

IPCC ÖZEL RAPORU

KARBONDİOKSİT TUTUM VE DEPOLAMASI

TEKNİK ÖZET

Hükümetler Arası İklim Paneli
III. Çalışma Grubu'na ait Ayrıntılı Rapor

ÇEVİRİ (translation into Turkish Language) :

JEOLOJİ MUH. Ender Ragıp ARSLAN

arsender@hotmail.com

Giriş ve İçerik

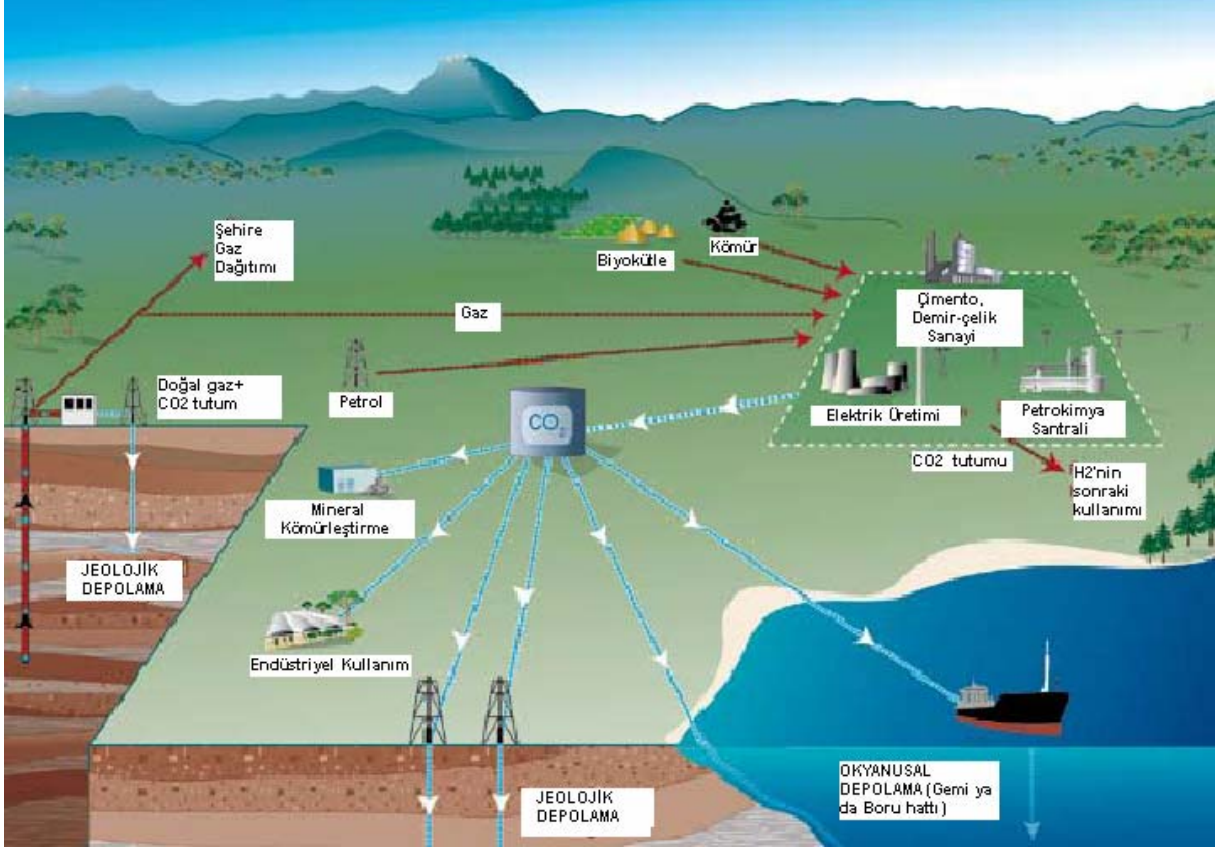
Karbondioksit tutum ve depolaması (KTD), insan faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂ in atmosferdeki emisyonlarının önlenmesi için bir alternatif olarak düşünülmektedir. Bu özel raporun çalışma amacı, KTD uygulamasının teknik, bilimsel, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutunu değerlendirmek, ve uygulamanın diğer iklim değişikliği indirgeme yöntemleri arasında yer almasını sağlamaktır.

Bu giriş bölümü, KTD sistemlerinin kısa bir tanıtımı ile beraber değerlendirme için genel bir iskelet oluşturur. Ardından 2. Bölüm'de KTD'nin küresel boyutta esnekliğini değerlendirmek için gerekli olan adım, yani temel CO₂ kaynaklarını ele alır. 3. Bölüm'de CO₂ tutumu için teknik yöntemler, 4. Bölüm'de de CO₂ taşıma metotları değerlendirilir. Bundan sonra her bir jeolojik depolama yöntemleri anlatılır. 5. Bölüm jeolojik depolama, 6. Bölüm okyanusal depolama ve 7. Bölüm mineral karbonizasyon ve CO₂ in endüstriyel kullanımlarını ele alır.

CO₂ tutum ve depolaması tanımı

Özellikle elektrik üretimi gibi amaçlar için kullanılan büyük yakıt üniteleri ya da otomobil motorları ve ikametgah-ticari alanlarda kullanılan ocaklar gibi daha küçük çaplı salınım kaynaklarında yakılan fosil yakıtlarından CO₂ salınır. CO₂ emisyonları, ayrıca bazı endüstriyel işlemler ile arazi toprak temizleme sırasında ormanların yakılmasındaki gibi kaynak ekstraksiyon işlemleri sonucunda ortaya çıkar. KTD en yararlı şekilde, güç santralleri ya da büyük endüstriyel işletmeler gibi geniş CO₂ amaçlı kaynaklara uygulanabilir. Bu kaynakların bazıları, taşımacılık, endüstri ya da yapı sektörüne hidrojen gibi dekarbonize yakıt sağlayabilir ve böylece bu dağıtım kaynaklarındaki emisyonları indirebilir.

KTD uygulaması, ilk olarak endüstri ve enerji kaynaklarında üretilen CO₂ in toplanması, uygun depo sahasına taşınması ve sonrasında uzun vadede atmosferden uzaklaştırılması için teknoloji kullanımlarını gerektirir. Bu amaçla KTD uygulaması, düşük sera gazı emisyonu ile kullanılan fosil yakıtlarını da desteklemiş olur. Biyo-kütle enerji kaynaklarında KTD uygulaması, daha güçlü oranlarda biyo-kütle toplanmaması şartıyla, biyo-kütlenin atmosferde kapladığı CO₂ nin tutumu ve depolanması yolu ile atmosferden CO₂ uzaklaştırabilir.



Şekil T1

Şekil T1’de KTD işleminin üç ana elemanı açıklanmıştır: tutum, taşıma ve depolama. Bu üç eleman da bugün, genelde jeolojik depolama için olmasa da, endüstriyel faaliyetlerde bulunmaktadır. Tutum aşaması, CO₂’in diğer gazlı ürünlerden ayrışımını kapsar. Güç santrallerinde olduğu gibi yakıt yakım işlemleri için, ayırma teknolojisi, yanma sonrasında CO₂ tutumunda ya da yanma öncesinde yakıtın karbonlardan ayrıştırılmasında (dekarbonize) kullanılabilir. Taşıma aşaması, CO₂ kaynağından uzaktaki bir mevkide bulunan depolama sahasına, tutulan CO₂’in aktarılmasını gerektirebilir. Taşıma ve depolama işlemlerini tümüyle kolaylaştırmak için, tutulan CO₂ gazı, tutum tesisatında yüksek bir yoğunlukta sıkıştırılır. Muhtemel depolama metotları ; yer altı jeolojik formasyonlara enjeksiyon, derin okyanuslara enjeksiyon ya da inorganik karbonatlara endüstriyel tecridi(yerleştirme). Ayrıca bazı endüstriyel işlemler, imalat ürünlerinde, az bir miktarda CO₂’ten yararlanıp depolayabilir.

Spesifik KTD sistem elemanlarının teknik matüritesi oldukça değişkendir. Bir kısmı halen araştırma, geliştirme ve deneme fazındayken, bazı teknolojiler, gelişmiş pazarda, özellikle petrol ve gaz endüstrisinde yayılmıştır. Tablo T1, tüm KTD sistemlerinin mevcut konumu hakkında veri sunmaktadır. 2005 ortasına göre, CO₂ tutum ve jeolojik depolamasına ilişkin üç ticari proje bulunmaktadır: Norveç açıklarında Sleipner doğal gaz işletme projesi,

Kanada'da Weyburn Geliştirilmiş Petrol Kurtarımı projesi(EOR) ve Cezayir'de In Salah Gaz projesi. her biri yıllık 1-2 MtCO₂ tutarak depolar. Şu da not edilmelidir ki, KTD uygulaması henüz büyük bir fosil yakıt elektrik santralinde uygulanmamıştır ve sistemin tamamı, elemanları kadar matür konumda değildir.

CO₂ tutum ve depolaması, neden ilgi görür?

