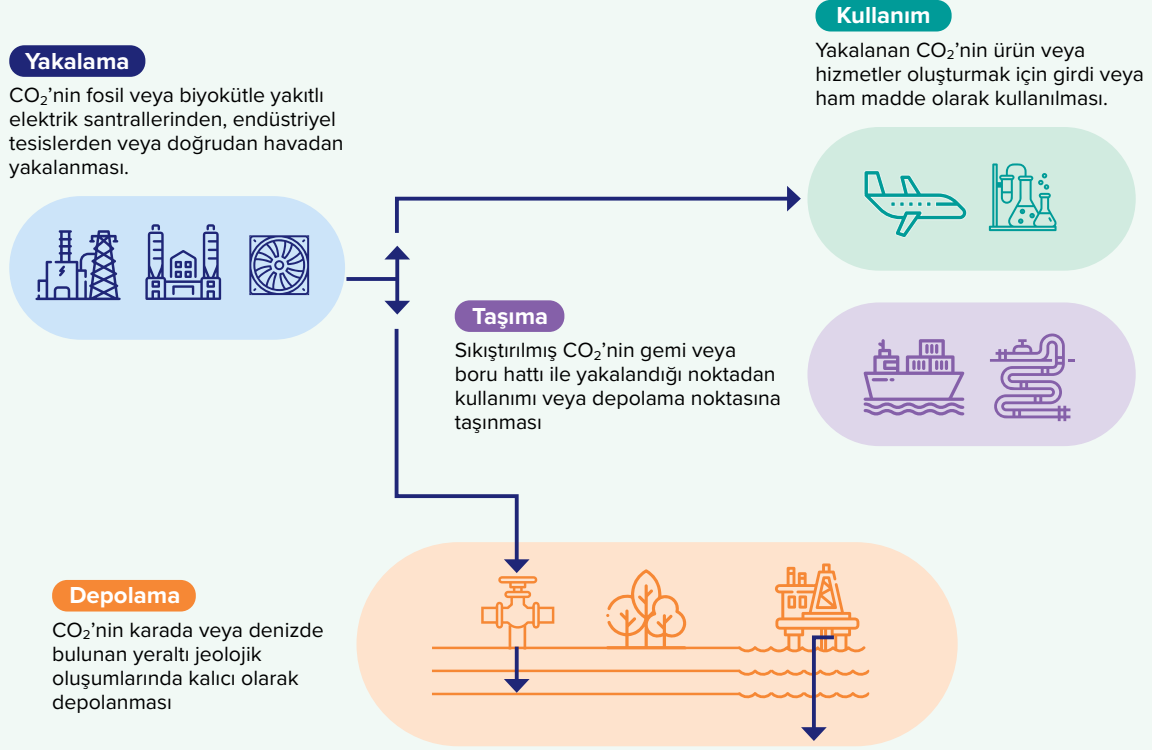
Fonu gibi girişimlerle KYKD projelerini desteklemektedir. Türkiye’de ise bu ölçekte bir teşvik sistemi henüz bulunmamaktadır. **KYKD ve KDG projelerinin hızlı gelişim ve yayılım** gösterebilmeleri için; **devlet desteğine**, özel sektör yatırımlarına, kamu ve özel sektör arasında **iş birliklerine** ve **karbon fiyatlandırma politikalarına** ihtiyaç duyulmaktadır. **Ulusal ETS’nin** devreye girmesi, **karbon salımı yapan işletmeler için bir maliyet unsuru yaratarak KYKD projelerinin hayata geçirilmesinin önünü açacağı düşünülmektedir.** ETS gelirlerinin KYKD ve KDG projelerine aktarılması, bu teknolojilerin yayılımını hızlandırabilir. Ayrıca, **KDG ile uzaklaştırılan CO₂’nin kredilendirilmesi**, yatırımcılar için ek gelir yaratma potansiyeli taşımaktadır.



2. KYKD Teknolojilerine ve KDG Çözümlerine Genel Bakış

KYKD'yi Nasıl Tanımlıyoruz?

Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (KYKD), kısaca fosil yakıt veya biyokütle kullanan enerji üretim tesisleri ve endüstriyel tesisler gibi büyük noktasal kaynaklardan atmosfere salınan karbondioksitin yakalanmasını içeren düşük karbonlu bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. Noktasal salım yapan kaynaklar yanında, karbondioksitin doğrudan havadan yakalanması da mümkündür. KYKD'nin Şekil 2.1'de gösterilen dört aşaması vardır: yakalama, taşıma, kullanım ve/veya güvenli depolama.



Şekil 2.1 KYKD Şeması [1]

KDG'yi Nasıl Tanımlıyoruz?

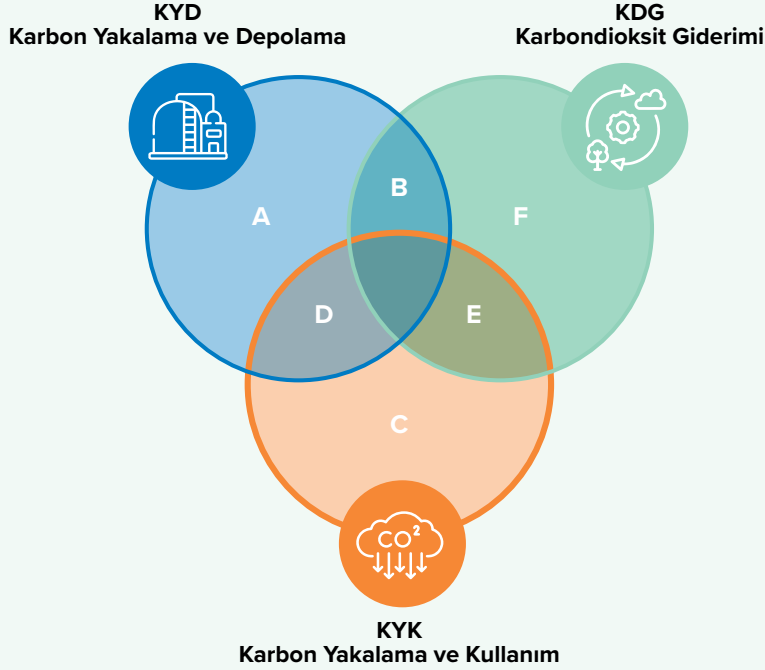
Karbondiyoksit Giderimi (KDG), atmosferdeki CO₂'yi teknoloji veya doğa temelli çözüm yolları ile yakalayıp jeolojik oluşumlar, karasal veya okyanus rezervuarları, ekosistemler ya da faydalı ürünler gibi farklı ortamlarda, on yıllardan on binlerce yıla kadar değişen sürelerle depolayan insan kaynaklı faaliyetler olarak tanımlanmaktadır [2, 3]. KYKD'den farklı olarak, KDG'nin amacı; **CO₂'yi doğrudan atmosferden uzaklaştırmak** veya **doğal karbon yutaklarını geliştirmektir** [4]. KDG yöntemleri, atmosferde birikmiş olan fazla CO₂'yi azaltarak, net karbon salımını sıfırlama veya negatif karbon emisyonuna ulaşma amacını taşımaktadır. KYKD'de de ise endüstriyel süreçlerden kaynaklanan emisyonları yakalama ve kontrol altına alma yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

Herhangi bir yöntemin veya teknolojinin KDG olarak kabul edilebilmesi için üç temel ilkenin sağlanması gerekmektedir [5]:

- I. CO₂'nin atmosferden uzaklaştırılması,
- II. Uzaklaştırılan CO₂'nin atmosfer dışında kısa (on yıllardan yüzyıllara) veya uzun süreli (on bin yıl ve daha uzun) olarak depolanması,
- III. Uzaklaştırma ve depolama sürecinde kullanılan biyokütle, enerji tüketimi, yan ürünler ve CO₂'nin depolanma şekli gibi süreçlerin sebep olduğu yukarı ve aşağı yönlü sera gazı emisyonları kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve tüm bu emisyonların atmosferden uzaklaştırılan ve depolanan toplam CO₂ miktarından düşük olması (nihai karbon bilançosunun negatif olması)

Bu temel ilkelere ek olarak, KDG çözümlerinde İhtiyatlılık (*İng. Precautionary*) ve Önemli Zarar Vermeme (*İng. Do not significant harm*) ilkeleri doğrultusunda biyolojik çeşitlilik ve ekosistem üzerinde olumsuz bir etki yaratmamak önemlidir.

Mevcut KDG çözümleri ve KYKD gibi yenilikçi teknolojileri bir arada ele alarak değerlendirmek, belirlenen hedeflere ulaşmaya yönelik bir patika oluşturmada önemli bir katkı sağlayabilecektir. Ayrıca, bu yaklaşım, farklı olgunluk ve maliyet seviyelerine sahip Ar-Ge pilot faaliyet sübvansiyonları için yol gösterici olacak, çeşitli KDG yaklaşımlarının daha geniş politika araçlarına dahil edilebilmesine ve destekleyici finansman mekanizmalarının oluşmasına da katkı sağlayacaktır. Şekil 2.2'de farklı uygulamalarda KYD, KYK ve KDG arasındaki ilişki verilmiştir.



- A** Emisyonları azaltan ve kalıcı depolamaya sahip olan ancak CO₂ giderimine yol açmayan KYD uygulamaları
Jeolojik depolama ile endüstriyel noktasal kaynak yakalama (örn. Fosil yanma ve proses emisyonları)
- B** CO₂ giderimine yol açabilecek KYD uygulamaları
DACCS, BECCS (yenilebilir biyokütle kullanılıyorsa)
- C** Karbon yoğunluğunu azaltan ancak CO₂'nin kalıcı olarak depolanmasına veya uzaklaştırılmasına yol açmayan KYK uygulamaları
Herhangi bir kaynaktan CO₂'nin yakalanması ve kısa süreli kullanım ürünlerinde kullanılması (örn. Sentetik yakıtlar, plastikler, gazlı içecekler)
- D** Emisyonları azaltan ve uzun süreli (jeolojik olmasa da) depolamaya sahip olan ancak CO₂ giderimine yol açmayan KYK uygulamaları
Fosil yakıt ve proses emisyonlarından CO₂'nin yakalanması ve CO₂'nin kimyasal ve kalıcı olarak bağlı olduğu ürünlerde kullanılması (örn. İnşaat malzemeleri)
- E** CO₂ giderimine yol açabilecek KYK uygulamaları
CO₂'nin yenilenebilir biyokütleden ve atmosferden yakalanması ve CO₂'nin kimyasal olarak uzun vadeli bir şekilde bağlandığı ürünlerde kullanılması (örn. İnşaat malzemeleri)
- F** KYD veya KYK olmayan CO₂ giderimi teknolojileri
Ormanlar, toprak karbonu, biyoçar, geliştirilmiş ayrışma/ aşınma, okyanus gübrelemesi

Şekil 2.2 Farklı Uygulamalarda KYD, KYK ve KDG Arasındaki İlişki [6]

Dünyada KYKD: Uygulama Örnekleri

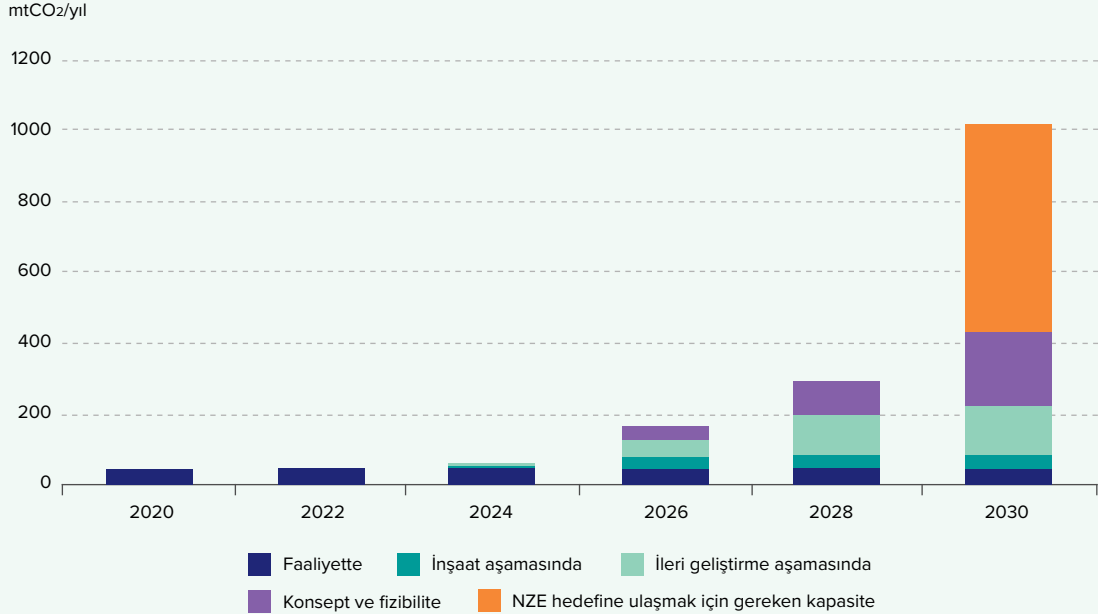
Karbon yakalama ve depolama faaliyetleri 1970'lerden beri sürdürülmektedir. Belirtilen yıllarda, Texas'ın Val Verde bölgesindeki doğal gaz işleme tesisleri, petrol üretimine katkı sağlamak amacıyla CO₂ yakalama ve satma işlemlerine başlamıştır. Bu dönemdeki ana amaç, doğal gazdan kolayca ayrılan yüksek konsantrasyondaki CO₂'yi yakalayıp, geliştirilmiş petrol geri kazanımında kullanmak üzere petrol şirketlerine satmaktır. Bir diğer deyişle, bu yıllardaki uygulamalar iklim odaklı olmaktan ziyade ticari bir amaç taşımaktaydı. Bu ilk projelerden bu yana, KYD uygulamaları daha fazla bölgeye ve alana yayılmıştır. İklim düzenlemeleri tarafından yönlendirilen, CO₂ depolama ve izleme sistemine sahip ilk büyük ölçekli karbon yakalama ve depolama projesi ise, 1996 yılında Norveç'te Sleipner açık deniz doğalgaz işleme tesisinde hayata geçirilmiştir. Projede şimdiye kadar, Kuzey Denizi'nin yaklaşık 1 km altındaki derin tuz akiferlerine 20 Mt'un üzerinde CO₂ depolanmıştır.

