

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FOSİL YAKITLARDAN KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA
SİSTEMLERİ KULLANILARAK DÜŞÜK KARBONLU HİDROJEN ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS

Abdullah MEMİŞ

OCAK-2026
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FOSİL YAKITLARDAN KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA
SİSTEMLERİ KULLANILARAK DÜŞÜK KARBONLU HİDROJEN ÜRETİMİ**

**LOW CARBON HYDROGEN PRODUCTION USING CARBON CAPTURE
AND STORAGE SYSTEMS FROM FOSSIL FUELS**

YÜKSEK LİSANS

Abdullah MEMİŞ

**OCAK-2026
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FOSİL YAKITLARDAN KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA
SİSTEMLERİ KULLANILARAK DÜŞÜK KARBONLU HİDROJEN ÜRETİMİ**

**LOW CARBON HYDROGEN PRODUCTION USING CARBON CAPTURE
AND STORAGE SYSTEMS FROM FOSSIL FUELS**

YÜKSEK LİSANS

Abdullah MEMİŞ

DANIŞMAN: PROF.DR.NAFİZ MADEN

**OCAK-2026
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans olarak hazırlamış olduğum “Fosil Yakıtlardan Karbon Yakalama ve Depolama Sistemleri Kullanılarak Düşük Karbonlu Hidrojen Üretimi” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

09/01/2026

Abdullah MEMİŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında ve şekillenmesinde öncülük yapan, yazım aşamasında bilgi birikimleri ve deneyimleri ile bana yol gösterip tez danışmanlığını yapmış olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Nafiz MADEN'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Beni bu günlere getirip desteğini hiçbir zaman esirgemeyen anne ve babama; her an yanımda olup desteğini eksik etmeyen sevgili eşim Çiğdem MEMİŞ'e; tez yazım sürecinde dünyaya gelen ve bana manevi bir motivasyon sağlayan oğlum Alperen MEMİŞ'e teşekkür ederim.

Abdullah MEMİŞ
GÜMÜŞHANE – 2026

ÖZET

Bu tez çalışması, fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemlerini teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla değerlendirerek, hidrojen ekonomisinin gelişimine katkı sunacak stratejiler ortaya koymayı amaçlamaktadır. Geleneksel buhar reformasyonu ve doğalgazın yüksek sıcaklıkta hidrojen ve karbona ayrıştırılması yöntemleri ele alınarak, karbon yönetimiyle entegrasyonları incelenmiştir. Özellikle düşük karbon salınlı veya karbon nötr hidrojen üretim yöntemlerinin uygulanabilirliği ve sürdürülebilir enerji dönüşümüne katkıları değerlendirilmiştir. Çalışmada, buhar reformasyonu yöntemi, karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojileriyle birlikte ele alınarak maliyet ve verimlilik açısından incelenmiştir. Ayrıca, doğalgazın yüksek sıcaklıkta katalitik olarak hidrojen ve karbona ayrıştırılması süreci ve yan ürün olarak üretilen karbonun sanayi sektörlerinde kullanım potansiyeli araştırılmıştır.

Buhar reformasyonunun KYD ile entegre edilmesi karbon salınımlarını azaltabilmekle birlikte, bu sürecin yaygınlaşmasının önünde ekonomik ve altyapısal zorluklar bulunmaktadır. Diğer yandan, fosil yakıtların yüksek sıcaklıkta hidrojen ve karbona ayrıştırılması yöntemi, karbon depolama ihtiyacını azaltarak ekonomik bir alternatif sunmaktadır. Kısa ve orta vadede hidrojen üretiminde fosil yakıtlar önemli bir rol oynayacak olsa da, uzun vadede yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim hedeflenmelidir.

Türkiye'nin mevcut doğalgaz altyapısı hidrojen üretimi ve dağıtımı için önemli bir temel sunmaktadır. KYD teknolojileriyle entegre hidrojen üretimi, Türkiye'nin karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine katkı sağlayabilir. Yan ürün olarak üretilen karbon, sanayi, tarım ve enerji sektörlerinde değerlendirilerek ekonomik fayda sağlanabilir. Ayrıca, orta vadede hidrojen üretiminin artırılması, enerji arz güvenliğini sağlamaya ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaya yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Buhar reformasyonu, Hidrojen üretimi, Karbon depolama
Karbon yakalama

SUMMARY

This thesis aims to offer a contribution to the economic economy and focuses on the technical, economic, and growth dimensions of hydrogen production from fossil fuels. The study explores the possibility of combining traditional steam reforming with the decomposition of oxygen and carbon particles from long-length natural gas. This capacity, along with the applicability of low-carbon and carbon-neutral regeneration methods, and its contributions to a sustainable energy transition are discussed. Specifically, the cost and efficiency of steam reforming expansions in conjunction with carbon capture and storage (CCS) technologies are evaluated. Furthermore, the potential for utilizing the carbon side effects generated by high-rate catalytic modulation methods in the industrial, agricultural, and energy sectors is investigated.

While steam reforming with CCS blocks has the potential to reduce carbon emissions, broad application options are limited due to economic and infrastructural constraints. In contrast, high-rate decomposition of fossil fuels offers a more economical alternative to carbon storage capacity. Although short- and medium-reserve fossil fuels will continue to play a significant role in growth, production based on long-reserve energy sources should be targeted.

Turkey's existing natural gas products provide a strong foundation for technological production and sales. Integrated energy production with KYD technologies can provide the country with carbon reduction opportunities. The economic value created by carbon obtained as a byproduct, supporting the amount of energy supply and reducing consumption of fossil fuels, is enhanced by the moderate increase in hydrogen production.

Keywords: Steam Reforming, Hydrogen Production, Carbon Storage, Carbon Capture

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	V
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Araştırmanın Amaç ve Hedefleri.....	2
1.3. Temel Kavramlar	3
1.3.1. Fosil Yakıtlar	3
1.3.2. Fosil yakıt salınımları.....	4
1.3.3. Fosil yakıtların Maliyeti	5
1.4. Hidrojen Enerjisi	6
1.4.1. Hidrojen Enerjisinin Özellikleri.....	6
1.4.3. Hidrojen Enerjisinin Çevresel ve Ekonomik Etkileri.....	8
1.4.4. Düşük Karbonlu Hidrojen Üretimi.....	9
1.4.5. Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	11
1.4.6. Hidrojen ve KYD 'nin Enerji Geçişindeki Yeri	13
2. KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA SİSTEMLERİ İLE DÜŞÜK KARBONLU ENERJİ ÜRETİMİ.....	15
2.1. Tarihsel Gelişim	16
2.2. Günümüzde KYD Teknolojisi	17
2.3. Karbon Yakalama Sistemleri.....	18
2.4. Karbon Taşıma Sistemleri	22
2.5. Karbon Depolama Sistemleri.....	26
3. KYD EKONOMİ VE POLİTİĞİ.....	29
3.1. KYD Teknolojisinin Kurulum ve İşletme Maliyetleri	30
3.2. Karbon Kredileri ve Teşvikler.....	32

3.3. Çevresel ve Sosyal Etkiler.....	33
3.4. Uzun Vadeli Ekonomik Faydalar ve Verimlilik	34
3.5. KYD Teknolojileri Politik Düzenlemeler	35
4. TÜRKiYE VE DÜNYADA KYD PROJEKSİYONU	38
4.1. Dünyada Karbon Yakalama ve Depolama Potansiyeli	38
4.2. Dünyada KYD Örnekleri	42
4.3. Türkiye’de Karbon Yakalama ve Depolama Sistemleri	45
4.4. Türkiye’de KYD Uygulamaları	49
4.5. KYD Teknolojisinin Gelecek Potansiyeli ve Maliyeti.....	52
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKÇA	68
ÖZGEÇMİŞ	77

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Fosil yakıt salınımları (URL-1, 2020).	5
Tablo 2.Hava Kirliliğinin Neden Olduğu Doğrudan ve Dolaylı Maliyetler (Karaca, 2021)	6
Tablo 3. Hidrojenin ve diğer yakıtların temel özelliklerinin karşılaştırılması (Felseghi ve Carcadea, 2019)	7
Tablo 4. Hidrojenin enerjisinin avantaj ve dezavantajları	8
Tablo 5. Faaliyet Durumuna Göre En Yüksek Kapasiteli KYD Projeleri (GCCSI, 2022b)	42
Tablo 6. Hesaplanan salınım değerleri (ECO-BASE, 2020).....	60
Tablo 7.Kurtalan Çimento Fabrikası ve Batman Rafinerisi KYD emisyonları ve maliyetleri (Doğan vd., 2023).....	60
Tablo 8.Karbon Yakalama Teknolojilerinin Teknik, Enerji ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması (Aksoy ve Tutar, 2025; Kheirini vd., 2021).	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Enerji arzının fosil ve yenilenebilir kaynaklara göre oranları (Arı ve Yılmaz, 2023).	4
Şekil 2. Türkiyede toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu (TÜİK, 2023).	4
Şekil 3. Sektörlere göre sera gazı emisyonları (TÜİK, 2023).	4
Şekil 4. Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	11
Şekil 5. Metanın BMR yöntemi ile hidrojen üretimi (Ayvaz, 1998; Şenaktaş, 2005). ...	12
Şekil 6. Yönteme Göre Küresel Hidrojen Üretimi (Dincer ve Acar, 2015).	12
Şekil 7. Karbon yakalama ve depolama konsepti (Drax, 2022).	16
Şekil 8. Yanma öncesi yakalama yöntemi (URL-1, 2020).	19
Şekil 9. Yanma sonrası yakalama yöntemi (URL-1, 2020).	20
Şekil 10. Oksi-yakıt yanmada yakalama (URL-1,2020).	20
Şekil 11. Farklı taşıma seçeneklerinde maliyetin taşıma uzaklığına göre değişimi (IPCC, 2005)	23
Şekil 12. Boru hattı birim debi için denizde sermaye maliyetleri (RECT, 2024).	25
Şekil 13. Boru hattı birim debi için karada sermaye maliyetleri (RECT, 2024).	26
Şekil 14. KYD Maliyetleri (IEA, 2019).	32
Şekil 15. 2020-2050 Yıllarında IEA'nın KYD'ye Ait Tahmini (IEA, 2021).	39
Şekil 16. 2050 Yılı KYD Öngörülleri (ETC, 2021).	39
Şekil 17. 2050 yılında KYD Sistemlerinin Görünüşü (RECT, 2024).	40
Şekil 18. Paris Anlaşması kapsamında hazırlanan UKB'de KYD uygulamalarına yer veren devletler (GCCSI, 2022a)	45
Şekil 19. Türkiye'nin 2021 yılı Salınımları içerisinde CO ₂ Salınımlarının Payı ve Ana Sektörleri (TÜİK, 2023).	48
Şekil 20. Türkiye'nin KYD açısından hedeflenebilecek sektörlerinin 1990–2021 dönemine ait kümülatif karbon salınım verileri (RECT, 2024).	48
Şekil 21. Türkiye'de karbon yakalama açısından öncelikli sektörlerin 1990–2021 arasındaki emisyon değişim süreci (RECT, 2024).	49
Şekil 22. Batı Raman Sahası (Sayman vd., 2024)	52
Şekil 23. Türkiye sınırları içerisindeki potansiyel jeolojik CO ₂ rezervuarları (Okandan vd., 2011)	59
Şekil 24. ECO-BASE tarafından önerilen karar verme modeli (ECO-BASE, 2020).	60

Şekil 25. Karbon Yakalama Akış Şeması (IPCC, 2005).....	64
---	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BEKYD	: Biyoenerji karbon yakalama ve depolama
BMR	: Doğalgazın Buhar Reformasyonu
CH ₄	: Metan
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbon dioksit
CO ₂ -EOR	: Karbondioksit ile Zenginleştirilmiş Petrol Üretimi
ÇİD	: Çevre ve İklim Derneği
DAC	: Doğrudan Karbon Yakalama (Direct Air Capture)
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EC	: European Commission
EEA	: European Environment Agency
EOR	: Gelişmiş petrol geri kazanımı (Enhanced Oil Recovery)
EPCI	: Mühendislik, Tedarik, İnşaat Ve Kurulum Maliyetleri
ER	: Enerji Rehberi
ET	: Energy Theory
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GCCSI	: Küresel Karbon Yakalama ve Depolama Enstitüsü (Global Carbon Capture and Storage Institute)
GECO	: Küresel Enerji ve İklim Görünümü (Global Energy and Climate Outlook)
g/mol	: 1 molekül de bulunan gram atom
IPCC	: Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IEAGHG	: Uluslararası Enerji Ajansı Sera Gazı Ar-Ge Programı (IEA Greenhouse Gas R&D Programme)
İDB	: İklim Değişikliği Başkanlığı
KYD	: Karbon yakalama ve depolama
LTSs	: Uzun vadeli düşük sera gazı salınımı geliştirme stratejilerini
MAPEG	: Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü
MJ/kg	: 1 kg da bulunan enerji

MJ/m ³	: 1 metreküpte bulunan enerji
Mt	: Milyon ton
NO ₂	: Azot dioksit
NDCs	: Ulusal Katkı Beyanı (Nationally determined contribution)
NOX	: Azot oksitler
OOIP	: Yerde Orijinal Petrol Miktarı (Original Oil In Place)
RE	: Rystad Enerji
RECT	: REC Türkiye (Regional Environmental Center)
SO ₂	: Kükürt dioksit
TCÇŞİDB	: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
TENMAK	: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
Vd.	: Ve diğerleri
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
WC	: Wray Castle Ltd.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji talebinin hızla arttığı günümüzde, fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmak büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin(H_2) fosil yakıtlardan elde edilmesi, kısa ve orta vadede artan talebi karşılamak için pratik bir çözüm sunarken, karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojileri ile entegre edilmesi, çevresel etkilerin minimize edilmesine olanak tanımaktadır.

Fosil yakıtlardan H_2 üretiminde iki temel yöntem öne çıkmaktadır: Buhar reformasyonu (BMR) ve Yüksek sıcaklıkta ayrıştırma. BMR, fosil yakıtlardan H_2 üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, karbondioksit (CO_2) salınımlarının tutulup depolanmasıyla çevreye duyarlı bir çözüm sunmaktadır. CO_2 , okyanus diplerinde veya jeolojik yapılarda güvenli bir şekilde depolanabilir. Diğer yandan, fosil yakıtların yüksek sıcaklıklarda saf H_2 ve karbona, ayrıştırılması hem enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin hem de çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek karbonun elde edilmesini sağlamaktadır.

KYD teknolojileri, fosil yakıtlardan kaynaklanan CO_2 emisyonlarını azaltmak da kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, CO_2 'in atmosfere salınmadan önce yakalanmasını ve güvenli bir şekilde depolanmasını sağlar. KYD teknolojileri, enerji üretim tesislerinden, sanayi tesislerinden ve diğer büyük ölçekli emisyon kaynaklarından CO_2 yakalayarak, bu gazın okyanus diplerinde veya yer altı jeolojik formasyonlarda depolanmasını mümkün kılar. Bu sayede, fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin karbon ayak izi önemli ölçüde azaltılabilir.

KYD teknolojisi, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltarak çevre kirliliğini minimize etmeyi hedefler. Bu süreçte, atmosfere salınması muhtemel karbon yakalanır ve güvenli bir şekilde depolanır. Böylece karbon salınımı azaltılarak küresel ısınma, karbon ayak izi ve çevresel bozulma gibi sorunlar önlenir. Çevre sorunlarının artan maliyetler ve küresel ekonomi üzerindeki olumsuz etkileri göz önüne alındığında, KYD teknolojileri bu tezin temel çözüm önerilerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli(IPCC) Beşinci Değerlendirme Raporu'nda, KYD içermeyen iklim modellerinin, salınım azaltma hedeflerine ulaşmada yetersiz olduğu belirtilmiştir. Daha da önemlisi, KYD içeren senaryolara göre azaltım maliyetlerinin de yaklaşık %138 arttığı ortaya konmuştur. Bu, yenilenebilir enerjilerin ve nükleer enerjinin tek başına 1.5°C sıcaklık artışı hedefine ulaşmada yeterli olmayacağı anlamına gelir. Bu nedenle, KYD teknolojileri, belirlenen hedefe en az maliyetle ulaşmak için kilit bir rol oynamaktadır.

9 Kasım 2021 tarihi itibari ile Ulusal Katkı Beyanlarını (NDCs) sunan 123 ülkeden 18'i KYD teknolojilerine yer vermiştir. Aynı tarihte, Uzun Vadeli Düşük Sera Gazı Salınımı Geliştirme Stratejilerini (LTSS) açıklayan 44 ülkenin, 33'ü KYD teknolojilerini CO₂ salınımını azaltım hedeflerinde kullanacaklarını beyan etmiştir (Akdağ ve Güllü, 2022a).

1.2. Araştırmanın Amaç ve Hedefleri

Bu tezin amacı, fosil yakıtlardan KYD teknolojileri kullanılarak düşük karbonlu hidrojen üretimini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, mevcut yazınlarda yer alan KYD teknolojilerinin teknik, ekonomik ve çevresel boyutları değerlendirilecek ve bu teknolojilerin hidrojen üretim süreçlerine entegrasyonu analiz edilecektir. Tez, bu alanın geniş çaplı bir değerlendirmesini sunarak, enerji sektöründe düşük karbonlu hidrojen üretimine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Tez kapsamında amaca ulaşmak için aşağıdaki hedeflerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir:

- i. KYD teknolojilerinin etkinliğini ve fosil yakıtlardan hidrojen üretimi süreçlerine birleşimini teknik açıdan değerlendirmek.
- ii. KYD teknolojilerinin ekonomik sürdürülebilirliğini ve maliyet etkinliğini analiz ederek, düşük karbonlu hidrojen üretimi için en uygun ekonomik şartları belirlemek.
- iii. KYD teknolojilerinin çevresel etkilerini, özellikle karbon emisyonları ve diğer çevresel göstergeler açısından değerlendirmek.
- iv. Enerji sektöründe düşük karbonlu hidrojen üretimine yönelik politika ve stratejilere dair öneriler geliştirmek.

Bu hedeflerin gerçekleştirilmesi neticesinde elde edilen bilgi ve verilerin ana amaca hizmet etmesi sağlanacaktır.

1.3. Temel Kavramlar

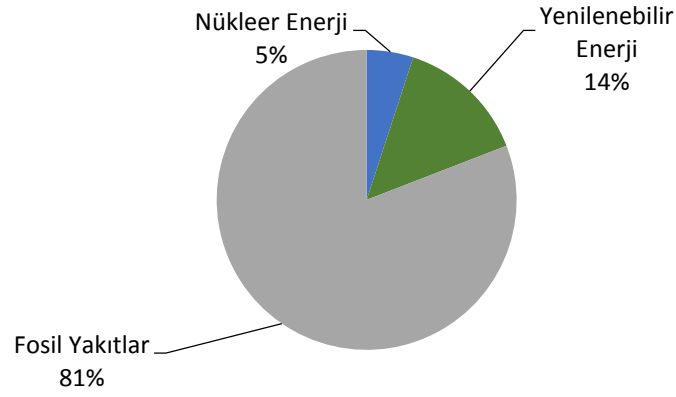
1.3.1. Fosil Yakıtlar

Geleneksel fosil yakıtlarından (kömür, petrol, doğalgaz) yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin zorunlu olduğu konusunun, bütün dünya kamuoyu ve ilgili karar vericilerin, her geçen gün artan, liste başı bir gündem maddesi olduğu görülmektedir. Söz konusu geçişin bir tercih olmadığı, fosil yakıtların yol açacağı çevresel etkilerin ciddi boyutlarda olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 1). Dünyanın genel enerji kullanımında % 80,87 oranında fosil yakıtlar yer almaktadır. Bu durum, iklim değişikliği ve çevresel yıkımın önüne geçilmesi için karbonsuz enerji kullanımına geçişin zorunlu olduğunu göstermektedir. Günümüz uygarlığı esas itibarıyla kömür-petrol-doğalgaz uygarlığıdır. Başlangıcı yaklaşık 250 yıl geriye uzanan Birinci Sanayi Devrimi'nden bu yana, özellikle enerji üretimi ve dünyanın doğal kaynaklarını kullanma tarzından, daha genel ifadeyle, mevcut yaşam tarzımızın devamlılığı nedeniyle yerküre sürekli olarak ısınmaktadır (Ertan, 2022).

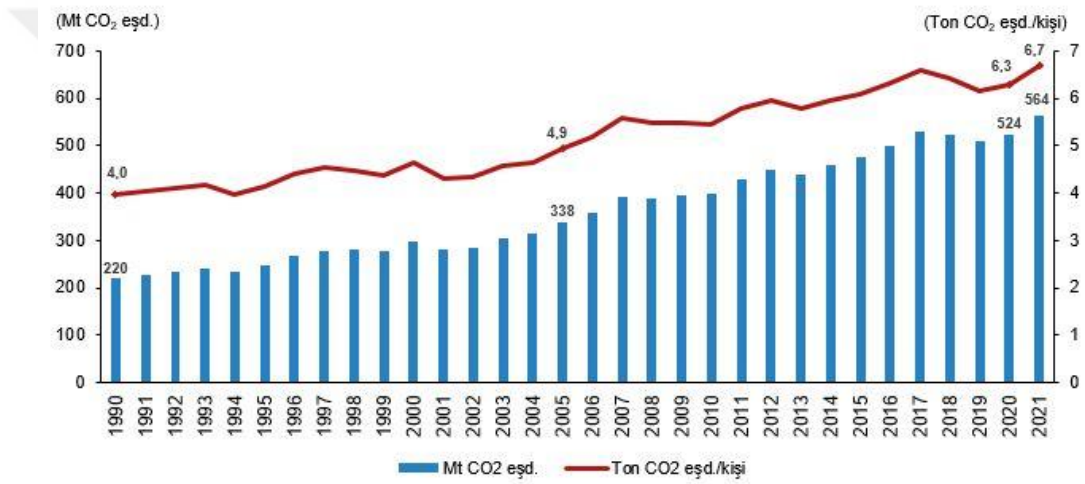
Sera gazı envanteri verilerine göre, 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu, bir önceki yıla kıyasla %7,7 oranında artış göstererek 564,4 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Kişi başına düşen toplam sera gazı emisyonu ise 1990 yılında 4 ton CO₂ eşdeğeri, 2020 yılında 6,3 ton CO₂ eşdeğeri ve 2021 yılında 6,7 ton CO₂ eşdeğeri olarak belirlenmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir (TÜİK, 2023).

Sera gazının artmasıyla oluşan küresel ısınma, fosil yakıtların kullanımı nedeniyle atmosfere salınan sera gazlarından kaynaklanmaktadır. Küresel ısınmanın neden olduğu iklim değişikliği, geçen 250 yıl zarfında insanoğlu için varoluşsal bir tehdit haline gelmiştir. Fosil yakıtların bu tehdidine karşı nötr bir karbon dengesine ve bu yüzyılın ikinci yarısında "net sıfır" CO₂ salınımlarının elde edilmesine ihtiyaç vardır. "Net sıfır" hedefi için enerji ve endüstri sektörlerinin çok hızlı ve kapsamlı bir dönüşümü gerekmektedir (Akdağ ve Güllü, 2022b). Enerji ve endüstri sektörlerinde toplam CO₂ salınımının diğer sektörlerle göre daha yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 3).

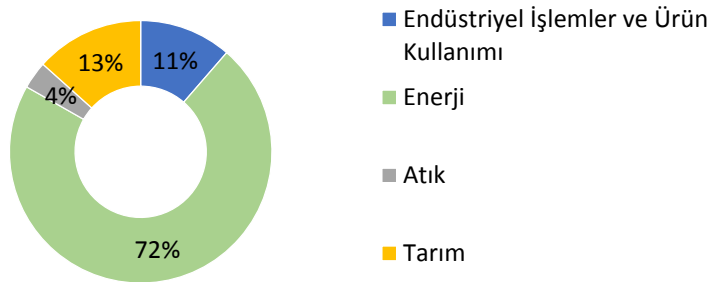
Küresel sıcaklık artışını 1.5°C hedefinde tutmak için, hemen hemen tüm geçiş senaryoları, dünya genelinde en az önümüzdeki on yıl boyunca fosil yakıtı dayalı enerji üretimini; çimento, demir-çelik ve kimya gibi temel endüstriyel süreçleri ve büyük ölçekli hidrojen üretimini karbonsuzlaştırmak amacıyla CO₂ yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır (Akdağ ve Güllü, 2022b).



Şekil 1. Enerji arzının fosil ve yenilenebilir kaynaklara göre oranları (Arı ve Yılmaz, 2023).



Şekil 2. Türkiye'de toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu (TÜİK, 2023).



Şekil 3. Sektörlere göre sera gazı emisyonları (TÜİK, 2023).

1.3.2. Fosil yakıt salınımları

Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan CO₂ miktarı yıllar içinde sürekli olarak artmıştır. 2020 yılında fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan küresel CO₂

emisyonları yaklaşık 34,8 milyar ton olarak hesaplanmıştır (Friedlingstein vd., 2020). Bu artış, sanayi devrimi ile birlikte başladı ve özellikle 20. yüzyıldan itibaren hız kazandı. 1960’larda dünya çapındaki fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları yaklaşık 10 milyar ton/yıl civarındaydı. Ancak elektriksel faaliyet, ulaşım ve enerji üretiminin yoğunlaşmasıyla bu rakamlar 1990’larda 20 milyar ton/yıl, 2000’lerde ise 30 milyar ton/yıl seviyesine çıktı (Ritchie ve Roser, 2020).

Özellikle kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların enerji üretiminde yoğun kullanımı, CO₂ emisyonlarındaki artışın temel nedenidir. 2020’lerde bu artış yavaşlamış olsa da, küresel karbon emisyonları hala önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için CO₂ emisyonlarını azaltma çabaları sürdürülmektedir. Fosil yakıtlardan kaynaklanan bazı kirleticilerin bir ton eşdeğeri petrol enerji üretmek için havaya karışan miktarlar kg olarak Tablo 1’de verilmiştir (URL-1, 2020).

Tablo 1. Fosil yakıt salınımları (URL-1, 2020).

Kirletici	Petrol (kg)*	Doğalgaz (kg)	Kömür (kg)
CO ₂	3,17	2,75	3,96
SO ₂	20	0.1	40
NO _x	4	1.5	7
PM	0.1	0.01	2
CO	0.5	0.2	0.8

* 1 TEP enerji üretimi için kg olarak

1.3.3. Fosil yakıtların Maliyeti

Fosil yakıtların maliyeti, sadece çıkarma, işleme ve taşıma gibi doğrudan masraflarla sınırlı değildir. Ekonomik açıdan bakıldığında, fosil yakıtların çevre ve insan sağlığına verdiği zararlar da hesaba katıldığında gerçek maliyetleri çok daha yüksek olmaktadır. Fosil yakıtların ekonomik zararı, çevresel maliyetler ve sağlık maliyetleri olarak iki başlık altında incelenecektir.

Fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere salınan CO₂ , metan (CH₄) ve diğer sera gazlarının, küresel ısınmayı hızlandırması ve iklim değişikliğini tetiklemesiyle ortaya çıkar. Bu süreç, doğal afetlerin sıklığını ve şiddetini artırarak büyük ekonomik kayıplara neden olur. Sel, kuraklık, orman yangınları ve deniz seviyesinin yükselmesi gibi olaylar altyapıya, tarımsal üretime ve yerleşim yerlerine zarar verir. Ayrıca, temiz su kaynaklarının kirlenmesi, hava kalitesinin bozulması ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi uzun vadeli zararlar da çevresel maliyetler arasında yer alır (IMF, 2019).

Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan hava kirliliğinin solunum yolu hastalıkları, kalp hastalıkları, kanser ve erken ölümler gibi sağlık sorunlarına yol açar. Hava kirliliği, özellikle büyük şehirlerde yaşayan insanlar için büyük bir tehdit oluşturur ve bu hastalıkların tedavi maliyetleri, iş gücü kaybı ve erken ölümler dolayısıyla ekonomiye ciddi yük getirir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre, atmosfer kirliliği her yıl 4 milyondan fazla insanı öldürmektedir. Bu değer 2020’de Covid-19 sebebiyle ölenlerin ve her yıl sıtma ve tüberküloz yüzünden hayatını kaybedenlerin toplamının iki katıdır (DSÖ, 2021). Sağlık sistemine getirilen bu yük, fosil yakıtların ekonomik maliyetini katlanarak artırmaktadır. Tablo 2’de hava kirliliğine bağlı sağlık maliyetlerinde ilk sırada yer alan kanserin Türkiye’ye ekonomik yükü yaklaşık 8,8 milyar TL olarak tespit edilmiştir (Çiçin vd., 2018).

Hava kirliliğine bağlı olarak kanser ölümlerinin oldukça ciddi maliyetleri olduğu görülmektedir. Hava kirliliğine bağlı olan bu maliyetler fosil yakıt kullanımından kaynaklı CO₂’nin atmosfere salınmasıyla oluşmaktadır. Bu kaynakların yakın zamanda tamamen terk edilemeyeceği göz önüne alındığında, onları daha çevreci hale getirmek için KYD teknolojilerinin kullanımı büyük önem taşımaktadır.