1992'de, iklim değişikliği ile ilgili uluslar arası kaygı, Birleşmiş Milletler İklim Kongresi'ni (UNFCCC) ortaya çıkarmıştır. Kongrenin asıl amacı, "iklim sistemine tehlikeli antropojenik müdahalesini engelleyecek bir seviyede atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının durağanlaştırılması"dır. Bu açıdan, KTD'nin dikkate alınması bağlamı, dünya CO₂ emisyonlarında, atmosferdeki sera gazı konsantrasyonu stabilizasyonunun uluslar arası amacına mecbur bırakılmış olması demektir. Global enerji kullanımı için çoğu senaryolar, iklim değişimini indirmeye özel çalışmaların eksikliği halinde bu yüzyıl boyunca CO₂ emisyonlarının büyük miktarda artacağını ileri sürer. Ayrıca, en az bu yüzyıl ortalarına kadar, temel enerji dayanağı olarak fosil yakıtlarının egemenliğinin süreceğini işaret eder. Emisyon önlem aşaması, gelecekteki emisyonların derecesine ve uzun dönemde hedeflenen CO₂ konsantrasyonuna bağlı olarak, atmosferde CO₂ konsantrasyonunun sabitleştirilmesini gerektirir: daha düşük stabilizasyon hedefi ile daha yüksek değişim emisyonları, CO₂ emisyonlarında daha fazla indirmeye demektir. IPCC Üçüncü Değerlendirme Raporu (TAR), düşünülen senaryolara göre bu yüzyıl boyunca CO₂ konsantrasyonunun 450-750 ppmv de tutulması için yüzlerce ve hatta binlerce gigaton CO₂'in kümülatif emisyonunun engellenmesi gerekecektir. Ayrıca TAR raporuna göre, "yapılan çoğu modellemeler, eldeki teknoloji seçenekleri ile atmosferde büyük oranda CO₂ stabilizasyonu başarılabilir", ancak "tek bir teknoloji seçeneği, gereken emisyon indirmelerinin tamamını sağlayamaz". Aksine, stabilizasyonu başarmak için indirmeye yöntemlerinin kombinasyonuna ihtiyaç duyulacaktır. Stabilizasyon için bilinen bu teknolojik seçeneklerin olmasına rağmen, TAR raporunda şöyle belirtilir: "uygulama, ortak sosyo-ekonomik ve kurumsal değişiklikler gerektirir".

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 ayırışma(doğal gaz işletimi, ammonia üretimi)				X
Taşıma	Boru hattı				X
	Gemi taşımacılığı			X	
Jeolojik Depolama	Geliştirilmiş Petrol Kurtarımı (EOR)				X ^a
	Gaz veya petrol sahaları			X	
	Tuz formasyonları			X	
	Geliştirilmiş Kömür Yatağı Metan		X		

	İyileştirmesi (ECBM)				
Okyanusal depolama	Direkt enjeksiyon (çözündürme yöntemi)	X			
	Direkt enjeksiyon (göl yöntemi)	X			
Mineral Karboni zasyon	Doğal silikat mineralleri	X			
	Atık maddeleri		X		
CO2in endüstriyel kullanım					X

Tablo T1 KTD ana elemanları.

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

Değerlendirmeye ilişkin temel sorunlar

KTD uygulamasının iklim değişimi önleminde üstlendiği rolü kavramak için belirtilmesi gereken bir dizi konu vardır. Bu teknik özetin çeşitli bölümlerinde ortaya çıkan sorular aşağıda sıralanmıştır:

- KTD teknolojisinin bugünkü durumu nedir?
- CO₂ tutma ve depolama potansiyeli nedir?
- Uygulamanın maliyeti nedir?
- Önemli bir derecede iklim değişimi önlenmesi için CO₂ ne kadar süre depolanmalıdır?
- KTD uygulamasının sağlık, güvenlik ve çevresel riskleri nelerdir?

- CO₂ depolama ilişkin yasal sorunlar nelerdir?
- Emisyon envanteri ve hesaplamaları için uygulamalar nelerdir?
- KTD teknolojisinin yaygınlaşması ve transferi için potansiyel nedir?

İklim değişimi indirgenmesi için bir alternatif olan KTD sisteminin analizinde, sistemden kaynaklanan bilhassa CO₂ emisyonlarının belli bir yolla belirlenmesi ve değerlendirilmesi, merkezi önem arz eder. Tutuma, depolamaya ve kullanım seçeneklerine ilişkin enerji gereksinimi ile depo rezervlerinde sızıntı ihtimalinin değerlendirilmesi, KTD zincirinin tümü için gereklidir.

Atmosfer stabilizasyonu ve uzun vadede ilerleyen gelişmeler açısından CO₂ depolaması, iklim değişimi indirgemesine önemli derecede katkıda bulunmaya yetecek zaman dilimi boyunca sürmelidir.

Bu rapor, 'tutulan fraksiyon' denilen CO₂ depolamasının sürekliliğini, yani uzun bir zaman aralığı boyunca depolama rezervinde tutulan enjekte CO₂'nin kümülatif kütle fraksiyonu tanımını vurgular. Farklı zaman periyotları için bu gibi fraksiyonların değerlendirmesi ve depolama seçenekleri ileride bahsedilmiştir. Sorunlar sadece CO₂'nin depoda ne kadar kalacağına yönelik değil bundan başka depodan oluşacak yavaş ve sürekli sızıntının kabul edilebilir miktarlarını da içerir.

KTD uygulaması mümkün depolama sahalarına, petrol ile gaz işletmeleri deneyimine sahip ve CO₂ tutumu için önemli bir kaynağa sahip ülkeler için bir seçenek olabilir.

CO₂ kaynakları

Bu bölümde CO₂ emisyonlarının bugünkü temel antropojenik kaynakları ve ilişkili muhtemel depolama sahaları açıklanmaktadır. İnsan aktivitelerinden kaynaklanan CO₂ emisyonları, temel olarak güç santrallerinde fosil yakıtlarının kullanılması, taşıma, endüstriyel işlemler, konut ve ticari yapılar gibi bir dizi farklı kaynaklardan oluşur. CO₂ ayrıca çimento yada hidrojen üretimi gibi bazı endüstriyel işlemlerden ve biyokütle yakımından da kaynaklanmaktadır.

Bugünkü CO₂ Kaynakları ve Özellikleri

CO₂ emisyonu küresel önlemi için bir alternatif olan KTD potansiyelini değerlendirmek için, büyük CO₂ emisyon kaynakları ile bunların muhtemel depolama sahalarına yakınlığı arasındaki global coğrafi ilişkileri ele alınmıştır. Yapı, ticari ve taşıma

sektöründeki CO₂ emisyonları, bu analizde göz ardı edilmiştir. Çünkü bu emisyon kaynaklarının her biri az ve genellikle değişken ve dolayısıyla da tutum ve depolama için elverişli değildir.

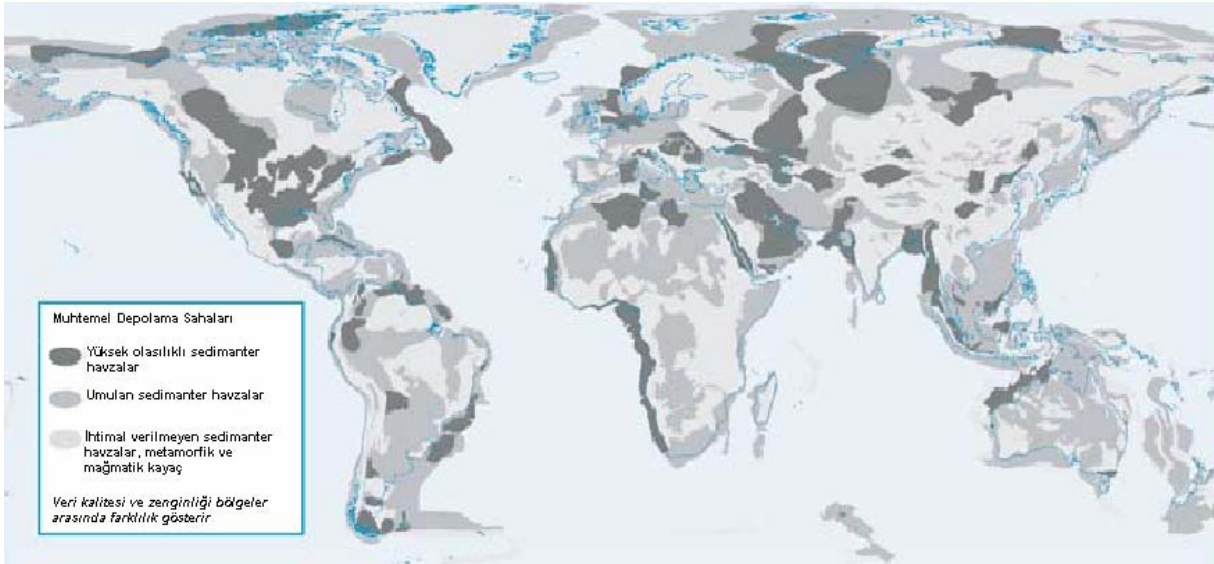
2000 yılında küresel boyutta fosil yakıtta kullanılan CO₂ emisyonları, yaklaşık 23.5 Gt CO₂ yıl⁻¹ (6GtC/yıl)dir. Bunun yaklaşık % 60'ı, büyük emisyon kaynaklarına mal edilmiştir. Ancak tüm bu kaynaklar CO₂ tutum işlemi için uygun değildir. Değerlendirilen kaynaklar dünya geneline ait olsa da, emisyon demetinin en çok ortaya çıktığı yerler: Kuzey Amerika (doğu ve batı US), Avrupa (kuzey-doğu kesimi), Doğu Asya (Çin'in doğu şeridi) ve Güney Asya (Hindistan yarımadası)dır. Buna oranla büyük çaplı biyokütle kaynakları sayıca daha az ve küresel boyutta düşük salınımlıdır.