Tablo 2.1'de, Global KYD Enstitüsü (*İng. Global CCS Institute*) verilerine göre, 2023 yılı itibarı ile ticari tesislerin (operasyonel, inşaat, ileri ve erken geliştirme aşamalarında) sayıları ve kapasiteleri verilmiştir. 2022 yılında, 194 olan tesis sayısı, 2023 yılı itibarı ile 392'ye yükselmiştir ve toplam kapasiteleri 361 Mt/yıl'dır. Bu tesislerden 41 adeti ise operasyonel durumdadır ve yaklaşık 49 Mt CO₂/yıl yakalama ve depolama kapasitesine sahiptir. Ancak bunların önemli bir kısmı (erken KYD uygulamaları olarak isimlendirilir), daha önce de belirtildiği gibi iklim amaçları için geliştirilmemiştir ve CO₂ salımlarını en aza indirmek ve yakaladıkları CO₂'nin depolanmasını maksimize etmek gibi çalışma amaçları taşımamaktadır.

Tablo 2.1. Ticari KYKD Tesisleri – 2023 [17]

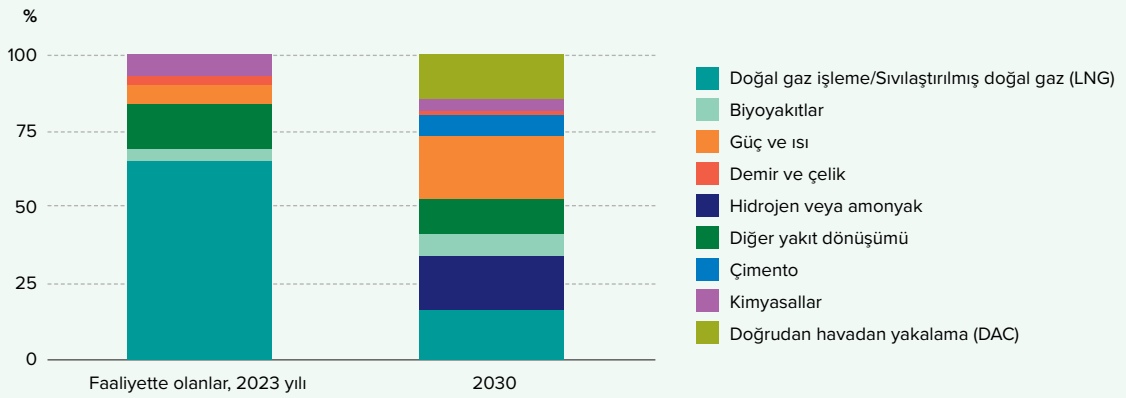
	Operasyonel	İnşaat Aşamasında	İleri Geliştirme Aşamasında	Erken Geliştirme Aşamasında	Toplam
Tesis sayısı	41	26	121	204	392
Kapasite (Mt CO ₂ /yıl)	49	32	144	135	361

Geçmişte KYKD uygulamaları beklentilerin gerisinde kalmış olsa da son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır ve şu anda KYKD değer zinciri boyunca çeşitli aşamalarda 700'den fazla proje geliştirilmektedir. 2030 yılında, yıllık yaklaşık 435 Mt CO₂ yakalama ve yıllık 615 Mt CO₂ depolama kapasitesine ulaşılması planlanmaktadır. Ne var ki, bu rakamlar 2050 Net Sıfır Emisyon (*İng. Net Zero Emission [NZE]*) Senaryosu'nda 2030 yılı için var olan yıllık yaklaşık 1 Gt (1000 Mt) CO₂'nin yakalanıp depolanması hedefinin sırasıyla sadece %40'ına ve %60'ına karşılık gelmektedir [8]. Bu durum, mevcut ve planlanan büyük ölçekli CO₂ yakalama projelerinin kapasitesinin, NZE Senaryosu ile karşılaştırıldığı Şekil 2.3'teki grafik ile görselleştirilmiştir. Görüldüğü gibi, 2030 yılında tüm aşamalardaki projelerin devreye girmesiyle birlikte kapasitede büyük bir artış gözlemlenmektedir. Ancak, turuncu alan (NZE hedefi ile mevcut kapasite arasındaki boşluk) hala oldukça büyüktür, bu durum NZE hedeflerine ulaşmak için daha fazla projeye ve kapasite artışına ihtiyaç olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.3 Mevcut ve Planlanan Büyük Ölçekli CO₂ Yakalama Projelerinin Kapasitesi ile Net Sıfır Emisyon (NZE) Senaryosu Karşılaştırması, 2020-2030 [9]

Şekil 2.4'te ise 2023 yılında faaliyette olan ve 2030 faaliyete geçmesi planlanan KYKD tesislerinin sektörlere göre kapasite yüzdeleri gösterilmiştir. Buradan, günümüzde doğal gaz işleme tesislerinde yoğunlaşan projelerin, çimento, enerji, kimya ve hidrojen gibi emisyon azaltımının zor olduğu sektörlerle – temiz enerji ve süreç değişiklikleriyle kontrol edilmesi güç olan yüksek emisyon yoğunluklu üretim süreçlerine sahip endüstrilere – hızla yayılacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca, günümüzde neredeyse sıfır düzeyinde olan havadan karbondioksit yakalama kapasitesinin önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir [10, 11].



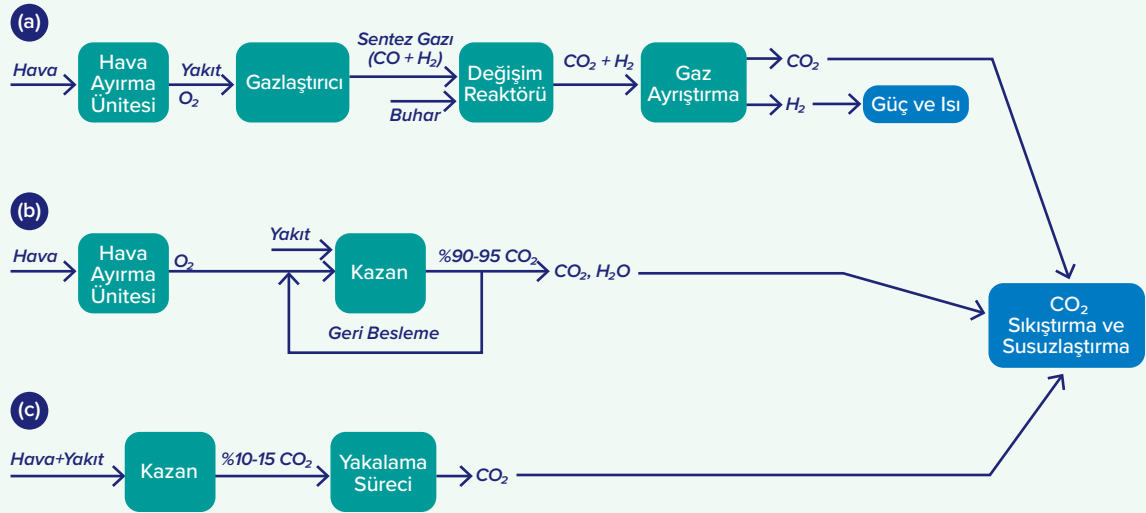
Şekil 2.4 Faaliyette Olan ve Planlanan KYKD Tesislerinin Sektörlere Göre Yüzdesel Kapasiteleri [11]

2.1 Karbon Yakalama Teknolojileri

Karbondioksit yakalamamanın üç geleneksel ana yöntemi vardır: “yanma öncesi”, “oksijenli yanması” ve “yanma sonrası” (Bknz. Şekil 2.5).

- Yanma Öncesi:** Hava, azot (N_2) ve oksijen (O_2) olarak ayrılmak üzere bir hava ayrıştırma ünitesine girer. Buradaki amaç, gazlaştırıcıya girecek olan çok yüksek saflıkta O_2 elde etmektir. Gazlaştırıcıda katı yakıt veya petrol kalıntıları, oksijen ile reaksiyona girerek yüksek basınçlı hidrojen (H_2) ve karbon monoksit (CO) içeren bir sentez gazı oluşturur. Değişim reaktörlerinde, CO 'yu CO_2 ve daha fazla H_2 'ye dönüştürmek için su buharı (H_2O) kullanılır. Gaz ayrıştırma ünitesinde, yüksek basınçlı CO_2 yakalanır, sıkıştırılır ve kullanım veya kalıcı jeolojik depolama için taşınır. Bu işlem sonucunda neredeyse saf hidrojen elde edilir; bu hidrojen, gaz türbininde yakılarak atmosfere CO_2 salımı olmadan elektrik üretir.

- b. Oksi – Yakıt Yanması:** Hava, azot (N_2) ve oksijen (O_2) olarak ayrılmak üzere bir hava ayırıştırma ünitesine girer. O_2 , yakıtla birlikte kazana iletilir. Yakıt saf oksijenle yakıldığında, kazan sıcaklığı oldukça yükselir. Bu sıcaklık artışını sınırlamak için yanma gazlarının bir kısmı geri beslenerek yeniden kazana verilir. %90 – 95 oranında CO_2 içeren kalan yanma gazı kazandan çıkarak yakalama sürecine yönlendirilir ve susuzlaştırılıp sıkıştırılarak taşımaya hazır hale getirilir.
- c. Yanma Sonrası:** Yakıtın yanmasından sonra oluşan baca gazından CO_2 ayrıştırılır. Ön işlemler ile safsızlıklar giderildikten sonra CO_2 yakalama işlemi uygun teknolojiler ile gerçekleştirilir. Mevcut tesislere entegre edilebilmesi sayesinde uygulama esnekliği sağlamaktadır.



Şekil 2.5 Geleneksel CO_2 Yakalama Teknolojilerinin Süreçleri (a) Yanma Öncesi, (b) Oksi – yakıt Yanması, (c) Yanma Sonrası [12]

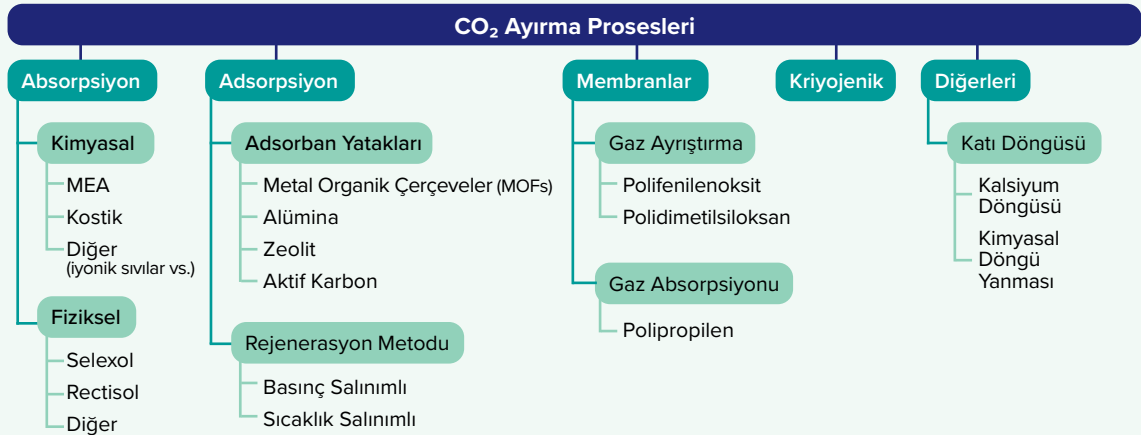
Tablo 2.2'de, bu teknolojilerin uygulama alanları, avantaj ve sınırlamaları ve teknoloji hazırlık seviyeleri (TRL) özetlenmiştir.

