

# Türkiye'nin Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Potansiyeli



## Kaynak, Çevre ve İklim Derneği (REC)

Kaynak, Çevre ve İklim Derneği (REC), Türkiye'nin çevre konusundaki hukuki, kurumsal, teknik ve yatırım kapasitesini güçlendirmeyi; böylelikle Türkiye'nin çevresinin korunmasına destek sağlamayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, farklı finansal kaynaklar kullanarak yürütmekte olduğumuz çalışmalarla, kamu yönetimi, sivil toplum kuruluşları, özel sektör ve diğer tüm paydaşlar arasında işbirliği, bilgi paylaşımı ve ortak karar alma süreçlerini güçlendirmek için çalışıyoruz.

Kaynak, Çevre ve İklim Derneği, siyasi görüşlerden ve çıkar gruplarından bağımsız, kâr amacı gütmeyen uluslararası bir kuruluş olan Orta ve Doğu Avrupa için Bölgesel Çevre Merkezi'nin (REC) Türkiye ofisi REC Türkiye'nin faaliyetlerini devam ettirmektedir. REC Türkiye 2004-2022 yılları arasında 18 yıl Türkiye'de faaliyet göstermiş ve resmi olarak 11 Şubat 2022'de projelerini Kaynak, Çevre ve İklim Derneği'ne devretmiştir. Dernek, bu kapsamda Arnavutluk, Bosna Hersek, Karadağ ve Kuzey Makedonya'da kurulan REC'lerle işbirliği içerisinde.

### Eser Adı: Türkiye'nin Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Potansiyeli

Bu yayının bütün hakları saklıdır.

© 2024, Kaynak, Çevre ve İklim Derneği - REC

Bu yayının hiçbir kısmı herhangi bir formda izin alınmadan satılamaz ya da satılmak için çoğaltılamaz. Ancak kaynak belirtme koşuluyla, izin alınmaksızın bu yayından kısa alıntılar yapılabilir.

#### Yayımcı

Kaynak, Çevre ve İklim Derneği - REC

Beştepe Mah. Nergiz sk. No: 7/2 İç Kapı No: 27 Yenimahalle / Ankara (Pk. 06560) Türkiye

E-posta: info@rec.org.tr

#### Yayına Hazırlayanlar

Rifat Ünal Sayman

Çağlar Sinayuç

Elif Korkmaz

#### Grafik Tasarım ve Uygulama

İris İletişim Çözümleri

# **Türkiye'nin**

## Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Potansiyeli



Mart 2024  
Ankara



## YÖNETİCİ ÖZETİ

Türkiye'nin sera gazı salımlarının -kısa ve orta vadede- azaltılmasında karbon yakalama, kullanma ve depolama (KYKD) ülkenin koşullarına uygun bir çözüm olarak değerlendirilmemektedir. KYKD, karbon yakalama maliyetlerinin düşmesi durumunda, Türkiye'nin 2053 net-sıfır salım hedefine ulaşmasına çimento ve demir-çelik sektörlerinin salımlarının düşürülmesine destek olarak sınırlı katkı sunabilir.

### DÜNYADA KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA

Uluslararası düzeyde KYKD net-sıfır salıma ulaşmak için kullanılacak araçlardan birisi olarak görülmektedir.

Paris Anlaşması Birinci Küresel Stok Sayımı, KYKD'nın araştırma ve uygulamalarının yaygınlaştırılması çağrısı yapmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) öngörülerinde KYKD teknolojilerine yer vermiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2050 yılında net-sıfır salıma ulaşmak için 2030'da karbon yakalama miktarının bir milyar ton, 2050'de altı milyar tona yükselmesini öngörmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde CO<sub>2</sub> depolanmasına ton başına 85 dolar teşvik verilmektedir. Avrupa Birliği Karbon Yakalama ve Depolama Direktifini kabul etmiş; salım ticareti sisteminde ton başına CO<sub>2</sub> salım bedelinin 100 avroya yaklaşmış olması, KYKD teknolojilerinin uygulanmasını olası hale getirmiştir.

Dünya'da KYKD teknolojilerinin yaygınlaşmasının önünde önemli engeller bulunmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) KYKD uygulamalarına ilişkin zorlukları dört ana başlıkta ortaya koymuştur. Ortalama CO<sub>2</sub> yakalama maliyeti ton başına 100 avronun üzerindedir. Yakalama teknolojisi, salımların azaltılmasının zor olduğu çimento ve demir-çelik fabrikaları için halen yeteri kadar gelişmemiştir. KYKD uygulamalarındaki en büyük zorluk uygun depolama sahalarının bulunmasıdır. Depolama sahalarıyla CO<sub>2</sub> salım kaynaklarının coğrafi olarak çakışmaması maliyetleri ve riskleri artırmaktadır. Sınır aşan uygulamalar idari süreçleri zorlaştırmaktadır.

KYKD teknolojileri enerji verimliliği ve yenilenebilir enerjiye geçişe göre pahalı bir çözümdür.

Oxford Üniversitesinin değerlendirmesine göre net-sıfır emisyonu ulaşmada KYKD teknolojilerine yoğun kullanılması, bu teknolojilerin sınırlı kullanıldığı senaryolara göre 30 trilyon dolar daha

yüksek maliyetlidir. Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması çok daha düşük maliyetli bir yol sunmaktadır.

KYKD teknolojilerinin kullanılmasında önceliğin sera gazı salımlarının düşürülmesinde sınırlı teknik alternatiflerin olduğu imalat sanayine verilmesi önerilmektedir.

Dünya genelinde KYKD teknolojilerinin kullanılmasında önceliğin sera gazı salımlarının düşürülmesinin zor olduğu çimento üretimi ve demir-çelik üretimi gibi imalat sanayi sektörlerine verilmesi kabul görmektedir. Buna karşın başta ABD olmak üzere elektrik üretiminde de KYKD teknolojilerinin kullanımını planlayan ülkeler bulunmaktadır. Devletler, Paris Anlaşması Birinci Küresel Stok Sayımında KYKD'de önceliğin sera gazı salımlarının düşürülmesinin zor olduğu sektörlerle verilmesi üzerinde anlaşmışlardır.

## TÜRKİYE'DE KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA

Türkiye 2053 yılında net-sıfır salıma ulaşmayı taahhüt etmiştir.

Türkiye 2021'de Paris Anlaşmasını onaylamış; anlaşma kapsamında 2030 yılı için 1.213 milyon ton CO<sub>2</sub>e olarak öngördüğü salımlarını artıştan %41'lik azaltımla 695 milyon ton CO<sub>2</sub>e seviyesinde tutmayı taahhüt etmiştir. Sera gazı salımlarının 2038'de pik yapmasını öngörmüş; uzun dönemde net-sıfır salım hedef yılı olarak 2053'ü belirlemiştir.

Türkiye 2021 yılında KYKD'ye konu olabilecek 254 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazı salımı yapmıştır.

Türkiye'de 2021 yılında elektrik üretimi kaynaklı 160 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri, metalik olmayan mineral ürünleri (çimento vd.) üretimi kaynaklı 77 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri ve demir-çelik sektörü kaynaklı 18 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazı salımı gerçekleşmiştir.

Türkiye'de karbonun jeolojik olarak depolanabileceği sahaların çalışılması gerekmektedir.

Türkiye'de potansiyel depolama sahaları sadece petrol ve doğalgaz sahaları için yayınlanmış durumdadır ve bu sahaların toplam kapasitesi 108 Mt CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır. Türkiye'nin akifer alanlarında çok daha yüksek bir jeolojik depolama kapasitesi olduğu tahmin edilmekle birlikte, bu alanlardaki potansiyel kapasite hesaplanmamıştır. Türkiye'nin de akifer alanlarındaki jeolojik depolama kapasitesini ve risklerini ortaya koyması gerekmektedir.

Türkiye’de detaylı olarak bilinen depolama sahaları Türkiye’nin salımlarına göre yetersizdir.

Bilinen ve hızlı uygulamaya alınabilecek kapasitenin 20 yıl boyunca doldurulacağı bir varsayımda, yıllık 5,4 Mt CO<sub>2</sub>e depolama kapasitesi ilk aşamada kullanılabilir. Bu kapasite, Türkiye’nin 2021 için yıllık 564 Mt CO<sub>2</sub>e salımı olduğu düşünüldüğü zaman çok düşük kalmaktadır. Türkiye’nin de akifer alanlarındaki jeolojik depolama kapasitesini ve risklerini ortaya koyması gerekmektedir.

Türkiye’de potansiyel olarak yakalanacak karbonun depolama sahalarına taşınması yüksek maliyetli olacaktır.

Türkiye’nin karbonun depolaması için kullanılabilecek bilinen petrol sahaları Güney Doğu Anadolu bölgesinde yoğunlaşmıştır, uygun akifer sahalarının ise Karadeniz’de olduğu düşünülmektedir. Salım kaynağı tesisler ise özellikle Marmara ve Ege bölgesinde kuruludur. Salım kaynakları ile depolama sahalarının farklı bölgelerde yoğunlaşması, yakalanan CO<sub>2</sub>’nin salım kaynağından depolama sahasına taşınmasının maliyetini arttırıcı bir unsurdur.

Türkiye’nin KYKD konusunda yetişmiş insan kaynağı sınırlıdır, mevzuatı oluşturulmamıştır ve kurumsal altyapısı tamamlanmamıştır.

Türkiye’de KYKD’ya ilişkin mevzuat bulunmamaktadır. KYKD’ya ilişkin bu hukuki boşluklar hızlı bir şekilde kapatılmalıdır. Kalıcı depolama kapasitesinin etkin bir şekilde belirlenmesi ve yönetilmesi için TPAO, BOTAŞ ve MTA gibi kurumların görev tanımları, CO<sub>2</sub>’nin taşınması, jeolojik depolanmasını, kapatılmasını ve izlenmesini içerecek şekilde yenilenmelidir. Yakalamaya ilişkin Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın kurumsal kapasitesi, özellikle denetim için oluşturulmalıdır. Depolama tesislerinin düzgün çalışması ve kapanma ve kapanma sonrası sürecin izlenmesi ve sonuçlandırılmasına ilişkin finansal mekanizmalar oluşturulmalıdır.

Türkiye, geliştirilmiş petrol geri kazanımı (EOR) uygulamaları kapsamında petrol sahalarında ve jeotermal sahalarda yeraltına CO<sub>2</sub>’nin basılması konusunda deneyimlidir. Buna karşın, CO<sub>2</sub>’nin yakalanması ve depolanmasına ilişkin yeterli uzmanı yoktur. KYKD’nın kullanımı için önemli bir işgücü oluşturulmalıdır.

Türkiye, Uzun Dönemde KYKD Teknolojilerinin Kullanılmasını Olası Görmektedir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022), Türkiye’nin 2035 yılına kadar olan projeksiyonlarında KYKD teknolojilerine yer vermemiştir. Plan, 2035 sonrası dönemde karbon yakalama teknolojisine sahip termik santrallerin üretim

portföyüne dahil olabileceğini belirtmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile EBRD iş birliğinde hazırlanan Türkiye Demir-Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası projesinde KYKD teknolojileri azaltım senaryolarının içerisinde dahil edilmiştir. TÜRKÇİMENTO 2022 yılında KYKD teknolojilerinin çimento sektöründe kullanımı üzerine bir rapor hazırlamıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TENMAK iş birliği içerisinde Ulusal CO<sub>2</sub> Tutma ve Değerlendirme Teknolojileri Yol Haritası çalışması 2023 yılında tamamlanmış olup raporu halen yayınlanmamıştır.

Gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye’de, başta finansal engeller ve diğer zorluklar, ülkede petrol kurtarımı amacıyla yapılan CO<sub>2</sub> enjeksiyonu dışında mevcut uygulaması bulunmayan KYKD’nin yakın gelecekte geniş çapta uygulanmasını zorlaştıracaktır. Türkiye’nin henüz emekleme aşamasında olan KYKD’nin ülkede uygulanması için şimdiden bu uygulamaların yakalama, taşıma, kullanma ve depolamadan oluşan dört ayağının tamamını çalışması, bunlara ilişkin stratejilerini ortaya koyması, yasal bir zemin oluşturması ve idari çerçevesini belirlemesi gerekmektedir.

**KYKD teknolojileri, elektrik sektöründe yenilenebilir enerjiye geçişin ertelenmesi gibi Türkiye’nin emisyon azaltım hedeflerine ulaşmasını geciktirecek kararların gerekçesi olarak kullanılmamalıdır.**

Yüksek maliyeti dışında, Türkiye’de KYKD’ye ilişkin finansal, teknolojik, hukuki ve idari durum, KYKD’nın Türkiye’nin hedeflerine ulaşmasında küçük bir etkisi olacağını göstermektedir. Uzun vadede Türkiye 2053 hedeflerine ulaşmak için KYKD teknolojilerini kullanmayı tercih edebilir. Maliyetlerin düşmesi durumunda ortaya çıkabilecek bu durum, örneğin elektrik üretiminde yenilenebilir enerjiye geçişinin ertelenmesi gibi Türkiye’nin karbonsuzlaşmasını geciktirici bir gerekçe olarak kullanılmamalıdır.

**KYKD teknolojilerinin kullanılmasında öncelik sera gazı salımlarının düşürülmesinde sınırlı teknik alternatiflerin olduğu imalat sanayine verilmelidir.**

Türkiye, KYKD teknolojilerinin kullanımında, düşük maliyetli ve iklim dostu alternatifleri bulunan fosil yakıttan elektrik üretimini ayakta tutmak yerine, salım azaltımının zor olduğu imalat sanayi sektörlerinin salımlarının yönetilmesine öncelik vermelidir. Bu da riskleri azaltacak güçlü çevresel güvencelerle birlikte yapılmalıdır. Gerçekçi bir değerlendirme, Türkiye’nin bilinen ve daha hızlı devreye alınabilecek sınırlı jeolojik depolama kapasitesinin, imalat sanayine yönlendirmesinin yerinde olacağını göstermektedir.

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>YÖNETİCİ ÖZETİ</b>                                                                    | <b>v</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER</b>                                                                       | <b>ix</b>  |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b>                                                                  | <b>xi</b>  |
| <b>TABLolar LİSTESİ</b>                                                                  | <b>xiv</b> |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                                          | <b>1</b>   |
| 1.1. KARBON YAKALAMA TEKNOLOJİLERİ                                                       | 7          |
| 1.2. KARBON KULLANMA TEKNOLOJİLERİ                                                       | 11         |
| 1.3. KARBON DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ                                                       | 11         |
| 1.3.1. İZLEME FAALİYETLERİ                                                               | 17         |
| 1.3.2. KALICI JEOLojİK CO <sub>2</sub> DEPOLAMAYA İLİŞKİN RİSKLER                        | 19         |
| 1.4. KYKD MALİYETLERİ                                                                    | 20         |
| <b>2. DÜNYADA KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA</b>                                  | <b>27</b>  |
| 2.1. KYKD TEKNOLOJİLERİNE BİÇİLEN AZALTIM KATKISI                                        | 33         |
| 2.2. KURULU TESİSLER VE HAZIRLIK DURUMU                                                  | 32         |
| 2.3. ÜLKE ÖRNEKLERİ                                                                      | 36         |
| 2.2.1. AVRUPA BİRLİĞİ                                                                    | 37         |
| 2.2.2. ABD                                                                               | 38         |
| 2.2.3. İNGİLTERE                                                                         | 39         |
| 2.2.4. ALMANYA                                                                           | 39         |
| 2.2.5. HOLLANDA                                                                          | 39         |
| <b>3. TÜRKİYE'NİN KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA MEVCUT DURUMU VE POTANSİYELİ</b> | <b>41</b>  |
| 3.1. KURUMSAL YAPI VE MEVZUAT                                                            | 44         |
| 3.2. TÜRKİYE'DE KYKD UYGULAMALARI                                                        | 46         |
| 3.2.1. GELİŞMİŞ PETROL KURTARIMINI AMAÇLAYAN PROJELER                                    | 46         |
| 3.2.2. JEOTERMAL SAHALARDAKİ PİLOT ÇALIŞMALAR                                            | 48         |
| 3.3. TÜRKİYE'DE POTANSİYEL KYKD SALIMLARI                                                | 50         |
| 3.3.1. Çimento Sektörü                                                                   | 53         |

|                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.2. Demir-Çelik Sektörü                                                                                      | 54        |
| 3.3.3. Termik Santraller                                                                                        | 55        |
| 3.3.4. Diğer Tesisler                                                                                           | 55        |
| 3.4. TÜRKİYE'NİN DEPOLAMA POTANSİYELİ                                                                           | 56        |
| 3.5. KYKD'NİN TÜRKİYE İÇİN MALİYETİ                                                                             | 59        |
| <b>4. DEĞERLENDİRME</b>                                                                                         | <b>65</b> |
| <b>EKLER</b>                                                                                                    | <b>69</b> |
| <b>EK 1 TÜRKİYE'NİN TOPLAM SERA GAZI SALIMLARI</b>                                                              | <b>69</b> |
| <b>EK 2 TÜRKİYE'NİN KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA MEVCUT DURUMU VE POTANSİYELİ ANKET ÖZET SONUÇLARI</b> | <b>74</b> |
| <b>EK 3 KARBON YAKALAMA KULLANMA VE DEPOLAMA TERİMLER SÖZLÜĞÜ</b>                                               | <b>77</b> |
| <b>KISALTMALAR</b>                                                                                              | <b>81</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b>                                                                                                 | <b>85</b> |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|            |                                                                                                                                                                                      |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 1 –  | Şekil 1. Türkiye'nin [İklim Değişikliği] Ulusal Katkı Beyanı                                                                                                                         |
| Şekil 2 –  | KYKD Temel Süreci (Enerji Dönüşümü Komisyonu, 2022)                                                                                                                                  |
| Şekil 3 –  | KYKD'ya İhtiyaç Nedenleri (Enerji Dönüşümü Komisyonu – Temmuz 2022)                                                                                                                  |
| Şekil 4 –  | KYKD Değer Zinciri (ETC için SYSTEMIQ – 2022)                                                                                                                                        |
| Şekil 5 –  | KYKD Nasıl Çalışır? (Avrupa Birliği, AB Aksiyonu, Karbon yakalama, kullanma ve depolama)                                                                                             |
| Şekil 6 –  | Karbon Yakalama Yöntem ve Teknolojileri (ETC için SYSTEMIQ (2022); Cancawe (2018)- Teknoloji keşfi – karbon yakalama)                                                                |
| Şekil 7 –  | Endüstriyel İşlemler ve Enerji Üretiminde Karbon Yakalama                                                                                                                            |
| Şekil 8 –  | Biyoenerji Karbon Yakalama ve Depolama (BEKYD)                                                                                                                                       |
| Şekil 9 –  | Önemli CO <sub>2</sub> jeolojik depolama seçenekleri (CO <sub>2</sub> GeoNet, 2015).                                                                                                 |
| Şekil 10 – | CO <sub>2</sub> Faz Diyagramı (Bachu vd., 2008)                                                                                                                                      |
| Şekil 11 – | CO <sub>2</sub> yoğunluğunun basınç ve sıcaklık ile değişimi (Bachu vd., 2008)                                                                                                       |
| Şekil 12 – | CO <sub>2</sub> yoğunluğunun derinlik ile değişimi (Bachu vd., 2008)                                                                                                                 |
| Şekil 13 – | Karbon Depolama (Avrupa Komisyonu, DG TREN)                                                                                                                                          |
| Şekil 14 – | Sleipner projesi sismik ölçüm sonuçları (Torp and Gale, 2004)                                                                                                                        |
| Şekil 15 – | KYKD Maliyetleri (IEA (2019)- Enerji Teknolojisi Perspektifleri)                                                                                                                     |
| Şekil 16 – | KYKD Maliyetleri (IEA (2017)                                                                                                                                                         |
| Şekil 17 – | Boru hattı birim debi için sermaye maliyetleri (a) karada (b) denizde (Bongers, 2015).                                                                                               |
| Şekil 18 – | Farklı taşıma seçeneklerinin maliyetlerinin mesafeye bağlı olarak değişimi (IPCC, 2005)                                                                                              |
| Şekil 19 – | Depolama kaynaklı maliyet bileşenlerinin göreceli ağırlıkları. CAPEX: sermaye maliyeti, ABEX: terk maliyeti, OPEX: operasyonel maliyet, Post Closure: Enjeksiyon sonrası (IEA, 2022) |
| Şekil 20 – | 2050 Yılı KYKD Öngörülleri (Enerji Dönüşümü Komisyonu – Temmuz 2022)                                                                                                                 |
| Şekil 21 – | IEA'nın 2020-2050 Yılları Arasında KYKD'ya İlişkin Öngörüsü (IEA (2021) 2050 yılına kadar Net Sıfır, Küresel Enerji Sektörü için Bir Yol Haritası)                                   |
| Şekil 22 – | 2050 yılında KYKD Sistemlerinin Görünüşü (ETC için SYSTEMIQ – 2022)                                                                                                                  |
| Şekil 23 – | Mevcut haliyle uygulamada olan KYD Tesislerinin Dünya Haritası (Global KYD Enstitüsü- KYD 2022'nin Global Statüsü)                                                                   |

|                   |                                                                                                                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Şekil 24 –</b> | Çeşitli Geliştirme Aşamalarındaki KYD Tesislerinin Dünya Haritası (Global KYD Enstitüsü- KYD 2022'nin Global Statüsü)                                        |
| <b>Şekil 25 –</b> | 1,5°C'lik Küresel Isınma Özel Raporu IPCC'de CO <sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasına KYD katkısı (mtpa)                                                    |
| <b>Şekil 26 –</b> | Dünya genelindeki mevcut ticari büyük ölçekli KYD tesisleri, daha küçük ölçekli (pilot ve örnek) KYD tesisleri ve KYD test merkezleri (Ekim 2018 itibarıyla) |
| <b>Şekil 27 –</b> | KYD proje döngüsü için geçerli KYD ile ilgili özel yasalar                                                                                                   |
| <b>Şekil 28 –</b> | KYD Politika Göstergesi                                                                                                                                      |
| <b>Şekil 29 –</b> | Depolama Göstergesi                                                                                                                                          |
| <b>Şekil 30 –</b> | KYD Yasal ve Düzenleyici Göstergesi                                                                                                                          |
| <b>Şekil 31 –</b> | KYD Hazırlık Endeksi                                                                                                                                         |
| <b>Şekil 32 –</b> | Ülkelerin Paris Anlaşması Kapsamında BMİDÇS'ye Sundukları Ulusal Katkı Beyanlarında (UKB) KYKD (Global KYD Enstitüsü- KYD 2022'nin Global Statüsü)           |
| <b>Şekil 33 –</b> | KYKD Uygulaması için Kamu İdareleri ve KYKD Paydaşlarına Düşen Sorumluluklar (Enerji Dönüşümü Komisyonu – Temmuz 2022)                                       |
| <b>Şekil 34 –</b> | Batı Raman Sahası                                                                                                                                            |
| <b>Şekil 35 –</b> | Batı Raman sahası Garzan üstü yapı kontur haritası (Şahin vd., 2007)                                                                                         |
| <b>Şekil 36 –</b> | CO <sub>2</sub> enjeksiyon sistemi (Aksoy vd., 2017)                                                                                                         |
| <b>Şekil 37 –</b> | Türkiye'nin 2021 yılı Salımları içerisinde CO <sub>2</sub> Salımlarının Payı ve Ana Sektörleri                                                               |
| <b>Şekil 38 –</b> | 1990-2021 Arasında Türkiye'nin Karbon Yakalamayla İlişkili Sektörlerinin Toplam Salımları                                                                    |
| <b>Şekil 39 –</b> | 1990-2021 Arasında Türkiye'nin Karbon Yakalamayla İlişkili Sektörlerinin Salımlarında Değişim                                                                |
| <b>Şekil 40 –</b> | Türkiye'nin Potansiyel Karbon Yakalama Tesisleri                                                                                                             |
| <b>Şekil 41 –</b> | Türkiye'nin MRV Tesisleri (Potansiyel ETS Tesisleri)                                                                                                         |
| <b>Şekil 42 –</b> | Türkiye'nin Çimento Üretimi                                                                                                                                  |
| <b>Şekil 43 –</b> | Türkiye'de Kurulu Çimento Tesisleri                                                                                                                          |
| <b>Şekil 44 –</b> | Türkiye Çelik Haritası                                                                                                                                       |
| <b>Şekil 45 –</b> | Dünya tortul kayaçları ve kalınlıkları (Kearns vd., 2017)                                                                                                    |
| <b>Şekil 46 –</b> | Dünya'da Karbon Depolama Potansiyel Sahaları (Wei vd., 2021)                                                                                                 |

- 
- Şekil 47 –** Türkiye'deki olası CO<sub>2</sub> depolama alanları (Okandan vd., 2011)
- Şekil 48 –** ECO-BASE projesinde belirlenmiş olan karar ağacı (ECO-BASE, 2020)
- Şekil 49 –** 2020 yılı CO<sub>2</sub> sera gazı salımları
- Şekil 50 –** Türkiye'nin Toplam Sera Gazı Salımlarında 1990 Yılına Göre Değişim
- Şekil 51 –** Türkiye'nin Toplam ve Sektörel Sera Gazı Salımlarında 1990-2021 Arası Değişim
- Şekil 52 –** Türkiye'nin toplam sera gazı salımlarının yıllara göre sektörel değişimi (TÜİK, 2022)
-

## TABLÖLER

|                  |                                                                                                                                                                                                    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tablo 1</b> – | Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Yardım Projesi kapsamında belirlenen hidrokarbon sahaları CO2 depolama kapasitesi (Low Carbon Turkey, 2019). |
| <b>Tablo 2</b> – | Hesaplanan emisyon miktarları                                                                                                                                                                      |
| <b>Tablo 3</b> – | Türkiye için anahtar performans göstergeleri (ECO-BASE, 2020)                                                                                                                                      |
| <b>Tablo 4</b> – | Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası KYKD maliyetleri ve emisyonları (Doğan vd., 2023)                                                                                                  |

# 1. GİRİŞ

- 1.1. KARBON YAKALAMA TEKNOLOJİLERİ
- 1.2. KARBON KULLANMA TEKNOLOJİLERİ
- 1.3. KARBON DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ
- 1.4. KYKD MALİYETLERİ

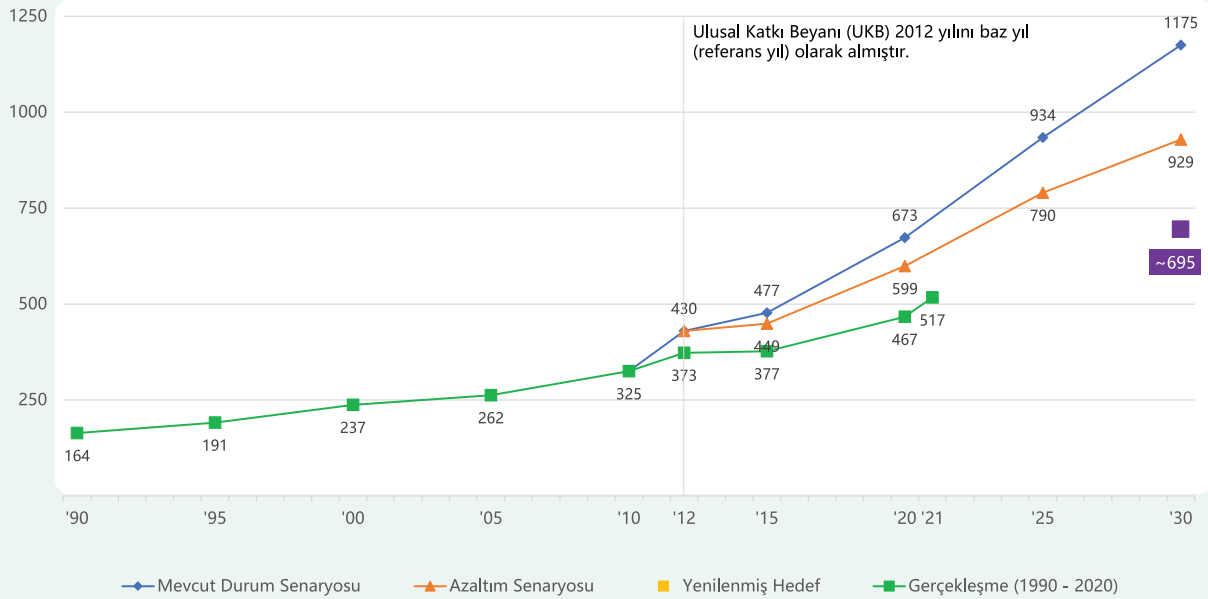


# 1. GİRİŞ

Türkiye 2021 yılında iklim değişikliğiyle mücadele için Paris Anlaşmasını onayladı. Paris Anlaşmasının onaylamasını takiben, 2022 yılında, 2030 yılı için taahhüt ettiği sera gazı salımlarında artıştan azaltım<sup>1</sup> hedefini %21'den %41'e yükseltti. Bu kapsamda, Türkiye'nin 2030 yılı için 1.213 milyon ton CO<sub>2</sub>e olarak öngördüğü salımlarını, 695 milyon ton CO<sub>2</sub>e seviyesinde tutması gerekiyor. (Bk. Şekil 1) Türkiye, uzun dönemde sera gazı salımlarının pik düzeye 2038 yılında çıkmasını planlarken, net-sıfır emisyon hedef yılını 2053 olarak açıkladı.

**Şekil 1 | Türkiye'nin [İklim Değişikliği] Ulusal Katkı Beyanı**

Toplam Seragazı Salımı Mt CO<sub>2</sub>e (AKAKDO) dahil



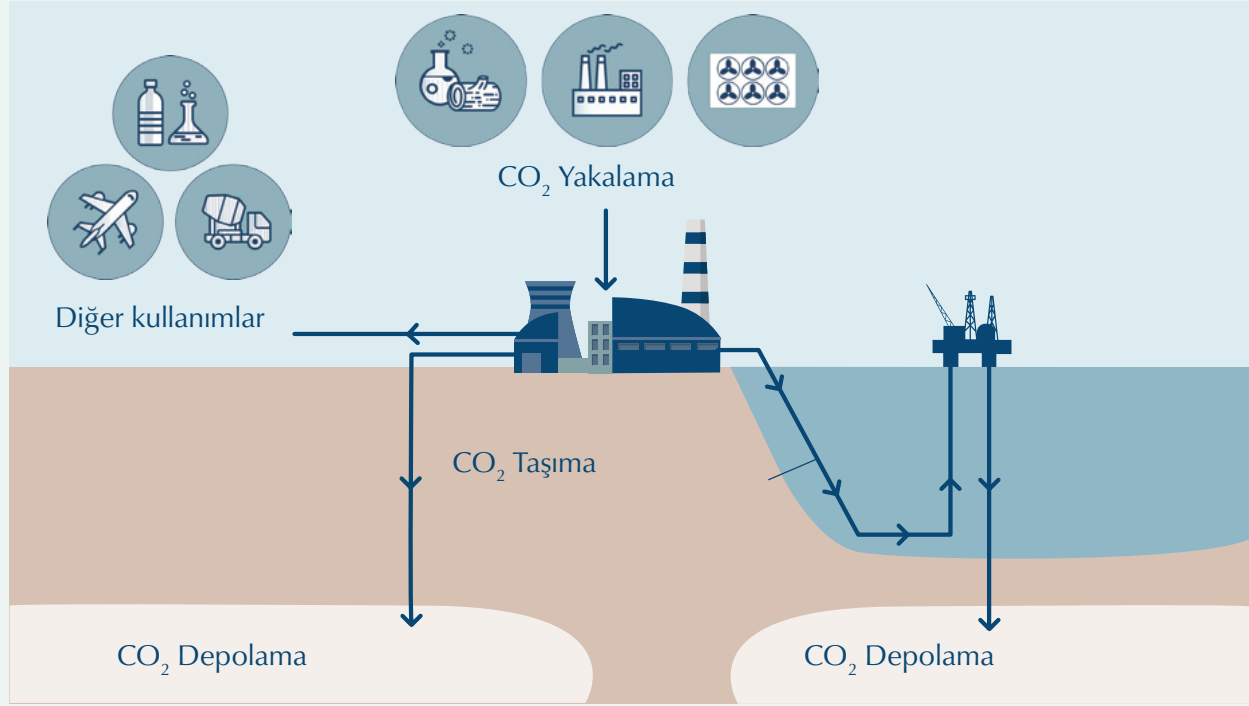
Türkiye'nin net-sıfır karbon hedeflerine ulaşmasında yoğun sera gazı salımı yapan sektörlerin karbonsuzlaşması kilit bir rol oynamaktadır. Karbon yoğun sektörlerde sera gazı salımları azaltılmadığı sürece Türkiye'nin net-sıfır karbon hedefine ulaşması mümkün olmayacaktır. Buna karşın, bazı karbon yoğun sektörlerin karbonsuzlaştırılması diğer sektörlerle göre daha zordur. Bu sektörlerin başında endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ile tarım sektörleri bulunmaktadır.

<sup>1</sup> 2015 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine (en:UNFCCC tr:BMİDÇŞ) sunulan Türkiye'nin Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkısı, mutlak emisyonlarda bir düşüş öngörmemiştir. Paris Anlaşması'nın onaylanmasının ardından Türkiye, Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkısını yenilemeye ve 2053 yılına kadar net sıfıra ulaşmak için uzun vadeli bir strateji hazırlamaya başladı.

Özellikle endüstriyel işlemler sektörü kaynaklı salımların azaltımında karbon yakalama ve kullanma (KYK) ile karbon yakalama depolama (KYD) teknolojileri geliştirilmiş ve uygulanmaya sınırlı da olsa başlanmıştır. Bu iki teknoloji kısaca karbon yakalama, kullanma ve depolama (tr: KYKD en: CCUS) olarak da kullanılmaktadır. Dünya'da KYKD teknolojileri araştırılmaya ve geliştirilen teknolojilerin uygulanmasına ilişkin ekonomik analizler yapılmaya devam etmektedir. KYKD, özellikle endüstriyel faaliyetler ve enerji üretimi sırasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub>'in kaynağında yakalanması, taşınması, kullanılması veya yeraltına depolanması süreçlerini içermektedir. Yakalanan CO<sub>2</sub>, farklı amaçlarla kullanılır veya karasal / denizel alanlarda yeraltında depolanır. (Bk. Şekil 2)

## Şekil 2 | KYKD Temel Süreci (Enerji Dönüşümü Komisyonu, 2022)

### KYKD, DEPOLAMA VEYA KULLANIM İÇİN CO<sub>2</sub> YAKALIYOR



Uluslararası müzakerelerde KYDK teknolojilerinin uzun vadede küresel net-sıfıra ulaşılmasında önemli olduğu kabul görmektedir.<sup>2</sup> Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) çalışmaları net-sıfır öngörülerinde KYKD teknolojilerine yer vermişlerdir. IEA, küresel ölçekte sıfır emisyon modellerinde 2030 için 1 milyar ton, 2050 için 6 milyar ton CO<sub>2</sub> yakalanmasını öngörmektedir. Avrupa Birliği KYKD'yi önemli bir iklim ve enerji politikası aracı olarak kabul etmektedir. Avrupa Birliği, CO<sub>2</sub>'in büyük bir sızıntıya yol açmayacak ve çevreye zarar verme riski olmayacak bir şekilde güvenli jeolojik depolamasını sağlamak için 2009'da Karbon Yakalama ve Depolama Direktifini kabul etmiştir. Geçen 14 yıla rağmen Avrupa Birliği ülkelerinde hali hazırda büyük ölçekli bir karbon depolama tesisi bulunmamaktadır.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (tr: BMİDÇS en: UNFCCC) kapsamında Dubai'de düzenlenen 28. Taraflar Toplantısında (COP28) Paris Anlaşması kapsamında Küresel Stok Sayımı hazırlanmıştır. Bu raporda ilk defa fosil yakıtlardan -kademeli olarak- dönüşümün önemi kabul edilmiştir. Elektrik üretiminde kömür kullanımının, sera gazı salımlarının düşürülmediği hallerde, sonlandırılmasının hızlandırılması kabul edilmiştir. Bu

<sup>2</sup> IEA (2023), CCUS, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/ccus>

durum kömürden elektrik üretiminde KYKD teknolojilerinin kullanılmasına olanak sunmaktadır. Buna tezat olarak Devletler, KYKD teknolojilerinin özellikle salımları düşürmenin zor olduğu sektörlerde ve düşük karbonlu hidrojen üretiminde yaygınlaştırılmasının önemini kabul etmiştir.<sup>3</sup>

Avrupa Birliği KYKD teknolojilerine genel olarak sera gazı salımlarının düşürülmesinde sınırlı teknik alternatiflerin olduğu imalat sanayine öncelik vermektedir. (Bk. Şekil 3). COP28 kararlarında da KYKD teknolojilerinin kullanımının yaygınlaştırılmasında öncelik bu sektörler verilmiştir.

### Şekil 3 | KYKD'ya İhtiyaç Nedenleri (Enerji Dönüşümü Komisyonu – Temmuz 2022)

KARBON YAKALAMA, KULLANMA VEYA DEPOLAMAYA (KYKD) ÜÇ BAĞLAMDA İHTİYAÇ OLACAK

TEMEL ROL - sınırlı teknik alternatifler



CO<sub>2</sub> üreten endüstriyel proseslerde ve diğer sıfır karbonlu çözümlerle dekarbonize edilemez



Atmosferden önemli ölçüde tasarlanmış CO<sub>2</sub> giderimi sağlamak için.



Yerel kaynaklar ve maliyet göz önüne alındığında en düşük maliyetli dekarbonizasyon çözümü olduğu yerde

Günümüz teknolojileriyle KYKD sera gazı salımlarının düşürülmesinde çok yüksek maliyet getirmektedir. Oxford Üniversitesinin değerlendirmesine göre net-sıfır emisyonu ulaşmada KYKD teknolojilerine az başvurulması, bu teknolojilerin yoğun kullanılmasına göre 30 trilyon dolar daha düşük maliyet getirmektedir. Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması çok daha düşük maliyetli bir yol sunmaktadır.<sup>4</sup>

KYKD, KYK ve KYD teknolojilerinden ikisini birden ifade etmektedir. KYKD teknolojisinde ilk olarak CO<sub>2</sub> diğer gazlardan ayrılarak yakalanır veya bir başka ifadeyle tutulur. KYDK, yakalama, taşıma, kullanma ve depolama süreçlerinin tamamını içermektedir. Bu dört sürecin her birinde farklı teknolojiler yer almaktadır. Şekil 4 KYKD süreçlerini özetlemektedir.

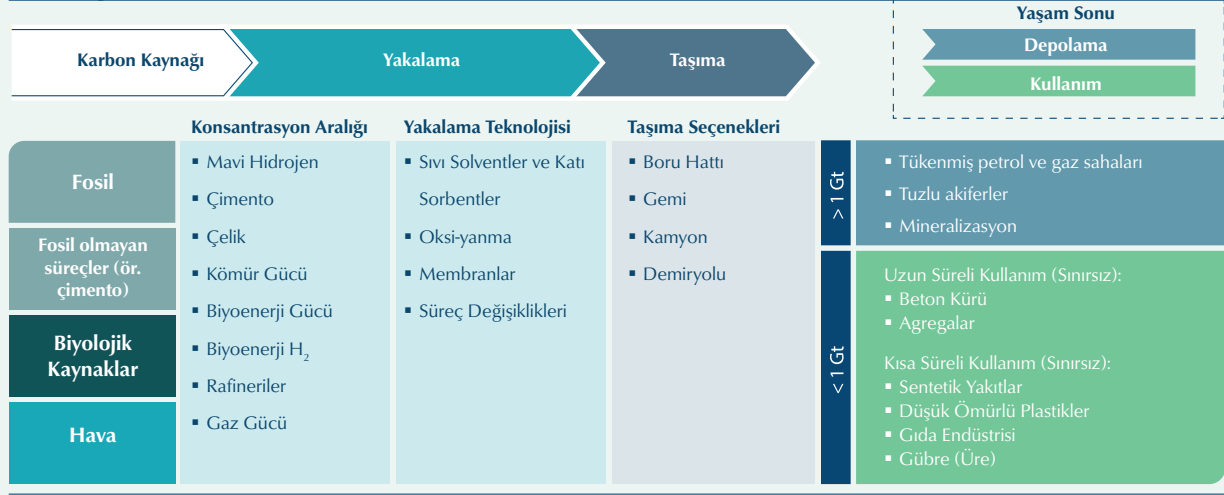
<sup>3</sup> UNFCCC, FCCC/PA/CMA/2023/L.17 [28. (b) Accelerating efforts towards the phase-down of unabated coal power; 28. (c) Accelerating zero- and low-emission technologies, including, inter alia, renewables, nuclear, abatement and removal technologies such as carbon capture and utilization and storage, particularly in hard-to-abate sectors, and low-carbon hydrogen production]

<sup>4</sup> Bacilieri, A., Black, R., & Way, R. (2023). Assessing the relative costs of high-CCS and low-CCS pathways to 1.5 degrees. Oxford Smith School Working Paper 23- 08.