Şu anki büyük emisyon kaynaklarının geniş çoğunluğu, %15'ten düşük CO₂ konsantrasyonuna sahiptir(bazı durumlarda, esas itibariyle düşük). Ancak fosil yakıt bazlı endüstriyel kaynakların küçük bir bölümü (%2'den az bir bölümü), %95'ten fazla CO₂ konsantrasyonları içerir. Yüksek konsantrasyonlu kaynaklar, KTD uygulaması için muhtemel adaylardır. Çünkü tutum evresinde sadece dehidrasyon ve sıkışma yeterlidir(Bkn. 3. Bölüm). Yapılan bir analizde depolama formasyonuna ortalama 50 km uzaklıkta bulunan ve gelir kazandırmaya elverişli bu gibi yüksek saflıktaki kaynakların, bugün yaklaşık olarak yılda 360 MtCO₂ ürettiği belirtilmektedir. Ayrıca biyoetanol üretimi gibi bazı biyo-kütle kaynakları da, benzer uygulamalarda kullanılacak yüksek konsantrasyonlu CO₂ kaynaklarını oluşturmaktadır.

Emisyon bölgesi ile depolama sahasının arasındaki uzaklık, KTD uygulamasının CO₂ emisyonu indirgenmesinde önemli rol oynayıp oynamayacağı üzerinde önemli bir yaklaşımdır. Şekil T2a, temel CO₂ kaynaklarını belirtir(noktalarla gösterilmiştir) ve Şekil T2b, jeolojik depolamanın olabileceği sedimanter havzaları gösterir(grinin farklı tonlarında). Şekilde geniş anlamda, temel kaynaklar ile hemen altındaki ya da kabul edilebilir uzaklıktaki (300m den az) jeolojik depolama için uygun sedimanter havzalar arasında potansiyel olarak iyi bir korelasyon bulunduğu görülmektedir. Şekil T2b'de, muhtemel depolama rezervi olarak henüz tanımlanmamış ya da değerlendirilmemiş havzalar görülmektedir: bu muhtemel depolama sahaları için, bölgesel düzeyde uygunluğu onaylanmış daha ayrıntılı bir jeolojik analiz gerekmektedir.



Şekil T2a. Karbondioksitin büyük durağan kaynaklarının global dağılımı(IEA GHG, 2002).



Şekil T2b. Uygun tuz formasyonları, petrol veya gaz arazileri ya da kömür yataklarının bulunabileceği sedimanter havzalardaki muhtemel bölgeler.

Gelecekteki emisyon kaynakları

IPCC'nin Emisyon Senaryoları Özel Raporu'nda (SRES) karbondioksitin gelecekteki emisyonları için, küresel olarak 2020 yılında 29-44 GtCO₂/yıl ve 2050 yılında 23-84 GtCO₂/yıl arasında tahmin edildiği altı aydınlatıcı senaryo üzerine dayalı bir çalışma yapılmıştır. 2050'ye kadar özellikle Güney ve Doğu Asya'da elektrik santralleri ve endüstriyel sektörlerden oluşan CO₂ emisyon kaynaklarının sayısında kayda değer bir artış beklenmektedir. Tersine Avrupa'da bu gibi kaynakların sayısı bir miktar düşebilir. Yüksek ve düşük CO₂ içerikli kaynaklar arasındaki oran, hidrojen ya da diğer sıvı ve gazlı ürünler üretimi için fosil yakıtlarının sıvılaştırması veya gazlaştırması üzerine çalışan santrallerin ölçü

ve derecesi için bir fonksiyon olacaktır. Bu santrallerin sayısı, teknik olarak tutum için uygun yüksek CO₂ konsantrasyonlu kaynakların sayısını ifade eder.

Yüksek emisyon dereceleri ile ilişkili olan CO₂ tutum potansiyeli, 2020'de yıllık 2.6-4.9 GtCO₂ (0.7-1.3 GtC) ve 2050'de de 4.7-37.5 GtCO₂ (1.3-10 GtC) olarak tahmin edilmiştir. Bu miktarlar, 2020 ve 2050 için sırasıyla %9-12 ve %21-45 global CO₂ emisyonlarına karşılık gelir. Emisyon ve tutum derecesi, doğal belirsizlik senaryoları ve modelleme analizleri ile KTD uygulamasının teknik sınırlarını aksettirir. Bu senaryolar, sadece fosil yakıtlarından CO₂ tutumu üzerine hazırlanmış, biyokütle kaynaklarını hesaba katmamıştır. Ancak, büyük ölçekte biyokütle dönüşüm tesislerinden kaynaklanan emisyonlar da tutum için teknik olarak uygundur.

Düşük karbonlu enerji taşıyıcılarının potansiyel gelişimi, yüksek konsantrasyonlu sabit CO₂ kaynaklarının gelecekteki ölçüsü ve miktarına bağlıdır. Senaryolar ayrıca, elektrik ya da hidrojen gibi düşük karbonlu enerji taşıyıcılarının büyük çaptaki üretimi ile, bugün az miktarda ikametgah-ticari yapılarda ve nakliye sektöründe dağıtılan kaynaklar tarafından kullanılan fosil yakıtlarının birkaç on yıl içinde yerini alabileceğini belirtmektedir. Bu enerji taşıyıcıları, CO₂ kaynaklarını oluşturan büyük santrallerde (elektrik santralleri ya da bugün doğal gazdan hidrojen üreten santraller vb.) biyokütle ve/veya fosil yakıtlarından üretilebilir. Bu kaynaklar, CO₂ tutumu için uygun olacaktır. Bunun gibi KTD uygulamaları, taşımadan ve dağıtımli enerji tedarik sistemlerinden yayılan CO₂ emisyonlarını indirgeyebilir.

Karbondiyoksit tutumu

Bu bölümde, KTD tutum teknolojisi ele alınmıştır. 2. Bölümde gösterildiği gibi, güç santralleri ve diğer büyük çaplı endüstriyel işlemler, tutum için esas adaylar ve bu bölümün ana konusudur.

Tutum teknolojisi seçenekleri ve uygulamaları

CO₂ tutumunun amacı, bir depolama sahasına kolaylıkla taşınabileceği yüksek basınçta yoğunlaştırılmış CO₂ akışı meydana getirmektir. Pratikte, düşük CO₂ içerikli tam gaz akışı, taşınarak yeraltına enjekte edilebilse de, enerji maliyeti ve ilişkili diğer masraflar genellikle bu uygulamayı güçleştirmektedir. Bu nedenle hemen hemen saf bir CO₂ akışının sağlanması, taşıma ve depolama için gereklidir. Bugün doğal gaz işlem santralleri ve ammonia üretim tesisleri kapsamındaki büyük santrallerde CO₂ ayırma işlemi önceden beri

yapılmaktadır. Şu anda, CO₂ tipik olarak diğer endüstriyel gaz akışını temizlemek için uzaklaştırılmaktadır. Uzaklaştırma, sadece birkaç durumda depolama amaçları için yapılmaktadır: çoğu durumda, CO₂, atmosfere bırakılır. Tutum işlemleri, ticari olarak kömür veya doğal gaz yakımı ile oluşan gaz akımlarından kullanışlı CO₂ toplamı sağlamak için de kullanılır. Yine de halen hiçbir büyük elektrik santralinde CO₂ tutum uygulamaları yapılmamaktadır.

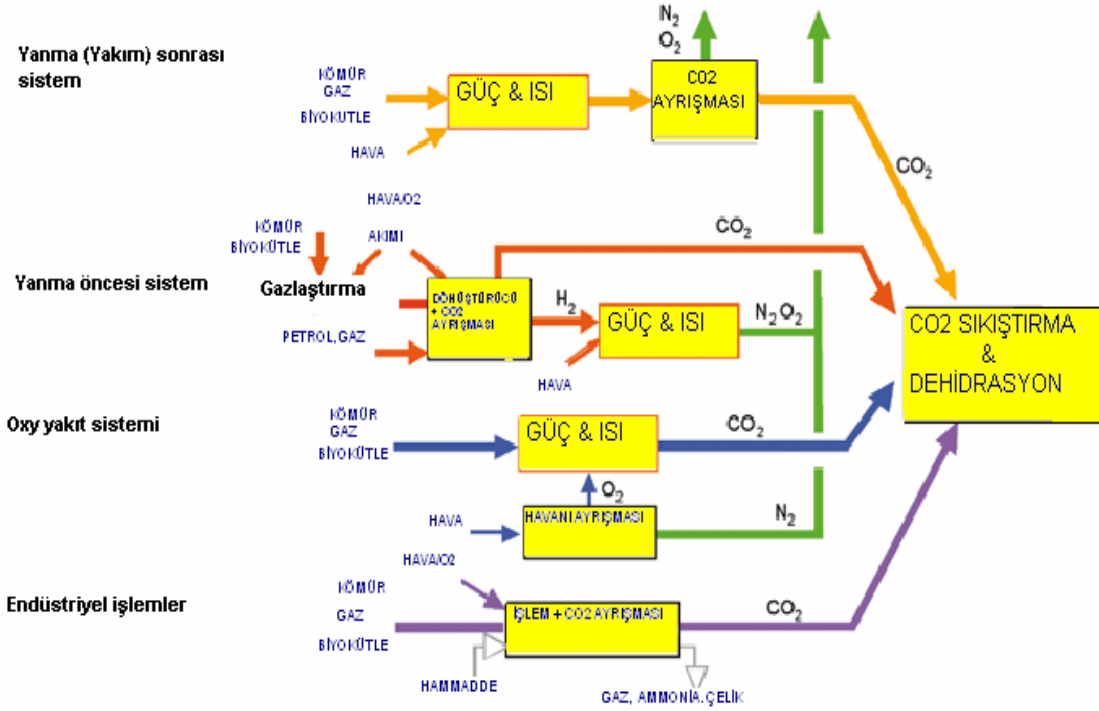
Söz konusu işletme ya da elektrik santrali uygulamalarına bağlı olarak, başta fosil yakıt olmak üzere (kömür, doğal gaz veya petrol), biyokütle ya da bu yakıtların karışımından oluşan karbondioksitin tutumuna yönelik üç temel yaklaşım vardır:

Post-combustion (yanma sonrası) sistemleri, CO₂'i, havada temel yakıtın yakılmasıyla oluşan akışkan gazlardan ayırır. Bu sistemler doğal olarak, esas ögesi azot olan (havadaki) akışkan bir gaz akımındaki mevcut karbondioksitin küçük bir fraksiyonu (tipik olarak hacimce %3-15) tutmak için, bir sıvı çözücüyü kullanır. Modern bir pulverize kömür (PC) santrali ya da doğal gaz kombine çevrim santrali için bugünkü post-combustion (yanma sonrası) tutum sistemleri, monoetanolamin gibi organik çözücü kullanır.