Tablo 2.2 Karbon Yakalama Teknolojileri [13-17]

Yakalama Teknolojisi	Uygulama Alanı	Avantajlar	Dezavantajlar	TRL
Yanma Öncesi	Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) santralleri; Doğal Gaz Kombine Çevrim (NGCC) santralleri; hidrojen üretimi; bazı endüstriyel süreçler	- Yüksek CO₂ konsantrasyonlu ve yüksek kısmi basınçlı gaz akışı oluşur böylece yakalama için gerekli enerji ihtiyacı ve maliyet azalır. - Yüksek saflıkta hidrojen üretimi sağlanabilir, temiz yakıt olarak kullanılabilir - Yanma sonrası yöntemine göre daha yüksek ayırma verimliliği ve daha düşük enerji maliyeti vardır	- Sınırlı mevcut tesislerde uygulanabilir (IGCC tesisleri gibi) - Yüksek yatırım maliyetleri gerektirir ve karmaşık bir teknolojidir - Yeni altyapı ve tesisin yeniden tasarımı gereksinimi vardır - Gaz türbininde hidrojen zengin yakıt kullanımı verimlilik sorunları oluşturur	TRL 9 (gaz-su değişimi reaksiyonlarında, asidik gazların gideriminde uzun yıllardır kullanılıyor) <u>Karbon Yakalama uygulamalarında:</u> TRL 8 – 9 (absorpsiyon prosesleri) TRL 6 – 7 (adsorpsiyon prosesleri) TRL 4 – 6 (membran prosesleri)
Oksi – Yakıt Yanması	Enerji üretimi; yüksek emisyonlu endüstriyel süreçler (çimento ve çelik üretimi gibi)	- Yüksek saflıkta CO₂ üretilir, yakalama süreci oldukça kolaylaşır, çok yüksek yakalama verimliliğine sahiptir - Baca gazı miktarının az olması CO₂ ayrıştırma maliyetlerini düşürür.	- Oksijen üretimi için enerji yoğun hava ayrıştırma üniteleri gerektirir; maliyetlidir. - Mevcut tesislere entegrasyonu zordur, yanma süreçlerinde değişiklik gerektirir. - Büyük ölçekli uygulamaları sınırlıdır ve karmaşık işletme gereksinimleri vardır.	TRL 7 (küreselde 2 adet oksi-yakıt teknolojisine sahip tesis bulunuyor)
Yanma Sonrası	Mevcut fosil yakıtlı enerji santralleri (kömür, doğalgaz); geniş endüstriyel süreçler; petrol rafinerileri	- Mevcut tesislere kolayca entegre edilebilir, esneklik sağlar. - Ana yanma sürecinde büyük değişiklik gerektirmez	- CO₂'nin düşük kısmi basıncı yakalama verimliliğini düşürür - Solvent rejenerasyonu için yüksek enerji maliyeti gerektirir. Ayrıca geleneksel solventlerin kullanımı çevresel sorunlar oluşturur - Yüksek sermaye ve işletme maliyetleri gerektirir (yüksek hacimli baca gazları için büyük ekipman boyutu gereksinimi nedeniyle)	TRL 8 – 9 (absorpsiyon prosesleri) TRL 4 – 6 (adsorpsiyon prosesleri) TRL 4 – 5 (membran prosesleri)

2.2 Karbondioksit Ayırma Prosesleri/Teknolojileri

CO₂ yakalama teknolojilerinde, uygun CO₂ ayırma proseslerinin kullanılması gereklidir. CO₂ ayırma prosesinin seçimi, sürecin gerçekleşeceği koşullara, kullanılan yakıt türüne, CO₂'nin kısmi basıncına ve işlenecek gazın bileşimine bağlı olarak belirlenir. CO₂ ayırma prosesleri; sıvı çözücüler ile absorpsiyon, katı malzemeler ile adsorpsiyon, membran ile ayırma, kriyojenik ayırma ve diğer teknolojileri (kalsiyum döngüsü, kimyasal döngü yanması) içermektedir (Bknz. Şekil 2.6). Bu teknolojilerin avantajları/dezavantajları, yakalama verimi ve enerji ihtiyaçları hakkında bilgiler Tablo 2.3'te özetlenmiştir.



Şekil 2.6 CO₂ Ayırma Prosesleri Özeti [12]

Tablo 2.3 Karbondioksit Ayırma Proseslerinin Karşılaştırması [12, 15, 18]

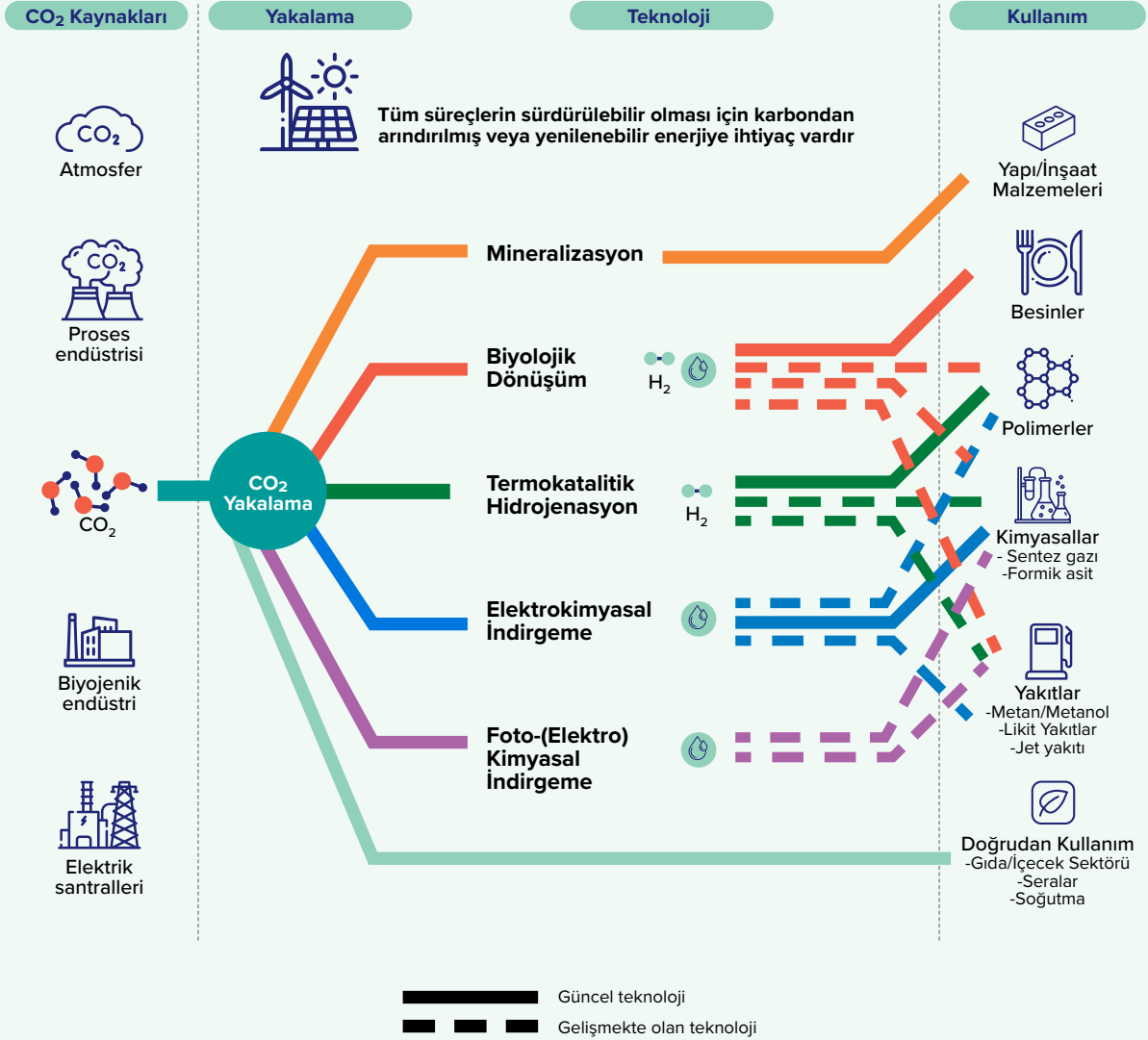
Ayırma Prosesleri	Avantajlar	Dezavantajlar/Zorluklar	Yakalama Verimi (%)	Gerekli Enerji (kg CO ₂)
Absorpsiyon (Fiziksel)	Düşük toksisite; düşük enerji gereksinimi	Sınırlı CO ₂ tutma kapasitesi; pahalı	90–98	4,0–6,0
Absorpsiyon (Kimyasal)	Geniş ticari kullanım; düşük CO ₂ konsantrasyonlarında uygulanabilmesi; kolayca entegre edilebilmesi; CO ₂ saflığının > %99'a ulaşabilmesi	Rejenerasyon işlemi pahalı (enerji yoğun); düşük geri kazanım oranı (<i>ing. Recovery rate</i>); korozif; toksik; büyük ekipman boyutu ihtiyacı	90–98	2,0–4,5

Ayırma Prosesleri	Avantajlar	Dezavantajlar/Zorluklar	Yakalama Verimi (%)	Gerekli Enerji (kg CO ₂)
Absorpsiyon (İyonik Sıvılar)	Düşük buharlaşma; çoğu toksik değil; termal olarak kararlı	Viskoz; pahalı rejenerasyon ve yüksek sermaye maliyeti	95–99	1,5–2,0
Adsorpsiyon	CO ₂ geri kazanımı ve rejenerasyon için düşük enerji gereksinimi; adsorbentlerin (SiO ₂ , MOF gibi) geniş gözenekli yapısı ve ayarlanabilir morfolojileri	Yetersiz CO ₂ seçiciliği; çok sayıda döngüde kimyasal, termal ve mekanik olarak sorbentlerin kararlılığının kaybolması	80–95	2,0–3,0
Membran	Malzemelerin ticari bulunabilirliği yüksek; yüksek ayrıştırma verimliliği (> %80); rejenerasyon prosesi gerektirmez; basit modüler sistem	Engellenmiş kütle transferi; tıkanma ve kirlenme problemleri; endüstriyel olarak kanıtlanmamış durumda	80–90	0,5–6,0
Kriyojenik	Olgun teknoloji; iyi CO ₂ geri kazanımı	CO ₂ konsantrasyonları > %90 için uygulanabilir; çok düşük sıcaklık gerektirir; enerji yoğun	>95	6,0–10,0
Katı Döngüsü	Ucuz ham maddeler ile sorbent sentezi; CO ₂ ana yanma ürünü olup N ₂ ile karışmadığından enerji yoğun olan ayırma işlemine gerek kalmaması	Sorbentlerin hızlı degradasyonu; oksijen taşıyıcılarının stabilitesinin yetersiz olması; yetersiz büyük ölçekli operasyon deneyimi	85–95	3,0–5,0

2.3 Karbon Kullanım Sistemleri

Karbon Yakalama ve Kullanım (KYK) (*İng. Carbon Capture and Utilization [CCU]*), küresel karbon yönetimi araç setinde kullanılan önemli bir yöntemdir [19]. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere, noktasal kaynaklardan veya doğrudan havadan yakalanan CO₂, çeşitli dönüşüm yolları kullanılarak sentetik yakıtlara (metanol/etanol/havacılık yakıtı), kimyasal ara maddelere, polimerlere (poliüretan, plastik) ve yapı/İNŞAAT malzemelerine dönüştürülebilmektedir. Ayrıca, CO₂ dönüşüme uğratılmadan doğrudan; seralarda/üre – gübre üretiminde verim artırmak için, soğutma sistemlerinde ısı transfer sıvısı olarak, yiyecek/içecek endüstrisinde, geliştirilmiş petrol geri kazanımında çözücü madde olarak kullanılabilir.