## Şekil 4 | KYKD Değer Zinciri (ETC için SYSTEMIQ – 2022)

## CCUS değer zinciri dört farklı aşamaya ayrılabilir

KYKD Değer Zinciri



Karbon yakalama, fosil yakıt kullanan tesislerde yanma öncesi veya sonrası gerçekleşebilmektedir. Karbon kullanma teknolojisi, yakalanan CO<sub>2</sub>'nin yeniden kullanılabilir bir ürüne dönüştürülmesi işlemidir. CO<sub>2</sub>, kimyasal üretimlerde, sentetik yakıt üretiminde ve inşaat malzemeleri üretiminde kullanılabilir. Örneğin, CO<sub>2</sub>, çimento üretimi sırasında kullanılan kireç taşının yerini alabilir. Karbon kullanma teknolojisi, endüstriyel faaliyetlerin sera gazı emisyonlarını azaltmaya yardımcı olabilir. Karbon depolama teknolojisi ise, yakalanan CO<sub>2</sub>'nin yeraltında veya okyanuslarda depolanması işlemidir. Karbon depolama teknolojisi için de birkaç farklı yöntem mevcuttur. Bunlar arasında yeraltına yüksek basınçlı CO<sub>2</sub> enjeksiyonu ve karbonat mineralizasyonu gibi yöntemler bulunmaktadır. (Bk. Şekil 5)

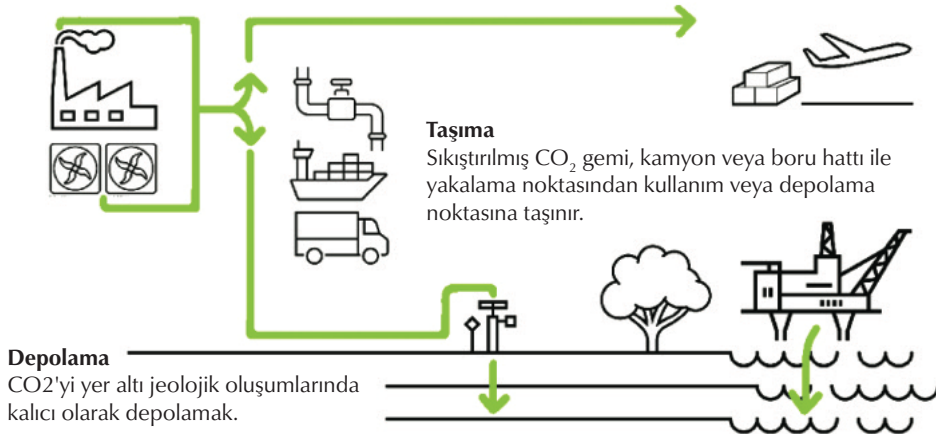
Şekil 5 | KYKD Değer Zinciri (ETC için SYSTEMIQ – 2022)<sup>5</sup>

## Yakalama

Örneğin biyokütle yakıtlı elektrik santrallerinden, endüstriyel tesislerden veya havadan CO<sub>2</sub> yakalama.

## Kullanma

Yakalanan CO<sub>2</sub>, ürün ve hizmetler oluşturmak için bir ham madde kaynağı olarak kullanılır.



<sup>5</sup> URL: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage_en)

KYKD'ya ilişkin teknolojiler aşağıda sunulmaktadır:

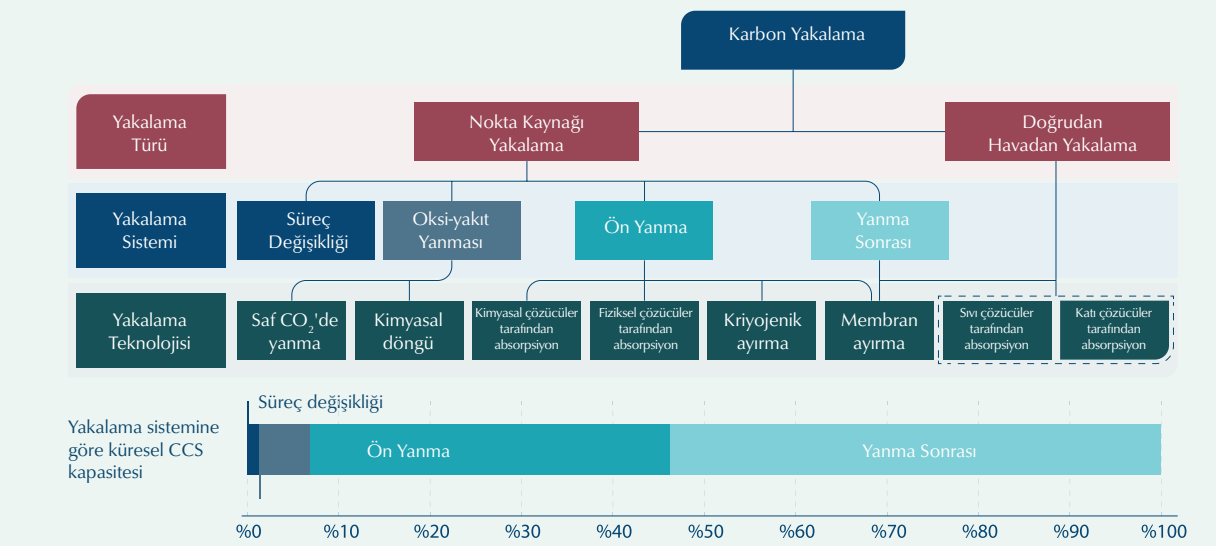
- Karbon Yakalama Teknolojileri
  - İmalat Sanayi ve Enerji Sektöründe Karbon Yakalama
  - Doğrudan (Havadan) Karbon Yakalama
- Karbon Kullanma Teknolojileri
  - Senterik Yakıtlar
- Karbon Depolama Teknolojileri
  - Yüksek Basıncılı CO<sub>2</sub> Enjeksiyonu
  - Karbonat Mineralizasyonu
- Karbon Yakalamalı Biyoenerji

### 1.1. KARBON YAKALAMA TEKNOLOJİLERİ

Karbon yakalama teknolojileri, atmosferdeki karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazını yakalamak ve depolamak veya başka bir şekilde kullanmak için tasarlanmış çeşitli yöntemlerdir. Bu teknolojiler, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmayı amaçlar ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamayı hedefler. KYKD sürecinin birinci adımı karbonun yakalanmasıdır. Karbon yakalama çok farklı teknoloji ve yöntemlerle yapılabilmektedir. (Bk. Şekil 6)

**Şekil 6 | Karbon Yakalama Yöntem ve Teknolojileri (ETC için SYSTEMIQ (2022); Cancawe (2018)- Teknoloji keşfi – karbon yakalama)**

Karbon yakalama teknolojileri, yakalama tipine, sistemine, teknolojisine ve ayırma tekniğine göre kategorize edilebilir  
Karbon yakalama teknolojileri



Karbon yakalama teknolojileri, atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu azaltarak iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynayabilir. Ancak bu teknolojilerin bazı zorlukları vardır, örneğin yüksek maliyet, enerji gereksinimleri, CO<sub>2</sub>'in güvenli bir şekilde depolanması ve kullanılması gibi konular üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

CO<sub>2</sub> salımlarının önemli bir bölümü imalat sanayi ve enerji sektöründe fosil yakıtların kullanımından kaynaklanmaktadır. İmalat Sanayi ve Enerji Sektöründe Karbon Yakalama özellikle büyük ölçekli tesislerde karbon yakalama teknolojileri olarak kullanılabilir. Bu tesislerde karbon yakalama teknolojileri üç başlık altında incelenebilir:

**Yanma Sonrası CO<sub>2</sub> Yakalama:** Bu yöntem, endüstriyel tesislerin baca gazlarından CO<sub>2</sub> gazını ayırmak için kullanılır. Örneğin bir termik santralin enerji üretimi sırasında açığa çıkan gazlar bu yöntemle ayrıştırılabilir. Yanma sonrası CO<sub>2</sub> yakalama yöntemi, CO<sub>2</sub> gazını temiz hava akımına karışmadan yakalamak için çeşitli malzemeler kullanır. (Bk. Şekil 7)

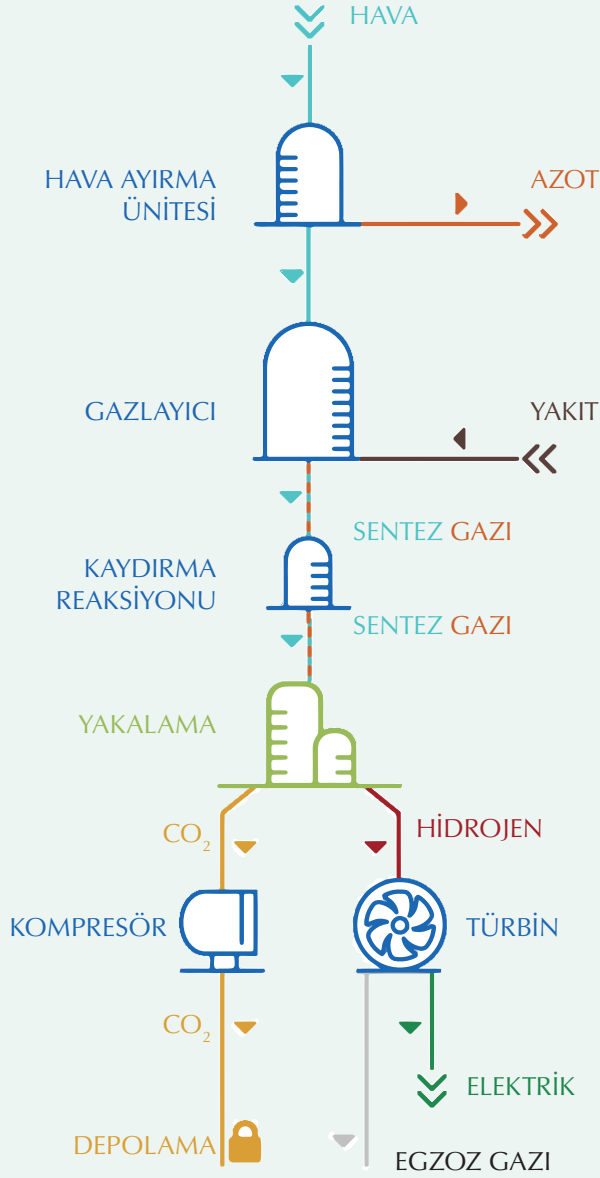
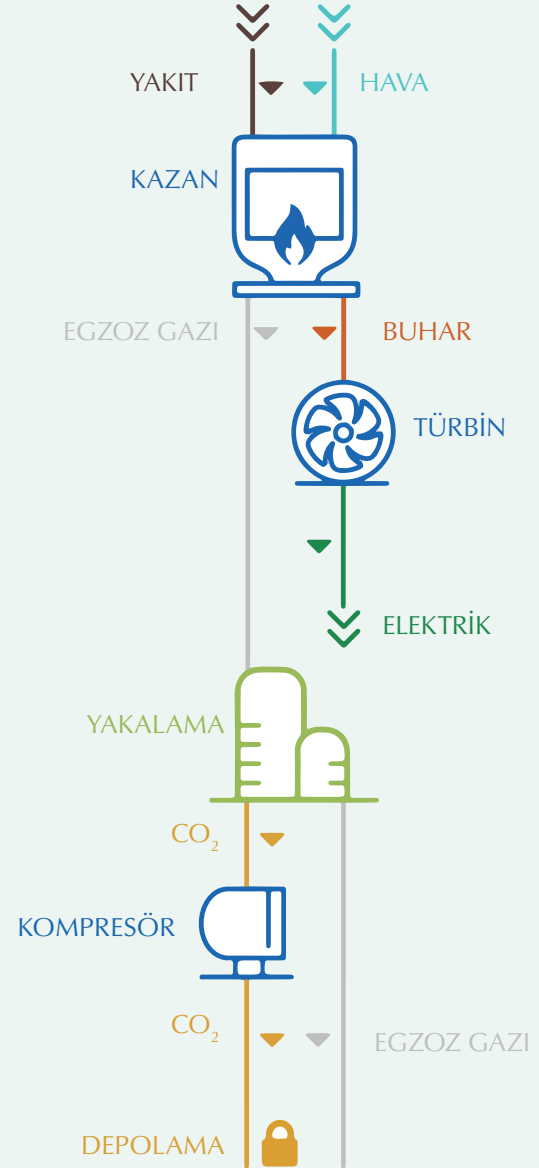
**Yanma Öncesi CO<sub>2</sub> Yakalama:** Bu yöntem, fosil yakıtların yakılmadan önce gaz haline getirilmesi işlemi olan gazlaştırma işlemi sırasında CO<sub>2</sub> gazını ayırmak için kullanılır. Gazlaştırma işlemi sırasında, yakıt gazı ve su buharı kullanılarak sentez gazı üretilir. Ardından, CO<sub>2</sub> sentez gazından ayrılır ve depolanmak üzere ayrı bir sistemde tutulur. (Bk. Şekil 7)

**Oksi-yakıt CO<sub>2</sub> Yakalama:** Bu yöntem, yakıtın oksijenle yanması sırasında oluşan gazların temizlenmesi için kullanılır. Yakıtlarla birlikte, saf oksijen de kullanılır ve yanma sonucunda CO<sub>2</sub> gazı üretilir. Ardından, CO<sub>2</sub> gazı oksijen kullanımından önce yakalanır ve depolanmak üzere ayrı bir sistemde tutulur.

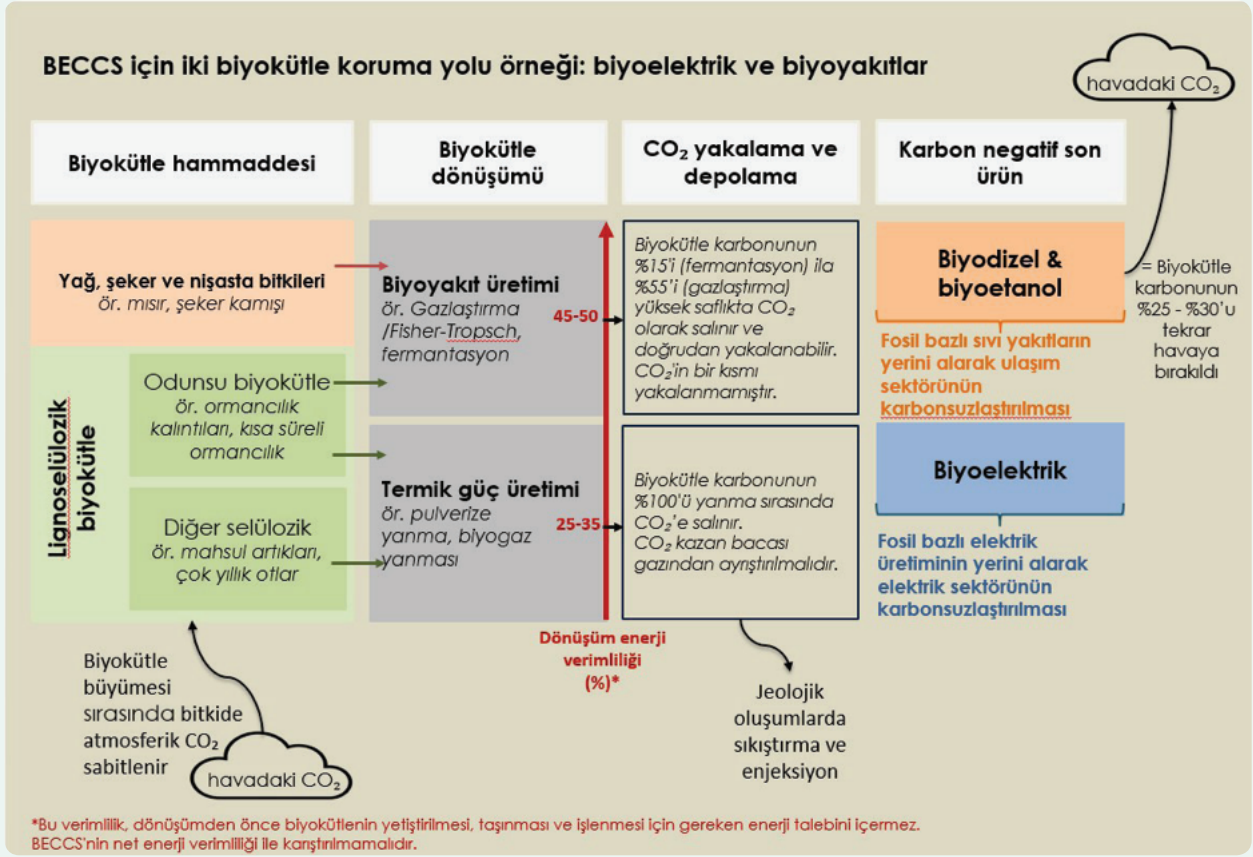
Bunların dışında Doğrudan (Havadan) Karbon Yakalama (DAC) teknolojisi de gelişmeye başlamıştır. Bu yöntem havada bulunan CO<sub>2</sub> gazını yakalamak için kullanılan bir teknolojidir. Bu yöntem, karbon dioksit seviyesini azaltmaya yardımcı olur. DAC teknolojisi, karbon dioksit emisyonlarının azaltılmasına ve havadaki karbon dioksit miktarının dengelenmesine yardımcı olabilir. Ancak mevcut teknolojiler çok pahalıdır.

Bir başka teknoloji biyoenerji karbon yakalama ve depolamadır. (BEKYD) Biyoenerji ile enerji üretmek için kullanılan biyokütle kaynaklarının yanması sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> gazının yakalanması işlemidir. Bu yöntem, biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde kullanımını artırırken, CO<sub>2</sub> salımlarını azaltmaya yardımcı olabilir. (Bk. Şekil 8). BEKYD, biyoenerji üretiminde karbon nötr veya karbon negatif bir süreç sağlamayı hedefler.

Şekil 7 | Endüstriyel İşlemler ve Enerji Üretiminde Karbon Yakalama

YANMA ÖNCESİ CO<sub>2</sub> YAKALAMAYANMA SONRASI CO<sub>2</sub> YAKALAMA

Şekil 8 | Biyoenerji Karbon Yakalama ve Depolama (BEKYD)



BEKYD'nin çalışma prensibi, biyoenerji üretimi sırasında CO<sub>2</sub> gazının yakalanması ve ardından depolanmasıdır. Biyoenerji kaynakları arasında biyokütle ve biyogaz gibi organik atıklar, bitki örtüsü ve tarımsal atıklar yer alır. Bu kaynaklar, enerji üretimi için yanmaya veya fermentasyona tabi tutulurken CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkar. BEKYD, bu süreçte açığa çıkan CO<sub>2</sub> gazını yakalar ve daha sonra depolama veya başka bir kullanım amacıyla saklar.

BEKYD'nin birkaç bileşeni vardır. İlk olarak, biyoenerji üretimi için biyokütle veya biyogaz kaynağı seçilir. Kaynak, enerji üretimi sürecine tabi tutulurken CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkar. Daha sonra, CO<sub>2</sub> gazı yakalanır. Yakalanan CO<sub>2</sub> gazı daha sonra depolanır veya başka bir şekilde kullanılır. Depolama, yer altı depolama veya mineralizasyon gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. CO<sub>2</sub> gazı, uygun jeolojik oluşumlar içinde saklanarak yer altına enjekte edilebilir. Bu şekilde CO<sub>2</sub>, atmosfere geri salınmadan uzun süreli bir şekilde hapsedilebilir. Sonrasında karbon negatif son ürün oluşur ve biyoetanol ve biyoelektrik gibi ürünler ulaşım ve elektrik sektörünün karbonsuzlaşmasına katkı sağlayabilir.

## 1.2. KARBON KULLANMA TEKNOLOJİLERİ

Yakalanan CO<sub>2</sub>'nin kullanımında en büyük kullanma potansiyeli sentetik yakıtların üretimi olarak görülmektedir. Sentetik yakıtlar, doğal kaynaklardan elde edilen yakıtların yerine kullanılabilecek şekilde sentetik olarak üretilen yakıtlardır. Bu yakıtlar, genellikle yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilir ve fosil yakıtların yerini almaları amaçlanır (IEA Raporu).

Sıvı sentetik yakıtlar arasında biyoyakıt, biyodizel, sentetik dizel ve DME (dimetil eter) yer alır. Biyoyakıtlar, bitkisel yağlar, talaş, ağaç kabuğu, atıklar ve biyokütle türevleri gibi malzemelerden üretilirler. Biyoyakıtlar, fosil yakıtlara göre daha az karbon salımına neden olur ve bu nedenle çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek olarak görülürler. Bununla birlikte, biyoyakıt üretimi, gıda maddelerinin üretimine yönelik alanların kullanımına neden olabileceği için tartışmalıdır.

Hidrojen, suyun elektrolizi yoluyla üretilir ve genellikle bir yakıt hücresi aracılığıyla kullanılır. Yakıt hücresi, hidrojeni oksijenle reaksiyona sokarak elektrik üretir. Hidrojen, fosil yakıtların yerine kullanılabilen bir yakıt olarak görülmektedir. Ancak, hidrojen üretimi halen yüksek maliyetlidir ve üretiminde kullanılan elektriğin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi gerekmektedir.

Gaz sentetik yakıtlar arasında biyogaz ve sentetik metan yer almaktadır. Biyogaz, organik atıklardan elde edilen bir gazdır ve elektrik ve ısı üretimi için kullanılabilir. Sentetik metan ise hidrojen ve karbondioksitin bir araya getirilmesiyle elde edilir ve doğal gazın yerini alabilir. Bununla birlikte, sentetik metanın üretimi halen yüksek maliyetlidir ve yeterli miktarda yenilenebilir enerji kaynaklarına erişim gerektirir.

Sentetik yakıtlar taşımacılık sektöründe karbon salımlarını azaltma potansiyelini taşımaktadır. Sentetik yakıtlar, fosil yakıtların yerini alabilecekleri gibi fosil yakıtlarla birlikte de kullanılabilmektedir. Günümüz teknolojileriyle sentetik yakıtların üretimi yüksek maliyet gerektirmekte, bu nedenle sentetik yakıtların yaygın kullanımı ekonomik açıdan mümkün görülmemektedir. Bununla birlikte, sentetik yakıtların özellikle havacılık ve denizcilik gibi sektörlerde, elektrikli araçların kullanımının zor olduğu alanlarda kullanımı konusunda fırsatlar bulunmaktadır. Sentetik yakıtların üretiminde kullanılan kaynakların sürdürülebilirliği önemli bir sorun olarak görülmektedir. Sentetik yakıtların üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması bu konuda önemli bir adımdır.

Sonuç olarak, sentetik yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla fosil yakıtların yerini alabilecek enerji kaynaklarıdır. Sentetik yakıtların üretiminde kullanılan kaynakların sürdürülebilirliği ve maliyetleri konusundaki tartışmalar, bu yakıtların kullanımın etkileriyle birlikte devam etmektedir. Sentetik yakıtların yaygınlaşması için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

## 1.3. KARBON DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

CO<sub>2</sub>'nin jeolojik depolanması, atmosfere net salımların önemli ölçüde azaltılması konusunda uygulanabilir bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Doğal ve yaygın olarak milyonlarca yıl kendiliğinden depolanmış CO<sub>2</sub> sahaları mevcuttur. Bu yeraltı katmanlarının CO<sub>2</sub>'yi verimli ve güvenli bir şekilde uzun süre depolamaya uygun olduğunu göstermektedir. Bu teknoloji, özellikle petrol ve gaz keşfi ve üretimi, doğal gaz depolama ve sıvı atıkların derin depolanması ve asit gaz alanında elde edilen deneyimler sonucunda uygulanabilir görülmektedir. Ayrıca, jeolojik ortamlarda yeterli CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi, dünya çapında eşit olmayan bir şekilde dağılmış olsa da mevcuttur ve muhtemel saklama süresi oldukça yeterlidir ve binlerce yıl depolamaya olanak verir (IPCC, 2005).

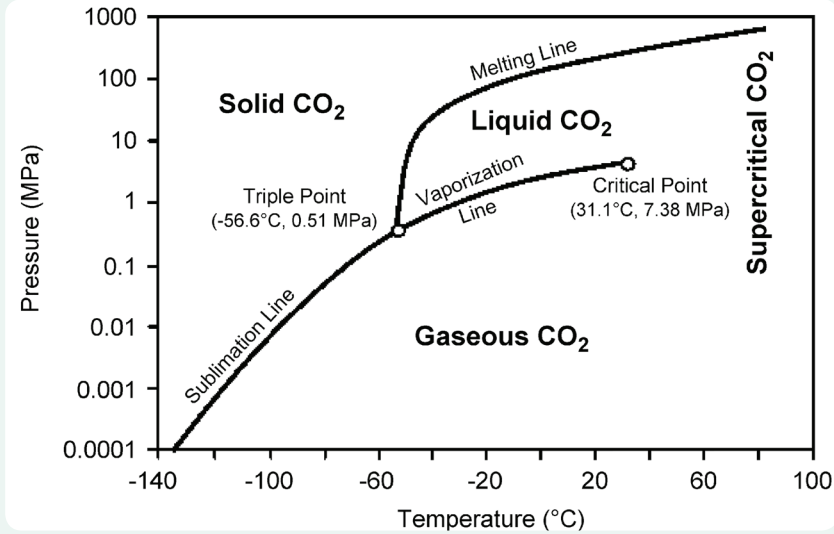
Karbondioksitin jeolojik ortamlarda depolanması, hidrokarbon rezervuarlarındaki petrol ve gaz birikimleri ile kömür yataklarındaki metan ile birçok benzer özelliği paylaşmaktadır. Teknolojik açıdan, özellikle petrol ve gaz endüstrisinde, çeşitli karbon, yakalama ve depolama (KYD) bileşenleriyle ilgili geniş bir deneyim bulunmaktadır.

CO<sub>2</sub>'nin fiziksel özellikleri depolamanın hangi derinlik ve koşullarda yapılması gerektiğini belirlemektedir. Bu nedenle CO<sub>2</sub>'nin farklı faz durumları ve bu durumların yeraltı depolama koşulları üzerindeki etkileri, özellikle süperkritik CO<sub>2</sub>'nin özellikleri aşağıda verilmektedir.

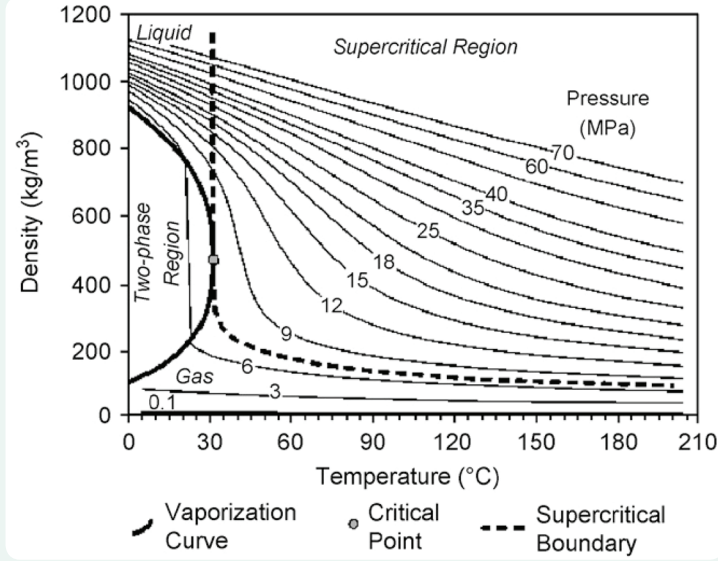
The diagram illustrates a geological cross-section of a subsurface reservoir system. The layers from top to bottom are: Su seviyesi (Water level), En genç örtü formasyon (Youngest cover formation), Akifer (Aquifer), Petroli rezervuarı (Petroleum reservoir), and Tüketilmiş gaz rezervuarı (Depleted gas reservoir). The base is labeled Kristal temel (Crystalline basement). The diagram shows CO<sub>2</sub> injection wells and a petroleum production well. A legend on the right identifies symbols for CO<sub>2</sub> depolanması (CO<sub>2</sub> storage), Kömür yatağı (Coal seam), Petroli rezervuarı (Petroleum reservoir), and Tüketilmiş gaz rezervuarı (Depleted gas reservoir). Two inset photographs on the left show rock samples with a 50 cm scale bar.

Normal standart koşullarda  $\text{CO}_2$ ,  $1.872 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip bir gazdır.  $\text{CO}_2$  için kritik sıcaklık ve basınç değerleri, sırasıyla,  $T_c = 31.1^\circ\text{C}$  ve  $P_c = 7.38 \text{ MPa}$ 'dır. Kritik sıcaklık altındaki sıcaklıklarda ve buharlaşma eğrisinin üzerindeki basınçlar için  $\text{CO}_2$  bir sıvıdır, ancak kritik noktanın üzerindeki sıcaklık ve basınçlar için  $\text{CO}_2$  süperkritik bir akışkan olarak kabul edilir (Şekil 10).

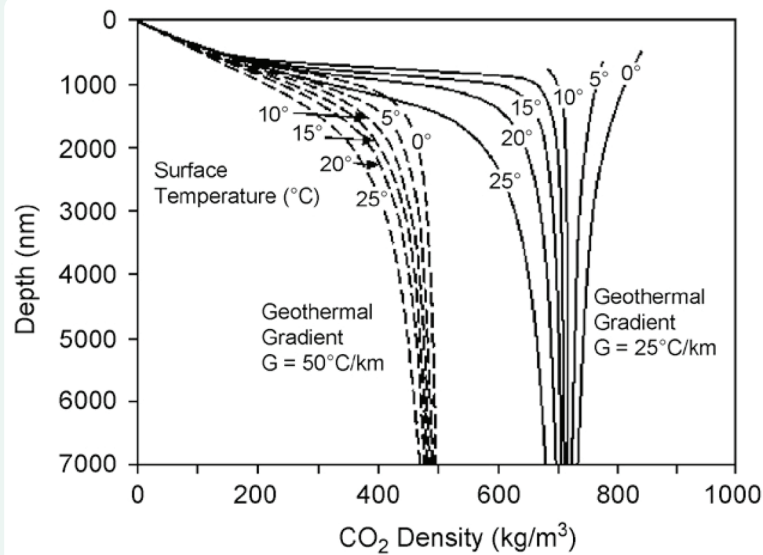
Şekil 10 |  $\text{CO}_2$  Faz Diyagramı (Bachu vd., 2008)



Süperkritik koşullarda bir akışkanın sıvı veya gaz fazından farklı özellikleri vardır, ancak bu durumda en dikkat çekici ve ilgili olanlar, sıvılar gibi yüksek yoğunluğa sahip olmaları ve bir gaz gibi mevcut tüm hacmi işgal etmeleridir. Hem sıcaklık hem de basınç, yer altındaki derinlikle arttıkça artar, ancak basınç artışı ile  $\text{CO}_2$  yoğunluğu artarken, sıcaklık artışı  $\text{CO}_2$  yoğunluğunu azaltan bir etki yaratır (Şekil 11).

Şekil 11 | CO<sub>2</sub> yoğunluğunun basınç ve sıcaklık ile değişimi (Bachu vd., 2008)

Bu nedenle yoğunluk derinlikle hızla artar ve sonra jeotermal rejime bağlı olarak stabilize olur veya hatta azalır (Şekil 12). Çoğu durumda yer altına 800 m veya daha derine enjekte edilen CO<sub>2</sub>, yüksek yoğunluğa sahip ancak suya göre daha hafif bir batan süperkritik bir akışkan olacağını göstermektedir. Bu derinliğin üzerinde CO<sub>2</sub> bir gazdır ve yoğunluğu ekonomik olarak depolanamayacak kadar düşüktür.

Şekil 12 | CO<sub>2</sub> yoğunluğunun derinlik ile değişimi (Bachu vd., 2008)

Tuzlu formasyonlara enjekte edilen  $\text{CO}_2$ , farklı fiziksel ve kimyasal tutunma mekanizmalarıyla denge içinde kalır. Fiziksel tutunma mekanizması,  $\text{CO}_2$ 'nin hareketsiz kaldığı serbest bir gaz veya süper kritik akışkan olduğu durumda iki şekilde gerçekleşir.

- Stratigrafik ve yapısal tuzak içinde hareketsiz olarak  $\text{CO}_2$ 'nin tutulması veya insan yapımı mağaralarda (bu bağlamda hareketli,  $\text{CO}_2$ 'nin akışının fiziksel düşük geçirgenlik bariyeri tarafından engellendiği ve bir yol bulunursa  $\text{CO}_2$ 'nin kendi kaldırma kuvveti ve diğer kuvvetler tarafından sürükleneyeceği anlamına gelir);
- Düşürülemeyen gaz doygunluğunda gözenek alanındaki arta kalan gaz tutunması, bu durumda  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  ile formasyon suyu arasındaki arayüzey gerilimi nedeniyle hareketsizdir ve bir yol mevcut olsa bile akış mümkün değildir. Bu mekanizmaya arta kalan kapanlanma da denir.

$\text{CO}_2$ 'nin formasyon içinde süper kritik bir akışkan veya gaz olarak davrandığı fiziksel tutunma mekanizmasını (yapısal kapanlanma),  $\text{CO}_2$ 'nin yeraltı suyunda zamanla çözündüğü "çözünürlük tutunma" mekanizması ve kimyasal reaksiyonların rol oynadığı,  $\text{CO}_2$ 'nin formasyon içindeki ikincil karbonatların doğrudan veya dolaylı olarak çökmesine yol açan "mineral tutunma" mekanizması izler. Özellikle derin tuzlu su akiferlerine yapılan  $\text{CO}_2$  enjeksiyonlarında su içerisinde  $\text{CO}_2$ 'nin çözünmesi sonrasında  $\text{CO}_2$  ile doymuş olan suyun diğer rezervuar suyuna göre ağırlaşarak formasyonun tabanına doğru ilerlemesi ile  $\text{CO}_2$ 'nin güvenli depolanması sağlanır. Hidrodinamik ve çözünürlük tutunma mekanizmaları depolamanın başlangıç aşamalarında etkilidir. Çözünürlük tutunma mekanizması,  $\text{CO}_2$ 'nin formasyon suyunda çözünmesi ve formasyon suyunun asiditesini artırarak çevre kayaç minerallerinin çözünürlüğünü etkileyebilir. Bu mekanizmalar arasında en önemlisi ve dengeleyici olanı, kimyasal reaksiyonların etkili olduğu,  $\text{CO}_2$ 'nin uzun süre hareketsiz kalmasını ve atmosfere geri dönmesinin engellendiği mineral tutunma mekanizmasıdır. Mineral tutunma  $\text{CO}_2$ 'nin katı mineraller ile reaksiyona girerek kalsit mineraline dönüşmesidir. En kalıcı depolama mekanizması olmasına rağmen diğer mekanizmalara göre en çok zaman alan mekanizma olarak bilinir. Mineral tutunma, kayaç minerallerinin varlığına, gaz basıncına ve sıcaklığa bağlıdır.

$\text{CO}_2$  suya göre 10 kat daha fazla petrol içerisinde çözünme eğilimindedir. Uygun basınç ve sıcaklık koşullarında petrol ile tek faz olarak karışabilir. Bunun için hafif ve orta ağırlıkta petroler daha uygundur. Petrol ile tam olarak karışabildiği durumlarda  $\text{CO}_2$ , petrolün şişmesini ve viskozite değerinin düşmesine neden olur. Bu özelliği geliştirilmiş petrol kurtarımı (EOR) operasyonlarında kullanılmasını sağlar. EOR amacıyla basılan  $\text{CO}_2$ 'nin bir kısmı üretilen petrol ile birlikte geri üretilse de yeniden yakalanır ve enjekte edilir. Bu sayede  $\text{CO}_2$  depolanması sağlanmış olur.

$\text{CO}_2$  yeraltında herhangi bir yere enjekte edilemez, öncelikle uygun formasyonların bulunması gereklidir.  $\text{CO}_2$  depolamaya uygun jeolojik ortamlar aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- Kapasite: İstenen  $\text{CO}_2$  hacmini kabul edebilmelidir.
- Enjektivite:  $\text{CO}_2$  kaynağından sağlandığı hızda  $\text{CO}_2$  alabilmelidir.
- Sınırlama: Depolama alanındaki hafif ve hareketli  $\text{CO}_2$ 'nin yeraltındaki diğer yerlere, sığ içilebilir yeraltı suyuna ve/veya yüzeye göçünü ve sızmasını önleyebilmelidir.

$\text{CO}_2$ , yeraltında uygun bir rezervuar kayacına enjekte edildiğinde, rezervuarda var olan akışkanları öteleyecek ve yer değiştirecektir. Bunun gerçekleşebilmesi için depolanacak formasyonun yeterli gözeneklilik ve geçirgenliğe sahip olması gerekir.  $\text{CO}_2$ 'nin basınçlandırılması ile yeterli düşük yoğunluğa ulaşması için bu formasyonların 800 m'den daha derin olması beklenir. Ayrıca bu formasyonların içme suyu formasyonu olmamasına da dikkat edilmelidir.

Kumtaşı veya karbonatlı kayaçlardan oluşan tortul kayaçlar yeterli gözeneklilik ve geçirgenlik özelliklerine sahip olabilir. Bunun yanında düşük geçirgenliğe sahip şeyl katmanları ve tuz katmanları  $\text{CO}_2$ 'nin enjekte edildiği

rezervuarda tutan bir fiziksel engel olan kapan kayaç vazifesini görebilirler. Kömür damarları ise adsorplanma özellikleri sayesinde yüksek miktarda CO<sub>2</sub> depolama imkânı verebilirler. Bazalt gibi volkanik kayaçlar ise her ne kadar çatlaklı oldukları için depolamaya uygun gözükmeler de CO<sub>2</sub>'nin mineral olarak çökmesi için kullanılabilirler (Gislason ve Oelkers, 2014).

Yeraltı yapılarının uzun süreli depolamaya uygunluğunun belirlenmesi, depolanacak alanı derinlemesine incelemiş ve yerbilimleri konusunda deneyimli kişilerce yapılmalıdır. CO<sub>2</sub> çeşitli jeolojik sahalarda depolanabilir. Bu alanların başına petrol ve gaz rezervuarları, derin tuzlu su sahaları, kömür damarları gelmektedir.

## Petrol ve Gaz Rezervuarları

CO<sub>2</sub> terkedilmiş petrol ve gaz rezervuarlarına enjekte edilebilir. Bu tür sahalar, jeolojik olarak detaylı şekilde incelenmiş oldukları için hem ne miktarda CO<sub>2</sub> depolamasının gerçekleştirilebileceğine hem de ne hızla CO<sub>2</sub>'nin enjeksiyon kuyularından basılabileceğine dair bilgi açısından zengindir. En önemlisi de rezervuarın üst tarafında bir kapan kayaç bulunduğu konusunda çok yüksek güvenilirlik vardır. Bu tür sahalar, üretim yapılabilecek petrol barındırmaları durumunda da CO<sub>2</sub> depolanması için kullanılabilir. Geleneksel petrol üretim yönteminde, yüzeyden yapılan sondajlarla petrol rezervuarına erişilir, ardından çözünmüş gazın genişmesi, akifer suyu girişi, varsa gaz rezervuarındaki gazın genişmesi gibi öteleyici kuvvetler sayesinde petrol üretimi gerçekleştirilir. Akifer suyu girişi ya da gaz rezervuarı bulunmayan petrol sahalarında petrol üretimi petrol içinde çözünmüş gazın basıncın düşmesiyle açığa çıkarak genişmesine bağlıdır. Ancak bu yöntem, hafif ve orta graviteli petrolerin üretimine uygun olup, düşük API graviteli yoğun ağır petrol üretimine olanak tanımaz. CO<sub>2</sub> enjeksiyonu, rezervuarda kalan ağır petrolün üretilmesine yardımcı olabilir. Karbondioksitin petrol rezervuarına enjekte edilmesi, ham petrolle karışarak petrolün viskozitesini azaltır ve petrolün hareket etmesini sağlar. Aynı zamanda gaz, rezervuar basınç seviyelerini sürekli olarak korur veya artırır. Artan basınç etkisiyle formasyonda bulunan petrol üretim kuyularına yönlendirilerek üretim yapılabilir. Bu yöntem, karbon dioksit emisyonlarını azaltmaya yardımcı olurken, petrol ve gaz üretiminde kullanılan suyu yeraltındaki kayaçlarda tutarak fosil yakıt üretiminin daha verimli olmasını sağlar. Çıkartılamayacak fosil yakıtların çıkartılmasını sağladığı ve fosil yakıt tüketimini arttırıcı etkisi olacağı için bu depolama yöntemi eleştirilmektedir (Şekil 13).

## Derin Tuzlu Su Formasyonları

Derin tuzlu su formasyonları, yüksek tuz içeriğine sahip suyla doygun derin sedimanter kayaçlardan meydana gelmektedir. Bu formasyonlar, yüksek CO<sub>2</sub> depolama kapasitesine sahiptir ancak enjekte edilen CO<sub>2</sub>'nin kritik seviyelerde kalabilmesi için yeterli bir derinlikte olmaları gerekmektedir (en az 800-1000 m). Bu nedenle, tuzlu su formasyonlarında CO<sub>2</sub> depolama işlemi sırasında sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Bu aşamadan sonra CO<sub>2</sub>, tuzlu su formasyonlarla bağlantılı kuyulara taşınır. Kuyu aracılığıyla enjekte edilen CO<sub>2</sub>, formasyon suyundan daha düşük yoğunluk ve viskoziteye sahip olduğundan, değişen basınç etkisiyle kuyudan uzaklaşarak formasyon içinde yayılır.

## Kömür Damarları

CO<sub>2</sub>'nin önemli özelliklerinden bir tanesi de azot ve metana göre daha yüksek olan kömüre olan ilgisidir. Bu sayede kömür gözeneklerinde CO<sub>2</sub> adsorplanmış bir şekilde depolanabilir.

Bazı durumlarda kömür damarları çok derinlerde ya da ince damarlar halinde olduklarından ötürü işletilememektedirler. Bu damarlar CO<sub>2</sub>'nin depolanması için bir seçenek olmaktadır. Bu damarlara enjekte edilen CO<sub>2</sub> kömür matrisinde

adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yer değiştirerek karbondioksitin depolanmasını ve metanın üretilmesini sağlar.

Kömür damarlarındaki karbondioksitin depolanma süreci, petrol ve gaz rezervuarları ile derin tuzlu formasyonlarda depolanma sürecinden oldukça farklıdır.  $\text{CO}_2$ , tercihen kömür damarlarında metanın mevcut olduğu durumlarda, metanla yer değiştirerek kömürün mikro gözeneklerinin yüzeylerine adsorplanır. Gözeneklerin hacmi ve kömür içindeki dağılımı, kömür damarlarında  $\text{CH}_4$  ve  $\text{CO}_2$  gibi gazların nasıl depolandığını anlamak için önemlidir. Kömürün kolloidal yapısı, kömürün hacminin 1-40 katı kadar metan gazını içinde tutabilmesine olanak tanır. Yeraltında, kömürle birlikte bulunan metan gazı bir basınç altında denge halindedir. Bu basınç seviyesi, kömürün cinsi, damarın derinliği ve kömürün gözenekliliği ile ilişkilidir. Kömür damarlarında depolanan metan, aşağıdaki şekillerde bulunur:

- Çatlaklar, kırıklar ve gözenekler içinde serbest gaz olarak,
- Çatlaklar ve gözeneklerde kömür yüzeyine bağlı olarak ve
- Suda çözünmüş olarak.