Tablo 2. Hava kirliliğinin neden olduğu doğrudan ve dolaylı maliyetler (Karaca, 2021)

	Doğrudan Maliyetler	Dolaylı Maliyetler
Toplam (TL)	669.324.387 TL	1.410.375.673 TL

1.4. Hidrojen Enerjisi

1.4.1. Hidrojen Enerjisinin Özellikleri

Hidrojen, doğada bol miktarda bulunan ancak serbest halde nadiren rastlanan bir elementtir. Genellikle su (H₂ O), hidrokarbonlar (örneğin, metan - CH₄) ve biyokütlede bileşikler halinde bulunur. Enerji taşıyıcısı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Çünkü yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve yakıldığında yalnızca su buharı açığa çıkarır. Bu özellikleri sayesinde, fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunları azaltma konusunda önemli bir alternatif olarak görülmektedir (Aydem, 2024).

Hidrojen, farklı yöntemlerle üretilebilir. Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslenen elektroliz süreçleri aracılığıyla sudan üretilmekte olup ve karbon salınımı içermez. Mavi hidrojen, BMR yöntemi ile üretilir. Ancak KYD teknolojileri kullanılarak CO₂ emisyonları azaltılabilir. Gri hidrojen ise karbon emisyonlarıyla birlikte

geleneksel yöntemlerle üretilir. Bu farklı üretim yöntemleri, hidrojenin enerji sektöründe nasıl kullanılacağını ve çevresel etkilerini belirleyen temel faktörlerdir (Saha vd., 2023).

Hidrojen enerjisi, ulaşım, sanayi, elektrik üretimi ve ısıtma gibi birçok alanda kullanılabilir. Yakıt hücreleri sayesinde hidrojen, elektrik, ısı üretebilir ve özellikle otomotiv sektöründe fosil yakıtlı araçlara çevreci bir alternatif sunar. Bununla birlikte, hidrojenin depolanması ve taşınması hâlâ teknik ve ekonomik zorluklar içermektedir. Gaz veya sıvı halde depolanabilen hidrojen, yüksek basınçlı tanklar veya kriyojenik sistemler gerektirir, bu da maliyetleri artırabilir. Gelecekte hidrojenin enerji sektöründe daha yaygın kullanılabilmesi için altyapı yatırımlarının artması ve üretim maliyetlerinin düşmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen hidrojenin maliyetlerinin düşürülmesi ve enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilir bir enerji dönüşümünde hidrojenin önemli bir rol oynamasını sağlayacaktır. Hidrojen, bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir (Tablo 3). Diğer yandan, hidrojen enerjisinin birçok avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Tablo 4).

Tablo 3. Hidrojenin ve diğer yakıtların temel özelliklerinin karşılaştırılması (Felseghi ve Carcadea, 2019).

Yakıt Türü	Enerji/Kütle (J/kg)	Enerji/Hacim (J/m ³)
Sıvı hidrojen	141,90	10,10
Gaz hidrojen	141,90	0,013
Akaryakıt	45,50	38,65
Gazolin	47,40	34,85
Jet yakıtı	46,50	35,30
Lpg	48,80	24,40
Lng	50,00	23,00
Doğalgaz	50,00	0,04
Kömür	30,00	-

Tablo 4. Hidrojenin enerjisinin avantaj ve dezavantajları (ET, 2024b)

Özellik	Açıklama	Değerlendirme
Emisyon Durumu	Hidrojen yakıldığında veya yakıt hücrelerinde kullanıldığında yalnızca su buharı açığa çıkar, karbon salınımı olmaz.	Çevre dostu
Enerji Yoğunluğu (Ağırlıkça)	Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir; birim ağırlık başına daha fazla enerji üretir.	Yüksek verimlilik
Yenilenebilir Kaynaklardan Üretim	Su elektrolizi gibi yöntemlerle yenilenebilir enerjiyle üretilebilir, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltır.	Sürdürülebilir üretim
Kullanım Alanı Çeşitliliği	Elektrik üretimi, ısıtma, taşımacılık ve sanayi gibi birçok sektörde kullanılabilir.	Çok yönlü enerji kaynağı
Enerji Depolama Kapasitesi	Uzun süreli enerji depolama imkânı sağlar; yenilenebilir kaynaklardaki dalgalanmaları dengeleyebilir.	Şebeke dengeleme avantajı
Üretim Maliyeti	Yeşil hidrojen üretimi hâlen yüksek maliyetlidir; ekonomik rekabet gücü düşüktür.	Yüksek maliyet (dezavantaj)
Depolama ve Taşıma Zorlukları	Gaz halindedir, düşük hacimsel enerji yoğunluğu nedeniyle yüksek basınç veya düşük sıcaklık gerekir.	Zor ve maliyetli depolama
Güvenlik Riskleri	Yüksek yanıcılık ve patlayıcılık riski taşır; güvenli sistemler gerektirir.	Güvenlik önlemleri şart
Altyapı Gereksinimleri	Üretim, taşıma ve dağıtım altyapısı henüz yetersizdir; büyük yatırımlar gerektirir.	Altyapı eksikliği

1.4.3. Hidrojen Enerjisinin Çevresel ve Ekonomik Etkileri

Hidrojenin çevresel etkileri, üretim yöntemiyle yakından ilişkilidir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sudan elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojen, sıfır karbon emisyonu sağladığı için en çevreci seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemle üretilen hidrojen, fosil yakıtlar gibi çevreye zararlı gazlar salmadan temiz bir enerji kaynağı sunar (IEA, 2019).

Diğer yandan, mavi hidrojen üretiminde, fosil yakıtlar kullanılır. Ancak, KYD teknolojileri ile ortaya çıkan CO₂ atmosfere salınmadan yakalanır. Bu yöntem, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerinden daha temiz bir geçiş sağlar (Wietschel ve Ball, 2009). Diğer yandan, KYD'nin yüksek maliyeti ve etkinliğindeki sınırlamalar, bu yöntemin çevresel etkisini tam anlamıyla ortadan kaldırmamaktadır.

En yaygın üretim yöntemi olan gri hidrojen ise doğal gazın buharla reformlanmasıyla elde edilir. Bu yöntem, hidrojenin en ucuz üretim şekli olmasına rağmen, çevresel açıdan en zararlısıdır. Karbon yakalama teknolojilerinin kullanılmaması

nedeniyle gri hidrojen üretimi, atmosfere büyük miktarda CO₂ salınımına yol açarak küresel ısınmaya önemli ölçüde katkı vermektedir (Lindsey, 2020).

Hidrojen üretim yöntemlerinde, elektroliz yöntemi büyük miktarda su gerektirir. Su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde bu durum çevresel bir sorun oluşturabilir. Ayrıca, hidrojenin sızıntısı durumunda ozon tabakasına zarar verebilme potansiyeli bulunmaktadır (Emsley, 2011).

Yenilenebilir enerji ve ekipman maliyetlerinin hızla düşmesi, gelecekte hidrojen üretiminin daha ucuz olacağını göstermektedir. Hâlihazırda mevcut doğal gaz boru hatlarından ulaştırılacağı için nakliye maliyetlerinin de düşük olacağı öngörülmektedir. 2050 yılına kadar hidrojenin birçok sektör için en ucuz karbonsuzlaştırılmış enerji kaynağı olmakla kalmayıp bugün petrol, kömür ve nükleer gibi yakıtlara ödediğimiz maliyetlerden daha ucuz olacağını öngörülmektedir (Alverà, 2022).

Hidrojen ekonomisindeki olumlu gelişmelere rağmen, teknolojisinin gelişmesi, piyasanın kabulü ve hidrojene yönelik yatırımlarla ilgili birtakım engeller çıkmaktadır (Dixon, 2007). Hidrojen teknolojilerinin 2050 yılında gelişiminin tamamlanacağı ve artan enerji ihtiyacının dörtte birini karşılayabileceği öngörülmektedir (Alverà, 2022). Ancak bu teknoloji günümüzde ekonomik açıdan uygulanabilir değildir. Bu nedenle hidrojen, KYD teknolojileri kullanılarak fosil yakıtlardan daha çevreci ve maliyet açısından daha uygun şekilde üretilebilir.

Fosil yakıt bağımlılığı hidrojen ekonomisinin önündeki bir engel olarak görülse de, KYD teknolojileri sayesinde hidrojen teknolojilerine geçişte çevresel ve ekonomik sorunlar büyük ölçüde azaltılabilecektir. Hidrojen teknolojilerine geçiş, yenilenebilir kaynaklarla bir süre daha ekonomik ve teknolojik sebeplerden ötürü mümkün görünmemektedir. Bu süreçte fosil yakıtlar gibi ucuz enerji kaynağını KYD teknolojileri kullanarak düşük karbonlu hidrojen üretimi incelenecek ve enerjiye olan talep fosil yakıtlarından karşılanacaktır.

1.4.4. Düşük Karbonlu Hidrojen Üretimi

Fosil yakıtlardan düşük karbonlu hidrojen üretiminin devam etmesi, enerji dönüşüm sürecinde kritik bir köprü rolü oynamaktadır. Dünyanın mevcut enerji tercihlerinde fosil yakıtlar önemli bir paya sahip olup, bu altyapıyı bir anda tamamen terk etmek enerji arz güvenliğinde riskler doğurabilir. Fosil yakıtlardan üretilen enerji, enerji üretiminde esneklik sağlayarak, artan enerji talebinin karşılanamadığı veya talebin yüksek olduğu dönemlerde güvenilir bir seçenek sunmaktadır. Ayrıca, fosil yakıt bazlı

enerji üretimi mevcut endüstriyel süreçlerde (örneğin petrokimya ve çelik üretimi) düşük karbonlu bir alternatif olarak kullanılabilir ve bu sektörlerin karbonsuzlaştırılmasında hızlı bir çözüm sunabilir.

Bunun yanı sıra, KYD teknolojilerinin fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen üretiminde kullanılması, bu sürecin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. KYD uygulamalarının yaygınlaştırılması, fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin daha çevre dostu bir biçimde üretilmesini sağlayarak düşük karbonlu enerji geçişini desteklemektedir. Bu yaklaşım, bir yandan enerji arz güvenliğinin sürdürülmesine katkı sağlarken diğer yandan karbon emisyonlarının azaltılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca bu geçiş dönemi, yenilenebilir ve düşük maliyetli enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması için gerekli zaman dilimini sunarak, küresel enerji talebinin karşılanmasına destek olmaktadır.

Hidrojen, temiz enerji kaynakları arasında yer almakta ve yanma sonucu yalnızca su açığa çıkardığı için çevre dostu bir yakıt olarak görülmektedir. Ancak güncel enerji üretiminin büyük bir kısmı, fosil yakıtlardan, özellikle BMR yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte büyük miktarda CO₂ üretimi KYD teknolojileri ile sağlanmaktadır. KYD teknolojileri, fosil yakıtlarla enerji üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ 'nin yakalanıp ve ayrıştırılmasını veya dönüştürülmesini sağlayarak, düşük karbonlu hidrojen üretimini mümkün kılmaktadır.

Fosil yakıtlardan düşük karbonlu hidrojen üretimi, özellikle enerjinin yoğun olarak kullanıldığı sektörlerde geçiş süreci için kritik bir rol oynayabilir. Yenilenebilir enerji kapasitesinin yeterince yaygınlaştığı veya sürekli enerji arzının zor olduğu, fosil yakıt temelli düşük karbonlu hidrojen, enerji dönüşüm sürecinde köprü olarak kabul edilebilir. Bu yöntem, enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunarak, hem mevcut altyapının değerlendirilmesine olanak tanır hem de enerjinin daha çevreci olmasını sağlar.

Düşük karbon salınlı hidrojen üretimi, tüm üretimin %1'inden azını oluşturmakta olup açıklanan projelere bakıldığında çok fazla sayıda düşük salınlı hidrojen üretim projesinin geliştirilme aşamasında olduğu görülmüştür (Kannah vd., 2021). KYD teknolojileri kullanılarak fosil yakıtlardan hidrojen elde etme ve elektrolizör kullanımının geliştirilmesi ile 2030 yılında 20 Mt düşük salınlı hidrojen üretimi gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir (Yıldırım vd., 2024).

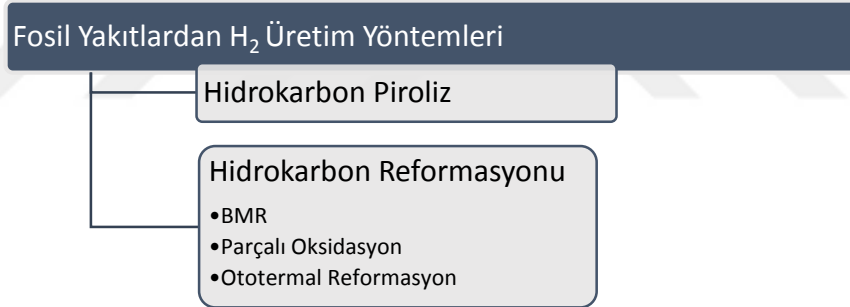
Fosil yakıtlardan düşük karbonlu hidrojen üretimi, KYD teknolojisiyle, dışarıya atılan karbonu tutmada önemli bir fırsat sunmaktadır. KYD teknolojilerinin bu süreci ile fosil yakıtların oluşturduğu zararlar en aza indirilebilirken, aynı zamanda enerji arz

güvenliği yenilenebilir olacaktır. Bu geçiş dönemi stratejisi, daha temiz ve sürdürülebilir enerji sistemlerine doğru atılan önemli bir adım olarak görülmelidir.

1.4.5. Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen, fosil yakıtlardan hidrokarbon reformasyonu ve piroliz yöntemi ile üretilmektedir (Şekil 4). Reformasyon, endüstriyel ölçekte hidrojen üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Hidrojen, rafinerilerde, amonyak üretiminde, petrokimya tesislerinde ve diğer çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle doğal gaz, hidrojen üretimi bakımından oldukça verimli bir kaynaktır. Ancak, atmosfere saldığı CO₂ ve diğer sera gazları nedeniyle küresel iklim değışikliğine neden olmaktadır.

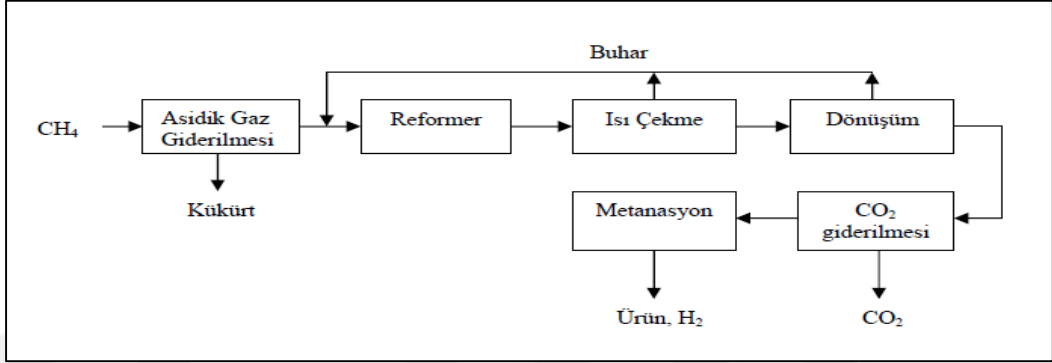
Yapılan çalışmalar, hidrojen üretim işleminde biyokütle gazlaştırma ve buhar dönüştürme yöntemlerinin dengeli bir yapıda olduğunu göstermektedir. Biyokütle gazlaştırma yöntemi daha yüksek miktarda hidrojen üretimine izin verirken buhar dönüştürme yöntemi ise daha yüksek enerji verimiyle öne çıkmaktadır (Megia vd., 2021).



Şekil 4. Hidrojen Üretim Yöntemleri

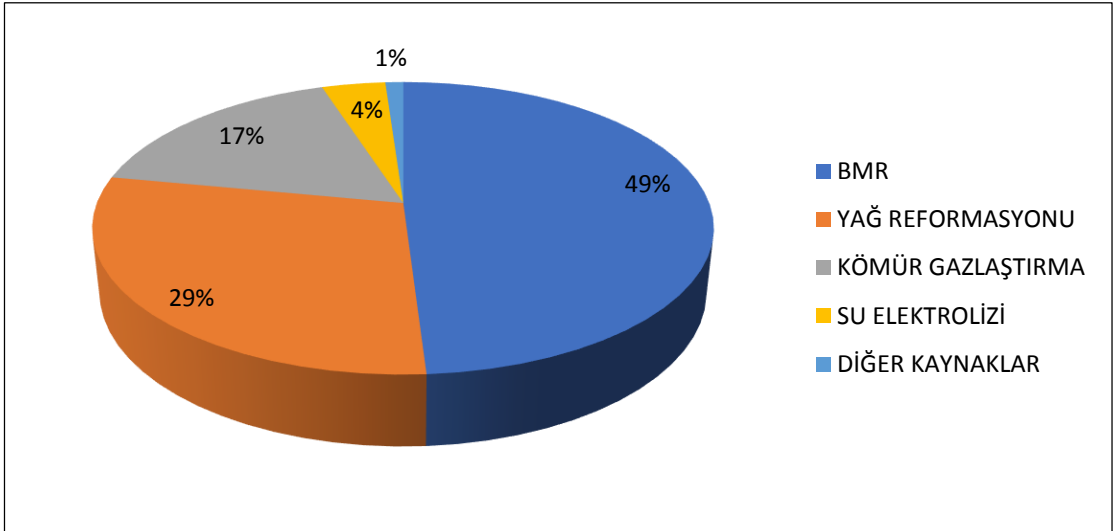
i. Hidrokarbon Reformasyonu: Doğal gazdan veya diğer hidrokarbonlardan hidrojen üretmek için kullanılan bir kimyasal süreçtir. Bu süreç, metanın (CH₄) veya diğer hidrokarbonların su buharıyla (H₂O) tepkimeye girmesiyle gerçekleşir. Reformasyon süreci genellikle endotermiktir. Bu sürecin temel amacı, hidrojen üretmek iken bunun yanında istenmeyen karbon monoksit (CO) ve CO₂ de üretilmektedir. Saf hidrojen elde etmek için yan ürünler genellikle arıtma adı verilen ek bir işlemle uzaklaştırılır. Hidrojen, bir dizi endüstriyel uygulama için önemli bir malzeme ve enerji taşıyıcısıdır (Şekil 5).

Hidrojen, genellikle doğal gaz (metan) veya diğer hidrokarbon kaynaklarından hidrojen gazının elde edilmesi amacıyla kullanılan bir yöntem olan hidrokarbon reformasyonu yöntemi ile üretilebilir. Bu süreç genellikle BMR olarak adlandırılır. Metanın su buharı ile tepkimesi sonucu hidrojen ve CO₂ oluşur (Yıldırım vd., 2024).



Şekil 5. Metanın BMR yöntemi ile hidrojen üretimi (Ayvaz, 1998; Şenaktaş, 2005).

ii. Buhar Reformasyonu (BMR): BMR genellikle doğal gazdan hidrojen üretimi için kullanılan bir kimyasal süreçtir. Bu süreç, endotermik bir tepkimedir ve genellikle endüstriyel ölçekte uygulanır. Hidrojen üretiminde en yüksek pay, %49 ile BMR yöntemiyle gerçekleştirilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Yönteme göre küresel hidrojen üretimi (Dincer ve Acar, 2015).

iii. Parçalı Oksidasyon: Genellikle bir yakıtın oksijenle kısmi olarak yanmasını tanımlayan bir kimyasal süreçtir. Bu süreçte yakıt, yeterli oksijenle reaksiyona girmediği

için tam yanma gerçekleşmez. Bu durum, genellikle bir içten yanmalı motorda, gaz türbininde veya endüstriyel bir süreç içinde kontrol edilen koşullarda gerçekleşir.

iv. Ototermal Reformasyon: Hidrojen üretim süreçlerinden biridir ve genellikle CH_4 gibi hidrokarbonları kullanarak gerçekleştirilir. Bu süreçte, tepkimeler sırasında ortaya çıkan ısı, tepkimeleri sürdürmek için yeterli olacak kadar enerji sağlar. Bu nedenle, ototermal reformasyon, dış bir ısı kaynağına gereksinim duyulmadan gerçekleşen bir tür kendiliğinden ısıtma sürecidir.

v. Hidrokarbon Piroliz: Hidrokarbon içeren malzemelerin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda ısıl ayrışımını tanımlar. Bu süreç, genellikle endüstriyel çevrelerde yağ rafinerileri, kimyasal tesisler ve atık yönetimi gibi uygulamalarda kullanılır.

1.4.6. Hidrojen ve KYD 'nin Enerji Geçişindeki Yeri

Hidrojen ve fosil yakıtların enerji yoğunluğu karşılaştırması, bu enerji kaynaklarının verimliliği ve çevresel etkileri açısından önemli bir konudur. Hidrojenin enerji yoğunluğu, hacim bazında oldukça düşüktür (yaklaşık 120 MJ/kg), ancak ağırlık bazında oldukça yüksektir. Bu nedenle, hidrojen genellikle sıkıştırılarak veya sıvı halde depolanır.

Fosil yakıtlar arasında petrol, yaklaşık 42-47 MJ/kg, kömür 24-35 MJ/kg ve doğal gaz 37-55 MJ/m³ enerji yoğunluğuna sahiptir (IEA, 2020a). Fosil yakıtlar, hacim açısından hidrojenin çok daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle depolama ve taşıma açısından avantaj sağlar. Ancak, hidrojenin yanma ürünü yalnızca su buharıdır, bu da onu temiz bir enerji kaynağı haline getirir. Fosil yakıtlar ise yanma sırasında CO₂ ve diğer zararlı emisyonlar üretir.

KYD teknolojileri, hidrojenin tarihsel gelişiminde temiz enerji geçişini hızlandıran önemli bir unsur olmuştur. Geleneksel fosil yakıt kaynaklı hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel zararlarını en aza indirerek, hidrojenin enerji üretiminde daha sürdürülebilir bir rol oynamasını sağlamaktadır. Özellikle mavi hidrojen üretiminde karbon emisyonlarının yakalanması ve depolanması, bu teknolojinin çevre dostu enerji sistemlerinde gelecekte oynayacağı kritik rolü ortaya koymaktadır. Hidrojen üretimi ile ilgili teknolojilerin daha da gelişmesiyle birlikte, KYD'nin de bu sürece entegrasyonu artacak ve daha çevreci enerji çözümleri mümkün hale gelecektir.

KYD teknolojileri, hidrojen ekonomisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelerek temiz enerji geçişini hızlandırmaktadır. Geleneksel fosil yakıt kaynaklı hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etkilerini azaltmak için geliştirilen bu teknolojiler, özellikle mavi

hidrojen üretimi sürecinde ortaya çıkan karbon emisyonlarının yakalanması ve depolanması sayesinde hidrojenin daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023) çalışmaları bu alandaki gelişmeleri ve gelecek hedeflerini ortaya koymaktadır. KYD teknolojilerinin hidrojen üretimi ile entegrasyonu, enerji sektöründe daha çevreci çözümlerin önünü açacak ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayacaktır.

Mavi hidrojen üretimi, KYD teknolojileri sayesinde daha çevre dostu hale gelmiştir. Bu süreçte, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂, özel sistemler aracılığıyla yakalanır ve yeraltı gibi güvenli depolama alanlarına gönderilir. Bu sayede, atmosferdeki CO₂ miktarı azaltılır ve iklim değişikliğinin etkileri hafifletilir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporlarına göre, KYD teknolojileri, hidrojen ekonomisinin büyümesi için kritik öneme sahiptir ve birçok ülke bu teknolojilere yatırım yapmaktadır.

Gelecekte, hidrojen üretimi ile ilgili teknolojilerin daha da gelişmesiyle birlikte, KYD'nin de bu sürece entegrasyonu artacak ve daha çevreci enerji çözümleri mümkün hale gelecektir. Özellikle yeşil hidrojen üretimi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan yöntemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, KYD teknolojileri, hidrojen ekonomisinin sürdürülebilirliğini sağlamak için önemli bir rol oynamaya devam edecektir. IPCC raporları, KYD teknolojilerinin iklim hedeflerine ulaşılmasında önemli bir araç olduğunu vurgulamaktadır.

Hidrojen, yüksek ağırlık bazında enerji yoğunluğu ve çevre dostu özellikleri ile gelecekteki enerji sistemleri için büyük potansiyele sahiptir. Ancak, hacimsel yoğunluk ve depolama zorlukları, fosil yakıtlarla doğrudan rekabet etmesini zorlaştırmaktadır.

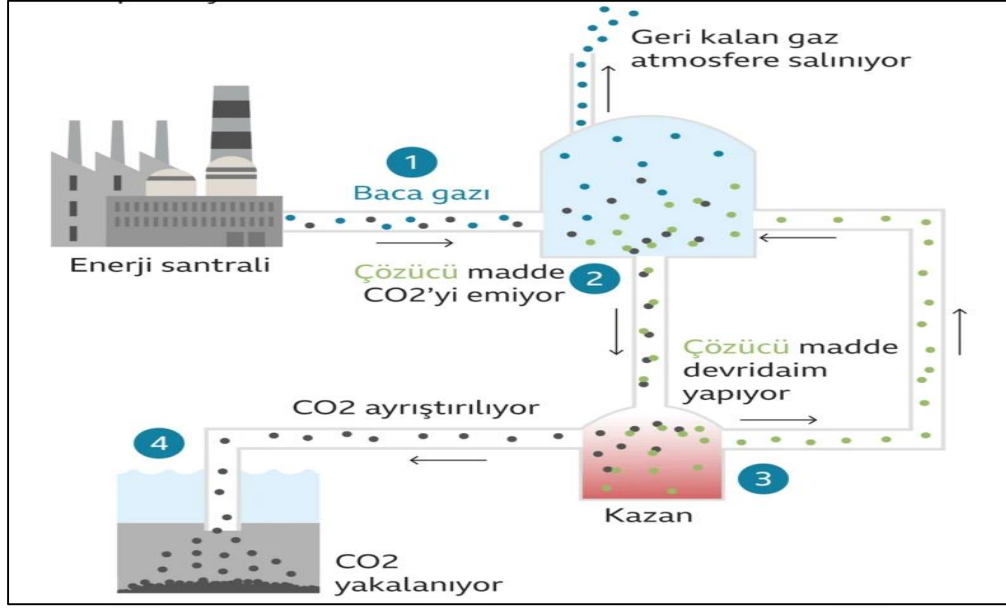
2. KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA SİSTEMLERİ İLE DÜŞÜK KARBONLU ENERJİ ÜRETİMİ

KYD insan kaynaklı sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla geliştirilmiş bir teknolojidir. KYD, fosil yakıtların yanması ve endüstriyel işlemler sırasında oluşan CO₂ gazını yakalar ve yer altına depolayarak atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu azaltmaya yardımcı olur. Bu teknoloji, IPCC'nin Üçüncü Değerlendirme Raporu'nda geniş kapsamlı olarak ele alınmıştır (IPCC, 2001).

KYD teknolojisi üç ana aşamadan oluşur: CO₂ 'nin tutulması, nakledilmesi ve depolanması. Tutma aşamasında, enerji üretim tesislerinden ve büyük endüstriyel kaynaklardan çıkan CO₂ gazı ayrıştırılır ve sıkıştırılır. CO₂ daha sonra boru hatları veya gemiler aracılığıyla depolama sahalarına nakledilir. Depolama aşamasında, CO₂ yer altı jeolojik formasyonlarına, örneğin boş petrol ve gaz sahalarına veya tuz akiferlerine enjekte edilir (Şekil 7). Bu süreç, CO₂ 'nin uzun süreli olarak atmosferden uzak tutulmasını sağlar (ER, 2025).

Enerji tüketiminin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması, iklim değişikliği ile mücadelede önemli stratejilerdir. Daha az enerji yoğun ekonomik faaliyetlerin yaygınlaştırılması ve enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması, karbon emisyonlarını azaltmaya katkı sağlar. Ayrıca, kömür gibi yüksek karbon içerikli yakıtlardan doğal gaz gibi daha az karbon içerikli yakıtlara geçiş, CO₂ emisyonlarının azaltılmasında etkili bir yöntemdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve biyolojik absorpsiyon yöntemleri de atmosferdeki CO₂ 'nin azaltılmasına katkıda bulunur (TCÇŞİDB, 2024).

KYD'nin etkinliği, karbonun yakalanması ve depolanması işleminin maliyeti ve teknolojik uygulanabilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, KYD'nin geniş çapta uygulanabilmesi için maliyetlerin düşürülmesi ve teknolojik iyileştirmelerin devam etmesi gerekmektedir. Gelecekte CO₂ 'nin petrol ve gaz sahalarına enjekte edilmesi yoluyla hidrokarbon üretiminin artırılması gibi yeni yöntemler de KYD'nin ekonomik açıdan daha cazip hale gelmesine katkıda bulunabilir (ER, 2025).



Şekil 7. Karbon yakalama ve depolama konsepti (Drax, 2022).