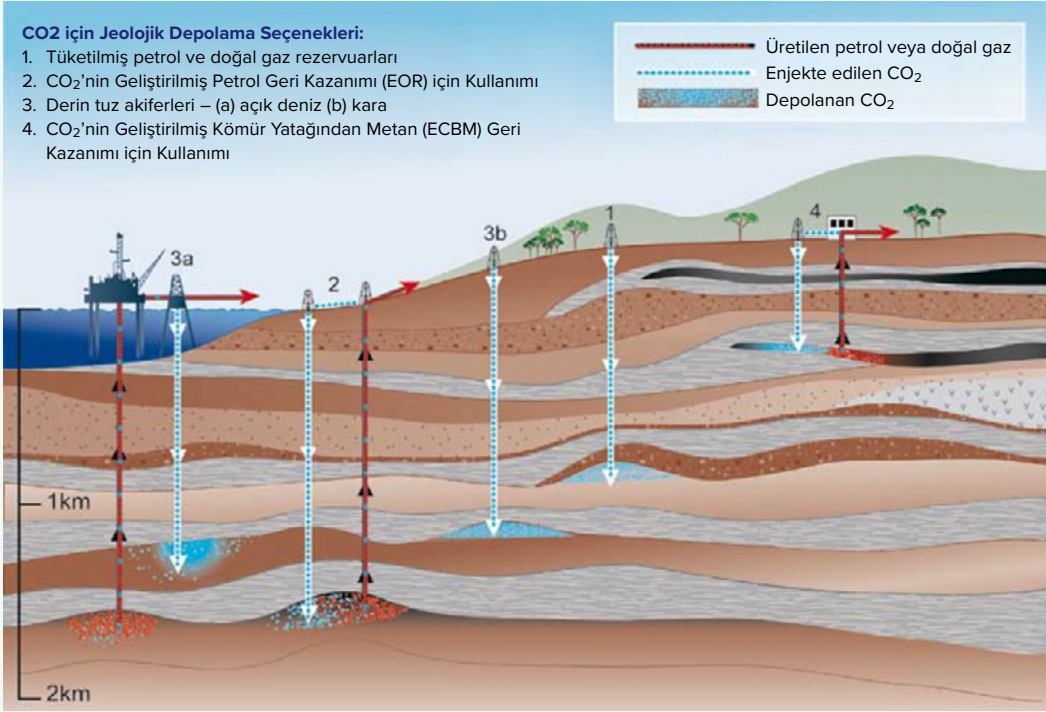
Günümüzdeki ticari KYK uygulamaları çoğunlukla CO₂’nin gübrenin ham maddesi olan üre üretiminde (~130 Mt – %57), EOR’da (~80 Mt – %34), gıda ve içecek üretiminde, seralarda kullanımı gibi doğrudan kullanıldığı alanları içermektedir [21, 22]. Bu ticari uygulamalara ek olarak, metanol, etanol veya formik asit üretim işlemleri artık pilot tesis veya ispat ölçeğindedir. Laboratuvar ölçekli sistemler ise; alkoller, aldehytler, dimetil eter (DME), organik asitler ve karbamatlar üretmek için CO₂ kullanımını araştırmaktadır [23]. Son yıllarda, ulusal ve uluslararası emisyon azaltım hedefleri, yenilenebilir enerjinin yükselişi ve enerji güvenliği arayışı gibi etmenler sayesinde, KYK kapsamında CO₂’nin dönüştürülerek kullanımı ilgi çekmeye başlamıştır. CO₂; biyolojik, kimyasal ve mineralizasyon olmak üzere üç temel yöntem kullanılarak faydalı ürünlere dönüştürülmektedir [24]. Biyolojik dönüşümde, mikroorganizmalar (Örn: mikroalgler) CO₂’yi hızla emerek ve güneş ışığını kullanarak, CO₂’yi kimyasal veya yakıt gibi nihai bir ürüne dönüştürmektedir [25]. Kimyasal dönüşümde, karbon – oksijen bağı kırılmakta ve karbon, nihai ürün eldesi için diğer elementlere (hidrojen) bağlanmaktadır. Bu süreçte, CO₂, emtia kimyasallarının ve yakıtların sentezi için reaktant veya ham madde olarak kullanılmaktadır [25]. Mineralizasyon veya karbonatlamada, CO₂, kalsiyum veya magnezyum içeren minerallerle doğal bir reaksiyona girerek değerli yapı/İNŞAAT malzemeleri üretimi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde, CO₂, nihai ürüne (beton/agrega) entegre edilerek katı karbonatlar şeklinde depolanabilmektedir [26].

Şekil 2.7 KYK Süreci ve CO₂ Dönüşüm Yöntemleri [20]

2.4 Karbon Depolama Sistemleri

Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) (*İng. Carbon Capture and Storage [CCS]*) teknolojisi, noktasal kaynaklardan veya doğrudan havadan yakalanan CO₂'nin jeolojik depolama alanlarına iletilmesi ilkesine dayanmaktadır. CO₂'nin jeolojik olarak depolanması, sıvı veya süperkritik formdaki CO₂'nin, yer altında 800 – 1000 m'den derin ve yüksek basınçlı (100 bar'dan büyük) derin jeolojik oluşumlara depolanması anlamına gelmektedir [27]. Bu sayede, CO₂ atmosferden kalıcı bir şekilde uzaklaştırılmış olmaktadır. Başarısız denemelerin de ortaya çıktığı durumlar ile birlikte, CO₂ enjeksiyonu ve depolanması, 50 yılı aşkın süredir güvenli ve etkili bir şekilde çalışmaktadır. Sadece Norveç'te, Sleipner ve Snøhvit tesislerinin 1996'dan beri yaklaşık 26 milyon ton CO₂ depoladığı bilinmektedir [28]. IPCC'nin KYD Özel Raporu'nda, uygun şekilde seçilip yönetilen jeolojik rezervuarların, enjekte edilen CO₂'nin %99'undan fazlasını “çok muhtemel olarak” 100 yıldan uzun süre, hatta “muhtemel olarak” 1000 yıldan uzun süre tutabileceği belirtilmiştir [29].

Güvenli ve kalıcı depolama yapılabilecek seçenekler; Tuzlu Su Akiferlerine Depolama, Tükenmiş Petrol ve Doğalgaz Rezervuarlarına Depolama, Derin Kömür Damarlarına Depolama (Geliştirilmiş Kömür Yatağından Metan (*İng. Enhanced Coal Bed Methane [ECBM]*) Geri Kazanımı), Bazalt Oluşumlara Depolama, Gaz Hidrat Depolama ve Okyanus Depolaması olarak sıralanmaktadır (Şekil 2.8) [29]. Bu depolama seçeneklerinin özellikleri, avantaj ve dezavantajları Tablo 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.8 CO₂ için Jeolojik Depolama Seçenekleri [29]

CO₂'nin derin yeraltı oluşumlarında güvenli bir şekilde, sızıntı riski olmadan tutulabilmesi için enjekte edilecek olan CO₂'nin miktarı, enjeksiyon hızı ve süresi doğru bir şekilde belirlenmelidir. Bu süreci etkileyen önemli fiziksel özellikler arasında; kayaçların gözeneklilik kapasiteleri (porozite), kayaçtaki sıvı/gaz geçişini etkileyen geçirgenlik seviyesi (permeabilite) ve basınç öne çıkmaktadır [30]. Jeolojik oluşumlara enjekte edilen CO₂, fiziksel ve kimyasal süreçlerle hapsedilmekte ve binlerce yıl boyunca güvenli bir şekilde depolanabilmektedir [29].

Tablo 2.4 CO₂ Depolama Yöntemleri

Depolama Seçeneği	Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar
Tuz Akiferleri	Tuzlu su içeren derin yeraltı akiferleridir. CO ₂ , su ile temas ettiğinde çözünür ve kayaç gözeneklerinde depolanır.	- Geniş coğrafi dağılım - Yüksek depolama kapasitesi - CO₂ çözünürlüğü nedeniyle güvenli	- Tuzlu su rezervuarları sınırlıdır - Sızıntı riskleri
Tükenmiş Petrol ve Doğalgaz Rezervuarları	Daha önce petrol veya gaz çıkarımı yapılan kuyulara CO ₂ geri basılır.	- Yerleşik altyapı - Basınç yönetimi kolay - EOR (enhanced oil recovery) ile geri kazanım	- Düşük maliyetli ancak sınırlı kapasite - Eski kuyuların sızdırmazlık sorunları olabilir
Derin Kömür Damarları	Derin yerlerdeki kömür damarları CO ₂ 'yi emip kömür içindeki gözenekler CO ₂ 'yi bağlar.	- CO₂'nin metan ile yer değiştirmesiyle metan geri kazanımı - Bazı rezervuarlarda iyi kapasite	- Metan gazının atmosfere salınma riski - Yeterli derin kömür damarları sınırlı
Bazalt Oluşumlar	CO ₂ 'nin bazalt kayaçlarla mineralize olduğu depolama yöntemidir. CO ₂ bazaltla reaksiyona girerek karbonat minerallerine dönüşür.	- Kalıcı depolama - Mineralizasyon güvenliği sağlar	- Reaksiyon hızının kontrolü zor - Sınırlı alanlarda uygulanabilir
Gaz Hidrat Depolama	Gaz hidratlar, yüksek basınç ve düşük sıcaklıklarda oluşan katı yapılı gaz-su bileşikleridir. CO ₂ , bu yapılarla değiştirilebilir.	- Büyük potansiyel kapasite - Metan ile yer değişimi	- Yüksek basınç gereksinimi - Gaz hidratların kararsızlığı ve çözünme riski
Okyanus Depolaması	CO ₂ 'nin okyanus tabanına enjekte edilmesi veya okyanus yüzeyinde CO ₂ çözüldürülmesi ile gerçekleştirilir.	- Çok büyük hacimler - Coğrafi olarak geniş uygulanabilirlik	- Okyanus asitlenmesi riski - Ekosistem üzerindeki olumsuz etkiler - Uluslararası düzenleme zorlukları

2.5 Sektörel KYKD Uygulamaları ve Maliyet Analizleri

Karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojilerinin geniş çapta uygulanmasının önündeki en büyük engellerden biri mevcut maliyetlerdir.

Karbon yakalama ve depolama faaliyetlerinin toplam maliyeti aşağıdaki unsurları içerir [31]:

- Emisyon kaynağından CO₂ yakalama – CO₂'yi gaz akışından hacimce %95'in üzerinde saflığa kadar ayırma için teknolojilerin kurulumu ve işletilmesi,
- Taşıma yöntemine bağlı olarak CO₂ dehidrasyonu ve sıkıştırma/sıvılaştırma maliyetleri,
- Boru hattı veya gemi, mobil araçlar ile CO₂ taşınması için gerekli altyapı yatırımları,
- CO₂ enjeksiyonu için uygun alanların tespiti ve keşfinin yapılması,
- Depolanan CO₂'nin izlenmesi ve doğrulanması faaliyetleri.

Karbon yakalama teknolojisinin seçimi, KYD'de hayati bir husustur, ancak maliyeti etkileyen tek faktör değildir. KYD değer zinciri boyunca maliyetlere bir dizi başka faktör de etki etmektedir. Karbon yakalama projelerinin maliyeti; baca gazı özellikleri (örn. CO₂'nin kısmi basıncı), kullanılan spesifik teknoloji, CO₂'nin yakalama verimliliği ve elde etmek istenen CO₂ saflığı, operasyonun esnekliği, projenin büyüklüğü ve bölgesel ekonomik koşullar gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak; proje maliyeti, yatırım maliyeti (CAPEX), işletme maliyeti (OPEX) ve seviyelendirilmiş karbon yakalama maliyeti (LCOC) – (*Ing. Levelized Cost of Carbon Capture*) – bileşenleri olarak ifade edilmektedir.

Örneğin; yıllık 1 – 1.5 Mt CO₂ (bu değer ortalama büyüklükteki bir çimento fabrikasının yıllık CO₂ emisyon değerine denk gelmektedir) yakalama kapasitesine sahip ileri düzey amine bazlı yanma sonrası yakalama teknolojisi, aşağıdaki maliyet yapısına sahip olabilmektedir (bunlar tahmini değerlerdir):

CAPEX: \$400 milyon

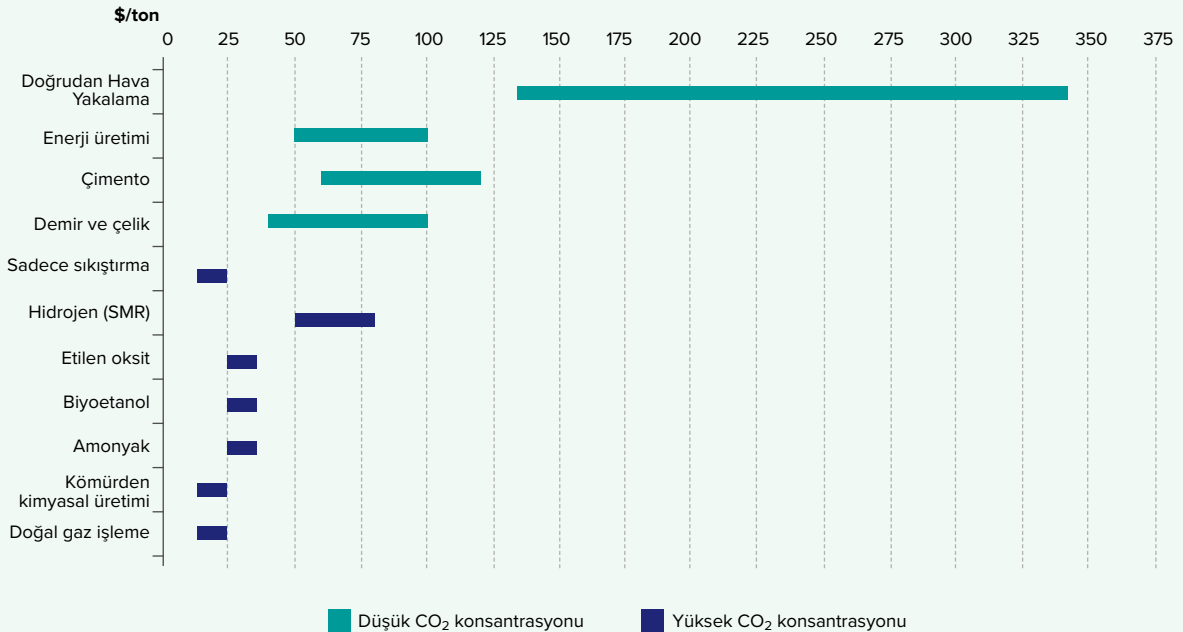
OPEX: \$75 milyon/ yıl

LCOC: \$80 / ton CO₂ (taşıma ve depolama hariç)

KYD projelerinin maliyetlerinin projeye özgü olduğu bilinmektedir; tesisin işletme ömrü, yük faktörü, yıllık karbon yakalama oranı, mevcut altyapıya entegrasyon ve yakalanan CO₂'ye olan pazar talebi gibi faktörler de maliyetleri etkilemektedir [32].