Pre-combustion (yanma öncesi) sistemleri, esas olarak karbon monoksit ve hidrojen içeren bir karışımı üretmek için buhar ve hava ya da oksijen ile temel yakıtı reaktörde işlemlerden geçirir. CO₂ ile birlikte biraz daha hidrojen, ikinci bir reaktörde (dönüşüm reaktöründe) buharlı karbon monoksitin reaksiyonu ile üretilir. Hidrojen ve karbondioksitten oluşan karışım, daha sonra CO₂ gazı buharına ve hidrojen buharına ayrıştırılabilir. CO₂ depolanırsa hidrojen, elektrik ve/veya ısı üretmek için yakılan karbonsuz enerji taşıyıcısına dönüştürülebilir. İlk yakıt dönüşüm basamaklarının yanma sonrası sistemlerinde daha ayrıntılı ve masraflı olmasına rağmen, dönüşüm reaktörü ile elde edilen karbondioksitin yüksek konsantrasyonları (tipik olarak kuru temelde hacimce %15-60) ve bu uygulamalarda rastlanan yüksek basınç, CO₂ ayrışımı için daha elverişlidir. Yanma öncesi sistemlerinden gazlaştırma üniteli kombine çevrim santrali teknolojisi kullanılan güç santrallerinde de yararlanılabilir.

Oxyfuel combustion (oxy-yakıt yakım) sistemlerinde, çoğunlukla su buharı ve CO₂ olan bir baca gazı elde etmede temel yakıtın yakılması için hava yerine oksijen kullanılır. Böylece yüksek CO₂ konsantrasyonlu (hacimce %80'den fazla) bir baca gazı elde edilir. Sonrasında su buharı, gaz akımının soğutulması ve sıkıştırılması ile ortadan kaldırılır. Oxy-yakıt yakımı, bugün çoğu projelerde yerine getirilen %95-99 saflıkta, havadan oksijenin

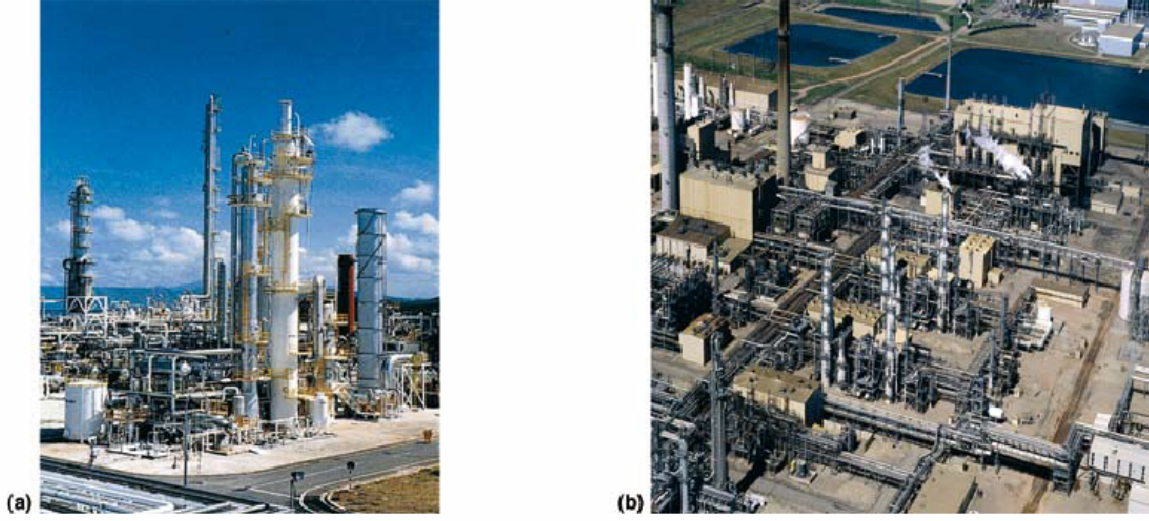
ayrılması işlemi gerekmektedir. Daha sonraki baca gazı muamelesi, CO₂ depoya gönderilmeden önce baca gazından yoğunlaşmamış gazların ve hava kirletici maddelerin uzaklaştırılmasını gerektirir. Kazanlarda CO₂ tutum metodu olarak, oxy-yakıt combustion sistemleri deneme fazındadır. Oxy-yakıt sistemleri, gaz türbinlerinde de çalışılmakta, ancak bu uygulamalar için kavramsal projeler halen araştırma fazındadır.



Şekil T3, ana tutum işlemleri ve sistemleri üzerine şematik bir diyagramdır. Her biri, gaz kütlesi akımından CO₂, H₂ veya O₂ ayrışması içermektedir (baca gazı, sentez gazı, hava ya da ham doğal gaz gibi). Bu ayırma basamakları, fiziksel veya kimyasal solventler, membranlar, sıvı solventler ya da krojenik ayırma vasıtası ile gerçekleşmektedir. Belirli bir tutum teknolojisinin seçimi, ekseriyetle hangi koşullar altında çalışması gerektiği durumuna göre saptanır. Şu an santraller için yanma sonrası ve yanma öncesi sistemleri, saçıkları CO₂'in %85-95 'ini tutabilmektedir. Ayırma cihazları çok daha büyük, enerji yoğunluklu ve masraflı hale gelse de, daha yüksek tutum verimliliği mümkündür. Sistemin türüne bağlı olarak, tutum ve sıkıştırma, tutum bulundurmeyen eşdeğer bir santralden yaklaşık %10-49 daha fazla enerji gerektirir. CO₂ emisyonlarının birleşmesinden dolayı, tutulan toplam CO₂ miktarı yaklaşık %80-90 civarındadır. Oxy-yakıt yakım sistemleri, pratikte, salınan CO₂'in hemen hemen tümünü tutabilecek düzeydedir.

1. Bölüm'de bahsedildiği gibi, CO₂ tutumu önceden beri birkaç endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır(Bkn. Şekil T3). Pre-combustion (yanma öncesi) tutum için

kullanılacak aynı teknoloji ile büyük ölçekte hidrojen üretimi (genellikle ammonia ve gübre üretimi ve petrol rafineri işletmeleri için) için çalışılmaktadır. Ham doğal gazdan (tipik olarak yeteri miktarda CO₂ içerir) CO₂ ayrıştırılması, ayrıca yanma sonrası tutum için kullanılan benzer teknoloji ile büyük bir ölçekte de denenmiştir. Büyük ölçekte oksijen ayrımı için ticari sistemler bulunsa da, şu anda CO₂ tutumu için oxy-yakıt yakım deneme fazındadır.



Şekil T4 (a) Malezya'daki bir santralde yakım sonrası karbondioksit tutumu.

(b) Amerika, Kuzey Dakota'daki bir kömür gazlaştırma santralinde yakım öncesi karbondioksit tutumu.

CO₂ tutumu: riskler, enerji ve çevre

CO₂ tutum sistemine ait monitörlleme, risk ve yasal uygulamalar, endüstride düzenli sağlık, güvenlik ve çevre kontrolü uygulamalarının bileşenlerine karşı meydan okuyacak yeni görüşlere elvermez. Yine de, CO₂ tutum sistemleri, işletilmeleri için önemli miktarda enerji gerektirir. Bu da toplam verimliliği düşürür. Bundan dolayı santraller, her kilowatt-saat elektrik üretimi için daha fazla yakıtı ihtiyaç duyar.

CO₂ tutum maliyeti

Büyük santrallerdeki CO₂ tutumunun hesaplanan maliyeti, bugün ticari kullanımdaki teknolojilerin proje çalışmaları tasarımlarına dayanmaktadır. Süperkritik pulverize kömür(PC), doğal gaz kombine çevrim santrali (NGCC) ve gazlaştırma üniteli kombine çevrim santrali (IGCC) için tutum sistemleri, tutum için enerji gereksinimi de dahil, kW-saat başına yaklaşık %80-90 CO₂ emisyonu indirgemesi tasarlanmıştır. Bu üç sistem için maliyet oranları, farklı çalışmalarda teknik, ekonomik ve işletme varsayımları üzerinde farklılıklar göstermiştir. Maliyet farklılığı, CO₂ tutum sisteminin projesi, işletmesi ve tutum teknolojisinin uygulandığı (santral büyüklüğü, yeri, verimlilik, yakıt türü, yakıt masrafı, kapasite etkeni ve sermaye değeri gibi faktörler) referans santralin parasal desteğindeki farklılıklara bağlanabilir.