1.5. Tarihsel Gelişim

KYD'nin tarihçesi, ilk olarak 1970'lerde petrol çıkarma işlemlerinde CO₂ enjeksiyonu ile başlamıştır. Petrol sahalarında gelişmiş petrol geri kazanımı (EOR) amacıyla CO₂ 'nin yeraltına enjekte edilmesi, hem daha fazla petrol çıkarılmasını sağlamakta hem de CO₂ 'nin bir kısmının yeraltında depolanmasına olanak tanımaktadır. Bu süreç, KYD'nin ticari anlamda ilk kullanım örneklerinden biridir, ancak bu dönemde CO₂ 'nin depolanması çevresel bir amaçtan ziyade ekonomik bir kazanç sağlamaya yönelikti.

1990'lara gelindiğinde, KYD'nin iklim değişikliğiyle mücadeledeki potansiyeli fark edilmeye başlandı ve ilk büyük ölçekli karbon depolama projesi olan Norveç'teki Sleipner projesi hayata geçirildi. Bu proje, Kuzey Denizi'ndeki bir doğalgaz sahasında üretilen CO₂ 'nin deniz altındaki tuzlu akiferlere enjekte edilmesiyle, atmosfere yıllık yaklaşık bir milyon ton CO₂ salınımını engellenmiştir. Sleipner projesi, KYD'nin pratik olarak uygulanabilirliğini kanıtlamış ve bu teknolojinin küresel iklim politikalarındaki önemini artırmıştır.

2000'li yıllarda ise KYD, Birleşmiş Milletler ve diğer uluslararası kuruluşların iklim politikalarına dâhil edilmiştir. Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi küresel iklim anlaşmalarında karbon azaltım stratejilerinin bir parçası olarak yer almıştır (IPCC, 2005). Bu dönemde, birçok ülke ve özel şirket, KYD projelerine yatırım yapmaya başlamıştır. Ancak, teknolojinin yüksek maliyetleri ve yeraltında depolanan CO₂ 'nin

güvenliğiyle ilgili endişeler, KYD'nin yaygın olarak benimsenmesini sınırlamıştır (IEA, 2020a).

IPCC, 2005 yılında KYD 'yi vurgulayan bir rapor yayınladı ve bu da birçok ülkede KYD 'ye yönelik hükümet desteğinin artmasına yol açtı. Hükümetler, KYD ve fosil yakıt bazlı hidrojen için tahmini 30 milyar ABD doları harcadı (Gerstner ve Kunze,1989). Dünya çapında, yıllık 130 milyon ton CO₂ depolamak için 149 projenin 2020 yılına kadar faaliyete geçmesi önerildi. Bunlardan yaklaşık %70'i uygulanmadı(Perez vd.,2010). Sınırlı tek seferlik sermaye hibeleri, depolanan CO₂ için uzun vadeli sorumluluğu ele alan önlemlerin olmaması, yüksek işletme maliyetleri, sınırlı sosyal kabul edilebilirlik ve fonlama programlarının dış bütçe baskılarına karşı kırılganlığı, projelerin iptal edilmesine sebep oldu (IEA,2023b).

Temmuz 2024 itibarıyla dünya genelinde ticari ölçekli 44 KYD tesisinden 16'sı, doğal gazdan kaynaklanan ve doğal olarak oluşan CO₂ ayrıştırılmasına yönelik faaliyet göstermektedir. Yedi tesis hidrojen, amonyak veya gübre üretimi; yedi tesis kimyasal üretimi; beş tesis elektrik ve ısı üretimi; iki tesis ise petrol rafinasyonu amacıyla işletilmekte olup, KYD teknolojisi ayrıca bir demir ve çelik tesisinde de kullanılmaktadır. Buna ek olarak, dünya çapında üç tesis yalnızca CO₂ 'nin taşınması ve/veya depolanmasına ayrılmıştır. 2024 itibarıyla, petrol ve gaz endüstrisi dünya çapında faaliyette olan KYD kapasitesinin %90'ını kapsamaktadır (GCCSI, 2024).

GCCSI (2024) verilerine göre, ticari ölçekli KYD tesislerinin on sekizi Amerika Birleşik Devletleri'nde, on dördü Çin'de, beşi Kanada'da ve ikisi Norveç'te bulunmaktadır. Ayrıca Avustralya, Brezilya, Katar, Suudi Arabistan ve Birleşik Arap Emirlikleri'nin her birinde birer proje mevcuttur. IEA (2023) raporuna göre ise 2020 yılı itibarıyla Kuzey Amerika'da 8.000 km'yi aşan CO₂ boru hattı altyapısı bulunurken, Avrupa'da ve Orta Doğu'da iki CO₂ boru hattı sistemi faaliyet göstermektedir.

1.6. Günümüzde KYD Teknolojisi

Günümüzde KYD teknolojisi, enerji üretim tesisleri, çimento fabrikaları, demir-çelik üretim tesisleri ve kimya endüstrisi gibi büyük CO₂ emisyon kaynaklarında kullanılmaktadır. Özellikle kömür ve doğal gazla çalışan enerji santralleri, bu teknolojinin en önemli uygulama alanlarından biridir. KYD teknolojisi, bu tesislerin çevresel etkilerini azaltmak için kullanılmaktadır.

KYD teknolojisi, son yıllarda önemli gelişmelere sahne olmuştur. CO₂ 'nin yakalanması, taşınması ve depolanması süreçlerindeki verimlilik artışı, bu teknolojinin

daha geniş çapta uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ancak, KYD'nin maliyeti hala önemli bir engeldir. Depolama alanlarının güvenliği ve uzun vadeli izlenmesi gibi teknik ve çevresel zorluklar da bu teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlandıran faktörler arasındadır.

KYD teknolojisinin yaygınlaşması, hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların destekleyici politikalarına bağlıdır. Karbon fiyatlandırması, vergi teşvikleri ve doğrudan mali destek gibi mekanizmalar, KYD yatırımlarını teşvik etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca Paris Anlaşması ve Avrupa Birliği İklim Değişikliği Politikası gibi uluslararası anlaşmalar ve düzenlemeler, KYD teknolojisinin gelişimini desteklemektedir (EnviCo, 2025).

Global CCS Institute(GCCSI) tarafından yayınlanan 2020 KYD Küresel Durum Raporuna göre, faaliyette olan 26 tesis ile dünya çapında 65 ticari KYD tesisi bulunmaktadır. Bu tesisler toplamda yıllık yaklaşık 40 Mt CO₂ yakalayabilmekte ve depolayabilmektedir. Genel operasyonel CO₂ yakalama kapasitesi 2010'dan bu yana istikrarlı bir şekilde artmasına rağmen, karbon yakalamadaki faaliyet düzeyi 2011'den sonra azalmıştır. Bununla birlikte, 2015 Paris Anlaşması ile birlikte birçok hükümet daha güçlü iklim politikaları oluşturmuş ve özel sektöre daha fazla baskı uygulamaya başlamıştır. 2017 yılından bu yana 30'dan fazla yeni entegre tesis duyurulmuştur. Sonuç olarak, açıklanan tüm projelerin tamamen faaliyete geçmesi durumunda, toplam küresel CO₂ yakalama kapasitesi yılda yaklaşık 130 Mt'a yükselecektir (ABS, 2021).

1.7. Karbon Yakalama Sistemleri

Bu teknolojiler, havadaki CO₂ gazını yakalama, depolama veya çeşitli şekillerde kullanma amaçlı geliştirilmiş yöntemlerdir. Karbon yakalama sistemleri, sera gazı emisyonlarını azaltmayı ve iklimsel etkilerin azaltılmasına yönelik kritik bir rol üstlenmektedir. KYD sistemlerinde ilk adım, karbonun yakalanması olup bu aşama farklı teknolojiler ve yöntemlerle gerçekleştirilebilir.

Karbon yakalama teknolojisi, atmosferdeki CO₂ yoğunluğunu azaltmak suretiyle iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir işlev üstlenmektedir. Bununla birlikte, söz konusu teknoloji; yüksek ekonomik maliyetler, yoğun enerji ihtiyacı ve karbondioksitin güvenli biçimde depolanmasına ilişkin teknik imkansızlıklar barındırmaktadır. Bu zorluklarla ilgili çalışmalar devam etmektedir (Sayman vd., 2024).

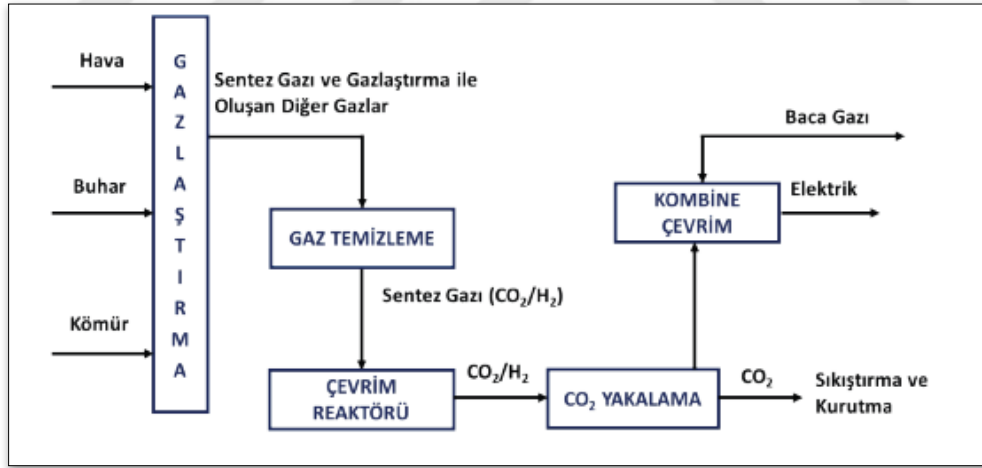
CO₂ emisyonlarının kayda değer bir kısmı, fosil yakıtların kullanıldığı sanayi, enerji ve imalat sektöründe ortaya çıkmaktadır. Sanayi, enerji ve imalat sektörlerinde karbon yakalama teknolojileri, öncelikle yüksek kapasiteli üretim alanlarında

uygulanmaktadır. Bu sistemler, genellikle üç ana kategoride sınıflandırılır: ön yakma, son yakma ve oksijen yakma.

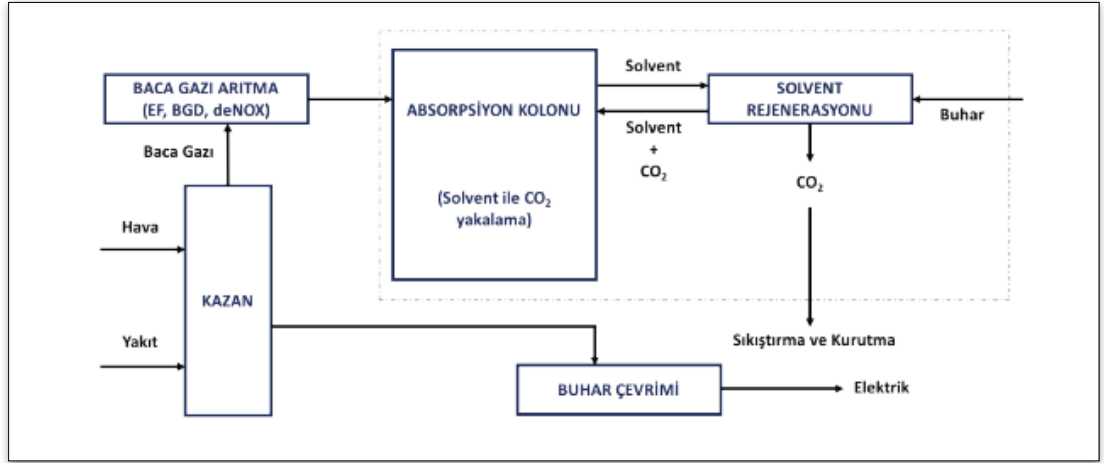
i. Ön Yakma (Pre-combustion): Ön yakma, fosil yakıtların yakılmadan önce işlenmesiyle CO_2 'nin ayrıştırılması sürecidir. Bu yöntemle, fosil yakıtlar önce gazlaştırılır ve ardından hidrojen ve CO_2 'ye dönüştürülür. CO_2 , bu süreçte yakalanır ve depolanır (Şekil 8). Hidrojen ise enerji üretimi için kullanılabilir (YEGM, 2025).

ii. Son Yakma (Post-combustion): Son yakma, fosil yakıtların yakılmasından sonra CO_2 'nin yakalanmasını içerir (Şekil 9). Bu sistemde, baca gazlarından CO_2 'yi ayrıştırmak için amin bazlı çözeltiler gibi kimyasal çözücüler kullanılır. Bu yöntem, mevcut enerji santrallerine kolayca entegre edilebilir ve yaygın olarak kullanılmaktadır (YEGM, 2025).

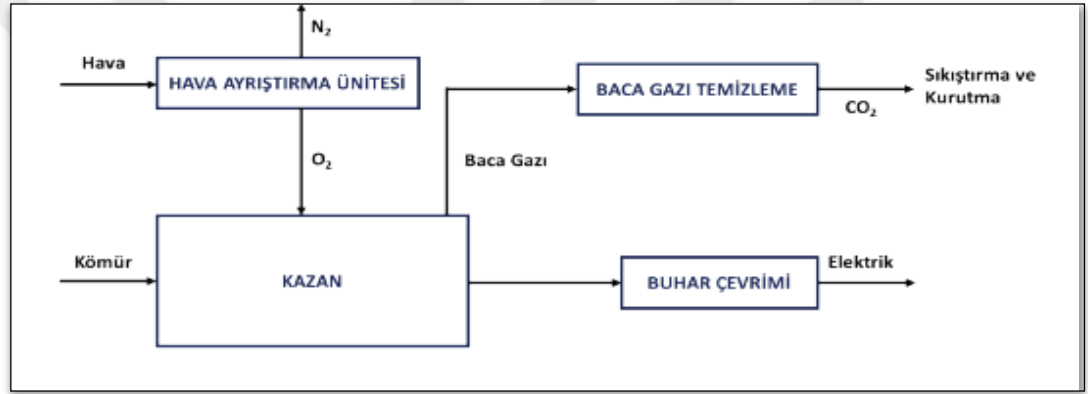
iii. Oksijen Yakma (Oxy-fuel Combustion): Oksijen yakma, yakıtın saf oksijenle yakılması sürecidir. Bu yöntemle üretilen baca gazı, büyük oranda CO_2 ve su buharından oluşur. Su buharı kolayca yoğuşturulup ayrıştırılır, geriye kalan CO_2 ise yakalanarak depolanır (Şekil 10). Oksijen yakma, CO_2 'nin yüksek konsantrasyonda yakalanmasını sağladığı için avantajlıdır (ECKA, 2025).



Şekil 8. Yanma öncesi yakalama yöntemi (URL-1, 2020).



Şekil 9. Yanma sonrası yakalama yöntemi (URL-1, 2020).



Şekil 10. Oksi-yakıt yanmada yakalama (URL-1,2020).

Bunların dışında Doğrudan Karbon Yakalama (DAC) gelişmeye başlamıştır. Atmosferde bulunan CO₂ 'in doğrudan yakalanmasını sağlayan bir teknolojidir. Bu teknoloji, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç olarak kabul edilmektedir çünkü atmosferdeki CO₂ seviyelerini doğrudan azaltma potansiyeline sahiptir (Keith vd., 2018). DAC sistemleri genellikle fanlar aracılığıyla havayı çekerek, CO₂ 'yi kimyasal emiciler veya diğer yakalama mekanizmaları aracılığıyla ayırır. Daha sonra, bu CO₂ sıvılaştırılır ve depolanır. Depolanması istenmediği takdirde yeniden kullanılmak üzere farklı endüstrilere gönderilir.

DAC teknolojisinin en büyük avantajlarından biri, emisyon kaynaklarından bağımsız olarak CO₂ 'yi atmosferden doğrudan çekebilmesidir. Bu, özellikle CO₂ emisyonlarının azaltılması zor olan sektörlerde, örneğin havacılık ve deniz taşımacılığı gibi, büyük bir avantaj sağlar. Ayrıca, mevcut fosil yakıt altyapısına entegre edilerek

enerji santrallerinin ve endüstriyel tesislerin karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunabilir (Realmonte vd., 2019).

Bununla birlikte, DAC teknolojisinin bazı zorlukları vardır. En belirgin zorluklardan biri, bu sistemlerin yüksek enerji ve maliyet gereksinimleridir. CO₂ 'yi atmosferden çekmek, genellikle büyük miktarda enerji tüketir ve bu da DAC sistemlerinin ekonomik verimliliğini sınırlayabilir. Ayrıca, yakalanan CO₂ 'nin güvenli ve kalıcı bir şekilde depolanması veya yeniden kullanımı da önemli bir meseledir (Fasihi vd., 2019).

Biyoenerji karbon yakalama ve depolama (BEKYD), biyokütleden enerji üretirken açığa çıkan CO₂ 'i yakalama ve depolama yöntemidir. Bu teknoloji, biyokütle kaynaklarının yanması sırasında üretilen CO₂ 'yi atmosfere salınmadan önce yakalar ve güvenli depolama alanlarına taşır. BEKYD, bu süreçte karbonsuz veya karbon negatif enerji üretimini hedefler, yani atmosfere salınan CO₂ miktarından daha fazlasını yakalayarak net bir negatif emisyon sağlar. Bu yöntem, özellikle enerji üretiminde karbon nötrlüğüne ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlayarak iklimsel risklerin yönetiminde kritik bir rol üstlenmektedir (ET, 2024a).

BEKYD'in avantajları arasında, sürdürülebilir biyokütle kaynaklarının kullanımı ve atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu azaltma potansiyeli yer alır. Bununla birlikte, BEKYD'in uygulama maliyetleri, biyokütle kaynaklarının sürdürülebilirliği ve yakalanan CO₂ 'nin güvenli depolanması gibi bazı zorluklar da mevcuttur. Bu zorlukların üstesinden gelmek için teknolojinin daha da geliştirilmesi ve uygun politikaların uygulanması gerekmektedir. BEKYD, doğru uygulandığında iklim değişikliğiyle mücadelede güçlü bir araç olabilir ve enerji sektöründe önemli bir rol oynayabilir (Gough ve Upham, 2011).

BEKYD sistemlerinin çalışma prensibi, biyokütle kaynaklarından enerji üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ yakalanması ve depolanması üzerine kuruludur. BEKYD teknolojisi, biyokütle, yani organik materyallerin (örneğin, odun, bitki artıkları ve tarımsal atıklar) enerji üretimi için yakılması veya gazlaştırılmasıyla başlar. Bu süreçte üretilen CO₂ , atmosfere salınmadan önce çeşitli teknolojiler kullanılarak yakalanır.

Yakalama işlemi genellikle üç ana yöntemle gerçekleştirilebilir: ön yakma, son yakma ve oksijen yakma. Ön yakma yönteminde, yakma işlemi başlamadan önce biyokütleden elde edilen gazlar işlenir. Son yakma yönteminde ise, CO₂ , yanma sonrasında egzoz gazlarından ayrıştırılır. Oksijen yakma yönteminde ise, biyokütle saf oksijen kullanılarak yakılır ve bu, daha saf ve kolay yakalanabilir bir CO₂ akışı sağlar.

Yakalanan CO₂ , sıvılaştırılarak veya sıkıştırılarak güvenli depolama alanlarına taşınır. Bu alanlar genellikle derin yeraltı jeolojik formasyonları, boş petrol ve gaz

rezervuarları veya okyanus tabanlarındaki formasyonlardır. Yakalanan CO₂ 'nin uzun süreli ve güvenli bir şekilde depolanması, BEKYD sistemlerinin çevresel faydalarını maksimize etmek için kritik öneme sahiptir (Gough ve Upham, 2011).

1.8. Karbon Taşıma Sistemleri

Yakalanan CO₂'in depolanması için öncelikle depolama alanlarına taşınması gerekmektedir. CO₂, ağırlıklı olarak gaz halinde taşınmaktadır. Gaz olarak taşınması verimsiz olduğu durumlarda ise taşıma işlemi yoğun veya sıvı formda olan CO₂ ile gerçekleştirilmektedir. CO₂ taşıma işlemi;

- i. Boru hatları,
- ii. Deniz yolu,
- iii. Karayolu ve demiryolları aracılığı ile sağlanabilmektedir.

CO₂ taşımacılığı genellikle boru hatları ve gemiler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Kamyonlar ise daha çok sınırlı miktarda CO₂ 'nin taşınması gereken durumlarda tercih edilmektedir. Özellikle uzun mesafeli taşıma gereksinimlerinde, boru hattı altyapısının bulunmadığı bölgelerde gemi taşımacılığı etkili bir alternatif sunar. Bu amaçla geliştirilen özel taşıma gemilerinin kapasitesi artırılmakta olup, bazı modeller yaklaşık 40.000 ton basınçlandırılmış ve soğutulmuş CO₂ taşıyabilmektedir. Bu gelişmeler, CO₂ 'nin güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasını mümkün kılmaktadır (SWZ Maritime, 2021).

Gemiyle gerçekleştirilen CO₂ taşımacılığında en kritik gereksinimlerden biri, ara depolama tesislerinin varlığıdır. Bu tesisler sayesinde, gemi seferleri sırasında yakalanan CO₂ kısa süreli olarak güvenli biçimde depolanabilmektedir. Öte yandan, boru hattı taşımacılığı genellikle gemi taşımacılığına kıyasla daha ekonomik bir seçenek sunmakta; ayrıca CO₂ 'nin yakalandığı noktadan nihai depolama alanına kadar kesintisiz bir akış sağlamaktadır. Bir boru hattının taşıma kapasitesi ise hattın çapı, giriş ve çıkış basınç değerleri ile boru et kalınlığı gibi teknik parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Sayman vd., 2024).

Chrysostomidis (2009) tarafından gerçekleştirilen varsayımsal bir durum analizinde, emisyon kaynakları ile depolama sahalarının doğrudan noktadan noktaya boru hatlarıyla bağlanması ile bu noktaların bütünleşik bir ana hat sistemi üzerinden taşınması arasındaki maliyet farkları karşılaştırılmıştır. Elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Kapasite kullanımının belirginliği sayesinde, noktadan noktaya boru hattı yatırımları bireysel geliştiriciler tarafından proje özelinde finanse edilecektir.

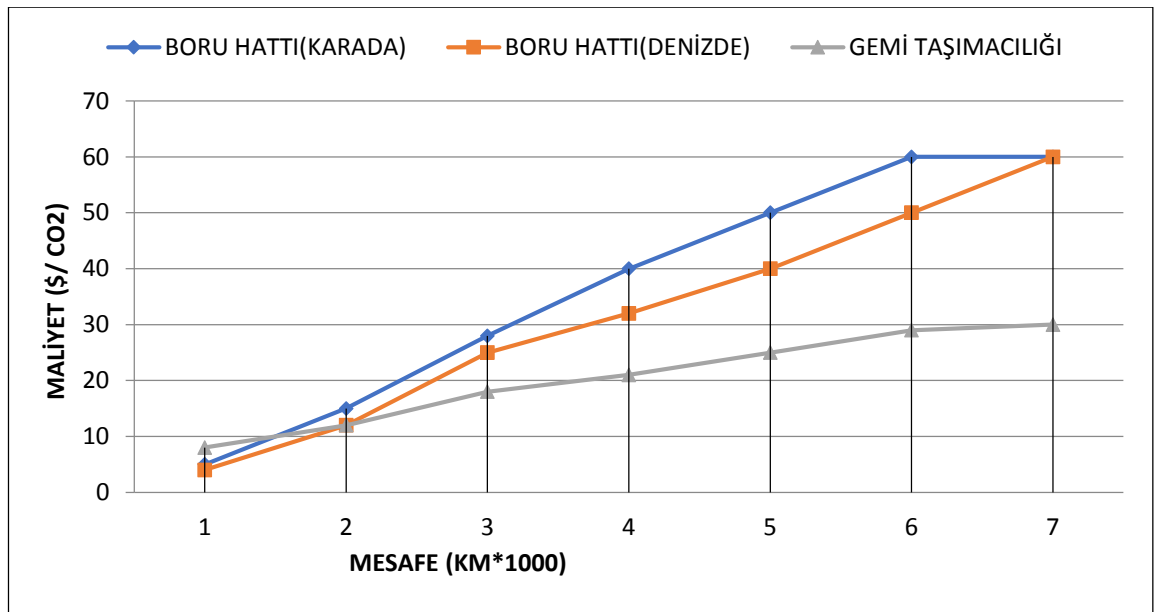
- Zaman içinde en etkin performansı sunabilecek alternatif, entegre ana hat boru şebekeleri olacaktır.

- Entegre ana hat boru şebekelerinin ekonomik sürdürülebilirliğini sağlamak için garantili kapasite kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, kapasite kullanımını destekleyici nitelikte optimize edilmiş ağların gelişimini teşvik edecek kamu politikalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

- İlk yıllarda kapasite artışına paralel olarak ticari sürdürülebilirliği sağlamak adına kamu desteği önem arz etmektedir. Ana hat altyapısının hayata geçirilmesi için hükümet teşvikleri ve kredi garantileri temel gereksinimler arasında yer almaktadır.

CO₂ taşıma projeleri, karbon fiyatlamasıyla ilişkilendirilen yüksek düzenleyici ve pazar riskleri nedeniyle bankalar ve finansal kuruluşlar tarafından riskli yatırım alanları olarak görülmektedir.

Farklı taşıma seçeneklerinde maliyet, taşıma uzaklığına göre farklılık arz etmektedir. Kısa mesafelerde borularla nakliye ekonomik olsa da uzak mesafelerde gemi taşımacılığı en ekonomik seçenek olmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. Farklı taşıma seçeneklerinde maliyetin taşıma uzaklığına göre değişimi (IPCC, 2005)

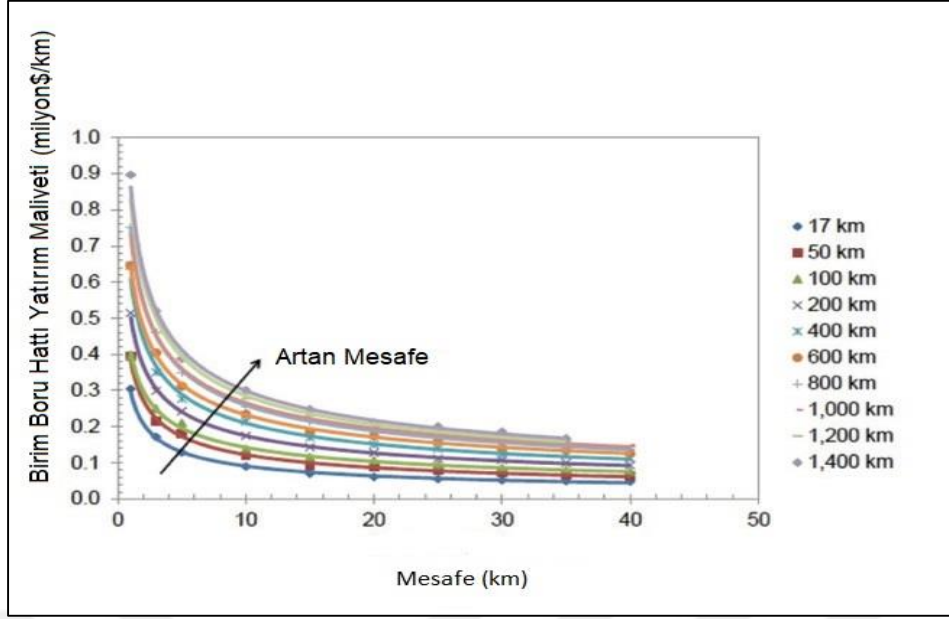
i. Boru Hatları ile CO₂ Taşınması: CO₂'nin boru hatları ile taşınması genellikle iki ana aşamada gerçekleşir: yakalama ve taşıma. Yakalanan CO₂, yoğunlaştırılarak boru hatlarına pompalanır ve bu hatlarla belirli bir hedefe taşınır. Bu hedefler genellikle uzak mesafelerdeki depolama alanları veya kullanım alanları olmaktadır. Taşınma süreci sırasında, CO₂'in sızıntı ve aşırı basınç gibi riskleri için çeşitli güvenlik önlemleri alınır (Holloway ve Rochelle, 2015).

Depolama alanları genellikle yeraltı jeolojik oluşumlar olarak belirlenir ve bu oluşumlar, CO₂'nin uzun süreli depolanmasını sağlar. Bu oluşumlar arasında tuz mağaraları, eski petrol ve doğal gaz yatakları, derin tuzlu su oluşumları gibi yerler bulunur.

Dünyada boru hattıyla CO₂ taşımacılığının en yaygın yapıldığı ülke olan ABD'de yılda yaklaşık 66 milyon ton CO₂ boru hatlarıyla taşınmaktadır. ABD'nin aksine, dünyanın geri kalanında bu yöntem pek yaygın değildir. KYD teknolojilerinin yaygınlaşarak kullanımının artması için ekonomik olarak en verimli yöntem olan boru hatlarıyla taşınmanın yaygınlaşması da önem arz etmektedir. Bu nedenle yeni boru hatlarının kurulması, mevcut CO₂ boru hatlarının artırılması veya yenilenerek CO₂ taşınmasına daha uygun hale getirilmesi gerekmektedir (Ertemel vd.,2023).

ii. Deniz Yolu ile CO₂ Taşınması: Deniz yolu ile CO₂ taşınması, KYD teknolojilerinin bir parçası olarak önemli bir taşıma yöntemidir. Bu yöntem, CO₂'nin sıvılaştırılarak gemiler aracılığıyla taşınmasını içerir. Deniz yolu taşımacılığı, kara boru hatları ile taşınamayan veya ekonomik olmayan durumlarda özellikle uzun mesafeler için kullanılır. CO₂, genellikle düşük sıcaklıklarda sıvılaştırılır ve özel olarak tasarlanmış gemilerle taşınır. Bu süreç, CO₂'nin endüstriyel kaynaklardan yakalanması, sıvılaştırılması ve hedef depolama alanlarına veya yeniden kullanım tesislerine taşınmasını içerir.