Endüstriyel kaynaklara uygulanan KYD'nin tekno – ekonomik performansı üzerine kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiş olsa da maliyet tahminlerinde büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durum kısmen incelenen farklı projeler ve yakalama teknolojisi seçimindeki farklılıklardan kaynaklansa da önemli bir kısmı maliyet değerlendirme yöntemleri ve varsayımlarıyla ilgili hususlardan kaynaklanmaktadır. KYD maliyetleri genel olarak yüksek gibi algılsa da maliyet profili çok farklı parametrelere bağlıdır. Projeden projeye ve coğrafyadan coğrafyaya farklılıklar göstermektedir. Örneğin, “saf” veya yüksek konsantrasyonlu CO₂ akışları üreten endüstriyel süreçlerde (etanol üretimi veya doğal gaz işleme gibi) yakalama maliyeti (seviyelendirmiş sermaye maliyeti) ton başına **\$15–25** arasında değişirken, “seyreltilmiş” gaz akışlarına sahip çimento üretimi ve enerji üretimi gibi işlemlerde ise yakalama maliyeti ton başına **\$40–120** arasında olabilmektedir. Bundan dolayı maliyet hesaplarının her bir proje / uygulama için ayrı yapılması ile sağlıklı bir sonuca ulaşılabilecektir.

Sektörlere göre 2019 yılı için ortalama CO₂ yakalama maliyetleri Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Sektörlere Göre Seviyelendirilmiş CO₂ Yakalama Maliyetleri, 2019 (Maliyet tahminleri, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki verilere dayanmaktadır. Yakalama maliyetlerine sıkıştırma maliyetleri dahil edilmiştir) [33]

Taşıma ve depolama maliyetleri de projeden projeye büyük ölçüde değişmektedir ve esas olarak CO₂ hacimleri, taşıma mesafeleri ve depolama koşullarına bağlıdır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde, karada boru hattı ile taşıma maliyeti ton başına \$2–14 arasında değişirken, karada depolama maliyetleri daha geniş bir yelpazede olabilmektedir (<\$10 ile \$60 arası). Ancak, depolamanın ekonomik fayda sağladığı bazı durumlarda – örneğin, CO₂'nin petrol üretimini artırmak için petrol sahalarına enjekte edilip kalıcı olarak depolanması – depolama maliyetleri (kuramsal olarak) negatif de olabilmektedir [33].

Tablo 2.5'te sektörel bazda operasyonel aşamada olan KYD tesislerinin CAPEX maliyetleri ile ilgili örneklerle yer verilmiştir. Ayrıca, ilgili sektörler için literatürde yer alan geniş kapsamlı maliyet analizleri incelenmiş, kaçınılan CO₂ maliyetleri sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 2.5 Sektörel KYD Uygulama Örnekleri

Endüstri	Öne Çıkan Teknoloji	Endüstriyel Ölçek Uygulama Örneği	Kaçınılan CO ₂ maliyetleri
Çimento	- Kimyasal Absorpsiyon (TRL 7-8) - Kalsiyum Döngüsü (TRL 7-8)	- Henüz yok - Heidelberg Materials Brevik Çimento (Norveç, 2024 sonu) 0,4 Mton CO₂/yıl - CAPEX: €420 milyon [34].	€52,4/tCO ₂ , €80,2/tCO ₂ , €102,9/tCO ₂ [35, 36].
Çelik	Kimyasal Absorpsiyon (TRL 9)	- Tek uygulama: Al Reyadah Emirates Steel – DRI (Abu Dabi) 0,8 Mt CO₂/yıl - Maliyet verisi yok - ArcelorMittal -Yüksek Fırın (Fransa, 2030) 1 Mt CO₂/yıl - Kalıcı depolama yapılacak, ilk KYD'li sıfır emisyon çelik	€55/tCO ₂ , €60,6/tCO ₂ [37].

Endüstri	Öne Çıkan Teknoloji	Endüstriyel Ölçek Uygulama Örneği	Kaçınılan CO ₂ maliyetleri
Enerji	- Kimyasal absorpsiyon (kömür+doğalgaz) (TRL9) - Kimyasal absorpsiyon (biyokütle) (TRL 7-8)	Boundary Dam-Kömür (Kanada)	\$52/tCO ₂ – \$85/tCO ₂ (NGCC) [34].
		1 Mt CO₂/yıl - CAPEX: Ca.\$1,47 milyar (%50'si yakalama için) [38].	
		Petra Nova – Kömür (ABD)	
		1,4 Mt CO₂/yıl - CAPEX: \$1 milyar (%50'si yakalama için) [38].	
Hidrojen	- Kimyasal/fiziksel absorption (TRL 9) - Katı Adsorbent (VSA) (TRL 9)	Port Arthur – Air Products (ABD)	€36,4/tCO ₂ , €55,5/tCO ₂ , €58,7/tCO ₂ (SMR için) [39].
		0.9 Mt CO₂/yıl - CAPEX: \$431 milyon [38].	
		Shell Quest (Kanada)	
		CAPEX: Ca.\$790 milyon [38].	
Gübre	Gübre üretim emisyonlarının yakalanması, aslında ham maddesi olan hidrojenin üretimi sırasında oluşan karbondioksitin yakalanması ile ilgilidir.		
Alüminyum	Alüminyum üretimi ile ilgili planlanan bir karbon yakalama projesi yoktur.		

2.6 Karbondioksit Giderim (KDG) Çözümleri

IPCC (2018) tarafından belirlenen KDG yöntemlerinin gruplandırılmasında üzerinde anlaşmaya varılmış tek bir yol bulunmamakla birlikte, bu çalışmada KDG çözümleri doğa temelli ve teknoloji temelli çözümler olarak iki ana kategoride incelenmektedir.

Doğa Temelli Çözümler (DTÇ) (*İng. Nature – based Solutions [NbS]*), doğal ve insan müdahalesi görmüş ekosistemlerin korunması, sürdürülebilir yönetimi ve restorasyonu aracılığıyla toplumsal sorunlara yanıt vermeyi ve hem insanlara hem de doğaya fayda sağlamayı hedefleyen stratejiler olarak tanımlanmaktadır [40]. Bu çözümler, iklim değişikliği, afet riski, gıda ve su güvenliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve insan sağlığı gibi küresel

ölçekte önem arz eden zorlukların üstesinden gelmeye yönelik sürdürülebilir kalkınma çözümleri sunmaktadır [41]. Ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma, sulak alan ve turbalık restorasyonu, toprakla karbon tutumu, ve mavi karbon yönetimi DTÇ kapsamında yer alan KDG yöntemleri olarak öne çıkmaktadır. Küresel ölçekte DTÇ yöntemlerine daha fazla önem verilmesinin, insan ve çevre odaklı kalkınmayı teşvik ederek gelecekteki şoklara karşı daha dirençli bir sistem oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

Teknoloji temelli KDG çözümleri, atmosferdeki karbonu uzun vadeli olarak tutmayı hedefleyen yenilikçi yöntemler olarak tanımlanmaktadır. Bu çözümler arasında karbon yakalama teknolojilerinin kullanıldığı Karbon Yakalama ve Depolama Özellikli Biyoenerji (BECCS), Doğrudan Havadan Karbon Yakalama ve Depolama (DACCS), biyokütleden elde edilen biyoçar, geliştirilmiş ayrıştırma/aşınma, ve okyanus alkalinitesinin artırılması gibi yöntemler yer almaktadır. Her bir teknoloji, karbonu atmosferden çekerek ya biyolojik süreçler aracılığıyla ya da kimyasal ve fiziksel mekanizmalarla uzun süreli depolamayı amaçlamaktadır.

Şekil 2.10'da yer alan IPCC ve UNEP raporlarında sıralanan KDG yöntemleri, karbon yakalama mekanizmalarına, uygulanabilirliğe, ölçeklenebilirliğe, izleme, raporlama ve doğrulama (İRD) kolaylığına, potansiyel sonuçlara, ortalama maliyetlere, kamu algısına, depolama araçlarına ve sürelerine göre kategorize edilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, özellikle ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma gibi DTÇ çözümleri, karbon yakalama potansiyelleri yüksek olmasının yanı sıra, kamu algısında daha fazla kabul görmektedir. Ancak bu çözümlerin büyük bir kısmında, İRD faaliyetlerinin henüz istenen seviyede olmadığı ve daha fazla çalışma gerektirdiği de açıktır. Ayrıca, doğa temelli çözümlerin etkili ve uzun vadeli olabilmesi için bu yöntemler ile giderilen karbonun depolama süresi konusu da önem taşımaktadır. Doğa temelli yöntemlerin depolama sürelerinin on yıllardan yüz yıllara kadar değişkenlik göstermesi, kalıcılık konusunda dikkatli olunmasını gerektirmektedir. KDG çözümleri, sahip oldukları karmaşık yapılar nedeniyle değer zincirinde yukarı ve aşağı yönlü çevresel etkilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (*İng. Life-Cycle Assessment [LCA]*) gibi metodolojilerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır [42]. Teknoloji temelli çözümlerin sağladığı depolama sürelerinin çok daha uzun (yüz yıllardan on binlerce yıllara) olmasına rağmen, bu yöntemlerin maliyetlerinin düşürülmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bunun yanında, kamu algısını iyileştirme ve kapasite geliştirme çalışmaları da önceliklendirilmelidir.

Teknoloji	Ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma	Toprakla karbon tutumu	Biyoçar	Karbon yakalama ve depolama özellikli biyoenerji (BECCS)	Doğrudan havadan karbon yakalama ve depolama	Geliştirilmiş ayrışma/aşınma	Sulak alan ve turbalık restorasyonu	Mavi karbon yönetimi	Okyanus alkalinitesi geliştirme	Okyanus gübrelemesi
Yakalama Mekanizması	Arazi temelli biyolojik	Arazi temelli biyolojik	Arazi temelli biyolojik	Arazi temelli biyolojik	Kimyasal	Geo-kimyasal	Arazi temelli biyolojik	Okyanus temelli biyolojik	Geo-kimyasal	Okyanus temelli biyolojik
Uygulanabilirlik / Hazırlık	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ölçeklenebilirlik	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
İRD* Kolaylığı	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Potansiyel Sonuçlar	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Kamu Algısı	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Maliyet (US\$/tCO2)	<100	<100	100-500	100-500	>800	100-500	<100	<100	Ölçmek için çok erken	
Depolama Ortamı/Aracı										
	Binalar, bitki örtüsü, toprak ve sediman			Jeolojik rezervuar		Mineraller	Bitki örtüsü, toprak ve sediman		Mineraller	Deniz sedimanı
Kalıcılık	On yıllardan yüzyıllara			10000 yıl veya daha uzun			On yıllardan yüzyıllara		10000 yıl veya daha uzun	Yüzyıllardan binlerce yıllara
Metrik (ölçü) performansı ● Önemli ilerleme ● Orta dereceli ilerleme ● Biraz ilerleme ● Yok/Çok kısıtlı ilerleme										

Şekil 2.10 KDG Yöntemleri ve Temel Özellikleri [19]

KDG çözümleri ile giderilen CO₂'nin sertifikasyonu için belirli kriterler bulunmaktadır. Bu kriterler ile, CO₂ giderimlerinin doğru bir şekilde ölçülmesi, karbonun belirlenen bir süre boyunca depolanması (ürünlerde depolanan karbon için en az 35 yıl), mevcut uygulamaların ötesine geçilmesi ve örneğin biyolojik çeşitlilik üzerinde olumlu etkiler sağlayarak daha geniş sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanması beklenmektedir.

KDG çözümlerini hem düzenlemek hem de teşvik etmek amacıyla küresel ölçekte ciddi adımlar atılmaktadır. KDG çözümleri, küresel ölçekte ciddi bir dönüşüm ve teşvik sürecinden geçmekte olup, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlamak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Küresel ölçekte karbon kredisi üreten örnek vaka çalışmalarından elde edilen sonuçlar dikkate alındığında [43], Türkiye'nin ekosistemine uygun olarak ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma, sulak alan ve turbalık restorasyonu, toprakta karbon tutumu ve mavi karbon yönetimi çözümlerinin öne çıktığı söylenebilir. Bununla birlikte, Türkiye'nin BECCS konusunu da değerlendirmesi yerinde bir adım olacaktır.



3.

