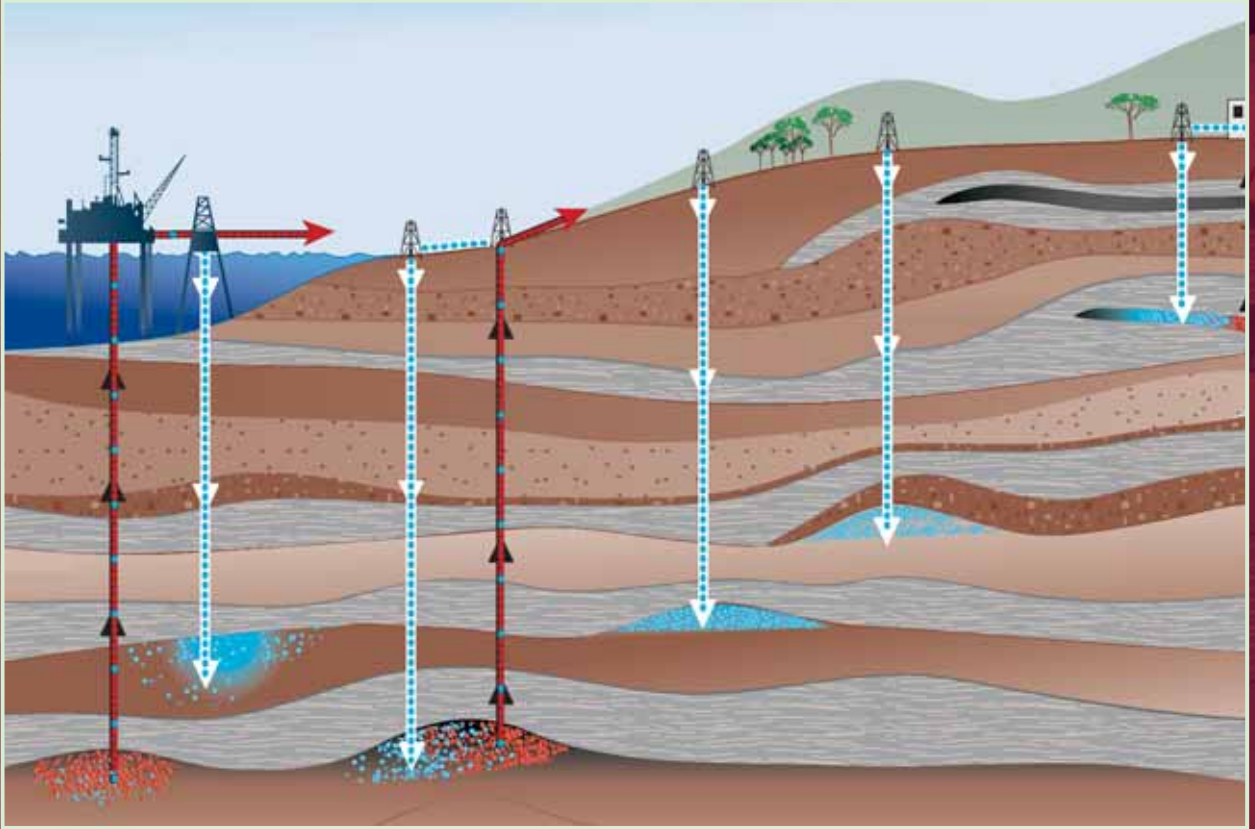


KARBONDİOKSİT TUTUM VE DEPOLAMASI

CEVİRİ :

Jeo. Muh. Ender Ragip ARSLAN

UZMANLAR İCİN ÖZET RAPOR



IPCC ÖZEL RAPORU
KARBONDİOKSİT TUTUMU VE DEPOLAMASI

UZMANLAR İÇİN ÖZET

HÜKÜMETLERARASI İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ PANELİ'NİN (IPCC) III.
ÇALIŞMA GRUBU'NA AİT ÖZEL RAPOR

Based on a draft by:

Juan Carlos Abanades (Spain), Makoto Akai (Japan), Sally Benson (United States), Ken Caldeira(United States), Heleen de Coninck (Netherlands), Peter Cook (Australia), Ogunlade Davidson(Sierra Leone), Richard Doctor (United States), James Dooley (United States), Paul Freund (United Kingdom), John Gale (United Kingdom), Wolfgang Heidug (Germany), Howard Herzog (United States),David Keith (Canada), Marco Mazzotti (Italy and Switzerland), Bert Metz (Netherlands), Leo Meyer(Netherlands), Balgis Osman-Elasha (Sudan), Andrew Palmer (United Kingdom), Riitta Pipatti (Finland),Edward Rubin (United States), Koen Smekens (Belgium), Mohammad Soltanieh (Iran), Kelly (Kailai), Thambimuthu (Australia and Canada)

CO₂ tutumu ve depolaması nedir? İklim Değişikliğini Önleme Amacına Nasıl Etki Eder?

1. *Karbondioksit tutum ve depolaması, karbondioksitin endüstriden ve enerjiye ilişkin kaynaklardan alınarak depo bölgesine taşıma ve atmosferden uzun vadede ayırma işlemini içeren bir uygulamadır. Bu rapor, KTD işlemini atmosferde sera gazının konsantrasyonunu azaltıcı yöndeki etkilerinden bahsetmektedir.*

Diğer azaltma yöntemleri enerji verimliliğinin artırılması, düşük karbon içerikli yakıtlara geçiş, nükleer enerji, yenilenebilir enerji ve karbondioksitsiz sera gazı emisyonun indirgenmesi gibi seçenekleri içerir. KTD yöntemi, maliyeti düşürücü ve sera gazı emisyonunun azalmasında esnekliği arttırıcı bir avantaja sahiptir. KTD uygulaması teknolojik matürite, maliyet, tüm potansiyel, dağıtım ve gelişmekte olan ülkelere teknoloji transferi ile teknolojiyi uygulama kapasiteleri, regülatör yönleri, çevresel sorunları ve kamu algısına dayanır(Bölüm 1.1.1, 1.3, 1.7, 8.3.3.4).

2. *III. Değerlendirme Raporu (TAR), hiçbir teknoloji seçeneğinin tek başına stabilizasyonu sağlamak için gerekli emisyon indirimlerinin tümünü başaramayacağını, yine de önlem amacıyla tedbirlerin gerektiğini belirtmektedir.*

Senaryoların çoğu, bu yüzyılın ortasına dek enerji kaynağının yine fosil yakıtlarından sağlanacağı üzerine tasarlanır. Üçüncü Değerlendirme Raporu'nda bahsedildiği gibi, eldeki teknolojik yöntemler¹ ile atmosfer duraylılığının büyük bir oranda sağlanabileceğini, ancak uygulamanın sosyo-ekonomik ve kurumsal değişikliklere ihtiyacı olduğunu belirtir(Bölüm 1.1, 1.3).

KTD Nitelikleri Nelerdir?

3. *CO₂ tutumu, büyük kaynak noktalarına uygulanabilir. Edinilen CO₂, sıkıştırılarak jeolojik formasyonlara, okyanuslara, mineral karbonatları² içerisine ya da endüstriyel işlemlerde kullanılması amacıyla taşınabilir.*

¹ "Eldeki teknolojik yöntemler", işletmelerde ya da pilot enstitü deneyinde şu an var olan teknolojik imkanları kasteder. Derin teknolojik atılımları gerektiren yeni hiçbir çalışmayı kapsamaz. Bilinen teknolojik yöntemler TAR'da ve KTD ile ilgili indirgeme senaryolarında bahsedilmiştir.