CO₂ tutum sistemi elektrik üretim maliyetini bir NGCC santrali için %35-70 (0.01-0.02 US\$/kWh), süperkritik PC santrali için %40-85 (0.02-0.03 US\$/kWh) ve IGCC santrali için %20-55 (0.01-0.02 US\$/kWh) oranında arttırmaktadır. Toplamda, tutum sistemli fosil yakıt santralleri için elektrik üretim maliyetleri (CO₂ taşıma ve depolama masrafları hariç), 0.04-0.09 US\$/kWh arasında, tutum sistemi bulundurmayan aynı santral için 0.03-0.06 US\$/kWh arasında değişmektedir. Bugüne dek yapılan çalışmaların çoğunda, yüksek kapasiteli büyük santral durumunda ve santral ömrü boyunca doğal gaz fiyatlarının 2.6-4.4 US\$ GJ⁻¹ arasında olduğu durumlarda, NGCC sistemlerinin yeni PC ve IGCC santrallerinden (tutum sistemi var veya yok) daha düşük maliyette elektrik üretimi gerçekleştirdiği belirlenmiştir.

KTD sistemleri ayrıca, tekil veya fosil yakıt bileşimli biyokütle beslenme stoğu ya da yakıtı kullanılan sistemlere de uygulanabilir. Az sayıda bir çalışma tutum, taşıma ve depolama içeren sistemlerin maliyetine değinmiştir. 24 Mwe biyokütle IGCC santralinde 0.19 MtCO₂/yıl tutumu, elektrik üretim maliyetindeki ortalama 0.08 US\$/kWh bir artışa tekabül eden, yaklaşık 80 US\$/tCO₂ toplam tutum olarak hesap edilmiştir. Sonuç olarak, farklı

işletmelerdeki tutum maliyeti (çimento ve çelik sanayi, rafineriler), yaklaşık 25-115 US\$/tCO₂ toplam tutum arasında değişmektedir. Tutumun birim maliyeti genel olarak, saf CO₂ akımının salındığı yerlere ilişkin işletmelerde daha düşüktür (örneğin, doğal gaz işletmeciliği, hidrojen ve ammonia üretimi vb.). Buna örnek olarak maliyetin 2-56 US\$/tCO₂ arasında değiştiği hidrojen santralleri gösterilebilir.

CO₂ Nakli

Santrali direkt olarak jeolojik depolama sahası üzerine kurulmamış ise, tutulan karbondioksitin tutum noktasından bir jeolojik depolama sahasına taşınması gerekmektedir.

CO₂ taşıma metotları

Boru hatları bugün gelişmiş pazar teknolojisi ve CO₂ taşınması için en yaygın metot olarak görülmektedir. CO₂ gazı, taşınmasını kolaylaştırmak ve maliyetini düşürmek suretiyle, iki-fazlı akış rejiminden ve CO₂ yoğunluğundaki artıştan sakınmak için 8 MPa üzerindeki bir basınç ile sıkıştırılmaktadır. CO₂ ayrıca, gemi, yol ya da demiryolu tankerlerinde sıvı olarak da taşınabilmektedir.

İlk uzun mesafeli CO₂ boru hatları, 1970'lerin başında işleme konulmuştur. Amerika'da genellikle, CO₂'ten faydalanan EOR'un bulunduğu Texas bölgesi ve çevresine, yıllık 40 MtCO₂'den fazla doğal gaz ve antropojenik kaynaklar 2500 km lik borularla taşınmaktadır. Bu boru hatları, "DENSE PHASE" (yoğun faz) modunda (belirgin faz değişiminin olmadığı ve gazdan sıvıya doğru sürekli ilerlediği faz modu) ve çevre ısısı ile yüksek basınçta çalışmaktadır. Bu boruların çoğunda akım, akıntının geldiği yöndeki uçta bulunan kompresörler ile sağlanmaktadır. Bazı boru hatlarında ara kompresör istasyonları (itici) da bulunmaktadır.

Bazı durum ya da bölgelerde, özellikle karbondioksitin uzun mesafeler ya da deniz aşırı taşınması gerektiğinde gemi ile nakliyesi, ekonomik olarak daha cazip olabilir. Sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG, başlıca propan ve bütan), deniz tankerleri ile geniş bir ticari ölçekte taşınmaktadır. CO₂ de aynı yolla gemilerle taşınabilir (tipik olarak 0.7 Mpa basınçta). Ancak şu anda, sınırlı talep nedeniyle küçük bir ölçekte yer almaktadır. Sıvılaşmış karbondioksitin özellikleri, LPG'ninkine benzemektedir ve teknoloji de, bu gibi sistemlerin gerçekteşmesi yönünde bir talep olursa büyük CO₂ taşıyıcıları üzerine geliştirilebilir.

Yol ve demiryolu tankerleri de teknik olarak uygun seçeneklerdir. Bu sistemler karbondioksiti, -20° C lik bir sıcaklıkta ve 2 MPa basınç altında taşıyabilir. Ancak bu yöntemler, boru hatları ve gemilere oranla pek ekonomik sayılmaz (küçük bir bölümü hariç) ve büyük ölçekte KTD ile ilişkili olması olasılık dışıdır.

Çevre, güvenlik ve risk yönleri

Çoğunlukla EOR uygulamaları için geliştirilen bugünkü standartlar, KTD 'de gerek duyulan için aynı değildir. Düşük-azot içeriği EOR için önemli iken, KTD için pek bir değeri olmayabilir. Yerleşim yerlerinden geçen CO₂ nakli boru hatları, detaylı yol seçimi, yüksek basınç koruması, sızıntı taraması gibi tasarımlara ihtiyaç duyar.

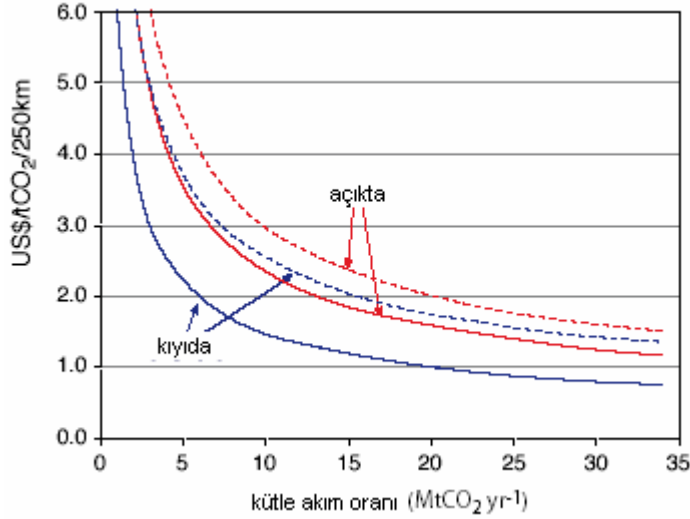
Borulardan kaçakların çok az meydana gelmesine rağmen taşıma sırasında CO₂ atmosfere sızabilir. Kuru (nemsiz) CO₂, oksijen, hidrojen sülfid, sülfür veya azot oksitler gibi kirleticiler içerse bile, genelde boru hatları için kullanılan karbon-manganez çelikleri aşındırmaz. Diğer taraftan nemli CO₂, yüksek derecede aşındırıcıdır. Bundan dolayı CO₂ boruları, aşınmaya karşı dayanıklı bir metal alaşımdan yapılmalı, ya da içten metal alaşımla veya sürekli polimer tabaka ile kaplanmalıdır. Bazı borular, malzeme maliyeti karbon-manganezinkinden yedi kat fazla olsa bile aşınmaya dayanıklı alaşımlardan yapılmaktadır. Gemiler için toplam atmosfere salınım, kaynama ve motor eksozundan salınım dahil, 1000 km için %3-4 arasındadır. Kaynama, tutum ve sıvılaştırma ile azaltılabilir, ve bu tekrar tutum ile salınım 1000 km'de %1-2 arasına çekilebilir.

Bazen kazalar da meydana gelebilir. CO₂ borularının bulunması halinde, ki genellikle düşük nüfus yoğunluklu bölgelerde bulunabilir, buralarda her kilometre için meydana gelebilecek sorunlar, yıla bölündüğünde birden az olur(km-yıl için 0.0003) ve yaralanma veya ölüm gerçekleşmez. Hidrokarbon borularından edinilen tecrübe ile sabittir ve etkisi, doğal gaz kazalarından daha şiddetli olmaz. Deniz taşımacılığında hidrokarbon tankerleri potensiyel olarak tehlikelidir ancak olası tehlikeler tasarım, yapım ve işletme için standartlara neden olmuş, büyük kazalar önlenmiştir.

CO₂ nakliyesi maliyeti

Maliyet hesaplamaları, karbondioksitin hem deniz taşımacılığı, hem de boru hattı nakliyesi üzerine yapılmıştır. Her iki durumda da masraflar, en çok mesafeye ve taşıma niceliğine bağlanmıştır. Boru hattı ile nakliyede maliyet, hattın kıyıda veya denizden açıkta

oluşuna, arazide nüfus yoğunluğuna ve izlenen rotada dağların, büyük akarsuların veya donmuş zeminin bulunup bulunmadığına bağlı olarak değişir. Bütün bu faktörler maliyeti iki katına çıkarmakta, hatta boru hattının yerleşim yerinde bulunması halinde çok daha fazla artışa neden olmaktadır. Ek basınç (itici-destek pompa istasyonları) gibi herhangi ek masraflar da daha uzun borular gerektirir ki bu da nakliye maliyetinin bir parçası olarak hesaba katılmıştır. Bu masraflar nispeten daha azdır ve burada anlatılan hesaplamalara katılmamıştır.