KYKD ve KDG Çözümlerinin Etkinleştirilmesinde Karbon Piyasalarının Rolü

Karbon yönetiminde yenilikçi çözümler olan KYKD ile KDG yöntemleri, yüksek maliyetlerinin yanı sıra öngörülebilir ve istikrarlı bir gelir akışı sağlayamamaları nedeniyle yatırımcıların güvenini henüz kazanamamış ve beklenen ilgiyi görememiştir. Bu durum, özellikle TRL'si düşük olan KYKD çözümlerinin geliştirilip ölçeklendirilmesi açısından büyük bir engel teşkil etmektedir. KYKD ve KDG çözümlerinin ticarileştirilmesi için olası iş modelleriyle birlikte değerlendirilmesi, bu alandaki yatırımların artmasına katkıda bulunabilmektedir. Birçok KYKD ve KDG odaklı şirket, iş modellerini ilgili projelerden elde edilen karbon giderme kredilerini (*İng. CO₂ removal credits [CRCs]*) şirketlere veya ülkelere satmak üzerine kurmaktadır. Başka bir deyişle, KYKD ve KDG projeleriyle atmosferden uzaklaştırılan karbon, karbon kredilendirme yoluyla piyasada satılarak ek bir gelir kaynağı oluşturabilmektedir. Bu yaklaşım üç ana şekilde gerçekleştirilebilir:

1. Zorunlu Karbon Piyasaları (Uyum Piyasaları): Ulusal, bölgesel veya yerel düzeyde oluşturulan Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) (*İng. Compliance markets*)
2. Gönüllü Karbon Piyasaları: Kendi inisiyatifiyle karbon ayak izini azaltmak isteyenler için

3. Niş Gönüllü Karbon Piyasaları: Belirli projelere odaklanan, daha dar kapsamlı piyasalar

KDG ve KYKD Çerçevesinde Zorunlu Karbon Piyasaları (Uyum Piyasaları):

Bu piyasalar, devletler tarafından belirlenen zorunlu emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda çalışmaktadır. Örneğin, ulusal bir ETS (Emisyon Ticaret Sistemi) veya uygulanan karbon vergisi gibi sistemler kapsamında, belirlenen karbon kredileri ticaretine olanak tanımaktadır. Zorunlu piyasalarda, işletmeler, salımlarını belirlenen referans emisyon seviyesi altına düşürerek veya karbonu kalıcı olarak tutarak karbon kredisi üretebilirler. Bu süreç, doğrulanmış bir kredi arzı yaratmaktadır [44].

ETS, KDG ve KYKD projelerinin teşvik edilmesinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. BECCS ve DACCS gibi yenilikçi teknolojilerin yüksek maliyetleri ve erken entegrasyon zorlukları, karbon giderme kredilerinin ETS'ye entegre edilmesiyle aşılabilecektir. Bu tür bir entegrasyon, karbon piyasalarının likiditesini artırabilecek, bu teknolojilerde erken öğrenme süreçlerini destekleyebilecek ve teknolojik gelişimi hızlandırabilecektir [45].

AB'nin Karbon Giderimi ve Karbon Tarımı Sertifikasyonu Yönetmeliği (*İng. EU Carbon Removals and Carbon Farming Certification [CRCF] Regulation*), Türkiye'de geliştirilebilecek bir sertifikasyon sistemi için iyi bir örnek teşkil etmektedir [46]. Böyle bir sistem, şeffaflık ve standartlaştırma sağlayarak KDG ve KYKD projelerini destekleyerek, bu projelere finansman sağlanmasına yardımcı olabileme potansiyeli taşımaktadır. ETS'nin KDG ve KYKD teknolojilerini kapsayacak şekilde tasarlanması, karbon piyasalarının esnekliğini artırırken, yenilikçi teknolojilerin yaygınlaşmasını destekleyebilecek ve iklim değişikliği ile mücadelede etkili bir araç haline gelebilecektir. Bu yaklaşım, hem ekonomik büyümeye hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilecektir.

KDG ve KYKD Çerçevesinde Gönüllü Karbon Piyasaları:

Gönüllü Karbon Piyasaları (GKP), merkezi bir otoriteye bağlı olmaksızın, özel sektör aktörlerinin sera gazı emisyonlarını azaltan veya atmosferden uzaklaştıran projelerden elde edilen karbon kredilerini alıp sattığı bir yapı olarak tanımlanmaktadır [47]. Bu piyasada her bir karbon kredisi, azaltılan veya atmosferden uzaklaştırılan bir ton CO_{2,eşd.}'i temsil etmektedir. GKP kapsamında, proje bazlı karbon kredileri, gönüllü talep doğrultusunda standart belirleyiciler tarafından sertifikalandırılmakta ve bu süreç bağımsız doğrulama ile denetlenmektedir [48]. Sonuç olarak, farklı niteliklere sahip piyasadaki karbon kredileri,

“azaltım” ve “uzaklaştırma” olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu kategoriler, karbon kredilerinin piyasa fiyatını doğrudan etkilemekte olup, uzaklaştırma projeleri genellikle daha yüksek bütünlüğe sahip ve daha maliyetli olarak kabul edilmektedir.

GKP kapsamındaki sertifika standartları arasında, KYD+ Initiative öncülüğünde, KDG ve teknoloji tabanlı KYD faaliyetleri için Verra ile yayımlanan metodoloji dikkat çekmektedir [49, 50]. Bu standart, KDG ve KYD projeleri için genel gereklilikleri belirlemekte olup, uzaklaştırılan CO₂’nin ölçümüne yönelik CO₂ yakalama, taşıma ve depolama faaliyetleri doğrultusunda bir dizi modül sunmaktadır [51]. Örneğin, DACSS, CO₂’nin taşınması ve CO₂’nin tuzlu su akiferlerinde ve tükenmiş petrol ve gaz rezervuarlarında depolanması faaliyetlerini kapsayan ilk modülün çalışmaları devam etmekte olup, yakın zamanda piyasaya sürülmesi planlanmaktadır [52]. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere, KDG ve KYKD teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak sertifikasyon süreçlerinin de ilerleyeceğini ve bu teknolojilerden elde edilen kredilerin GKP’de daha fazla yer bulacağını göstermektedir.

KDG ve KYKD Çerçevesinde Niş Gönüllü Karbon Piyasaları:

KDG ve KYKD projelerinin ölçeklendirilmesini desteklemek amacıyla GKP’nin geri kalanından çok daha yüksek kredi fiyatlarına ulaşan farklı GKP girişimleri ortaya çıkmıştır. Microsoft [53] ve Stripe [54] gibi büyük teknoloji şirketleri ve Airbus [55] ile Shopify [56] gibi büyük firmaların yanı sıra UBS [57] ve SwissRe [58] gibi finans sektörü aktörleri, net sıfır hedefleri doğrultusunda KDG ve KYKD projelerinden üretilen kredileri özellikle almaya başlamışlardır. Bu firmalar, bireysel projelerin belirli bir limite kadar üretmeyi başardıkları tüm uzaklaştırmaları satın alma taahhütlerinden, avans piyasa taahhütleri (*Ing. Advance market commitments*)’ gibi yeni işlem yollarına kadar uzanan geniş bir yelpazede önemli kaynaklar ayırmışlardır.

Karbon giderimi pazar yerleri (*Ing. Carbon removal marketplaces*) olarak adlandırılan yeni bir ekosistem, karbon uzaklaştırmaya özgü standartlar ve piyasa mekanizmalarını birleştirerek hızla gelişmektedir. Puro.Earth, Nori ve Isometric gibi şirketler, biyoçar, karbonatlı yapı malzemeleri ve toprakta karbon tutumu gibi KDG alanlarında yenilikçi metodolojiler geliştirmektedir [59-62]. Ancak, bu şirketler metodolojik şeffaflık eksikliği ve kredi hacimlerini artırma odaklı yaklaşımları nedeniyle eleştirilmektedir. Öte yandan, bu yeni ekosistem, uluslararası gönüllü niş karbon piyasalarının büyümesine katkıda

1. Gönüllü karbon piyasasında oluşan ortalama fiyatın birkaç kat üzerindeki fiyatla on yıla kadar devam eden sabit fiyatlı vadeli sözleşmeler.

bulunurken, KDG ve KYKD projelerinin finansmana erişimini artırmakta ve bu projelerin sürdürülebilirliğini desteklemektedir. Ancak, güvenilir ve etkin bir piyasa yapısı için şeffaflık, hesap verebilirlik ve düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir.



4.

Türkiye için Tespitler ve Öneriler

Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmesi için KYKD teknolojilerinin kritik bir rol oynayacağı açıktır. Bu ihtiyaç, 2024 – 2030 dönemini kapsayan İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı'nda hem enerji hem de sanayi sektörleri için açıkça belirtilmiştir. Son gerçekleşen COP29 kapsamında ise Türkiye, Uzun Dönemli İklim Stratejisi raporunu yayınlamıştır. Bu raporda, 5. Strateji maddesi olarak yer bulan KYKD teknolojilerinin üretim sektörlerinde uygulanabilirliğinin artırılmasına odaklanılacağı ve özellikle çimento ile çelik sektörlerinin önceliklendirileceği vurgulanmıştır.

Ülkemiz özel sektöründe (üniversite iş birlikleri ile), KYKD teknolojileri kapsamında, hem yakalama hem kullanım hem de depolama özelinde Avrupa Birliği ve TÜBİTAK tarafından desteklenen projeler bulunmaktadır. Bu projelerin sınırlı sayıda endüstri sektörü tarafından yürütüldüğü gözlemlenmiştir. Akademi tarafında ise bu alanda ortaya çıkarılan tez sayısının oldukça düşük olduğu görülmektedir. KYKD teknolojilerindeki gelişimin uzun süren Ar-Ge çalışmaları gerektirdiği gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, ülkemizde nitelikli akademik çalışmaların sayısının artırılması ve bu çalışmaların akademik düzeyden pilot tesislere ve sektöre aktarımının desteklenmesi gerektiği açıktır. Türkiye'de KYKD alanında çalışmalar yapılan girişimler incelendiğinde ise direkt olarak bir son ürün yahut henüz patentlenebilir bir sürece rastlanmamıştır.

Aşağıda bu rapor kapsamında yürütülen çalışmalar sonucunda ülkemiz için elde ettiğimiz tespitler ve öneriler sıralanmıştır:

1. Ülke Bazında ve Proje Özelinde Fizibilite Çalışmalarının Yapılmasının Gerekliliği:

Coğrafi konumun ve enerji maliyetlerinin KYKD projelerinin uygulanabilirliği üzerindeki etkisi yüksektir. Bu sebeple, KYKD'nin Türkiye'deki potansiyelini tam olarak değerlendirebilmek için ülke bazında ve proje özelinde analizlerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, Türkiye'nin enerji karmasında yenilenebilir enerji potansiyelinin yüksek olması, enerji maliyetleri açısından Türkiye'yi avantajlı konuma getirebilir. Kısa ve orta vadede Türkiye için öncelikli bir çözüm olarak değerlendirilmemekle birlikte, KYKD teknolojileri, uzun vadede maliyetlerin düşmesi durumunda, Türkiye'nin 2053 hedeflerine ulaşmasında özellikle çimento ve demir-çelik sektörlerindeki emisyonların azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

2. Depolama Atlasının Oluşturulmasının Gerekliliği: Karbon depolama çözümleri, iklim hedefleri doğrultusunda KYKD projelerinin en kritik aşaması olarak kabul edilmektedir. Türkiye'de KYKD projeleri geliştirme aşamasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli husus, CO₂ depolama çözümlerinin belirlenmesidir. Bu bağlamda, jeolojik depolama seçeneklerinin hem teknik hem ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu gösteren projelere/çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu projelerin yapılabilirliği/başarısı için güçlü bir yasal ve düzenleyici çerçevenin oluşturulması ve teşvik mekanizmaları gerekmektedir.

- a. Potansiyel CO₂ depolama sahaları ile ilgili bazı verilerin mevcut olduğu tahmin edilmektedir, ancak ilgili kurumlar tarafından açık veri paylaşımına ulaşılamamıştır.
- b. Noktasal kaynaklardan yakalanan yüksek miktardaki CO₂'nin depolanabilmesi için çok geniş bir jeolojik depolama alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye'de CO₂'nin depolanabileceği tükenmiş petrol sahalarının kapasitesi oldukça sınırlıdır (Batı Raman Sahası ~ 100 milyon ton CO₂ – EOR), dolayısıyla özellikle tuzlu su akiferlerinin depolama kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir [63].
- c. Bunun yanında, Türkiye'nin en büyük CO₂ rezervuarı olarak öne çıkan Dodan Sahasının depolama potansiyeli sunabileceği, Trakya, Batı

Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu'da tespit edilen derin akiferlerin CO₂ depolama için uygun olabileceği, soda mağaralarının ise hacimlerinin küçük ve yüzeye yakın olmaları nedeniyle depolama kapasitesinin sınırlı olduğu öngörülse de alternatif seçenekler arasında değerlendirilebileceği bilinmektedir. Ayrıca, Sivas Havzası'nda yer alan tuz tektoniklerinin CO₂ depolama potansiyeli olduğu bilinmektedir; ancak bu jeolojik oluşumların CO₂ depolama kapasiteleri detaylı bir şekilde araştırılmalıdır.

- d. Türkiye'nin jeotermal enerji sahalarından yüksek saflıkta CO₂ yakalama potansiyeli olduğu ve yakalanan CO₂'nin rezervuara geri basılması sonucu CO₂'nin rezervuar verimini artırırken alternatif bir CO₂ depolama çözümü olabileceği gözlemlenmiştir. Buradaki depolama süresinin doğru bir şekilde tayini için izleme, raporlama ve doğrulama çalışmaları yapılması gerekmektedir.
- e. Sınır ötesi taşımacılık ile Türkiye'ye coğrafi olarak yakında bulunan alternatif CO₂ depolama seçenekleri (Bulgaristan, Yunanistan) değerlendirilmelidir.