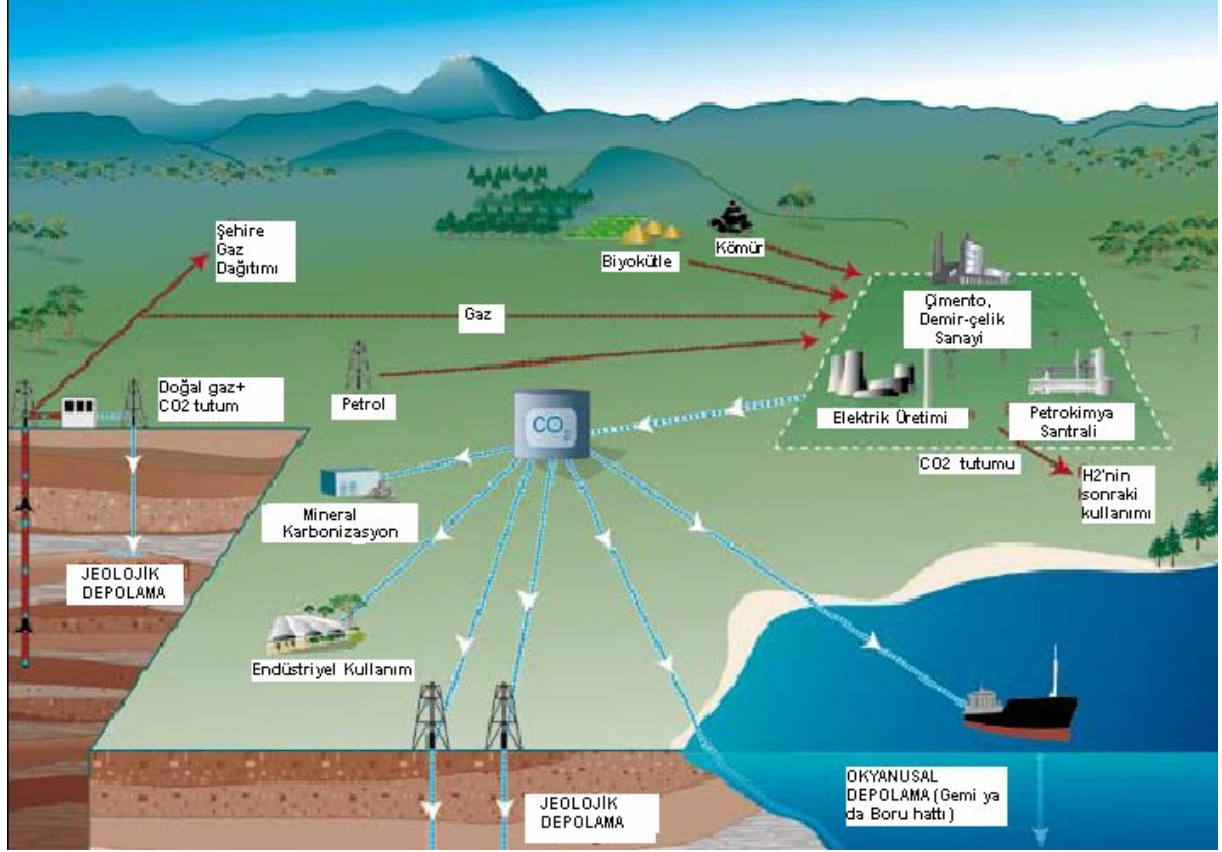
² "Mineral karbonatları"na CO₂ depolaması, derin jeolojik karbonasyon ya da 6. Bölüm'de anlatılan gelişmiş karbonat nötrilizasyonu ile okyanusal depolamayı içermez(Bölüm 7.2).

Büyük ölçekte CO₂ kaynakları fosil yakıtları ya da biyokütle enerji işlemleri, yüksek CO₂ salımlı endüstriler, doğal gaz üretimi, sentetik yakıt enstitüleri ve fosil yakıt bazlı hidrojen üretim işletmelerini kapsar. Muhtemel teknik depolama metotları: jeolojik depolama (petrol ve gaz arazileri ile işletilmeyen kömür yatakları ve derin tuz formasyonları³ gibi jeolojik formasyonlar), okyanusal depolama (okyanusta su sütununa ya da derin deniz zeminine direkt olarak bırakma) ve karbondioksitin inorganik karbonatlar içerisinde işleyimsel yerleşimi. Rapor, ayrıca CO₂'in endüstriyel kullanımını içermekte, ancak bunun CO₂ emisyonu indirgemesine fazla katkıda bulunmayacağını belirtmektedir(Bölüm 1.2, 1.4, Tablo 2.3).

Tablo U1. Dünya genelinde yılda 0.1 milyon tondan fazla emisyonunda sabit CO₂ kaynakları üretim ya da endüstriyel kullanım profili

İŞLEM	KAYNAK SAYISI	EMİSYONLAR
Fosil Yakıtlar		
Elektrik	4,942	10,539
Çimento Üretimi	1,175	932
Rafineriler	638	798
Çelik-Demir Sektörü	269	646
Petrol ve Gaz Üretimi	-----	50
Diğer Kaynaklar	90	33
Biyokütle		
Biyoetanol ve Biyoenerji	303	91
Toplam	7,887	13,466

³ “Tuz formasyonları”, yüksek konsantrasyonlu çözünmüş tuz içeren formasyon suyu ile doymuş sedimanter kayalardır. Yaygın olarak bulunurlar ve tarım ya da kullanım için uygun olmayan yüksek miktarda su içerirler. Jeotermal enerjideki olası artış, muhtemel jeotermal arazilerini CO₂ depolaması için uygun kılmamaktadır(Bkn. Bölüm 5.3.3).



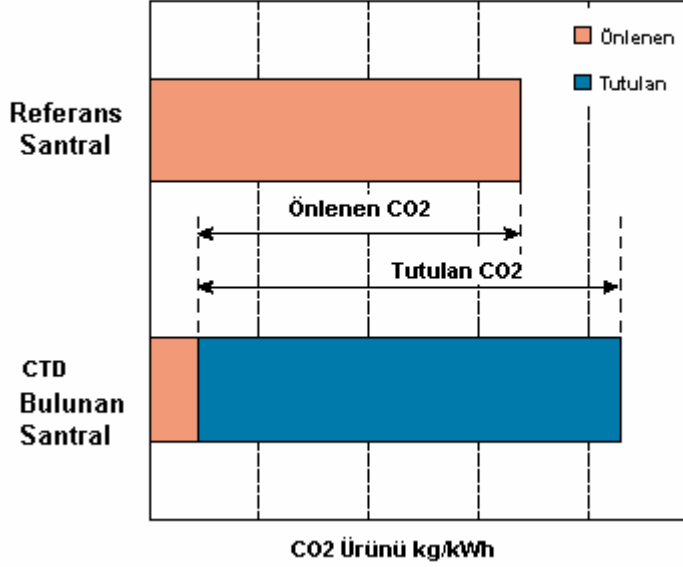
Şekil U1. KTD'nin ilişkili olduğu kaynaklar, karbondioksit nakli ve depolama seçeneklerini gösteren muhtemel KTD sistemlerinin şematik diyagramı

4. KTD boyunca atmosferdeki emisyon azalımı, tutulan CO_2 fraksiyonuna, elektrik(güç) santrallerinin toplam verimindeki kaybı ya da tutumuna, taşıma ve depolama ile taşıma esnasında olası sızıntı için gereken ek enerjiden dolayı endüstriyel işlemlerden kaynaklanan CO_2 salınımına ve uzun vadede depoda tutulan CO_2 fraksiyonuna bağlıdır.

Mevcut teknoloji, bir tutum tesisine tabi tutulan karbondioksitin yaklaşık %85-95'ini haczeder. KTD sistemiyle (jeolojik veya okyanusal depo erişimli) donatılmış bir elektrik santrali, KTD sistemi bulundurmeyen aynı tesisten yaklaşık %10-40⁴ daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar. Güvenli bir depolama ile KTD sistemli bir elektrik santrali KTD bulundurmeyen bir tesisle karşılaştırıldığında atmosfere salınan karbondioksitte ortalama

⁴ Oran aralığı, üç farklı elektrik santraline bağlı olarak değişir: Doğal gaz kombine çevrim santralleri için oran %11-22, pulverize kömür santralleri için %24-40 ve gazlaştırma üniteli kombine çevrim santralleri için %14-25 arasındadır.

%80-90 emisyon azalmasına neden olur(Bkn. Şekil U2). Bir depo rezervinde olabilecek sızıntının yayılımı, belirli bir zaman aralığında muhafaza edilen CO₂ enjeksiyonun “kümülatif miktar fraksiyonu” olarak tanımlanmıştır. Mineral karbonatlarına depolama sistemleri, KTD bulundurmayan eşdeğer bir tesisten %60-180 daha fazla enerji gerektirecektir(Bölüm 1.5.1, 1.6.3, 3.6.1.3, 7.2.7).