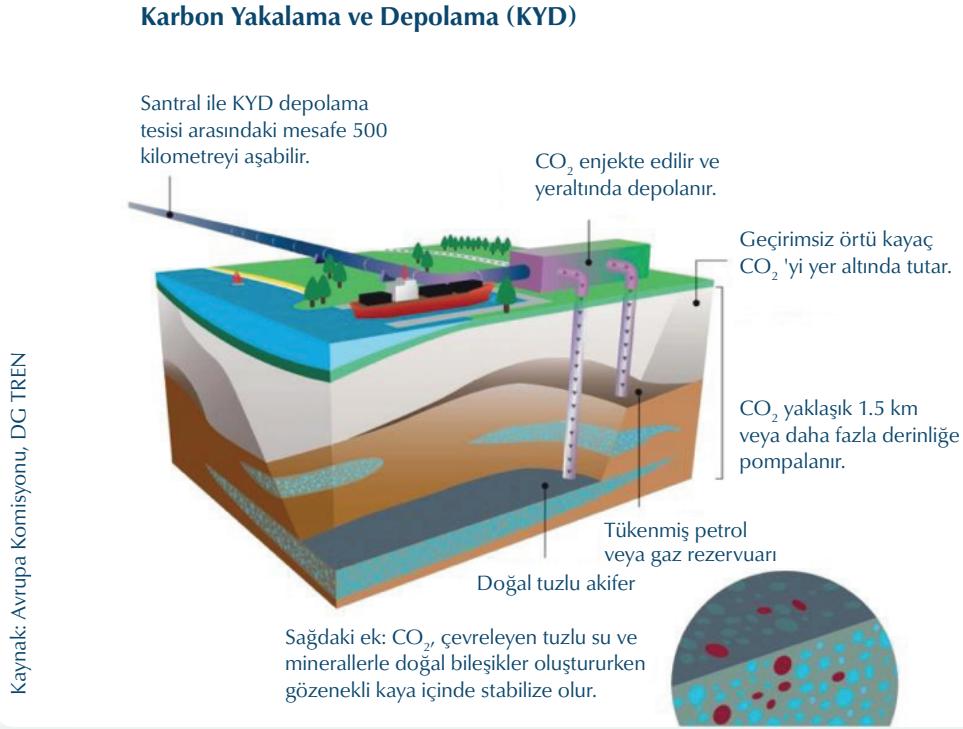
Bu durumlar arasında sadece ilk ikisi metan emisyonu açısından önemlidir. Gaz önce adsorpsiyon yoluyla kömür tarafından tutulur. Adsorpsiyon kapasitesi aşıldığında gaz, formasyon suyu içinde çözünür ve/veya gözeneklerde ve çatlaklarda serbest gaz olarak birikebilir. Kömürler iki ayrı porozite sistemiyle tanımlanır: ilk olarak, sürekli olan yüzey çatlakları ve ikinci olarak, heterojen gözenekli yapı içeren matriks blokları arasında yer alan çatlaklar. Doğal çatlaklar, sürekli yüzey çatlakları ve kesintili "butt" çatlaklarından oluşur ve oldukça düzenli bir şekilde yerleşmiştir, boyutları milimetreden santimetreye kadar değişir. Karbondioksit enjekte edilmesi durumunda, kömür içinde depolanan metan, karbondioksit ile yer değiştirerek karbondioksitin depolanmasına olanak sağlar.

### 1.3.1. İZLEME FAALİYETLERİ

KYKD'nın önemli unsurlarından biri, kalıcı olarak depolanan  $\text{CO}_2$ 'nin izlenmesidir. Enjeksiyon sonrası aşamada basılan  $\text{CO}_2$ 'nin kaçak olup olmadığını anlamak için izlenmesi kritiktir. Uygun izleme yapıldığında  $\text{CO}_2$ 'nin sızıntıları erken tespit edilebilir ve çevre ve yeraltı suyu üzerindeki risk azaltılır. İzleme, formasyondaki basınç artışı izleyerek simülasyon tahminlerinin doğrulanmasında da kullanılabilir. Kütle denge doğrulamaları, izleme çalışmalarının gerçekleştirilmesinin önemli bir nedenidir. Enjekte edilen  $\text{CO}_2$  miktarları, belirlenen bölgelerde depolandığından ve projelerin başlamadan önce belirtilen emisyon kotalarıyla uyumlu olduğundan emin olmak için izlenmelidir. İzleme yoluyla simülasyonların başarılı bir şekilde doğrulanması, araştırmacılara simülasyon araçlarının kullanımına daha fazla güven sağlar. Bu nedenle, doğru izleme araçları geliştirmek için sürekli olarak büyük çaba harcanmaktadır. Modelleme yaklaşımı gibi,  $\text{CO}_2$  izleme ya mekânsal ya da zamansal temelde sınıflandırılabilir. Mekânsal temelde,  $\text{CO}_2$ 'nin etkilediği alanlara göre izlenir. Bu temelde, atmosfer izleme, yakın yüzey izleme ve yeraltı izleme (kırıklar, kuyular, rezervuar ve sızdırmazlık gibi) olarak sınıflandırılabilir. Zamansal temelde ise izleme, enjeksiyon aşaması ve enjeksiyon sonrası aşama olarak gruplandırılabilir (Ajayi vd., 2019).

### Atmosferik İzleme Araçları

Bu araçlar, yeraltı formasyonlarına enjekte edilen  $\text{CO}_2$ 'nin atmosfere sızmasını önlemek için tasarlanmıştır.  $\text{CO}_2$  sızıntılarını hızla algılayabilen optik sensörler, atmosferik izler ve türbülans kovaryans yöntemleri kullanılır. Atmosferik izleyiciler, sızıntıların erken tespiti ve  $\text{CO}_2$  akış yönünün izlenmesi için formasyona beraber enjekte edilen yapay maddelerdir. Perflorokarbonlar ve kükürt hekzaflorür gibi izleyiciler yaygın olarak kullanılır. Lazer sistemleri ve LIDAR gibi uzaktan algılama teknolojileri de gaz sızıntılarını izlemek için kullanılır.

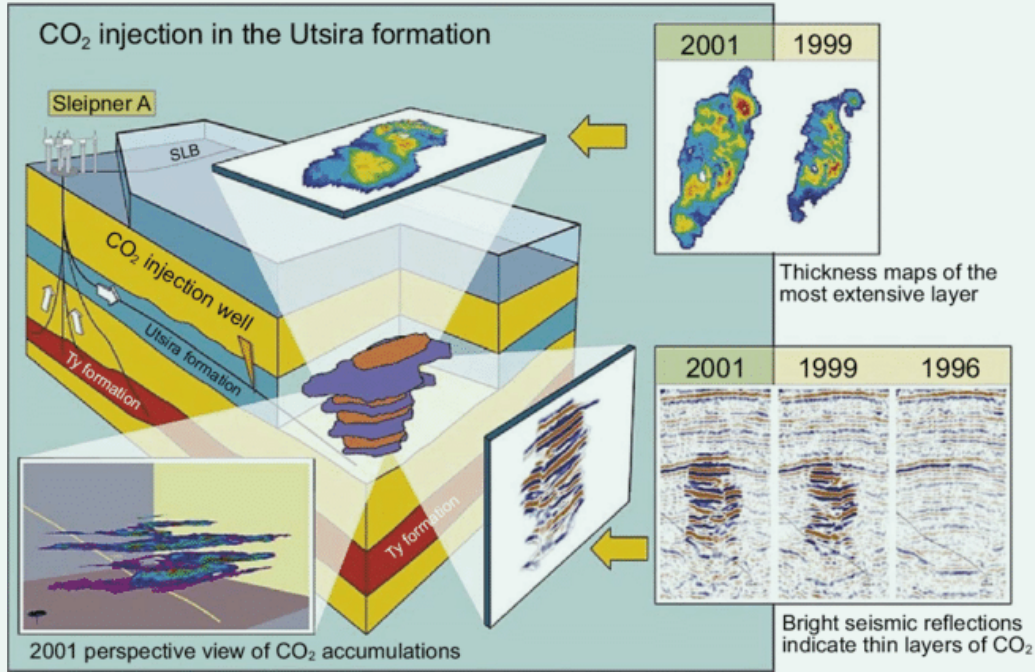
**Şekil 13 | Karbon Depolama (Avrupa Komisyonu, DG TREN)****Yüzeye Yakın İzleme Araçları**

Yüzeye yakın CO<sub>2</sub> akışı, genellikle çatlaklar veya terkedilmiş kuyu boşluklarından çıkan baloncuklar şeklinde olur. Bu izleme, yeraltı ve atmosfer arasındaki bağlantıyı sağlar ve zamanında tespit edilirse yeraltı sızıntılarını önleyebilir. Bu alandaki izleme, atmosferik ve yeraltı izlemelerine göre daha az maliyetlidir. Yüzeye yakın izleme için kullanılacak teknikler arasında interferometrik sentetik açıklıklı radar (InSAR), eğimölçerler ve zaman aralıklı sismik yöntemler bulunur.

**Yeraltı İzleme Araçları**

Yeraltı izlemesinin amacı, derin jeolojik formasyonlara enjekte edilen CO<sub>2</sub> kütlelerinin hareketini izlemek ve uzun vadeli kararlılığını göstermektir. Seçilen izleme teknikleri, gerekli bilgilere, maliyetlere ve bilgi elde etme süresine bağlıdır. Sismik yöntemler, yeraltı yapılarının dağılımını değerlendirmek ve enjekte edilen kütle ve gaz sızıntılarını izlemek için kullanılır. Bu konuda önemli bir örnek Utsira formasyonuna basılan CO<sub>2</sub>'nin sismik yöntemler ile izlenmesidir. Sismik yansımaların CO<sub>2</sub> kütlelerinin yerini gösterebildiği kanıtlanmıştır (Şekil 14). Elektromanyetik ve elektriksel yöntemler, yeraltındaki doyumluk değişikliklerini belirlemek için kullanılır. Jeofiziksel günlükler, kuyu özellikleri ve rezervuar sıvıları hakkında faydalı bilgiler sağlar. InSAR, yüzey deformasyonlarını izlemek için kullanılır değişiklikleri ölçebilir.

Şekil 14 | Sleipner projesi sismik ölçüm sonuçları (Torp and Gale, 2004)



### 1.3.2. KALICI JEOLÖJİK CO<sub>2</sub> DEPOLAMAYA İLİŞKİN RİSKLER

KYKD teknolojisinin kendine özgü riskleri ve zorlukları da bulunmaktadır. Riskin en yüksek olduğu aşama, enjeksiyon aşamasıdır. Enjeksiyon aşaması sırasında, yeraltına sıvı enjekte edilmesi, jeomekanik ve hidrodinamik etkilere neden olur. Enjeksiyon rezervuarında, akiferde veya kömür yatağında basınç artışı yaşanır ve enjeksiyon sonrası yavaşça azalır. Enjeksiyon basıncına bağlı olarak, jeomekanik etkiler, mevcut çatlakların açılması, kaya kırılması, fay aktivasyonu, indüklenmiş mikro sismik aktivite ve hatta orta şiddette yerel depremler olabilir. Ancak, bu jeomekanik etkileri değerlendirmek ve kontrol etmek konusunda önemli bir deneyime sahiptir. Düzenleyici kurumlar, güvenli üst limitler belirleyerek, enjeksiyon sırasında aşırı basınca izin vermezler. CO<sub>2</sub> depolamasının güvenliği, enjeksiyon aşamasından sonra artar, çünkü basınç azalması ve zamanla CO<sub>2</sub>'yi yeraltında immobilize eden ikincil mekanizmaların artması sayesinde sızıntı riski azalır.

KYKD'da en önemli risk faktörü, karbondioksitin sızıntısıdır. CO<sub>2</sub>'nin sızıntısı, sürekli yukarıya doğru hareket eden itme kuvveti nedeniyle hem enjeksiyon sırasında hem de sonrasında mümkündür. CO<sub>2</sub>'nin sızıntısı, atmosfer, yüzeyel yeraltı suyu, boşluklu toprak zonlarına veya atmosfere geçişi içerebilir. Sızıntı sonucu oluşabilecek riskler hem anlık yüksek oranlı sızıntılar hem de yavaş, düşük oranlı ve uzun süreli sızıntıları kapsar. Sızıntının küresel ve yerel sonuçları vardır; küresel sonuç, atmosfere sızıntı yaparak depolamanın etkinliğini azaltır ve atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu artırır. CO<sub>2</sub>'nin atmosfere, yeraltı suyu akiferlerine, yüzey altı toprak katmanlarına veya üzerindeki kaynak taşıyan katmanlara sızmasını önlemek için yapılan modelleme ve izleme çalışmaları, KYKD'nın temel bileşenleridir. Sızıntı riskleri şunlardır:

- **Akifer Aşırı Basıncı:** Akiferin aşırı basınç altında kalması, kapak kaya tabakasında çatlaklar oluşturabilir ve fayları yeniden aktifleştirebilir. Tuzlu su akiferleri, başlangıç basıncından dolayı, enjeksiyon başladığında hızlı bir basınç artışına neden olabilir. Bu tür riskler, özellikle akiferin basınç kapasitesi ve çevresel etkiler dikkate alınarak değerlendirilmelidir.
- **Terk Edilmiş Kuyular:** Tüketilmiş petrol ve gaz sahalarındaki terk edilmiş kuyular, yapısal bütünlüklerinin zamanla bozulması nedeniyle önemli bir sızıntı yoludur. Bu kuyular, gaz sızıntılarına yol açabilecek tasarım hataları veya malzeme reaksiyonları nedeniyle risk oluşturur.
- **Faylar ve Çatlaklar:** Aktif olmayan fayların aktifleşmemesi ve geçirgen fayların ve çatlakların olmamasına dikkat edilmesi, yer seçimi ve karakterizasyon aşamasında önemlidir.

Yeraltında sıvı enjekte etmek, yerel sıvıların (su, petrol veya gaz) yer değiştirmesi, enjekte edilen ve yerel sıvıların sıkıştırılması ve bazen de hafif yer yükselmelerine yol açabilecek gözenek alanının genişlemesi gibi hidrodinamik etkilere neden olur. CO<sub>2</sub>'nin yeraltında depolanması için gereken ölçekte sıvı enjeksiyonu konusunda deneyim yoktur ve bu hacimlerin yeraltı suyuna etkisi daha fazla değerlendirilmelidir.

CO<sub>2</sub> depolanmasıyla ilişkilendirilen bir diğer risk, indüklenmiş sismisitedir. Bu risk, özellikle fay hatlarının varlığı durumunda, depolama sitelerinin güvenliği ve kamu algısı üzerinde etkili olabilecek sismik olaylara yol açabilir. Bu nedenle, uygun yer karakterizasyonu ve fay hatlarının dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

#### 1.4. KYKD MALİYETLERİ

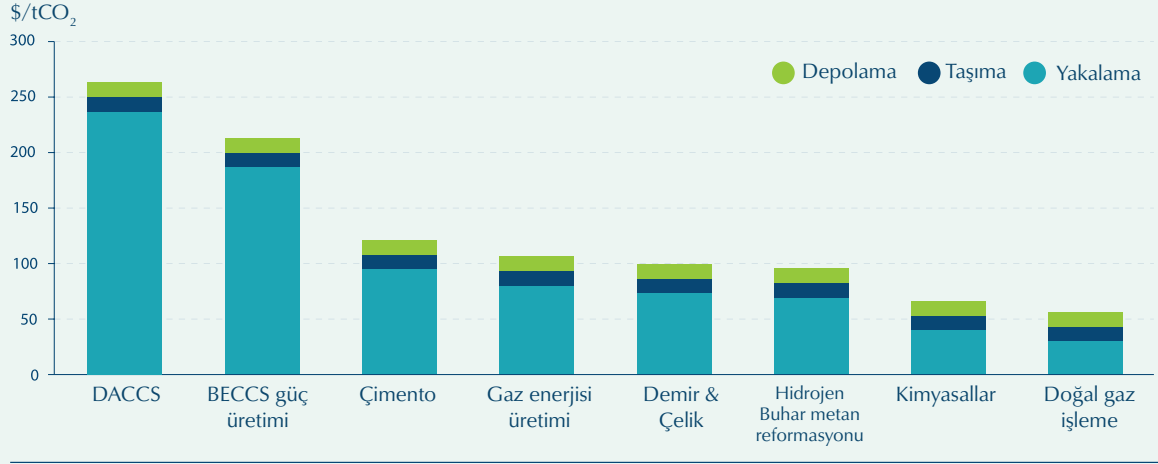
Dünya'da Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama (KYKD) maliyetleri bir düşüş eğiliminde olmakla birlikte hala ton başına CO<sub>2</sub>'nin KYKD maliyeti oldukça yüksektir. KYKD maliyetleri üç aşamalı bir sürecin tamamını kapsayan maliyetleri içermektedir:

- Yakalama
- Taşıma
- Kullanma veya Depolama

Mevcut elektrik üretimi ve imalat sanayi tesislerinde karbonun yakalanması, taşınması ve depolanmasının maliyeti 100 dolar seviyesine inmiş bulunmaktadır. Ancak karbonun doğrudan havadan yakalanmasının maliyeti halen çok yüksektir. (Bk. Şekil 15).

**Şekil 15 | KYKD Maliyetleri (IEA (2019)- Enerji Teknolojisi Perspektifleri)****Yakalama maliyeti genellikle CCS'nin toplam maliyetini artırır**

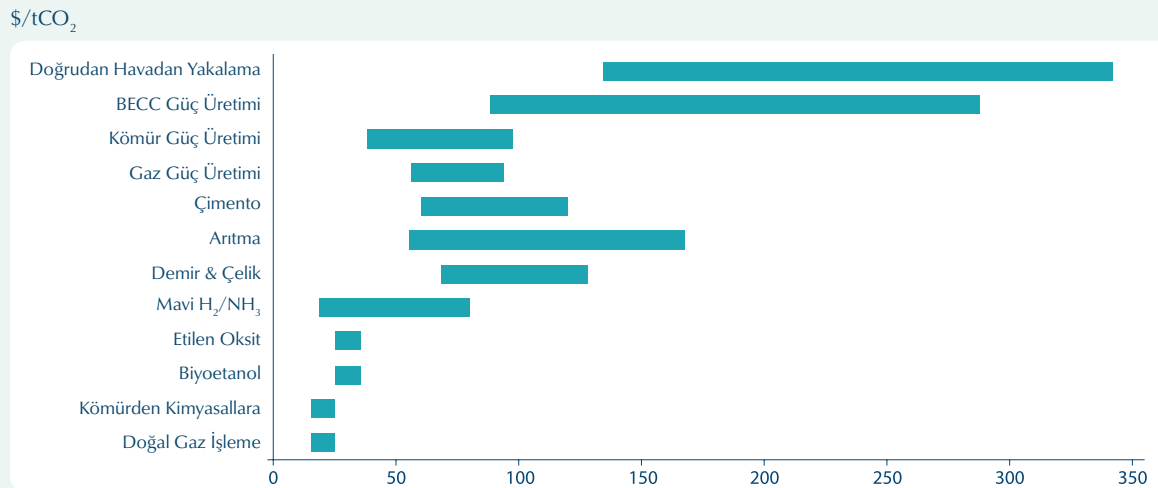
Uygulamaya göre seviyelendirilmiş yakalama, taşıma ve depolama maliyeti



Günümüz teknolojileri ile CO<sub>2</sub> farklı kaynaklarda yakalanabilmektedir. Bunların başında termik santrallerde, çimento ve demir çelik tesislerinde gerçekleştirilecek faaliyetler gelmektedir. Bunların dışında Doğrudan Havadan CO<sub>2</sub> yakalama (DKYKD) ve KYKD'lı Biyoenerji (BKYKD) gelişim gösteren teknolojilerdir. Günümüzde DKYKD ile bir ton CO<sub>2</sub> yakalamanın maliyeti 350 \$'a kadar çıkabilmektedir. (Bk. Şekil 16).

**Şekil 16 | KYKD Maliyetleri (IEA (2017))****Bugün sektörel olarak seviyelendirilmiş yakalama maliyeti tahminleri büyük ölçüde değişmektedir**

Bugün sektöre göre seviyelendirilmiş yakalama maliyeti tahminleri aralığı



CO<sub>2</sub> taşıma ve depolama maliyeti, yakalamaya göre daha düşük seviyelerdedir. Bir CO<sub>2</sub> depolama projesi için kapsamlı bir uygulanabilirlik çalışması, teknik, ekonomik ve çevresel etkilerin multidisipliner değerlendirmelerini gerektirir. Özellikle projenin ekonomik uygulanabilirliği üç belirsiz faktörden etkilenmektedir (Zhang vd., 2007):

1. Ekonomik parametreler, altyapının sermaye maliyetleri ve bakım maliyetleri, doğal gaz ve elektrik için mevcut ve gelecekteki fiyatlar, faiz oranları, enflasyon oranları ve CO<sub>2</sub> kredilerini içerir,
2. Belirsiz karar faktörleri, enjeksiyon kuyularının, izleme kuyularının, enjeksiyon hızlarının sayısı gibi, ve
3. Söz konusu olan FEP'ler (Özellikler, Olaylar ve Süreçler). FEP örnekleri, jeolojik özellikler (su taşıyıcı kayaç, mevcut sızıntı yolları, vb.), korozyon nedeniyle terk edilen kuyuların açılması, yüksek enjeksiyon basıncı nedeniyle çatlakların veya kırıkların oluşması sonucu CO<sub>2</sub> kaçağı ve beklenmeyen altyapı arızaları (örneğin, boru hattı patlaması) gibi faktörleri içerir.

Maliyetler açısından bir değerlendirme yapılırsa aktif petrol kuyularında CO<sub>2</sub>'nin depolama maliyeti en az olmaktadır. Kömür yatakları, tüketilmiş petrol ve gaz rezervlerinde depolama maliyetleri aktif petrol kuyularına oranla daha fazladır.

Depolanacak CO<sub>2</sub> içerisinde safsızlıkların (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S vs) varlığı CO<sub>2</sub>'nin tutulmasını, taşınmasını, rezervuara enjekte edilmesini, rezervuarda tutunma mekanizmasını ve depolama kapasitesini etkiler. CO<sub>2</sub> içerisindeki bu safsızlıklar, gazın sıkıştırılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle karbondioksit yeralıtında depolanmadan önce diğer gazlardan arındırılması gerekmektedir. Gazların içerisindeki karbondioksitin oranının düşük olmasından dolayı ayrıştırma işlemi oldukça pahalı olup, büyük çaplı yüzey tesislerine ve fazla miktarlarda enerjiye ihtiyaç vardır.

CO<sub>2</sub> sıkıştırılmış gaz olarak boru hatlarıyla taşındığı gibi sıvılaştırılmış olarak izole tanklarla gemilerle, karayolu tankerleriyle veya demiryoluyla da taşınabilir. Yoğun akışkan formuna basınçlandırılan CO<sub>2</sub>, gaz fazından oldukça düşük bir hacim kaplamaktadır. Kompresör istasyonunun tasarımındaki önemli faktörler gazın debisi, giriş ve çıkış basınçları, gaz ısı kapasitesi ve kompresör verimliliğidir.

CO<sub>2</sub> daha çok gemilerle veya boru hatları ile taşınabilir. Kamyonlarla gaz taşıma işlemi daha çok küçük miktarlardaki CO<sub>2</sub>'nin taşınması için yaygındır. Gemi ile taşıma işlemi, özellikle CO<sub>2</sub>'nin uzun mesafelere taşınması gerektiği durumlarda boru hattı ile taşıma yerine alternatif bir yoldur. Bunun için özel gemiler geliştirilmekte ve gemilerin taşıma kapasiteleri artırılmaya çalışılmaktadır. Basınçlandırılan ve soğutulan 230.000 ton CO<sub>2</sub>'yi taşıma kapasitesine sahip gemiler bulunmaktadır. Gemi taşımacılığındaki en önemli ihtiyaç ara depolama tesisleridir. Bu sayede gemiler seyahat halindeyken yakalanan CO<sub>2</sub> kısa süreli olarak depolanabilir. Boru hattı taşımacılığı gemi ile taşımacılığa göre daha ekonomik olmakta, ayrıca gazın yakalama noktasından depolama alanına kadar kesintisiz akış avantajını sunmaktadır. Bir boru hattının taşıyabileceği miktar, boru hattının çapı, giriş ve çıkış basınçları ve borunun et kalınlığına bağlıdır.

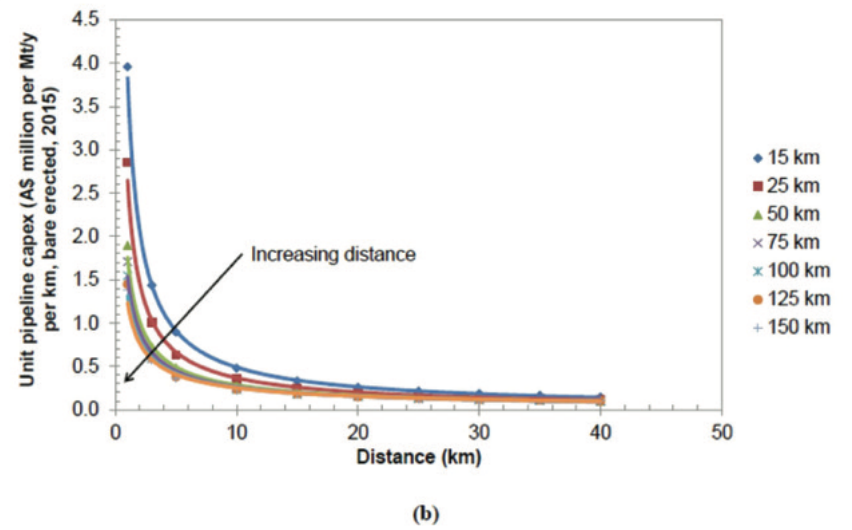
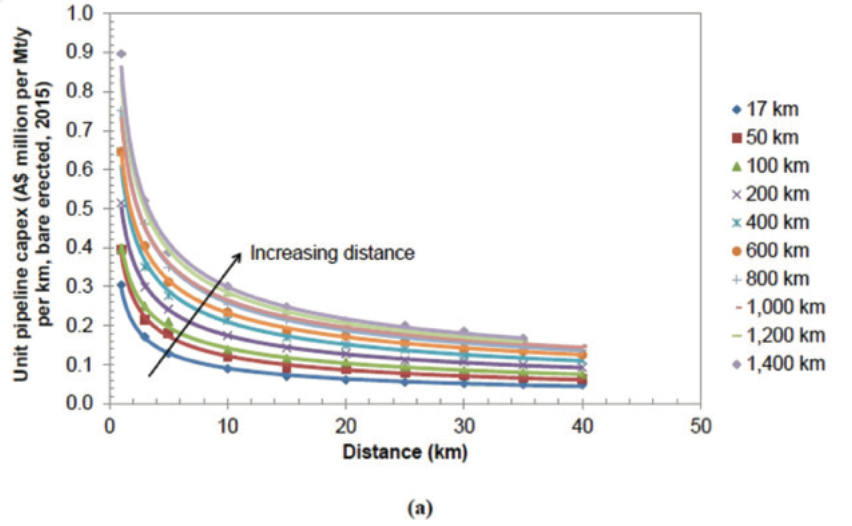
Chrysostomidis (2009) tarafından yapılan varsayımsal bir durum çalışmasında, emisyon noktaları ile depolama sahalarının ayrı ayrı noktadan noktaya bağlanması ile bir bütünleşmiş hat ile toplanarak taşınması arasındaki maliyet analizi karşılaştırılmıştır. Çıkan önemli sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Noktadan-noktaya boru hatları, kapasite kullanımı konusundaki kesinlik nedeniyle bireysel geliştiriciler tarafından proje bazında finanse edilecektir.
- Bütünleşmiş ana hat boru şebekeleri, uzun vadeli en verimli seçenek olabilir.
- Aynı zamanda, bu tür bütünleşmiş ana hat boru şebekelerinin ekonomik olarak sürdürülebilir olabilmesi için "garantili" kapasite kullanımına ihtiyaç duyacaktır. Bu nedenle, kapasite kullanımını desteklemek amacıyla optimize edilmiş ağların gelişimini teşvik eden kamu politikalarına ihtiyaç duyulacaktır.

- Kapasitenin arttığı ilk yıllarda hükümet desteği ticari sürdürülebilirlik için önemli olacaktır. Hükümet teşvikleri veya kredi garantileri, bir ana hat altyapısını desteklemek için de gereklidir.
- Bankalar ve finansal kuruluşlar, CO<sub>2</sub> taşıma projelerini karbon fiyatıyla ilişkilendirilen önemli düzenleyici ve pazar riskleri taşıyan projeler olarak görmektedir.

Her ne kadar boru hatları ile taşıma sermaye maliyeti akış debisi ve mesafe ile artsa da birim akış debisi başına boru hattı sermaye maliyeti yüksek debiler için azalarak neredeyse sabit bir görünüm almaktadır (Bk. Şekil 17).

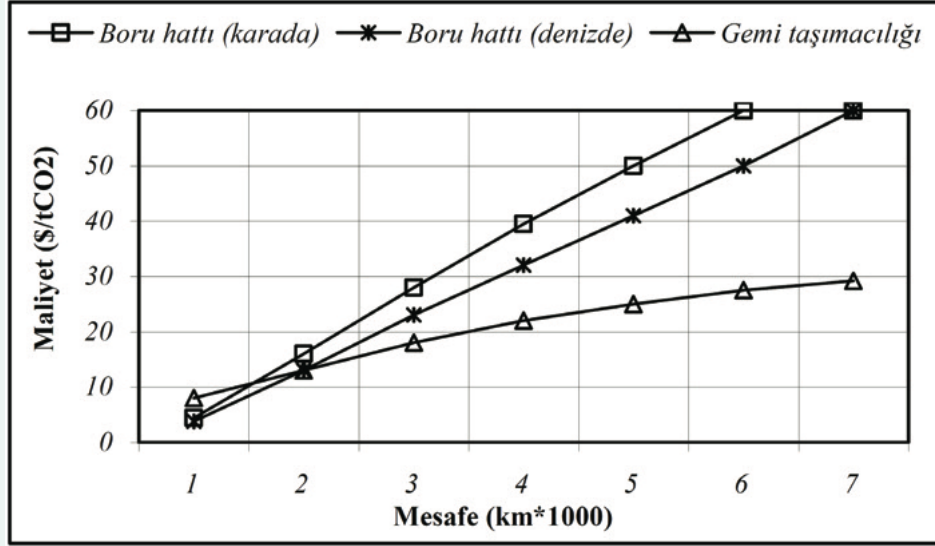
**Şekil 17 | Boru hattı birim debi için sermaye maliyetleri (a) karada (b) denizde (Bongers, 2015).**



Kompresör ve yeniden sıkıştırma maliyetleri dışında boru hatlarının operasyonel maliyetleri de bulunmaktadır, ancak, operasyonel maliyeti için sermaye maliyetinin %1'i kadar bir değer alınabilir.

Taşıma maliyeti farklı alternatifler için taşıma uzaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Kısa mesafelerde borularla nakliye ekonomikken, uzak mesafelerde gemi taşımacılığı en ekonomik seçenek olmaktadır (Şekil 18).

**Şekil 18 | Farklı taşıma seçeneklerinin maliyetlerinin mesafeye bağlı olarak değişimi (IPCC, 2005)**



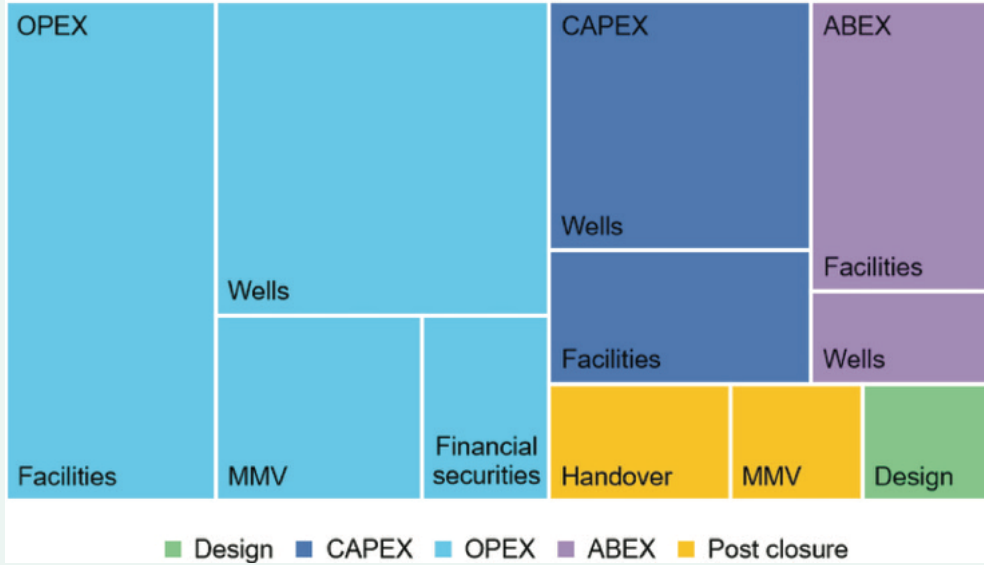
Depolama sahasına taşınan CO<sub>2</sub>'nin yeraltına basılması için enjeksiyon basıncının doğru olarak seçilmesi gerekir. Enjeksiyon basıncının, rezervuar akışkanını enjeksiyon noktasından uzaklaştırmaya yetecek kadar yüksek ancak rezervuar kayaçlarını ya da üstündeki örtü kayacı tahrip etmeyecek kadar düşük olmasına dikkat edilmelidir. Özellikle düşük geçirgenliğe sahip rezervuarlarda kuyu dibi basıncı yüksek enjeksiyon debisi olduğunda hızlıca artış yapacaktır. Depolanacak CO<sub>2</sub> miktarına, enjeksiyon debisine, rezervuarın geçirgenlik ve kalınlığına, mümkün olan en yüksek enjeksiyon basıncına ve kuyu tipine göre enjeksiyon kuyularının sayısı belirlenir.

CO<sub>2</sub> yakalanmasına kıyasla, CO<sub>2</sub> depolama için çok az maliyet hesaplama çalışmaları bulunmaktadır. Bunun nedeni aktif CO<sub>2</sub> depolama projelerinin sayısının azlığıdır. Proje ölçeğinde teknik, yasal, düzenleyici ve yerel market gereksinimlerini hesaba katan çalışmaların yapılması daha doğru maliyet hesabı yapılmasını sağlayacaktır. Aksi taktirde genellikle bir aralık olarak maliyet hesapları verilebilmektedir. Yine de sınırlı sayıda çalışma ve işletme sitelerinden maliyetle ilgili bazı sonuçlar çıkarılabilir (IEA, 2022):

- Karar Öncesi Yatırım (FID) maliyetleri, kaynak değerlendirmesi ve site tasarımı ile ilişkilidir ve risk taşır.
- Karada depolama (değerlendirme, geliştirme ve işletme) genellikle denizde depolamadan daha ucuzdur.
- Depolama sahasının kapasitesi ve enjeksiyon yeteneği, depolama birim maliyetlerini güçlü bir şekilde etkiler.
- Aktif basınç yönetimi maliyetleri artırabilir.
- Tuzlu kaynaklar genellikle tükenmiş petrol ve gaz alanlarındaki kaynaklardan daha geniş ve maliyetli veri toplama gerektirecektir.

Birleşik Krallık KYD Değer Bıçme projesi, Birleşik Krallık'ta bulunan 5 depolama sahasını detaylı olarak inceleyerek CO<sub>2</sub> taşıma ve depolama için saha bazlı geliştirme planları oluşturmuştur. Bu çalışmanın bir ürünü de depolama kaynaklı maliyetlerin göreceli olarak dağılımını belirlemek olmuştur (Şekil 19).

**Şekil 19 | Depolama kaynaklı maliyet bileşenlerinin göreceli ağırlıkları. CAPEX: sermaye maliyeti, ABEX: terk maliyeti, OPEX: operasyonel maliyet, Post Closure: Enjeksiyon sonrası (IEA, 2022)**



CO<sub>2</sub> enjeksiyonu operasyonlarının ekonomisinin doğru olmadığı ve bu durumun büyük ölçekli uygulamanın başlıca engeli olduğunu savunulmaktadır. Gerçekten de depolanan CO<sub>2</sub> için bir değer olmadığı sürece ekonomi uygulamayı etkileyecektir, ancak bir vergi sistemi veya karbon piyasası aracılığıyla depolanan CO<sub>2</sub> için bir değer oluşturulsa bile, şirketler eğer önceki seçenek daha ucuzsa CO<sub>2</sub>'yi depolamak yerine atmosfere salma ve vergiyi ödeme kararı alabilirler. Geliştirilmiş hidrokarbon geri kazanma operasyonlarında, CO<sub>2</sub> piyasadan satın alınan bir malzemedir ve bu nedenle yer altında değil yer üstünde bir değere sahiptir ve bu operasyonlar hidrokarbon geri kazanımını maksimize etmek ve CO<sub>2</sub> kaybını minimize etmek üzere optimize edilir. Sonuç olarak, geri kazanılan petrol ile birlikte pompada üretilen CO<sub>2</sub> ayrılır ve yeniden enjekte edilir ve operasyonların sonunda rezervuar boşaltılır ve geri kazanılan CO<sub>2</sub> satılır. Eğer depolanan CO<sub>2</sub> bir piyasa değerine sahipse, o zaman geliştirilmiş hidrokarbon operasyonları üretilen hidrokarbonların ve depolanan CO<sub>2</sub>'nin birleşik değerini maksimize etmek üzere optimize edilecektir. Diğer operasyonlarda, örneğin Sleipner'dekine benzeyen bir asit gaz bertarafı operasyonu veya CO<sub>2</sub> depolama operasyonları doğrudan bir iş maliyetini temsil eder, ancak muhtemelen çeşitli nedenlerle maliyet-etkin bir işlem olacaktır. Karbondioksit depolama maliyetleri, karada yapılan operasyonlar için 0,5-5,0 USD/t CO<sub>2</sub> net enjekte edilen miktara karşılık gelirken, denizde yapılan operasyonlar için 6-12 USD/t CO<sub>2</sub> (IPCC, 2005) civarında olup yakalama ve depolama zinciri içinde en düşük maliyetli olanlardır, taşıma maliyetleri ile kıyaslanabilir ve CO<sub>2</sub> yakalama maliyetinin önemli ölçüde altındadır. Avustralya'daki enerji santrallerinden taşıma ve depolama için öngörülen en düşük maliyet (5-14 USD/t CO<sub>2</sub>), iyi depolama özelliklerine sahip bölgelere kısa mesafe taşıma içeren durumlar için geçerlidir. En yüksek öngörülen maliyet (70 USD/t CO<sub>2</sub>'ye kadar), daha kötü özelliklere sahip depolama oluşumlarına uzun mesafe taşıma içeren durumlar için geçerlidir (Bongers, 2015).



## 2. DÜNYADA KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA

- 2.1. KYKD TEKNOLOJİLERİNE BİÇİLEN AZALTIM KATKISI
- 2.2. KURULU TESİSLER VE HAZIRLIK DURUMU
- 2.3. ÜLKE ÖRNEKLERİ



## 2. DÜNYADA KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA

Dünya'da hali hazırda farklı KYKD Teknolojileri kullanarak uygulamada olan KYKD tesisleri bulunmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde mevcut haliyle uygulamada bulunan tesisler ve planlama aşamasında bulunan tesisler yer almakta Dünya'da jeolojik potansiyel gösterilmektedir. KYKD teknolojilerinin küresel salımların azaltılmasındaki rolü ortaya konulmaktadır.