Şekil T5, 250 km gibi çok düşük mesafede boru hattı ile nakliyenin maliyetini gösterir. Genellikle 1-8 US\$/tCO₂ (4-30 US\$/tC) arasındadır. Şekilde ayrıca boru hattı maliyetinin CO₂ kütle akış oranına ilişkisini göstermektedir.

Gemi taşımacılığında, tanker hacmi ile yükleme ve boşaltma sistemlerinin özellikleri, tüm nakliye masrafının saptanmasında etkili bazı etkenlerdir. Eğer deniz nakliyesi mümkün ise, yaklaşık 1000 km den büyük mesafeler ve yıllık birkaç milyon tondan az karbondioksit miktarı için genel olarak boru hatlarından daha ekonomiktir. Okyanusal depolamada en uygun taşıma sistemi, şu enjeksiyon metotlarına bağlıdır: su yüzeyinde sabit bir tekneden, hareket halindeki gemiden veya kıyıdaki bir boru hattından enjekte.

Jeolojik depolama

Bu bölümde, karbondioksitin jeolojik depolaması için kapsamlı olarak ele alınan üç çeşit jeolojik formasyon söz edilir: petrol ve gaz rezervleri, derin tuz formasyonları ve işletilmeyen kömür yatakları(Şekil T6). Her üç durumda karbondioksitin yeryüzünün altındaki bir kaya formasyonuna jeolojik depolaması, sıkışık bir formda enjekte edilmesi ile

başarılmıştır. Doğal gaz, petrol ya da tuzlu su barındıran veya önceden barındırmış gözenekli kaya formasyonları, CO₂ depolaması için muhtemel adaylardır. Uygun depo formasyonları hem kıyıda, hem denizden açıkta oluşabilir (içerisi sedimentlerle dolmuş, kabukta oluşan büyük ölçekli doğal çöküntü alanları). İleride işletilmesi mümkün olmayan kömür yatakları da CO₂ depolaması için kullanılabilir ve yeterli permeabiliteyi sağlayabilirler (Bkn. Şekil T6). Kömür yataklarında CO₂ depolama yöntemi ile metan üretimi gelişimi halen deneme aşamasındadır(Bkn. Tablo T1).

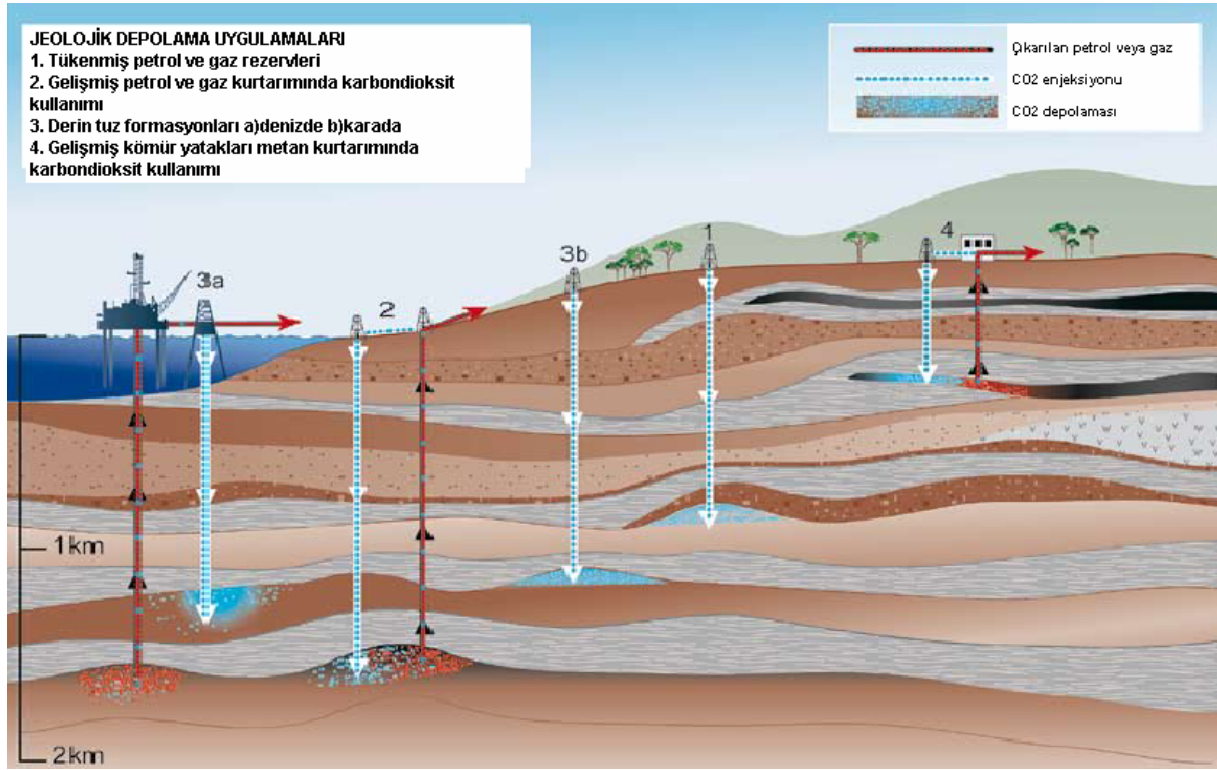
Bulunan CO₂ depolama projeleri

Karbondiyoksitin jeolojik depolaması, üç endüstriyel ölçekli projede sürdürülmektedir (1 MtCO₂/yıl ve üzeri projeler): Kuzey Denizi'ndeki Sleipner Projesi, Kanada'daki Weyburn Projesi ve Cezayir'deki In Salah Projesi. Atmosfere salınacak ortalama 3-4 MtCO₂/yıl tutulmuş ve jeolojik formasyonlarda depolanmıştır.

Depolama teknolojisi ve mekanizmaları

Derin jeolojik formasyonlara CO₂ enjeksiyonu çok kez, petrol ve gaz araştırmaları ve işletim endüstrisinde geliştirilen aynı teknolojiyi gerektirir. Petrol sondaj teknolojisi, enjeksiyon teknolojisi, depo rezervuar dinamiğinin bilgisayar simülasyonu ve mevcut uygulamalardan monitörleme metotları, jeolojik depolama işletmesi ve tasarımı için daha da geliştirilmektedir. Diğer yer altı enjeksiyonu uygulamaları da konuya ilişkin işlevsel deneyimi sağlamaktadır. Özellikle doğal gaz depolama, sıvı atıkların derin enjeksiyonu ve asit gazı düzenlemesi, 1990'dan bu yana megaton boyutta Kanada ve Amerika'da uygulanmaktadır.

Hidrokarbon rezervlerinde ya da derin tuz formasyonlarında CO₂ depolaması, genellikle karbondiyoksitin sıvı ya da süperkritik faza geldiği sıcaklık ve çevre basıncının bulunduğu 800 m altındaki derinliklerde yer edinmesi beklenir. Bu koşullar altında CO₂ yoğunluğu, su yoğunluğunun %50-80'i arasında değişecektir, ki bu da karbondiyoksiti yukarıya doğru itmeye eğimli kaldırma kuvvetleri ile sonuçlanan bazı ham petrolerin yoğunluğuna yakındır. Sonuç olarak, seçilen depo rezervuarının üzerindeki iyi bir örtü kayacının bulunması, karbondiyoksitin yeraltındaki kapanında kalmasını sağlamak için önemlidir. Yeraltına enjeksiyon yapıldığında CO₂, in situ akışkanları yerine geçerek gözenekleri doldurur. Petrol ve gaz rezervlerinde karbondiyoksitin in situ akışkanları yerine geçmesi, çoğu boşluk hacminin CO₂ depolaması için uygun duruma gelmesi ile sonuçlanır.



Şekil T6

Tuz formasyonlarında muhtemel depolama hacmi hesapları daha düşük olur. Toplam kaya hacminin %30'u gibi düşük bir orandadır.

Depo formasyonuna enjeksiyon yapıldığında, tutulan fraksiyon fiziksel ve jeokimyasal kapan mekanizmalarının kombinasyonuna bağlıdır. Karbondioksitin yukarıya göçünü engelleyecek fiziksel kapan, depo formasyonu üzerindeki şistli ve killi kaya katmanı ile sağlanabilir. Bu geçirimsiz tabaka, örtü kayasıdır. Ek olarak fiziksel kapan, karbondioksiti formasyonun gözeneklerinde tutabilecek kılcal kuvvetler ile de sağlanabilir. Ancak çoğu durumda, karbondioksitin örtü kaya altında yanal göçüne olanak tanımak için formasyonun bir veya daha fazla köşesinden açık bırakılır. Bu durumlarda ek mekanizmalar, enjekte karbondioksitin uzun vadeli kapanları için önemlidir.

Jeokimyasal kapan olarak bilinen mekanizmalar, karbondioksitin in situ akışkanları ve ana kaya ile reaksiyona girmesiyle oluşur. İlk olarak CO₂, in situ akışkanları içerisinde çözünür. Bu olay meydana gelirken (yüzlerce yıldan binlerce yıla kadar zaman periyodunda), CO₂ ile doymuş su, daha yoğun bir duruma gelir ve böylece formasyon içerisine çöker. Bundan sonra iyonik türden kayaç mineralleri ile çözülmüş CO₂ arasında kimyasal reaksiyonlar sonucu enjekte karbondioksitin bir kısmı, milyonlarca yıl boyunca katı karbonat minerallerine dönüşecektir.