Şekil U2. Elektrik santrallerinden karbondioksit tutum ve depolaması. Tutum, nakil ve depolama için gerekli olan ek enerjiye bağlı olarak elektrik santrallerinin tüm verimindeki kayıptan kaynaklanan karbondioksitin artan üretimi ve nakil sırasında olabilecek sızıntı sonucu, tutum bulundurmayan referans santrale göre daha fazla oranlarda CO₂/birim ürün elde edilecektir(Şekil 8.2).

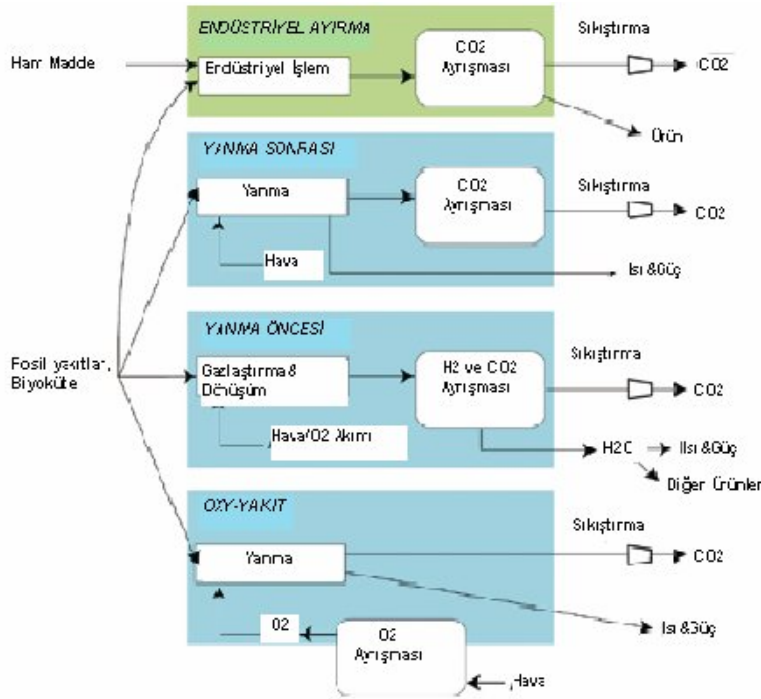
KTD Teknolojisinin Bugünkü Durumu Nedir?

5. Farklı tipte CO₂ tutma sistemleri mevcuttur: *post-combustion*(yakma sonrası), *pre-combustion*(Yakma öncesi) ve *oxy fuel combustion*(oxy yakıt yakma). Gaz akımındaki CO₂ konsantrasyonu, gaz akımının basıncı ve yakıt türü(katı veya gaz), tutma sistemlerinin seçilmesinde etkili birkaç faktördür.

Santrallerdeki *post-combustion*(yakma sonrası) CO₂ tutumu, özel koşullar altında ekonomik olarak uygundur⁵. Bu yöntem, bir dizi elektrik santrallerinin baca gazlarından

⁵ “Özel koşullarda ekonomik olarak uygunluk” ile, iyi anlaşılabilir ve teşvik edici vergi sisteminde veya az bir teknoloji replikasyonları ile (5’ten az) küçük piyasalarda seçili ticari uygulamalarda kullanılan teknoloji kastedilir.

edinilen CO₂ tutumu için kullanılışdır. Doğal gaz işletme endüstrisinde CO₂ ayrışımı, benzer teknolojinin kullanıldığı gelişmiş pazarda⁶ gerçekleştirilir. Pre-combustion(yakma sonrası) yöntemi için gerekli teknoloji, gübre ve hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Pre-combustion (yakma öncesi) yönteminin ilk dönüşüm basamakları, daha ayrıntılı ve masraflı olmasına rağmen, gaz akımında daha yüksek CO₂ konsantrasyonu ve yüksek basınç, ayrışmayı kolaylaştırır. Oxy-yakıt yakma, deneme fazındadır⁷ ve yüksek saf oksijen kullanılır. Bu da gaz akımında yüksek CO₂ konsantrasyonuna ve dolayısıyla, daha kolay CO₂ ayrışımı ve oksijenin havadan ayrılmasında daha fazla enerji gereksinimine yol açar(Bölüm 3.3, 3.4, 3.5).



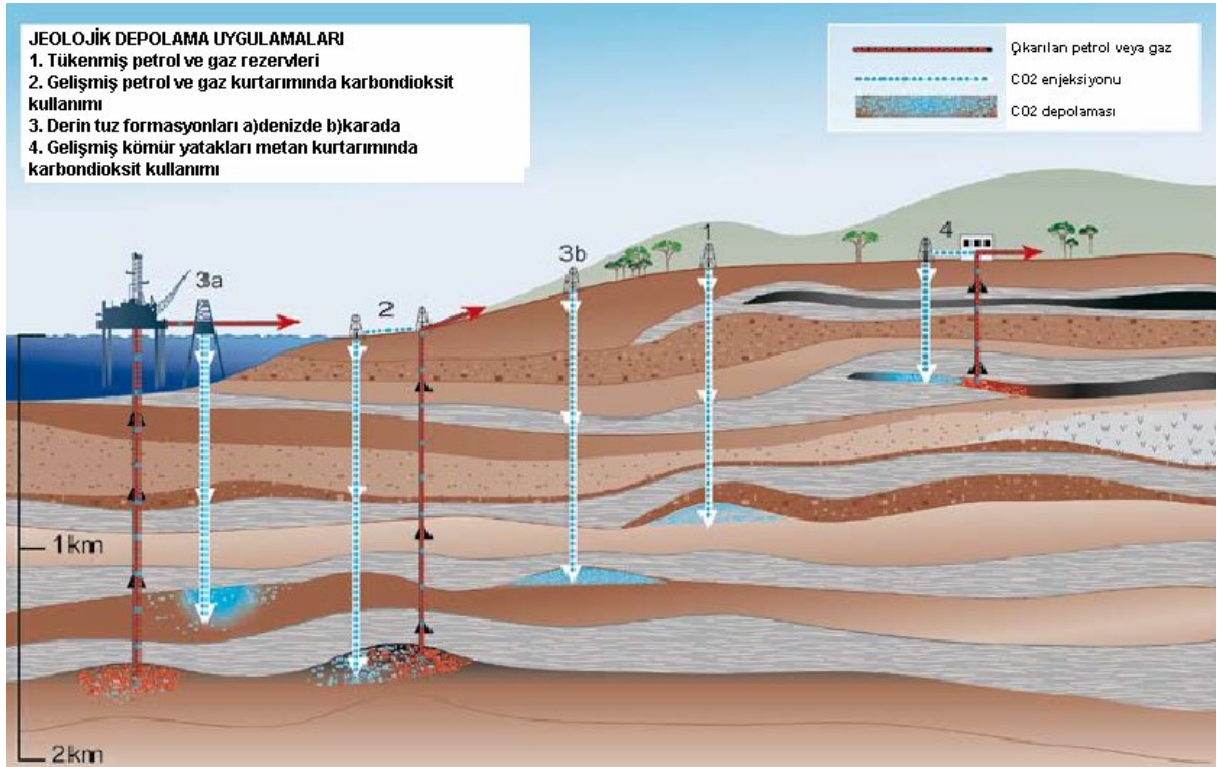
Şekil U3. Tutum sisteminin şematik gösterimi.

6. Büyük miktarlardaki CO₂'nin 1,000 km'ye kadar uzaklıklara taşınmasında boru hatları tercih edilmektedir. Yıllık birkaç milyon tondan daha az miktarlardaki CO₂ için ya da deniz aşırı daha uzak mesafeler için, uygun olan yerlerde gemilerin kullanılması, ekonomik olarak daha cazip olacaktır.

⁶”Gelişmiş pazar”, dünya çapında ticari ölçekli teknoloji toplu replikasyonları ile faaliyetteki teknoloji kastedilir.

⁷”Deneme fazı”, teknolojinin kurulup örnek platformda yürütüldüğü ancak büyük ölçekli bir sistemin tasarımı ve inşaatı için daha fazla gelişimin gerektiği evredir.