### 2.1. KYKD TEKNOLOJİLERİNE BİÇİLEN AZALTIM KATKISI

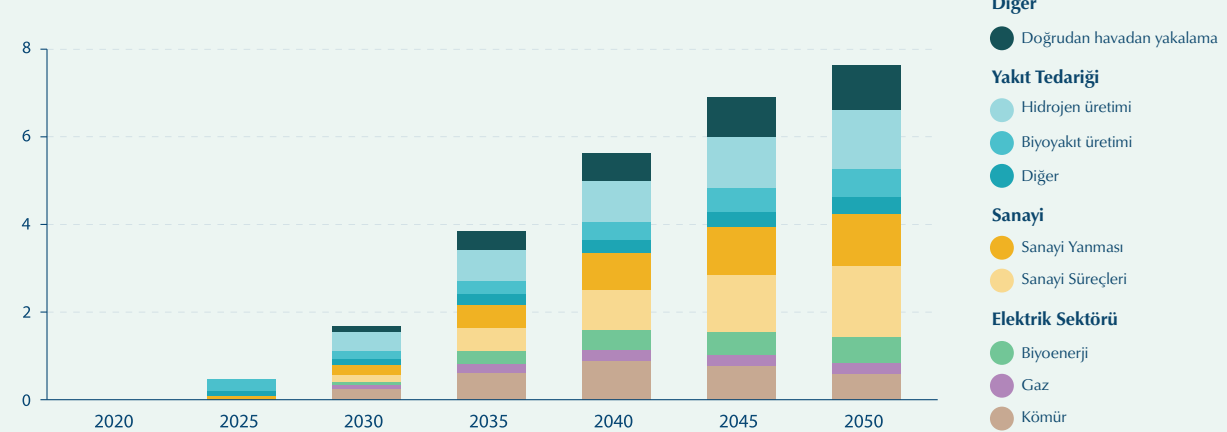
Dünyanın 2050 yılında net sıfır salım hedefine ulaşması için farklı kurumlar 2050 yılına gelindiğinde yıllık 6 ila 10 milyar ton CO<sub>2</sub> yakalanması gerektiğini öngörmektedirler. IEA, 2025 yılından itibaren KYKD teknolojilerinin önemli pay almasını öngörmektedir. (Bk. Şekil 20). Bu, enerji sektöründe ve endüstride karbondioksit emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir bir enerji geleceği oluşturmak için KYKD teknolojilerine daha fazla yatırım yapılmasının gerektiğini vurgulamaktadır. KYKD teknolojileri, enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımına devam edilirken, salınan karbondioksiti yakalayarak atmosfere uzaklaştırmayı ve çevreye zarar vermeden üretimi sürdürmeyi hedeflemektedir. Beklenen bu azaltım katkısının maliyetsiz bir çözüm olduğu düşünülmemektedir. KYKD mevcut teknolojilerle oldukça pahalı bir çözüm sunmaktadır. (Bk. Bölüm 1.4)

**Şekil 21 | IEA'nın 2020-2050 Yılları Arasında KYKD'ya İlişkin Öngörüsü (IEA (2021) 2050 yılına kadar Net Sıfır, Küresel Enerji Sektörü için Bir Yol Haritası)**

**IEA'nın net sıfır senaryosundaki küresel CO<sub>2</sub> yakalama, ETC'nin temel senaryosuna büyük ölçüde benzer, ancak DACC için daha küçük bir role sahiptir.**

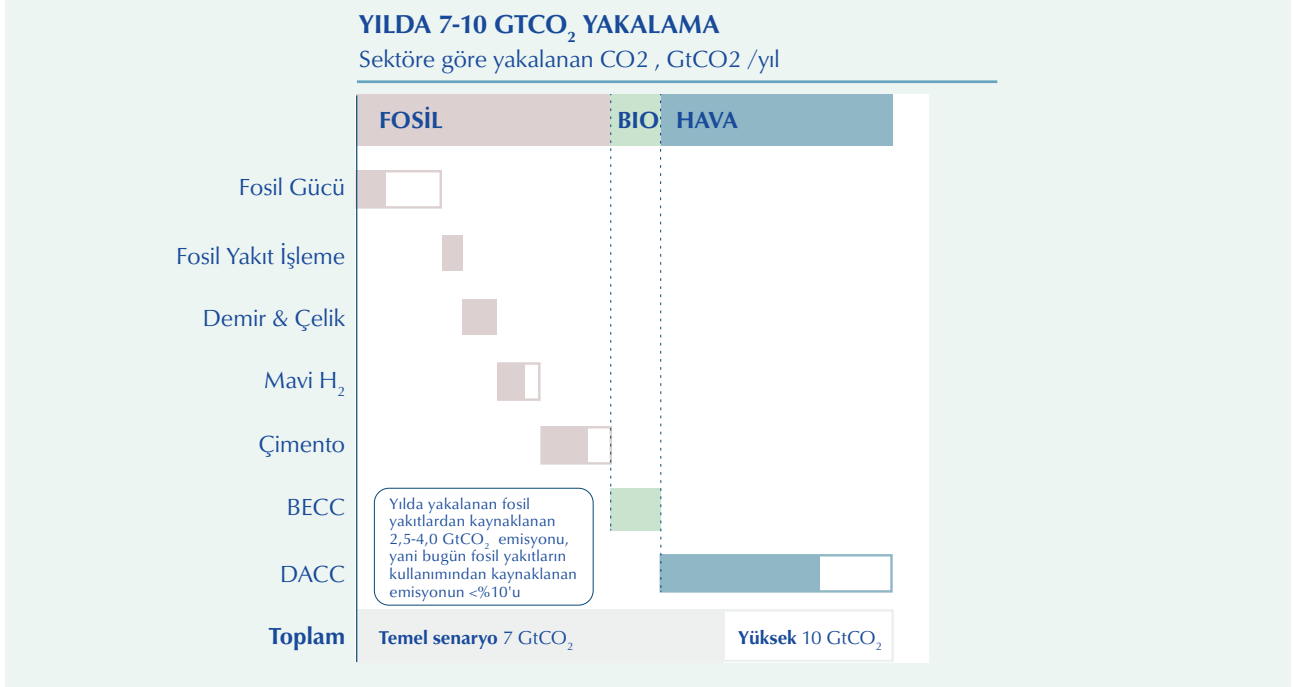
IEA'nın net sıfır senaryosunda kaynağa göre küresel CO<sub>2</sub> yakalama

GtCO<sub>2</sub> /yıl



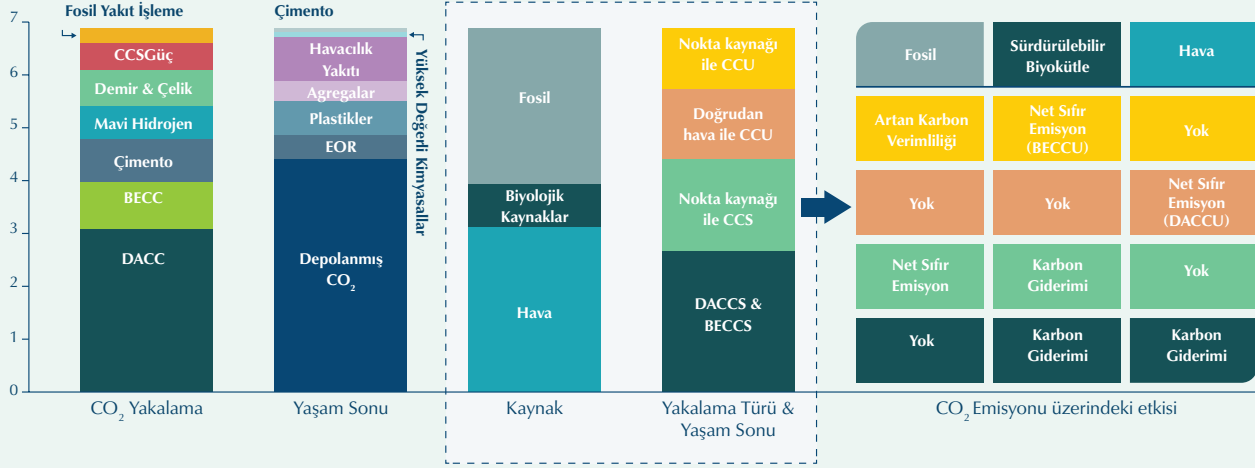
IEA'nın öngörülleri, KYKD teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda enerji sektöründe ve endüstride daha fazla benimsenmesinin beklendiğini gösteriyor. Bu teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanımının artırılmasıyla, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğiyle mücadele edilmesi konusunda önemli adımlar atılması hedeflenmektedir.

**Şekil 21 | 2050 Yılı KYKD Öngörülleri (Enerji Dönüşümü Komisyonu – Temmuz 2022)**



2050 yılına ilişkin öngörülerde Doğrudan Havadan Karbon Yakalamaya (DHKY) önemli bir pay biçilmektedir. (Bk. Şekil 21). Bu teknolojiler, küresel olarak sürdürülebilir bir enerji geleceği oluşturmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için önemli bir araç olarak görülüyor. DHKY, sera gazı emisyonlarını azaltmak için mevcut enerji altyapısı ve endüstriyel süreçlerle birlikte çalışabilir ve daha fazla karbondioksit yakalamayı sağlayarak net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir. DHKY teknolojilerinin önemi, iklim değişikliğiyle mücadele çabalarını desteklemek ve karbondioksit salımını azaltmak için gelecekte daha fazla yatırım ve geliştirme gerektirecektir.

## Şekil 22 | 2050 yılında KYKD Sistemlerinin Görünüşü (ETC için SYSTEMIQ – 2022)

CO<sub>2</sub> yakalama ve kullanım ömrünün sona ermesinin değişen kombinasyonları, CO<sub>2</sub> emisyonları üzerinde farklı etkiler anlamına gelirCO<sub>2</sub> yakalama ve kullanım ömrünün sona ermesinin değişen kombinasyonları, CO<sub>2</sub> emisyonları üzerinde farklı etkiler anlamına gelirGtCO<sub>2</sub> /yıl

Öngörülerde yakalanan yıllık yaklaşık 7 milyar ton CO<sub>2</sub>'nin 4,4 milyar tonun depolanması ve 2,5 milyar tonunun ise kullanılması beklenmektedir. Kullanılacak CO<sub>2</sub>'nin sektörel dağılımının aşağıdaki gibi olması öngörülmektedir: (Bk. Şekil 22).

- %35 Sentetik Havacılık Yakıtı
- %25 Yüksek Değerli Kimyasallar ve Plastikler
- %20 Özel ve Sınırlı Şartlar Altında Artırılmış Yağ Geri Kazanımı
- %20 Yapı Malzemelerinde Depolanır (ör. Çimento & Beton)

IPCC Özel 1,5°C'lık Küresel Isınma Raporunda küresel sıcaklığın 1,5°C ile sınırlandırılmasının insani faaliyetlerinden kaynaklı net küresel karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarının miktarında 2030 yılında 2010 seviyesinin %45 azalma yaşanarak, 2050 yılında "net sıfır"<sup>6</sup> emisyon miktarına ulaşılması gerektiği belirlenmektedir.

Rapor, KYD'nin, 1,5°C hedefine ulaşmak için önerilen altıtma teknolojilerinden biri olarak tanındığını kabul etmektedir. 1,5°C'lık Küresel Isınma Özel Raporu IPCC'de CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasına ilişkin KYD katkısı gösterilmiştir. (Bk. Şekil 23)

<sup>6</sup> Rapora göre, kalan emisyonların, havadaki CO<sub>2</sub> giderilerek dengelenmesi gerektiği anlamına geliyor

**Şekil 23 | 1,5°C'lik Küresel Isınma Özel Raporu IPCC'de CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasına KYD katkısı (mtpa)<sup>7</sup>**

P2: EMİSYON AZALTIMLARININ TEMEL OLARAK YÜKSEK İNSAN VE DÜŞÜK KARBONLU TEKNOLOJİ GELİŞTİRME VE ENERJİ VE ÜRÜNLERDE DÜŞÜK TALEP İLE ELDE EDİLDİĞİ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAKLI SENARYO

P3: EMİSYON AZALTIMLARININ ESAS OLARAK ENERJİ VE ÜRÜNLERİN ÜRETİM ŞEKLİNİ DEĞİŞTİREREK VE DAHA AZ ÖLÇÜDE TALEP AZALMALARIYLA ELDE EDİLDİĞİ BİR ORTA YO SENARYOSU

P4: EMİSYON AZALTIMLARININ TEMEL OLARAK TEKNOLOJİK ARAÇLARLA ELDE EDİLDİĞİ, CCS İLE BİYOENERJİ DAĞITIMI YOLUYLA KARBONDİOKSİT GİDERİMİNİN GÜÇLÜ BİR ŞEKİLDE KULLANILDIĞI KAYNAK VE ENERJİ YOĞUNLUĞU OLAN BİR SENARYO

## 2.2. KURULU TESİSLER VE HAZIRLIK DURUMU

Mevcut haliyle uygulamada olan tesislerin Dünya'daki dağılımı aşağıdaki haritada gösterilmektedir. Avrupa'ya oranla Amerika Birleşik Devletleri çevresinde daha fazla mevcut haliyle uygulamada olan karbon yakalama ve depolama tesisi olduğu görülmektedir.

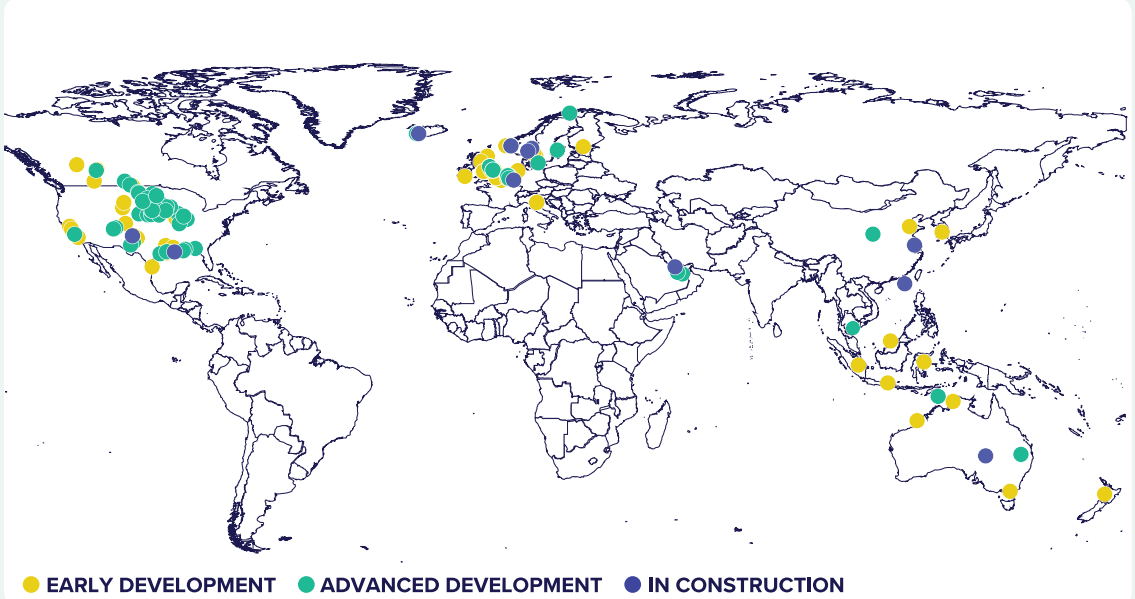
Çeşitli geliştirme aşamalarındaki karbon yakalama ve depolama tesislerinin Dünya üzerindeki dağılımı erken geliştirme, ileri geliştirme ve yapım aşamasında olarak aşağıdaki haritada gösterilmektedir.

<sup>7</sup> The Global Status of CCS: 2018 - Global CCS Institute

Şekil 24 | Mevcut haliyle uygulamada olan KYD Tesislerinin Dünya Haritası (Global KYD Enstitüsü- KYD 2022'nin Global Statüsü)



Şekil 25 | Çeşitli Geliştirme Aşamalarındaki KYD Tesislerinin Dünya Haritası (Global KYD Enstitüsü- KYD 2022'nin Global Statüsü)



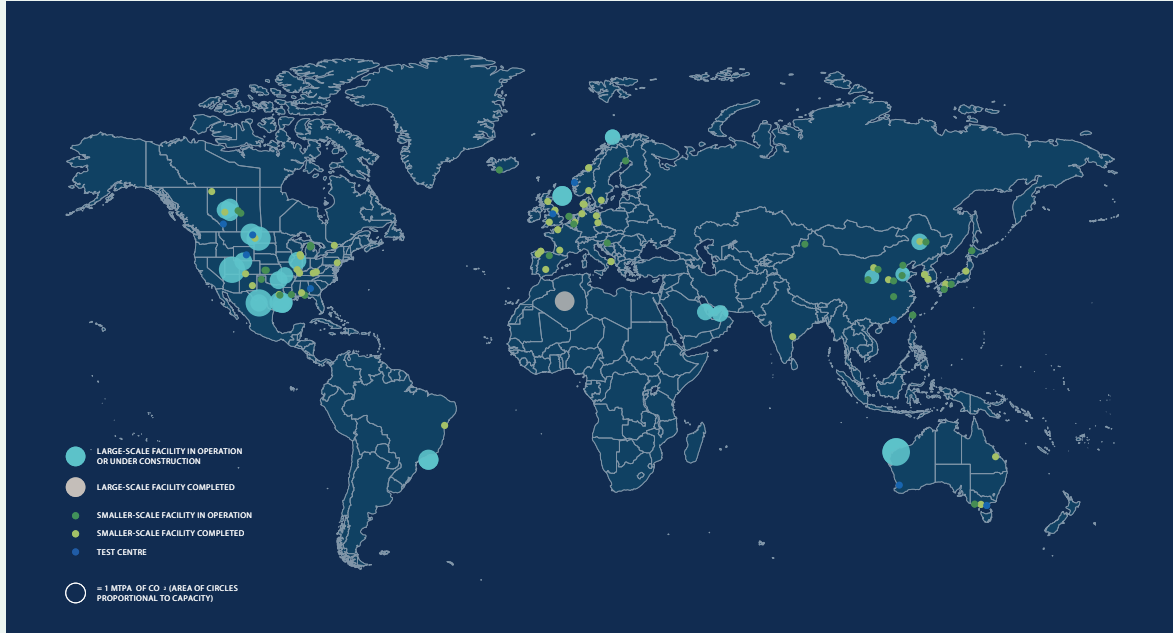
İleri Geliştirme, projelerin mühendislik geliştirme için önemli miktarda fon aldığı, proje geliştirmeye daha yüksek düzeyde bağlılık gösterildiği, onay ve inşaat için fon sağlama olasılığının daha yüksek olduğunu gösterir. Bu artış, gelecekteki proje büyümesi için önemlidir.

Ayrıca, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) senaryolarına göre, Paris Anlaşması'nda öngörülen 2°C hedefine ulaşmak için 2040 yılına kadar toplamda 2.500'den fazla KYD tesis<sup>8</sup> işler durumda olmalıdır. Şu anda, yeterli miktarda KYD tesisi bulunmamaktadır ve KYD tesislerinin projeksiyonları yukarıda belirtilen kurulum oranlarından çok uzaktır. Küresel olarak 18 büyük ölçekli ticari KYD projesinin bugün faaliyette olduğu ve yılda yaklaşık 40 milyon ton CO<sub>2</sub> toplam yakalama kapasitesine sahip olduğu ve bugüne kadar 230 Mt CO<sub>2</sub>'nin güvenli bir şekilde yeraltına enjekte edildiği bildirilmektedir.<sup>9</sup>

Tesisler ağırlıklı olarak ABD, Çin, Kanada, Avustralya ve Norveç gibi petrol geri kazanımı ve kömür üretiminin yaygın olduğu ülkelerde yoğunlaşmaktadır:

- Bu kapasitenin neredeyse %60'ı gelişmiş petrol geri kazanımı marifetiyle ve %35'i de doğrudan depolanmaktadır.
- Tesislerin %33'ü doğal gaz, %20'si elektrik, %11'i kimyasal üretim tesisleridir.

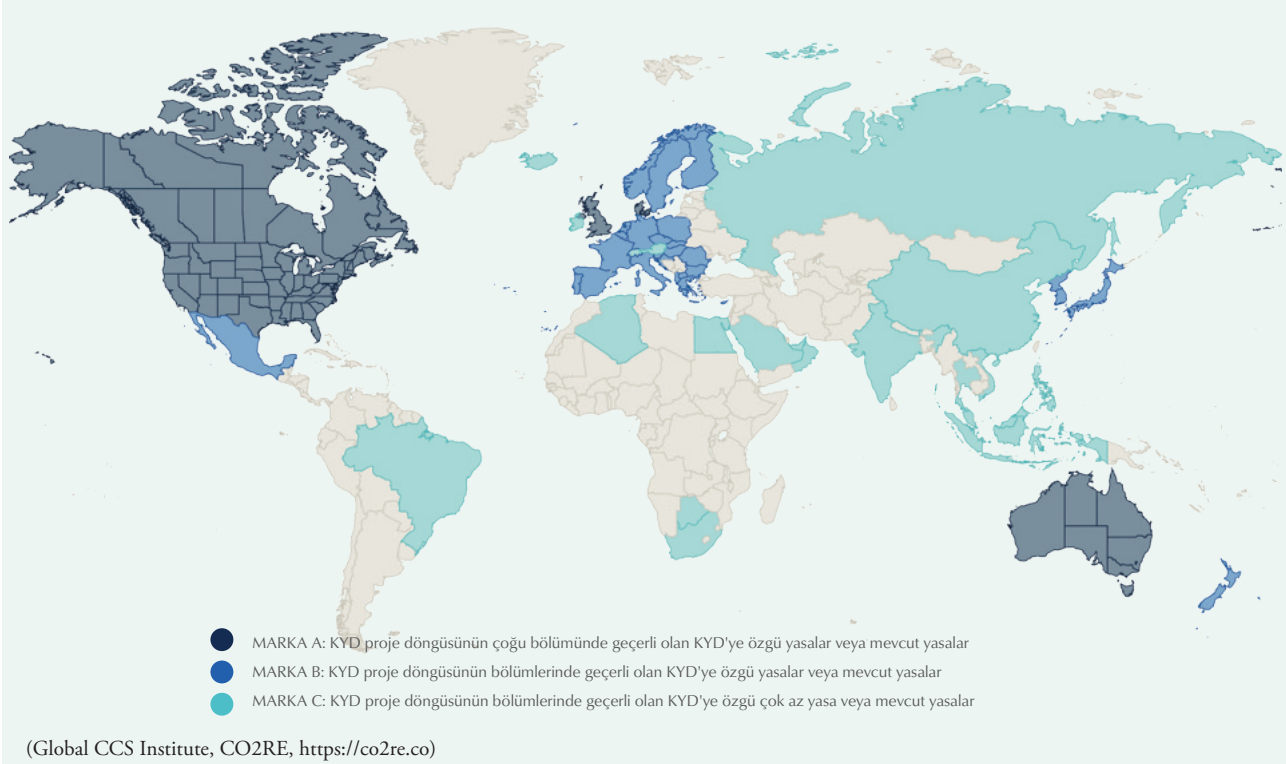
**Şekil 26 | Dünya genelindeki mevcut ticari büyük ölçekli KYD tesisleri, daha küçük ölçekli (pilot ve örnek) KYD tesisleri ve KYD test merkezleri (Ekim 2018 itibariyle)<sup>10</sup>**



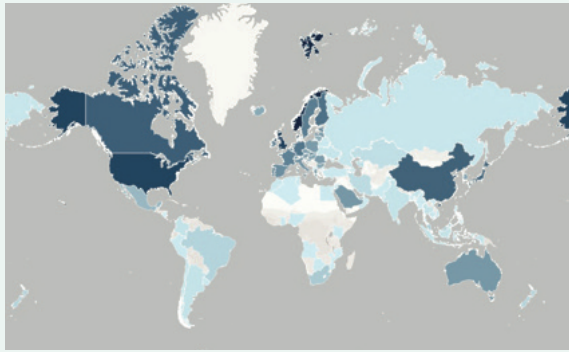
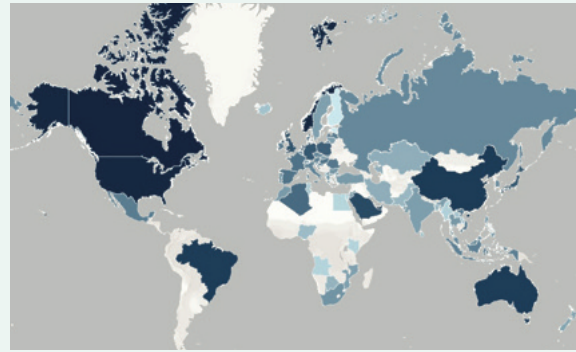
<sup>8</sup> Yıllık 1,5 milyon ton (Mtpa) karbondioksit (CO<sub>2</sub>) yakalama kapasitesine sahip bir tesise dayanmaktadır.

<sup>9</sup> Bu, 2040 yılına kadar Paris hedefine ulaşmak için gerekli olabileceklerin %1'inden daha azdır. Global KYD Institute, 2017. KYD'in Küresel Durumu: 2017. Melbourne, Avustralya <https://www.globalccsinstitute.com/webform/global-status-ccs-2017>.

<sup>10</sup> <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

**Şekil 27 | KYD proje döngüsü için geçerli KYD ile ilgili özel yasalar<sup>11</sup>**

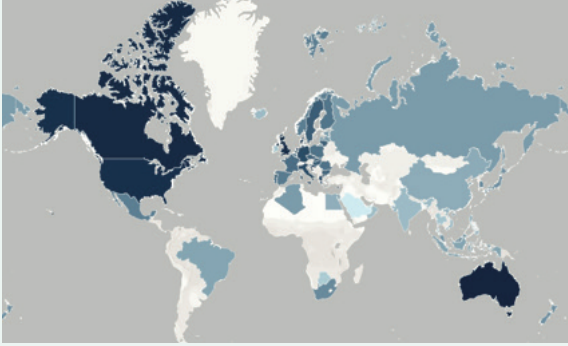
CO2RE veritabanı<sup>12</sup>, ulusal yasal ve düzenleyici çerçevelerin değerlendirilmesini, KYD'ye özgü ulusal ve yerel yönetimlerin politika önlemlerinin değerlendirilmesini ve her bir ülkenin KYD'nin uygulamasına yönelik depolama kaynağı gelişiminin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Ülkeler bu açılarından incelendiği zaman ABD, Avustralya, Brezilya, Çin, Kanada, Norveç ve Suudi Arabistan'ın KYKD teknolojilerinin hayata geçirilmesinde diğer ülkelere göre daha hazır oldukları görülmektedir. (Bk. Şekil 28, 29, 30 ve 31)

**Şekil 28 | KYD Politika Göstergesi****Şekil 29 | KYD Depolama Göstergesi**

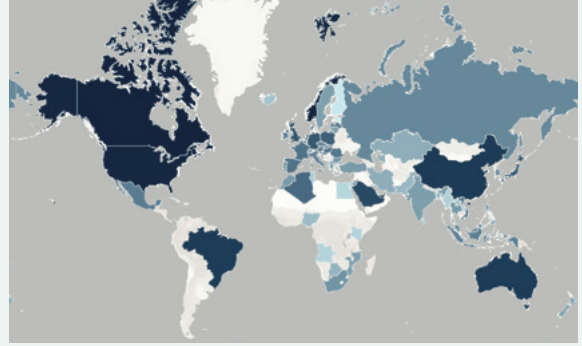
<sup>11</sup> The Global Status of CCS: 2018 - Global CCS Institute

<sup>12</sup> <https://co2re.co/Policies/>

Şekil 30 | KYD Yasal ve Düzenleyici Göstergesi

(Global CCS Institute, CO2RE, <https://co2re.co>)

Şekil 31 | KYD Hazırlık Endeksi

(Global CCS Institute, CO2RE, <https://co2re.co>)

### 2.3. ÜLKE ÖRNEKLERİ

Son yıllarda KYKD uygulamaları ve taahhütleri Dünya genelinde yaygınlaşmaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamında Paris Anlaşması sorumluluğu olarak sundukları Ulusal Katkı Beyanlarında (UKB) [en:NDC] KYKD'ya yer veren ülkelerin sayısı hızla artmaktadır. Özellikle UKB'larını güncelleyen birçok ülke, Avustralya, Kanada, Çin, Japonya, Norveç, BAE ve ABD de dahil olmak üzere, KYKD teknolojilerine politikalarında yer vermiş bulunmaktadır. (Bk. Şekil 32).

Şekil 32 | Ülkelerin Paris Anlaşması Kapsamında BMİDÇS'ye Sundukları Ulusal Katkı Beyanlarında (UKB) KYKD (Global KYD Enstitüsü- KYD 2022'nin Global Statüsü)

| ÜLKE / UKB (NDC)            | NUBK | BİRİNCİ UKB | BİRİNCİ UKB GÜNCELLEMESİ | İKİNCİ UKB |
|-----------------------------|------|-------------|--------------------------|------------|
| AVUSTRALYA                  |      |             |                          |            |
| BAHREYN                     |      |             |                          |            |
| KANADA                      |      |             |                          |            |
| ÇİN                         |      |             |                          |            |
| MISIR                       |      |             |                          |            |
| EL SALVADOR                 |      |             |                          |            |
| İZLANDA                     |      |             |                          |            |
| İRAN                        |      |             |                          |            |
| IRAK                        |      |             |                          |            |
| JAPONYA                     |      |             |                          |            |
| MALAWİ                      |      |             |                          |            |
| MOĞOLİSTAN                  |      |             |                          |            |
| NORVEÇ                      |      |             |                          |            |
| PAKİSTAN                    |      |             |                          |            |
| KATAR                       |      |             |                          |            |
| SUUDİ ARABİSTAN             |      |             |                          |            |
| GÜNEY AFRIKA                |      |             |                          |            |
| BİRLEŞİK ARAP EMİRLİKLERİ   |      |             |                          |            |
| AMERİKA BİRLEŞİK DEVLETLERİ |      |             |                          |            |
| KUVEYT                      |      |             |                          |            |
| TOGO                        |      |             |                          |            |
| TUNUS                       |      |             |                          |            |

UKB KYKD'DEN BAHSEDER

UKB KYKD'DEN BAHSETMEZ

MEVCUT DEĞİL

### 2.3.1. AVRUPA BİRLİĞİ

Avrupa Birliği KYKD teknolojilerinin kullanımına ilişkin mevzuatını olan Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) Direktifini 2009 yılında kabul ederek yayınlamıştır. Direktif, CO<sub>2</sub>'nin jeolojik depolanması için yasal çerçeveyi oluşturmaktadır. KYD Direktifi AB'deki jeolojik oluşumlardaki CO<sub>2</sub> depolamasını ve depolama alanlarının tüm kullanım ömrünü kapsar. Ayrıca, KYD'nin yakalanması ve taşınması bileşenlerine ilişkin hükümler içerir. Avrupa Komisyonu, "Sürdürülebilir Karbon Döngüleri" iletişiminde, sürdürülebilir ve iklime dayanıklı karbon döngüleri oluşturmak için uzun vadeli hedef belirledi. Bu hedef kapsamında Avrupa Komisyonu, CO<sub>2</sub>'nin endüstriyel olarak yakalanmasını, kullanılmasını ve depolanmasını desteklemek için metodolojik destek ve finansman sağlar, karbon giderimlerinin sertifikasyonu için düzenleyici bir çerçeve geliştirdi.

Sürdürülebilir karbon döngülerine ilişkin bildiri aynı zamanda, tarım arazilerini CO<sub>2</sub>'yi atmosferden uzaklaştırmaya ve karbon stoklarını artırmaya yardımcı olacak şekilde sürdürülebilir bir şekilde yönetmeyi amaçlayan karbon tarımı kavramını da ele almaktadır. Son olarak, "mavi karbon" girişimleri, ekosistemleri yeniden canlandırarak okyanus ve kıyı ekosistemlerindeki CO<sub>2</sub>'nin uzaklaştırılmasını artırmayı amaçlamaktadır.

Avrupa Birliği, 2011 yılından bu yana AB-ETS çerçevesi içinde yürütülen NER 300 Programı ile enerji endüstrisinde yenilikçi düşük CO<sub>2</sub> gösterim projelerine yatırımları teşvik etmektedir. NER 300 programının ana finansman odakları, yenilikçi yenilenebilir enerji teknolojileri ve KYKD üzerinedir. İnovasyon Fonu başlığı altında, KYKD için kaynakların sanayi sektörüne de yayılması amaçlanmaktadır. 2021 itibarıyla İnovasyon Fonu, AB-ETS'nin bir parçasıdır. 2020'den 2030'a kadar, çevre açısından güvenli Karbon Yakalama ve Kullanma (KYK) süreçleri de dahil olmak üzere iklim değişikliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilecek yenilikçi düşük CO<sub>2</sub> üretim süreçlerine yönelik projeleri gösteren endüstri projelerine, AB içinde teşvikler sağlanması amaçlanmaktadır. AB İnovasyon Fonu'nun ilk teklif çağrısı, Avrupa Komisyonu tarafından 3 Temmuz 2020'de yayınlanmış bulunmaktadır. Bu teklif çağrısı, yatırım hacmi 7,5 milyon avronun üzerinde olan projeleri ele almaktadır.

Avrupa Birliği Taksonomisi, sürdürülebilir finansmanı teşvik etmek ve Avrupa Yeşil Mutabakatının hedeflerine ulaşmaya yardımcı olmak amacıyla 2020 yılında Avrupa Komisyonu tarafından başlatılan bir inisiyatiftir. AB taksonomisi, AB'nin iklim ve çevre hedeflerini yatırım amaçlı belirli ekonomik faaliyetler için kriterlere çeviren bir sınıflandırma sistemidir. Özetle, çevresel açıdan sürdürülebilir ekonomik faaliyetlerin listesini oluşturmaktadır. Bu taksonomi, sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek için kullanılan bir dizi teknik kriter ve ölçütler içerir. Karbon yakalama, kullanma ve depolama (KYKD), Avrupa Birliği Taksonomisi içinde "iklim değişikliği uyumlu" bir faaliyet olarak kabul edilir. Bu kategori, karbon emisyonlarını azaltmaya ve atmosferdeki karbon miktarını azaltmaya yönelik teknolojileri kapsar. Özellikle, karbon yakalama, kullanma ve depolama süreci, endüstriyel tesislerden salınan karbon gazlarını yakalayıp, kullanarak ve depolayarak çevreye salınan karbon miktarını azaltmayı hedefler.

Bu teknolojiler, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması gibi diğer sürdürülebilirlik önlemleriyle birlikte düşünüldüğünde, Avrupa Birliği'nin iklim değişikliğiyle mücadeledeki taahhütlerine katkıda bulunabilir. Karbon yakalama, kullanma ve depolama, fosil yakıt tüketimi devam ettiği sürece atmosferdeki karbon seviyelerini azaltmada önemli bir rol oynayabilir.

Avrupa Birliği Taksonomisi CO<sub>2</sub>'nin yer altında kalıcı jeolojik depolanmasını taksonomiye dahil etmiştir. Bu kategorideki ekonomik faaliyetler, 1893/2006 Sayılı Yönetmelik (EC) tarafından oluşturulan ekonomik faaliyetlerin istatistiksel sınıflandırmasına uygun olarak E39.00 NACE koduyla ilişkilendirilmiştir. 1893/2006 sayılı yönetmelik 3 bölüm, 21 maddeden ve 5 ekten oluşmaktadır. Bu Yönetmelik, bundan sonra 'NACE Rev. 2' olarak anılacak olan Avrupa Topluluğu'ndaki ekonomik faaliyetlere ilişkin ortak bir istatistiksel sınıflandırma oluşturur. Bu sınıflandırma, topluluk sınıflandırmalarının ekonomik gerçekliğe uygun olmasını sağlar ve

ulusal, topluluk ve uluslararası sınıflandırmaların ve dolayısıyla ulusal, topluluk ve uluslararası istatistiklerin karşılaştırılabilirliğini geliştirir. Yönetmeliğin birince bölümünde genel hükümler, ikinci bölümünde ilgili mevzuatlarda yapılacak değişiklikler, üçüncü bölümünde son hükümler yer alır.

Potansiyel depolama kompleksinin ve çevresinin karakterizasyonu ve değerlendirilmesi veya Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2009/31/EC sayılı Direktifinin 3. Maddesinin (8) bendi anlamında araştırma, jeolojik formasyonun CO<sub>2</sub> depolama alanı olarak kullanıma uygun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla yapılır.

Kapatma ve kapatma sonrası yükümlülükler de dahil olmak üzere yer altı jeolojik CO<sub>2</sub> depolama sahalarının işletilmesi için:

- Çalışma sırasında sızıntıyı önlemek için uygun sızıntı tespit sistemleri uygulanır.
- Yetkili ulusal otorite tarafından kontrol edilen düzenli raporlar ile, enjeksiyon tesisleri, depolama kompleksi ve uygun olduğu durumlarda çevreye ilişkin bir izleme planı yapılır.

Birlik içindeki depolama sahalarının araştırılması ve işletilmesi açısından faaliyet, 2009/31/EC sayılı direktifte yer alır. Üçüncü ülkelerdeki depolama sahalarının araştırılması ve işletilmesi açısından faaliyet, CO<sub>2</sub>'nin jeolojik depolanmasına ilişkin ISO 27914:2017 ile uyumludur.

2009/31/EC direktifi 8 bölüm, 41 maddeden oluşmaktadır. Bu Direktif, iklim değişikliğiyle mücadeleye katkıda bulunmak amacıyla karbondioksitin (CO<sub>2</sub>) çevre açısından güvenli jeolojik depolanmasına yönelik yasal bir çerçeve oluşturur. CO<sub>2</sub>'nin çevre açısından güvenli jeolojik depolanmasının amacı, CO<sub>2</sub>'nin çevre ve insan sağlığına yönelik olumsuz etkileri ve riskleri önleyecek ve bunun mümkün olmadığı durumlarda mümkün olduğunca ortadan kaldıracak şekilde kalıcı olarak muhafaza edilmesidir. Bu Direktif, Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi (UNCLOS) anlamında Üye Devletlerin topraklarında, münhasır ekonomik bölgelerinde ve kıta sahanlıklarında CO<sub>2</sub>'nin jeolojik depolanmasına uygulanacaktır. Direktifte yer alan bölümler konu, kapsam ve tanımlar, depolama alanlarının seçimi ve arama izinleri, depolama izinleri, işletme, kapanma ve kapanma sonrası yükümlülükler, üçüncü taraf erişimi, genel hükümler, değişiklikler ve son hükümler başlıklarını içermektedir.

### 2.3.2. ABD

ABD'nin KYKD'ya ilişkin mevcut politikaları dört ana başlıkta toplanabilir. Aşağıda bu politikaların özetleri verilmiştir:

- Karbon Yakalama Programı: Enerji santralleri, çimento ve çelik tesisleri, rafineriler, petrokimya tesisleri ve diğer kaynaklardan CO<sub>2</sub> emisyonlarının %95'inden fazlasını yakalamayı hedefleyen teknolojilerin araştırma, geliştirme, demonstrasyon ve yaygınlaştırılması (RDD&D) için kurulmuştur.
- Karbon Depolama Programı: CO<sub>2</sub>'nin ticari hacimlerde ve zaman dilimlerinde uzun vadeli depolanması için doğrulanabilir bilgiler sağlamak ve jeolojik karbon depolamanın etkili bir CO<sub>2</sub> emisyonu azaltma çözümü olarak uygulanabilirliğini sağlamak için kurulmuştur.
- Karbon Yakalama Gösterim Projeleri Programı: Kömür ve doğal gaz kullanımına ilişkin karbon yakalama teknolojilerinde demonstrasyon projeleri için finansman sağlayan bir programdır.
- Karbon Dioksit Uzaklaştırma Programı: Yüzyıl ortasına kadar gigaton ölçekli karbondioksit azaltımını kolaylaştırmak için çeşitli CDR yaklaşımları geliştirmek üzere kurulmuştur.

Bu politikaların hepsi uygulanmaktadır ve uygulama başlangıç yılları 2002 ile 2022 arasında değişmektedir. Mevcut bu politikalara ilave olarak, ABD Yönetimi tarafından 2022 yılında ilan edilen Enflasyon Düşürme Yasası, enerji güvenliği ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik yatırımlar için 369 milyar dolarlık bütçe oluşturulmuş; bu bütçenin de 3 milyar doları KYKD için ayrılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri, Gelir Vergisi Kanunu 45Q Bölümü altında KYKD projeleri için önemli vergi teşvikleri sunmaktadır. 45Q Bölümü ilk olarak 2008 yılında uygulamaya alınmış ve 2018 yılında teşvik miktarlarını artırmak, uygunluğu genişletmek ve inşaat başlangıç tarihini uzatmak için güncellenmiştir. 2022 Enflasyon Azaltma Yasası bu teşvikleri daha da güçlendirmiştir. Bu kapsamda, tuzlu jeolojik formasyonlarda depolanan CO<sub>2</sub> için vergi teşvik miktarı ton başına 50\$'dan 85\$'a çıkartılmıştır. CO<sub>2</sub> kullanımı, geliştirilmiş petrol çıkarma (EOR) veya ürünlere dönüşüm dahil, için vergi teşvikleri ton başına 35\$'dan 60\$'a yükseltilmiştir. Doğrudan havadan yakalama (DAC) tesisleri, depolama için ton başına 50\$'dan 180\$'a ve kullanım veya EOR için 35\$'dan 130\$'a yükseltilmiştir. (Carbon Capture and Storage in the United States, Congressional Budget Office, 2023.)

### 2.3.3. İNGİLTERE

İngiltere KYKD teknolojilerine önem veren ülkelerden biridir. Ülke, 2050 yılına kadar net-sıfır salım ulaşmakta KYKD'nin kullanılması konusunda kararlı. Bu amaçla 2004-2019 arasında İngiltere KYKD Araştırma ve İnovasyon için 330 milyon sterlinin üzerinde kamu finansmanı sağlamıştır. Bu finansman, KYKD ile ilgili temel bilimi anlamak, iyileştirilmiş yakalama süreçleri ve ekipmanı geliştirmek ve ayrıca KYKD'de yeni nesil konu uzmanlarını eğitmek için çok önemli olmuştur.

İngiltere önemli bir adım olarak KYKD ile elektrik üreten santralleri desteklemek için Sevk Edilebilir Güç Anlaşmasını (DPA) uygulamaya aldı. Sevk Edilebilir Güç Anlaşması ile 2020'lerin ortalarında en az bir KYKD enerji santralini devreye sokmayı amaçlıyor. Yeni KYKD projelerinin geliştirilmesini teşvik etmek için politika çerçevesini gözden geçirmeye ve geliştirmeye devam etmeye başladı ve 2022 Nisan ayında KYKD Yatırımcı Yol Haritasını yayınladı. 2025 yılı için 10 MtCO<sub>2</sub>/yıl KYKD kapasitesine ulaşma taahhüt edildi. KYKD teknolojisini kullanarak 2030 yılına kadar yılda 20-30MtCO<sub>2</sub> yakalayıp depolamak ve gelecekteki yatırım ve potansiyel ihracat fırsatlarının temellerini oluşturmayı amaçlıyor.

Bu amaçla 1 milyar sterlinlik KYD Altyapı Fonu oluşturuldu. KYD Altyapı Fonu hem KYD'yi hem de etkin "mavi" ve elektrolitik "yeşil" hidrojeni destekleyen 240 milyon sterlinlik Net Sıfır Hidrojen Fonunu içermektedir.

### 2.3.4. ALMANYA

Almanya, enerji santralleri sektöründe ve yüksek CO<sub>2</sub> emisyonlarına sahip endüstrilerde karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojileriyle %80-95 oranında emisyon azaltımı hedefliyor. Ülkede jeolojik CO<sub>2</sub> depolaması araştırmaları 2005 yılından beri özel bir programla finanse edilmiştir. Bu program 2014'te sona ermiştir. Federal Ekonomi ve İklim Eylemi Bakanlığı (BMWK), KYKD'yi da içerecek şekilde enerji araştırmalarına finansman sağlamaktadır. Almanya, 2021'de Doğrudan Havada Karbon Yakalama senaryolarını araştırmak için iki önemli araştırma projesi başlatmış bulunmaktadır.