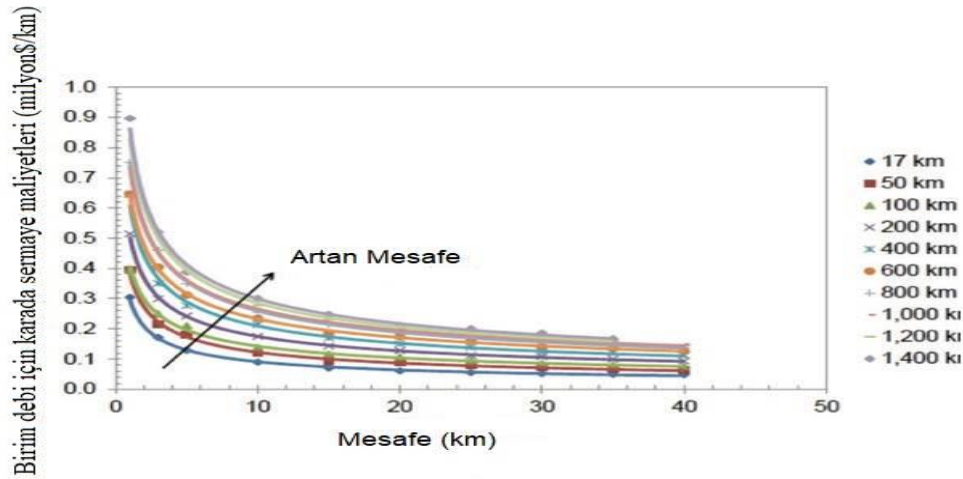
Deniz yolu ile CO₂ taşınmasının en önemli avantajlarından biri, büyük miktarlarda CO₂'nin ekonomik ve verimli bir şekilde taşınabilmesidir. Bu yöntem, özellikle büyük ölçekli KYD projeleri için uygundur ve karasal altyapının sınırlı olduğu bölgelerde etkili bir çözüm sunar (Şekil 12). Ancak, deniz taşımacılığı, güvenlik riski ve çevresel risklerin dikkatli bir şekilde yönetilmesini gerektirir. Örneğin, CO₂'nin sıvılaştırılması ve taşınması sırasında meydana gelebilecek sızıntılar ve kazalar, ciddi çevresel etkilere yol açabilir. Bu nedenle, bu süreçlerin güvenli ve düzenlemelere uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi kritik öneme sahiptir (Metz vd.,2005).



Şekil 12. Boru hattı birim debi için denizde sermaye maliyetleri (RECT, 2024).

iii. Karayolu ve Demiryolu ile CO₂ Taşınması: Karayolu ve demiryolu ile CO₂ taşınması günümüzde mümkündür. Boru hattının mevcut olmadığı durumlarda, yüksek basınçla sıvı hale getirilmiş CO₂'in taşınması karayolları ve demiryolları ile sağlanmaktadır. Ölçek ekonomisi nedeniyle (yani taşınan miktar arttıkça birim maliyetin düşmesi), karayolu ve demiryolu ile yapılan CO₂ taşımacılığı, boru hattı taşımacılığına kıyasla yaklaşık 3 ila 10 kat daha maliyetlidir. Bu nedenle söz konusu seçenekler, yeterli verimi sağlamadıkları ve boru hattına ikame olamayacakları için karada kalıcı bir yöntem olarak tercih edilmemektedir. Karada CO₂ taşınması gerektiğinde ilk tercih her zaman boru hatları olmaktadır.

Boru hattı taşıma sistemlerinde sermaye maliyeti, debi ve mesafe ile birlikte artsa da; yüksek debi koşullarında birim debi başına düşen maliyet azalmakta ve sabitlenme eğilimi göstermektedir (Şekil 13). Kompresör ve yeniden sıkıştırma giderlerinin yanı sıra, boru hatlarının operasyonel maliyetleri de bulunmaktadır. Ancak bu maliyetler genellikle toplam sermaye maliyetinin %1'i civarında öngörülmektedir.



Şekil 13. Boru hattı birim debi için karada sermaye maliyetleri (RECT, 2024).

1.9. Karbon Depolama Sistemleri

Karbon depolama sistemleri, yakalanan CO₂ 'nin uygun yöntemlerle taşınarak depolama alanlarına iletilmesini içerir. Depolama işleminin temel amacı, bu CO₂ 'yi kullanılabilir bir ürüne dönüştürerek fayda sağlamak veya karbon döngüsünden kalıcı ya da uzun süreli olarak çıkarmaktır. En yaygın yöntem, CO₂ 'nin karbon döngüsünden çıkarılmasıdır ve bu işlem günümüzde jeoloji biliminin sağladığı yöntemlerle mümkündür (IPCC, 2005). Jeolojik depolama yöntemleri arasında;

- Tükenmiş petrol ve doğal gaz yataklarına depolama,
- Aktif petrol ve doğal gaz yataklarına depolama,
- Tuz oluşumlarına, çeşitli kayaç formasyonlarına depolama ve okyanus tabanına depolama yer alır.

Mevcut yöntemlerin yanı sıra, araştırılan ve geliştirilen farklı jeolojik depolama teknikleri de bulunmaktadır. Başarılı bir jeolojik depolama için hedef formasyonun, gözeneklilik ve üst kısımda düşük geçirgenlikli mühür gibi iki temel özelliğe sahip olması gereklidir (GCCSI, 2021).

i. Tükenmiş Petrol ve Doğal Gaz Yataklarına Depolama: Tükenmiş petrol ve doğal gaz yataklarına depolama, karbon depolama sistemleri kapsamında önemli bir yöntemdir. Bu yöntem, yakalanan CO₂ 'in artık petrol ve doğal gaz çıkarmak için kullanılmayan rezervuarlara enjekte edilerek depolanmasını içerir. Bu rezervuarlar, CO₂ 'nin depolanması için ideal koşullara sahip olabilir çünkü petrol veya gaz çıkarma süreçlerinde oluşmuş olan gözenekli ve geçirgen yapı, CO₂ 'nin burada etkin bir şekilde depolanmasını sağlar (Benson ve Cole, 2008).

Depolama işlemi sırasında, CO₂ rezervuarın içinde bulunan su ve gazlarla yer değiştirir. Tükenmiş petrol ve gaz rezervuarlarının genellikle üzerlerinde doğal bir mühür tabakası bulunur. Mühür tabakası CO₂ 'nin kaçmasını engeller. Bu mühürler; kil, tuz veya diğer düşük geçirgenliğe sahip kayalarla oluşabilir ve CO₂ 'nin uzun süreli olarak güvenli bir şekilde depolanmasını sağlar. Ayrıca, bu yöntemle depolanan CO₂ 'nin bir kısmı mineralizasyon süreciyle kayalarla kimyasal reaksiyona girerek katı hale geçebilir, bu da depolamanın kalıcılığını artırır (IPCC, 2005).

Tükenmiş petrol ve doğal gaz yataklarına CO₂ depolamanın diğer bir avantajı ise ekonomik potansiyeldir. Bu tür depolama alanlarının kullanılması, petrol ve gaz endüstrisinde hali hazırda mevcut olan altyapının değerlendirilmesine olanak tanır. Bu, yeni depolama alanlarının oluşturulması ve işletilmesine kıyasla maliyetleri düşürebilir. Ancak, bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için uygun jeolojik koşulların yanı sıra, detaylı saha değerlendirmeleri ve sürekli izleme sistemleri gereklidir (IEA, 2020b).

ii. Aktif Petrol ve Doğal Gaz Yataklarına Depolama: Aktif petrol ve doğal gaz yataklarına CO₂ depolanması, ilk depolama yöntemlerinden biri olarak bilinir ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (IEA, 2015). EOR olarak da bilinen bu yöntem, CO₂ 'nin mevcut petrol ve doğal gaz rezervuarına enjekte edilerek petrol ve doğal gaz ile yer değiştirmesini sağlar. Bu sayede, üretilen petrol ve doğal gaz miktarı artarken, CO₂ enjekte edildiği boşluklara girerek yüksek basınç altında depolanır. Depolanan CO₂ zamanla, formasyondaki kalan sıvı içinde çözünerek mineralize olur. Bu süreçteki ana hedef, petrol ve doğal gaz üretimini artırmaktır. CO₂ 'nin depolanması ise bu süreç içerisinde kendiliğinden gerçekleşir.

EOR, 50 yılı aşkın süredir kullanılan eski bir teknolojidir. Bu yöntem, özellikle endüstriyel kaynaklardan çıkan CO₂'nin yakalanıp enjekte edilmesiyle uygulandığında, kalıcı depolama sağlayarak sera gazı emisyonlarını büyük ölçüde azaltabilmektedir. Yapılan araştırmalar, endüstriyel CO₂ kullanılarak EOR yöntemiyle gerçekleştirilen petrol ve doğal gaz üretiminin, geleneksel yöntemlere kıyasla yaklaşık %63 oranında daha düşük sera gazı emisyonu ile sonuçlandığını ortaya koymaktadır (Ertemel vd., 2023).

iii. Tuz Oluşumlarına ve Çeşitli Kayaç Formasyonlarına Depolama: Mevcut doğal gaz ve petrol yataklarının yanı sıra, jeolojik rezervuarlara da CO₂ depolanabilir. Jeolojik depolama yöntemlerinin geneli için, formasyon yapısının uygun olması depolama için yeterlidir.

Derin tuzlu formasyonlar, yüksek miktarlarda çözülmüş tuz içeren suya doymuş derin sedimanter (tortul) kayalardan oluşmaktadır. CO₂ depolama kapasiteleri oldukça yüksek olan bu formasyonların, enjekte edilen CO₂'in kritik bir seviyede kalmasını sağlayacak yeterli bir derinlikte olması gerekir ($\geq 800-1000$ m; Solomon vd., 2008). Bu nedenle tuzlu formasyonlarda depolama işleminde CO₂, tutma işlemini takiben eğer enjeksiyon için yeterli basınca sahip değilse sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Bu aşamadan sonra CO₂, tuzlu formasyonlarla bağlantıyı sağlayan kuyulara dağıtılır. Kuyu vasıtasıyla formasyona enjekte edilen CO₂, formasyon suyundan daha az yoğunluk ve viskoziteye sahip olduğundan değişen basıncın da etkisiyle kuyudan uzaklaşarak formasyon içerisinde yayılır (Solomon vd., 2008).



3. KYD EKONOMİ VE POLİTİĞİ

KYD teknolojileri, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayan yenilikçi çözümler arasında yer almaktadır. Ancak bu teknolojilerin uygulanabilirliği büyük ölçüde ekonomik faktörlere dayanmaktadır. KYD, CO₂ 'nin endüstriyel tesisler ve enerji santralleri gibi büyük emisyon kaynaklarından yakalanmasını, ardından taşınmasını ve nihayetinde yer altı rezervuarlarında depolanmasını içerir (IEA, 2021). Bu sürecin her aşaması, altyapı maliyetleri, enerji tüketimi ve operasyonel giderler gibi önemli harcamaları beraberinde getirmektedir. Bu maliyetlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, KYD teknolojilerinin ekonomik uygulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

KYD'nin ekonomik değerlendirmesinde yakalama maliyetleri başlıca unsurlar arasında yer alır. CO₂ 'nin yakalanması, toplam KYD maliyetlerinin yaklaşık %70-%90'ını oluşturmaktadır (GCCSI, 2018). Çoğu teknoloji için ton başına maliyet 40 ila 80 ABD doları arasında değişirken, bu maliyetler enerji santralleri, çimento fabrikaları veya çelik üretim tesisleri gibi sektörlerde farklılık göstermektedir. Mevcut tesislere KYD sistemlerinin entegre edilmesi, genellikle yeni tesislere kıyasla daha yüksek maliyetler yaratmakta ve enerji verimliliğini düşürerek operasyonel giderleri artırabilmektedir.

Taşıma ve depolama süreçleri de KYD'nin toplam maliyetinde önemli bir yer tutmaktadır. CO₂ 'nin boru hatları aracılığıyla taşınması, genellikle yakalama ve depolama aşamalarından daha düşük maliyetli olsa da, altyapı kurulumu ciddi yatırımlar gerektirir. Depolama maliyetleri ise jeolojik koşullara ve sahanın konumuna bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, sızıntı riskleri ve uzun vadeli izleme gereklilikleri, KYD projelerinin toplam ekonomik yükünü artırmaktadır (IPCC, 2022).

Hükümetler ve uluslararası kuruluşlar, KYD teknolojilerinin ekonomik fizibilitesini artırmak için çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirmiştir. Karbon fiyatlandırması, karbon ticaret sistemleri ve doğrudan sübvansiyonlar bu teşvikler arasında yer almaktadır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan 45Q vergi kredisi, ton başına 50 ABD doları kadar destek sağlayarak KYD projelerini daha cazip hale getirmiştir (IEA, 2021). Bununla birlikte, teşviklerin yetersiz olduğu veya karbon fiyatlandırmasının düşük olduğu bölgelerde, KYD projeleri ekonomik açıdan sürdürülebilir olmayabilir.

KYD teknolojilerinin uzun vadeli sürdürülebilirliği, depolama alanlarının güvenliği, CO₂ sızıntısı riskleri ve bu risklere bağlı hukuki sorumluluklar gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca, enerji piyasalarındaki dalgalanmalar ve düşük karbonlu alternatiflerin hızla gelişmesi, KYD'nin rekabetçiliğini tehdit edebilir (IPCC, 2022). Bu nedenle, teknoloji geliştirme ve politika desteği büyük önem taşımaktadır. Ar-Ge faaliyetleri maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlayabilirken, karbon fiyatlandırma mekanizmalarının yaygınlaştırılması ve uluslararası iş birliği, KYD'nin ekonomik olarak daha uygulanabilir hale gelmesine yardımcı olabilir.

3.1. KYD Teknolojisinin Kurulum ve İşletme Maliyetleri

KYD teknolojilerinin uygulanması yüksek kurulum maliyetleri gerektirir. Yakalama, taşıma ve depolama aşamaları için özel altyapı ve teknolojiler geliştirilmelidir. Bu süreçler genellikle büyük ölçekli endüstriyel tesislerde uygulanır ve önemli sermaye yatırımı gerektirir (IEA, 2019). KYD teknolojilerinin ekonomik maliyeti; yatırım ve işletme giderleri, enerji tüketimi, altyapı gereksinimleri ve depolama maliyetlerini kapsar. Yakalama aşamasında fosil yakıtların yanması sırasında CO₂ 'nin ayrıştırılması ve saflaştırılması önemli miktarda enerji ve maliyet gerektirir (IEA, 2019). Taşıma aşamasında CO₂ 'nin güvenli şekilde depolanacağı alanların belirlenmesi ve taşınması gerekir. Bu maliyetler mesafeye ve taşıma yöntemine göre değişebilir (IEA, 2019).

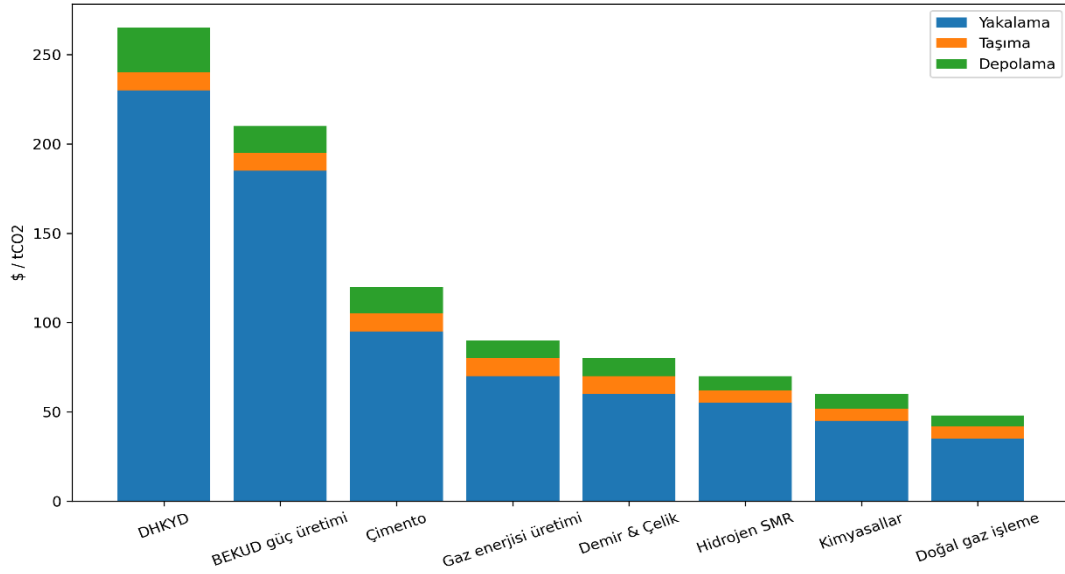
KYD maliyetleri, kullanılan teknoloji türüne ve ölçeğine göre değişir. Küçük ölçekli pilot projelerden büyük ölçekli ticari projelere kadar farklı seviyelerde maliyet analizleri yapılmaktadır. Ayrıca yakalama teknolojilerinin verimliliği, enerji yoğunluğu ve karbon kredileri gibi faktörler ekonomik değerlendirmelerde önemli rol oynar (Smith vd., 2021).

Rystad Energy'nin araştırmasına göre, KYD hizmetleri sektörüne yapılan harcamalar 2022'den 2025'e kadar dört katına çıkacak ve küresel toplam harcama 50 milyar doları aşması öngörülmektedir. KYD sektöründe 2024 ve 2025 yıllarında sırasıyla 18 ve 19 milyar dolar harcama yapılması beklenmektedir. Bu on yılın ortasında toplam harcamanın 52 milyar dolara ulaşacağı öngörülmektedir. Rakamlar yalnızca duyurulan projelere dayanmakta olup pilot projeler dahil edilmemiştir. Planlanan harcamalar CO₂ yakalama ünitelerinin kurulumu, taşınması ve depolanmasıyla ilgili hizmetleri kapsamaktadır. Avrupa ve Kuzey Amerika, 2025 yılına kadar faaliyete geçmesi beklenen 84 ticari KYD projesinden 63'üne ev sahipliği yaparak yatırımların büyük kısmını yönlendirilmesi beklenmektedir (RE, 2022).

Günümüzde dünya genelinde, yıllık toplam 41 milyon ton CO₂ yakalama kapasitesine sahip 56 ticari KYD projesi aktif olarak faaliyet göstermektedir. Mevcut projeksiyonlara göre, 2025 yılına kadar yaklaşık 140 KYD tesisinin devreye alınması planlanmakta olup, bu tesislerin yılda yaklaşık 150 milyon ton CO₂ 'yi yakalayabileceği öngörülmektedir. Bu projeler fizibilite, konsept ve inşaat aşamalarında. Toplam harcamaların yaklaşık üçte ikisi, CO₂ yakalama bileşenlerinin kurulumu ve operasyonlarının sürdürülmesine harcanacaktır. Mühendislik, tedarik, inşaat ve kurulum (EPCI) maliyetleri toplam harcamaların ana unsurudur ve 2025 yılına kadar toplamda 55 milyar doların 35 milyar dolarlık kısmını oluşturacaktır. Yıllık EPCI harcaması 2025'te 12 milyar dolara çıkarak %300'den fazla artacaktır.

CO₂ 'nin yakalanmasının ardından taşınması 2025'e kadar 8,5 milyar dolar değerinde hizmet alımını gerektirmektedir. CO₂ boru hatları, kamyonlar ve gemilerle depolama alanlarına taşınabilir. Kuzey Amerika'da 38'i bulunan 51 operasyonel kara boru hattı CO₂ taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Depolama işlemi, potansiyel alanların belirlenmesiyle başlayıp enjeksiyon ve izleme amaçlı sondaj kuyuları ile devam eder. Bu süreç 2025 yılına kadar en az 9 milyar dolarlık hizmet alımını gerektirmektedir (WEC, 2022). Elektrik üretimi ve imalat sanayisindeki mevcut tesislerde karbon yakalama, taşıma ve depolama maliyetleri ton başına 100 dolar civarına kadar düşmüştür (Şekil 14). Ancak DAC teknolojilerinin maliyeti halen önemli ölçüde yüksektir (ÇİD, 2022).

Karbon yakalama maliyetlerindeki farklılıklar, teknolojik olgunluk, ölçek ekonomileri, enerji tüketimi ve kullanılan teknolojiler gibi birçok faktöre bağlıdır. Doğrudan havadan karbon yakalama teknolojilerinin maliyetlerinin düşürülmesi için, daha fazla araştırma ve geliştirme çalışması yapılması, ölçek ekonomilerinden yararlanılması ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 14. KYD Maliyetleri (IEA, 2019)

3.2. Karbon Kredileri ve Teşvikler

KYD teknolojileri, karbon piyasalarında ticaret yapılabilen karbon kredileri oluşturarak ekonomik fayda sağlayabilir. Hükümetler ve uluslararası kuruluşlar, karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla KYD projelerine finansal destek, vergi indirimleri ve teşvikler sunarak bu yatırımların ekonomik fizibilitesini artırabilirler (ER, 2025). Bu teşvikler, KYD yatırımlarını daha cazip hale getirir ve fosil yakıtlardan kaynaklanan karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar.

Devlet destekleri, KYD teknolojilerinin erken aşama araştırma ve geliştirme faaliyetlerini teşvik ederken, pilot projelerin ve ticari uygulamaların yaygınlaşmasına da katkı sağlar. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan 45Q vergi kredisi, karbon yakalama projelerini ekonomik açıdan daha cazip hale getirmiştir (GCCSI, 2022a). Benzer şekilde, Avrupa Birliği'nin Horizon 2020 programı, KYD teknolojileri için önemli bir finansman kaynağı sağlamaktadır. Ayrıca, uluslararası işbirlikleri ve fonlar, KYD teknolojilerinin araştırma ve geliştirme süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır (IEAGHG, 2020).

Toplum etkileşimleri, KYD projelerinin başarısı için kritik öneme sahiptir. Toplumların projeler hakkında bilgilendirilmesi, katılımının sağlanması ve şeffaf iletişim, projelerin kabul oranını ve güven düzeyini artırır (Nielsen vd., 2022). KYD projelerinin çevresel ve ekonomik faydalarının topluma doğru şekilde aktarılması, yapılan CSS projelerinin toplumca kabulünü kolaylaştırır. Ayrıca, yeni iş imkânları yaratılması, yerel ekonomilerin güçlendirilmesi ve enerji güvenliğinin artırılması gibi ekonomik faydalar,

projelerin toplumsal desteğini ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini güçlendirir (Smith, 2023; Brown, 2024).

3.3. Çevresel ve Sosyal Etkiler

KYD teknolojisi, fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan CO₂ 'nin yakalanması, taşınması ve yer altında depolanması yoluyla sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır. Bu teknoloji, küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol üstlenmekle birlikte, hem çevresel hem de sosyal etkiler taşımaktadır.

Çevresel açıdan bakıldığında, KYD sisteminin her aşaması belirli riskler ve zorluklar içermektedir. Yakalama aşamasında, CO₂ 'nin ayrıştırılması ve saflaştırılması için yüksek miktarda enerji gereklidir; bu durum dolaylı olarak ek CO₂ salınımına neden olabilir (IEA, 2019). Taşıma sürecinde, CO₂ 'nin boru hatları, tankerler veya gemiler aracılığıyla taşınması ek karbon salınımı ve çevresel kirleticilerle ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda, taşıma yöntemlerinin çevresel etkileri, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin bütüncül sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde dikkate alınması gereken önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır (GCCSI, 2022a). Depolama aşamasında ise, CO₂ 'nin uzun vadeli olarak yer altında tutulması sırasında jeolojik yapının bozulması, yer altı su kaynaklarının kirlenmesi ve potansiyel sızıntı riskleri gibi çevresel tehditler ortaya çıkabilmektedir (Smith vd., 2021; Bui, 2020).

Bununla birlikte, KYD teknolojisi enerji ve sanayi sektörlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltmada etkili bir araçtır. Enerji santralleri, çimento, çelik ve kimya endüstrileri gibi yüksek emisyonlu alanlarda CO₂ 'nin yakalanarak atmosfere salınmasının önlenmesi, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, yakalanan CO₂ 'nin EOR süreçlerinde kullanılması, hem ekonomik fayda sağlar hem de enerji verimliliğini artırır. Ancak KYD sistemlerinin kurulumu ve işletimi yüksek maliyetlerle yapıldığından, bu teknolojilerin geniş ölçekli uygulamaları ekonomik açıdan sınırlı kalmaktadır. Ek enerji gereksinimi, santrallerin genel verimliliğini düşürmekte ve enerji üretim maliyetlerini artırmaktadır (IEA, 2019).

Depolama güvenliği, KYD'nin sürdürülebilirliği açısından en kritik konulardan biridir. Jeolojik yapıların kararlılığı, uzun vadeli sızıntı riskleri ve depolama alanlarının izlenmesi gerekliliği, teknolojinin çevresel güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir (Bui, 2020; Smith vd., 2021). Bu nedenle, KYD uygulamalarında sürekli izleme, risk

değerlendirmesi ve çevresel güvenlik protokollerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Toplumların KYD projelerine yönelik tutumları ve algıları, bu teknolojilerin başarısında belirleyici bir faktördür. Toplumların güvenini kazanmak için bilgilendirme, şeffaflık ve katılım süreçlerinin etkin biçimde yürütülmesi gerekmektedir (Nielsen vd., 2022). Projelere dair güvenlik ve çevresel kaygıların azaltılması, kamu desteğini artırır. Diğer yandan, KYD projeleri yerel ekonomilere katkı da sağlayabilir. Yeni iş fırsatları yaratılması ve bölgesel kalkınmanın desteklenmesi, bu teknolojinin sosyal kabulünü güçlendirmektedir (IEAGHG, 2020). Bu projelerin sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda ve yerel topluluklarla uyum içinde hayata geçirilmesi gerekmektedir.

KYD teknolojisi karbon emisyonlarının azaltılmasında yüksek bir potansiyele sahip olsa da çevresel riskler, maddi zorluklar ve sosyal kabul gibi faktörlerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, KYD'nin sürdürülebilir biçimde uygulanabilmesi için hem teknik hem de toplumsal açıdan bütüncül yaklaşımlar geliştirilmelidir.

3.4.Uzun Vadeli Ekonomik Faydalar ve Verimlilik

KYD teknolojileri, uzun vadede ekonomik faydalar sağlayarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur. Atmosferik karbon emisyonlarının azaltılması, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynar. Bu da ekonomik açıdan olumlu etkiler yaratır. Ayrıca, karbon yoğun endüstrilerde çalışan iş gücünün korunmasına ve yeni iş alanlarının yaratılmasına yardımcı olur (Smith vd., 2021).

KYD sistemlerinin ekonomik değerlendirilmesi, maliyet ve faydaların dikkatli bir şekilde analiz edilmesini gerektirir. Yüksek kurulum ve işletme maliyetleri, karbon kredileri ve teşvikler ile dengelenebilir. Enerji üretimini ve verimliliği artırarak ekonomik avantajlar sağlayabilir ve uzun vadede çevresel sürdürülebilirliği destekler. Bu nedenle, KYD teknolojileri, fosil yakıt kullanımının çevresel etkilerini azaltmada ve ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunmada önemli bir rol oynar.

KYD sistemleri, enerji üretim tesislerinde verimliliği artırarak ekonomik fayda sağlayabilir. Örneğin, EOR yöntemleri ile birlikte kullanıldığında, fosil yakıtların verimli bir şekilde kullanılması sağlanır. Bu da enerji üretim maliyetlerini düşürebilir ve ekonomik açıdan avantaj sağlayabilir (GCCSI, 2022a).

KYD teknolojileri, iklim değişikliğiyle mücadele ve sera gazı emisyonlarını azaltma hedeflerinde kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, kamuoyu ve endüstrinin bu

teknolojilere yönelik yaklaşımları, KYD projelerinin başarılı bir şekilde uygulanmasında belirleyici bir etkiye sahiptir.

Kamuoyu, genellikle KYD teknolojilerine karşı karışık duygular beslemektedir. Bir yandan, karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli nedeniyle olumlu bir yaklaşım sergilenirken, diğer yandan bu teknolojilerin çevresel ve ekonomik etkileri konusunda endişeler bulunmaktadır (Nielsen vd., 2022). Özellikle KYD projelerinin çevresel riskleri ve maliyetleri hakkındaki belirsizlikler, kamuoyunun bu teknolojilere olan güvenini zedeleyebilir. Dolayısıyla, kamuoyunun KYD teknolojilerine olan yaklaşımını olumlu yönde değiştirmek için şeffaflık, açık iletişim ve katılım önemlidir (Smith, 2023).