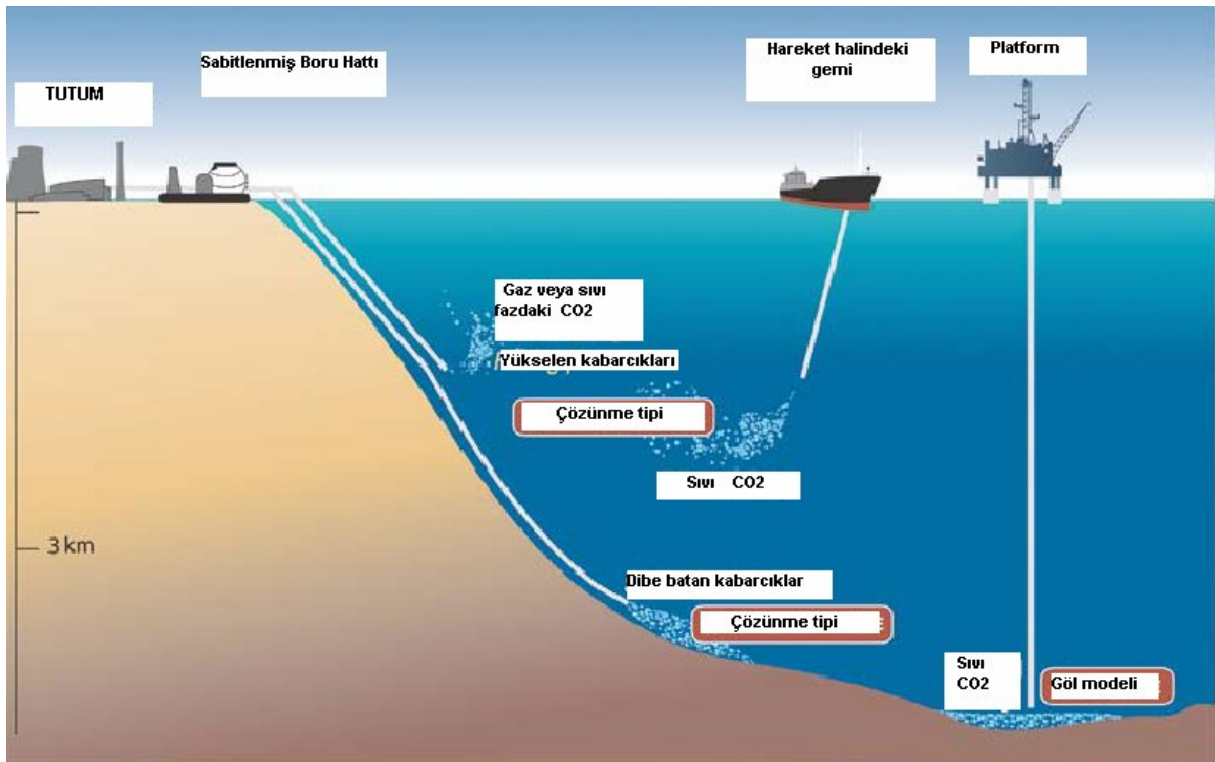
CO₂'in boru hattı transferi, gelişmiş pazar teknolojisi olarak işlenmektedir. Çoğu boru hatlarında kompresörler, akımın geldiği istikamet tersine bir akımı durdurmaktadır. Ancak bazı hatlar, ara kompresör istasyonlarına gereksinim duyar. Kuru CO₂, kirletici madde içerse bile boruları aşındırmaz. CO₂ nem içerdiği takdirde akımdan kaldırılarak aşınma engellenir ve boruların korezyon rezistan materyali onarım masraflarından kaçınılmış olur. Sıvılaştırılmış petrol gazlarının taşınmasına benzer şekilde CO₂ deniz taşımacılığı, özel koşullar altında ekonomik olarak uygundur ancak bugün isteğe bağlı olarak çok küçük oranda yapılmaktadır. CO₂ ayrıca ray ve yol tankerleri ile de taşınabilir ancak bununla büyük ölçekte CO₂ taşımacılığının etkili bir yöntem olması, olasılık dışıdır (Bölüm 4.2.1, 4.2.2, 4.3.2, Şekil 4.5, 4.6).



Şekil U4. Jeolojik depolama seçeneklerine genel bir bakış

7. Derinde, kıyıda ya da açıktaki jeolojik formasyonlarda CO₂ depolamasında, petrol ve gaz endüstrisinde geliştirilip petrol, gaz ve tuz formasyonları için ekonomik uygunluğu ispatlanmış birçok teknoloji türü kullanılır. Ancak henüz işletilmeyen kömür yataklarındaki⁸ depolama için yeterli seviyede değildir.

Eğer CO₂, 800 m derinliğin⁹ altında uygun tuz formasyonları ya da petrol veya gaz arazilerine enjekte ediliyorsa, çeşitli fiziksel ve jeokimyasal kapan mekanizmaları ile tekrar yeryüzüne çıkması engellenebilir. Genellikle, gerekli fiziksel kapan mekanizması örtü kayasıdır¹⁰. Kömür yataklarında depolama daha sığ derinliklerde yer alabilir ve kömür üzerinde CO₂ adsorpsiyonuna bağlıdır. Ancak teknik uygunluğu büyük oranda kömür yatağının permeabilitesine bağlıdır. Gelişmiş Petrol Kurtarımı(Enhanced Oil Recovery-EOR¹¹) ya da potansiyel olarak Gelişmiş Kömür Yatağı Metan Kurtarımı (Enhanced Coal Bed Methane Recovery-ECBM) ile farklı CO₂ depolama kombinasyonları, petrol ve gaz kurtarımından ek gelir edinmeye yönlendirebilir. Petrol sondajı teknolojisi, enjeksiyon teknolojisi, depolama haznesi performansının bilgisayar simülasyonu ve mevcut uygulamalardan metotlarının monitörlenmesi, jeolojik depolama projelerinin yürütülmesi ve tasarımda kullanımı için daha da geliştirilmiştir.



Şekil U5. Okyanusal depolama kavramına genel bir bakış. Çözünme modelinde karbondioksit, hızla deniz suyu içerisinde çözünürken, göl modelinde karbondioksit deniz tabanında bir göl oluşturur.

⁸ Bir kömür yatağı, derinliğinden veya çok ince olmasından dolayı işletilemiyor olabilir. Dolayısıyla potansiyel olarak CO₂ depolaması için kullanılabilir. Eğer depolamadan sonra yatak işletilirse, depolanan karbondioksit açığa çıkar. Gelişmiş Kömür Yatağı Metan Kurtarımı(ECBM), karbondioksit depolaması sırasında kömürlerden üretilen metanı potansiyel olarak arttırabilir. Üretilen metan da kullanılarak atmosfere bırakılması önlenecektir(Bölüm 5.3.4)

⁹ 800-1,000 m derinliklerde karbondioksit, süperkritik faza ulaşarak sıvı-benzeri bir durum (yaklaşık 500-800 kg/m³) alır. Böylece yer altında depo boşluklarının verimli bir şekilde kullanılması ve depolama güvenliğinin artırılması sağlanmış olur.

¹⁰ Çok düşük geçirgenlikteki kayalar, örtü birimini oluşturur ve akışkanın haznedenden dışarı kaçmasını önler(Bölüm 5.1.1).

¹¹ EOR, bu raporun amacı doğrultusunda karbondioksit kullanılan Gelişmiş Petrol Kurtarımını ifade eder.

Faaliyetteki üç endüstriyel ölçekli¹² depolama projeleri: Norveç'te denizden açıkta tuz formasyonundaki Sleipner projesi, Kanada'da Weyburn EOR projesi ve Cezayir'de bir gaz bölgesinde In Salah projesi. Diğerleri planlanmaktadır(Bölüm 5.1.1, 5.2.2, 5.3, 5.6, 5.9.4, Açıklama 5.1, 5.2, 5.3).

8. Okyanusal depolama, potansiyel olarak iki yolla yapılabilir: Sabit bir boru hattı ya da hareket halindeki bir gemiden CO₂'in su sütunu içerisine(tipik olarak 1,000 m altında) enjeksiyonu ve çözündürülmesi ile ya da bir boru hattı veya kıydan açıkta bir platformdan, sudan daha yoğun olduğu ve yakın çevresinde erimesini geciktirecek bir "göl" modeli oluşturması beklenen 3,000 m altındaki derinliklerde deniz zemini üzerine bırakılması. Okyanusal depolama ve bunun ekolojik etkileri halen araştırma fazındadır¹³.