### 2.3.5. HOLLANDA

Hollanda, SDE++ aracılığıyla sübvans edilecek projelere dayalı olarak, kimya endüstrisi, rafineriler ve atık yakma tesislerinde Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) kullanılarak 2030'da yaklaşık 9 Mt CO<sub>2</sub> azaltılmasını hedefleniyor. SDE++ şeması, üreticilerin yenilenebilir enerji veya CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması için mali tazminat alabileceği bir işletim hibesi olarak çalışıyor. Üreticiler, azalttıkları CO<sub>2</sub> salımlarının maliyetinin kârsız bileşeni için mali tazminat alıyor. SDE++, üreticilere, kullanılan teknolojiye bağlı olarak, belirli bir yıl boyunca maliyet fiyatının kâr etmeyen kısmını tazmin ediyor.



### 3. TÜRKİYE’NİN KYKD MEVCUT DURUMU VE POTANSİYELİ

- 3.1.KURUMSAL YAPI VE MEVZUAT
- 3.2.TÜRKİYE’DE KYKD UYGULAMALARI
- 3.3. TÜRKİYE’DE POTANSİYEL KYKD SALIMLARI
- 3.4.TÜRKİYE’NİN DEPOLAMA POTANSİYELİ
- 3.5.KYKD’NİN TÜRKİYE İÇİN MALİYETİ



### 3. TÜRKİYE'NİN KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA MEVCUT DURUMU VE POTANSİYELİ

Türkiye, KYKD teknolojilerinde henüz ilerleme kaydetmemiştir. Türkiye'nin KYKD teknolojilerini kullanması halinde, CO<sub>2</sub>'nin atmosferden ve biyosferden izole edilmiş şekilde kalmasını ve dolayısıyla çevresel anlamda güvenli ve etkili bir iklim değişikliğini azaltıcı seçenek olmasını sağlamak için teknolojinin çevresel risklerini yönetmesi gerekmektedir. İlgili kamu kuruluşları ve sektörlerin KYKD'ye ilişkin teknolojik ve teknik deneyiminin eksik olduğu kabul edilmektedir.

KYKD teknolojileri pahalı teknolojilerdir. Bu teknolojilerin kullanılması için ceza ve teşvik mekanizmalarının oluşması ve karbon salımının bedelinin olması gereklidir. Türkiye'nin KYKD teknolojilerini uygulayabilmek için gerekli ekonomik gerekçeleri oluşturması lazımdır. Ayrıca, Türkiye'de ve Dünya'da CO<sub>2</sub>'nin depolandığı tesislerinin düzgün çalışması ve kapanma ve kapanma sonrası sürecin izlenmesi ve sonuçlandırılmasına ilişkin finansal mekanizmalarla ilgili deneyim eksikliği bulunmaktadır. Türkiye yüksek riskli deprem kuşağında yer almaktadır. Bu durum Türkiye'nin KYKD teknolojilerinde özellikle depolama konusunda daha titiz davranmasını gerektirmektedir.

Türkiye'nin Geliştirilmiş Petrol Geri Kazanımı (EOR) uygulamaları konusunda deneyimi bulunmaktadır. Bu tesislerde CO<sub>2</sub> depolanması, petrolün çıkartılmasını sağladığı için makuldür. Ancak bu durum, fosil yakıt kullanımını arttırmakta, bu da iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamamaktadır. Türkiye'de tesisler EOR dışında CO<sub>2</sub>'nin jeolojik olarak depolanması durumunda, işletmeciler jeolojik uygulamaya karar verdiklerinde gelir elde etmek veya karbon vergilerinden kaçınmak için karbon ticareti yapma veya vergi indirimi edinme vb. gibi fırsatlara sahip değildirlir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022), Türkiye'nin 2035 yılına kadar olan projeksiyonlarında KYKD teknolojilerine yer vermemiştir. Plana göre mevcut KYD maliyetleri, karbon yakalama teknolojisine sahip kömür ve doğal gaz santrallerinin ilk yatırım maliyet öngörülleri ve verimlilik değerleri kullanıldığında pahalı kalmaktadır. Plan, 2035 sonrası dönemde yeni santrallerin ilk yatırım maliyetinde kaydedilebilecek daha yüksek oranda düşüş ve verimlilik artışı ile kömür ve doğal gaz yakıtlı karbon yakalama teknolojisine sahip termik santrallerin üretim portföyüne dahil olabileceğini belirtmektedir.

İmalat sanayiinde yüksek salım yapan sektörlerden biri olan çimento sektörü KYKD teknolojilerini yakından takip etmektedir. Türkiye'de çimento sektörünün en büyük temsilci olan TÜRKÇİMENTO 2022 yılında KYKD teknolojilerinin çimento sektöründe kullanımı üzerine bir rapor hazırlamıştır. 2023 Mart ayında TENMAK tarafından Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı kapsamında TENMAK Ar-Ge Teşvikleri KYKD Teknolojileri Çağrısı yapılmıştır. Çağrı ile Türkiye'de KYKD alanında Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesi hedeflenmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile EBRD iş birliğinde hazırlanmakta olan Türkiye Demir-Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası projesinde KYKD teknolojileri azaltım senaryolarının içerisine dahil edilmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TENMAK iş birliği içerisinde "Ulusal Karbondioksit Tutma ve Değerlendirme Teknolojileri Yol Haritası" çalışmalarını 2022 yılında başlanmış ve halen devam etmektedir. Kaynak, Çevre ve İklim Derneği, Türkiye'deki paydaşların konuya ilişkin farkındalık ve değerlendirmelerini almak üzere bir anket düzenlemiştir. Anket çalışmasının sonuçları Ek 2'de verilmektedir. Paydaşların geri bildirimleri Türkiye'nin

KYKD teknolojilerinin uygulanmasına hazır olmadığını göstermektedir. (Bk. Ek 2)

Türkiye'nin optimum uygulama politikası seçeneklerini belirleyecek iki önemli faktör vardır. Birincisi, kalıcı jeolojik CO<sub>2</sub> depolama sahalarının doğal mevcudiyeti ve bunların teknik ve ekonomik fizibilitesi ve ikinci olarak Türkiye'nin 2053 net-sıfır hedefi kapsamındaki politik hedefleri içerisinde KYKD seçeneği tercihidir. Türkiye'nin, net-sıfır salıma ulaşmada tanımlanan ulusal iklim hedeflerinde KYKD'nın yer alıp almayacağı konusundaki siyasi pozisyonunu netleştirmesi gerekmektedir. Herhangi bir politika senaryosunda, Türkiye'de KYKD'nin potansiyel uygulaması için kuralları tanımlaması gerekecektir. KYKD'ya ilişkin yakalama ve depolama potansiyeline ilişkin öngörüler yapmak mümkün olmakla birlikte, kullanıma ilişkin bir çalışma yapmak mümkün değildir.

### 3.1. KURUMSAL YAPI VE MEVZUAT

Karbon yakalama, taşıma ve jeolojik depolama süreçlerini düzenleyen bir yasal çerçeve bulunmamaktadır. Buna bağlı olarak kamu idareleri KYKD'dan sorumlu olarak görevlendirilmemiştir. Türkiye'de, sanayi tesislerinden elde edilen baca gazı/karbondioksitin petrol sahalarına enjekte edilmesi henüz uygulanmamakta olan bir yöntemdir. Türk Petrol Kanunu, 30 Mayıs 2013 tarihinde kabul edilen 6491 sayılı kanunla, petrol kaynaklarının keşfi, geliştirilmesi ve üretim süreçlerini düzenlemektedir. Kanunun 9. Maddesi'nin 3. fıkrasında, "Petrol sahalarında üretilen karbondioksit gazı, üretim artırma yöntemlerinde kullanılabilir." ifadesi bulunmakta olup, bu ifade petrol sahalarından çıkarılan CO<sub>2</sub>'nin gelişmiş petrol geri kazanımı için kullanılabileceğine işaret etmektedir; ancak sanayi tesislerinden elde edilen CO<sub>2</sub> kullanımıyla ilgili bir düzenleme bulunmamaktadır. Petrol Kanunu'na dayanarak 1986 yılından itibaren Dodan Gaz Sahası'ndan elde edilen CO<sub>2</sub>, Batı Raman sahasında petrol üretiminde kullanılarak Türkiye'nin en büyük petrol rezervinin işletilmesine katkı sağlamaktadır.

Türk Petrol Kanunu'nun 9. Maddesi'nin 4. ve 5. fıkralarında, yer altı depolama için kullanılacak petrol rezervuarlarının yönetimi ve kullanımı ile ilgili hükümler yer almaktadır. Bu hükümler, bir petrol sahasının depolama amacıyla kullanılabilmesi için tamamen tüketilmesini ve yetkili kurumların onayını gerektirmektedir. Bir sahanın hem petrol üretimine hem de depolama ve diğer enerji faaliyetlerine konu olabilmesi mümkündür.

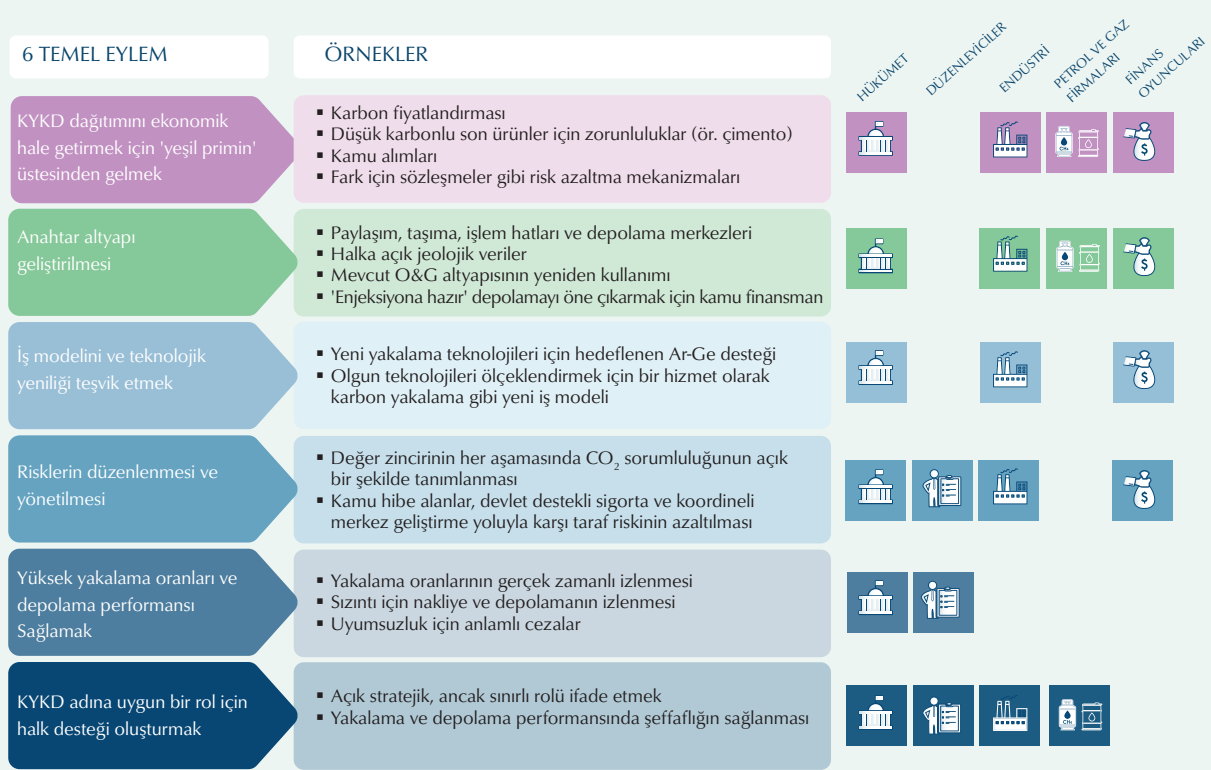
2014 yılında yayımlanan Türk Petrol Kanunu Uygulama Yönetmeliği, yer altı baca gazı veya karbondioksitin enjeksiyonu ve depolanması ile ilgili hükümleri içermemekte, ancak yer altı doğal gaz depolama ile ilgili bazı esaslara yer vermektedir. Yönetmeliğin ilgili maddelerinde, yeraltı doğal gaz depolama faaliyetleri için gereken izinler ve yönetmelikler açıklanmaktadır. Yeraltı doğal gaz depolama süreçlerinin, yeraltı baca gazı veya CO<sub>2</sub> enjeksiyonu ve depolama süreçlerinde uygulanabilirliği mevzuatta belirtilmemiştir. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG), doğal kaynaklarla ilgili izinleri vermektedir.

Çevre Kanunu, baca gazı/karbondioksitin tesislerden yakalanması ve iletimi ile ilgili özel düzenlemelere yer vermemekte, ancak sera gazı emisyonlarının takibi ve karbon ticareti gibi konularda genel hükümler içermektedir. ÇED Yönetmeliği, ÇED sürecinde uyulacak usul ve esasları düzenlemekte, karbon yakalama ve jeolojik depolama projeleri için özel hükümler içermektedir. Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş. Genel Müdürlüğü (BOTAŞ) tarafından yürütülen ham petrol ve doğal gaz boru hattı tesislerinin teknik emniyet ve çevre yönetmeliklerinde, baca gazı/karbondioksitin iletimiyle ilgili özel hükümler yer almamaktadır. Elektrik Piyasası Kanunu'nda ise, emisyon ticaretine ilişkin hükümler bulunmakta ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından belirlenmekte, gönüllü emisyon ticareti sistemi uygulanmaktadır. Karbon Piyasalarına Hazırlık Ortaklığı (PMR) programı kapsamında, Türkiye'de sera gazı emisyon ticareti sisteminin kurulması ve karbon fiyatlandırma politikalarının değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Taslak İklim Değişikliği Kanunu, yakalama ve depolama uygulamalarının emisyon azaltımı amacıyla kullanılmasına dair hükümler içermektedir. Bu mevzuatta yer alan düzenlemeler, Türkiye'de baca gazı/karbondioksitin tesislerden yakalanması ve iletimi uygulamalarının geliştirilmesi için önemli bir adım oluşturmaktadır.

Oluşturulacak mevzuatın kurumsal işbölümünü ve paydaşların eylemlerini içermesi gerekmektedir. Türkiye'de KYKD

### Şekil 33 | KYKD Uygulaması için Kamu İdareleri ve KYKD Paydaşlarına Düşen Sorumluluklar (Enerji Dönüşümü Komisyonu – Temmuz 2022)

#### KAMU İDARELERİ, ENDÜSTRİ VE FİNANS SEKTÖRÜ TARAFINDAN ÜSTLENİLMESİ GEREKEN 6 TEMEL EYLEM



teknolojilerinin uygulama alanı bulabilmesi için kamu idarelerine ve KYKD paydaşlarının üstlenmeleri gereken temel eylemler bulunmaktadır. (Bk. Şekil 33) Bu kapsamda merkezi idareye ve özel sektöre önemli sorumluluklar düşmektedir. KYKD çok fazla paydaşın dahil olması gereken süreçleri içermektedir.

Türkiye'nin bu alanların tamamında kurumsal kapasite ve nitelikli uzman oluşturması gerekmektedir. TENMAK tarafından 2023 yılında Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı kapsamında KYKD Teknolojileri Çağrısı açılmıştır.<sup>13</sup> Çağrı ile ticarileştirilebilir KYKD teknolojileri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede Teknoloji Hazırlık Seviyesi (THS) en az 4 olan projelerin, THS 8 seviyesine çıkartılması hedeflenmiştir. Çağrıda üç ana konu öncelik olarak belirlenmiştir;

- Karbon yakalama teknolojileri (%95 üzerinde verimli ve günlük en az 1 ton tutabilecek kapasitesini sağlayabilir olması)
- Karbon kullanım ve faydalı ürüne dönüştürme teknolojileri (karbonun yüksek verim, düşük maliyetle ve modüler olarak yakıtlar, kimyasallar ve karbonatlı mineraller gibi faydalı ürünlere dönüştürülmesi)
- Karbon depolama teknolojileri (günlük en az 1 ton depolama kapasitesi ile yüksek verim ve düşük maliyete sahip modüler depolama seçeneklerinden rezervuarlara kadar geniş kapsamlı depolama seçenekleri)

<sup>13</sup> TENMAK Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı: TENMAK Ar-Ge Teşvikleri Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama Teknolojileri Çağrısı Target-2023-02-KYKD

Projede her bir proje için üst limit olarak elli milyon TL belirlenmiştir.<sup>14</sup> Bu tutar ile KYKD için Ar-Ge yapılabilmesi gerçekçi değildi. Diğer taraftan, proje Türkiye'de KYKD konusunda bilgili uzman yetiştirmesine katkı sağlayacaktır.

Türkiye'nin, bir Avrupa Birliği aday ülkesi olarak AB'nin ilgili direktifi olan Karbon Yakalama ve Depolama Direktifini iç hukuka aktarma sürecini tamamlamamıştır. Bir aday ülke olarak Türkiye, katılım sürecinde iç hukukun KYDD ile tam uyumunu sağlamak amacıyla ilgili mevcut ulusal mevzuatta değişiklik yapmayı ve / veya yeni yasama aracını ayrıca çıkarmayı seçebilir. Şu anda Türkiye'de bütünüyle KYKD'yi konu alan ayrı bir mevzuat ya da iklim değişikliğiyle mücadele etmek için KYKD kapsamında CO<sub>2</sub>'nin jeolojik olarak kalıcı depolanmasını açıkça düzenleyen düzenlemeler bulunmamaktadır.

KYKD iklim değişikliğini azaltıcı araçlar kapsamında dikkate alınacak ise Türkiye'nin KYKD'nin uygulanması önündeki ticari engelleri ele almak zorundadır. KYD tesislerinin düzgün çalışması ve kapanma ve kapanma sonrası sürecin izlenmesi ve sonuçlandırılmasına ilişkin finansal mekanizmalarla ilgili deneyim eksikliği bulunmaktadır ve ticari teşvikler (karbon fiyatı ve/veya karbon vergisi) mevcut değildir.

- Direktif bağlamında “yetki devri”nin tanımı ve uygulaması konusunda paydaşlar arasında sınırlı bir anlayış mevcuttur ve fikir birliği bulunmamaktadır,
- İlave üretimi kolaylaştıran Geliştirilmiş Petrol Geri Kazanımı (EOR) uygulamaları dışında CO<sub>2</sub>'nin jeolojik olarak depolanması durumunda, işletmeciler jeolojik uygulamaya karar verdiklerinde gelir elde etmek veya karbon vergilerinden kaçınmak için karbon ticareti yapma veya vergi indirimi edinme vb. gibi fırsatlara sahip değildirlir.
- Türkiye'de, karbon ticareti mekanizmasının olmaması nedeniyle KYKD ile ulaşılabilecek potansiyel CO<sub>2</sub> azaltımları mükafatlandırılmamaktadır. Eğer kurulacak karbon ticareti sistemine dahil edilirse, KYD yoluyla CO<sub>2</sub> azaltımı karbon fiyatı kapsamında kıymetlendirilebilecektir. Kısacası, karbon ticaret mekanizmalarının ve / veya karbon vergisinin olmaması, Türkiye'de KYD tesislerinin kurulmasını etkilemektedir.

Yukarıdakilere ek olarak, halkın bilgilendirilmesi ve KYKD'nin toplumsal kabulü diğer önemli belirleyicilerdir.

## 3.2. TÜRKİYE'DE KYKD UYGULAMALARI

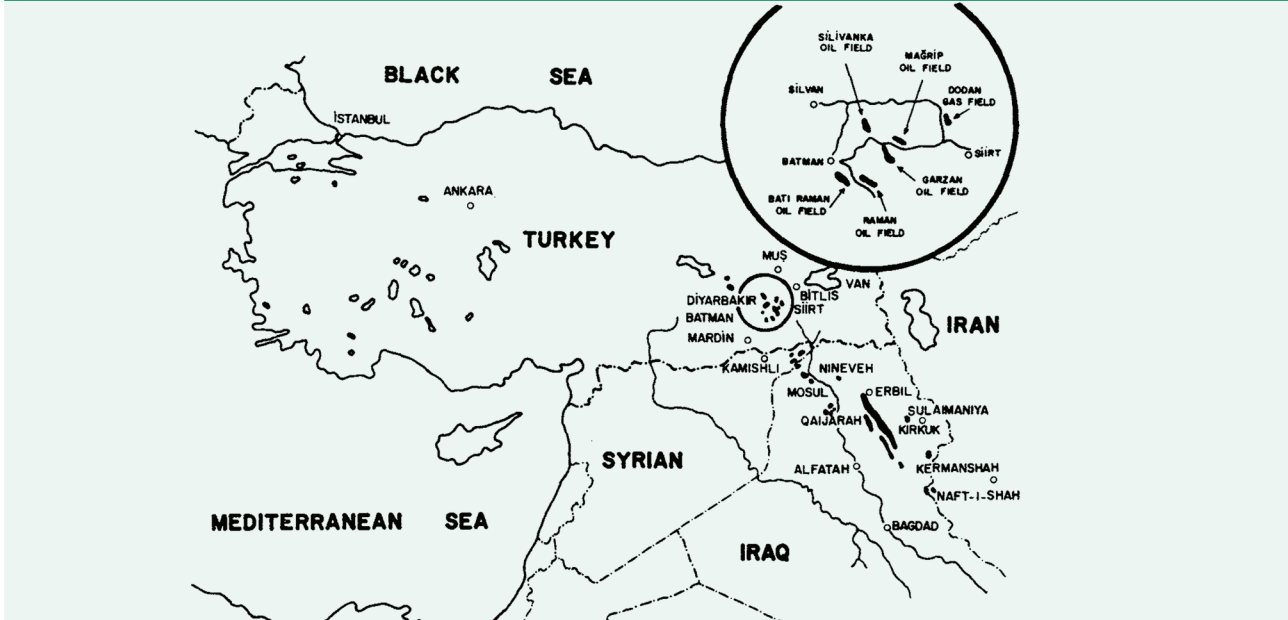
Türkiye'de KYDK uygulaması bulunmamaktadır. Buna karşın, Türkiye'nin teknolojik olarak benzer uygulamalar olan gelişmiş petrol kurtarımı ve jeotermal sahalarda basınç yükseltmek için CO<sub>2</sub>'nin yakalanarak geri basılması konusunda deneyimi bulunmaktadır. Bu alanlardaki tecrübeler Türkiye'nin KYKD politikalarının geliştirilmesine yol gösterebilir. Türkiye gelişmiş petrol kurtarımı amacıyla yeraltı jeolojik yapılarına CO<sub>2</sub> enjeksiyonu gerçekleştiren öncü ülkelerden birisidir. Ancak amaç sanayi tesislerinden yakalanan baca gazı ya da karbondioksiti yeraltında depolamak değil, mevcut bir doğal CO<sub>2</sub> rezervuarından üretilen CO<sub>2</sub> ile petrol kurtarımını artırmak olmuştur. Son yıllarda özellikle jeotermal alanında pilot çalışmalar hız kazanmıştır. Türkiye'de özellikle Menderes Grabeninde üretilen jeotermal akışkan ile beraber yüksek miktarda CO<sub>2</sub> da yüzeye çıkmaktadır. Denizli'deki Kızıldere jeotermal sahasında üretilen CO<sub>2</sub>'nin az bir kısmı bölgede bulunan Linde firmasına ait bir tesiste gıda amaçlı kullanıma uygun saf CO<sub>2</sub> olarak işlenmekte ve satılmaktadır. Geri kalan CO<sub>2</sub> ise havaya bırakılmaktadır. Yapılan pilot projeler ile jeotermal sahalardan üretilen CO<sub>2</sub>'nin yakalanarak sahanın sürdürülebilirliğine katkısı araştırılmaktadır.

### 3.2.1. GELİŞMİŞ PETROL KURTARIMINI AMAÇLAYAN PROJELER

1986 yılından bu yana Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO), yaklaşık olarak yılda 1 milyon ton CO<sub>2</sub>'yi, yaklaşık 80 km uzaklıktaki doğal bir CO<sub>2</sub> sahasından ürettikten sonra, nihai petrol üretimini artırmak amacıyla Batı Raman Sahası'ndaki Garzan karbonatlarına enjekte etmektedir (Şekil 34).

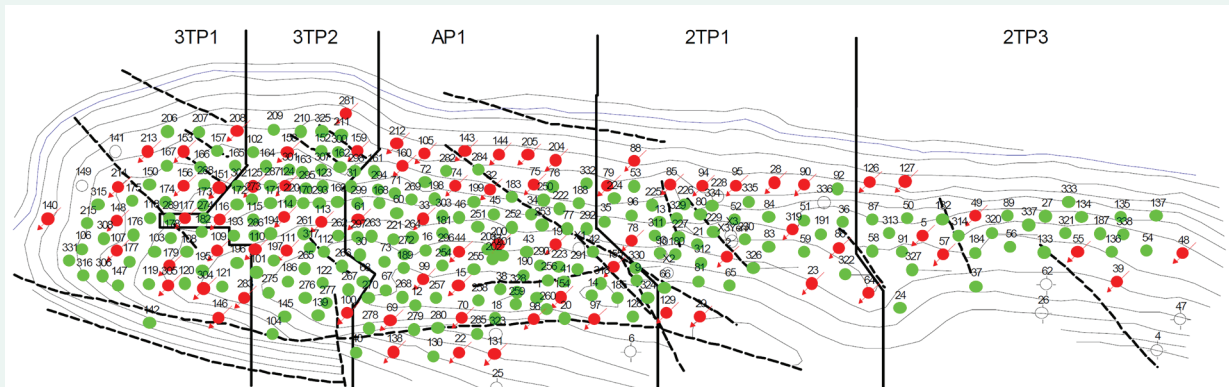
<sup>14</sup> 2023 yılı döviz kuru ortalaması dikkate alındığında yaklaşık iki milyon Amerikan doları.

Şekil 34 | Batı Raman Sahası



Batı Raman EOR projesi, dünyadaki önemli karışmayan CO<sub>2</sub>-EOR projelerinden biri olarak kabul edilebilir. Yaklaşık 1,850 MM STB (300 milyon Sm<sup>3</sup>) başlangıçta yerinde petrol (OOIP) ile Batı Raman sahası, Türkiye'nin en büyük petrol sahasıdır. Batı Raman'da üretim formasyonu yaklaşık 17 km x 4 km boyutlarında doğu-batı uzanımlı antiklinal yapıda Garzan kireçtaşıdır (Şekil 35).

Şekil 35 | Batı Raman sahası Garzan üstü yapı kontur haritası (Şahin vd., 2007)



1961 ile 1986 yılları arasında doğal basınç düşümüne dayalı birincil üretim, OOIP'nin sadece %2'sinden daha az bir petrol kurtarımı ile sonuçlandı. CO<sub>2</sub> enjeksiyonu öncesinde sadece 32 MM STB (5 milyon Sm<sup>3</sup>) petrol üretilebilmişti. Proje, ağır petrolün (9-15 API veya 950-1.000 kg/m<sup>3</sup>) karışmaz CO<sub>2</sub> ile yer değiştirmesi sayesinde üretilebilmesine dayanmaktadır. Batı Raman petrolünün moleküler ağırlığının yüksek olması nedeniyle gazın petrolle karışabilmesi için gerekli basınç orijinal rezervuar basıncının çok üzerindedir. Karışabilirlik söz konusu olmadığından karışamaz tipte CO<sub>2</sub> uygulamalarında öncelikle etkin mekanizma gazın petrol içerisinde çözünmesi, petrolü genişletmesi ve vizkozitesini düşürmesidir. Bu tür sistemlerde, öncelikle gazın çatlaklar içerisinde ilerlemesi, daha sonra da matriks içine doğru ilerlemeye çalışması beklenir. Bu nedenle, çatlaklı bir yapıda karışamaz tip uygulamada üretim artırıcı mekanizma çatlak-matriks arası difüzyon ilişkisine bağlı olarak gelişecektir. Batı Raman sahası uygulamasının sonuçları rezervuarda petrolün matriks içerisinde, akışın ise birbiri ile bağlantılı erime boşlukları ve kılcal çatlaklarda olduğunu göstermektedir. Formasyon suyu içerisinde CO<sub>2</sub> miktarının artmasıyla karbonat/bikarbonat dengesinde değişim, gözenek hacmi ve geçirgenlikte artış, su ve petrol arasındaki yüzey geriliminde azalma ve gravite drenaj etkisi matriks/çatlak difüzyonuna ek mekanizmalar olarak devreye girer.

Proje, her bir kuyu için enjeksiyon-bekleme-üretim döngüsü ile başlamış ve daha sonra 67 enjeksiyon kuyusuyla çalışan geleneksel bir enjeksiyon-üretim şemasına dönüşmüştür. Yoğun ek sondajların bir sonucu olarak 1992'de günlük 14.000 STB (2.200 Sm<sup>3</sup>) petrol üretim hızı ile zirveye ulaştı. CO<sub>2</sub> ve ağır petrol arasındaki heterojenlikler ve olumsuz akışkanlık oranları, çatlaklı karbonat rezervuarının etkili bir şekilde üretilmesine engel olmaktadır. Temmuz 2002'de üç kuyuda çatlakları dolduran polimer jel uygulanarak bir pilot proje gerçekleştirildi. CO<sub>2</sub> enjeksiyonu ile günlük petrol üretimi 2012 yılında 7000 STB/gün (1110 Sm<sup>3</sup>/gün) seviyesine yükseldi. Aynı yıl sahanın petrol kurtarımı %6'ya ulaştı (Şahin, 2008).

Enjeksiyon için kullanılan doğal CO<sub>2</sub>, içerdiği H<sub>2</sub>S ve sudan yaklaşık olarak %90 saflığında ayrıştırılmak amacıyla absorpsiyon ve dehidrasyon ünitelerinde işlenir. Daha sonra enjeksiyon sahasına taşınmak üzere 1750 psi (121 bar) basınca sıkıştırılır ve bir boru hattıyla taşınır. Enjeksiyon sahasında CO<sub>2</sub>, üretilen petrolün ayrıldığı CO<sub>2</sub> ile birleştirmeden önce daha fazla dehidrasyon yapılır ve 1350 psi'ye sıkıştırılır. 1986 ile 2012 yılları arasında, kaynak sahada yerel CO<sub>2</sub> miktarının yaklaşık %70'ini oluşturan 263 milyar scf (7,5 milyar Sm<sup>3</sup>) gaz üretildi ve Batı Raman sahasına pompalandı. 2006 yılı sonu itibari ile üretilmiş olan 93,8 milyon varil petrolün 57,8 milyon varili CO<sub>2</sub> enjeksiyonu projesi sayesinde üretilmiştir.

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı tarafından işletilen dört farklı sahada pilot veya tam saha ölçeğinde CO<sub>2</sub>-EOR uygulanmaktadır. Camurlu sahasında yer alan 380 MM STB (60 milyon Sm<sup>3</sup>) ağır petrolün bulunduğu sahada daha derindeki rezervuardan gelen CO<sub>2</sub> zengin gaz ile bir pilot proje uygulanmıştır. Pilot çalışma, yetersiz gaz miktarları nedeniyle erken sona erdirilmiştir. Bir diğer pilot uygulama, sadece %0,07'lik birincil kurtarmanın düşük verçekimi ve yüksek viskoziteye sahip petrol nedeniyle elde edildiği İkiztepe sahasında gerçekleştirilmiştir. Japonya Ulusal Petrol Şirketi ve Türkiye Petrolleri tarafından gerçekleştirilen CO<sub>2</sub>-EOR pilot testi, petrol viskozitesinde bir iyileşme gösterdi. Son olarak, Camurlu sahasından yaklaşık 10 km uzakta bulunan Batı Kozluca sahası, tam saha ölçekli bir CO<sub>2</sub>-EOR uygulaması için bir aday olarak seçildi. 3%'lük birincil kurtarmanın enjeksiyonun 5 yıl sonrasında %4'ün üzerine çıktığı görüldü. CO<sub>2</sub> enjeksiyonu ile birlikte ardışık su enjeksiyonu (WAG) ve dolgu kuyularının sondajı gerçekleştirilmiştir.

Türkiye'deki CO<sub>2</sub>-EOR uygulamaları, ağır petrol rezervuarlarından kurtarımın potansiyelini göstermiştir. Güneydoğu Türkiye'de yaklaşık olarak 2,5 milyar STB (400 milyon Sm<sup>3</sup>) tahmini ağır petrol rezervi, CO<sub>2</sub>-EOR projeleri için uygun olabilecek petrol sahalarında bulunmaktadır. Şu anda devam eden tüm CO<sub>2</sub>-EOR projelerinde doğal CO<sub>2</sub> kullanılmıştır. Ancak Afsin-Elbistan enerji santrali ve Sugoza enerji santrali gibi ağır petrol sahalarına yakın büyük endüstriyel CO<sub>2</sub> kaynakları bulunmaktadır.

### 3.2.2. JEOTERMAL SAHALARDAKİ PİLOT ÇALIŞMALAR

Türkiye'deki jeotermal sahalara, yüksek oranlarda CO<sub>2</sub> içermektedir. Türkiye'de Ege Bölgesi'nde jeotermal sistemlerde çoğunlukla bulunan karbonatlı kayaçlar (mermer, kireçtaşı, kalkışit, kalsit gibi), yüksek jeotermal gradyen nedeniyle parçalanmakta ve CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır. Daha sonra basıncın etkisiyle CO<sub>2</sub> jeotermal akışkan içerisinde çözünmektedir. Jeotermal akışkan içinde çözünmüş olan CO<sub>2</sub>, üretim sonrasında salınmakta ve büyük bir bölümü atmosfere yayılmaktadır. Bu durum, kömür santrallerine kıyasla jeotermal elektrik santrallerinin bazen 2-3 kat daha fazla CO<sub>2</sub> salımına yol açmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu da temiz ve çevre dostu olarak kabul edilen jeotermal kaynaklar için finansal, teknik ve sosyal riskler oluşturmaktadır. Jeotermal projeler, karbon ticaretinden gelir elde etmeyi beklerken, karbon cezası ödeme riski ile karşılaşabilirler.

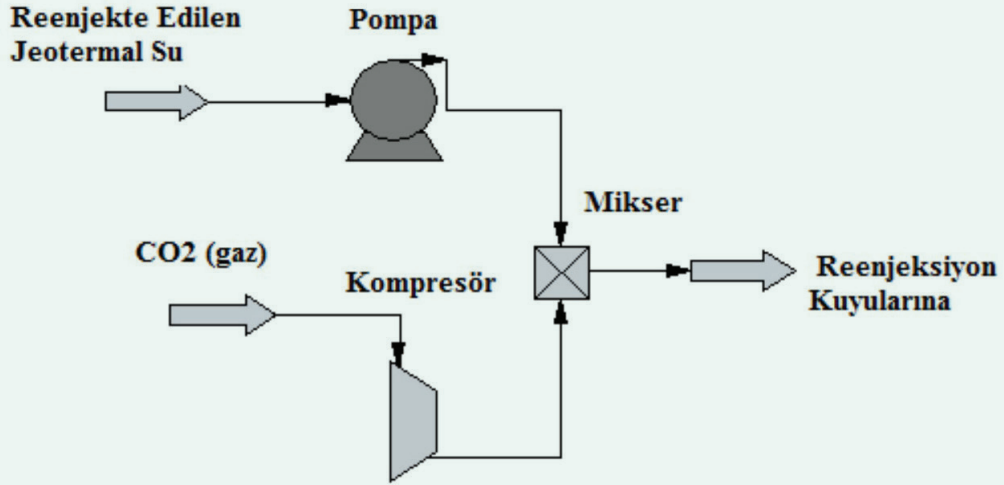
AB Horizon 2020 Jeotermal Emisyon Kontrolü (GECO) projesi İtalya, İzlanda, Almanya ve Türkiye'de yer alan dört proje alanında KYKD projelerinin ekonomik uygulanabilirliğini ve ek faydalarını değerlendirmeyi hedeflemiştir. Proje 2018 – 2023 yılları arasında Türkiye'den ODTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü ve Zorlu Enerji ile 11 diğer ortak ile yürütülmüştür. Belirlenen dört alandan sadece iki tanesinde yeterli veri bulunduğu için, Hellisheiði (İzlanda) ve Kızıldere (Türkiye) projeleri ekonomik olarak uygulanabilir bulunmuştur.

Kızıldere projesi Türkiye'deki ilk ve yüksek potansiyelli jeotermal saha olarak tanımlanmaktadır. Denizli İli'nde yer alan bu yüksek sıcaklık metamorfik rezervuar, Zorlu Enerji tarafından 2008 yılında devralınmış ve halen işletilmektedir. Kızıldere-I, II ve III adlı üç jeotermal güç santralini kapsamaktadır. Kızıldere-II'den çıkan yoğunlaşmayan gazların yaklaşık üçte biri, Linde isimli CO<sub>2</sub> işleme tesisine gönderilmektedir. GECO projesi kapsamında Zorlu Enerji, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmayı ve aynı zamanda rezervuarın sürdürülebilirliğini korumayı hedeflemektedir.

Proje süresince Kızıldere'de reenjeksiyon hattına 41,6 ton/saat debi ile CO<sub>2</sub> eklenerek suda çözünmesi sağlanmıştır. Toplamda 980 ton karbon dioksit geri basılmış ve basılan CO<sub>2</sub>'nin bir etkisi olarak kuyunun enjektivitesi asidik su basılması nedeniyle iki katına çıkarak 190 ton/saat'e çıkmıştır. Kızıldere için toplam yatırım maliyeti 810.000 € olarak verilmiştir.

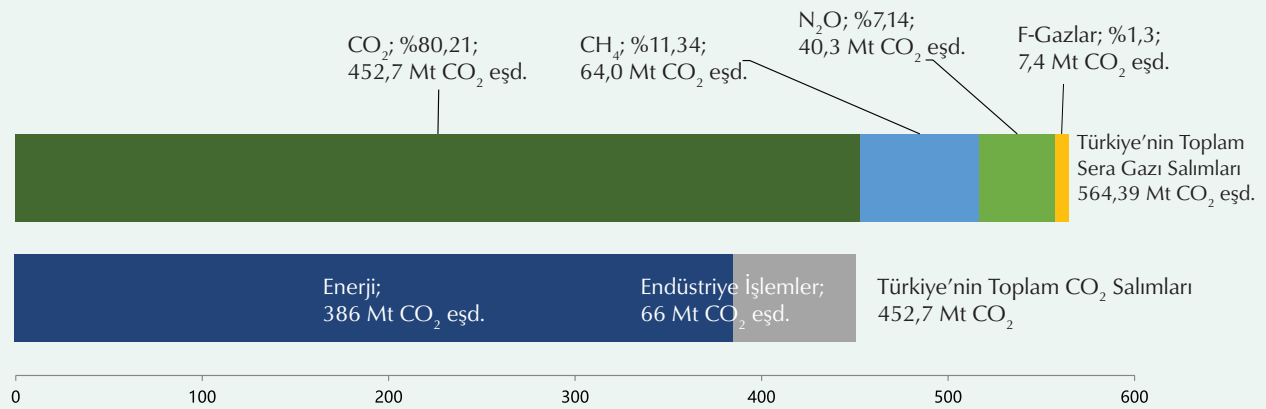
Kızıldere projesinde, pilot ölçekli bir KYKD projesi uygulanmakta ve bu proje, Hellisheiði projesine kıyasla daha yüksek bir Depolanan Karbon Seviyelendirilmiş Maliyeti (DKSM) göstermektedir. Kızıldere'deki bu maliyetin ton başına €19-63 arasında değiştiği ve baz senaryosunda €40 olduğu tahmin edilmektedir. Kızıldere projesinin ekonomik kırılma noktalarının, karbon fiyat senaryolarına bağlı olarak 8-30 yıl arasında değiştiği belirtilmiştir.

Benzer bir TÜBİTAK projesinde (Proje No: 119M942) de Aydın – Salavatlı jeotermal sahasında üretilen CO<sub>2</sub>'nin suda çözünerek rezervuara Şekil 36'da verilen sistem kullanılarak geri basılmasının etkileri çalışılmıştır. CO<sub>2</sub>, su içinde hızlı ve kolayca çözünen bir gazdır. Jeotermal işletmelerden atmosfere salınan CO<sub>2</sub>, bir kompresör aracılığıyla enjekte edilen suya basılır ve enjeksiyon kuyusuna basılmadan önce çözünme basıncının üzerine çıkana kadar sıkıştırılır. Enjeksiyon kuyularındaki artan basınç, pompalama ve kompresör işletme maliyetlerini artırır. İşletme maliyetlerini azaltmak ve re-enjeksiyon basıncını düşürmek için, basılmak istenen tüm karbondioksidin enjekte edilen tüm suda çözünmesi, en ekonomik çözüm olduğu belirtilmiştir. CO<sub>2</sub>'nin tamamının enjekte edilen akışkan içerisinde çözülmesi durumunda; 9.800 kg/sa olan CO<sub>2</sub>'nin tamamı 337 t/sa akışkan içinde çözündürülerek re-enjeksiyon kuyusuna basılmaktadır. Santral çıkışı jeotermal su için 80, CO<sub>2</sub> için 110 °C'dir. Tüm CO<sub>2</sub>'nin %100 çözünmesi için gereken basınç 50,5 bar'dır. Çözünme sonunda karışımın sıcaklığı 83,3 °C olmaktadır. Sistemin 10 bar giriş basıncında 337 t/sa sıcak suyu 50,5 bar basınca yükseltebilmek için 545 kW gücünde bir pompaya gereksinimi bulunmaktadır. Ayrıca, 9.800 kg/sa debide 10 bar giriş basıncında 110 °C sıcaklığa sahip CO<sub>2</sub>'yi 50,5 bar basınca sıkıştıracak kompresör için güç 498 kW gücündedir (Aksoy vd., 2017).