3. Yasal Mevzuat ve Teşvik / Destek Sistemi Gerekliliği: KYKD ve KDG teknolojilerinin gelişimini hızlandırmak için net politika çerçevelerine ve devlet desteğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu projelerin yaygınlaşması ve etkin şekilde uygulanabilmesi için, devlet desteğinin yanı sıra sanayi ve özel sektörün yatırımları da önem arz etmektedir. Bu bağlamda, kamu ve özel sektör arasında güçlü bir iş birliği kurulmalıdır. Özel sektör, teknoloji geliştirme, operasyonel süreçlerin yönetilmesi ve ticarileştirme konularında öncü bir rol üstlenirken, kamu sektörü regülasyon ve altyapı desteği ile projeleri şekillendirebilir. Ayrıca özel sektörde farklı alanlarda çalışan firmalar, örneğin, teknoloji firmaları proje geliştiricilerle, gemicilik firmaları limanlarla, endüstriyel karbon salımı yapan şirketler taşıma ve depolama alanında çalışan firmalarla karşılıklı iş birliği içerisinde olmalıdır.

4. Sektörel Yaklaşımın Değerlendirilmesi: Türkiye'nin özellikle çimento ve çelik sektörlerindeki küresel pazardaki rekabetçiliğini sürdürebilmesi için düşük karbonlu ürün üretimine hızla geçiş yapması gerekmektedir. Düşük karbonlu ürün tedariği, yüksek bir fayda/maliyet oranı sunmaktadır. Ne var ki, birçok ağır sanayi, hazır tip üniteler veya sistem bileşenlerini satın alma yaklaşımına daha aşına olmasına rağmen, karbon yakalama projeleri, uzun süren ön – FEED ve FEED (İng.

Front End Engineering Design) geliştirme aşamalarından geçmesi gereken, tesise özel tasarımlardır. Türkiye'deki tesislerin bu durumu göz önünde bulundurması gerekmektedir.

5. **Endüstriyel Kümelenmelerin ve İş birliklerinin Önemi:** Dünyadaki diğer başarılı örneklerdeki gibi, Türkiye'de de KYKD uygulamalarının maliyet etkinliğini artırmak ve alınan riskleri azaltmak için endüstriyel kümelenmelerin oluşturularak, CO₂ altyapılarının paylaşılması çok önemli olacaktır. Birden çok noktasal kaynaktan veya havadan yakalanan karbonun yakıt, kimyasallar ve malzeme üretiminde kullanımının ticari ölçekte gösterimi sağlanabilir ve bu sayede hem ekonomik kazanımlar elde edilir hem de teknolojinin yaygınlaşması hızlanabilir. Endüstriyel kümelenmeler, bu tür iş birliklerinin geliştirilmesi ve paylaşılan altyapılarla maliyetlerin optimize edilmesi için bir katalizör görevi görecektir. Ayrıca, Türkiye, KYKD alanında uluslararası iş birliklerini güçlendirmeli ve uluslararası iş birliği platformlarına (Örneğin; Clean Energy Ministerial, Mission Innovation, Carbon Management Challenge [CMC]) üye olarak bu alandaki bilgi ve deneyim paylaşımını artırmalıdır. Avrupa Birliği ve diğer uluslararası finansman kuruluşlarının sunduğu fonlar ve projelerden yararlanarak, KYKD teknolojilerinin gelişimi hızlandırılmalıdır.
6. **Çeşitli Endüstriyel Atık Fraksiyonlarının CO₂ Mineralizasyonunda Değerlendirilmesi:** CO₂'nin çeşitli atık fraksiyonları kullanılarak (çelik cürufu, kül, madencilik atığı, inşaat-yıkıntı atıkları vb.) mineralizasyon yöntemi ile kalsiyum/sodyum karbonata dönüştürülmesi ve sonrasında yapı malzemelerinde kullanımı (yardımcı bağlayıcı malzemeler, agrega, seramik vb.) pazar talebi yüksek olan bir kullanım yöntemidir ve ayrıca CO₂'nin uzun süreli (yüzyıllar) depolanmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, özellikle çimento sektörü için Türkiye'de uygulanabilirlik potansiyeli yüksek bir CO₂ kullanım yöntemidir. Ayrıca, çimento sektöründe CO₂'nin beton kürlemede kullanılması, başka bir faydalı uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır.
7. **Yakalanan CO₂'nin Ekonomik Değer Yaratacak Diğer Kimyasallara Dönüşümünün Değerlendirilmesi:** CO₂'nin metanol, formik asit, poliüretan, sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) ve diğer değerli kimyasal ürünlere dönüştürülmesi gibi süreçlerde yenilikçi katalizör ve reaktör teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik projeler desteklenmelidir. CO₂ dönüşümüne yönelik süreçlerin ekonomik ve

teknik fizibilitesini göstermek için pilot ve demonstrasyon tesislerinin kurulması gereklidir. Ayrıca, CO₂'nin biyolojik dönüşümünü sağlayan mikroalg yetiştiriciliği ile biyoyakıt üretimi konusundaki çalışmalar ekonomik değer sunan döngüsel bir model olarak öne çıkmaktadır.

8. KDG Çözümlerinin Uygulanması: KDG çözümleri küresel ölçekte henüz yeni bir ivme kazanmaya başlamışken, Türkiye bağlamında KDG çözümlerinin potansiyeli konusunda kesin bir sonuca henüz varılamamıştır. Türkiye’de, doğa temelli çözümler kapsamında çeşitli projeler hayata geçirilmiş olsa da, bu projelerin çoğunun KDG odaklı olmadığını söylemek mümkündür. Küresel ölçekte karbon kredisi üreten örnek vaka çalışmalarından elde edilen sonuçlar dikkate alındığında [43], Türkiye’nin ekosistemine uygun olarak ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma, sulak alan ve turbalık restorasyonu, toprakta karbon tutumu, mavi karbon yönetimi ve biyoçar çözümlerinin öne çıktığı söylenebilir. Bununla birlikte, Türkiye’nin BECCS konusunu da değerlendirmesi önem arz etmektedir.

9. Ulusal ETS’nin Kurulmasının Önemi: Türkiye’de kurulması planlanan Ulusal ETS’nin sektörel kapsamı ve düzenleyici unsurların belirlenmesi, özel sektörün azaltım faaliyetleri kapsamında yasal yükümlülüklerinin netleşmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

- a. ETS’ye dahil edilecek sektörler, sera gazı türleri ve raporlama yükümlülükleri titizlikle belirlenmelidir.
- b. ETS’nin düzenleyici kurumunun netleştirilmesi ve etkin bir yönetim yapısının oluşturulması elzemdir.
- c. Uzun vadeli etki analizlerinde ETS’nin ekonomik büyüme, istihdam ve teknoloji tercihlerine yönelik yapısal etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle sanayi ve enerji sektörlerinde karbon fiyatlamasının beşeri sermaye ve teknolojiye uzun vadeli yansımaları değerlendirilmelidir.
- d. Türkiye’nin karbon giderimini ölçmek, izlemek ve doğrulamak için bir çerçeve oluşturulmalı ve ulusal karbon giderimi sertifikasyon sistemi geliştirilmelidir.
- e. ETS tasarımı esneklik sağlayacak ve beklenmedik gelişmelere hızla yanıt verebilecek bir yönetim çerçevesi oluşturulmalıdır.

- f. Fiyat oluşumuna etki eden politika hedeflerinin netleştirilmesi, belirsizlikleri azaltacak stratejilerin geliştirilmesi önem taşımaktadır.
- g. Türkiye’de kurulacak ulusal ETS’nin denkleştirme mekanizmalarına belirli koşullar altında sınırlı izin verilmesi, KDG ve KYKD projelerine olan ilgiyi artırabilir. Ancak bu mekanizmalar, azaltım çabalarını engellemeyecek şekilde tasarlanmalıdır.
- h. Doğrudan havadan karbon yakalama ve biyokütle kullanan tesislerin ETS’ye dahil edilmesi (ve bu tesislere ücretsiz tahsisat sağlanması), DACCS ve BECCS yoluyla elde edilen karbon kredilerinin piyasada satılabilmesini mümkün kılabilir. Ayrıca, Türkiye’nin DACCS ve BECCS ile ürettiği karbon kredileri, Paris Anlaşması’nın 6. Maddesi kapsamında diğer ülkelerle ticareti yapılarak değerlendirilebilir. Böylece Türkiye, Ulusal Katkı Beyanı (UKB) hedeflerini desteklemek için gönüllü iş birlikleri geliştirerek iklim eylemlerini daha da güçlendirebilir.
- i. Türkiye’de jeolojik yapılara depolanabilecek CO₂ miktarının belirlenmesi ile, ETS sistemine bu karbondioksit miktarının da dahil edilmesi düşünülmelidir.
- j. ETS tasarımı kritik bir unsur, gelirlerin etkin kullanımıdır. ETS gelirleri, KYKD ve KDG gibi yenilikçi teknolojilere teşvik ve yatırım olarak değerlendirilebilir, bu doğrultuda özel fonlar oluşturulabilir.
- k. KYKD ve KDG teknolojilerinin gelişimi için özel fonlar oluşturulması uzun vadede çevresel ve endüstriyel süreçlerde yeniliklere yol açacaktır.
- l. Türkiye’nin ulusal ETS’sinin, diğer uluslararası karbon piyasalarıyla entegre edilmesi, piyasa likiditesini artırarak daha geniş emisyon azaltım fırsatları yaratabilir. Bu entegrasyonun sağlanabilmesi için uyum ve karşılıklı tanıma standartlarının geliştirilmesi gerekmektedir.
- m. ETS’nin etkin yönetimi için Karbon Piyasaları Kurulu gibi bağımsız ve yetkin bir düzenleyici yapının oluşturulması büyük önem arz etmektedir.

10. KYKD Projelerinin Risklerinin Belirlenmesinin Önemi: KYKD projelerinde yüksek düzeydeki finansal ve teknolojik risklerin yanı sıra değer zincirinden ve mevzuattan kaynaklı riskler de mevcuttur.

- a. Bir kararın tüm proje aşamalarındaki etkisini anlamak için KYKD değer zincirinin tamamındaki riski değerlendirmek önemlidir.
- b. Mevcut durumda CO₂ salımının KYKD projelerinden daha az maliyetli olması ticarileşme riskini beraberinde getirmektedir. Bu riski azaltmak için devlet desteği önemli hale gelmektedir.
- c. Türkiye’de gerçekleştirilecek bir KYKD projesi, türünün ilk örneği olma özelliği taşıyacağından, yüksek teknolojik riskler içermektedir. Ayrıca, projenin inşaat aşamasında da teknik altyapı riskleri söz konusu olup, bu durum projenin başarısını etkileyebilecek önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.
- d. Türkiye’de KYKD özelinde bir mevzuatın henüz bulunmaması sebebiyle, olası mevzuatsal risklerin önüne geçmek için ikili altyapı anlaşmaları değerlendirilebilir.

11. KYKD Projelerinin Türkiye’de Uygulanabilirliğinin Artırılmasının Önemi:

Türkiye’de KYKD teknolojilerinin geliştirilmesi için demonstrasyon ve pilot projelerin gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu projeler, teknolojilerin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğini ortaya çıkarmanın yanı sıra bilgi birikimi oluşturulması ve yerel kapasitenin artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca bu projeler, sanayi – üniversite iş birliklerini teşvik edecektir.

12. AR-GE Çalışmalarının / Akademik Araştırmaların Desteklenmesi Gerekliliği:

Türkiye’nin KYKD teknolojileri ve KDG alanında mevcut ayak izinin sınırlı olması, bu çözümlerin yaygınlaşmasını engelleyen önemli bir faktördür. Bu sebeple, Türkiye’de KYKD ve KDG projelerine yönelik Ar–Ge çalışmalarına ve akademik araştırmalara daha fazla kaynak ayrılmalıdır. Yerel üniversiteler, araştırma merkezleri ve özel sektör iş birliği ile bu teknolojilerin geliştirilmesi ile maliyetlerinin düşürülmesi sağlanabilecektir. Buna ek olarak, ilgili Ar–Ge yatırımları, Türkiye’nin bu alandaki teknolojik yetkinliğini de artıracaktır.

5.

Sonuç

KYKD teknolojilerinde sürekli ilerleme kaydedilmesine rağmen, asıl sorunun bu teknolojilerin uygulamaya geçirilmesinde olduğu görülmektedir. Yatırımlar hızlandıkça teknolojilerin daha da gelişmesi ve maliyetlerin düşmesi zaten beklenmektedir. Ancak en büyük engelin iş modeli geliştirme ve finansman sağlama süreçlerinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, bu teknolojilerin uygulanabilirliğinin gösterilmesi için özellikle karbonun kullanım alanlarının gelişimi için önemli adımlar atılması gerekecektir.