Çözünmüş ve dağıtılmış CO₂, global karbon döngüsünün bir parçası haline gelebilir ve nihayet atmosferde denge sağlanabilir. Laboratuvar deneylerinde, küçük çaplı okyanus deneyleri ve model simülasyonları, ortak fiziksel ve kimyasal fenomenla ile teknolojileri asitlik derecesinde (düşük pH) önemli bir artışı gösterse de, okyanusal depolama yöntemleri, deniz ekosistemleri üzerindeki etkisi ile birlikte çalışılmaktadır.

9. CO₂'nin kirli akıntılarda küçük miktarda ve silikat minerallerinde bolca bulunan metal oksitlerle reaksiyonu sonucu kararlı karbonatlar oluşur. Bugünkü geliştirme evresindeki teknoloji ile ancak kirli akıntılarda uygulanan güvenilir yöntemler deney fazındadırlar.

10. Kimyasal işlemlerde gaz, sıvı yada bir beslenme deposu olarak tutulan CO₂'nin endüstriyel kullanımları¹⁴ ile değerli karbon içerikli ürünler elde edilmesi mümkündür. Ancak CO₂ emisyonlarının oranlarında önemli bir azalmaya katkıda bulunması beklenemez.

¹² "Endüstriyel ölçek", burada 1 MtCO₂/yıl olarak ifade edilmiştir.

¹³ "Araştırma fazı", bilimin anlaşıldığı, teknolojinin genel olarak konseptual tasarıda ele alındığı veya laboratuvarında denendiği ve henüz pilot tesislerde kullanılmadığı aşamadır.

¹⁴ Karbondioksitin endüstriyel kullanımları, EOR(Gelişmiş Petrol Kurtarımı)'nı içermeyen kullanımlarını kapsar.

CO₂ in genellikle kısa periyotlar için tutulduğunda (ay veya yıl) endüstriyel kullanımlarındaki potansiyeli azdır. Tekrar CO₂ nin fosil hidrokarbonlar yerine beslenme stoğu olarak tutulduğu işlemler her zaman yaşam döngüsü emisyonların indirgenmesinde başarı sağlayamaz(Bölüm 7.3.1, 7.3.4).

11. KTD elemanları , çeşitli geliştirme evrelerindedir. Tüm KTD sistemleri, matür ya da özel koşullar altında ekonomik olarak uygun bugünkü teknolojilerden oluşturulabilir. Ancak tüm sistemin gelişim durumu, ayrı ayrı parçalarından daha düşük olabilir.

Tutulmuş CO₂'nin birleştirilmesi, taşınması ve entegre KTD sistemlerine depolanmasına ilişkin az bir deneyim vardır.

CO₂ kaynakları ve depolama seçenekleri arasındaki coğrafi ilişki nedir?

12. CO₂'in büyük seviyedeki kaynakları, endüstriyel ve kentsel bölgelere yakın mevkilerde düşünülür. 300 km'lik arazilerdeki gibi kaynaklar, formasyonları potansiyel olarak jeolojik depolama için uygun kılar. İlk araştırma sonuçları, küresel olarak büyük seviyedeki CO₂ kaynaklarının az bir oranda muhtemel okyanus depolama sahalarına yakın olduğunu göstermektedir.

KTD ELEMANI	KTD TEKNOLOJİSİ	Araştırma Evresi	Deneme Evresi	Özel koşullarda Ekonomik uygunluğu	Gelişmiş Pazar
Tutum	Post-combustion (yanma sonrası)			X	
	Pre-combustion (yanma öncesi)			X	
	Oxyfuel combustion (oxy yakıt kullanımı)		X		X

	Endüstriyel ayrışma(doğal gaz işletimi, ammonia üretimi)				X
Taşıma	Boru hattı				X
	Gemi taşımacılığı			X	
Jeolojik Depolama	Geliştirilmiş Petrol Kullanımı (EOR)				X ^a
	Gaz veya petrol sahaları			X	
	Tuz formasyonları			X	
	Geliştirilmiş Kömür Yatağı Metan Kurtarımı (ECBM)		X		
Okyanusal depolama	Direkt enjeksiyon (çözündürme modeli)	X			
	Direkt enjeksiyon (göl modeli)	X			
Mineral karbonizasyonu	Doğal silikat mineralleri	X			
	Atık maddeleri		X		

CO ₂ in endüstri yel kullanım					X
---	--	--	--	--	---

Tablo U2. KTD sistem elemanlarının mevcut matüritesi. X işareti, her eleman için en yüksek matürite seviyesini göstermektedir. a işaretinde EOR için CO₂ enjeksiyonu, gelişmiş pazar teknolojisidir.

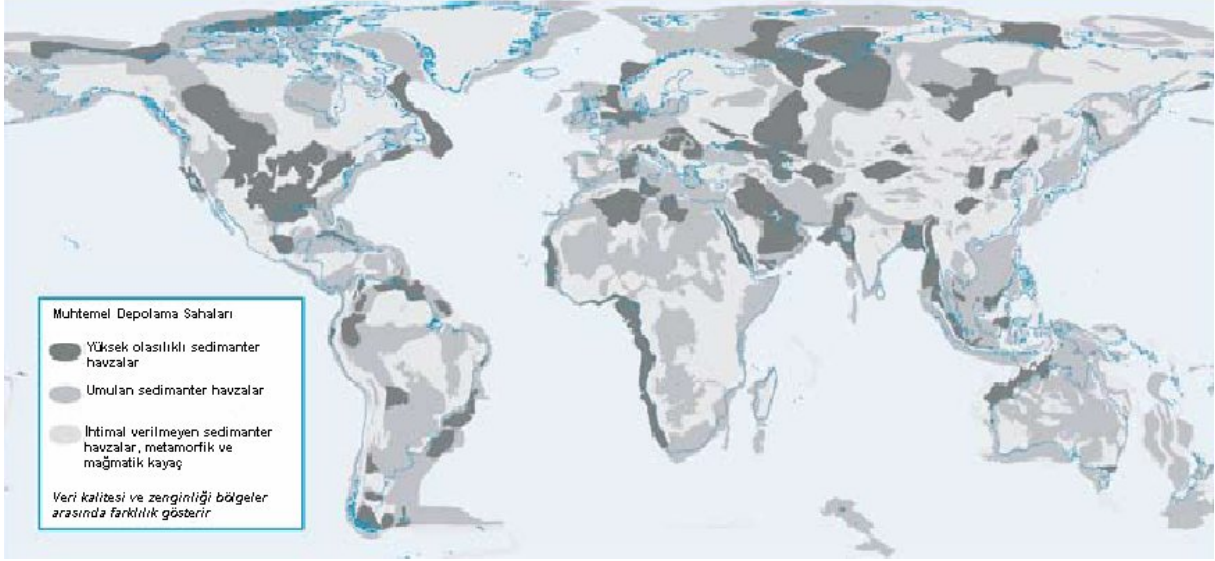
NOT: ^a Gelişmiş petrol kurtarımında karbondioksit enjeksiyonu, gelişmiş pazar teknolojisidir ancak bu teknoloji karbondioksit depolaması için kullanıldığında özel koşullarda ekonomik olarak uygundur.

Bugünkü mevcut literatüre göre, uygun jeolojik depolama formasyonları ile uygun geniş seviyedeki CO₂ kaynakları sınırlıdır. Ayrıntılı bölgesel değerlendirmeler üzerine çalışmaların artırılması gerekir.

Senaryo çalışmalarına göre, geniş seviyedeki kaynakların sayısının gelecekte artması beklenmektedir. 2050’de beklenen teknolojik sınırlamalar altında, elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonunun % 30- 60 ve bu endüstriden de %30-40 oranı ile birlikte global fosil yakıt CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 20-40 arasında, tutum için uygun olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca büyük ölçekte biyokütle dönüşüm faaliyetlerinden doğan emisyonlar tutum için teknolojik olarak uygundur. Gelecekte düşünülen geniş ölçüdeki kaynakların muhtemel depolama sahalarıyla ilişkisi üzerine henüz çalışma yapılmamıştır(Bölüm 2.3, 2.4.3).



Şekil U6. Karbondioksitin büyük durağan kaynaklarının global dağılımı(IEA GHG, 2002).



Şekil U7. Uygun tuz formasyonları, petrol veya gaz arazileri ya da kömür yataklarının bulunabileceği sedimanter havzalardaki muhtemel bölgeler.