Endüstri açısından bakıldığında, KYD teknolojilerine yönelik yaklaşım daha pragmatik ve fırsat odaklıdır. Birçok endüstri lideri, KYD teknolojilerini hem sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak hem de karbon vergileri ve düzenlemelerden kaçınmak için bir fırsat olarak görmektedir (IEA, 2019). Bununla birlikte, KYD projelerinin yüksek maliyetleri ve teknik zorlukları, endüstrinin bu teknolojilere yatırım yapma konusunda temkinli olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, hükümet teşvikleri, vergi indirimleri ve karbon kredileri gibi mali destek mekanizmaları, endüstrinin KYD projelerine olan ilgisini artırmada önemli bir rol oynamaktadır (ER, 2025).

Ayrıca, endüstrinin KYD teknolojilerine olan yaklaşımı, genellikle rekabet avantajı elde etme ve sürdürülebilirlik raporlamasında liderlik pozisyonunu koruma çabalarıyla şekillenmektedir. Birçok büyük şirket, sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek ve yatırımcıların beklentilerini karşılamak için KYD teknolojilerine yatırım yapmaktadır. Örneğin, enerji sektöründe faaliyet gösteren şirketler, karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşmak için KYD projelerine büyük ölçekli yatırımlar yapmaktadır (Brown, 2024).

Sonuç olarak, kamuoyu ve endüstrinin KYD teknolojilerine yönelik yaklaşımları, bu teknolojilerin başarısı için kritik öneme sahiptir. Kamuoyunun güvenini kazanmak ve projelerin kabulünü artırmak için şeffaflık ve açık iletişim esastır. Aynı şekilde, endüstrinin KYD projelerine olan ilgisini devam ettirmek için hükümet teşvikleri ve mali destek mekanizmaları önemlidir. Bu iki faktör bir araya geldiğinde, KYD teknolojilerinin yaygınlaşması ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkin bir araç olarak kullanılması mümkün olacaktır.

3.5. KYD Teknolojileri Politik Düzenlemeler

KYD teknolojisi, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç olarak görülmektedir. Bu bölümde, KYD ve düşük karbonlu hidrojen üretimine yönelik küresel

politikalar ile enerji sektöründe KYD'ye yönelik stratejik politika önerileri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

i. KYD ve Düşük Karbonlu Hidrojen Üretimine Yönelik Küresel Politikalar:

Küresel ölçekte, KYD'nin yaygınlaştırılması ve etkin kullanımı için çeşitli politikalar ve düzenlemeler uygulanmaktadır. Paris Anlaşması, bu teknolojilerin desteklenmesini ve uygulanmasını teşvik eden önemli bir küresel girişimdir. Anlaşma, taraf ülkelere karbon emisyonlarını azaltma hedefleri belirlemekte ve bu hedeflere ulaşmak için yenilikçi teknolojilerin kullanılmasını teşvik etmektedir (Paris Anlaşması, 2015).

Avrupa Birliği, KYD projelerine finansal destek sağlayarak bu teknolojinin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Avrupa Komisyonu, Horizon 2020 ve Horizon Europe gibi programlar aracılığıyla KYD projelerine fon sağlamaktadır. Bu projeler, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği artırmayı amaçlamaktadır (EC, 2020).

Amerika Birleşik Devletleri'nde, 45Q vergi kredisi gibi uygulamalar, KYD projelerini ekonomik açıdan daha cazip hale getirmekte ve özel sektör yatırımlarını teşvik etmektedir. Bu tür politikalar, KYD teknolojilerinin yaygınlaşmasını ve endüstriyel ölçekte uygulanmasını kolaylaştırmaktadır (USDE, 2020).

Asya ülkelerinde de KYD teknolojilerine yönelik politikalar geliştirilmektedir. Örneğin, Japonya, Çin ve Güney Kore, karbon emisyonlarını azaltmak için KYD teknolojilerine yatırım yapmakta ve bu teknolojilerin geliştirilmesine yönelik araştırma projelerini desteklemektedir (GCCSI, 2022a).

ii. Enerji Sektöründe KYD 'ye Yönelik Stratejik Politika Önerileri: KYD teknolojileri, enerji sektöründe sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için önemli bir araçtır. KYD teknolojilerinin yaygınlaşmasını ve etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak amacıyla, çeşitli stratejik politika önerileri geliştirilmelidir.

iii. Finansal Teşvikler ve Destek Mekanizmaları: Enerji sektöründe KYD projelerinin ekonomik fizibilitesini artırmak için hükümetler tarafından sağlanan finansal teşvikler büyük önem taşımaktadır. Bu teşvikler arasında vergi indirimleri, karbon kredileri ve doğrudan mali destekler yer almaktadır (ER, 2025). Örneğin, ABD'de uygulanan 45Q vergi kredisi programı, KYD projelerine yönelik önemli mali teşvikler sunmaktadır (IEA, 2019). Bu tür destek mekanizmaları, KYD teknolojilerinin yaygınlaşmasını teşvik ederek enerji sektöründe karbon emisyonlarını azaltabilir.

iv. Yasal ve Düzenleyici Çerçevenin Güçlendirilmesi: KYD projelerinin başarıyla uygulanabilmesi için net ve kapsamlı bir yasal ve düzenleyici çerçevenin oluşturulması

gerekmektedir. Bu çerçeve, KYD projelerinin izin süreçlerini kolaylaştırmalı, güvenli depolama alanlarının belirlenmesini sağlamalı ve projelerin uzun vadeli izleme ve raporlama gerekliliklerini tanımlamalıdır (IEAGHG, 2020). Ayrıca, uluslararası işbirlikleri ve standartlar, KYD teknolojilerinin küresel çapta benimsenmesini kolaylaştırabilir.

v. Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) Faaliyetlerinin Desteklenmesi: KYD teknolojilerinin maliyet etkinliğini artırmak için sürekli olarak Ar-Ge faaliyetlerine yatırım yapılmalıdır. Hükümetler, üniversiteler ve özel sektör arasındaki işbirlikleri, yenilikçi KYD çözümlerinin geliştirilmesini teşvik edebilir (Smith, 2023). Bu kapsamda, pilot projeler ve demonstrasyon projeleri, yeni teknolojilerin test edilmesi ve ölçeklenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

vi. Kamuoyu ve Toplum Bilincinin Artırılması: KYD projelerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kamuoyu ve toplumun desteği kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, KYD teknolojilerinin faydaları ve potansiyel riskleri hakkında toplumun bilgilendirilmesi gerekmektedir (Nielsen vd., 2022). Şeffaf iletişim ve toplumsal katılım, projelerin kabul oranını artırabilir ve kamuoyunun güvenini kazanabilir.

vii. Uluslararası İşbirliklerinin Geliştirilmesi: KYD teknolojilerinin küresel çapta benimsenmesi ve yaygınlaştırılması için uluslararası işbirliklerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Hükümetler, uluslararası kuruluşlar ve özel sektör arasındaki işbirlikleri, bilgi ve deneyim paylaşımını teşvik edebilir ve KYD projelerinin finansmanını kolaylaştırabilir (IEA, 2019). Bu işbirlikleri, küresel karbon azaltma hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlayabilir.

4. TÜRKİYE VE DÜNYADA KYD PROJEKSİYONU

4.1. Dünyada Karbon Yakalama ve Depolama Potansiyeli

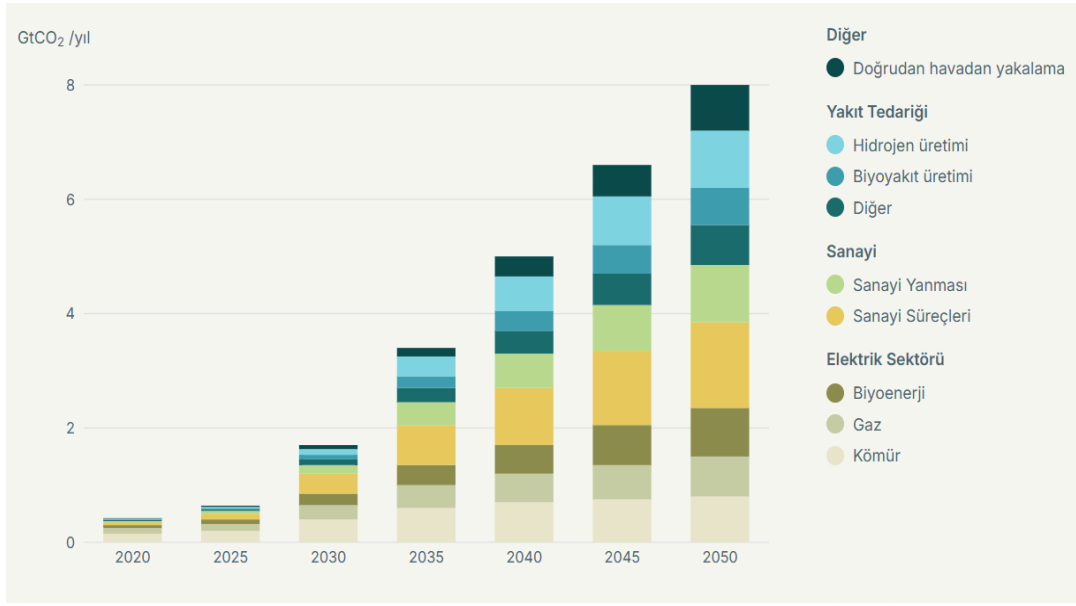
Dünyada KYD teknolojileri kullanılarak halen uygulamada ve kurulması planlanan KYD sistemleri bulunmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde uygulamadaki ve planlanan KYD teknolojileri incelenmektedir. KYD teknolojilerinin karbon salınımların azaltılmasındaki rolü ortaya konulmaktadır.

2050 yılına kadar net sıfır salınım hedefinin tutturulabilmesi için yıllık 6 ila 10 milyar ton CO₂ 'nin yakalanması gerektiği yönünde çeşitli kurumsal tahminler mevcuttur. IEA, 2025 yılından itibaren KYD teknolojilerinin bu süreçte etkin bir katkı sağlayacağını ifade etmektedir (Şekil 15). Bu gelişme, enerji ve sanayi sektörlerinde karbon azaltımı ile sürdürülebilir enerji dönüşümünü desteklemek amacıyla KYD teknolojilerine yönelik yatırım stratejilerinin güçlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Sayman vd., 2024).

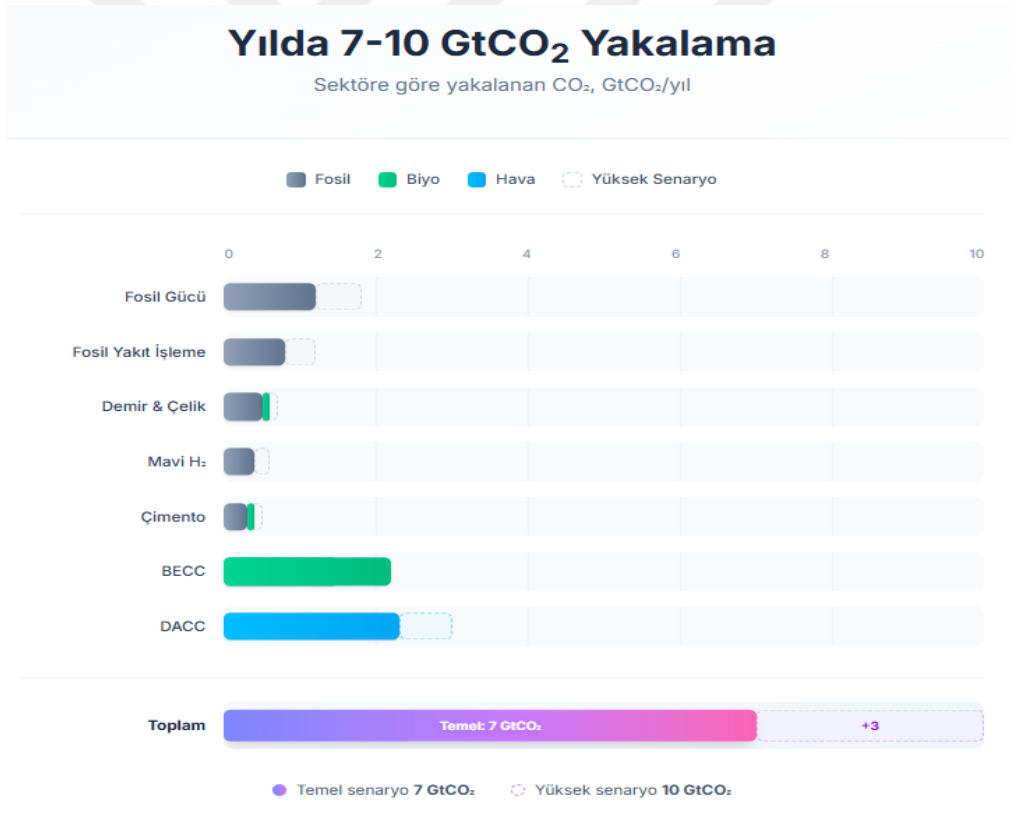
IEA'ya göre, KYD teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda enerji sektöründe ve sanayi uygulamalarında daha yaygın bir şekilde benimsenmesi beklenmektedir. Bu teknoloji, sera gazı emisyonlarını azaltmada ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç olarak görülmektedir. KYD'nin geliştirilmesi ve kullanımının artırılması, enerji geçişinin hızlanmasına katkıda bulunurken, karbon yoğun endüstrilerde emisyonların azaltılmasına da yardımcı olacaktır (IEA, 2021).

2050 yılına ilişkin öngörüler, DHKY teknolojilerinin düşük karbonlu enerji geçişi ve uzun vadeli iklim politikaları açısından stratejik öneminin artacağını ortaya koymaktadır (Şekil 16). Bu teknolojiler, küresel düzeyde sürdürülebilir enerji dönüşümünü destekleyen politikaların ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik stratejik yaklaşımların temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Atmosfere salınmış CO₂'in havadan uzaklaştırılmasını sağlayan DHKY sistemleri, net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada temel bir araç olarak değerlendirilmektedir (GCCSI, 2022b).

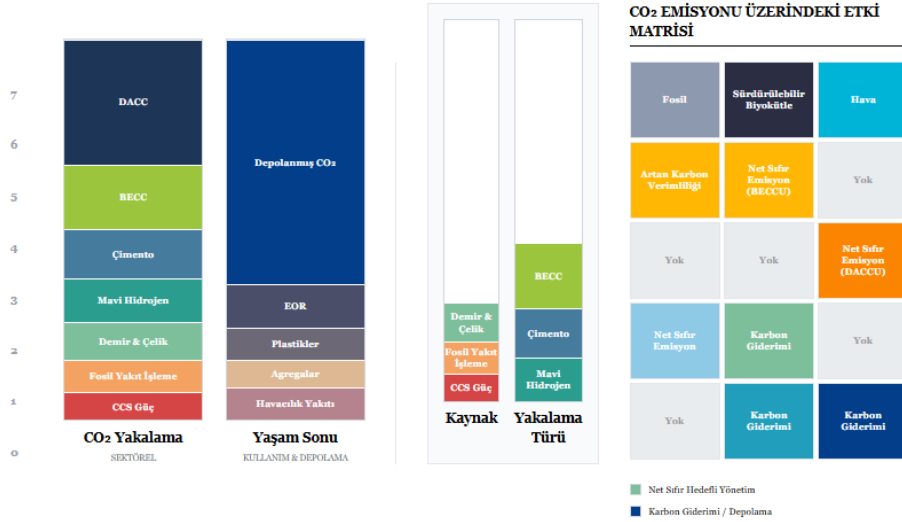
DHKY teknolojileri, sera gazı emisyonlarının düşürülmesinde önemli bir araç olarak görülmektedir. Ancak, bu teknolojilerin potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılabilmesi için maliyetlerin düşürülmesi, yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi ve politik desteklerin artırılması gerekmektedir. Gelecekte DHKY, karbon nötr bir dünya için temel çözümlerden biri olmaya devam edecektir.



Şekil 15. 2020-2050 yıllarında IEA'nın KYD'ye ait tahmini (IEA, 2021).



Şekil 16. 2050 yılı KYD öngörülleri (ETC, 2021)



Şekil 17. 2050 yılında KYD sistemlerinin görünüşü (RECT, 2024)

Yapılan projeksiyonlara göre yıllık yaklaşık 7 milyar ton CO₂ yakalanacak olup, bunun 4,5 milyar tonu jeolojik depolama yoluyla bertaraf edilecek; kalan 2,5 milyar tonu ise endüstriyel kullanım alanlarında değerlendirilecektir. Sektörel kullanım dağılımı aşağıda belirtilmiştir (Şekil 17):

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

IPCC tarafından yayımlanan 1.5°C özel raporu, küresel sıcaklık artışının 1.5°C eşiğiyle sınırlandırılmasının iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirme açısından kritik bir eşik olduğunu ortaya koymaktadır. Rapora göre, bu hedefe ulaşabilmek için insani faaliyetlerden kaynaklanan net küresel CO₂ emisyonlarında ciddi düşüşler gerçekleşmelidir. Özellikle 2030 yılına kadar 2010 seviyesine göre %45 oranında azalma ve 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşma hedefleri belirlenmiştir. Bu durum, iklim değişikliğiyle mücadelede acil ve kapsamlı önlemler alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

IPCC, KYD teknolojisini küresel emisyon azaltım stratejileri kapsamında 1.5°C hedefi için kritik bir çözüm olarak değerlendirmektedir. KYD, atmosferdeki CO₂'yi yakalayıp yeraltı gibi güvenli depolama alanlarına gönderen bir süreçtir. Bu sayede, atmosfere salınan CO₂ miktarı azaltılarak küresel ısınmanın yavaşlatılması amaçlanır.

Rapor, KYD 'nin özellikle sanayi tesisleri ve enerji üretimi gibi sektörlerde önemli bir rol oynayabileceğini belirtmektedir.

Küresel Karbon Yakalama Depolama Enstitüsü (GCCSI) 2022 Küresel Durum Raporu, 2022 yılında açıklanan yeni KYD projelerini duyurmuştur. Rapora göre, 2022 Eylül itibarıyla taşıma ve depolama projeleri dâhil olmak üzere 196 adet inşaat halinde proje bulunmaktadır (IPCC, 2022). İleri geliştirme aşaması, projelerin mühendislik faaliyetleri için kayda değer düzeyde finansman sağladığını, proje sahiplerinin daha güçlü bir taahhüt sergilediğini ve onay ile inşaat süreçleri için fon temin etme olasılığının arttığını göstermektedir. Bu ilerleme, uzun vadeli proje büyümesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Paris Anlaşması'nın 2°C hedefi doğrultusunda, IEA senaryoları 2040 yılına kadar en az 2.500 KYD tesisinin aktif olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Mevcut KYD altyapısı bu gereksinimin oldukça gerisindedir; halihazırda yalnızca 18 büyük ölçekli ticari tesis faaliyet göstermekte ve yıllık toplam CO₂ yakalama kapasitesi yaklaşık 40 milyon tonla sınırlı kalmaktadır. Bugüne kadar yeraltına güvenli şekilde enjekte edilen CO₂ miktarı ise 230 Mt civarındadır (GCCSI, 2020).

Dünya çapında geliştirilen bazı karbon yakalama projelerine yönelik bilgiler Tablo 5'te görülmektedir. Norveç, Avustralya, Kanada, Çin ve ABD gibi gelişmiş EOR altyapısına ve kömür üretim kapasitesine sahip ülkelerde KYD tesislerinin mekânsal dağılımı belirgin şekilde artış göstermektedir. Tesislerin %20'si elektrik, %11'i kimyasal üretim, %33'ü doğal gaz tesisleridir. Bu kapasitenin neredeyse %60'ı EOR marifetiyle ve %35'i de doğrudan depolanmaktadır.

CO₂RE veri tabanı, KYD teknolojilerinin yaygınlaştırılmasına yönelik olarak ulusal düzenlemelerin, yerel yönetim stratejilerinin ve depolama altyapısının gelişim düzeylerinin değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Ülkeler bu açılardan incelendiği zaman Avustralya, Brezilya, ABD, Çin, Suudi Arabistan, Norveç ve Kanada'nın uygulama sürecine diğer ülkelere göre daha hazır oldukları görülmektedir.

Tablo 5. Faaliyet durumuna göre en yüksek kapasiteli kyd projeleri (GCCSI, 2022b)

Tesis Adı	Ülke	Devreye Alınma Tarihi	Tesis Sektörü	Yakalama Kapasitesi (Mta CO ₂)	Depolama Kodu
Başlangıç Aşamasında KYD Teknolojisi Tesisleri					
Illinois	ABD	2025	Kimyasal Üretimi	8,1	Jeolojik Depolama
Drax BECCS	İngiltere	2027	Elektrik Üretimi	8,0	Jeolojik Depolama
Medway Elektrik İstasyonları	İngiltere	Değerlendirme Aşamasında	Elektrik Üretimi	7,6	Jeolojik Depolama
Inpex	Avustralya	2026	Doğal Gaz İşleme	7,0	Jeolojik Depolama
NextDecade Rio Grande	ABD	2025	Doğal Gaz İşleme	5,5	Değerlendirme Aşamasında
İnşa Aşamasındaki KYD Teknolojisi Tesisleri					
Louisiana	ABD	2026	Muhtelif	5,0	Jeolojik Depolama
Santos Cooper Havzası	Avustralya	2023	Doğal Gaz İşleme	1,7	Jeolojik Depolama
Kuzey Sahası	Katar	2025	Doğal Gaz İşleme	1,0	Değerlendirme Aşamasında
1PointFive	ABD	2024	Direkt Hava Tutma	0,5	Jeolojik Depolama
Norcem Brevik	Norveç	2024	Çimento Üretimi	0,4	-
İleri Seviyede Gelişen KYD Teknolojisi Tesisleri					
Doğu Sahili Kümesi	İngiltere	2025	Muhtelif	27,0	Jeolojik Depolama
Bayu–Undan	Timor-Leste	2027	Doğal Gaz İşleme	10,0	Jeolojik Depolama
Prairie State	ABD	2020–2030	Elektrik Üretimi	6,0	Jeolojik Depolama
San Juan	ABD	-	Elektrik Üretimi	6,0	Jeolojik Depolama
Deer Park	ABD	-	Elektrik Üretimi	5,0	Jeolojik Depolama
Faaliyetteki KYD Teknolojisi Tesisleri					
Shute Creek	ABD	1986	Doğal Gaz İşleme	7,0	EOR
Petrobras Santos	Brezilya	2011	Doğal Gaz İşleme	7,0	EOR
Teksas	ABD	2010	Doğal Gaz İşleme	5,0	EOR
Gorgon	Avustralya	2019	Doğal Gaz İşleme	4,0	Jeolojik Depolama
Great Plains – Weyburn-Midale	ABD	2000	Sentetik Yakıt	3,0	EOR

4.2. Dünyada KYD Örnekleri

KYD teknolojilerine yönelik küresel düzeydeki uygulama ve taahhütler son yıllarda ivme kazanmıştır. BMİDÇS çerçevesinde Paris Anlaşması kapsamında sunulan Ulusal Katkı Beyanlarında (UKB) KYD'ye yer veren ülkelerin sayısı artmakta; özellikle UKB'lerini güncelleyen Avustralya, Kanada, Çin, Japonya, Norveç, BAE ve ABD gibi ülkeler bu teknolojiyi ulusal iklim politikalarına entegre etmektedir (Şekil 18).

Avrupa Birliği (AB), KYD teknolojilerinin güvenli şekilde uygulanmasını sağlamak amacıyla 2009 yılında Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi'ni kabul

etmiştir. Bu direktif, CO₂ 'nin güvenli jeolojik depolanmasını düzenlerken yakalama ve taşıma süreçlerine ilişkin yasal hükümler de içermektedir. Ayrıca, depolama alanlarının kullanım ömrü boyunca güvenliğini sağlamak için yüksek standartlar getirilmiştir (EC, 2009).

AB, bu kapsamda sürdürülebilir karbon döngüleri oluşturmayı hedefleyen politikalar geliştirmiştir. Avrupa Komisyonu'nun Sürdürülebilir Karbon Döngüleri bildirisi, endüstriyel süreçlerde CO₂ 'nin yakalanması, kullanılması ve depolanmasına yönelik finansal ve metodolojik destek sağlamaktadır. Ayrıca, karbon giderimlerinin sertifikasyonu için yasal bir çerçeve oluşturulmuş; karbon tarımı ve mavi karbon projeleri gibi doğaya dayalı çözümler bu hedeflere entegre edilmiştir (EEA, 2021).

ABD'de KYD politikaları, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik dört ana program altında toplanmıştır. Karbon Yakalama Programı, enerji santralleri ve ağır sanayi tesislerinde CO₂ emisyonlarının %95'ini yakalamayı hedefleyen Ar-Ge ve demonstrasyon faaliyetlerini desteklemektedir. Karbon Depolama Programı, ticari ölçekte depolamayı teşvik ederken, 45Q vergi teşvikleri ile depolanan CO₂ miktarına göre finansal destek sunmaktadır. 2022 Enflasyon Azaltma Yasası (Inflation Reduction Act) ile bu teşvikler artırılmış; jeolojik formasyonlarda depolama için ton başına 85\$, EOR ve ürün dönüşümleri için 60\$, doğrudan hava yakalama (DAC) için 180\$ olarak belirlenmiştir (CBO, 2023).

Karbon Yakalama Gösterim Projeleri Programı, kömür ve doğalgaz tesislerinde KYD teknolojilerinin uygulanabilirliğini test eden projeleri desteklerken, CO₂ Uzaklaştırma Programı, gigaton ölçeğinde karbon azaltımını hedefleyen giderim yaklaşımlarına odaklanmaktadır. ABD yönetimi ayrıca iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik 369 milyar dolarlık bütçenin 3 milyar dolarını KYD projelerine ayırmıştır (CBO, 2023).

Bu kapsamda, Air Products Clean Energy Complex, Teksas'ta kurulmakta olan dünyanın en büyük hidrojen ve KYD entegre üretim tesislerinden biridir. Proje, yılda yaklaşık 3 milyon ton CO₂ yakalayarak karbon emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir.

İngiltere, 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda KYD teknolojilerine önem vermektedir. 2004–2019 yılları arasında 330 milyon sterlini aşkın kamu finansmanı sağlayan ülke, Sevk Edilebilir Güç Anlaşması ile KYD destekli enerji santrallerini teşvik etmektedir. Bu kapsamda uygulanan HyNet North West Projesi, doğal

gazdan mavi hidrojen üretirken açığa çıkan CO₂ 'yi KYD sistemiyle yakalayıp depolamayı amaçlamaktadır.

İngiltere ayrıca, 2022 KYD Yatırımcı Yol Haritası ile 2025 yılına kadar 10 MtCO₂ /yıl, 2030'a kadar ise 20–30 MtCO₂ /yıl kapasiteye ulaşmayı taahhüt etmiştir. Bu hedef doğrultusunda 1 milyar sterlinlik KYD Altyapı Fonu ve 240 milyon sterlinlik Net Sıfır Hidrojen Fonu oluşturulmuştur. Ülkenin önemli girişimlerinden biri olan H21 North of England Projesi, yıllık 20 milyon ton CO₂ yakalamayı hedefleyerek düşük karbonlu enerji sağlamayı amaçlamaktadır.

Dünya genelinde, Norveç'teki Snøhvit LNG tesisi ve Almanya'daki Schwarze Pumpe santrali gibi projeler KYD teknolojisinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca Çin ve Hindistan gibi büyük ekonomiler de KYD yatırımlarını artırarak bu sistemin yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır.

KYD teknolojisinin geliştirilmesi için maliyetleri azaltacak yenilikçi yakalama süreçleri ve güvenli depolama yöntemleri öncelikli araştırma alanlarıdır. Bu teknolojinin yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyonu, net sıfır karbon hedeflerine ulaşmada güçlü bir sinerji oluşturabilir (IEA, 2021).

Toplum bilincinin artırılması, yerel halkın katılımı ve şeffaf bilgilendirme politikaları, KYD'nin kabulü açısından kritik öneme sahiptir. Depolama alanlarının çevresel etkilerinin düzenli izlenmesi, hem çevresel güvenliği hem de toplumsal güveni destekleyecektir (Wray, 2024).

Sonuç olarak, KYD teknolojileri enerji sektörünün düşük karbonlu dönüşümünde önemli bir araçtır. Ancak potansiyelini gerçekleştirebilmesi için teknik, finansal ve sosyal engellerin aşılması gerekmektedir. Bu doğrultuda hükümetlerin, uluslararası kuruluşların ve özel sektörün koordineli çalışması, KYD'nin küresel ölçekte yaygınlaşmasını sağlayacaktır.