Şekil 36 | CO<sub>2</sub> enjeksiyon sistemi (Aksoy vd., 2017)

### 3.3. TÜRKİYE'DE POTANSİYEL KYKD SALIMLARI

Türkiye'de KYKD politikalarının ortaya konulmasında ülkenin CO<sub>2</sub> salım kaynaklarının ortaya konulması ve bunlar arasında öncelik oluşturulması önemlidir. KYKD gibi pahalı bir teknolojinin Türkiye'de sınırlı kullanımı olacağı değerlendirilmektedir. Türkiye'nin 1990 yılında 220 Mt CO<sub>2</sub>e olan sera gazı salımları 2020 yılında %138'lik bir artışla 524 Mt CO<sub>2</sub>e seviyesine yükselmiştir.<sup>15</sup> (Bk. Ek 1). Türkiye'nin salımları 2021 yılında 564 Mt CO<sub>2</sub>e'ye yükselmiştir. Bu salımlarının 452,7 milyon tonu CO<sub>2</sub> salımlarıdır. Toplam CO<sub>2</sub> salımlarının 386 Mt'u enerji sektörü ve 66 Mt'u endüstriyel işlemler kaynaklıdır. (Bk. Şekil 37)

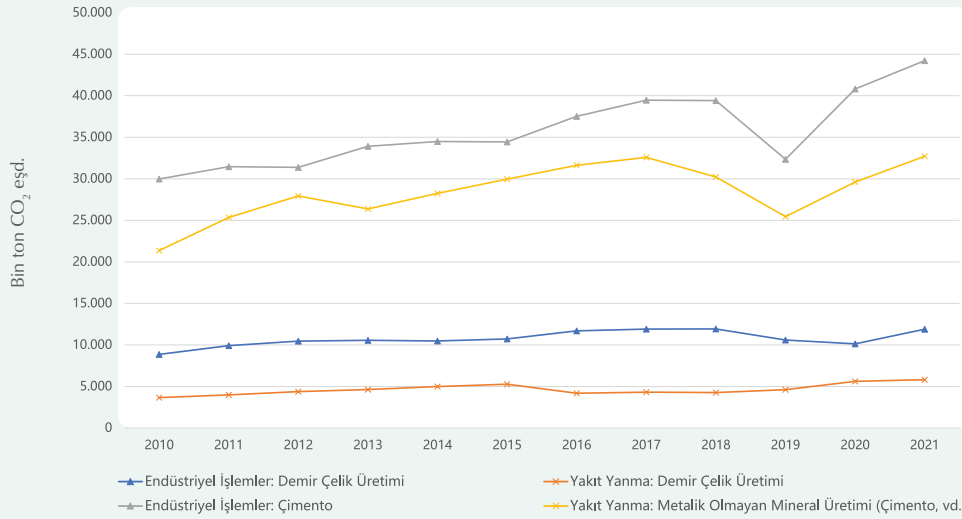
Şekil 37 | Türkiye'nin 2021 yılı Salımları içerisinde CO<sub>2</sub> Salımlarının Payı ve Ana Sektörleri<sup>16</sup>

<sup>15</sup> 2020 yılında AKAKDO sektörünün net karbon tutumu -57 Mt CO<sub>2</sub>e olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'nin 2020 yılı salımları, AKAKDO dahil edildiğinde 467 MT CO<sub>2</sub>e seviyesine gerilemektedir. Yıllar içerisinde yutak alan miktarda değişiklik göstermekle birlikte, 1990- 2020 arasında karbon tutumları yakın miktarda gerçekleşmiştir.

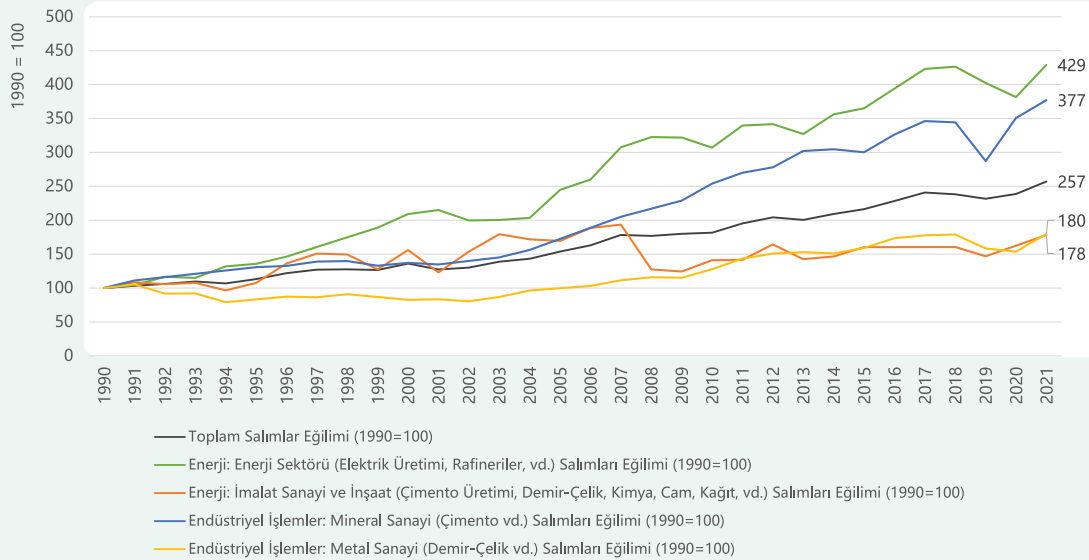
<sup>16</sup> Veri Kaynağı: TÜİK, 2022

CO<sub>2</sub> salımları içerisinde elektrik üretimi, demir-çelik üretimi ve çimento üretimi öne çıkmaktadır. Türkiye'nin toplam salımlarının 160 Mt CO<sub>2</sub> eşd.i enerji sektörü, 77 Mt CO<sub>2</sub> eşd.i metalik olmayan mineral ürünleri (çimento vd.) ve 18 Mt CO<sub>2</sub> eşd.i demir çelik sektörü kaynaklıdır. Metalik olmayan mineral ürünleri ve demir çelik sektörü salımları, endüstriyel işlemler ve yakıt yanma kaynaklıdır. (Bk. Şekil 38) Bu sektörlerin salımları 1990 yılından bu yana düzenli olarak artış göstermiştir. 1990 yılı değerleri 100 kabul edildiğinde, 2021 yılına elektrik üretimine ilişkin salımlar 429, mineral üretimi kaynaklı endüstriyel işlemlere ilişkin salımlar 377'ye ulaşmıştır. (Bk. Şekil 39)

**Şekil 38 | 1990-2021 Arasında Türkiye'nin Karbon Yakalamayla İlişkili Sektörlerinin Toplam Salımları<sup>17</sup>**

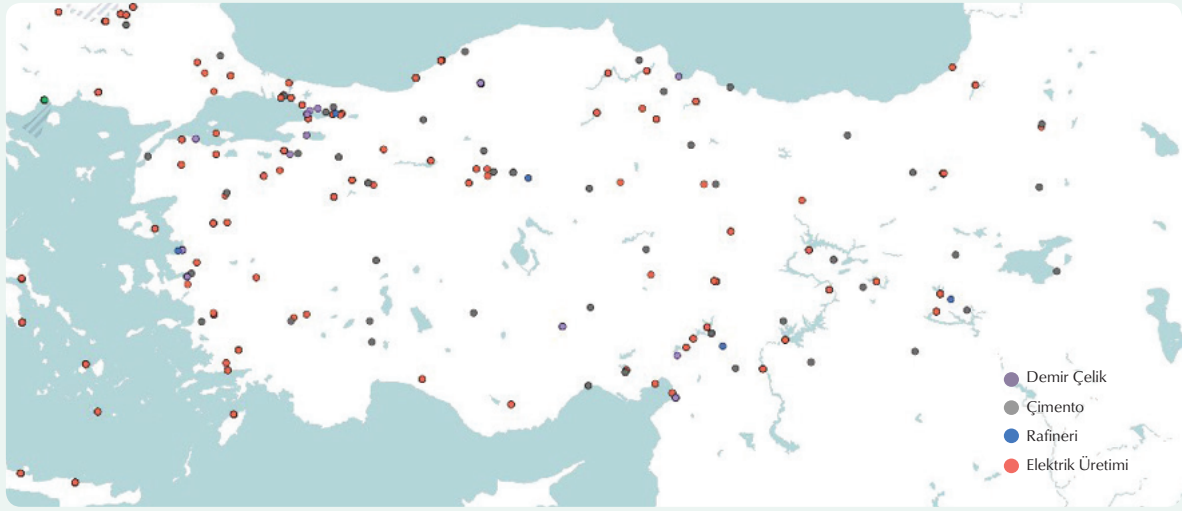


**Şekil 39 | 1990-2021 Arasında Türkiye'nin Karbon Yakalamayla İlişkili Sektörlerinin Salımlarında Değişim<sup>18</sup>**

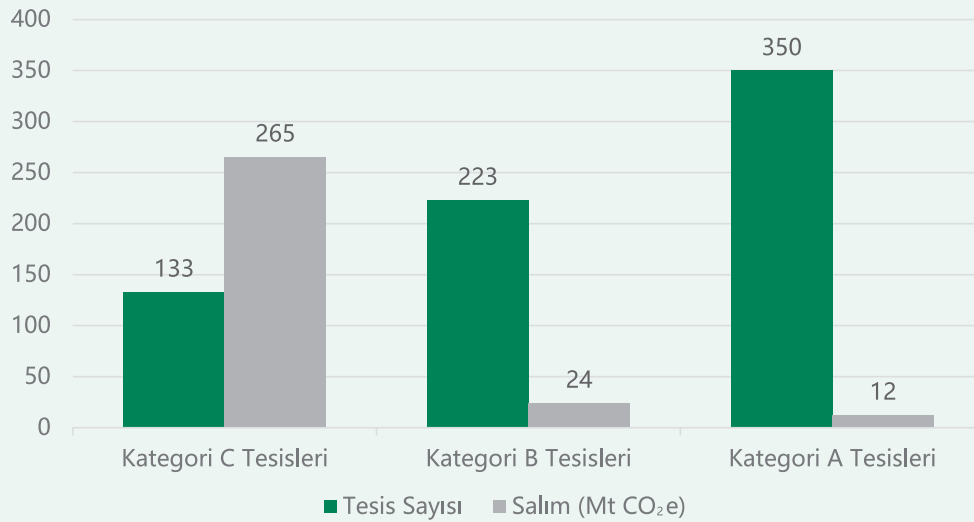


<sup>17</sup> Veri Kaynağı: TÜİK, 2022

<sup>18</sup> Veri Kaynağı: TÜİK, 2022

**Şekil 40 | Türkiye'nin Potansiyel Karbon Yakalama Tesisleri<sup>19</sup>**

Tesislerin sektör bazlı dağılımları da bilinmektedir. (Bk. Şekil 40) Takip eden şekillerde Türkiye'nin çimento tesislerinin ve demir-çelik tesislerinin haritaları paylaşılmaktadır. Buna karşın, bu tesislerin salım miktarları, işleten şirketler tarafında yasal yükümlülükleri kapsamında hesaplanmakla birlikte, büyük çoğunluğu tarafında kamuya açılmamaktadır. Nihai olarak Türkiye'de 133 büyük tesis, Türkiye'nin toplam salımlarının yarısına yakınıni gerçekleştirmektedir. Türkiye'nin olası KYKD teknolojilerinin kullanımında bu tesisler ön planda olacaktır. (Bk. Şekil 41)

**Şekil 41 | Türkiye'nin MRV Tesisleri (Potansiyel ETS Tesisleri)<sup>20</sup>**

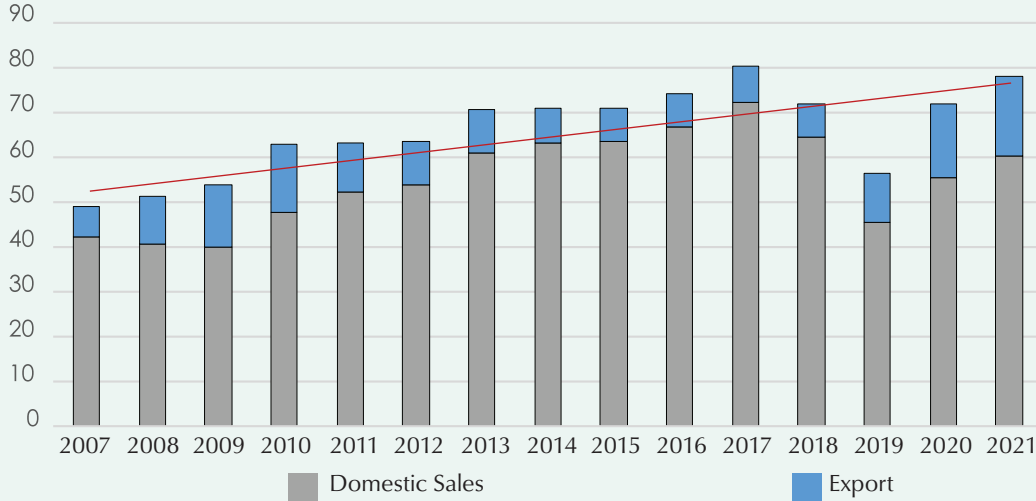
<sup>19</sup> IEA (2021), The world has vast capacity to store CO<sub>2</sub>: Net zero means we'll need it, IEA, Paris <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>

<sup>20</sup> 8. Ulusal Bildirim ve 5. İki Yıllık Rapor, Türkiye Cumhuriyeti

### 3.3.1. Çimento Sektörü

Türkiye'nin çimento sektörü kaynaklı salımları artmaya devam etmektedir. (Bk. Şekil 42) Yakın gelecekte de Türkiye'nin salımlarındaki artışın, çimento üretimine bağlı olarak artmaya devam edeceği öngörülmektedir.

Şekil 42 | Türkiye'nin Çimento Üretimi<sup>21</sup>



Türkiye'de çimento tesisleri ülkenin çoğu bölgesinde mevcuttur. (Bk. Şekil 43) Bu durum, çimento sektörü tesislerini KYKD için uygun salım kaynakları haline getirmektedir. Bilinen depolama kapasitesinin yoğunlaştığı Güney Doğu Anadolu Bölgesinde çimento tesisleri kuruludur.

Şekil 43 | Türkiye'de Kurulu Çimento Tesisleri<sup>22</sup>



<sup>21</sup> Veri Kaynağı: TÜRKÇİMENTO, 2022

<sup>22</sup> TÜRKÇİMENTO, 2022

Çimento fabrikaları için genellikle en uygun karbon yakalama teknolojisi olarak yanma sonrası yakalama yöntemi öne çıkmaktadır. Bu yöntemin tercih edilmesinin birkaç önemli sebebi vardır. İlk olarak, bu teknoloji mevcut çimento üretim tesislerine entegre edilmesi açısından esneklik sunar, yani yeni tesisler inşa etmek yerine mevcut tesislerin modernizasyonu için daha uygun bir teknolojidir. Teknolojik olarak da daha olgun bir yöntem olduğu için, endüstriyel ölçekte uygulamalarda daha güvenilir ve test edilmiş bir çözüm haline gelmiştir.

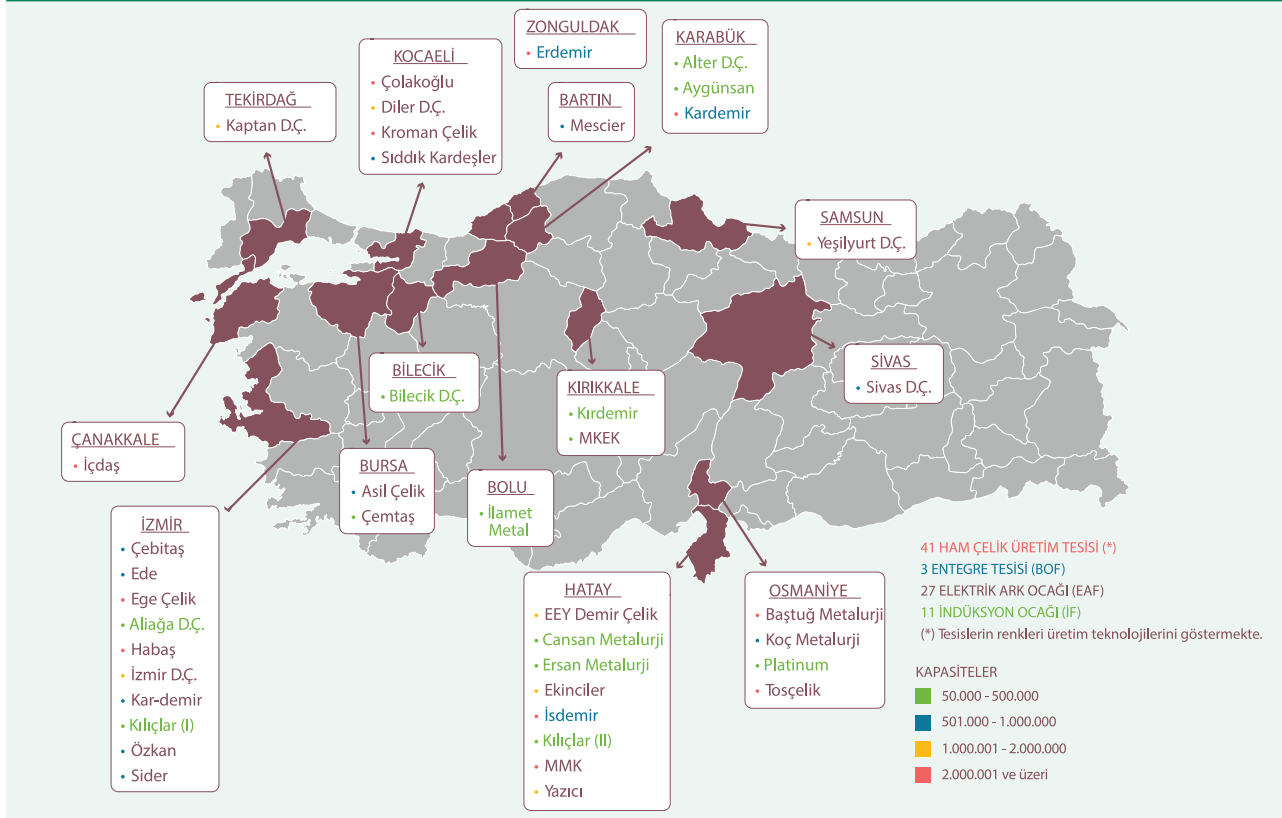
Yanma sonrası yakalama, çimento üretiminde kullanılan çeşitli yakıtlarla uyumlu çalışabilir. Bu, çeşitli yakıt türlerine esnek bir şekilde uyum sağlayabilen bir teknoloji olduğunu gösterir. Ayrıca, oksijen-yakıt yakma gibi alternatif yöntemlerin aksine, yüksek saflıkta oksijen gereksinimi olmaması bu teknolojiyi daha cazip hale getirmektedir.

Çimento fabrikalarının baca gazlarında genellikle daha düşük karbon dioksit konsantrasyonları bulunur ve yanma sonrası yakalama bu tür gazlar için daha etkili bir çözüm sunmaktadır.

### 3.3.2. Demir-Çelik Sektörü

Türkiye'nin demir-çelik sanayi salımları da artmaktadır. Çimento sanayinin aksine, Türkiye'nin demir-çelik üretimi sınırlı sayıda ilde bulunmaktadır. (Bk. Şekil 44) Ayrıca Türkiye'de demir-çelik tesislerinin büyük bölümü elektrikli ark ocakları kullanmaktadır. Bu tesislerin de KYKD potansiyeli düşüktür. Türkiye'de Erdemir, İsdemir ve Kardemir olmak üzere üç adet entegre tesis bulunmaktadır. Bu tesislerde İsdemir Güneydoğu Anadolu bölgesine yakındır. Ayrıca potansiyel sahalar ile İskenderun arasında mevcut petrol boru hatları bulunmaktadır.

Şekil 44 | Türkiye Çelik Haritası



<sup>23</sup> Dursun Baş, IPM, Türkiye Çelik Sektörünün Karbonsuzlaşması: Mevcut Durum, Veri Kaynağı: TÇÜD

Entegre demir çelik tesislerinde proseslerde yan ürün olarak açığa çıkan kok, yüksek fırın, çelikhane ve konverter gazlarının kullanım sonrası artan kısmının değerlendirilerek, elektrik enerjisi üretmek için enerji santrallerine gönderilmektedir. Bu kapsamda proses gazlarından elektrik enerjisi üretiminin gelecek dönemlerde de devam edeceği varsayılarak, CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırılması ve depolanması amacı ile Stepwise projesi bulunmaktadır. STEPWISE, Avrupa'nın H2020 LCE programı altında yürütülen bir projedir ve demir çelik sektöründe CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmayı hedefleyen bir girişimdir. Bu proje, demir çelik üretimi sırasında CO<sub>2</sub>'yi yakalayıp uzaklaştırmak için geliştirilen bir yanma öncesi karbon dioksit giderme teknolojisini test etmektedir. Bu teknoloji, yüksek fırın gazlarının karbondioksitten arındırılmasını ve elde edilen gazın daha sonra elektrik üretimi için kullanılmasını içeren bir sistem üzerine kuruludur.

CO<sub>2</sub>'nin bu süreçte giderilmesi, rejeneratif katı adsorbanlar kullanılarak yapılan bir ileri CO<sub>2</sub> giderme teknolojisi ile sağlanmaktadır. Bu teknoloji, yüksek sıcaklıklarda CO<sub>2</sub>'nin seçici katı adsorbanlar üzerinde tutulmasını ve su gazı değişim reaksiyonu ile buharla etkileşime girerek CO<sub>2</sub>'nin karbonmonoksit, CO<sub>2</sub> ve hidrojen (H<sub>2</sub>) gazlarına dönüştürülmesini içerir. Bu işlem, elektrik üretiminde kullanılabilecek hidrojen açısından zengin ve yüksek basınçlı bir gaz akışı üretir. Katı adsorbanın basınç salımı yoluyla yeniden canlandırılması, taşınması ve depolanması kolay CO<sub>2</sub> açısından zengin bir ürün elde edilmesine yol açar (TÜBİTAK, 2023).

### 3.3.3. Termik Santraller

Karbon yakalama teknolojileri, termik santrallerde sera gazı emisyonlarını azaltmak için önemli bir rol oynamaktadır. Enerji sektörü fosil yakıtların yoğun olarak kullanıldığı bir sektördür ve KYKD yöntemlerinin özellikle termik santrallerde uygulanması iklim değişikliği ile mücadele için gerekli bir adımdır. Termik santrallerde uygulanması en kolay olan yöntemlerin başında yanma sırasında oluşan egzoz gazından CO<sub>2</sub>'nin organik amin içeren sıvılarla temas ettirilerek ayrıştırılmasına dayanan yanma sonrası yakalama gelmektedir. Ancak bu yöntem oldukça enerji tüketen bir yöntemdir. Kömür tüketen santrallerde, yakıtın yanmasından önce kömürün basınç altında ısıtılarak sentez gazına dönüştürülerek CO<sub>2</sub>'nin ayrıştırılması da uygulanabilir bir yöntemdir. Ülkemizdeki termik santrallerde tüketilen fosil yakıtlar ile yapılan çalışmalarda termik santraller için karbon yakalama teknolojisi olarak "oksijence zengin yakma" yöntemi önerilmektedir (Kayahan, 2017). Bu yöntem, yanma havasındaki oksijen derişiminin artırılması esasına dayanmakta ve mevcut santrallere uygulanabilecek bir karbon tutma ve depolama alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada iki farklı Türk linyiti ve bir biyokütle, ayrıca bu malzemelerin karışımları kullanılarak testler yapılmıştır, burada biyokütle oranı %20'ye kadar artırılmıştır. Yanma havasındaki oksijen oranı ise %21 ile %30 arasında değişkenlik göstermiştir. Teknolojinin mali açıdan değerlendirilmesi amacıyla çeşitli hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Çan akışkan yatak güç santralinde uygulanabilecek dört farklı karbon tutma yöntemi incelenmiştir: a) MEA bazlı bir karbon tutma ünitesinin santrale eklenmesi, b) Yakıcının oksijenle zenginleştirilmiş yakma ünitesine çevrilmesi, c) Yakıcının oksi-yakma ünitesine (baca gazı geri dönüşümü ile) dönüştürülmesi, d) Yakıcının oksijenle zenginleştirilmiş biyokütle ile yakma ünitesine dönüştürülmesi.

Yapılan deneyler sonucunda, oksijence zenginleştirme işleminin her durumda yanma performansını artırdığı anlaşılmıştır. Özellikle biyokütle ile birlikte yakma durumunda, biyokütle oranının ve oksijen derişiminin artırılmasının birbirini destekleyen bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, oksijen konsantrasyonunun artmasıyla NO ve SO<sub>2</sub> emisyonlarının da arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, biyokütle eklenmesinin NO emisyonlarını artırırken SO<sub>2</sub> emisyonlarını azalttığı gözlemlenmiştir.

### 3.3.4. Diğer Tesisler

Rafineriler için en uygun yakalama teknolojisinin yenilenebilir amin bazlı solvent ile gerçekleştirilen metot olduğu değerlendirilmektedir. Bu yöntem hem yüksek CO<sub>2</sub> yakalama verimliliğine sahip, hem de yüksek saflıkta CO<sub>2</sub>

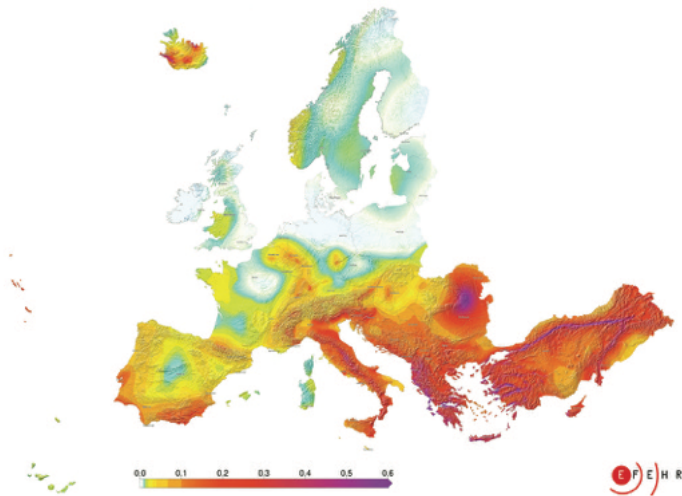
üretebilmesine olanak tanımaktadır. Ancak istenilen CO<sub>2</sub> yakalama performansı için SO<sub>2</sub> başta olmak üzere H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, ve O<sub>2</sub> bileşenlerinin ön işlemlerle uzaklaştırılması gereklidir. Yöntemin bir diğer özelliği ise proses sırasında solvent kullanılması nedeniyle sürekli bir atık oluşumunun gerçekleşmemesidir. Teknolojinin ticari adı Cansolv olarak isimlendirilmektedir. Bu teknoloji tek bir emisyon kaynağına (rafineri bacası) kurulabildiği gibi, birden fazla kaynağın birleştirilmesi sonrasında da uygulanabilmektedir. Rafineri emisyon gazının içeriği işlenen ham petrolün özellikleri ve rafinerinin çalışacağı ürün spektrine göre değişebilmektedir. Cansolv teknolojisini tasarım aralığında değişen gaz kompozisyonlarına esneklik gösterebilmektedir (TÜPRAŞ, 2023).

### 3.4. TÜRKİYE'NİN DEPOLAMA POTANSİYELİ

Türkiye'deki CO<sub>2</sub> depolama kapasitesinin belirlenmesine yönelik çalışmalar bulunmasına rağmen, bu çalışmalar hem çok kapsamlı değildir hem de halka açık bilgi sınırlıdır. Adıyaman, Trakya ve Batı Karadeniz bölgelerinde yüksek kapasiteye sahip uygun tuzlu su akiferlerinin bulunduğu belirtilmektedir. Bunun yanında görece daha düşük kapasiteye sahip olmasına rağmen, çok daha detaylı bilginin bulunduğu petrol ve gaz sahaları için çalışmalar yapılmıştır.

Türkiye için CO<sub>2</sub> Depolama Kapasitesi belirlenmesi için yapılan ilk çalışma ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi ve TPAO'nun Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Enerji İşleri Genel Müdürlüğü için yapmış oldukları Tübitak KAMAG projesi "Türkiye'de Termik Santraller ve Sanayi Tesislerinden Gelen Karbondioksit Emisyonu Envanterinin Çıkarılması ve Karbondioksitin Yeraltı Jeolojik Ortamlarda Depolanma Potansiyelinin Belirlenmesi" projesidir.

Bu projenin amacı, Türkiye'de termik santraller ve diğer sanayi tesislerinden gelen karbondioksit emisyonlarının envanterini çıkarmak ve bu CO<sub>2</sub>'nin yeraltı jeolojik ortamlarda depolanma potansiyelini belirlemektir. Çalışmaya, 500 MW üzerinde kurulu gücü olan termik santraller, çimento fabrikaları, demir çelik endüstrisi, şeker fabrikaları ve rafineriler dahil edilmiştir.



Türkiye'nin, KYKD uygulaması açısından karşılaştığı başlıca sorunlardan biri de yüksek riskli deprem coğrafyasında yer almasıdır. (Avrupa Sismik Tehlike Haritası<sup>24</sup>) Bu doğal afet tesisleri ciddi şekilde tehdit etmekte ve önlemler için yapılması gereken yatırım maliyetlerini arttırmaktadır. 2013 yılında gerçekleştirilen Avrupa Sismik Risk Projesi kapsamında oluşturulan sağda gösterilen Harita incelendiğinde, Türkiye'nin büyük bir kısmının deprem açısından riskli olduğu görülebilir. Türk Hükümeti sismik olarak aktif alanlarda CO<sub>2</sub> depolanmasına izin vermemeyi tercih edebilir.

Proje kapsamında hem petrol ve gaz sahaları hem de uygun gözeneklilik, geçirgenlik, litoloji, derinlik vb. özelliklerine sahip akiferler araştırılmıştır. Adıyaman çevresi, Trakya bölgesi ve Batı Karadeniz'de uygun sahaların bulunduğu tespit edilmiştir. Ancak, gizlilik kararı olması nedeniyle ne miktarda bir depolama kapasitesine ulaşıldığı hakkında bilgi bulunmamaktadır. Batı Raman sahasına 1986 yılından beri yapılan CO<sub>2</sub> enjeksiyonu

için gerekli olan CO<sub>2</sub>'nin üretildiği doğal CO<sub>2</sub> rezervuarı olan Dodan sahasının depolama yapmak için uygun bir aday olduğu projede belirtilmektedir. Dodan sahasının CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi 16 Mt olarak değerlendirilmiştir (Okandan vd., 2009).

<sup>24</sup> [http://www.share-eu.org/sites/default/files/SHARE\\_Brochure\\_public.web\\_.pdf](http://www.share-eu.org/sites/default/files/SHARE_Brochure_public.web_.pdf)

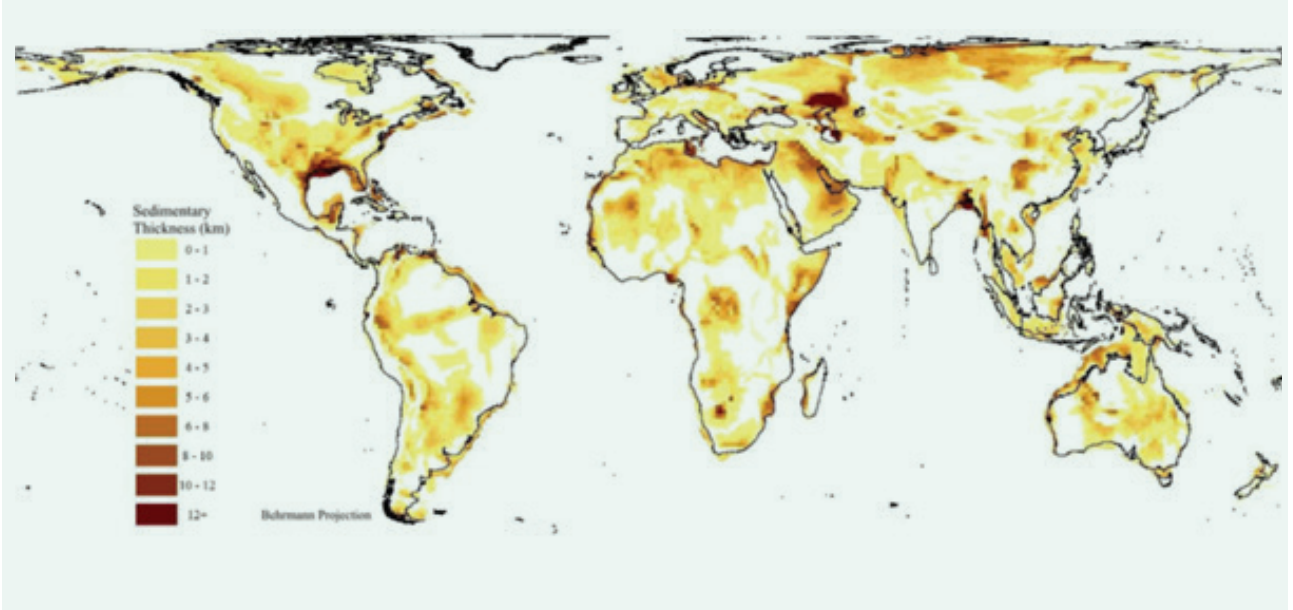
“Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Yardım Projesi” adı altında yürütülen bir çalışma kapsamında, Avrupa Birliği direktifinin Türkiye'deki mevzuata entegrasyonu için çalışmalar yapılmıştır. Bu proje, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Human Dynamics, Bölgesel Çevre Merkezi (REC) Türkiye ve Agriconsulting Europe S.A. (AES) Konsorsiyumu tarafından yürütülmüştür. Proje çerçevesinde gerçekleştirilen çalışmalardan bir tanesi de Türkiye'deki hidrokarbon sahalarının CO<sub>2</sub> depolama kapasitesinin belirlenmesidir.

ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi tarafından yürütülen çalışmada, Batman (62 saha), Adıyaman (38 saha) ve Trakya (3 saha) Bölgelerindeki sahalarla ait mevcut rezervuar sıcaklığı, orijinal rezervuar basıncı, formasyon suyu tuzluluğu ve yerinde petrol miktarı gibi veriler kullanılarak her bir saha için karbondioksit depolama kapasiteleri hesaplanmıştır. Kullanılan petrol formasyon hacim faktörleri, literatürde yer alan çalışmaların sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Rezervuar basınç ve sıcaklık koşullarındaki CO<sub>2</sub> yoğunluk değerleri, The National Institute of Standards and Technology (NIST) Chemistry WebBook veri tabanından elde edilmiştir. Karbondioksitin formasyon suyundaki çözünürlüğü, Carnegie Mellon Üniversitesi İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nün CO<sub>2</sub> Çözünürlük Hesaplama web sayfası ile çeşitli çözünürlük modelleri kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Batman, Adıyaman ve Trakya Bölgelerindeki sahalarla yaklaşık olarak toplam 108.718.662,19 ton CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi olduğu tahmin edilmektedir. En yüksek depolama kapasitesine sahip bölgenin TPAO Batman Bölge Müdürlüğü'ne bağlı olan sahalar olduğu Tablo 1'da görülmektedir.

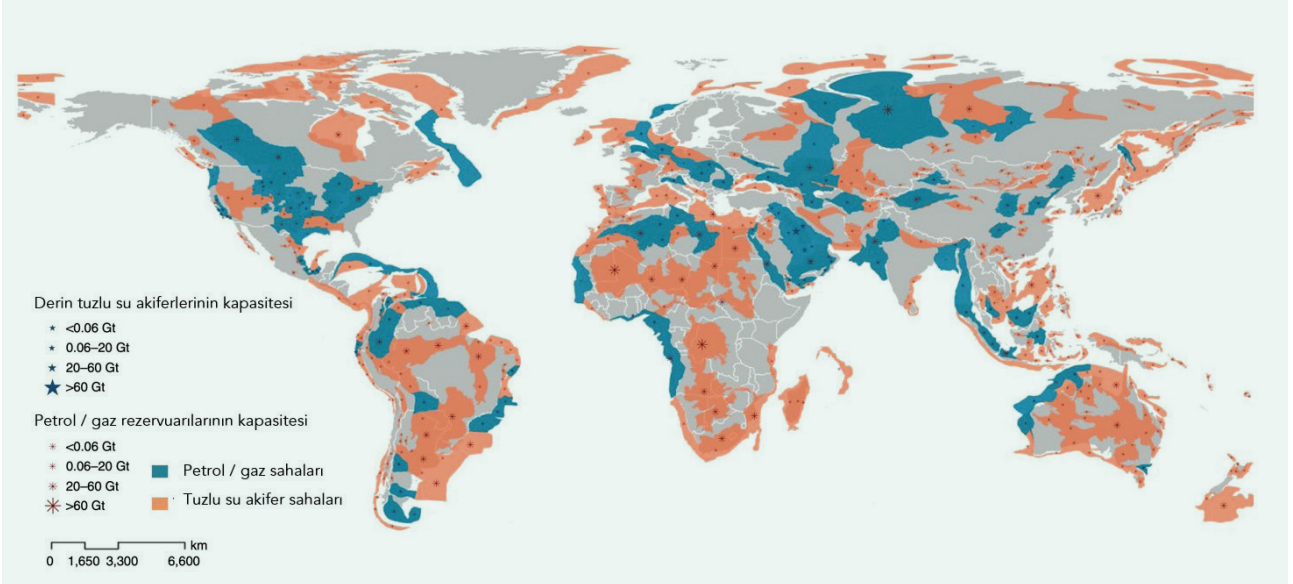
**Tablo 1 | Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Yardım Projesi kapsamında belirlenen hidrokarbon sahaları CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi (Low Carbon Turkey, 2019).**

|                                                      | Depolanabilecek CO <sub>2</sub> Miktarı (Mton) |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Batman Bölgesi                                       | 79,5                                           |
| Adıyaman Bölgesi                                     | 28,7                                           |
| Trakya Bölgesi                                       | 0,5                                            |
| Depolanabilecek Toplam CO <sub>2</sub> Miktarı (ton) | 108,7                                          |

Görüldüğü üzere hidrokarbon sahaların CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi Türkiye'nin CO<sub>2</sub> emisyonlarının yakalanması halinde yeterli bir hacim sağlamamaktadır. Türkiye'de özellikle emisyon kaynaklarının bulunduğu Marmara ve Batı Anadolu Bölgelerinde CO<sub>2</sub> depolamak için uygun derin tuzlu su akiferlerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda Dünya çapında CO<sub>2</sub> depolama alanlarını belirlemeyi amaçlayan ve IEA Greenhouse Gas R&D Programme tarafından geliştirilen ve mevcut verilerin eksikliklerine ve uyumsuzluklarına rağmen kullanılabilir bir depolama kapasitesi sunan ve sadece bölgedeki tortul havzaların kapladığı alanı hesaba katan metot ile yapılan çalışmalar bir bilgi verebilir. Bu alanın yarısının yeterli bir mühürle kaplandığı ve tortul katmanın ortalama net kalınlığının 100 metre olduğu varsayılır (Şekil 45). Bu hacme bir depolama verimlilik faktörü uygulanarak depolama kapasitesi tahmin edilir. Bu metodoloji, her bir kilometrekarelik tortul havzanın alanı için ortalama olarak 0.1 ile 1 milyon ton arasında CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi sağladığını öne sürmektedir. Bu basit metodoloji, CO<sub>2</sub> depolaması için uygun jeolojik koşulların (yeterli kalınlık, uygun derinlik, geçirimsiz kapan kayaç varlığı, yüksek geçirgenlik gibi) yeterince büyük alanlar üzerinde rastgele dağıldığını varsayar. Çalışmada, Türkiye'nin içinde bulunduğu grup Diğer Avrasya (ROE) olarak adlandırılmıştır. Bu grupta yer alan ülkeler Arnavutluk, Karadağ, Ukrayna, Belarus, Türkiye, Gürcistan, Ermenistan, Azerbaycan, Kazakistan, Özbekistan, Kırgızistan ve Türkmenistan'dır. Tüm bu ülkelerin düşük ve yüksek tahmin olarak CO<sub>2</sub> depolama kapasiteleri sırasıyla 485 Gt ve 3410 Gt olarak verilmektedir (Kearns vd., 2017).

**Şekil 45 | Dünya tortul kayaçları ve kalınlıkları (Kearns vd., 2017)**

2021 yılında yayınlanan bir çalışma Dünya genelinde petrol ve akifer alanlarını ortaya koymaktadır. Çalışmaya göre Karadeniz’de karbon depolamaya uygun akifer alanları bulunmaktadır. (Bk. Şekil 46)<sup>25</sup> Daha net bir depolama kapasitesinin Türkiye için belirlenmesi için Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) gibi yer bilimleri alanında çalışan devlet kurumları ve ulusal şirketlerin deneyimlerine ve verilerine ihtiyaç bulunmaktadır.

**Şekil 46 | Dünya’da Karbon Depolama Potansiyel Sahaları (Wei vd., 2021)**

<sup>25</sup> Wei, YM., Kang, JN., Liu, LC. et al. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2°C climate target. Nat. Clim. Chang. 11, 112–118 (2021).

Türkiye'de özellikle CO<sub>2</sub>-EOR alanındaki bilgi birikimi ve teknolojinin yüksek seviyede olması nedeniyle, yakalanan CO<sub>2</sub>'nin öncelikli olarak petrol kurtarımını artırmak amaçlı geliştirilmiş petrol üretim teknolojilerine yönlendirileceği değerlendirilmektedir. Bu konuda en temel zorluk petrol sahalarının karbon emisyon noktalarına olan uzaklığıdır. Ancak henüz uygun tuzlu su akiferlerinin yerleri ve potansiyeli konusunda yeterli çalışma yapılmamış olması, ayrıca CO<sub>2</sub>-EOR teknolojilerinin petrol kurtarımı nedeniyle maliyeti düşürücü etkisi olması bu tür bir iş planının daha gerçekçi olacağını düşündürmektedir. Ancak bu kapsamda yürütülecek faaliyetleri iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamayaacağı gibi KYKD uygulaması olarak da değerlendirilemeyecektir.