13. KTD , uzun vadede taşımadan ve enerji tedarik sistemlerinden dağılmış CO₂ emisyon parçacıklarını azaltan fosil yakıt bazlı elektrik veya hidrojen üretiminde oluşacak CO₂ emisyonlarının kontrolünde yarar sağlar.

Araçlarda elektrik ve yakıt hücrelerinde, taşıma sektörü dahil, hidrojen kullanılabilir. CO₂ enjeksiyonu ile gaz ve kömür dönüşümleri, bugün hidrojen üretimi için muhtemel bir seçenektir. Daha fazla fosil yakıtı ya da biyokütle bazlı hidrojen veya elektrik üretimi, tutum ve depolama için teknik olarak uygun geniş CO₂ kaynakları miktarında artışa neden olacaktır. Bugün bu gibi uygun kaynakların sayısı, yeri ve ölçüsünün belirlenmesi zordur(Bölüm 2.5.1).

KTD Maliyeti¹⁵ ile Teknik ve Ekonomik Potansiyeli Nedir?

14. KTD sisteminin elektrik üretimine uygulanması, 2002 yılı koşullarında elektrik üretim maliyetini kilowatt saat başına 0.01-0.05 US dolar¹⁶ arttıracığı tahmin edilmiştir(yakıt, özel teknoloji, mevki ve ulusal durumlara bağlıdır). EOR yönteminden yararlanma dahil edilirse, KTD'e bağlı ek elektrik üretim maliyetini 0.01-0.02 US\$/kWh¹⁷ düşürecektir. Güç üretiminde kullanılan yakıt fiyatlarının piyasadaki artışı, KTD maliyetini arttıracak eğilimdedir. Petrol fiyatının KTD üzerindeki kantitatif etkisi belirsizdir. Ancak EOR geliri, yükselen petrol fiyatları ile birlikte artacaktır.

¹⁵ Bu raporda kullanıldığı üzere “maliyetler”, sadece piyasa değerlerini ifade etmekte ve KTD kullanımı ile ilişkili çevresel zararlar gibi harici maliyetleri içermemektedir.

¹⁶ Bu rapordaki tüm maliyetler, 2002 US\$ cinsinden bildirilmiştir.

¹⁷ Mevcut literatürde kullanıldığı gibi 15-20 US\$ petrol varil fiyatı üzerinden hesaplanmıştır.

Maliyet, ülkeden ülkeye mutlak ve göreceli şartlarda oldukça değişir. Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralleri, Pulverize Kömür ya da Gazlaştırma Üniteli Kombine Çevrim Santrallerinde KTD sistemlerinin henüz kurulmamış olması, bu sistemlerin güvenilir düzeyde bir maliyet hesabı yapılmasına engeldir. Gelecekte KTD maliyetleri, araştırma, teknolojik ve ekonomik gelişmeler ile daha da düşürülebilir. Ekonomik göstergeler, zamanla biyokütle bazlı KTD sistemlerinin maliyetini de aşağıya çekebilir(Bölüm 3.1.4, 3.7.5).

16. Çoğu KTD sistemlerinde tutum maliyeti (sıkıştırma dahil), en yüksek gelen maliyettir.

Bir KTD sistemi elemanlarının maliyeti, referans santrali ile büyük ölçüde CO₂ kaynağı, taşınması ve depolama durumuna bağlı olarak değişir. Bir on yıl sonrasında tutum maliyeti, bugün araştırma ve deneme döneminde olan yeni teknolojiler ile %20-30 ya da daha fazla oranlarda indirilebilir. Karbondioksit nakil ve depolama maliyeti de teknolojinin daha da ilerlemesi ve geniş ölçekte yayılması ile düşebilir(Bölüm 1.5.3, 3.7.13, 8.2).

KTD sistemli elektrik santrali	Doğal gaz kombine çevrim santrali US\$/tCO ₂ karı	Pulverize kömür dağıtım santrali US\$/tCO ₂ karı
<i>Tutum ve jeolojik depolama içeren elektrik santrali</i>		
Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali (NGCC)	40-90	20-60
Pulverize Kömür	70-270	30-70
Gazlaştırma Üniteli Kombine Çevrim Santrali	40-220	20-70
<i>Tutum ve EOR sistemli elektrik santrali</i>		
Doğal Gaz Kombine Çevrim	20-70	0-30

Santrali (NGCC)		
Pulverize Kömür	50-240	10-40
Gazlaştırma Üniteli Kombine Çevrim Santrali	20-190	0-40

KTD sistem bileşenleri	Mali değeri	Açıklamalar
Bir kömür veya gaz ocaklı Santralde CO ₂ tutumu	15-75 US\$/tCO ₂ toplam tutumu	Tutum tesisi bulundurmeyen aynı santrale oranla, tutulan CO ₂ 'nin toplam maliyeti
Hidrojen ve ammonia üretimi veya gaz işletmesinde tutum	5-55 US\$/tCO ₂ toplam tutumu	Basit kurulama ve sıkıştırma gerektiren yüksek saflıktaki kaynaklarda uygulama
Diğer endüstriyel kaynaklarda tutum	25-115 US\$/tCO ₂ toplam tutumu	Ara değerler, bir dizi farklı teknoloji ve yakıtların kullanımını yansıtır.
Taşıma	1-8 US\$/tCO ₂ nakliyesi	5 (üst sınır)-40 (alt sınır) MtCO ₂ /yıl kütle akım oranları için 250 km başına borulama yada deniz ulaşımı
Jeolojik depolama	0.5-8 US\$/tCO ₂ toplam enjeksiyonu	EOR yada ECBM muhtemel gelirleri hariç
Jeolojik depolama : monitörleme, verifikasyon	0.1-03 US\$/tCO ₂ enjeksiyonu	Enjeksiyon öncesi, enjeksiyon, enjeksiyon sonrası monitörleme dahil ve regülatör gereksinimlerine bağlıdır.
Okyanusal depolama	5-30 US\$/tCO ₂ toplam enjeksiyonu	Açık denize 100-500 km nakliyesi dahil, manitörleme ve verifikasyon dahil değil
Mineral karbonizasyon	5-100 US\$/tCO ₂ toplam mineralleştirme	Oranlar en iyi durumu gösterir. Karbonizasyon için ek enerji kullanımını kapsar

NOT: Bu rapordaki tüm maliyet hesaplamaları 2002 yılı US\$ için yapılmış, petrole dayanan maliyetler de petrol varilinin 15-20 US\$ olduğu göz önüne alınarak yapılmıştır.

17. Enerji ve ekonomik modeller, KTD sistemlerinin iklim değişikliğinin azaltılmasına yönelik temel katkısının elektrik sektöründe yaygınlaşmasından ileri geleceğini göstermektedir. Bu raporda değerlendirilen çoğu modellemeler, CO₂ fiyatlarının yaklaşık 25-30US\$/tCO₂'e ulaştığında KTD sistemlerinin önemli bir seviyede yaygınlaşmaya başlayacağını belirtmektedir.

18. Mevcut bilgiler,dünya genelinde jeolojik formasyonlarda en az 2,000GtCO₂(545 GtC) depolama kapasitesinin¹⁸ teknik potansiyeli¹⁹ olabileceğini²⁰ göstermektedir.

Tuz formasyonlarında jeolojik depolama için çok daha fazla potansiyel bulunabilir. Ancak üst sınırın bilgi eksikliği ve henüz belirlenemeyen metodolojiye bağlı olarak kesin hesabı yapılamamıştır. Petrol ve gaz rezervleri daha iyi bilinmektedir. Kömür yataklarındaki teknik depolama kapasitesi, daha az ve düşük bildirilmiştir.

Okyanuslardaki CO₂ depolama kapasitesi için model hesaplamaları, atmosferin tahmin edilen stabilizasyon seviyesi²¹ ve okyanus pH değişimi gibi çevresel kısıtlamalara bağlı olarak binlerce GtCO₂ tarzında olabileceğini göstermiştir. Kullanılan mineral karbonizasyon seviyesi bugün tam olarak belirlenemez. Teknik olarak tüketilmiş belirsiz silikat rezervi miktarına ve çıkarılan ürünün hacmine bağlı olarak değişmektedir(Bölüm 5.3, 6.3.1, 7.2.3, Tablo 5.2).