ÜLKE / ÜBK (NDC)	NUBK	BİRİNCİ ÜBK	BİRİNCİ ÜBK GÜNCELLEMESİ	İKİNCİ ÜBK
AVUSTRALYA				
BAHREYN				
KANADA				
ÇİN				
MİGİR				
EL SALVADOR				
İZLANDA				
İRAN				
İRAK				
JAPONYA				
MALAWI				
MOĞOLİSTAN				
NORVEÇ				
PAKİSTAN				
KATAR				
SUUDİ ARABİSTAN				
GÜNEY AFRIKA				
BİRLİK ARAP EMİRLİKLERİ				
AFRİKA RİRİ FİŞİK DEVİ FTİFİRİ				
KUVEYT				
TOGO				
TUNUS				

■ ÜBK KYD'DEN BAHSEDER ■ ÜBK KYD'DEN BAHSETMEZ ■ MEVCUT DEĞİL

Şekil 18. Paris Anlaşması kapsamında hazırlanan ÜBK'de KYD uygulamalarına yer veren devletler (GCCSI, 2022a)

4.3. Türkiye'de Karbon Yakalama ve Depolama Sistemleri

Türkiye'de KYD teknolojilerinin mevcut durumu, teknik, ekonomik ve politik boyutlarıyla değerlendirildiğinde, hem yapısal eksiklikler hem de stratejik fırsatlar içermektedir. KYD uygulamalarının çevresel risklerinin etkin biçimde yönetilebilmesi ve CO₂ 'nin güvenli şekilde depolanabilmesi için, kamu kurumları ile özel sektörün teknolojik kapasitesinin artırılması gerekmektedir. Bununla birlikte, Türkiye'de KYD alanındaki teknik bilgi birikimi ve uygulama deneyimi hâlen sınırlı düzeydedir; bu durum, teknolojinin yaygınlaştırılması ve ulusal iklim hedefleriyle uyumlu biçimde entegrasyonu açısından önemli bir engel teşkil etmektedir (ÇİD, 2022).

Teknolojinin yüksek maliyeti, ceza ve teşvik mekanizmalarının oluşturulması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Depolama süreçlerinin kapatma sonrası izlenmesi ve finansal mekanizmaların eksikliği de uygulamanın önünde engel teşkil etmektedir (ETKB, 2022). Türkiye'nin yüksek deprem riski, özellikle jeolojik depolama alanlarının seçiminde titiz bir yaklaşım gerektirmektedir. EOR uygulamalarındaki deneyim, CO₂ 'nin bu yöntemle depolanmasını kolaylaştırır da, fosil yakıt kullanımını artırarak iklim değişikliğiyle mücadeleyi olumsuz şekilde etkilemektedir (TÜRKÇİMENTO, 2022).

Türkiye'nin 2022 de yayınladığı Ulusal Enerji Planı'na göre, KYD teknolojilerine 2035'e kadar yer vermemektedir. Mevcut maliyetler, bu teknolojilerin ekonomik olarak uygun olmadığını göstermektedir. Ancak plan, 2035 sonrası dönemde maliyetlerin düşmesiyle KYD 'nin enerji üretim portföyüne dâhil edilebileceğini öngörmektedir (ETKB, 2022).

Çimento sektörü, Türkiye'de KYD uygulamaları açısından öne çıkan bir alandır. TÜRKÇİMENTO, 2022 yılında bu teknolojinin sektöre entegrasyonu üzerine bir rapor yayımlamış, Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) ise 2023 yılında KYD Teknolojileri Çağrısı açarak Ar-Ge çalışmalarını desteklemeyi hedeflemiştir (TÜRKÇİMENTO, 2022; TENMAK, 2023). Ayrıca, Türkiye demir-çelik sanayisine yönelik hazırlanan Düşük Karbonlu Yol Haritası'nda KYD senaryolarına yer verilmiş, ETKB ile TENMAK iş birliğiyle "Ulusal CO₂ Tutma ve Değerlendirme Teknolojileri Yol Haritası" çalışmalarına başlanmıştır (ETKB, 2022).

Türkiye'nin KYD teknolojilerini etkin biçimde uygulayabilmesi için, öncelikle potansiyel jeolojik depolama sahalarının teknik ve ekonomik fizibilitesinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme, 2053 yılı için belirlenen net-sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda, KYD teknolojilerinin ulusal iklim politikalarına entegrasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye'nin bu alandaki siyasi yaklaşımını netleştirmesi ve uygulamaya yönelik yasal ve kurumsal çerçeveyi oluşturması, KYD 'nin iklim değişikliğiyle mücadele stratejileriyle uyumlu ve sürdürülebilir biçimde hayata geçirilmesini sağlayacaktır (ÇİD, 2022).

KYD faaliyetlerini yönlendirecek özel bir mevzuat Türkiye'de hâlihazırda mevcut değildir. Kamu kurumları KYD 'den sorumlu olarak görevlendirilmemiştir. Sanayi tesislerinden elde edilen CO₂ 'nin petrol alanlarına depolanması yöntemi de uygulanmamaktadır. Türk Petrol Kanunu'nun 6491 sayılı düzenlemesi petrol kaynaklarının keşfi ve üretimini kapsamakta, ancak sanayi kaynaklı CO₂ kullanımıyla ilgili bir hüküm içermemektedir (ETKB, 2022; MAPEG, 2023).

TENMAK'ın 2023 yılı Teknoloji ve Ürün Geliştirme Projeleri Destek Programı çerçevesi açtığı KYD talebi, ticarileştirilebilir teknolojilerin geliştirilmesini hedeflemekte ve projelerin Teknoloji Hazırlık Seviyesini 4'ten 8'e yükseltmeyi amaçlamaktadır. Bu girişim, KYD konusunda uzman yetişmesine katkı sağlamaktadır (TENMAK, 2023).

Türkiye, AB müktesebatına uyum süreci kapsamında Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi'ni iç hukukuna henüz aktarmamıştır. Bu kapsamda yeni yasal düzenlemeler beklenmektedir (ÇİD, 2022). Karbon ticareti mekanizmasının ve karbon

fiyatlandırmasının olmaması, KYD yatırımlarının ekonomik cazibesini azaltmaktadır. Ayrıca tesislerin kapanma sonrası izleme süreçlerinde de deneyim eksikliği bulunmaktadır (ETBK, 2022).

Batı Raman sahasında Dodan Gaz Sahası'ndan elde edilen CO₂ kullanılarak petrol üretimi artırılmış olsa da, bu uygulama KYD süreci kapsamında değerlendirilmemektedir (MAPEG, 2023). Çevre Kanunu ve ÇED Yönetmeliği, baca gazı CO₂ 'nin yakalanması ve taşınmasıyla ilgili özel düzenlemeler içermemekte, ancak İklim Değişikliği Kanunu taslağı bu konuları içerecek şekilde hazırlanmıştır. Karbon Piyasalarına Hazırlık Ortaklığı (PMR), Türkiye'de sera gazı emisyonlarının piyasa temelli yönetimi için gerekli düzenleyici ve operasyonel çerçevenin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (BOTAŞ, 2022).

Türkiye'nin KYD politikalarının belirlenmesinde, sera gazı salınım kaynaklarının analiz edilmesi ve sektörel önceliklerin tanımlanması kritik önemdedir. Türkiye'nin sera gazı salınımları 1990'da 220 milyon ton CO₂ eşdeğeri iken, 2021'de 564 Mt CO₂ e'ye yükselmiştir. Bu salınımların büyük kısmı enerji sektöründen kaynaklanmaktadır; 386 Mt CO₂ enerji, 66 Mt CO₂ endüstriyel işlemlerden gelmektedir (TÜİK, 2023a; EÜAŞ, 2022)(Şekil 19).

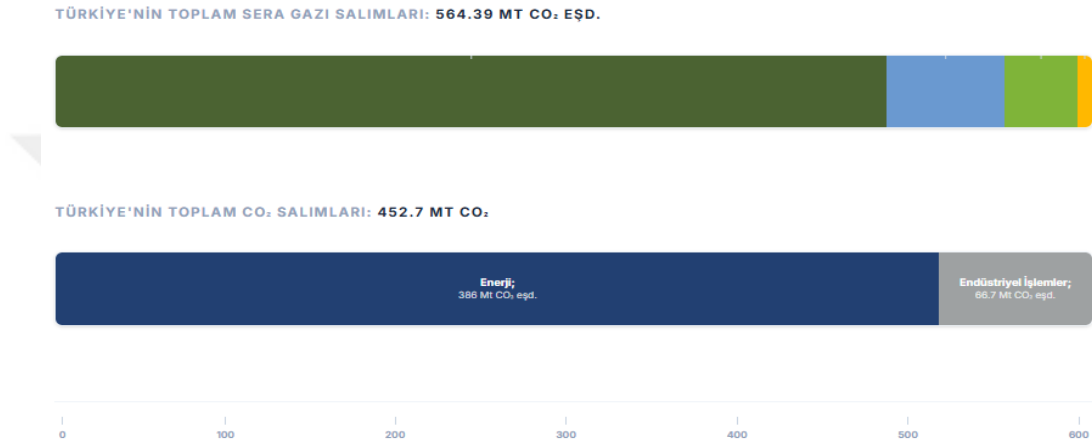
Elektrik üretimi, çimento ve demir-çelik sektörleri, Türkiye'nin toplam CO₂ salınımlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Örneğin, elektrik üretimi salınımları 1990 yılına göre 2021 yılında 429 seviyesine ulaşmıştır(Şekil 20). Aynı şekilde, çimento üretimi ve diğer mineral ürünlere dayalı endüstriyel işlemler, 1990 seviyesinin 377 katına çıkmıştır(Şekil 21). Demir-çelik ve çimento sektörlerinden kaynaklanan emisyonlar, ağırlıklı olarak enerji amaçlı yakıt tüketimi ve proses bazlı endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanmaktadır (Koç ve Kaynak, 2023).

Bununla birlikte, KYD teknolojileri yüksek maliyetli olduğu için, Türkiye'de bu teknolojilerin kullanımının sınırlı kalacağı öngörülmektedir. KYD teknolojilerinin uygulanabilirliği, karbon ticareti ve fiyatlandırma mekanizmalarının etkinliğine bağlıdır. Bu bağlamda, yüksek karbon salınımı yapan tesislerin KYD önceliklendirilmesinde odak noktası olması gerektiği açıktır (GECO, 2023).

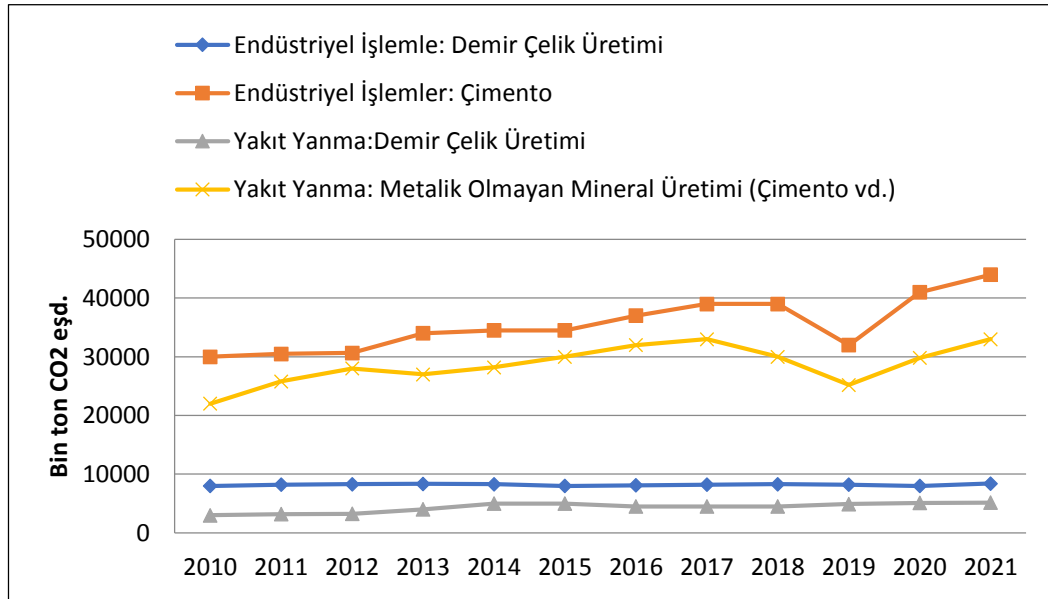
Türkiye'deki tesislerin sektör bazlı salınım dağılımları genel hatlarıyla bilinmekle birlikte, bu tesislerin salınım miktarları işletici şirketler tarafından hesaplanmakta, ancak çoğu durumda kamuya açıklanmamaktadır (İDB, 2023). Özellikle çimento ve demir-çelik sektörleri, toplam sera gazı salınımlarında önemli bir paya sahiptir. Türkiye'deki çimento

ve demir-çelik sanayisi sektörel analizleri mevcut olmakla birlikte, bu tesislere ait ayrıntılı emisyon verileri sınırlı bilgiyle değerlendirilmektedir (EÜAŞ, 2022).

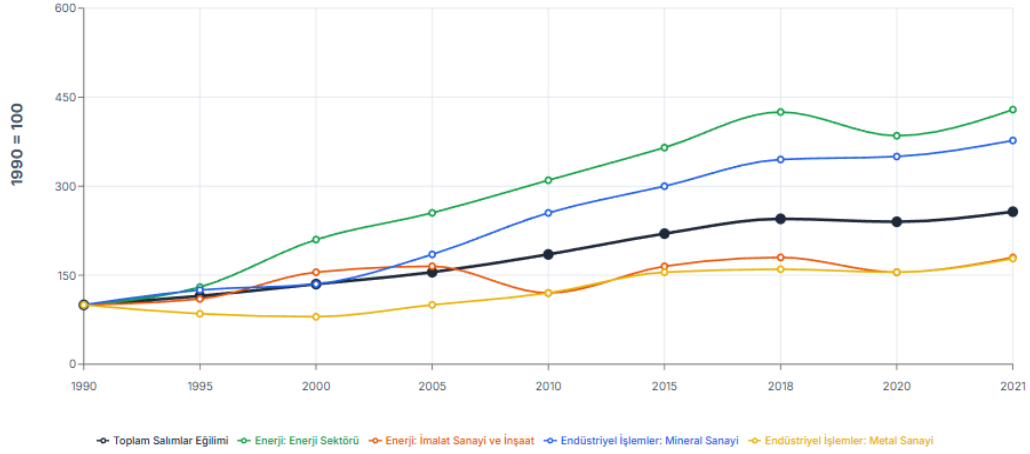
Türkiye’deki büyük ölçekli tesislerden 133’ü, ülke genelindeki toplam CO₂ salınımlarının yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Bu durum, bu tesisleri KYD teknolojilerinin uygulanmasında öncelikli hale getirmektedir (YEGM, 2009). KYD gibi yüksek maliyetli teknolojilerin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için, bu tesislerin sektörel önceliklendirilmesi kritik bir önem taşımaktadır.



Şekil 19. Türkiye’nin 2021 yılı salınımları içerisinde CO₂ salınımlarının payı ve ana sektörleri (TÜİK, 2023).



Şekil 20. Türkiye’nin KYD açısından hedeflenebilecek sektörlerinin 1990–2021 yıllarına ait kümülatif karbon salınım verileri (RECT, 2024)



Şekil 21. Türkiye’de karbon yakalama açısından öncelikli sektörlerin 1990–2021 yıllarına ait emisyon değişim süreci (RECT, 2024).

4.4. Türkiye’de KYD Uygulamaları

Her ne kadar Türkiye’de KYD uygulamaları henüz başlamamış olsa da, gelişmiş petrol kurtarımı ve jeotermal sahalarda CO₂ enjeksiyonu gibi süreçlerde edinilen teknik bilgi ve saha deneyimi, KYD altyapısının kurulmasına yönelik önemli bir temel sunmaktadır. Türkiye, EOR uygulamalarında CO₂ enjeksiyonu gerçekleştiren ülkeler arasında yer almakta olup, bu süreçlerde kullanılan CO₂ doğal kaynaklardan temin edilmekte ve depolama değil üretim artırımı hedeflenmektedir (ETKB, 2022).

Türkiye’de jeotermal sahalarda yürütülen pilot projeler, özellikle Menderes Grabeni gibi yüksek CO₂ içeriğine sahip alanlarda yoğunlaşmıştır. Kızıldere sahasında üretilen CO₂ ’nin sınırlı bir kısmı saflaştırılarak ticari amaçlarla kullanılmakta, kalan miktar ise atmosfere salınmaktadır. Bu projeler, jeotermal kaynaklardan elde edilen CO₂ ’nin yakalanarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunma olanaklarını araştırmaktadır (TENMAK, 2023).

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO), 1986 yılından bu yana Batı Raman Sahası’nda yer alan Garzan karbonatlarına, doğal bir CO₂ rezervuarından temin edilen ve yıllık yaklaşık 1 milyon tonluk miktara ulaşan CO₂ enjeksiyonu gerçekleştirmektedir. Bu proje, dünyadaki önemli karışmayan Karbondioksit ile Zenginleştirilmiş Petrol Üretimi (CO₂-EOR) projelerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Türkiye’nin petrol sahalarından olan Batı Raman, yaklaşık 1.850 milyon MM STB (300 milyon Sm³) yerinde petrol (OOIP) kapasitesine sahiptir (Şekil 22). Rezervuarın doğal basınç kapasitesine sahip ilk üretim uygulamaları, başlangıçta OOIP’in yalnızca %2’den az

petrol çıkarılmasına olanak tanımıştır. Ancak CO₂ enjeksiyonuyla petrol üretimi önemli ölçüde artmıştır (Şahin, 2008).

Batı Raman sahasında kullanılan teknik, ağır petrolün (9-15 API) karışmaz CO₂ ile yer değiştirmesiyle üretilebilir hale gelmesine dayanmaktadır. Karışabilirlik olmadığı için CO₂'nin petrol içerisinde çözünmesi, petrolü genleştirmesi ve viskozitesini düşürmesi esas mekanizmalardır. 1992'de yoğun ek sondajlarla 14.000 STB (2.200 Sm³) günlük üretim seviyesine ulaşılmıştır. Pilot çalışmalar kapsamında 2002'de polimer jel uygulamaları yapılmış ve sonuçta 2012 yılında günlük üretim 7.000 STB'ye (1.110 Sm³) çıkmıştır. Aynı yıl sahadaki petrol kurtarımı %6 seviyesine ulaşmıştır. CO₂ enjeksiyonu sürecinde kullanılan gaz, absorpsiyon ve dehidrasyon ünitelerinde %90 saflığa kadar işlenmiş ve 1.750 psi(121 bar) basınca sıkıştırılarak boru hatlarıyla taşınmıştır (Şahin, 2008).

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Batı Raman dışında farklı sahalarda da CO₂-EOR uygulamaları gerçekleştirmiştir. Çamurlu, İkiztepe ve Batı Kozluca sahalarındaki pilot projeler, bu tür yöntemlerin ağır petrol sahaları için potansiyelini göstermiştir. Özellikle Batı Kozluca sahasındaki tam saha ölçekli uygulamada kurtarma oranı %4'ün üzerine çıkmıştır. Türkiye'nin güneydoğusunda tahmini ağır petrol kaynağı 2,5 milyar STB (400 milyon Sm³) olarak bilinmektedir. Bu alanlar CO₂-EOR projeleri için uygun görülmektedir. Bununla birlikte, endüstriyel CO₂ kaynakları olan Afşin-Elbistan ve Sugözü enerji santralleri gibi tesisler, gelecekte projeler için değerlendirilebilecek potansiyele sahiptir (Şahin, 2008).

Batı Raman sahasında uygulanan CO₂ bazlı gelişmiş petrol kurtarımı (EOR) süreci, karışmayan enjeksiyon teknikleri açısından dünya çapında referans gösterilen projelerden biridir. Sahanın yaklaşık 1.850 MMSTB (300 milyon Sm³) düzeyindeki başlangıçta yerinde petrol kapasitesi, Türkiye'nin en büyük petrol sahası olma niteliğini pekiştirmektedir. Petrol üretimi, doğu-batı yönünde uzanan antiklinal bir yapı içerisinde yer alan Garzan kireçtaşı formasyonundan sağlanmaktadır (Şahin, 2008).

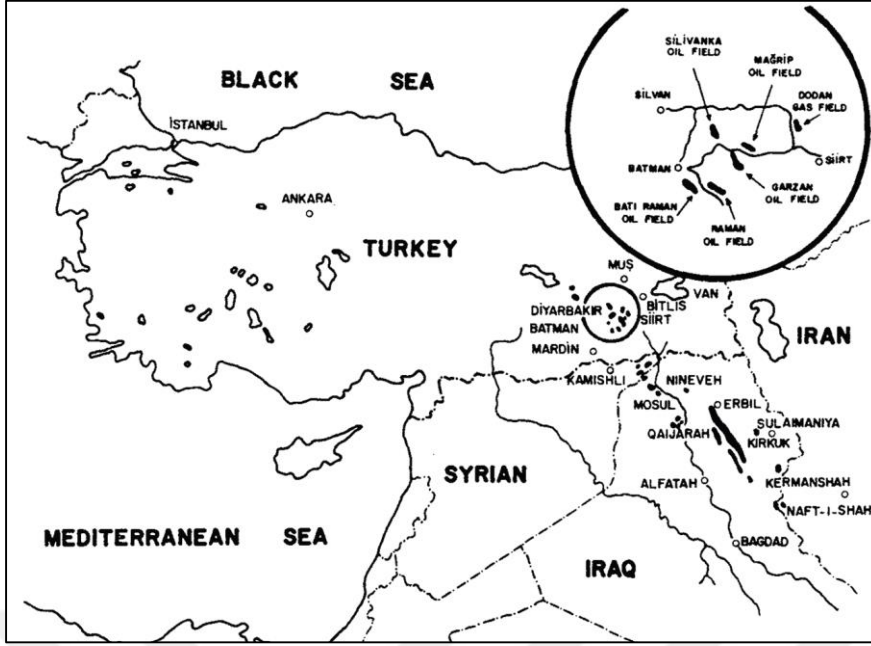
Türkiye'nin jeotermal sahalarında, yer altı akışkanlarıyla birlikte dikkate değer düzeyde CO₂ salınımı gözlemlenmektedir. Ege Bölgesi'ndeki jeotermal sistemlerde, karbonatlı kayaçların (mermer, kireçtaşı, kalkışist, kalsit gibi) yüksek jeotermal gradyen nedeniyle parçalanması sonucunda CO₂ açığa çıkmaktadır. Basıncın etkisiyle bu CO₂, jeotermal akışkan içerisinde çözünmekte, ancak üretim sonrasında büyük bir kısmı atmosfere salınmaktadır. Bu durum, jeotermal elektrik santrallerinin, kömür santrallerine kıyasla zaman zaman 3 kata kadar CO₂ salınımına yol açmasına neden olmaktadır (Aksoy

vd., 2017). Bu, temiz enerji olarak kabul edilen jeotermal kaynakların çevresel ve sosyal riskler oluşturmasına ve karbon ticaretinden gelir bekleyen projelerin karbon cezası ödeme riskiyle karşılaşmasına neden olur.

2018–2023 döneminde yürütölen Avrupa Birliği Horizon 2020 GECO Projesi, Türkiye dahil dört ölkede jeotermal kaynaklı CO₂ emisyonlarının kontrolü ve KYD teknolojilerinin ekonomik ve çevresel değerlendirmesi amacıyla hayata geçirilmiştir. Türkiye’den ODTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü ile Zorlu Enerji projeye aktif katkı sunmuştur. Hellisheiði (İzlanda) ve Kızıldere (Türkiye) sahaları, ekonomik uygulanabilirlik açısından olumlu değerlendirilmiş ve saha düzeyinde uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Kızıldere projesi, Türkiye'nin yüksek potansiyelli ilk jeotermal sahası olarak tanımlanmıştır. Denizli ilinde yer alan bu jeotermal alan, 2008 yılında Zorlu Enerji’nin kontrolüne geçmiş ve günümüzde de aynı firma tarafından işletilmektedir. Kızıldere sahasında faaliyet gösteren üç jeotermal santralden (I, II ve III) ıkan yoğuşmayan gazların yaklaşık %33’ü, Linde’nin CO₂ saflaştırma tesisine iletilmekte; geri kalan kısmı ise çevreye salınmaktadır. GECO Projesi kapsamında, Kızıldere sahasında CO₂ emisyonlarını azaltmak ve rezervuarın sürdürülebilirliğini artırmak için pilot ölçekli bir KYD projesi uygulanmıştır. Re-enjeksiyon hattına 41,6 ton/saat debiyle CO₂ eklenerek, toplamda 980 ton CO₂ geri basılmıştır. Asidik su enjeksiyonu sonrası kuyunun enjektivite kapasitesi iki kat artmış ve 190 ton/saat seviyesine ulaşmıştır. Projenin toplam yatırım maliyeti 810.000 € olarak kaydedilmiştir. Kızıldere sahasında depolanan karbon için hesaplanan seviyelendirilmiş maliyet, ton başına 19–63 € arasında değişmekte olup, temel senaryoda yaklaşık 40 € olarak tahmin edilmektedir (Aksoy vd., 2017).

Aydın-Salavatlı jeotermal sahasında üretilen CO₂'nin tamamının enjekte edilen su içinde çözünmesinin, en ekonomik çözüm olduğu tespit edilmiştir. Santral çıkışındaki jeotermal suyun sıcaklığı 80 °C, CO₂'nin sıcaklığı ise 110 °C’dir. %100 çözünme için gereken basınç 50,5 bar olarak hesaplanmış ve bu basınçta karışımın sıcaklığı 83,3 °C olmuştur. Çözünme süreci için gerekli olan pompa gücü 545 kW, kompresör gücü ise 498 kW olarak belirtilmiştir (Aksoy vd., 2017).



Şekil 22. Batı Raman sahası (Sayman vd., 2024)

4.5. KYD Teknolojisinin Gelecek Potansiyeli ve Maliyeti

KYD teknolojisi, iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir araç olmaya devam etmektedir. Bu teknoloji, fosil yakıtların yanması ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir ve gelecekteki enerji ve çevre politikalarının temel bir parçası olacağı öngörülmektedir. KYD'nin geleceği, teknolojik ilerlemeler, ekonomik sürdürülebilirlik ve uluslararası politikaların etkisi altında şekillenecektir.

KYD teknolojisinin geleceğinde büyük ilerlemeler, CO₂ yakalama ve depolama verimliliğinin artırılması yönünde olacaktır. Yeni materyaller ve kimyasal süreçler, CO₂ 'nin daha düşük maliyetlerle ve daha yüksek verimlilikle yakalanmasını sağlayacaktır. Örneğin, gelişmiş solventler ve membranlar, CO₂ 'nin ayrıştırılmasını daha ekonomik hale getirebilir (ER, 2025). Ayrıca, depolama kapasitesinin artırılması ve güvenli depolama alanlarının geliştirilmesi, KYD teknolojisinin etkinliğini artıracaktır. Derin denizaltı ve tuz akiferleri gibi yeni depolama seçenekleri, büyük miktarlarda CO₂ 'nin güvenli bir şekilde depolanmasına olanak tanıyacaktır (YEGM, 2025).

KYD teknolojisinin geniş çapta uygulanabilmesi için ekonomik sürdürülebilirlik büyük önem taşımaktadır. Karbon fiyatlandırması ve karbon vergisi gibi ekonomik teşvikler, KYD yatırımlarını cazip hale getirebilir. Ayrıca, kamu ve özel sektörün KYD projelerine yapacağı yatırımlar, bu teknolojinin yaygınlaşmasını destekleyecektir.

Maliyetlerin düşürülmesi ve verimlilik artışları, KYD'nin ekonomik sürdürülebilirliğini artıracak faktörler arasında yer almaktadır (GCCSI, 2023a).

KYD teknolojisinin geleceği, ulusal ve uluslararası düzeydeki politikaların ve düzenleyici çerçevelerin etkisi altında olacaktır. Paris Anlaşması ve Avrupa Birliği İklim Değişikliği Politikası gibi uluslararası anlaşmalar, KYD'nin benimsenmesini teşvik eden önemli faktörlerdir. Hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların KYD projelerine sağladığı finansal destek ve düzenleyici kolaylıklar, bu teknolojinin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır (EEA, 2023).

KYD teknolojisinin başarısı, toplumsal kabul ve farkındalık düzeyine de bağlıdır. Toplumun KYD teknolojisinin faydaları konusunda bilgilendirilmesi ve bu teknolojinin çevresel ve ekonomik avantajlarının anlatılması, kamu desteğini artırabilir. Eğitim ve bilgilendirme kampanyaları, KYD projelerinin hayata geçirilmesinde önemli rol oynayacaktır (Burrell, 2025).

KYD teknolojisi, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir araç olmaya devam edecektir. Teknolojik gelişmeler, ekonomik sürdürülebilirlik, politik destek ve toplumsal kabul, KYD 'nin gelecekteki başarısını belirleyecek ana faktörlerdir. Fosil yakıtların kullanımının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ile birlikte, KYD teknolojisi de küresel karbon emisyonlarının azaltılmasında hayati bir rol oynamaya devam edecektir.

KYD teknolojisi, atmosfere salınan CO₂ 'nin büyük bir kısmını yakalayarak yer altında güvenli bir şekilde depolamayı amaçlamaktadır. Bu teknoloji, iklim değişikliği ile mücadelede ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte önemli bir rol oynamaktadır.