### 3.5. KYKD'NİN TÜRKİYE İÇİN MALİYETİ

Türkiye'de KYDK'ya ilişkin çok sınırlı çalışma bulunmaktadır. 2009 yılında gerçekleştirilen Tübitak KAMAG projesi "Türkiye'de Termik Santraller ve Sanayi Tesislerinden Gelen Karbondioksit Emisyonu Envanterinin Çıkarılması ve Karbondioksitin Yeraltı Jeolojik Ortamlarda Depolanma Potansiyelinin Belirlenmesi" bu alandaki en önemli projedir. Bu proje, Türkiye'de termik santraller ve diğer sanayi tesislerinden gelen karbondioksit emisyonlarının envanterini çıkarmayı ve bu CO<sub>2</sub>'nin yeraltı jeolojik ortamlarda depolanma potansiyelini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, 500 MW üzerinde kurulu gücü olan termik santraller, çimento fabrikaları, demir çelik endüstrisi, şeker fabrikaları ve rafinerilerden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyon miktarlarını hesaplamayı ve bu emisyonların depolanabileceği potansiyel yeraltı alanlarını belirlemeyi içerir.

Projede, Çaylarbaşı petrol sahası, CO<sub>2</sub> depolama ve ek petrol üretimi için uygun bir yer olarak seçilmiştir. Buraya yakın bir çimento fabrikasından gelen emisyonlar kullanılarak CO<sub>2</sub> enjeksiyonu ve depolaması modellenmesi yapılmıştır. Proje, CO<sub>2</sub> depolamanın jeolojik ve sayısal modellerini incelerken ekonomik değerlendirmeler de yapmaktadır.

Ana hedef, Türkiye'deki uygun yeraltı yapılarını ve bu yapıların depolama kapasitelerini tespit etmek ve seçilen bir sahada CO<sub>2</sub>'nin yeraltına enjeksiyonunun detaylarını incelemektir. Projede, termik santraller ve diğer sanayi tesislerinden gelen yıllık yakıt miktarı ve türleri, CO<sub>2</sub> emisyonlarının IPCC Tier 1 metoduna göre hesaplanması, Türkiye'de CO<sub>2</sub> depolanabilecek yapıların incelenmesi, CO<sub>2</sub> enjeksiyonu ve depolamasının modellenmesi, sanayi tesisinden CO<sub>2</sub>'nin taşınması ve depolanmasının teknik ve ekonomik analizi gibi aşamalar yer almaktadır.

Projeyi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Petrol Araştırma Merkezi ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı yürütmüş, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Enerji İşleri Genel Müdürlüğü ise müşteri kurum olarak görev almıştır.

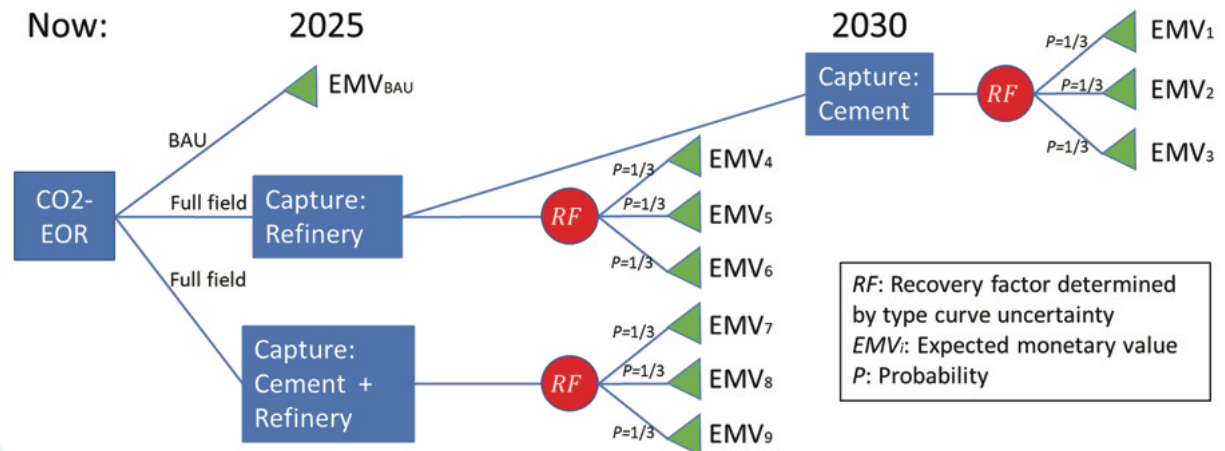
Modelleme çalışması sonucunda, CO<sub>2</sub> enjeksiyon döngüsünün 20 yıl sürdüğü ve bu süre içinde 8 yıl boyunca 2 milyon varil petrol üretimi ve 280 milyon Sm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>'nin depolanabileceği belirlenmiştir. Taşıma aşaması, boru hattı ve tankerlerle taşıma olarak iki alternatif ile tasarlanmıştır. Tankerle taşımanın yatırım maliyeti 34 milyon ABD doları ve aylık işletme maliyeti 408.000 ABD doları olarak hesaplanmıştır. Bu yöntem, proje süresi ve taşınacak CO<sub>2</sub> miktarı göz önünde bulundurulduğunda daha uygulanabilir olarak değerlendirilmiştir. Boru hattı ile taşımanın yatırım maliyeti ise 53,5 milyon ABD doları ve aylık işletme maliyeti 414.000 ABD doları olarak belirlenmiştir. Boru hattı ile taşımanın maliyeti tankerle taşımaya göre daha yüksek olmasına rağmen, sürekli ve büyük miktarlardaki CO<sub>2</sub> taşınması için daha uygun bir yöntem olabilir. Bu iki taşıma yöntemi arasında seçim yapılırken, taşınacak CO<sub>2</sub> miktarı, taşıma mesafesi, maliyetler ve proje süresi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, küçük miktardaki CO<sub>2</sub> için ve proje süresini göz önünde bulundurarak tankerle taşıma daha uygun bulunmuştur.

Sonuç olarak, projede yapılan değerlendirmeler Türkiye'nin dünya CO<sub>2</sub> emisyonlarının sadece %1'inden sorumlu olduğunu göstermekte, bilinen petrol ve gaz rezervuarlarının sadece küçük endüstriyel sahaların CO<sub>2</sub> emisyonlarını muhafaza edebileceğini belirtmektedir. Ayrıca, projede CO<sub>2</sub>'nin taşınması ve depolanmasının teknik ve ekonomik uygulanabilirliği de incelenmiştir. Proje kapsamında hem petrol ve gaz sahaları hem de uygun gözeneklilik, geçirgenlik, litoloji, derinlik vb. özelliklerine sahip akiferler araştırılmıştır. Adıyaman çevresi, Trakya bölgesi ve Batı Karadeniz'de uygun sahaların bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 47). Dodan doğal CO<sub>2</sub> sahası 18 Mt CO<sub>2</sub> depolama kapasitesine sahip bir depolama seçeneği olarak önerilmiştir (Okandan vd, 2011).

Şekil 47 | Türkiye'deki olası CO<sub>2</sub> depolama alanları (Okandan vd., 2011)

2017 – 2020 yılları arasında gerçekleştirilen AB ERANET ACT projelerinden ECO-BASE- “Establishing CO<sub>2</sub> Enhanced Oil Recovery Business Advantages in South-Eastern Europe” projesinin amacı, verileri tarayarak karbon yakalama, kullanma ve depolama (KYKD) uygulamalarının yaygınlaştırılmasını desteklemek, KYKD yollarını geliştirmek ve Güneydoğu Avrupa’da (GDA) potansiyel CO<sub>2</sub> Zenginleştirilmiş Petrol Kurtarma (CO<sub>2</sub>-EOR) pilot proje olanaklarını araştırmaktır. ECO-BASE, KYKD'nin CO<sub>2</sub>-EOR yoluyla potansiyelini değerlendirmek için bir dizi faaliyet yoluyla çalışmıştır. Proje sonunda belirlenmiş olan proje önerisi Batman Rafinerisinden ve Siirt Kurtalan’da yer alan çimento fabrikasından yakalanan CO<sub>2</sub>’nin Batı Raman petrol sahasına enjeksiyonu ile petrol kurtarımının artırılmasını hedeflemektedir. Bu projeye 5 ülkeden 7 partner katılmıştır. Türkiye’de ODTÜ-Petrol Araştırma Merkezi partner olarak projeye dahil olmuştur. Modelleme yaklaşımı belirlendikten sonra, Türkiye için modelleme sürecini yönlendirmek için kullanılan potansiyel iş modeli ağacı (Şekil 48) oluşturuldu.

Şekil 48 | ECO-BASE projesinde belirlenmiş olan karar ağacı (ECO-BASE, 2020)



Yapılan çalışmalar neticesinde Tablo 2'de verilen Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası için toplam tahmini emisyon miktarlarına ulaşılmıştır.

**Tablo 2 | Hesaplanan emisyon miktarları**

|                                              | Batman Rafinerisi            | Kurtalan Çimento Fabrikası   |
|----------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Toplam tahmini emisyon                       | 0,269 MtCO <sub>2</sub> /yıl | 0,404 MtCO <sub>2</sub> /yıl |
| Yakalama faktörü                             | 0,5                          | 0,8                          |
| Tahmini CO <sub>2</sub> yakalama potansiyeli | 0,134 MtCO <sub>2</sub> /yıl | 0,323 MtCO <sub>2</sub> /yıl |

Batı Raman sahasında CO<sub>2</sub> kullanımının nasıl gerçekleştirileceği seçilirken, dört farklı karar yolu simüle edildi, her zamanki şekilde devam etmek (yani Dodan'ı tüketmek), 2025'ten itibaren Batı Raman rafinerisinden CO<sub>2</sub> satın almak ve 2030'da Kurtalan çimento fabrikasından CO<sub>2</sub> tedarik etme seçeneği veya her iki CO<sub>2</sub> kaynağından 2025'ten itibaren CO<sub>2</sub> tedarik etme seçeneği. Temel petrol fiyat senaryosu için sonuçlar neredeyse aynı bulundu, ancak petrol fiyatı yüksek eğilimi takip ettiğinde, 2025'ten itibaren rafineri yakalama ve aynı anda rafineri ve çimento fabrikasından yakalama, en karlı ve finansal riski en düşük olan seçenekler olarak belirlendi. Türkiye için anahtar performans göstergelerinin genel bir özeti, 10% iskonto oranıyla üretimin son yılı için NPV ve diğer parametrelerle birlikte Tablo 3'de sunulmaktadır. Sahadaki toplam depolama kapasitesinin, tahmini olarak 16 milyon ton CO<sub>2</sub>'ye ulaşacağı beklenmektedir (ECO-BASE, 2020).

**Tablo 3 | Türkiye için anahtar performans göstergeleri (ECO-BASE, 2020)**

|                                                 | Baz senaryo | Rafineri 2025 | Rafineri 2025<br>Çimento 2030 | Rafineri ve Çimento<br>2025 |
|-------------------------------------------------|-------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Üretim bitiş tarihi                             | 2.026,4     | 2037          | 2040                          | 2036                        |
| NPV, M€                                         | 116,6       | 197,7         | 287                           | 410,4                       |
| Toplam petrol satış, M€                         | 322,8       | 663,8         | 930,3                         | 1165,7                      |
| Toplam vergi, M€                                | -74,1       | -132,6        | -189                          | -249,4                      |
| Ort. Petrol üretim maliyeti, €/bbl              | 23,6        | 31,2          | 29,4                          | 26,5                        |
| Toplam CO <sub>2</sub> maliyeti, M€             | -6          | -57,5         | -112,8                        | -151,1                      |
| Toplam depolanan CO <sub>2</sub> , Mt           | 0,6         | 2,1           | 5,5                           | 5,38                        |
| CO <sub>2</sub> sayesinde üretilen petrol, Mbbl | 6,83        | 20,32         | 37,09                         | 36,87                       |
| Toplam ek üretim                                | 0,0037      | 0,011         | 0,02                          | 0,0199                      |

Geliştirilmiş petrol kurtarımını içeren bir başka fizibilite çalışması da ODTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, TÜPRAŞ ve TPAO ortaklığında 2021 – 2023 yılları arasında gerçekleştirilen “Batman Petrol Rafinerisinden Yakalanacak Baca Gazı / Karbon Dioksitin Batı Raman Sahasına Enjeksiyonu için En Uygun İş Modelinin Teknik ve Ekonomik Açından Araştırılması” başlıklı Tübitak 1005 projesidir.

Bu projenin amacı, karbondioksitin iklim değişikliğine etkisini azaltmak için atmosfere salınması yerine yer altına depolanmasını sağlamaktır. Proje, Türkiye'de özellikle Dodan gaz sahasından çıkarılan CO<sub>2</sub> ile geliştirilmiş petrol kurtarımı (CO<sub>2</sub>-EOR) üzerine odaklanmaktadır. Bu yöntem 1986'dan beri Batı Raman sahasındaki petrol üretiminde kullanılmaktadır. Ancak Dodan gazının yetersizliği nedeniyle, petrol üretimi azalmıştır. Bu sorunu çözmek için Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası'ndan CO<sub>2</sub> yakalanması ve havadan azot yakalanıp CO<sub>2</sub> ile karıştırılması gibi senaryolar değerlendirilmektedir. Bu çalışma hem petrol üretiminin sürekliliğini sağlamayı hem de sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Proje sırasında hesaplanan yakalama ve boru hattı maliyetleri ile tahmini CO<sub>2</sub> yakalama potansiyeli değerleri Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.

**Tablo 4 | Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası KYKD maliyetleri ve emisyonları (Doğan vd., 2023)**

|                                              | Batman Rafinerisi            | Rafineri + Kurtalan Çimento Fabrikası | Rafineri + Çimento + Havadan Azot Yakalanması |
|----------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Yakalama maliyeti                            | 200 \$/tCO <sub>2</sub>      | 85 \$/tCO <sub>2</sub>                | 12.588 \$/gün                                 |
| Boru hattı maliyeti                          | \$923.442                    | \$1.740.378                           | \$923.442                                     |
| Tahmini CO <sub>2</sub> yakalama potansiyeli | 0,049 MtCO <sub>2</sub> /yıl | 0,279 MtCO <sub>2</sub> /yıl          | 0,049 MtCO <sub>2</sub> /yıl                  |

Proje, üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Faz 1- Baca gazlarındaki karbon dioksitin uygun teknolojilerle yakalanmasına yönelik teknik ve ekonomik gereksinimlerin belirlenmesi.
- Faz 2- Batı Raman sahasının mevcut altyapısının uygunluğunun incelenmesi ve geliştirilmiş petrol kurtarımı faaliyetleri sonucunda elde edilecek petrol miktarının tahmini.
- Faz 3- Karbon dioksitin sahaya taşınmasını ve azotun havadan yakalanmasını kapsayacak şekilde idari, ekonomik ve teknik senaryoların değerlendirilmesi ve en uygun iş modellerinin ortaya konulması.

Projede, karbon yakalama ve depolama (KYKD) teknolojilerinin ekonomik sürdürülebilirliği ve çevresel etkinliği dört farklı senaryo üzerinden analiz edilmiştir:

- Senaryo 1- Mevcut operasyonların devamı olarak ele alınmış, CO<sub>2</sub> vergisi olmaması durumunda Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'nın (TPAO) 20 yıllık süreçte 533 milyon USD kar elde etmesi öngörülmüştür. Bu senaryoda, TPAO karlı durumda olmasına rağmen, TÜPRAŞ ve Kurtalan Çimento'nun CO<sub>2</sub> salımları çevresel iyileştirmeye katkıda bulunmamaktadır.
- Senaryo 2 ve 3- Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikasından ek CO<sub>2</sub> enjeksiyonlarının yapıldığı senaryolardır. Bu senaryolar, TPAO'nun karlılığını sürdürmesi için sırasıyla CO<sub>2</sub> vergisinin \$148/ton ve \$58/ton olması gerektiğini göstermiştir.
- Senaryo 4- Batı Raman sahasında havadan azot (N<sub>2</sub>) yakalama işlemi ve Batman Rafinerisinden ek CO<sub>2</sub> enjeksiyonunu içermektedir. Bu senaryoda, TPAO'nun zarar etmemesi için ek bir CO<sub>2</sub> vergi desteğine ihtiyaç

duyulmamaktadır. Net Bugünkü Değer analizi sonucunda bu senaryo en uygulanabilir olarak değerlendirilmiş, ancak CO<sub>2</sub> depolanması daha sınırlı kalmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma, maliyet odaklı bir karbon yakalama teknolojisi geliştirilemezse, karbon vergisi veya teşvik sistemi gibi destekleyici mekanizmaların KYKD projelerinin karlılığı üzerinde doğrudan etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle senaryo 3 düşünüldüğünde, \$58/ton'luk bir vergiyle hem atmosfere salınmayan CO<sub>2</sub> miktarının önemli olduğu hem de petrol kurtarımının artırılarak dış ticaret açığının azaltılmasına katkı sağlanabileceği belirtilmiştir. Her bir senaryo, farklı operasyonel değişikliklerin ve CO<sub>2</sub> vergisinin projenin genel karlılığı üzerindeki etkilerini değerlendirmekte ve bu teknolojilerin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği açısından önemli içgörüler sağlamaktadır (Doğan vd., 2023).

Kayahan (2017) tez çalışmasında Çan termik santrali için oxy-kömür yakımını sadece linyitin yakıt olarak kullanılmasında en ekonomik yakalama teknolojisi olarak belirlemiştir. Bu yöntemde elektrik maliyeti, CO<sub>2</sub> önleme maliyeti ve CO<sub>2</sub> yakalama maliyeti sırasıyla 50.5 €/MWh, 55.3 €/tCO<sub>2</sub> ve 36.4 €/tCO<sub>2</sub>'dir. Yakalama teknolojisi olarak %30 oksijen ile zenginleştirilmiş yanma durumuna uygulandığında hava ile yanma durumuna uygulamaya göre daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. Maliyetler arasındaki farkın az olması nedeniyle retrofit için revizyon yapmanın gereksiz olabileceği önerilmektedir. Ancak çalışmada biyokütle oksijen zenginleştirilmiş durumu, tüm karbon yakalama retrofit alternatifleri arasındaki en ekonomik durum olduğu belirtilmiştir. Oksijenli yakım, en ekonomik KYKD alternatifi olarak görünse de, hala uygulama için birçok teknik engel bulunmaktadır. Örneğin, yüksek maliyetli hava ayrıştırma ünitesi (ASU), hava ile oksijenli yanma modu değişim sorunları ve yüksek miktarda oksijen kullanımından kaynaklanan riskler. Bu nedenle oksijen zenginleştirilmiş %30 yakmanın mevcut enerji santralleri için kısa vadeli ekonomik bir retrofitting seçeneği olduğu önerilmektedir.

Rafineriler için önerilmiş olan amin bazlı solvent ile yakalama teknolojisinin ekonomik analizi 20 yıl operasyon için, %20 vergi ve %11,5 indirgenme oranı hesaba katılarak Tüpraş tarafından Batman Rafinerisi için yapılmıştır. Sermaye maliyeti olarak 2,3 MMscf/gün gazın işlenmesi için 1 adet kompresör ile birlikte CO<sub>2</sub> yakalama ünitesinin maliyeti 28 milyon USD olarak ortaya çıkmaktadır. Ünitenin işletilmesi için gerekli olan buhar, elektrik, amin, ham su, kostik ve soğutma suyu gibi kalemler değerlendirilmiştir. IRR değeri %15 olarak alındığında günlük 147 ton CO<sub>2</sub> yakalama kapasitesine sahip bir ünite için CO<sub>2</sub> yakalama maliyeti 200 USD/tCO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır (TÜPRAŞ, 2023).

Depolama maliyeti konusunda Türkiye'nin daha fazla bilgisi bulunmaktadır. 1986 yılından beri Dodan doğal CO<sub>2</sub> sahasından üretilerek 86 km uzaklıkta bulunan Batı-Raman sahasına yapılan enjeksiyon neticesinde 2009 yılı verilerine göre 16,4 MtCO<sub>2</sub> sahaya basılmış, 11,8 MtCO<sub>2</sub> geri üretilmiş ve 1991'den beri 4,93 MtCO<sub>2</sub> geri yakalanarak tekrar basılmıştır. CO<sub>2</sub>'nin Dodan tesislerinde üretilmesi, H<sub>2</sub>S vb safsızlıklarından arındırılması ve sıkıştırılması için maliyet 11,8 USD/tCO<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir. Üretilen gazın tekrar yakalanarak geri basılmasının maliyeti ise 8,8 USD/tCO<sub>2</sub> tutmaktadır (Şahin vd., 2010). Bu maliyetler geliştirilmiş bir saha için olduğundan kuyu maliyetlerini içermemektedir. Özellikle derin tuzlu su akiferlerine yapılması planlanan enjeksiyonlar için taşıma, yeni kuyu ve gözetim maliyetlerinin de düşünülmesi gerekmektedir.



## 4. DEĞERLENDİRME



## 4. DEĞERLENDİRME

Bu rapor, Türkiye'nin 2053 yılında net-sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasında Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama teknolojilerinin olası kullanımını değerlendirmektedir. Türkiye, ekonomik büyümeyle çevresel sorumluluklarını dengelemeye çalışan orta gelire sahip bir ülkedir. Tarihsel süreç incelendiği zaman, Türkiye'de çevresel sorumluluklara önem verilmekle birlikte, ekonomik büyümenin ön planda tutulduğu görülmektedir. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (KYKD) teknolojileri mevcut ekonomik alışkanlıkları sürdürmeye olanak vermesiyle büyüme politikalarını desteklerken, pahalı bir araç olması, uygulanmasına ilişkin en büyük zorluk olarak ortaya çıkmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporları, KYKD uygulamalarına ilişkin zorlukları dört ana başlıkta ortaya koymuştur. İlk olarak CO<sub>2</sub> yakalama maliyeti çok yüksektir. Bu yüksek maliyet özellikle salım miktarlarının büyük olduğu elektrik üretimi, çimento, demir çelik gibi sektörlerde daha da belirgin bir hale gelmektedir. Bu sektörlerdeki ortalama yakalama maliyeti ton başına 100 avronun üzerindedir. Yakalama teknolojisi, salımların azaltılmasının zor olduğu çimento ve demir-çelik fabrikaları için halen yeteri kadar gelişmiş durumda değildir. Yakalama teknolojisinin henüz olgunlaşmamış olması ve yüksek maliyetine karşın, Avrupa'daki çalışmalar, KYKD uygulamalarındaki en büyük zorluğun uygun depolama sahalarının bulunması olduğunu göstermektedir. Depolama sahalarıyla CO<sub>2</sub> salım kaynaklarının coğrafi olarak çakışmaması maliyetleri ve riskleri artırmaktadır. Sınır aşan uygulamalar idari süreçleri zorlaştırmaktadır. Bu zorluklar nedeniyle KYKD projeleri, duyurulmalarından sonra uygulamaya ortalama altı yıl sonra geçebiliyorken, birçok KYKD projesi ise iptal edilmektedir.

Dünya'da 2050 yılında net-sıfır salıma ulaşılmasına ilişkin bütün projeksiyonlarda KYKD yer almıştır. IEA, 2050 yılında net-sıfır salıma ulaşmak için 2030'da karbon yakalama miktarının bir milyar ton, 2050'de altı milyar tona yükselmesini öngörmektedir. Dünya'nın farklı ülkelerinde KYKD'nın gelişmesi için destekler oluşturmuştur. Amerika Birleşik Devletleri'nde CO<sub>2</sub> depolanmasına ton başına 85 dolar teşvik verilmektedir. Avrupa Birliği'nde salım ticareti sisteminde ton başına CO<sub>2</sub> salım bedelinin 100 avroya yaklaşmış olması, KYKD teknolojilerinin uygulanmasını cazip hale getirmektedir.

Gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye'de, başta finansal engeller ve diğer zorluklar, petrol kurtarımı amacıyla yapılan CO<sub>2</sub> enjeksiyonu dışında mevcut uygulaması bulunmayan KYKD'nın yakın gelecekte geniş çapta uygulanmasını zorlaştıracaktır. Mali kaygıların yanı sıra Türkiye'de depolama kapasitesi hakkındaki kısıtlı bilgi mevcuttur. Mevcut araştırmalar, Türkiye'nin CO<sub>2</sub>'nin kalıcı jeolojik depolaması için yeterli kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapasitenin iklim politikası projeksiyonlarında KYKD'ye biçilecek rolle uyumluluğu ise üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Türkiye'de potansiyel depolama sahaları sadece petrol ve doğalgaz sahaları için yayınlanmış durumdadır ve bu sahaların toplam kapasitesi 108 Mt CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır. Bu kapasitenin 20 yıl boyunca doldurulacağı bir varsayımda yıllık 5,4 Mt CO<sub>2</sub> depolama kapasitesi ilk aşamada kullanılabilir. Bu kapasite, Türkiye'nin 2021 için yıllık 452,7 Mt CO<sub>2</sub> salımı olduğu düşünüldüğü zaman çok düşük kalmaktadır. Türkiye KYKD araştırmalarında geç kalmış bir ülkedir. Türkiye'nin akifer alanlarında çok daha yüksek bir jeolojik depolama kapasitesi olduğu ve bu alanların Türkiye'nin jeolojik depolama ihtiyacını karşılayabileceği tahmin edilmekle birlikte, bu alanlardaki potansiyel kapasite hesaplanmamıştır. Türkiye'nin de akifer alanlarındaki jeolojik depolama kapasitesini ve risklerini ortaya koyması gerekmektedir.

Türkiye'nin bilinen depolama sahaları özellikle Güney Doğu Anadolu bölgesinde yoğunlaşmıştır. Salım kaynağı

tesisler ise özellikle Marmara ve Ege bölgesinde kuruludur. Salım kaynakları ile depolama sahalarının farklı bölgelerde yoğunlaşması, yakalanan CO<sub>2</sub>'nin salım kaynağından depolama sahasına taşınmasının maliyetini arttırıcı bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, kalıcı depolama kapasitesinin etkin bir şekilde belirlenmesi ve yönetilmesi için TPAO, BOTAŞ ve MTA gibi kurumların görev tanımları, CO<sub>2</sub>'nin taşınması, jeolojik depolanmasını, kapatılmasını ve izlenmesini içerecek şekilde yenilenmelidir. Yakalamaya ilişkin Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın kurumsal kapasitesi, özellikle denetim için oluşturulmalıdır. Depolama tesislerinin düzgün çalışması ve kapanma ve kapanma sonrası sürecin izlenmesi ve sonuçlandırılmasına ilişkin finansal mekanizmalar oluşturulmalıdır. Türkiye'de KYKD'ya ilişkin mevzuat bulunmamaktadır. KYKD'ya ilişkin bu hukuki boşluklar hızlı bir şekilde kapatılmalıdır.

Türkiye, geliştirilmiş petrol geri kazanımı (EOR) uygulamaları kapsamında petrol sahalarında ve jeotermal sahalarda yeraltına CO<sub>2</sub>'nin basılması konusunda deneyimlidir. Buna karşın, CO<sub>2</sub>'nin yakalanması ve depolanmasına ilişkin yeterli uzmanı yoktur. KYKD'nın kullanımı için önemli bir işgücü oluşturulmalıdır. TENMAK tarafından 2023 yılında Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı kapsamında KYKD Teknolojileri Çağrısı yapılmıştır. Çağrı ile Türkiye'de KYKD alanında Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesi hedeflenmiştir. Bu tür çağrılar Türkiye'de KYKD nitelikli uzman kapasitesinin oluşmasına katkı sağlayacaktır.

Bütün bu veriler dikkate alındığında, kısa ve orta vadede KYKD teknolojilerinin Türkiye için hayata geçirilebilir bir teknoloji olmadığı değerlendirilmektedir. Uzun vadede Türkiye 2053 hedeflerine ulaşmak için KYKD teknolojilerini kullanmayı tercih edebilir. Türkiye'nin henüz emekleme aşamasında olan KYKD'nin ülkede uygulanması için şimdiden bu uygulamaların yakalama, taşıma, kullanma ve depolamadan oluşan dört ayağının tamamını çalışması, bunlara ilişkin stratejilerini ortaya koyması, yasal bir zemin oluşturması ve idari çerçevesini belirlemesi gerekmektedir. Bu kapsamda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve TENMAK iş birliği içerisinde Ulusal CO<sub>2</sub> Tutma ve Değerlendirme Teknolojileri Yol Haritası çalışması 2023 yılında tamamlanmış olup raporu halen yayınlanmamıştır.

Türkiye'de 2021 yılında elektrik üretimi kaynaklı 160 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri, metalik olmayan mineral ürünleri (çimento vd.) üretimi kaynaklı 77 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri ve demir-çelik sektörü kaynaklı 18 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri sera gazı salımı gerçekleşmiştir. Bu sektörlerin toplam 254 Mt CO<sub>2</sub> eşdeğeri salımı, Türkiye'de CO<sub>2</sub> yakalama teknolojilerinin kullanımı için potansiyelini ortaya koymaktadır. İlave olarak, hidrojen üretimi Dünya'da yaygınlaşmakta, Türkiye'nin de ilgili üretilere başlanması beklenmektedir. Mavi hidrojen üretilmesinde KYKD teknolojileri kullanılmaktadır. KYKD Dünya genelinde artan KYKD tartışmaları, KYKD'nin Türkiye'nin 2053 net-sıfır emisyon hedefi için bu sektörlerdeki salımların yönetilmesinde güçlü bir çözüm olarak sunulmasına neden olabilir. Bu da örneğin elektrik üretiminde yenilenebilir enerjiye geçişinin ertelenmesi gibi Türkiye'nin karbonsuzlaşmasını geciktirici bir gerekçe olarak kullanılabilir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022), Türkiye'nin 2035 yılına kadar olan projeksiyonlarında KYKD teknolojilerine yer vermemiştir. Plan, 2035 sonrası dönemde karbon yakalama teknolojisine sahip termik santrallerin üretim portföyüne dahil olabileceğini belirtmektedir. Buna karşın, yukarıda sıralanan Türkiye'de KYKD'ya ilişkin finansal, teknolojik, hukuki ve idari durum, KYKD'nın Türkiye'nin hedeflerine ulaşmasında küçük bir etkisi olacağını göstermektedir. Gerçekçi bir değerlendirme, Türkiye'nin bilinen ve daha hızlı devreye alınabilecek sınırlı jeolojik depolama kapasitesinin, imalat sanayine yönlendirmesinin daha yerinde olacağını göstermektedir. Demir-çelik ve özellikle çimento sektörlerinde, CO<sub>2</sub> salımlarının azaltımında teknolojik alternatiflerin çok sınırlı etkisi bulunmaktadır. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile EBRD iş birliğinde hazırlanan Türkiye Demir-Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası projesinde KYKD teknolojileri azaltım senaryolarının içerisine dahil edilmiştir. Bu imalat sanayi sektörlerinin 2021'de salımlarının Türkiye'nin toplam salımları içerisinde %17'lik büyük bir payı vardır. Türkiye, KYKD teknolojilerinin kullanımında, düşük maliyetli ve iklim dostu alternatifleri bulunan fosil yakıttan elektrik üretimini ayakta tutmak yerine, salım azaltımının zor olduğu imalat sanayi sektörlerinin salımlarının yönetilmesine öncelik vermelidir. Bu da riskleri azaltacak güçlü çevresel güvencelerle birlikte yapılmalıdır.

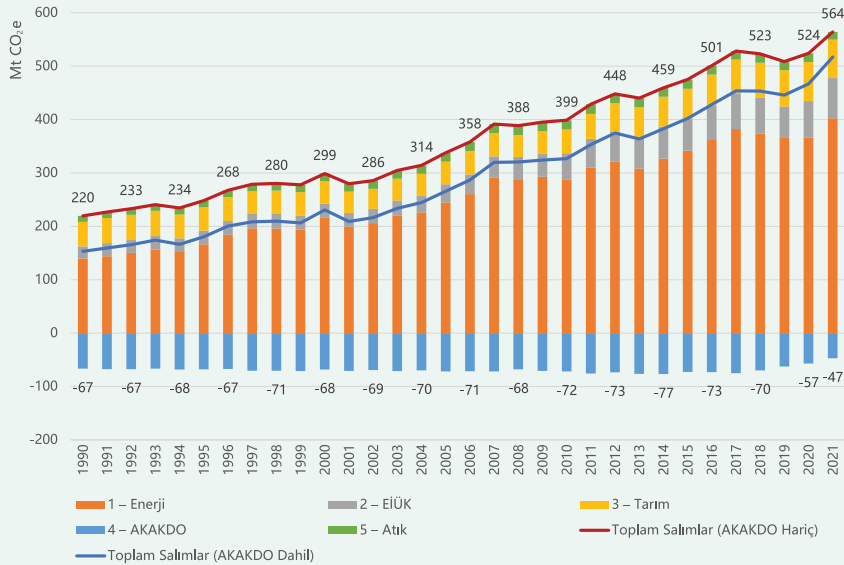
**EKLER**



## EKLER

## EK 1 TÜRKİYE'NİN TOPLAM SERA GAZI SALIMLARI

Türkiye'nin 1990 yılında 220 Mt CO<sub>2</sub>e olan sera gazı salımları 2020 yılında %138'lik bir artışla 524 Mt CO<sub>2</sub>e seviyesine yükselmiştir<sup>26</sup> (Bk. Şekil 49). 2020 yılında AKAKDO sektörünün net karbon tutumu -57 Mt CO<sub>2</sub>e olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'nin 2020 yılı salımlar, AKAKDO dahil edildiğinde 467 MT CO<sub>2</sub>e seviyesine gerilemektedir. Yıllar içerisinde yutak alan miktarı değişiklik göstermekle birlikte, 1990- 2020 arasında karbon tutumları yakın miktarda gerçekleşmiştir.

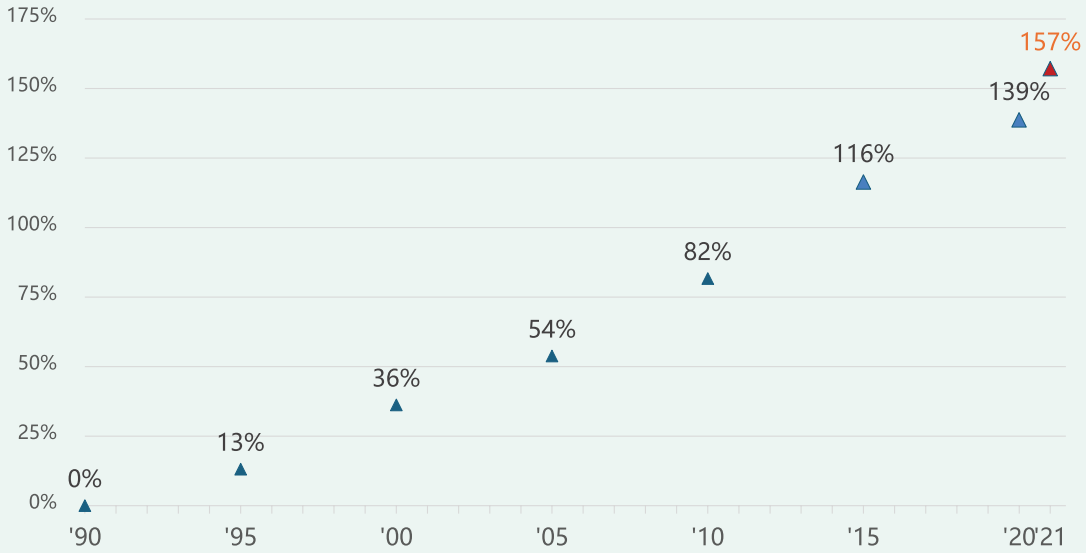
Şekil 49 | Türkiye'deki olası CO<sub>2</sub> depolama alanları (Okandan vd., 2011)

Türkiye'nin sera gazı salımları 2021 yılında bir yılda kaydedilen en yüksek sera gazı salım artışını gördü. Türkiye'nin 2021 yılı sera gazı salımlarında 2020'ye göre gerçekleşen 40,4 Mt CO<sub>2</sub>e eşd. fazla salım bu güne kadar kaydedilenlerin en yükseği oldu. Oransal olarak %7,7 olan bu artış, 2007 ve 1996'nın ardından oransal olarak da en yüksek üçüncü artış olarak kaydedildi. (Bk. Şekil 51)

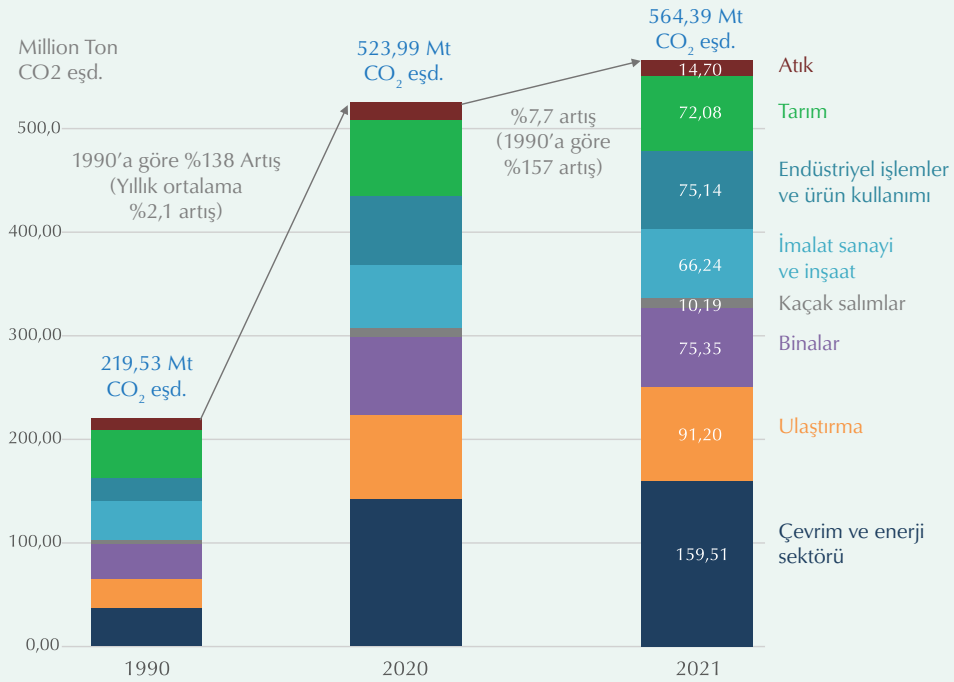
Türkiye'nin sera gazı salımları içinde enerjinin payı son yıllarda azalış eğiliminde olsa da Türkiye'nin toplam sera gazı salımlarında enerji sektörü en üst sırada yer almaktadır. Enerji sektörünün toplam salımlar içindeki payı 1990 yılında %64'ten 2020 yılında %70 seviyesine çıkmıştır. Enerji sektörünü %13 ile endüstriyel faaliyetler, %14 ile tarım ve %3 ile atık sektörleri takip etmektedir. Türkiye'nin seragazı salımları 1990-2021 yılları arasında %157'lik bir artış göstermiştir. (Bk. Şekil 50 ve Şekil 52)

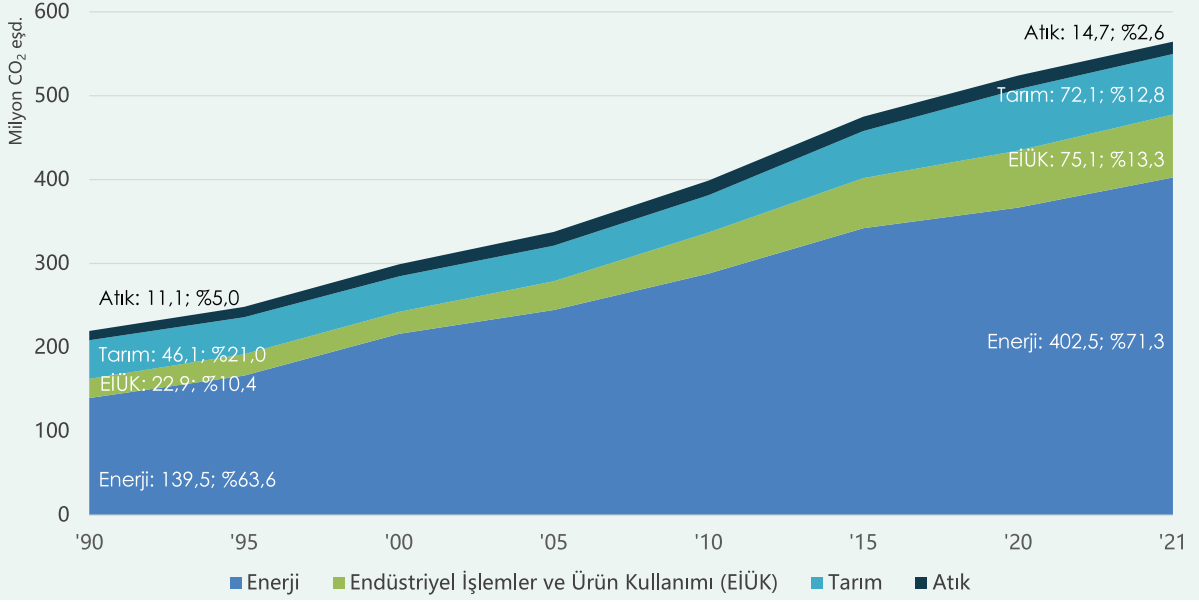
<sup>26</sup> 2020 yılında AKAKDO sektörünün net karbon tutumu -57 Mt CO<sub>2</sub>e olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'nin 2020 yılı salımları, AKAKDO dahil edildiğinde 467 MT CO<sub>2</sub>e seviyesine gerilemektedir. Yıllar içerisinde yutak alan miktarı değişiklik göstermekle birlikte, 1990- 2020 arasında karbon tutumları yakın miktarda gerçekleşmiştir.