19. 450 ve 750 ppmv arasında atmosferik sera gazı konsantrasyonlarının stabilizasyonu için yapılan çoğu senaryolarda ve en düşük maliyetli önlem seçeneklerinde KTD'nin ekonomik potansiyeli²² kümülatif olarak 2,200 GtCO₂ miktarına denk olacaktır ki bu da KTD'nin 2100 yılına kadar dünya genelinde önlem çalışmalarına %15-55 katkı yapacağı anlamına gelir.

¹⁸ Bu ifade, mevcut literatürdeki yazarların uzman görüşlerine dayanmaktadır. Depolama kapasitesi hesaplamalarındaki belirsizliği yansıtmaktadır(Bölüm 5.3.7).

¹⁹ "Teknik potansiyel", TAR'da ifade edildiği üzere henüz denenmiş bir teknoloji veya uygulama ile sera gazı emisyonlarının indirgenmesi için mümkün olan miktar olarak tanımlanmıştır.

²⁰ "Olasılık", %66-90 arasını ifade eder.

²¹ Bu yaklaşım, okyanuslara karbondioksit enjeksiyonunun bir süre sonra atmosfer ile dengeye ulaşacağı görüşünü göz önüne almıştır.

²² Ekonomik potansiyel, belirli koşullar altında (örneğin, karbondioksit indirgemelerinin piyasa değeri ve diğer seçeneklerin maliyetleri) mali açıdan uygun bir şekilde sürdürülebilecek spesifik bir seçenekten sera gazı emisyonu indirgeme miktarıdır.

Bu ekonomik potansiyel hesaplamalarındaki belirsizlik önemlidir. Ekonomik potansiyel olarak KTD nin başarıya ulaşması, bu yüzyıl boyunca yüzlerden binlerceye kadar CO₂ tutum sistemlerinin kurulmasına ve bu sistemlerinin her birinin yıllık 1-5 MtCO₂ tutumuna bağlıdır. KTD nin gerçek uygulamaları, diğer indirgeme yöntemlerinde olduğu gibi, çevresel etkiler, sızıntı riski ve belirli yasaların ya da kamu benimsemesinin olmayışından kaynaklanan etkenlere bağlı olarak, ekonomik potansiyelden düşük olması muhtemeldir(Bölüm 1.4.4, 5.3.7, 8.3.1, 8.3.3, 8.3.3.4).

20. Çoğu senaryo çalışmalarında, bu yüzyıl boyunca indirgemedede KTD nin rolü artmaktadır ve indirgeme amacıyla KTD nin eklenmesi ile dengelenen CO₂ konsantrasyonları maliyeti %30 ve yukarısında bir düşüşe neden olur.

KTD sistemlerinin ekonomik rekabeti itibarı ile KTD teknolojileri, bugünkü enerji alt yapısı ile uyumaktadır.

Bu sahadaki güncel analiz düzeyi sınırlıdır. Daha fazla değerlendirmelerin yapılması, verileri geliştirmek için gereklidir(Bölüm 1.5, 8.3.3, 8.3.3.4, Açıklama 8.3).

KTD Sistemlerinin Yöredeki Sağlık, Güvenlik ve Çevresel Riskleri Nelerdir?

21. CO₂ hattı taşımacılığı ile ortaya çıkan lokal riskler²³ bugün hidrokarbon hatlarından meydana gelen tehlikelere benzer, belki de daha az risklidir.

Çoğunlukla düşük nüfus yoğunluklu alanlardaki CO₂ hatların varlığında, boruların kilometre başına yarattığı tehlikeler çok azdır ve hidrokarbon hatları ile karşılaştırılabilir. Büyük çaptaki beklenmedik CO₂ salınımı, havadaki konsantrasyonunu %7-10'dan daha yoğun duruma getirdiğinde insan hayatı ve sağlığı için ani bir tehlike yaratır. Popülasyonun bulunduğu bölgelerden geçen CO₂ taşıma hattı, yol seçimi, yüksek basınç koruması, sızıntının bulunması ve diğer etkili faktörler üzerinde dikkat gerektirir. KTD için boru hattı projesinde karşılaşılabilecek hiçbir zorluk, kesin olarak önceden kestirilemez(Bölüm 4.4.2, EkI.2.3.1).

22. Mevcut yer altı verilerine dayanarak uygun alanın seçilmesi ile, sorunları gösterecek görüntüleme programları, bir regülator sistemi ve olduğu takdirde CO₂ salınımlarının durdurulması ya da kontrolü, yöre sağlığı, güvenliği ve jeolojik depolamanın çevresel riskleri gibi durumlar, doğal gaz depolaması vb. faaliyetlerin bugünkü riskleri ile karşılaştırılabilir.

²³ Risk, bir olayın gerçekleşmesi halinde sonuçlarının ortaya çıktığı olasılık değerlendirmesi olarak ele alınmıştır.

Doğal CO₂ rezervleri, yeraltında CO₂ davranışının anlaşılmasında yardımcı olabilir. Sızıntının düşük olduğu depolama sahalarının özellikleri, geçirimsiz örtü kayaçları, sızıntı yolunun bulunmayışı ve etkili kapan mekanizmalarını içerir. Sızıntının beklendiği iki farklı kategori vardır: (1) başarı sağlanamayan enjeksiyon kuyusu ya da terkedilmiş kuyu boyunca açığa çıkan ani sızıntı ve, (2) saptanmamış fay, kırık ya da kuyular boyunca aşamalı sızıntı. Yeraltında yüzeye yakın bölgelerde CO₂ konsantrasyonlarının yükselmesi, bitkiler ve toprakaltı canlılar için öldürücü, yer altı suyu için kirletici etki yapar. Suyun yükselmesi sonucu dengeli atmosfer koşullar ile birleşmesi, havadaki CO₂ konsantrasyonunun insan ve hayvanlara zarar verecek kadar yükselmesine neden olur. CO₂ enjeksiyonu ile oluşan basınç, küçük sismik olayları tetikleyebilir.

Jeolojik depolama hakkında sınırlı bir deneyim mevcut iken, yakından ilişkili endüstriyel tecrübe ve bilimsel veriler, iyileştirme dahil isabetli risk yönetimi için bir dayanak oluşturabilir. Mevcut risk yönetimi metodlarının etkinliği, halen CO₂ depolama ile kullanımı için araştırmayı gerektirir. Depolama sahasında sızıntı oluşması halinde, sızıntıyı durdurmak için uygulanacak iyileştirme çalışmaları, standart kuyu onarım teknikleri ya da CO₂ sığ akifere sızmadan önce durdurma ve çıkarma işlemlerini kapsar. CO₂ in jeolojik depolamasına ilişkin uzun bir zaman verildiğinde, oldukça uzun periyotlarda bölgesel görüntüleme gerekli olabilir(Bölüm 5.6, 5.7, Tablo 5.4, 5.7, Şekil 5.25).

23. CO₂ in okyanusa eklenmesi ya da okyanus zemininde sıvı CO₂ havuzları oluşturulması, bölgenin kimyasal ortamını endüstriyel ölçekte değiştirecektir. Deneyler, yüksek CO₂ konsantrasyonlarının okyanus organizmalarındaki ölümleri arttıracaklarını göstermiştir. Deniz organizmaları üzerindeki CO₂ etkileri, ekosistemde öneme sahip olacaktır. Okyanusta direkt CO₂ enjeksiyonunun süregelen etkileri, okyanuslar boyunca ekosistem üzerinde ve uzun zaman diliminde henüz çalışılmamıştır.

550 ppmv CO₂'te denge için %10 indirgeme sağlayacağı okyanusal depolamanın, 7 bölgede 3000m derinlikte CO₂ bırakıldığı varsayımı üzerine yapılan model simülasyonları, okyanus hacminin yaklaşık %1 inde asitlik derecesinin artışı (pH düşüşü >0.4) ile sonuçlanmıştır. Sonuç değerlendirmesi olarak; okyanusal depolamanın olmadığı denge durumunda, pH derecesi sanayi öncesi düzeyine göre tüm okyanus yüzeyinde 0.25 derece düştüğü sanılmaktadır. 0.2den 0.4'e pH düşüşü, sanayi öncesi okyanus asitliğinin ortalamasındaki değişimlerden daha önemli bir büyüklüktedir. Bu seviyedeki pH değişimlerinde, okyanus yüzeyine yakın bölgelerde yaşayan organizmalarda bazı tesirler görülmüş, ancak uzun vadedeki etkileri üzerinde henüz çalışılmamıştır. Bu etkileri daha iyi

anlamak için, önceden yapılacak ayrıntılı bir risk değerlendirmesi başarıya götürebilir.