Paris Anlaşması ile belirlenen küresel ölçekteki sıcaklık artışına yönelik azaltım hedeflerine ulaşılmasında güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve elektrik depolama teknolojilerine yönelik uygulamalar son yıllarda önemli ölçüde ilerleme kaydetmiştir. Buna karşılık, KYD uygulamalarının elektrik sektöründe, IPCC tarafından oluşturulan ihtiyatlı senaryolarda öngörülen büyüme oranlarına ulaşamamıştır (IPCC, 2022).

Bugünkü projeksiyonlar çerçevesinde değerlendirildiğinde, net sıfır hedeflerine ulaşılmasında elektrifikasyon, hidrojen ve sürdürülebilir biyoenerjinin yanı sıra KYD 'nin de önemli bir rol oynayacağı anlaşılmaktadır. KYD, çimento başta olmak üzere çeşitli imalat sanayii kollarında emisyonların doğrudan azaltılmasına katkı sağlayabilecek bir teknolojidir. Ayrıca, başta havacılık olmak üzere, uzun mesafeli taşımacılık için sınırlı sayıdaki düşük karbonlu seçeneklerden biridir (IEA, 2022).

KYD'nin bir diğ er potansiyel alanı, DAC teknolojileri ve biyoenerji ile entegrasyonudur. DAC, atmosferdeki CO₂ 'yi doğrudan yakalayarak karbon emisyonlarını azaltmayı hedefleyen yenilikçi bir teknolojidir. KYD ile birleştirildiğinde, atmosferden net karbon azaltımı sağlama potansiyeli artmaktadır. Biyoenerji tesislerinde KYD uygulamaları hem enerji üretimi hem de emisyon azaltımı açısından önemli faydalar sunmaktadır (GCCSI, 2023b).

KYD teknolojisinin tam potansiyeline ulaşabilmesi için bazı stratejik adımlar atılması gerekmektedir:

- **Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge):** Yeni ve daha verimli karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi, 'nin ekonomik uygulanabilirliğini artırır.

- **Altyapı Yatırımları:** CO₂ 'nin yakalanması, taşınması ve depolanması için gerekli altyapının geliştirilmesi, teknolojinin geniş çapta uygulanabilirliği için hayati önem taşır.

- **Politik ve Finansal Destek:** Hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların KYD projelerine teşvik sağlaması, karbon fiyatlandırması ve karbon vergisi gibi politikaların uygulanması, bu teknolojinin benimsenmesini hızlandırmaktadır.

KYD teknolojisi, enerji sektörü ve karbon yoğun endüstriler için önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Teknolojik gelişmeler ve maliyetlerin düşürülmesiyle birlikte, KYD 'nin daha geniş bir ölçekte uygulanması beklenmektedir. İklim değişikliği hedeflerine ulaşmak için bu teknolojinin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir bir geleceğin inşasında kritik bir rol oynayacaktır.

KYD teknolojilerinin enerji sektöründe geniş çapta benimsenmesi ve uygulanması, detaylı ve stratejik yol haritalarının geliştirilmesini gerektirir. Bu yol haritaları, teknolojinin mevcut zorluklarının üstesinden gelmesine ve gelecekteki fırsatların değerlendirilmesine yönelik rehberlik sunar.

KYD teknolojisinin yaygınlaşması için öncelikli adım, yenilikçi yakalama, taşıma ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesidir. Daha verimli, maliyet etkin ve çevresel açıdan güvenli teknolojilerin ortaya konulması, KYD'nin uygulanabilirliğini artıracaktır. Üniversiteler, araştırma kurumları ve sanayi kuruluşları, bu alandaki Ar-Ge çalışmalarını desteklemelidir. Örneğin, yeni solventler ve membran teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar, karbon yakalama süreçlerinin etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir (GCCSI, 2021).

Pilot projeler, KYD teknolojisinin uygulanabilirliğini ve ölçeklenebilirliğini test etmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu projeler, sahada gerçekleştirilen uygulamalardan

elde edilen deneyimler sayesinde teknolojiye dair pratik bilgilerin ve verilerin toplanmasını sağlar. Ticari ölçekli projeler ise KYD'nin ekonomik ve teknik potansiyelini daha geniş ölçekte değerlendirmek için gereklidir. Hükümetlerin bu tür projelere mali destek sağlaması ve özel sektör yatırımlarını teşvik etmesi gereklidir. Örneğin, ABD'deki Petra Nova Projesi ve Norveç'teki Northern Lights projesi, KYD'nin ticari potansiyelini gösteren başarılı örneklerdir (IPCC, 2021).

KYD'nin başarılı bir şekilde uygulanması için karbon yakalama, taşıma ve depolama altyapısının geliştirilmesi gerekmektedir. Boru hatları, CO₂ 'nin taşınması için güvenli ve verimli bir yol sunarken, depolama alanlarının güvenilirliğinin artırılması uzun vadeli başarı için kritik öneme sahiptir. Bu altyapının geliştirilmesi için hükümetler ve özel sektör arasında iş birliği gereklidir.

KYD projelerinin yüksek sermaye maliyetleri, bu teknolojinin yaygınlaştırılmasında önemli bir engel oluşturmaktadır. Karbon fiyatlandırması, karbon vergileri ve teşvik programları gibi mekanizmalar, KYD projelerine ekonomik destek sağlayabilir. Ayrıca, uluslararası iş birliği ve fonlama mekanizmaları, gelişmekte olan ülkelerde KYD'nin uygulanabilirliğini artırabilir (EC, 2020).

KYD yol haritalarının geliştirilmesinde uluslararası iş birliği büyük bir öneme sahiptir. Ülkeler arasında bilgi paylaşımı, teknoloji transferi ve ortak projeler, KYD'nin küresel ölçekte yaygınlaşmasını hızlandırabilir. Özellikle BMİDÇS gibi platformlar, bu tür iş birliklerini desteklemek için kullanılabilir.

KYD yol haritaları, bu teknolojinin enerji geçişindeki rolünü optimize etmek ve karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşmak için kritik bir araçtır. Ar-Ge çalışmaları, altyapı yatırımları, düzenleyici çerçeveler ve finansal teşvikler gibi çok boyutlu stratejiler, KYD'nin sürdürülebilir bir geleceğe katkısını artıracaktır.

Türkiye'de KYD alanındaki çalışmalar oldukça sınırlıdır. 2009 yılında TÜBİTAK desteğiyle gerçekleştirilen proje ile çimento fabrikaları, termik santraller, şeker fabrikaları, rafineriler ve demir çelik endüstrisinden neden olan CO₂ emisyonlarının miktarını değerlendirme ve bu salınımların yeraltı yapılarının belirlenmesini hedeflemiştir. Çalışma, özellikle 500 MW üzerinde kurulu güce sahip termik santralleri içermiştir (TÜBİTAK, 2009).

Çaylarbaşı sahası, karbon depolama ve üretim artırımı açısından uygun jeolojik özellikleri nedeniyle proje kapsamında değerlendirmeye alınmıştır. Bu çalışma kapsamında, bir çimento fabrikasından sağlanan emisyon verileri doğrultusunda CO₂ enjeksiyon ve depolama potansiyeli değerlendirilmiştir. Ayrıca, taşıma ve depolama

süreçlerinin teknik ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Projede CO₂ 'nin taşınması iki alternatifle ele alınmıştır. Boru hattı ve tanker taşımacılığı. Tankerle taşıma yöntemi, 34 milyon dolar yatırım maliyeti ve 408.000 dolar aylık işletme maliyeti ile daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Boru hattı taşımalarının ise 53,5 milyon dolar yatırım maliyeti ve 414.000 dolar aylık işletme maliyeti olduğu hesaplanmıştır. Tanker taşımacılığı özellikle küçük CO₂ miktarları için daha uygulanabilir bulunmuştur.

Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları, CO₂ enjeksiyon sürecinin 20 yıl boyunca sürdürülebileceğini ve bu periyotta yaklaşık 8 yıl boyunca 2 milyon varil ek petrol üretimi sağlanırken, toplamda 280 milyon Sm³ CO₂ 'nin yeraltında güvenli biçimde depolanabileceğini ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, Trakya bölgesi, Batı Karadeniz ve Adıyaman çevresi'nde elverişli gözeneklilik ve geçirgenlik özelliklerine sahip akiferlerin bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 23). Dodan sahası ise 18 milyon ton CO₂ depolama kapasitesi ile önemli bir seçenek olarak öne çıkmıştır (Okandan vd., 2011). Ancak, Türkiye'nin sismik riski yüksek bir bölgede yer alması, KYD tesislerinin güvenliği açısından ek maliyetler ve zorluklar yaratmaktadır. Bu durum, özellikle deprem riski yüksek bölgelerde KYD uygulamalarının sınırlı olabileceğini göstermektedir.

2017-2020 arasında yapılan ECO-BASE projesi (Establishing CO₂ Enhanced Oil Recovery Business Advantages in South-Eastern Europe), KYD uygulamalarının Güneydoğu Avrupa'da yaygınlaştırılmasını hedeflemiştir. Projenin amacı, karbon yakalama ve CO₂ -EOR uygulamalarının teknik ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmek, bu alanda potansiyel pilot projeleri belirlemek ve iş modelleri geliştirmek olmuştur. Proje kapsamında, verilerin taranması ve modelleme yaklaşımları ile hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik dikkate alınarak Güneydoğu Avrupa'nın KYD potansiyeli incelenmiştir.

Bu kapsamda, Batman Rafinerisi ve Siirt Kurtalan Çimento Fabrikası'ndan yakalanacak CO₂ 'nin Batı Raman petrol alanına enjekte edilmesiyle petrol kurtarımını artırmayı amaçlayan bir pilot proje önerisi geliştirilmiştir. KYD süreçlerinin teknik detayları ve ekonomik etkileri analiz edilerek (Şekil 24) CO₂ 'nin yakalanması ve depolanmasının ekonomik faydalarını tahmin etmek için farklı olasılık senaryoları (örneğin, 2025 ve 2030 yıllarına yönelik tahminler) ve beklenen parasal değer (EMV) tahminleri gerçekleştirilmiştir.

Modelleme süreçleri sonucunda, CO₂ -EOR uygulamalarının petrol kurtarımını artırırken, karbon emisyonlarını azaltmada etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Ancak, süreçlerin başarıya ulaşabilmesi için yatırım maliyetleri, belirsizliklerin yönetimi ve

bölgesel düzenlemeler gibi faktörlerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Türkiye'nin ECO-BASE projesine katılımı, KYD ve CO₂ -EOR uygulamalarında ülkenin teknik kapasitesini artırmak ve uluslararası iş birlikleri ile bu alanda bilgi birikimi sağlamak adına önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, Tablo 6'da sunulan Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası için toplam emisyon tahminleri elde edilmiştir.

Batı Raman sahasında CO₂ kullanım stratejisinin belirlenmesi sürecinde dört ayrı senaryo modellenmiştir. Bu senaryolar arasında, 2025 itibarıyla Batı Raman rafinerisinden CO₂ temin edilmesi ve 2030 yılında Kurtalan Çimento Fabrikası'ndan CO₂ sağlanması seçeneği ile her iki kaynaktan 2025'ten itibaren eş zamanlı CO₂ tedarik edilmesi alternatifi yer almaktadır. Temel petrol fiyat varsayımı altında elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Ancak petrol fiyatı yüksek eğilimi takip ettiğinde, 2025'ten itibaren rafineri yakalama ve aynı anda rafineri ve çimento fabrikasından yakalama, en kârlı ve finansal riski en düşük olan seçenekler olarak belirlendi. Sahada gerçekleştirilecek enjeksiyon faaliyetleri sonucunda toplam depolama kapasitesinin yaklaşık 16 milyon ton CO₂ düzeyine erişmesi öngörülmektedir (ECO-BASE, 2020).

2021-2023 yılları arasında gerçekleştirilen projede, KYD süreçlerini geliştirmek amacıyla, Batman Rafinerisi'nden yakalanan baca gazı/ CO₂ 'in Batı Raman petrol alanına enjekte edilmesi için en elverişli durumun ekonomik ve teknik fizibilitesini araştırmıştır. TÜPRAŞ, TPAO ve ODTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü birlikteliğiyle yürütülen bu proje, CO₂'in iklim değişikliğine olan olumsuz etkilerini azaltmayı ve aynı zamanda geliştirilmiş petrol kurtarımı (CO₂ -EOR) yöntemi ile petrol üretimini artırmayı hedeflemiştir (Merey, 2023).

Proje, Türkiye'nin mevcut CO₂ kaynaklarını ve bunların petrol kurtarımı için kullanılabilirliğini incelemiştir. Özellikle Batı Raman sahasında 1986'dan bu yana kullanılan CO₂ -EOR yöntemine odaklanılmıştır. Ancak Dodan gaz sahasından elde edilen CO₂ miktarının yetersizliği nedeniyle, petrol üretiminde düşüşler yaşanmıştır. Bu durumu sonuçlandırmak için Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası'ndan CO₂ yakalama yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca CO₂ ile havadan azot karışımının kullanılabileceği senaryolar değerlendirilmiştir.

Projenin bir diğer önemli çıktısı ise karbon yakalama ve taşımaya ilişkin ekonomik analizlerdir. Boru hattı ve diğer taşıma yöntemleri için maliyetler hesaplanmış, CO₂ yakalama potansiyeli belirlenmiştir (Tablo 7). Proje, hem teknik hem de ekonomik

sürdürülebilirlik açısından yenilikçi çözüm önerileri sunmuş, Türkiye’de KYD uygulamalarının gelecekteki potansiyelini artırmak için önemli veriler sağlamıştır. Bu çalışma, Türkiye’nin sera gazı emisyonlarını azaltma hedeflerine katkı sunmasını, aynı zamanda enerji sektöründe ekonomik fayda sağlamayı amaçlamaktadır.

Türkiye’de KYD projelerinin ekonomik ve çevresel etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu teknolojilerin uygulanabilirliğine dair önemli veriler sunmaktadır. Özellikle karbon yakalama teknolojilerinin maliyeti ve karbon vergisi gibi ekonomik teşviklerin projelerin karlılığı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan analizler, \$58/ton'luk karbon vergisi senaryosunda hem petrol üretimini artırmak hem de atmosfere salınmayan CO₂ miktarının artırılarak ithalatın azaltılabileceğini ortaya koymuştur. Bu tür teşvik mekanizmalarının KYD projelerinin ekonomik sürdürülebilirliği üzerinde doğrudan etkili olduğu vurgulanmıştır. Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası'ndan CO₂ yakalanarak Batı Raman petrol sahasına enjeksiyonla geliştirilen petrol kurtarma (CO₂ -EOR) yönteminin hem sera gazı emisyonlarını azaltmada hem de enerji sektöründe ekonomik fayda sağlamada etkili olduğu ifade edilmiştir (Doğan vd., 2023).

2017 yılında Kayahan tarafından yapılan Çan Termik Santrali çalışmasında, %30 oksijen ile zenginleştirilmiş yanma teknolojisinin elektrik maliyeti 50.5 €/MWh, CO₂ önleme maliyeti 55.3 €/tCO₂ ve CO₂ yakalama maliyeti ise 36.4 €/tCO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu yöntem, hava ile yanmaya göre daha ekonomik bir alternatif olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, biyokütle ile oksijen zenginleştirilmiş yanma senaryosu, tüm karbon yakalama retrofit alternatifleri arasında en ekonomik seçenek olarak belirlenmiştir. Ancak, hava ayrıştırma ünitesi (ASU) maliyeti, oksijen kullanımından kaynaklanan riskler ve yanma modlarının değişim sorunları, bu teknolojinin uygulanabilirliği açısından önemli engeller olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, bu yöntem kısa vadeli ekonomik bir retrofitting seçeneği olarak önerilse de, uzun vadeli uygulanabilirlik teknik sorunların çözümüne bağlıdır (Kayahan ve İpek, 2019).

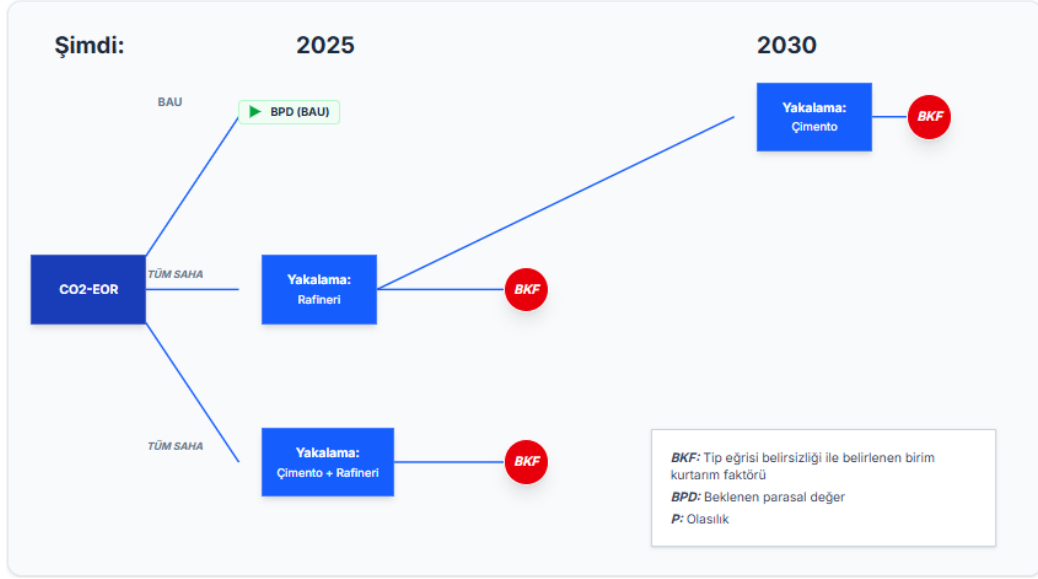
Batman Rafinerisi için önerilen amin bazlı karbon yakalama teknolojisinin ekonomik analizi TÜPRAŞ (2023) tarafından yapılmıştır. Buna göre, CO₂ yakalama ünitesinin sermaye maliyeti, 2.3 MMscf/gün gaz işlemek için yaklaşık 28 milyon dolar olarak hesaplanmıştır. Günlük 147 ton CO₂ kapasitesine sahip bir ünitenin yakalama maliyeti 200 \$/tCO₂ olarak belirlenmiş ve %15 iç karlılık oranı (IRR) ile değerlendirilmiştir. Ancak bu maliyet, teknolojinin ekonomik uygulanabilirliği üzerinde

olumsuz bir etkiye sahiptir. Türkiye'nin Batı Raman sahasında 1986'dan beri yürüttüğü CO₂ -EOR uygulamaları, mevcut depolama maliyetleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Dodan sahasında elde edilen CO₂ 'nin arıtılması ve sıkıştırılması için öngörülen birim maliyet 11.8 \$/tCO₂ olarak hesaplanmıştır. Geri kazanılan gazın yeniden enjeksiyonu ise 8.8 \$/tCO₂ düzeyinde maliyetlendirilmiştir. Öte yandan, derin tuzlu su akiferlerine yönelik planlanan enjeksiyon uygulamalarında; taşıma, yeni enjeksiyon kuyularının açılması ve izleme faaliyetlerine ilişkin maliyet kalemlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Karbon yakalama teknolojilerinin maliyeti yüksek olduğundan karbon vergisi veya teşvik sistemleri KYD projelerinin karlılığını artırmada kritik bir role sahiptir. Özellikle petrol kurtarma gibi ekonomik fayda sağlayan uygulamalar, karbon azaltımıyla birlikte enerji sektöründe stratejik avantajlar sunmaktadır. Mevcut enerji santralleri için oksijen zenginleştirilmiş yakma gibi teknolojiler kısa vadeli ekonomik retrofitting seçenekleri olarak değerlendirilebilir. Ancak bu teknolojilerin uygulanabilirliği, teknik zorlukların çözülmesine bağlıdır. Türkiye'nin mevcut CO₂ depolama deneyimi, gelecekteki KYD projelerine rehberlik etmek için önemli bir bilgi birikimi sunmaktadır. Bu tür analizler, Türkiye'nin karbon nötr hedeflerine ulaşmasında ve enerji sektöründe rekabet gücünü artırmasında yol gösterici olacaktır.



Şekil 23. Türkiye sınırları içerisindeki potansiyel jeolojik CO₂ rezervuarları (Okandan vd., 2011)



Şekil 24. ECO-BASE tarafından önerilen karar verme modeli (ECO-BASE, 2020).

Tablo 6. Hesaplanan salınım değerleri (ECO-BASE, 2020).

	Batman Rafineri	Kurtalan Çimento Fabrikası
Toplam tahmini emisyon (MtCO ₂ /yıl)	0,269	0,404
Yakalama faktörü	0,5	0,8
Tahmini CO ₂ yakalama potansiyeli (MtCO ₂ /yıl)	0,134	0,323

Tablo 7. Kurtalan Çimento Fabrikası ve Batman Rafinerisi KYD emisyonları ve maliyetleri (Doğan vd., 2023)

	Batman Rafinerisi	Kurtalan Çimento Fabrikası +Rafineri	Rafineri+Havadan Azot Yakalanması +Çimento
Yakalama Maliyeti (\$/tCO ₂)	200	85	12.588
Boru Hattı Maliyeti (\$)	923.442	1.740.378	923.442
Tahmini CO ₂ yakalama maliyeti (MtCO ₂ /yıl)	0,049	0,279	0,049

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

KYD sistemlerinin yakalama, ayırma–saflaştırma, sıkıştırma, taşıma ve depolama/izleme olmak üzere birbirini izleyen beş temel aşamadan oluşan çok aşamalı bir mühendislik sistemi niteliği taşımaktadır (Şekil 25). Sistem; teknolojik entegrasyon gereksinimi, farklı mühendislik alanlarının kesişimi ve her aşamanın kendine özgü maliyet profili ile karakterize edilmektedir. KYD sürecinde özellikle yakalama ve sıkıştırma aşamalarının toplam enerji tüketimi üzerinde önemli bir etki yarattığı; taşıma ve depolama aşamalarında ise lojistik, güvenlik ve uzun dönemli izleme gereksinimlerinin öne çıktığı tespit edilmiştir.

Bu durum, KYD'nin karmaşık ve disiplinler arası bir tasarım yaklaşımı gerektirdiğini vurgulamaktadır. KYD'nin yalnızca yakalama değil, aynı zamanda taşıma ve güvenli depolama süreçlerini kapsayan entegre bir zincir olarak ele alınması gerekmektedir (Metz vd., 2005). Enerji tüketimi ve maliyet yükünün özellikle yakalama ve sıkıştırma gibi ön aşamalarda yoğunlaşması, tüm sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Bui vd. (2018) tarafından yapılan değerlendirmelerde de KYD'nin etkinliğinin yalnızca yakalama oranına değil, süreçler arası uyum ve optimizasyona bağlı olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda, KYD'nin tek adımlı bir teknoloji değil, sistem mühendisliği yaklaşımı gerektiren bütünsel bir yapı olduğunu doğrulamaktadır.

KYD uygulamaları günümüzde en yaygın olarak enerji santralleri, çimento tesisleri, demir–çelik ve kimya sanayi gibi yoğun karbon salımı gerçekleştiren sektörlerde kullanılmaktadır. Küresel ölçekte ticari ölçekli tesislerin büyük bölümünün petrol ve doğal gaz sektöründe yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte yüksek yatırım maliyetleri, çevresel güvenlik gereklilikleri ve uzun vadeli izleme zorunlulukları KYD'nin yaygınlaşmasını sınırlandıran temel faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, KYD'nin ekonomik ve yönetsel boyutlara güçlü biçimde bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır. IEA (2023) ve GCCSI (2023) verileri, KYD projelerinin maliyet ve risk faktörleri nedeniyle belirli bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca jeolojik depolama kapasitesi, yüksek yatırım maliyetleri ve KYD projelerine ilişkin izin süreçleri, uzun dönemli sorumluluk paylaşımı ve teşvik mekanizmalarının açık biçimde tanımlanmamış olması, projelerin ölçeklenebilirliğini sınırlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu çerçevede, KYD'nin yalnızca teknik uygulanabilirlik değil, aynı zamanda politika ve teşvik mekanizmalarıyla desteklenmesi gereken bir teknoloji

olduğunu göstermektedir. Türkiye açısından da KYD'nin öncelikle pilot projelerle geliştirilmesi gerektiği yaklaşımıyla uyum sağlamaktadır.

KYD teknolojilerinin mühendislik literatüründe ön yakma, son yakma ve oksî-yakıt yakma olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır (Kheirnik vd., 2021). Teknik karşılaştırmalar; ön yakma yönteminin yüksek CO₂ basıncı ve konsantrasyonu avantajı sunduğunu, son yakma yönteminin mevcut tesislere entegrasyon kolaylığı sağladığını, oksî-yakıt yakmanın ise saf oksijen ortamında yüksek saflıkta CO₂ üretimine olanak tanıdığını göstermektedir (Tablo 8).

Bu sınıflandırma literatürde kabul gören teknolojik ayrımlarla uyumludur (Metz vd., 2005). Son yakma yakalama veriminin genellikle %85–90, ön yakma yakalamanın ise %95'e kadar çıkabildiği belirtilmektedir (Kheirnik vd., 2021). Oksî-yakıt sistemleri yüksek saflık avantajı sunmakla birlikte, hava ayırma ünitesinin enerji yükü nedeniyle maliyet artışı yaratmaktadır. Bu kapsamda, Teknoloji seçiminde yalnızca yakalama veriminin değil; enerji tüketimi, süreç uyumu ve maliyet dengelerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

CO₂ taşıma sürecinin KYD zincirinde kritik bir ara aşama olduğu belirlenmiştir. CO₂ 'nin gaz, sıvı veya yoğunlaştırılmış fazda boru hatları, deniz yolu ve kara yolu ile taşınabildiği; uzun mesafe ve yüksek hacimli taşımalar için boru hattı ve deniz taşımacılığının daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Taşıma altyapısının tasarımında güvenlik kriterleri ve kapasite planlamasının mühendislik açısından belirleyici olduğu görülmüştür.

Bu durum, KYD uygulamalarında lojistik ve altyapı boyutunun önemli olduğunu ifade eden Metz vd. (2005) verileriyle uyumludur. CO₂ taşıma ve depolama süreçlerinin sistem maliyeti ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Ayrıca, uzun dönem izleme, sızıntı riskleri ve çevresel güvenlik unsurlarının KYD'nin kabul edilebilirliğinde kritik rol oynamaktadır (Metz vd., 2005). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, taşıma ve depolama süreçlerinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel kriterlere göre optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

KYD teknolojilerinin uygulama maliyetlerinin yüksek olduğu ve maliyet kalemlerinin yakalama, taşıma ve depolama olarak ayrıldığı bu çalışma ile ortaya konmuştur. Toplam maliyet içerisinde en büyük payın yakalama aşamasına ait olduğu görülmüştür. Türkiye örnekleri üzerinden yapılan değerlendirmeler, yakalama ünitelerinin yatırım maliyetlerinin yüksek olduğunu; depolama ve EOR uygulamalarının ise daha düşük maliyetli olduğunu göstermektedir.

Toplam KYD maliyetinin %60–75’inin yakalama aşamasında yoğunlaşmaktadır (Rubin vd., 2015; GCCSI, 2023). Karbon fiyatlandırması, teşvik mekanizmaları ve düzenleyici çerçevenin bulunmadığı koşullarda KYD projelerinin ekonomik fizibilitesi zayıflamaktadır. Türkiye için EOR tabanlı uygulamaların başlangıç aşamasında daha rasyonel bir seçenek sunmaktadır. Hidrojen üretim süreçlerinin KYD teknolojileriyle entegrasyonunun düşük karbonlu hidrojen üretimi açısından kritik olduğu belirlenmiştir. KYD entegrasyonu ile karbon emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabildiği, ancak ekonomik ve altyapısal sınırlamaların yaygınlaşmayı etkilediği görülmüştür.

KYD entegrasyonu sayesinde mavi hidrojen üretiminde CO₂ emisyonlarının %90’a kadar azaltılabildiği, ancak hidrojen maliyetinin %20–30 oranında artmaktadır (Saha vd., 2023). Bu durum, KYD entegrasyonunun çevresel fayda sağlarken ekonomik politika desteği gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, BECCS ve DAC teknolojilerinin uzun vadeli iklim hedefleri açısından stratejik öneme sahip olduğu belirlenmiştir. Bu teknolojiler, yalnızca endüstriyel kaynaklardan değil, atmosferden doğrudan CO₂ yakalanmasına olanak tanımaktadır. BECCS ve DAC uygulamaları, net-sıfır hedeflerine ulaşmada tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Bu çerçevede KYD teknolojileri, yalnızca mevcut emisyonları azaltan değil, aynı zamanda geleceğin iklim politikalarında aktif rol oynayan sistemler olarak değerlendirilmektedir.