Aynı zamanda tercihli olarak karbondioksitin metan gibi gazların yerine geçeceği kömür ya da organikçe zengin şistler üzerine adsorblanması ile de bir başka kapan çeşidi oluşturulur. Bu durumda CO₂, basıncın ve sıcaklığın sabit kaldığı süre zarfında kapanda sıkıştırılacaktır. Bu yöntem, doğal olarak hidrokarbon rezervleri ve tuz formasyonlarındaki CO₂ depolamasından daha sığ derinliklerde yer alır.

Depolama sahalarının kapasitesi ve coğrafi dağılımı

Potansiyel olarak CO₂ depolaması için uygun sedimanter havzalı bölgeler, karada ve denizde olmak üzere tüm yerkürede bulunmaktadır. Bu rapor petrol ve gaz rezervleri, derin tuz formasyonları ve işletilmeyen kömür yataklarını ele almıştır. Diğer muhtemel jeolojik formasyon ya da yapılar (bazalt, petrol veya gaz şistleri, tuz mağaraları ve terkedilmiş madenler gibi), uygun saha özelliklerini sunabilir. Ancak buralarda potansiyel değerlendirmesi için ayrıntılı çalışmalar yapılmamıştır.

Farklı türdeki jeolojik depolama uygulamaları için Tablo 1.2’de teknik potansiyel hesaplamaları verilmiştir. Hesaplamalar ile doğruluk derecesi, bölgesel yer altı-yer üstü ve küresel max-min hesaplamalara bağlıdır.

Tablo 1.2 Çeşitli Jeolojik depolama seçenekleri için depolama kapasitesi. Depolama kapasitesi, ekonomik olmayan depolama seçeneklerini de içerir.

Hazne tipi	En düşük depolama kapasitesi hesaplaması (GtCO ₂)	En yüksek depolama kapasitesi hesaplaması (GtCO ₂)
Petrol ve gaz sahası	675 ^a	900 ^a
İşletilmeyen kömür tabakaları	3-15	200
Derin tuz formasyonları	1000	Belirsiz, ancak muhtemelen 10000

^a Bu rakamlar, henüz keşfedilmemiş petrol ve gaz sahalarının değerlendirmeye dahil edilmesi ile %25 oranında artabilir

Depolama potansiyeli araştırmasının diğer bir yolu ancak, diğer önlem seçeneklerinin yayılımına dair farklı sera gazı stabilizasyon senaryoları ve beklentileri altında, KTD kullanımı ile önlenecek CO₂ miktarı için yeterli olup olmadığını araştırmaktır. KTD için gelecek asırda ekonomik potansiyelin hesaplanan oranı yaklaşık olarak 200-2000 GtCO₂’dir.

Bölge seçimi kriter ve metotları

Bölge belirleme, seçimi ve sonuç tahmini, başarılı bir jeolojik depolama için çok önemlidir. Bölge seçiminden önce jeolojik ortamda, örtü kayacın sızdırmazlığı sağladığı, yeteri kadar geniş ve geçirgen depo formasyonun bulunduğu ve terkedilmiş ya da işletilen kuyuların depo güvenliğini tehlikeye atıp atmayacağı belirlenmelidir.

Petrol ve gaz rezervleri, doğal gaz depolama sahaları ve likit atık düzenleme bölgeleri için geliştirilen teknikler, karbondioksitin jeolojik depolama sahalarını tanımlamak için kullanışlıdır. Karbondioksitin yeraltındaki hareketinin modelleyen bilgisayar programları, bölge belirleme ve seçimine yardımcı olmaktadır. Bu programlar daha önce, petrol ve gaz rezervi mühendislik çalışmaları ve yer altı suyu kaynak araştırmaları gibi uygulamalar için geliştirilmiştir. Bunlar CO₂ depolamasının hem uzun vadede, hem kısa vadedeki sonucunu önceden bildirmek için gerekli birçok fiziksel, kimyasal ve jeokimyasal işlemler gerektirse de, uzun vadedeki sonuçlarını kestirmede güvenilirliğini kanıtlamak için daha çok tecrübeye ihtiyaç vardır. Bundan başka iyi bölge belirleme verileri, modellerin güvenilirliği için önemlidir.

Risk değerlendirmesi ve çevre etkisi

Jeolojik rezervlerdeki CO₂ depolamasında oluşacak sızıntı ile meydana gelen tehlikeler iki geniş kategoride ele alınmıştır: küresel riskler ve bölgesel riskler. Küresel riskler, depo formasyonundan atmosfere bir miktar sızıntının olması halinde iklim değişikliğine önemli katkıda bulunabilecek CO₂ salınımı içerir. Bundan başka, bir depo formasyonundan sızan CO₂ ile, insanlar, ekosistemler ve yer altı suyu için tehlike oluşabilir. Bunlar da bölgesel risklerdir.

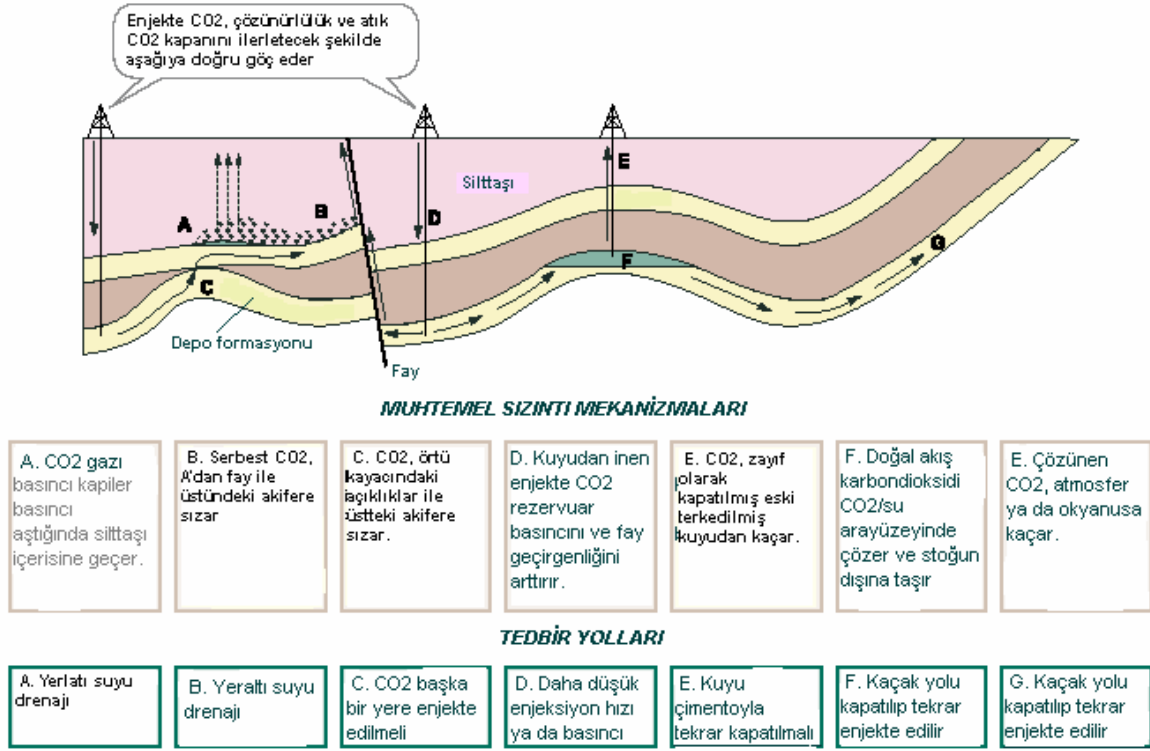
Global riskler açısından şu anki CO₂ depo sahalarının analiz ve gözlemleri, doğal sistemler, mühendislik sistemleri ve modellerine dayanarak, uygun seçilip denetlenen rezervlerdeki saklanan fraksiyon, 100 yıl ve hatta 1000 yıl için %99 oranını aşmaktadır. Diğer mekanizmaların ek kapan işlevi sağlamasıyla zaman içinde azalması beklenen sızıntı riskinin neticesinde, daha uzun zaman dilimini için bile benzer fraksiyonlar elde edilmiştir.

Bölgesel riskler açısından, ne tür bir sızıntı oluşabileceğine dair iki çeşit senaryo vardır: Birinci durum, enjeksiyon kuyusu başarısızlığı ya da terkedilmiş kuyulardan çıkan sızıntının beklenmedik ve hızlı CO₂ salınımına yol açması. Bu salınım türü, hemen ortaya çıkarılmalı ve kuyu püskürmeleri için bugün mevcut olan teknikler kullanılarak

durdurulmalıdır. Bu yolla oluşacak tehlikeler, ilk olarak salınımın olduğu anda çevrede bulunan ya da püskürmeyi kontrol etmek için çağırılan işçileri etkileyecektir. Havadaki %7-10'dan fazla CO₂ konsantrasyonu, insan hayatı ve sağlığı için hemen tehlike oluşturacaktır. Enjekte edilen toplam miktara oranla çok küçük bir oran olacak salınan bu CO₂ miktarını zaptetmek, saatler ve hatta günler alabilir. Bu türden tehlikeler, mühendislik ve idari denetimler ile petrol ve gaz endüstrisinde etkin olarak düzenli kontrol altındadır.