Depolanan CO₂ in okyanustan atmosfere beklenmedik ve feci bir firarı üzerine bilinen hiçbir mekanizma yoktur. CO₂ salınımı sırasında veya öncesinde moleküler CO₂'in bikarbonatlara ya da hidratlara dönüşümü, pH etkilerini düşürecek ve okyanusta CO₂ tutumunu arttıracaktır. Ancak, bu da ayrıca maliyeti ve diğer çevresel sorunları da beraberinde arttırır(Bölüm 6.7).

24. Büyük çapta mineral karbonizasyonun çevresel etkileri, madencilik ve hiçbir pratik kullanımı olmayan atık ürünlerinin çıkarılmasının bir sonucu olabilir.

Bir ton CO₂'nin endüstriyel tecridi için 1.6 ila 3.7 ton arasında silikat kayacı gereklidir. Mineral karbonizasyon etkileri, büyük ölçekteki yeryüzü madenlerinkine benzer. Madencilikte sondajlama, toprak taşınması, maden atıklarından ayırma ve filtrelemenin sonucu olarak toprak temizlemesi, yöre atmosferindeki kalite düşüşü, suya etkisi ve bitki örtüsü de dolaylı olarak habitat yıkımına sebep olabilir. Mineral karbonizasyon ürünlerinin çoğunluğu, arazi doldurma ve ek taşıma gerekliliğine sevk eder(Bölüm 7.2.4, 7.2.6).

[CO₂ Deposundaki Fiziksel Sızıntı, İklim Değişikliği Önleme Seçeneği Olan KTD Yöntemine Engel Olur mu?](#)

25. Mühendislik çalışmalarından ve doğayla özdeş modellemelerden yapılan gözlemler, uygun seçilip işletilen jeolojik rezervlerinde tutulan fraksiyonunun 100 yıllık zaman dilimi için yüksek olasılıkla²⁴ %99'u aşan oranlarda ve 1000 yıllık zaman dilimi üzeri için de muhtemelen²⁰ %99'u aşan oranlarda olacağını göstermiştir.

İyi seçilmiş, tasarlanmış ve ele alınmış bir jeolojik depolama sahası için CO₂ in büyük bir kısmı, çeşitli kapan mekanizmaları (trapping mechanisms) ile yavaş yavaş durağanlaştırılacaktır ve bu takdirde milyonlarca yıla kadar tutulabilecektir. Bu mekanizmalar yolu ile depolama uzun zaman diliminde daha güvenilir hale gelecektir(Bölüm 1.6.3, 5.2.2, 5.7.3.4, Tablo 5.5).

26. Okyanus depolamasından CO₂ firarı, yavaş yavaş yüzlerce yıl sürebilir.

Okyanus izlenim (tracer) verileri ve model hesaplamaları, okyanusal depo uygulaması ile enjeksiyonun derinliği ve mevkisine bağlı olarak, 100 yıl sonunda tutulan oran %65-100

²⁴ "Yüksek olasılık", %90-99 arasını ifade eder.

ve 500 yıl sonundaki oran ise %30-85 arasında olacaktır(düşük yüzde 1000m derinlik, yüksek yüzde 3000m derinlik için)(Bölüm 1.6.3, 6.3.3, 6.3.4, Tablo 6.2).

27. *Mineral karbonizasyon uygulaması ile depolanan CO₂, atmosfere kaçmayacaktır.*

28. *Sürekli bir CO₂ sızıntısı meydana gelirse, ki en azından bir kısım olacaktır, KTD'nin iklim değişikliğini önlemedeki avantajını dengeleyecektir. İklim değişikliği indirgemesi için sızıntı uygulamalarının değerlendirilmesi, karar aşaması için seçilen iskelet çatıya ve jeolojik ya da okyanusal depolama için saklanan fraksiyonlardaki mevcut bilgilere bağlıdır.*

Çalışmalar, nasıl geçirimsiz bir depolama ile kapatılacağı sorusunu farklı yönlere taşımıştır: durdurulan emisyonların miktarları, belirlenmiş indirgeme senaryosu maliyetinin düşürülmesi ya da atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının düşünülen seviyesi içeriğinde gelecekteki kabul edilebilir emisyonları(Bölüm 1.6.4, 8.4).

CO₂ Depolama Uygulamasının Yasal ve Düzenleyici Sorunları Nelerdir?

29. *Yeraltındaki operasyonlar için, dolaylı olarak ilgili ya da bazı hallerde direkt jeolojik depolamasına ilişkin düzenlemeler mevcut olsa da, ancak bazı ülkelerde özellikle uzun vadede jeolojik depolama için gelişmiş yasal veya düzenleme çatisi mevcuttur.*

Madencilik, petrol ve gaz işletmeleri, popülasyon kontrolü, atık maddeler, içme suyu, yüksek basınçlı gazların davranışı gibi konularda yasaların ve düzenlemelerin bulunması, jeolojik depolama ile dolaylı olarak ilgilidir. CO₂ in atmosfere sızmasını engelleme sorunları ve çevresel etkileri henüz çözülmemiştir. Bazı devletler, CO₂ depolamasının madencilik faaliyetleri ile karşılaştırıldığında uzun vadeli sorumluluk almışlardır(Bölüm 5.8.2, 5.8.3, 5.8.4).

30. *Şimdiye kadar ne CO₂ enjeksiyonunun deniz yataklarına hangi koşullarda uygulanacağına, ne de hangi okyanusun uygun olduğuna dair hiçbir veri üzerinde uzlaşmaya varılamamıştır.*

Bugün, deniz yataklarına ya da okyanuslara CO₂ enjeksiyonunun potansiyel olarak uygulaması üzerinde birkaç uzlaşma (özellikle Londra²⁵ ve OSPAR²⁶ ittifakı) yapılmıştır. Bütün bu uzlaşmalarda, jeolojik depolamaya ilişkin hiçbir spesifik konum ele alınmamıştır.

²⁵ Henüz uygulamaya konulmamış Deniz Popülasyonunun Çöp ve Diğer Atıkların Dökülmesinden Korunması Konulu Konferans (1972) ve bunun Londra Protokolü(1996).

²⁶ Paris'te (1992) kabul edilen Kuzey-doğu Atlantik Okyanus Çevresinin Korunması Konulu Konferans. OSPAR, Oslo-Paris için kısaltma olarak kullanılmıştır.

Emisyon Envanterleri ve Hesaplamaları için KTD'nin Anlamı Nedir?

31. Şu anki IPCC yönergeleri, KTD ile ilgili emisyon değerlendirmesine özgü metotları içermemektedir.

IPCC'nin genel tavsiyeleri, KTD'ye uygulanabilir. Birkaç ülkede de, ulusal emisyon hesaplama metotları ile beraber uygulanmaktadır. Özel metotlar, biyo-kütle uygulamaları ile ilgili geçici emisyonlar (fugitive emissions) ve negatif emisyonlar (negative emissions), fiziksel sızıntı, CO₂'in toplam tutum ve depolaması için gereklidir.

32. Bugünkü ancak birkaç KTD projesinde tamamen jeolojik depolama uygulaması kapsamakta, bu yüzden de monitörleme, verifikasyon, gerçek fiziksel sızıntı oranları ve ortak belirsizliklerin raporlanması ile ilgili az deneyim bulunmaktadır.

KTD'den CO₂ emisyonlarının görüntülenmesi ve verifikasyonu için birkaç teknik mevcut ya da gelişim dönemindedir. Ancak bunlar, uygunluk, bölge özelliği, kısıtlamalar ve belirsizlikler içinde değişmektedir.

33. CO₂, çeşitli bağlantılarla bir ülkede tutulup, diğer bir ülkede depolanabilir.

Hesaplamalar için kural ve metotlar, ayarlanmış olmalıdır. Gelecekte depolama sahasında meydana gelebilecek fiziksel sızıntı, hesaba katılmış olmalıdır.

Veri Eksikleri Nelerdir?

34. KTD açısından, şuanki mevcut veriler yetersiz görülmektedir. Artan bilgi ve deneyim ile belirsizlikler azalacaktır ve dolayısıyla iklim değişimi önlenmesi için KTD nin yaygınlaşmasına yönelik karar vermek de kolaylaşacaktır.