Noktasal kaynaklardan büyük ölçekli (1 – 1.5 Mt CO₂/yıl) (bu değer ortalama büyüklükteki bir çimento fabrikasının yıllık CO₂ emisyon değerine denk gelmektedir) karbon yakalama projelerinin yatırım sermayesi (CAPEX) maliyetlerinin €400 – 500 milyon’dan başladığı görülmektedir. Bu büyüklükteki yatırımların gerçekleştirilmesinde devlet desteği ve teşvik mekanizmalarının eksikliği durumunda, sektörün bu maliyetleri tek başına üstlenmesi oldukça zordur. Ayrıca, bu projelerde yakalanan karbonun önemli bir bölümünün depolanması gerekmekte olup, Türkiye’de uygun depolama alanlarına yönelik henüz kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun yanı sıra, Türkiye’de uygulanacak bir KYKD projesinin türünün ilk örneği olacak olması, beraberinde yüksek teknolojik ve finansal riskler taşımaktadır. Bu risklerin minimize edilebilmesi, ekosistemin geliştirilmesine yönelik bu alanda pazarın hazırlanması, ekosistemin eğitilmesi, teknolojilerin sınanması ve teknolojik parametrelerin oluşturulması amacıyla, en kısa sürede bu alandaki projelerin

hayata geçirilmesi ve öncelikli olarak teknik fizibilite çalışmalarının yapılması önem arz etmektedir.

Ayrıca, KYKD uygulamalarının başarısı için, ETS veya ulusal karbon vergisi gibi karbon fiyatlandırma mekanizmalarının benimsenmesinin ve vergi teşvikleri ve sübvansiyonlar gibi finansal yapıların kullanılmasının yanı sıra mevzuatsal ve yönetsel altyapıların oluşturulması da büyük önem taşımaktadır. Ulusal ETS'nin devreye alınması, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) ile uyumlu ticaret düzenlemelerinin ve uluslararası standartların belirlenmesi; karbon salımı yapan işletmelere maliyet yükü getirerek KYKD ve KDG projelerinin hayata geçirilmesini teşvik edebilecektir.

KAYNAKÇA



- [1] IEA, “Energy Technology Perspectives - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage,” 2020.
- [2] IPCC. (2018): Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.
- [3] Bird, J., Hope, G., Smith, S. ve Westburry, P. (n.d.). Carbon Dioxide Removal (CDR), Imperial College, Grantham Institute – Climate Change and the Environment, <https://www.imperial.ac.uk/grantham/publications/background-briefings/carbon-dioxide-removal-cdr/>
- [4] Sabin Center for Climate Change Law. Carbon Dioxide Removal Law, <https://cdrlaw.org/>, 2024.
- [5] S. E. Tanzer and A. Ramírez, “When are negative emissions negative emissions?,” *Energy & Environmental Science*, vol. 12, no. 4, pp. 1210-1218, 2019.
- [6] S. La Hoz Theuer and A. Olarte, “Emissions Trading Systems and Carbon Capture and Storage: Mapping possible interactions, technical considerations, and existing provisions. Berlin: International Carbon Action Partnership,,” 2023.
- [7] The Global Status of CCS: 2023 Scaling up Through 2030, Global CCS Institute, Australia, 2023.
- [8] IEA, “Tracking Clean Energy Progress 2023,” IEA, Paris, 2023. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- [9] IEA, “Capacity of current and planned large-scale CO2 capture projects vs. the Net Zero Scenario, 2020-2030,” IEA, Paris, 2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/capacity-of-current-and-planned-large-scale-co2-capture-projects-vs-the-net-zero-scenario-2020-2030>
- [10] IEA, “World captured CO2 by source in the Sustainable Development Scenario, 2020-2070,” IEA, Paris, 2021. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-captured-co2-by-source-in-the-sustainable-development-scenario-2020-2070>
- [11] IEA, “CCUS Projects Explorer,” IEA, Paris, 2024. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ccus-projects-explorer>
- [12] F. O. Ochedi, Y. Liu, and Y. G. Adewuyi, “State-of-the-art review on capture of CO2 using adsorbents prepared from waste materials,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 139, pp. 1-25, 2020.
- [13] A. Raza, R. Gholami, R. Rezaee, V. Rasouli, and M. Rabiei, “Significant aspects of carbon capture and storage—A review,” *Petroleum*, vol. 5, no. 4, pp. 335-340, 2019.
- [14] D. Alalawat and E. Khan, “Current status and future scenarios of carbon capture from power plants emission: a review,” *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 799-822, 2023.
- [15] H. Hekmatmehr *et al.*, “Carbon capture technologies: A review on technology readiness level,” *Fuel*, vol. 363, p. 130898, 2024.
- [16] S. A. Rackley, *Carbon capture and storage*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [17] A. M. Bukar and M. Asif, “Technology readiness level assessment of carbon capture and storage technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 200, p. 114578, 2024.
- [18] B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, and K. Andersson, “Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment,” *Fuel*, vol. 342, p. 127776, 2023.
- [19] M. Babiker, G., *et al.*, “Cross-sectoral perspectives. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>,” 2022.
- [20] J. Mertens *et al.*, “Carbon capture and utilization: More than hiding CO2 for some time,” *Joule*, vol. 7, no. 3, pp. 442-449, 2023.

- [21] IHS Markit (2018), Chemical Economics Handbook – Carbon Dioxide, <https://ihsmarkit.com/products/carbon-dioxide-chemical-economics-handbook.html>
- [22] IEA, “Putting CO2 to Use,” International Energy Agency, Paris, France, 2019. <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>
- [23] M. Draxler, J. Schenk, T. Bürgler, and A. Sormann, “The steel industry in the European union on the crossroad to carbon lean production—status, initiatives and challenges,” *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 165, no. 5, pp. 221-226, 2020.
- [24] R. Chauvy, N. Meunier, D. Thomas, and G. De Weireld, “Selecting emerging CO2 utilization products for short-to mid-term deployment,” *Applied energy*, vol. 236, pp. 662-680, 2019.
- [25] National Academies of Science Engineering and Medicine (2019) Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs. The National Academies Press, Washington, DC NASEM <https://doi.org/10.17226/25232>
- [26] CO2 Value Europe, 2018 <https://co2value.eu/>
- [27] M. Bui *et al.*, “Carbon capture and storage (CCS): the way forward,” *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 5, pp. 1062-1176, 2018.
- [28] The Global Status of CCS: 2020,” Global CCS Institute, Australia, 2020. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-report-2020/>
- [29] IPCC, 2005 – Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 431. Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>.
- [30] IEA, “CO2 storage resources and their development,” International Energy Agency, Paris, 2022. <https://www.iea.org/reports/co2-storage-resources-and-their-development>
- [31] D. Kearns, H. Liu, and C. Consoli, “Technology readiness and costs of CCS,” *Global CCS institute*, vol. 3, 2021.
- [32] The interview conducted with Mr. Aliyu A, a technology analyst at IEAGHG, as part of the report, ed, 2024.
- [33] IEA, “Levelised cost of CO2 capture by sector and initial CO2 concentration-2019,” Paris, 2020. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019>
- [34] IEAGHG, “Proceedings: CCS Cost Network 2023 Workshop,” IEAGHG, Netherlands, 2023.
- [35] IEAGHG, “Deployment of CCS in the Cement industry. 2013/19,” Cheltenham, United Kingdom., 2013.
- [36] R. Anantharaman, C. Fu, S. Roussanally, and M. Volsund, “D4. 2 Design and Performance of CEMCAP Cement Plant with MEA Post Combustion Capture,” *CEMCAP EU Project, Trondheim*, 2016.
- [37] IEAGHG, “IEAGHG Technical Review 2021-TR05: Towards improved guidelines for cost evaluation of carbon capture and storage,” UK, 2021.
- [38] T. Lockwood, “Carbon capture and storage: What can we learn from the project track record?,” Clean Air Task Force, 2024. <https://www.catf.us/resource/carbon-capture-storage-what-can-learn-from-project-track-record/>
- [39] S. Santos, G. Collodi, G. Azzaro, and N. Ferrari, “Techno-economic evaluation of SMR based standalone (merchant) plant with CCS,” *IEAGHG, February*, 2017.
- [40] Nature-based Solutions Initiative. (n.d.). What is the Nature-based Solutions Initiative and what are nature-based solutions?, <https://www.naturebasedsolutionsinitiative.org/what-are-nature-based-solutions>
- [41] International Union for Conservation of Nature. (n.d.). Nature-based Solutions, <https://www.iucn.org/our-work/nature-based-solutions#:~:text=Nature%2Dbased%20Solutions%20address%20societal,nature%20at%20the%20same%20time>
- [42] T. Terlouw, C. Bauer, L. Rosa, and M. Mazzotti, “Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review,” *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 4, pp. 1701-1721, 2021.
- [43] NbS Initiative. Case study platform, https://casestudies.naturebasedsolutionsinitiative.org/case-search?_sf_s=credit, 2024.
- [44] “ICAP. Emissions Trading in Practice: A Handbook on Design and Implementation,” 2021. https://icapcarbonaction.com/system/files/document/ets-handbook-2020_finalweb.pdf.

- [45] M. Fridahl *et al.*, “Novel carbon dioxide removals techniques must be integrated into the European Union’s climate policies,” *Communications Earth & Environment*, vol. 4, no. 1, p. 459, 2023.
- [46] Avrupa Komisyonu. Carbon Removals and Carbon Farming, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en, 2024.
- [47] Integrity Council for the Voluntary Carbon Markets. The Voluntary Carbon Market Explained, <https://icvcm.org/voluntary-carbon-market-explained/>, 2024.
- [48] European Energy Exchange. (n.d.). Voluntary Carbon Markets, <https://www.eex.com/en/markets/environmental-markets/voluntary-carbon-markets>
- [49] CCS+ Initiative. New carbon market initiative to scale-up carbon capture and storage solutions, <https://ccsplus.org/news/new-carbon-market-initiative-to-scale-up-carbon-capture-and-storage-solutions/>, 2021.
- [50] Verra. VCS Methodology, VM0049: Carbon Capture And Storage, <https://verra.org/wp-content/uploads/2024/06/VM0049-Carbon-Capture-and-Storage-v1.0.pdf>, 2024.
- [51] Verra. Verra Releases New Carbon Capture and Storage Methodology, <https://verra.org/verra-releases-new-carbon-capture-and-storage-methodology/>, 2024.
- [52] Verra. Carbon Capture And Storage, Batch 1 Modules, <https://verra.org/methodologies/methodology-for-carbon-capture-and-storage-batch-1-modules/>, 2024.
- [53] Microsoft. Carbon dioxide removal, <https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability/carbon-removal-program>, 2023.
- [54] Stripe. Stripe Climate increases carbon removal commitments to \$15 million, adding four new companies, <https://stripe.com/newsroom/news/fall-21-carbon-removal-purchases>, 2021.
- [55] Airbus. Direct air carbon capture and storage for aviation, <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-07-direct-air-carbon-capture-and-storage-for-aviation-explained>, 2022.
- [56] Shopify. Carbon Removal: How Shopify Is Leading the Charge on Corporate Responsibility, <https://www.shopify.com/blog/carbon-removal>, 2023.
- [57] UBS. UBS collaborates with neustark and Climeworks for removing CO₂ from the atmosphere. <https://www.ubs.com/global/en/media/display-page-ndp/en-20220830-carbonremoval.html>, 2022.
- [58] Swiss Re Group. Swiss Re and Climeworks launch partnership by signing world’s first ten-year carbon removal purchase agreement,” 2021. <https://www.swissre.com/media/press-release/nr-20210825-swiss-re-climeworks-partnership.html>
- [59] Puro.Earth. Carbon removal methods, <https://puro.earth/carbon-removal-methods>, 2024.
- [60] “Puro.Earth. Puro Standard, <https://fs.hubspotusercontent00.net/hubfs/7518557/Supplier%20Documents/Puro.earth%20Biochar%20Methodology.pdf>,” 2024.
- [61] Nori. High quality carbon credits with process based modeling, <https://nori.com/modeling-soil-carbon>, 2024.
- [62] Isometric. Isometric Standard, <https://registry.isometric.com/standard#introduction>, 2024.
- [63] Sayman, Sinayuç ve Korkmaz. (2024). Kaynak, Çevre ve İklim Derneği - REC, Türkiye’nin Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Potansiyeli

ÖNCÜL PROJE PROGRAMI
EKONOMİK DEĞER YARATMA POTANSİYELİNE SAHİP
KARBON YAKALAMA KULLANIM DEPOLAMA (KYKD)
VE KARBONDİOKSİT GİDERİM (KDG) ÇÖZÜMLERİ
DERİN ANALİZ RAPORU **ÖZET**



ttgv.org.tr

TTGV Merkez

Cyberpark B Blok Kat: 5-6, Bilkent
Ankara
0312 265 02 72

TTGV İstanbul Temsilciliği

İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Arı Teknokent
Arı II Binası Koruyolu A Blok Kat:7
Maslak-Sarıyer
0212 276 75 60

İletişim için:

info@ttgv.org.tr



#TeknolojiÜretenTürkiye
#İklimÖncüsü