Şekil 50 | Türkiye'nin Toplam Sera Gazı Salımlarında 1990 Yılına Göre Değişim



Şekil 51 | Türkiye'nin Toplam ve Sektörel Sera Gazı Salımlarında 1990-2021 Arası Değişim

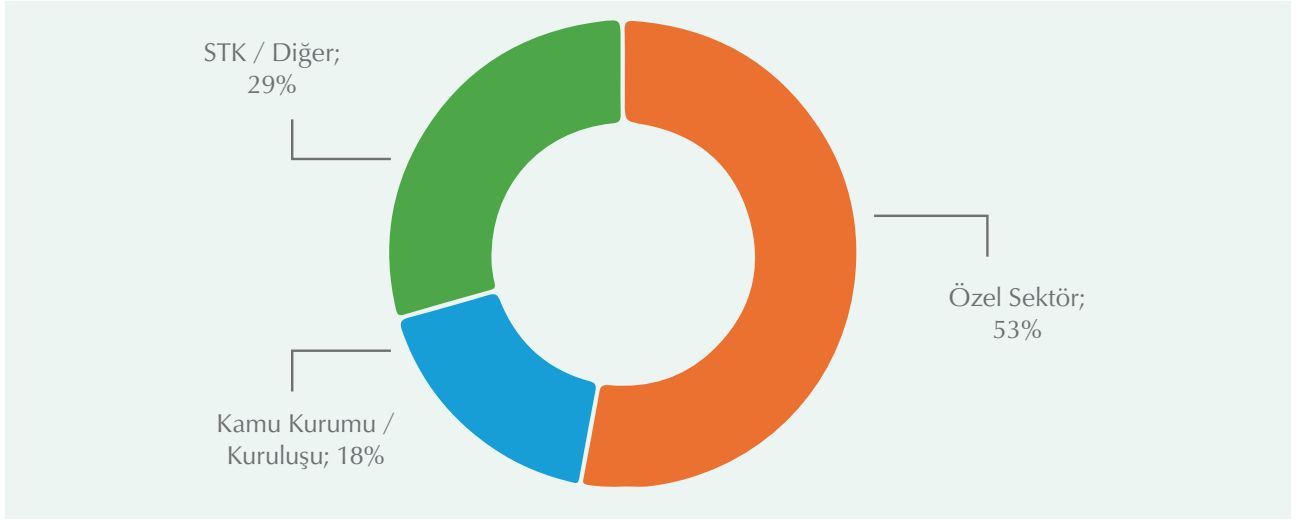


**Şekil 52 | Türkiye'nin toplam sera gazı salımlarının yıllara göre sektörel değişimi (TÜİK, 2022)**

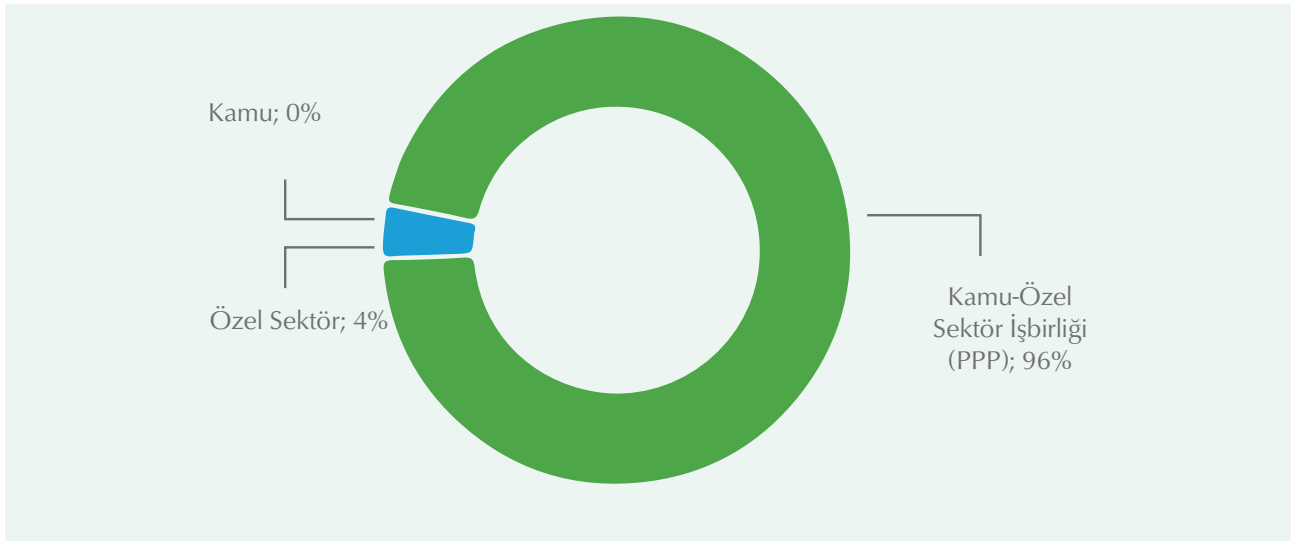
## EK 2 – TÜRKİYE'NİN KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA MEVCUT DURUMU VE POTANSİYELİ ANKET ÖZET SONUÇLARI

Kaynak, Çevre ve İklim Derneği, Türkiye'deki paydaşların konuya ilişkin farkındalık ve değerlendirmelerini almak üzere Kasım 2023'de çevrimiçi olarak bir anket çalışması düzenlemiştir. Anket ilgili çimento, demir-çelik ve elektrik üretimi sektörleri paylaşırları, ilgili kamu kurum ve kuruluşları, SKT'lar ve akademi ile paylaşılmıştır. Paydaşların geri bildirimleri Türkiye'nin KYKD teknolojilerinin uygulanmasına hazır olmadığını düşündüklerini göstermektedir. Özellikle öne çıkan bir unsur, katılımcıların KYKD teknolojilerinin uygulanmasında kamu-özel sektör işbirliğini şart görmesidir. Ankete katılanların %53'ü özel sektör, %29'u sivil toplum kuruluşları (STK), akademi ve diğer paydaşlardan ve %18 kamu kurum ve kuruluşlardandır.

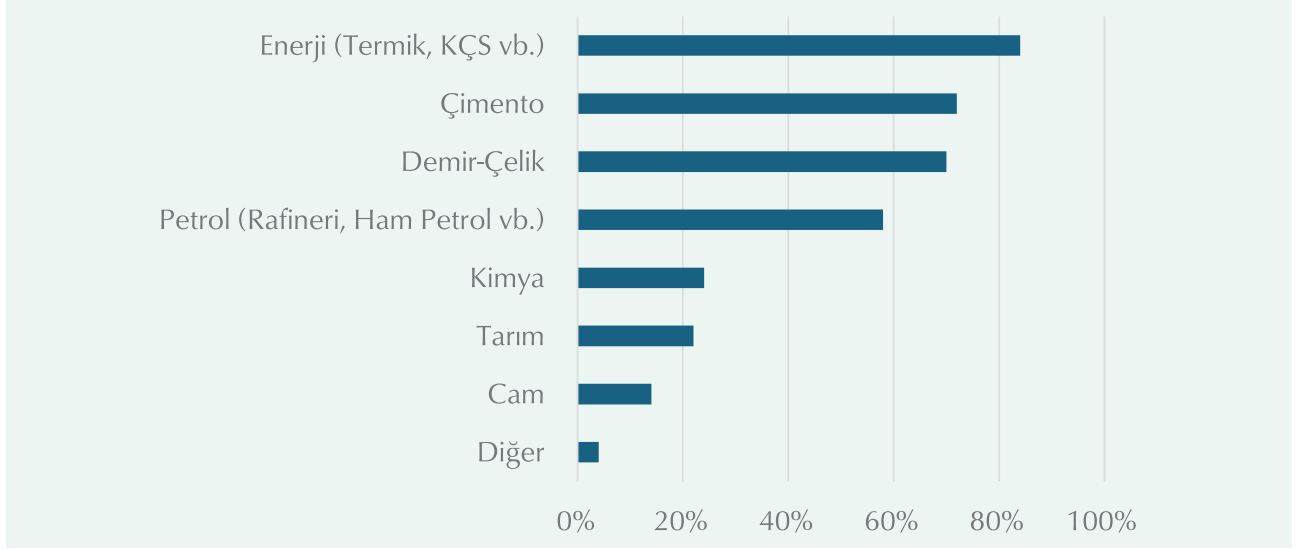
Anket Katılımcıları



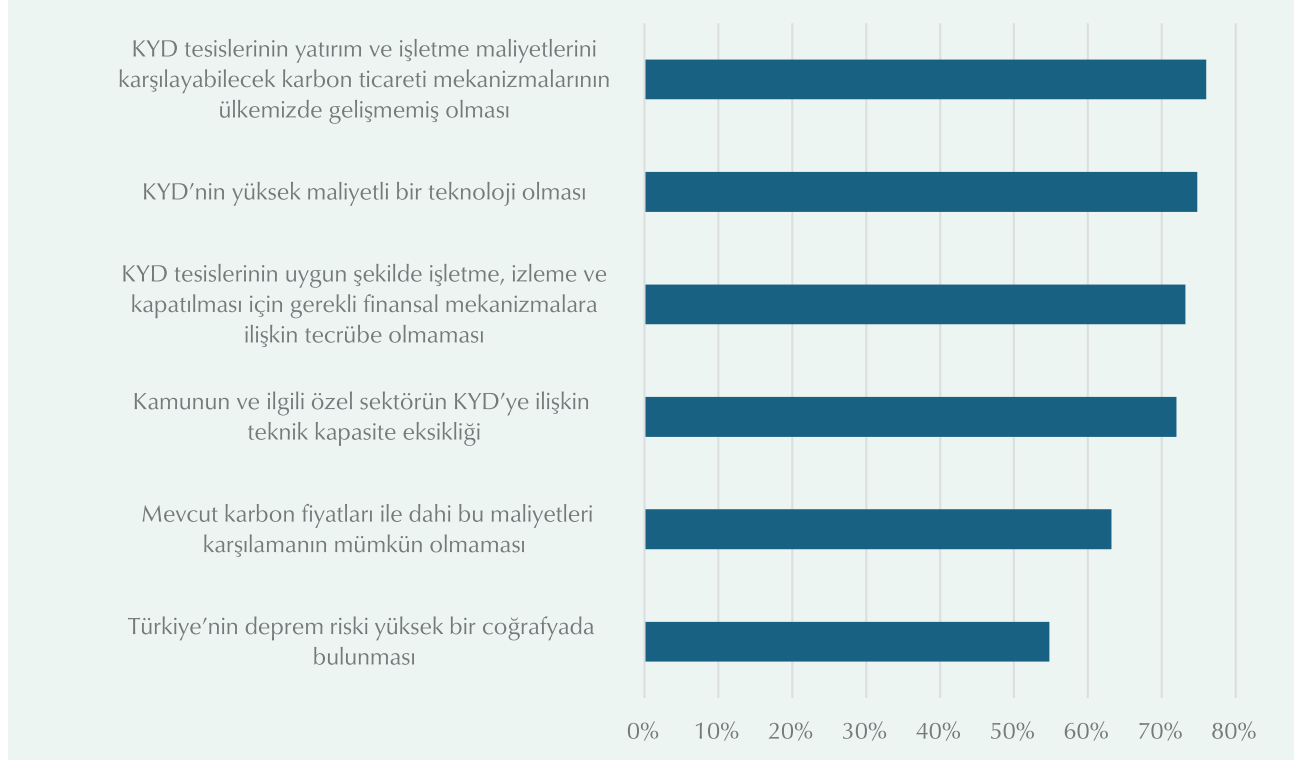
Ankete Katılanların %96'sı KYKD Uygulamalarının Kamu-Özel Sektör İşbirliğinde Yürütülmesi Gerekliğini Düşünüyor



Ankete Katılanların %70'inden Fazlası Öncelikli Sektörler olarak Elektrik, Çimento ve Demir-Çelik Üretimini Görüyor

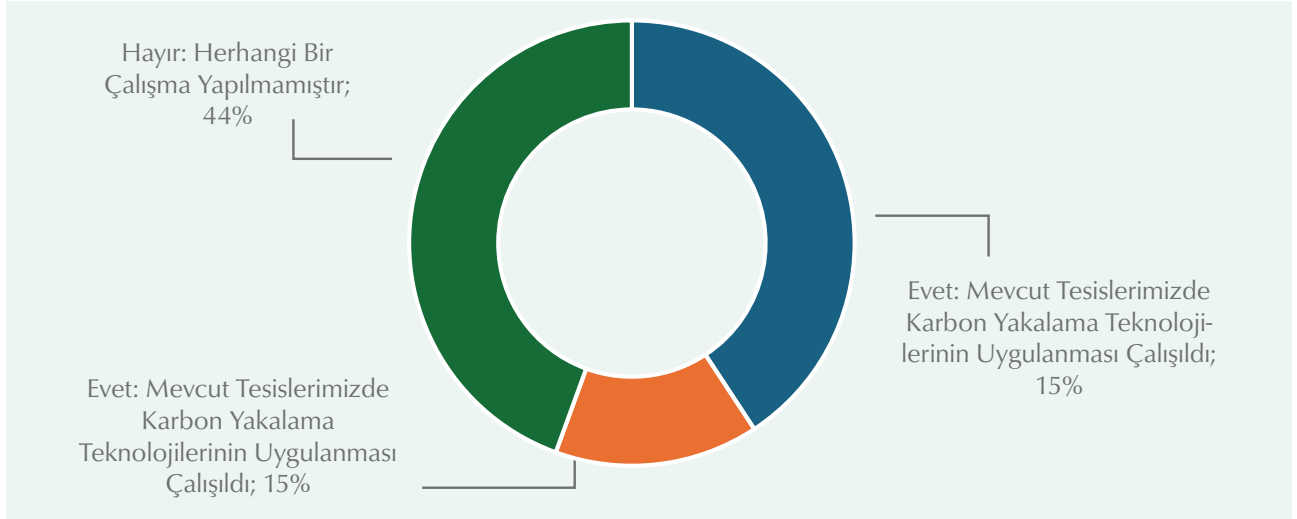


Ankete Katılanlar KYKD'nın Türkiye'de Uygulanmasının Önünde Önemli Engeller Olduğunu Düşünüyor.

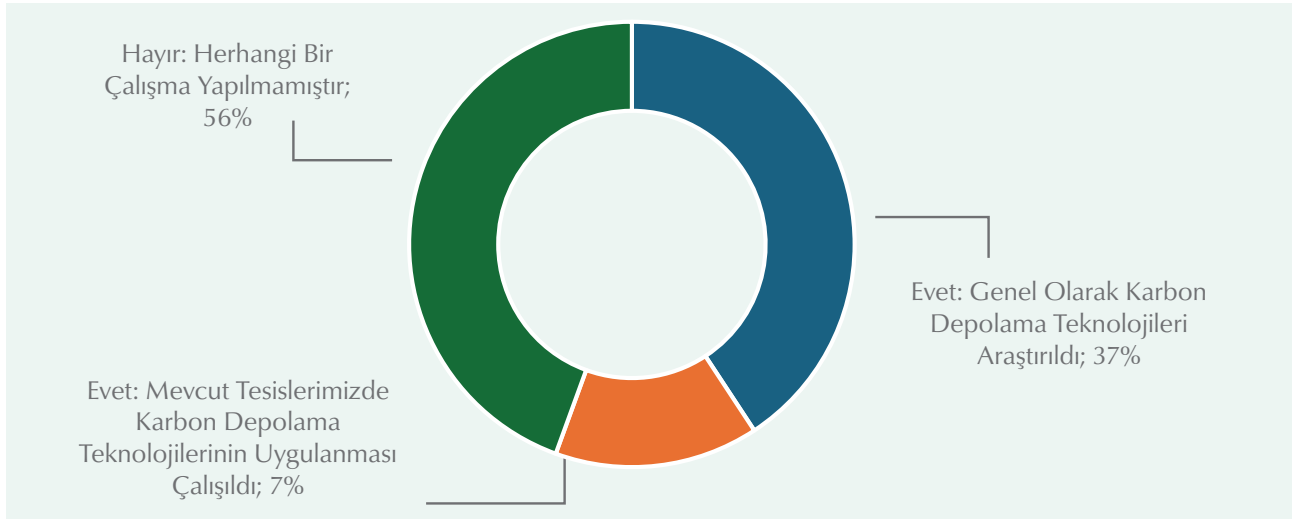


Ankete Kaydolan Özel Sektör Tesisleri Arasında KYKD Konusunda Çalışma Yürütmeye Başlayanlar Bulunuyor.  
(sadece özel sektör katılımcılarının yanıtları dikkate alınmıştır)

### Karbon Yakalama Teknolojileri



### Karbon Depolama Teknolojileri



### EK 3 KARBON YAKALAMA KULLANMA VE DEPOLAMA TERİMLER SÖZLÜĞÜ

**Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (KYKD):** Fosil yakıt bazlı elektrik santralleri ve diğer endüstriler gibi büyük ve sabit CO<sub>2</sub> yayan kaynaklardan CO<sub>2</sub> yakalamaya yönelik bir teknolojiler grubu olarak tanımlanır. KYKD ayrıca, tutulan CO<sub>2</sub>'nin, farklı uygulamalarda kullanım veya CO<sub>2</sub>'nin kalıcı olarak depolanması ve tutulması için jeolojik oluşumlara veya tükenmiş petrol ve gaz sahalarına enjeksiyon için sahalar taşınmasını da içerir. Karbon Yakalama ve Kullanma (KYK), Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) şeklinde de versiyonları vardır.

**Azaltma maliyeti:** Genellikle CO<sub>2</sub> tonu başına ABD doları olarak ifade edilen CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltma maliyeti.

**Ağaçlandırma ve yeniden ağaçlandırma:** Halihazırda orman örtüsü altında olmayan arazilere yeni ormanların dikilmesi. Ormanlar büyüdükçe atmosferdeki karbonu uzaklaştırır.

**Absorpsiyon:** Katı veya sıvı gibi bir maddenin, molekülleri arasındaki çok küçük gözenekler veya boşluklar yoluyla sıvı veya gaz gibi başka bir maddeyi alması işlemi.

**Adsorpsiyon (KYK'de):** Bir malzemenin yakalanabilmesi ve/veya depolanabilmesi için CO<sub>2</sub> moleküllerini yüzeyine çekme işlemi.

**Amonyak (NH<sub>3</sub>):** Azot ve hidrojenin bir bileşiğidir. Doğrudan yanma işleminde, yakıt hücrelerinde veya hidrojen taşıyıcısında doğrudan yakıt olarak kullanılabilir. Düşük karbonlu bir yakıt olabilmesi için düşük karbonlu hidrojenden amonyakın üretilmesi ve elektrik ihtiyacının düşük karbonlu elektrikle karşılanması gerekir.

**Akifer:** Kayaçları geçirgen olan veya sıvıların önemli ölçüde akmasına veya tutulmasına izin verecek kadar gözenekli olan bir jeolojik yapı için kullanılan teknik terim.

**BEKYK:** Karbon yakalama ve depolama özellikli biyoenerji, CO<sub>2</sub>'yi yakalamak ve depolamak için kullanılan KYD teknolojisi ile yakıt olarak biyokütle (normalde odun peletleri) kullanan enerji üretimini gerektirir. CO<sub>2</sub> de kullanılabilir, bu durumda teknolojiye BEKYK denir. BEKYD'nin, karbondioksiti atmosferden uzaklaştırmak ve bu CO<sub>2</sub>'yi yeraltında veya uzun ömürlü ürünlerde depolamak için bitkileri ve algleri kullanan bir dizi işlemi tanımlayan BiCRS'den (biyokütle karbon giderme ve depolama) farklı olduğuna dikkat edilmelidir.

**Biyokömür:** Biyokütlenin oksijen yokluğunda termal ayrışması, biyokömür olarak bilinen bir kömür oluşturur. Bu, toprak verimliliğini artırmak ve uzun vadeli istikrarlı bir karbon deposu görevi görmek için toprağa eklenebilir.

**Mavi Hidrojen:** Doğal gazın (veya metanın (CH<sub>4</sub>)) H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub>'ye ayrıştırılması ve CO<sub>2</sub>'nin tutulmasıyla Hidrojen (H<sub>2</sub>) üretimi.

**Karbon fiyatı:** Hükümet tarafından dayatılan bir fiyatlandırma mekanizması; iki ana tür, ya karbon yoğunluklarına dayalı olarak ürün ve hizmetlere uygulanan bir vergidir ya da ülke veya bölgede izin verilen emisyonlara bir üst sınır koyan ve şirketlerin karbon salma hakkı ticareti yapmasına izin veren bir kota sistemidir (ör. ödenek olarak). Bu, bazı şirketlerin bazen 'dahili' veya 'gölge' karbon fiyatları olarak adlandırılan, fiyat veya harç değil, bireysel proje tarama değerleri olarak kullandıklarından ayırt edilmelidir.

**Karbon dioksit giderimi (CDR):** CO<sub>2</sub>'nin atmosferden net olarak çıkarılmasıyla sonuçlanan kasıtlı eylemleri ifade eder. Bu, BEKYD veya DHKYD gibi mühendislik çözümlerini veya ağaçlandırma gibi doğal iklim çözümlerini (NCS) içerebilir.

**Döngüsel ekonomi modelleri:** Malzemelerin daha büyük bir bölümünü geri dönüştürerek, üretimdeki israfı azaltarak, ürünleri ve yapıları hafifleterek, ürünlerin kullanım ömürlerini uzatarak ve araba paylaşımına dayalı yeni iş modelleri uygulayarak ekonomide kaynakların ve malzemelerin yeniden dolaşımını sağlayan ekonomik modeller,

binalar ve daha fazlası.

**Doğrudan Havada Karbon Yakalama (DHKY):** Karbondioksiti atmosferden ayırmak için kimyasal işlemler kullanan çeşitli teknolojilerin ortak adı. Bu terim, CO<sub>2</sub>'nin müteakip arıtımı ile ilgili herhangi bir anlam taşımaz-kullanılabilir veya depolanabilir. Doğrudan Havada Karbon Yakalama ve Depolama (DHKYD), özellikle, yaşam sonu varış noktası olarak yakalama sonrası yüzey altı tecrit anlamına gelir. Doğrudan Havada Karbon Yakalama ve Kullanma (DHKYK), yakalanan CO<sub>2</sub>'nin yakalandıktan sonra kullanılmasını ifade eder.

**Doğrudan indirgenmiş demir (DRI):** Doğal gaz veya hidrojen kullanılarak demir cevherinden üretilen demir ("sünger demir" olarak adlandırılır). Bu DRI daha sonra elektrik ark ocağı (EAF) adı verilen ikinci bir adımda çeliğe dönüştürülür. DRI-EAF, geleneksel kok yakıtlı yüksek fırın/bazik oksijen fırınının (BF-BOF) dekarbonizasyonunu sağlayan alternatif bir birincil çelik üretim sürecidir ve demir-çelik üretiminde KYD'ye bir alternatiftir.

**Elektroliz:** Kendiliğinden olmayan bir kimyasal reaksiyonu yürütmek için elektrik akımı kullanan bir teknik. Elektrolizin bir biçimi, bir elektrolizörde yer alan ve yenilenebilir enerji kullanılarak gerçekleştirildiğinde "yeşil hidrojen" üreten, suyu hidrojen ve oksijene ayırtıran süreçtir.

**Enerji verimliliği:** Birim GSYİH başına enerji kullanımı.

**Fischer-Tropsch süreci:** Sentetik yakıtların üretimi için katalitik üretim süreci. Doğal gaz, kömür ve biyokütle hammaddeleri kullanılabilir.

**Kaçak emisyonlar:** Gaz veya petrolün işlenmesi veya taşınması gibi antropojenik faaliyetlerden herhangi bir amaçlanmayan gaz veya buhar salımı.

**Sera gazları (GHG'ler):** Atmosferdeki ısıyı hapseden gazlar. Gazın küresel sera gazı emisyon katkıları – CO<sub>2</sub> (%76), metan (%16), azot oksit (%6) ve florlu gazlar (%2).

**Yeşil hidrojen:** Yenilenebilir enerjiyle çalışan elektroliz yoluyla ayrıştırılan sudan (H<sub>2</sub>O) üretilen H<sub>2</sub>.

**Seviyelendirilmiş X maliyeti (LCOX):** Bir santralin ömrü boyunca karbon yakalama veya elektrik üretimi gibi belirli bir ürünün ortalama net bugünkü maliyetinin bir ölçüsü. Örneğin, Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (LCOE), bir elektrik üretim tesisinin kullanım ömrü boyunca tüm iskonto edilmiş maliyetlerin, teslim edilen gerçek enerji miktarlarının iskonto edilmiş toplamına bölünmesiyle hesaplanır.

**Doğal İklim Çözümleri (NCS):** Küresel ormanlar, sulak alanlar, otlaklar, tarım arazileri ve okyanuslarda karbon depolamayı artırmak ve/veya sera gazı emisyonlarını önlemek için koruma, restorasyon ve/veya iyileştirilmiş arazi yönetimi eylemleri.

**Negatif emisyonlar:** CO<sub>2</sub>'nin NCS ya da DHKYD veya BEKYD gibi tasarlanmış çözümler yoluyla çıkarılmasından kaynaklanan atmosferik CO<sub>2</sub> konsantrasyonunda net azalma.

**Nokta Kaynaklı karbon yakalama:** O<sub>2</sub>'nin kaynaklandığı tek, tanımlanabilir bir varlığa bağlı KYKD. Bu, CO<sub>2</sub>'yi atmosferden izole eden Doğrudan Havada Yakalamanın tersidir.

**Proses Emisyonları:** Endüstriyel bir proses sırasında meydana gelen yanma dışındaki bir kimyasal reaksiyonun sonucu olarak oluşan CO<sub>2</sub> ve diğer sera gazı emisyonları.

**Sekestrasyon:** CO<sub>2</sub>'nin artık atmosferde serbestçe hareket etmeyecek şekilde uzaklaştırılması veya ayrılması.

**Buhar metan dönüştürme (SMR):** Metanın ısıtıldığı ve hidrojen ve karbon monoksit karışımı olan sentez gazı (syngas) üretmek için buharla reaksiyona girdiği bir işlem. Bu işlem genellikle karbon monoksitin ısıtıldığı ve hidrojen verimini daha da artırmak için buharla reaksiyona girdiği bir Su Gazı Geçiş işlemiyle birleştirilir.

**Sentetik yakıtlar:** Hidrojen, karbondioksit ve elektrikten üretilen hidrokarbon sıvı yakıtlar. Elektrik girişi sıfır karbon ise ve CO<sub>2</sub> doğrudan hava tutulmasından geliyorsa sıfır karbon olabilirler. "Sentetik yakıtlar", "yakıttan güç"

veya "elektro yakıtlar" olarak da bilinir.

**Teknoloji Hazırlık Düzeyi (TRL):** Belirli bir teknolojinin ilk fıkirden büyük ölçekli, istikrarlı ticari operasyona ulaştığı olgunluk düzeyini tanımlar. IEA referans ölçeği kullanılır.

**Sıfır karbonlu enerji kaynakları:** Yenilenebilir enerji kaynaklarına (güneş, rüzgar, hidro, jeotermal enerji dahil), sürdürülebilir düşük karbonlu biyokütle ve nükleere atıfta bulunmak için kullanılan terim.

**Kaynak:** Enerji Dönüşümü Komisyonu. (2022). Enerji Dönüşümünde karbon yakalama, kullanma ve depolama: Hayati ama sınırlı.



## KAYNAKÇA



## KAYNAKÇA

- Ajayi T, Gomes JS, Bera A, 2019. A review of CO<sub>2</sub> storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Petroleum Science*. 16:1028-1063. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-0340-8>.
- Aksoy, N, Mutlu, H, Gök, Ö, Kılınç, G, 2017. Jeotermal Santrallarda Karbon Emisyonu ve Tutumu. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 19-22 Nisan, İzmir, 169-178.
- Avrupa Birliği. AB Aksiyonu, Karbon yakalama, kullanma ve depolama. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage_en)
- Bachu, S, 2008. CO<sub>2</sub> storage in geological media: role, means, status and barriers to deployment. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008; 34: 254–273.
- Bacilieri, A., Black, R., & Way, R., 2023. Assessing the relative costs of high-CCS and low-CCS pathways to 1.5 degrees. Oxford Smith School Working Paper
- Bongers, Geoff, 2015. Australian Power Generation Technology Report.
- Chrysostomidis I, Zakkour P, Bohm M, Beynon E, de Filippo, R, Lee, A, 2009. Assessing issues of financing a CO<sub>2</sub> transportation pipeline infrastructure. *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*. Vol 3:441-451.
- CO<sub>2</sub>GeoNet, 2015. CO<sub>2</sub>'nin yeraltı katmanlarında depolanması gerçekte ne anlama geliyor? CO<sub>2</sub>Geonet Avrupa Mükemmeliyet Ağı Raporu.
- Doğan, MO, İnceişi, T, Sınayuç, Ç, Akkuş, PD, Sancay, RH, Bülbül, S, Durgut, İ, 2023. Proje Sonuç Raporu. Batman Petrol Rafinerisinden Yakalanacak Baca Gazı / Karbon Dioksitin Batı Raman Sahasına Enjeksiyonu için En Uygun İş Modelinin Teknik Ve Ekonomik Açidan Araştırılması. Tübitak 1005 projesi. Proje no: 221M582.
- Dusseault MB, Bachu S, Rothenburg L, 2004. Sequestration of CO<sub>2</sub> in salt caverns. *Journal of Canadian Petroleum Technol*. 43(11):49–55.
- ECO-BASE Final Raporu, 2020. ECO-BASE: Establishing CO<sub>2</sub> enhanced Oil recovery Business Advantages in South Eastern Europe. ERANET ACT Project No: 271495.
- D. Giardini, J. Woessner, L. Danciu, F. Cotton, H. Crowley, G. Grünthal, R. Pinho, G. Valensise, S. Akkar, R. Arvidsson, R. Basili, T. Cameelbeck, A. Campos-Costa, J. Douglas, M. B. Demircioglu, M. Erdik, J. Fonseca, B. Glavatovic, C. Lindholm, K. Makropoulos, C. Meletti, R. Musson, K. Pitilakis, A. Rovida, K. Sesetyan, D. Stromeyer, M. Stucchi, Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource, doi:10.12686/SED00000001-SHARE, 2013. Url:[http://www.share-eu.org/sites/default/files/SHARE\\_Brochure\\_public.web\\_.pdf](http://www.share-eu.org/sites/default/files/SHARE_Brochure_public.web_.pdf)
- Enerji Dönüşümü Komisyonu. (Temmuz, 2022). Enerji Dönüşümünde karbon yakalama, kullanma ve depolama: Hayati ama sınırlı. ETC için SYSTEMIQ, 2022.
- Gislason SR, Oelkers EH, 2014. Geochemistry: carbon storage in basalt. *Science*. 344(6182):373–4. <https://doi.org/10.1126/science.1250828>.
- Global CCS Institute, Global Status of CCS 2022.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005. In: Metz B, Davidson O, de Coninck HC, Loos M, Mayer LA, editors. Special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kayahan, U, 2017. Experimental And Theoretical Investigation Of Oxy-Combustion in Fluidized Beds. PhD Thesis. Department of Mechanical Engineering, Marmara University. Istanbul.
- Kearns J, Teletzke G, Palmer, J, Thomann, H, Kheshgi, H, Chen, H, Paltsev, S ve Herzog, H, 2017. Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO<sub>2</sub> Storage Capacity Worldwide. *Energy Procedia*. 114: 4697 – 4709.
- Low Carbon Turkey, 2019. “Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Destek Projesi, Faaliyet 2.1 AB Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi Düzenleyici Etki Analizi (2009/31/EC) Raporu, Proje No: EuropeAid/136032/IH/SER/TR”.

## KAYNAKÇA

- OGCI, Global CCS Institute, Storegga. CO<sub>2</sub> Storage Resource Catalogue Cycle 3 Report [Internet]. 2022 Mar [cited 2022 Aug 29]. Available from: [https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2022/03/CSRC\\_Cycle\\_3\\_Main\\_Report\\_Final.pdf](https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2022/03/CSRC_Cycle_3_Main_Report_Final.pdf). Results from assessment cycle 3 of the CO<sub>2</sub> storage resource catalogue
- Okandan, E, Karakece Y, Çetin, H, Topkaya, İ, Parlaktuna, M, Akın, S, Bulbul, S, Dalha, Chantsalma, Anbar, S, Çetinkaya, C, Ermiş, İ, Yılmaz, M, Üstün, V, Yapan, K, Erten, AT, Demiralın, Y, Akalan, E, 2011. Assessment of CO<sub>2</sub> Storage Potential in Turkey, Modeling and a Prefeasibility Study for Injection into an Oil Field. Energy Procedia. 4:4849-4856.
- Şahin, S, Kalfa, Ü, Çelebioğlu, D, Karakeçe, Y, Topgüder, N, Bütün, S, Temel, B, 2007. Batı Raman Sahası üretim performansının iyileştirilmesi ve tekoekonomik rezervuar yönetim yaklaşımlarının rolü. İpetgas 07.
- Şahin, S, Kalfa, Ü, Çelebioğlu, D, 2008. Batı Raman Field Immiscible CO<sub>2</sub> Application-Status Quo and Future Plans. SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 11(4):778-791. Paper SPE 106575-PA.
- Şahin, S, Kalfa, D, Çelebioğlu, D, 2010. Unique CO<sub>2</sub>-Injection Experience in the Bati Raman Field May Lead to a Proposal of EOR/ Sequestration CO<sub>2</sub> Network in the Middle East. SPE International Conference on CO<sub>2</sub> Capture, Storage, and Utilization. New Orleans. USA. 10-12 November. SPE 139616.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://www.enerji.gov.tr/anasayfa>
- Torp TA, Gale J, 2004. Demonstrating storage of CO<sub>2</sub> in geological reservoirs: the Sleipner and SACS projects. Energy. 29(9):1361-9. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(04\)00153-7](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(04)00153-7).
- The Global CCS Institute. <https://co2re.co/>
- The Global Status of CCS, 2018.
- The International Energy Agency (IEA), 2017. Temiz Enerji Geçişlerinde KYKD
- The International Energy Agency (IEA), 2019. Enerji Teknolojisi Perspektifleri
- The International Energy Agency (IEA), 2021. 2050 yılına kadar Net Sıfır, Küresel Enerji Sektörü için Bir Yol Haritası
- The International Energy Agency (IEA), 2022. CO<sub>2</sub> storage resources and their development, an IEA CCUS handbook.
- The International Energy Agency (IEA), 2023. CCUS, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/ccus>
- TÜBİTAK, 2023. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Demir-Çelik Sektörü, 2023.
- TÜİK, 2022. Türkiye'nin toplam sera gazı salımlarının yıllara göre sektörel değişimi
- TÜPRAŞ, 2023. Karbondioksit yakalama teknolojilerinin tekno-ekonomik açıdan değerlendirme çalışması. Batman Petrol Rafinerisinden Yakalanacak Baca Gazı / Karbon Dioksitin Batı Raman Sahasına Enjeksiyonu için En Uygun İş Modelinin Teknik Ve Ekonomik Açından Araştırılması. Tübitak 1005 projesi. Proje no: 221M582.
- Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği (TÜRKÇİMENTO). <https://www.turkcimento.org.tr/>
- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK). <https://www.tenmak.gov.tr/>
- UNFCCC, 2023. Outcome of the first global stocktake, FCCC/PA/CMA/2023/L.17
- Zhang, Y, Oldenburg, C, Finsterle, S ve Bodvarsson G, 2007. System-level modeling for economic evaluation of geological CO<sub>2</sub> storage in gas reservoirs. Energy Conversion and Management. 48, 1827-1833.
- Wei, YM., Kang, JN., Liu, LC. et al, 2021. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target. Nat. Clim. Chang. 11, 112-118.

**KISALTMALAR**

|                       |                                                     |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>ACCU</b>           | Avustralya Karbon Kredisi Birimi                    |
| <b>ADNOC</b>          | Abu Dabi Ulusal Petrol Şirketi                      |
| <b>BECCS</b>          | Biyoenerji ile CCS                                  |
| <b>CCS</b>            | Karbon Yakalama ve Depolama                         |
| <b>CCUS</b>           | Karbon Yakalama Kullanımı ve Depolaması             |
| <b>CDR</b>            | Karbon Dioksit Giderimi                             |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Karbon Dioksit                                      |
| <b>COP</b>            | Taraflar Konferansı                                 |
| <b>DAC</b>            | Doğrudan Hava Yakalama                              |
| <b>DACCS</b>          | Karbon Depolama ile Doğrudan Hava Yakalama          |
| <b>DOE</b>            | ABD Enerji Bakanlığı                                |
| <b>AK</b>             | Avrupa Komisyonu                                    |
| <b>EOR</b>            | Gelişmiş Petrol Geri Kazanımı                       |
| <b>EPA</b>            | Çevre Koruma Ajansı                                 |
| <b>EPC</b>            | Mühendis, Tedarik, İnşaat                           |
| <b>EPS</b>            | Emisyon Performans Standartları                     |
| <b>ESG</b>            | Çevresel, Sosyal ve Kurumsal Yönetişim              |
| <b>ETS</b>            | Emisyon Ticaret Sistemi                             |
| <b>AB</b>             | Avrupa Birliği                                      |
| <b>FEED</b>           | Ön Uç Mühendislik Tasarımı                          |
| <b>GFC</b>            | Yeşil İklim Fonu                                    |
| <b>GHG</b>            | Sera Gazı                                           |
| <b>GT</b>             | Gigaton                                             |
| <b>GW</b>             | Gigavat                                             |
| <b>IEA</b>            | Uluslararası Enerji Ajansı                          |
| <b>IEA-SDS</b>        | IEA'nın Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu           |
| <b>IMO</b>            | Uluslararası Denizcilik Örgütü                      |
| <b>IPCC</b>           | Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli            |
| <b>IRS</b>            | Hazine ve İç Gelir Servisi                          |
| <b>JCM</b>            | Ortak Kredilendirme Mekanizması                     |
| <b>JOGMEC</b>         | Japonya Petrol, Gaz ve Metaller Ulusal Şirketi      |
| <b>LCFS</b>           | Düşük Karbonlu Yakıt Standardı                      |
| <b>LEDs</b>           | Uzun Vadeli Düşük Sera Gazı Geliştirme Stratejileri |
| <b>LNG</b>            | Sıvılaştırılmış Doğal Gaz                           |
| <b>MEE</b>            | Ekoloji ve Çevre Bakanlığı                          |
| <b>MMV</b>            | İzleme, Ölçüm ve Doğrulama                          |
| <b>Mt</b>             | Milyon Metrik Ton                                   |

|                 |                                                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| <b>MTPA</b>     | Yıllık milyon ton                                        |
| <b>MW</b>       | Megavat                                                  |
| <b>NDC</b>      | Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkı                          |
| <b>NET</b>      | Negatif Emisyon Teknolojisi                              |
| <b>NETL</b>     | Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı                   |
| <b>NPV</b>      | Net bugünkü değer                                        |
| <b>NZE</b>      | Net sıfır emisyon                                        |
| <b>PV</b>       | Fotovoltaik                                              |
| <b>Ar-Ge</b>    | Araştırma ve Geliştirme                                  |
| <b>RD&amp;D</b> | Araştırma, Geliştirme ve Gösterim                        |
| <b>SDS</b>      | Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu                        |
| <b>SLL</b>      | Sürdürülebilirlik Bağlantılı Kredi                       |
| <b>SMR</b>      | Buhar Metan Reformu                                      |
| <b>SOE</b>      | Devlete Ait Teşebbüs                                     |
| <b>TWH</b>      | Terrawatt Saati                                          |
| <b>UNFCCC</b>   | Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi |
| <b>BAE</b>      | Birleşik Arap Emirlikleri                                |
| <b>BM</b>       | SKHs BM'nin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri            |
| <b>VCM</b>      | Gönüllü Karbon Piyasası                                  |
| <b>WTE</b>      | Atıktan Enerjiye                                         |





## İşbirliği, Bilgi Paylaşımı ve Ortak Kararlar için

### Kaynak, Çevre ve İklim Derneği (REC)

Kaynak, Çevre ve İklim Derneği (REC), Türkiye'nin çevre konusundaki hukuki, kurumsal, teknik ve yatırım kapasitesini güçlendirmeyi; böylelikle Türkiye'nin çevresinin korunmasına destek sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu amaç doğrultusunda, farklı finansal kaynaklar kullanarak yürütmekte olduğumuz çalışmalarla, kamu yönetimi, sivil toplum kuruluşları, özel sektör ve diğer tüm paydaşlar arasında işbirliği, bilgi paylaşımı ve ortak karar alma süreçlerini güçlendirmek için çalışıyoruz.

Kaynak, Çevre ve İklim Derneği, siyasi görüşlerden ve çıkar gruplarından bağımsız, kâr amacı gütmeyen uluslararası bir kuruluş olan Orta ve Doğu Avrupa için Bölgesel Çevre Merkezi'nin (REC) Türkiye ofisi REC Türkiye'nin faaliyetlerini devam ettirmektedir. REC Türkiye 2004-2022 yılları arasında 18 yıl Türkiye'de faaliyet göstermiş ve resmi olarak 11 Şubat 2022'de projelerini Kaynak, Çevre ve İklim Derneği'ne devretmiştir. Dernek, bu kapsamda Arnavutluk, Bosna Hersek, Karadağ ve Kuzey Makedonya'da kurulan REC'lerle işbirliği içerisinde.

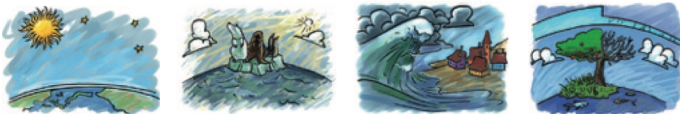
### Kaynak, Çevre ve İklim Derneği (REC)

**Adres:** Beştepe Mah. Nergiz Sok. VIA FLAT Plaza 7/2 Ofis  
No: 27 Yenimahalle 06560, Ankara, Türkiye

■ [info@rec.org.tr](mailto:info@rec.org.tr)

[twitter.com/recturkiye](https://twitter.com/recturkiye)

[linkedin.com/company/recturkey](https://linkedin.com/company/recturkey)



**Eser Adı:** A'dan Z'ye İklim Değişikliği Başucu Rehberi