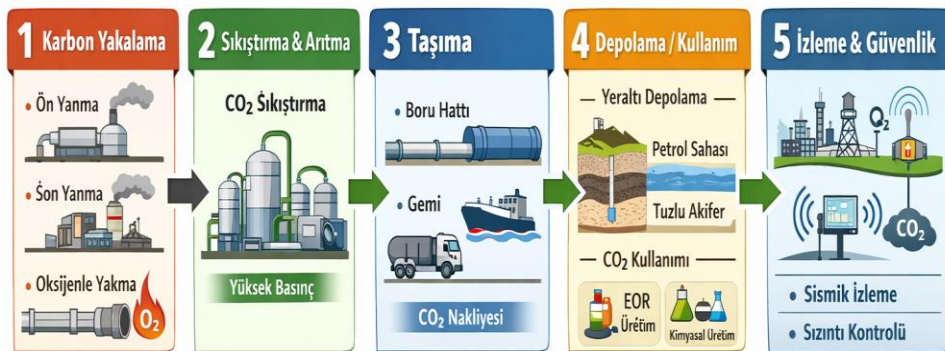
KYD sistemlerinin performansının, tek bir aşamanın verimliliğinden ziyade yakalama, sıkıştırma, taşıma ve depolama adımları arasındaki entegrasyon düzeyine bağlı olmaktadır. Süreçler arasında uyum sağlanamadığında, yakalama verimi yüksek olsa bile toplam sistem performansı düşmektedir. Özellikle yakalama ünitesi ile sıkıştırma ve taşıma altyapısı arasında kapasite uyumsuzluğu oluşması durumunda operasyonel kayıplar ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşım, KYD’nin entegre bir zincir olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Metz vd., 2005; Bui vd., 2018). Kapasite uyumsuzluklarının pratik uygulamalarda sistem performansını sınırlayabilmekte ve entegrasyon gereksinimini somut biçimde göstermektedir.

Araştırmada KYD entegrasyonunun tesislerin enerji dengesi üzerinde belirleyici bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Son yakma sistemlerde solvent rejenerasyonu için gerekli olan ısıнын önemli bir enerji yükü oluşturduğu; ön yakma ve oksijen-yakıt sistemlerinde ise hava ayırma ve gaz işleme ünitelerinin enerji tüketimini artırdığı görülmüştür. Bu durum, KYD uygulamalarında enerji optimizasyonunun tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu durum, Rubin vd. (2015) tarafından tanımlanan “enerji cezası” kavramı ile uyumludur. KYD entegrasyonunun

santral net verimini %8–15 aralığında düşürebilmektedir. Benzer şekilde Boot-Handford vd. (2014), özellikle post-combustion sistemlerde solvent rejenerasyon enerjisinin sistem performansını belirleyen temel unsur olduğunu vurgulamaktadır. Bu durumda, farklı yakalama teknolojilerinin enerji yüklerini birlikte değerlendirerek bütüncül bir tasarım yaklaşım gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

KYD teknolojilerinin teknik olarak uygulanabilir olmasına rağmen, ölçek büyütme sürecinde finansal belirsizlikler, düzenleyici çerçeve eksikliği ve yatırım risklerinin önemli engeller oluşturduğu görülmüştür. Özellikle uzun dönemli depolama sorumluluklarının belirsiz olması, yatırım kararlarını zorlaştırmaktadır. Bu durum, IEA (2023) ve GCCSI (2023c) raporlarında vurgulanan değerlendirmelerle örtüşmektedir. CCS projelerinin ölçeklenebilirliğinin karbon fiyatlandırması, teşvik mekanizmaları ve düzenleyici güvence ile doğrudan ilişkilidir. Böylece, KYD'nin yalnızca mühendislik çözümü değil, aynı zamanda kurumsal ve politik altyapı gerektiren bir teknoloji olmaktadır.

KYD teknolojilerinin kısa ve orta vadede enerji dönüşüm sürecinde tamamlayıcı bir rol üstlenebileceği belirlenmiştir. Özellikle fosil tabanlı sistemlerden düşük karbonlu üretime geçişte KYD'nin köprü işlevi görebileceği görülmüştür. Bununla birlikte uzun vadede KYD'nin yenilenebilir tabanlı sistemlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu değerlendirme, IEA (2023) senaryoları ile de uyumludur. KYD'nin kısa vadede emisyon azaltımında etkili olduğu, ancak uzun vadede yenilenebilir enerji sistemleriyle entegre edilmesi gerekmektedir.



Şekil 25. Karbon yakalama akış şeması (IPCC, 2005)

Tablo 8. Karbon yakalama teknolojilerinin teknik, enerji ve maliyet açısından karşılaştırılması (Aksoy ve Tutar, 2025; Kheirnik vd., 2021).

Yakalama Yöntemi	CO ₂ Konsantrasyonu	Yakalama Verimi (%)	Enerji Tüketimi	Entegrasyon Durumu	Maliyet Profili
Ön Yakma	Yüksek	90–95	Orta	Yeni tesislere uygun	Orta–Yüksek
Son Yakma	Düşük	85–90	Yüksek	Mevcut tesislere kolay	Yüksek
Oksi-yakıt	Çok yüksek	90	Yüksek	Orta	Yüksek

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında fosil yakıtlardan hidrojen üretimi süreçleri ile KYD teknolojilerinin entegrasyonu teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Tezde, KYD sistemlerinin mühendislik yapısını, uygulanabilirliğini ve hidrojen üretimiyle entegrasyon potansiyelini ortaya koyarak düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişteki rolünü değerlendirilmiştir. Bu kapsamda süreç aşamaları, teknoloji türleri, maliyet unsurları, çevresel etkiler ve Türkiye'nin potansiyeli analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

KYD'nin tekil bir emisyon azaltım aracı değil; yakalama, ayırma-saflaştırma, sıkıştırma, taşıma ve depolama/izleme aşamalarından oluşan, disiplinler arası mühendislik yaklaşımı gerektiren bütünleşik bir sistem olduğunu göstermiştir. Özellikle yakalama aşamasının hem teknik hem de ekonomik açıdan sistem performansını belirleyen en kritik basamak olduğu ortaya çıkmıştır. Yüksek enerji tüketimi ve yatırım maliyetleri, KYD'nin yaygınlaşmasının önündeki temel engeller arasında yer almaktadır.

Ön yakma, son yakma ve oksî-yakıt yakma teknolojilerinin her birinin yüksek CO₂ yakalama verimine ulaşabilmesine rağmen tesis uyumu, sistem karmaşıklığı, enerji cezası ve maliyet açısından önemli farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. Son yakma teknolojisi mevcut tesislere entegrasyon avantajı sağlarken, oksî-yakıt yakma yöntemi yüksek saflıkta CO₂ üretimiyle teknik üstünlük sunmaktadır. Ön yakma yaklaşımı ise hidrojen üretim süreçleriyle entegrasyon imkânı nedeniyle düşük karbonlu hidrojen üretimi açısından stratejik bir konuma sahiptir. Bununla birlikte yüksek ilk yatırım maliyetleri ve altyapı gereksinimleri bu teknolojilerin yaygın uygulamasını sınırlamaktadır.

Ekonomik analizler, KYD projelerinin karbon fiyatlandırması, teşvik mekanizmaları ve politika desteği olmaksızın rekabetçi olmasının güç olduğunu göstermiştir. Yakalama aşamasındaki sermaye ve enerji maliyetleri toplam maliyetin büyük bölümünü oluşturmaktadır.

Türkiye özelinde yapılan değerlendirmelerde, depolama ve EOR uygulamalarının yakalama aşamasına kıyasla daha uygulanabilir olduğu görülmüştür. Mevcut doğal gaz altyapısı ve jeolojik potansiyelin KYD-hidrojen entegrasyonu açısından önemli bir avantaj sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çevresel ve sosyal boyutlar açısından KYD teknolojilerinin iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir araç olmasına rağmen kamuoyu algısı, sızıntı riskleri ve uzun

dönemli izleme gerekliliklerinin teknoloji kabulünde belirleyici olduğu görülmüştür. Bu durum, KYD'nin yalnızca mühendislik temelli değil, aynı zamanda politik, kurumsal ve toplumsal boyutları olan bir dönüşüm teknolojisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Hidrojen üretimi ile KYD entegrasyonu bağlamında, fosil yakıta dayalı hidrojen üretiminin tek başına sürdürülebilir olmadığı; KYD entegrasyonu sayesinde emisyonların önemli ölçüde azaltılabildiği sonucuna varılmıştır. Özellikle, ön yakma yaklaşımı ve reformasyon süreçleriyle bütünleşik KYD uygulamaları, düşük karbonlu hidrojen üretimi açısından geçiş dönemi için stratejik bir seçenek sunmaktadır. Ancak maliyet, altyapı ve ölçek sorunları entegrasyonun kısa vadede sınırlı kalmasına neden olmaktadır.

Bu kapsamda elde edilen sonuçlar ve yapılan değerlendirmelerden yola çıkarak aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

1. KYD projelerinin ekonomik olarak uygulanabilir hale gelebilmesi için karbon fiyatlandırma mekanizmaları, teşvik sistemleri ve vergi indirimi politikaları güçlendirilmelidir.
2. Türkiye'de öncelikli olarak jeolojik depolama ve EOR tabanlı pilot KYD projeleri geliştirilmelidir.
3. Hidrojen üretimi ile KYD entegrasyonu için doğal gaz reformasyon tesislerinde pilot uygulamalar başlatılmalıdır.
4. KYD teknolojilerinin enerji cezasını azaltmaya yönelik Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.
5. Kamuoyu bilgilendirme ve şeffaf izleme sistemleri geliştirilerek toplumsal kabul artırılmalıdır.
6. Uzun vadede DAC ve BECCS gibi negatif emisyon teknolojileri ulusal iklim stratejilerine entegre edilmelidir.

KAYNAKÇA

- ABS. (2021). Sustainability and carbon capture, utilization and storage. 10 Şubat 2025 tarihinde <https://ww2.eagle.org/en/Products-and-Services/sustainability/ccus.html> adresinden erişildi.
- Akdağ, A. ve Güllü, H. (2022a). İklim değişikliği ve enerji geçişi. *Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları*.
- Akdağ, A. ve Güllü, H. (2022b). “Net sıfır” hedefinde karbon yakalama, kullanım ve depolama teknolojilerinin yeri. *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, 1(1), 62–79.
- Aksoy, A. ve Tutar, M. (2022). Methods and techniques for CO₂ capture: Review of potential solutions and applications in modern energy technologies. *Energies*, 15(3), 887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>
- Aksoy, N., Aydın, M. ve Şimşek, C. (2017). Jeotermal sahalarda karbon yakalama ve depolama uygulamaları üzerine bir değerlendirme. *Jeotermal Enerji Dergisi*, 3(2), 45–57.
- Alverà, M. (2022). Hidrojen Devrimi (Çev. S. Erkan). İstanbul: Say Yayınları.
- Arı, M., ve Yılmaz, M. (2023). Dünya’da ve Türkiye’de Enerji Kaynaklarının Kullanımı: Mevcut Durum ve Gelecek Perspektifi. *Uluslararası Enerji ve Politika Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 45–62.
- Aydem Enerji. (2024). Hidrojen Enerjisi Nedir? Geçmişi, Bugünü ve Geleceği. 22 Mart 2025 tarihinde <https://www.aydemenerji.com.tr/blog/202/hidrojen-enerjisi-nedir-gecmisi-bugunu-ve-gelecegi> adresinden erişildi.
- Ayvaz, Z. (1998). Çevre eğitime giriş. İzmir: *Çevre Eğitimi Merkezi Yayınları*, 3(21), 5–6.
- Benson, S. M. ve Cole, D. R. (2008). CO₂ Sequestration in Deep Sedimentary Formations. *Elements*, 4(5), 325–331. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.325>
- BOTAŞ. (2022). Boru Hatları ve Petrol Taşıma A.Ş. Faaliyet Raporu 2022. Ankara: BOTAŞ Yayınları.
- Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., ... Yao, J. (2014). Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science*, 7(1), 130–189.
- Brown, R. (2024). Economic impacts of carbon capture and storage projects. *Energy Policy*, 136, 104–112.

- Bui, M., Adjiman, S., Bardow, A., Anthony, E., Boston, A., Brown, S., ... Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062–1176.
- Bui, M. (2020). CO₂ yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri. *Enerji Politikaları Dergisi*, 29(4), 112-135.
- Burrell, S. (2025). CCS'nin kamu kabulünü anlamak: Geleceğimiz için ne ifade ediyor?. *Wray Castle*. 21 Mayıs 2025 tarihinde <https://wraycastle.com/tr/blogs/bilgi-tabani/ccs-kamu-kabul> adresinden erişildi.
- CBO. (2023). Amerika Birleşik Devletleri'nde Karbon Yakalama ve Depolama. 23 Mayıs 2025 tarihinde <https://www.cbo.gov> adresinden erişildi.
- Çiçin, İ., Öksüz, E., Karadurmuş, N. ve Malhan, S. (2018). Türkiye'de Akciğer Kanseri Raporu. *Medikal Akademi Yayınları*. 25 Mart 2025 tarihinde <https://www.medikalakademi.com.tr/wp-content/uploads/2018/11/turkiye-akciger-kanseri-raporu.pdf> adresinden erişildi.
- ÇİD. (2022). Türkiye'de Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojileri: Mevcut Durum ve Değerlendirme Raporu. Ankara: *Çevre ve İklim Derneği Yayınları*.
- Dincer, İ. ve Acar, C. (2015). Daha iyi sürdürülebilirlik için hidrojen üretim yöntemlerinin gözden geçirilmesi ve değerlendirilmesi. *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi*, 40(34), 11096–11111.
- Dixon, R. (2007). Hidrojen enerji ekonomisine doğru ilerleme: Durum, fırsatlar ve engeller. *Küresel Değişim için Azaltım ve Uyum Stratejileri Dergisi*, 12(3), 325–341.
- Doğan, M., Ertemel, F., ve Yılmaz, E. (2023). Türkiye'de CCS Projelerinin Ekonomik ve Çevresel Etkileri: Batman Rafinerisi ve Kurtalan Çimento Fabrikası Örneği. *MTA Bülteni*, 165(1), 45–62.
- EC. (2009). Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide. 18 Nisan 2025 tarihinde <https://eur-lex.europa.eu> adresinden erişildi.
- EC. (2020). Horizon 2020 and Horizon Europe Programs. 23 Nisan 2025 tarihinde <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/> adresinden erişildi.
- ECO-BASE. (2020). Deliverable D4.2: Decision Support Framework and Site Selection Criteria for CO₂ Storage in South-East Europe. *ECO-BASE Project Report, Horizon 2020*. 28 Nisan 2025 tarihinde <http://pete.metu.edu.tr/en/eco-base-project> adresinden erişildi.

- EEA. (2023). EU climate policy and the role of CCS in achieving net-zero targets. 10 Haziran 2025 tarihinde <https://www.eea.europa.eu/tr/help/sikca-sorulan-sorular/ab-iklim-degisikligine-nasil-yaklasiyor> adresinden erişildi.
- ECKA Enerji. (2025). Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama. 11 Haziran 2025 tarihinde <https://www.ecka.com.tr/ekler/karbon-yakalama-ve-depolama-1654758940.pdf> adresinden erişildi.
- Emsley, J. (2011). *Nature's Building Blocks: An A–Z Guide to the Elements (2. baskı)*. Oxford University Press.
- ER. (2025). Karbonsuzlaştırmada Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) Teknolojilerinin Rolü. 14 Mart 2025 tarihinde <https://enerjirehberi.com.tr/2025/05/20/karbonsuzlastirmada-karbon-yakalama-ve-depolama-ccs-teknolojilerinin-rolu/> adresinden erişildi.
- EnviCo. (2025). Uluslararası Karbon Ayırma ve Depolama Protokolleri (KYD). 10 Şubat 2025 tarihinde <https://envico.com.tr/uluslararasi-karbon-ayirma-ve-depolama-protokolleri-ccs/> adresinden erişildi.
- ET. (2024a). Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) Nedir? Erişim Adresi: <https://energytheory.com/tr/karbon-yakalama-ve-depolama-ccs-nedir/>
- ET. (2024b). Hidrojen Enerjisi: Avantajları ve Dezavantajları. 13 Mayıs 2025 tarihinde <https://energytheory.com/tr/hidrojen-enerjisinin-avantajlar%C4%B1-ve-dezavantajlar%C4%B1/> adresinden erişildi.
- Ertan, İ. (2022). Küresel ısınma ve sanayi devrimi. *İklim Değişikliği ve Çevre Araştırmaları Dergisi*, 15(3), 45–67.
- Ertemel, F., Yılmaz, E., ve Kılıç, M. (2023). Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojileri: Mevcut Durum, Uygulamalar ve Türkiye İçin Potansiyel. *TSKB Bilgilendirme Notu*. 17 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/bilgi-notu-ccs-kyd-teknolojileri-final.pdf> adresinden erişildi.
- ETC. (2021). Enerji dönüşümünde karbon yakalama, kullanma ve depolama. *Enerji Dönüşüm Komisyonu*. 8 Nisan 2025 tarihinde https://rec.org.tr/projearsivi/kykd/kykd_dunya/ adresinden erişildi.
- ETKB. (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı. Ankara: *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yayınları*.
- EÜAŞ. (2022). Türkiye Enerji ve Üretim Sektörleri Raporu. Ankara: *EÜAŞ Yayınları*.

- Fasihi, M., Efimova, O., ve Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Felseghi, R., ve Carcadea, E. (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications. *Energies*, 12, 4593. <https://doi.org/10.3390/en12234593>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O’Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., ve Zaehle, S. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340.
- Holloway, S., ve Rochelle, C. (2015). Carbon Capture and Storage. In M. Bickle (Ed.), Geological Storage of Carbon Dioxide (pp. 1–35). *Cambridge University Press*. Erişim adresi: <https://www.cambridge.org/core/books/geological-storage-of-carbon-dioxide/carbon-capture-and-storage/10.1017/CBO9781139023111.002>
- GCCSI. (2018). Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage. *Melbourne: Global CCS Institute*.
- GCCSI. (2020). The Global Status of CCS 2020: CCS Deployment Continues to Grow. *Melbourne: Global CCS Institute*. 4 Nisan 2025 tarihinde <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-of-ccs-2020> adresinden erişildi.
- GCCSI. (2021). CAPROCK Systems for CO₂ Geological Storage. *Melbourne: Global CCS Institute*.
- GCCSI. (2022a). Global Status of CCS Report 2022. *Melbourne: Global CCS Institute*.
- GCCSI. (2022b). Küresel Durum Raporu 2024 . s.57–58. Erişim tarihi: 19 Ekim 2024.
- GCCSI. (2023a). The role of carbon pricing in enabling CCS deployment. 13 Mart 2025 tarihinde <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications/the-role-of-carbon-pricing-in-enabling-ccs-deployment/> adresinden erişildi.
- GCCSI. (2023b). Bioenergy and Direct Air Capture with CCS: Pathways to Negative Emissions. 6 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications/bioenergy-and-direct-air-capture-with-ccs-pathways-to-negative-emissions/> adresinden erişildi.
- GCCSI. (2023c). Global Status of CCS Report 2023. *Global CCS Institute*. 10 Temmuz 2025 tarihinde <https://status23.globalccsinstitute.com/> adresinden erişildi.

- GCCSI. (2024). The Global Status of CCS Report 2024. *Global CCS Institute*. 3 Temmuz 2025 tarihinde <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> adresinden erişildi.
- GECO. (2023). Horizon 2020 Jeotermal Emisyon Kontrolü Projesi Sonuçları.
- Gerstner, G. J. ve Kunze, M. (1989). Results of the “light pill” action. *Gynäkologische Rundschau*, 29(2), 469-471.
- Gough, C., ve Upham, P. (2011). Biomass Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS or Bio-CCS). *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 1(4), 324–334.
- Gürel B., İpek O., (2019). 330 MWth Çan Dolaşımli Akışkan Yataklı Termik Santral Kazanının Hesaplamalı Partikül Akışkanlar Dinamiği Metoduyla Sayısal Analizi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 441-451.
- Howarth, R. W., ve Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, 9(10), 1676–1687.
- IEA. (2015). Storing CO₂ through Enhanced Oil Recovery. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/storing-co2-through-enhanced-oil-recovery>
- IEA. (2019). Emisyonlardan Değer Yaratmak: CO₂ Kullanımı. *Paris: IEA*. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>
- IEA. (2020a). Temiz Enerji Geçişlerinde CCUS. *Paris: IEA*.
- IEA. (2020b). CCUS in Clean Energy Transitions. *International Energy Agency*. 10 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions> adresinden erişildi.
- IEA. (2021a). CCS and Its Role in Climate Mitigation. 10 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-and-storage> adresinden erişildi.
- IEA. (2021b). The World Has Vast Capacity to Store CO₂ : Net Zero Means We’ll Need It. *Paris: IEA*. 10 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vastcapacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it> adresinden erişildi.
- IEA. (2022). Energy Technology Perspectives – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage: *CCUS in Clean Energy Transitions*.
- IEA. (2023). CCUS. IEA. 10 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.iea.org/reports/ccus> adresinden erişildi.
- IEAGHG. (2020). The Potential for CCS and CCU in Europe. IEA.
- İDB. (2023). Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporu – 2023. 13 Aralık 2024 tarihinde <https://iklim.gov.tr/ulusal-sera-gazi-envanteri-2023> adresinden erişildi.

- IMF. (2019). Global Fossil Fuel Subsidies Remain Large: An Update Based on Country-Level Estimates. 14 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2019/05/02/Global-Fossil-Fuel-Subsidies-Remain-Large-An-Update-Based-on-Country-Level-Estimates-46509> adresinden erişildi.
- IPCC. (2001). Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. Cambridge, USA.
- IPCC. (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. *Cambridge University Press*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, ss.442.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 15 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> adresinden erişildi.
- Kannah, R., Kavitha, S., Karthikeyan, O., Kumar, G., Vo, N., Dai-Viet, J., ...Vo, D.-V. (2021). Techno-economic assessment of various hydrogen production methods – A review. *Bioresource Technology*, 319, 124175. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124175>
- Karaca, C. (2021). Türkiye’de fosil yakıtların neden olduğu dışsal maliyetlerin analizi. 14th International Congress on Social Studies with Recent Researches, ss. 1. Antalya, Türkiye.
- Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., ve Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573–1594.
- Kheirinek, M., Ahmed, S. ve Rahmanian, N. (2021). Comparative techno-economic analysis of carbon capture processes: Pre-combustion, post-combustion, and oxy-fuel combustion operations. *Sustainability*, 13(24), 13567. <https://doi.org/10.3390/su132413567>
- Koç, A. ve Kaynak, M. (2023). Sınırdaki karbon düzenlemesi ve seçilmiş sektörlerde Türkiye’nin küresel rekabetçiliği. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 9(2), 45–68.

- Lindsey, R. (2020). Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. 9 Eylül 2025 tarihinde <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> adresinden erişildi.
- MAPEG. (2023). Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporu.
- Megia, P. J., Vizcaíno, A., Calles, J. ve Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: From fossil fuels toward renewable sources – A mini review. *Energy and Fuels*, 35, 20, 16403- 16415.
- Merey, Ş. (2023). Current status of Türkiye about carbon capture and sequestration: A case study related to carbon capture and sequestration in the Batı Raman heavy oilfield of Türkiye. *ResearchGate*. 18 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.researchgate.net/publication/374264103> adresinden erişildi.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M. ve Meyer, L. (2005). Carbon dioxide capture and storage: IPCC özel raporu. *Cambridge: Cambridge University Press*. 23 Ağustos 2025 tarihinde <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/> adresinden erişildi.
- Nielsen, J., JA, Stavrianakis, K. ve Morrison, Z. (2022). Public Perception of CCS Technologies. *Journal of Environmental Management*, 260, 110-120.
- Okandan, E., Aydın, A., ve Yıldız, T. (2011). Türkiye’de CO₂ Depolama Potansiyelinin Belirlenmesi: Dodan Sahası Örneği. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Teknik Raporu*. 2 Temmuz 2025 tarihinde https://bulten.mta.gov.tr/dosyalar/makaleler/635/tr_20240726194413_635_3_08b2c4eb.pdf adresinden erişildi.
- Paris Anlaşması. (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change. 10 Haziran 2025 tarihinde <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> adresinden erişildi.
- Saha, Priyanka, Faysal A., Akasha, Shaik M., Shovona, and Minhaj U., Monira (2023). Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy. *International Journal of Green Energy*, 21(6), 1383-1397. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2244583>
- Ritchie ve Roser (2020). CO₂ emissions Published online at OurWorldinData.org. 28 Haziran 2025 tarihinde <https://ourworldindata.org/co2-emissions> adresinden erişildi.
- RE. (2022). Carbon capture and storage service spending to total more than \$50 billion globally by 2025. 5 Mayıs 2025 tarihinde <https://worldoil.com/> adresinden erişildi.

- Realmonde, G., Daggash, H. A., Vaughan, N. E., Curry, C. L., Krause, A., ve Smith, S. M. (2019). An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. *Nature Communications*, 10(1), 3277.
- RECT. (2024). Türkiye'nin Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Potansiyeli Raporu. 27 Nisan 2025 tarihinde https://rec.org.tr/wp-content/uploads/2024/03/KYKD_Rapor.pdf adresinden erişildi.
- Rubin, E. S., Davison, J. E., ve Herzog, H. J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 378–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.04.011>
- Sayman, R. Ü., Sinayuç, Ç., ve Korkmaz, E. (2024). Türkiye'nin Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Potansiyeli Raporu (ss. 1-102) [*Araştırma*]. 10 Ağustos 2025 tarihinde https://rec.org.tr/2024/03/19/kykd_rapor/ adresinden erişildi.
- Smith, A., (2023). Environmental Communication and CCS Acceptance. *Environmental Science & Policy*, 150, 60-72.
- Smith, R., Jones, M., ve Lee, H. (2021). Implementing Carbon Capture and Storage Technologies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(3), 321-345.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... Miller, H. L. (Eds.). (2008). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. 10 Ekim 2025 tarihinde <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> adresinden erişildi.
- SWZ Maritime. (2021). Approval in principle for 40,000-m³ liquefied CO₂ carrier design. *Swz Maritime*. 4 Ekim 2025 tarihinde <https://swzmaritime.nl/news/2021/09/23/approval-in-principle-for-40000-m3-liquefied-co2-carrier-design/> adresinden erişildi.
- Şahin, B. (2008). Batı Raman sahasında CO₂ enjeksiyonu ve gelişmiş petrol kurtarma uygulamaları üzerine değerlendirmeler. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Dergisi*, 20(1), 15-28.
- Şenaktaş, B. (2005). Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (AAT 238114)
- TCÇŞİDB. (2024). İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024–2030). 4 Ekim 2025 tarihinde

- <https://bing.com/search?q=enerji+verimliliği+iklim+değişikliği+karbon+emisyonu+azaltma+stratejileri> adresinden erişildi.
- TENMAK. (2023). Karbon yakalama teknolojileri çağrısı: Ar-Ge projelerine destek programı. 4 Kasım 2024 tarihinde <https://www.tenmak.gov.tr/tugep> adresinden erişildi.
- TÜBİTAK. (2009). Türkiye'de karbon yakalama ve depolama (KYD) potansiyelinin belirlenmesi projesi (Proje No: 106G110)
- TÜİK. (2023). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990–2021. 5 Ekim 2025 tarihinde <https://iklim.gov.tr/tuik-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri-yayinlandi-haber-1122> adresinden erişildi.
- TÜRKÇİMENTO. (2022). Çimento sektöründe karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerinin potansiyeli. 13 Kasım 2024 tarihinde http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/ccs_teknolojileri.aspx adresinden erişildi.
- USDE. (2020). 45Q Carbon Capture Tax Credit. 15 Kasım 2025 tarihinde <https://www.energy.gov/fe/45q-carbon-capture-utilization-and-sequestration-incentive> adresinden erişildi.
- YEGM. (2009). Türkiye’de Termik Santraller ve Sanayi Tesislerinden Gelen Karbondioksit Emisyonu Envanterinin Çıkarılması ve Karbondioksitin Yeraltı Jeolojik Ortamlarda Depolanma Potansiyelinin Belirlenmesi (*TÜBİTAK KAMAG 106G110 No’lu Proje*). 12 Aralık 2024 tarihinde https://evcedyetkilendirme.enerji.gov.tr/teknoloji/ccs_son_proje.aspx adresinden erişildi.
- YEGM. (2025). Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojileri. 19 Ekim 2025 tarihinde https://evcedyetkilendirme.enerji.gov.tr/teknoloji/ccs_teknolojileri.aspx adresinden erişildi.
- Yıldırım, B., Figen, A. K., ve Karakılçık, M. (2024). Hidrojen Üretim Yöntemleri. *www.mmo.org.tr*, 87, 12.
- Wietschel, M., ve Ball, M. (2009). The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges (s. 646). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511635359>
- WC. (2025). CCS'nin Kamu Kabulünü Anlamak: Geleceğimiz İçin Ne İfade Ediyor?. 10 Ekim 2025 tarihinde <https://wraycastle.com/tr/blogs/bilgi-tabani/ccs-kamu-kabul> adresinden erişildi.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah MEMİŞ, lise öğrenimini Manisa'nın Turgutlu ilçesinde Mesleki ve Anadolu Lisesinde, lisans eğitimini 2012-2017 yılları arasında Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknolojisi Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2017-2018 yılları arasında mekanik proje çizimcisi olarak özel bir mühendislik firmasında çalıştı. 2020 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'na Tesisat Teknolojisi ve İklimlendirme Öğretmeni olarak atandı. Halen öğretmen olarak görev yapmaktadır. 2022 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansına başladı. Evli olup bir çocuk babasıdır.