İkinci bir senaryoda sızıntı, belirlenmemiş faylar, kırıklar ya da sızıntının yüzeye aşamalı ve daha dağınık bir şekilde salındığı sızıntı kuyuları boyunca meydana gelebilir. Bu durumda oluşacak tehlikeler, ilk olarak içme suyu akiferlerini ve su tablası ile yeryüzü arasında karbondioksitin biriktiği zondaki ekosistemleri etkileyecektir. Yer altı suyu, hem karbondioksitin akifere direkt olarak sızması ile, hem de enjeksiyon işlemi karbondioksitin yer değiştirmesi sonucu akiferlere giren brineller (tuzlu su) ile etkilenebilir. Ayrıca toprakta asitleşme ve oksijenin yer değişimi de meydana gelebilir. İnsanlar denizde meydana gelebilecek bir sızıntıdan, karadakinine oranla çok daha az etkilenecektir. Sızıntı yolları, birkaç teknik ile ve rezervin nitelendirilmesi ile belirlenebilir. Şekil T7'de bir tuz formasyonu için muhtemel sızıntı yolları gösterilmektedir. Muhtemel sızıntı yolları bilindiğinde, olası sızıntı mevkisine monitörleme ve iyileştirme stratejileri uyarlanabilir.

Dikkatli depolama sistem tasarlaması ve mevkilendirmesi, sızıntıyı erken ortaya çıkarma metotları ile beraber (tercihen, CO₂ zemin yüzeyine varmadan önce müdahale edilecek uzunluk), dağınık sızıntı ile ilişkili tehkeleri azaltmak için etkili yöntemlerdir. Sızıntı ortaya çıkarıldığında, bunu durdurmak ya da kontrol altına almak için bazı iyileştirme teknikleri mevcuttur. Sızıntı türüne bağlı olarak bu teknikler, standart kuyu onarım teknikleri ya da yeraltında sığ bir akifere sızmadan durdurulması yoluyla karbondioksitin çıkarılmasını kapsar.



Şekil T7 Tuz formasyonundaki enjekte CO₂ için muhtemel sızıntı yolları ve iyileştirme teknikleri. İyileştirme tekniği, rezervde belirlenen muhtemel sızıntı yollarına bağlıdır.

Bundan başka topraktan ve yer altı suyundan karbondioksitin uzaklaştırılması için teknikler de mevcuttur. Ancak, daha masraflıdır. CO₂ depolamasında kullanılacak bu tekniklerin tecrübesi, sonucu göstermek ve maliyeti hesaplamak için gerekecektir.

Monitörleme ve verifikasyon

Monitörleme, jeolojik depolama projelerinde bütün risk yönetimi stratejilerinin önemli bir parçasıdır. Standart prosedür ve protokoller henüz geliştirilmemiştir. Ancak teknoloji ilerledikçe, lokal riskler ve düzenlemelere bağlı olarak gelişmesi beklenmektedir. Ancak, enjeksiyon hızı ve enjeksiyon kuyusu basıncı gibi bazı parametrelerin usul olarak ölçülmesi beklenmektedir. Tekrarlanan sismik ölçümler, karbondioksitin yeraltındaki göçünü izlemek için yararlı olmaktadır. Gravite ve elektrik ölçümleri gibi yeni teknikler de kullanılabilir. Yer altı suyu numunesi ile zemin yüzeyi ve su tablası arasındaki toprak, direkt olarak CO₂ sızıntısını ortaya çıkarmak için kullanışlı olabilir. Enjeksiyon kuyularına yerleştirilecek alarmlı karbondioksit sensörleri ile sızıntının saptanması ve işçi güvenliği sağlanabilir.

Tüm monitörleme teknikleri diğer uygulamalarda uyarlanmasından sonra, jeolojik depolamaya dair hassaslık, çözüm ve güvenilirlik açısından değerlendirilmeli ve test edilmelidirler. Bulunan tüm endüstriyel ölçekli projeler ile pilot projeler, gelişim ile bu ve diğer monitörleme tekniklerini denemeye yönelik programlar içerir. CO₂ depolaması için verilen uzun zaman diliminde, çok uzun periyotlarda bölge monitörlenmesi gereklidir.

Yasal sorunlar

Bugün ancak birkaç ülkede karasal jeolojik depolama için yasal ve düzenleyici çatı geliştirilmiştir. İlgili yasalar, petrol yasaları, içme suyu yasaları ile madencilik düzenlemeleridir.

Alışlagelmiş, uluslar arası yasaların genel prensiplerine göre, milletler kendi topraklarını CO₂ depolama gibi faaliyetlerde bağımsızca kullanabilir ve kendi yargılama yetkileri altında çalıştırabilirler (hem jeolojik, hem okyanusal).

Bugün karbondioksitin denizel ortamda enjeksiyonu uygulaması üzerine (okyanusa ya da deniz-altı yataklara) birkaç antlaşma bulunmaktadır (özellikle Deniz Yasası UN Konresi ve OSPAR Kongreleri). Tüm bu antlaşmalarda karbondioksitin jeolojik depolamasına özgü bir taslak oluşturulmamıştır.

Jeolojik depolama maliyeti

Jeolojik depolama için gereken teknoloji ve ekipman, petrol ve gaz endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, karasal ya da denizel gibi bölgeye özgü etkenler, rezervuar derinliği ve depo formasyonun jeolojik karakteristikleri gibi (geçirimsizlik ve formasyon kalınlığı vb.) etkenlere bağlı olarak maliyet önemli değişiklik göstermektedir.

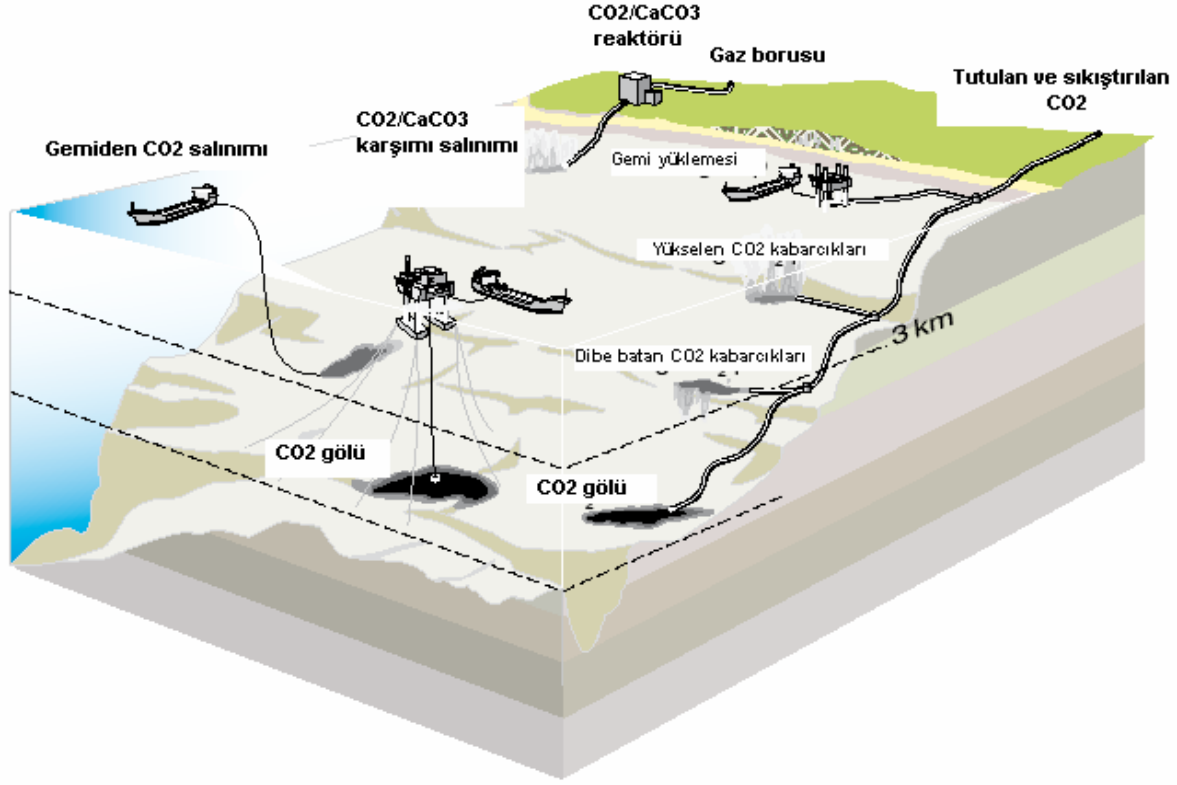
Tuz formasyonları ile tüketilmiş petrol ve gaz sahalarında depolama maliyeti hesaplamalarına göre, enjekte edilen 1 ton CO₂ için maliyeti, 0.5-8 US\$ arasında değişmektedir. Monitörleme masrafları olarak 0.1-0.3 US\$/tCO₂ dahildir. En düşük maliyet karada, sık, yüksek permeabiliteli rezervler ve/veya kuyuların ve altyapının tekrar kullanılacak petrol ve gaz arazilerinden mevcut olduğu depolama sahalarında sağlanır.

Depolama EOR, ECBM veya muhtemel Geliştirilmiş Gaz Kurtarımı ile birlikte uygulandığında karbondioksitin ekonomik değeri, KTD maliyetini düşürebilir. 2003'teki petrol fiyatları ve verilerine dayanarak, karada CO₂ depolama ile EOR için geliştirilmiş petrol üretiminde 10-16 US\$/tCO₂ (37-59 US\$/tC) kar elde edilebilir (jeolojik depolama

masrafları dahil). Halen gelişim safhasındaki EGR ve ECBM için gerçek tecrübeye dayalı güvenilir maliyet verileri henüz edinilmemiştir. Ancak nasıl olursa olsun, gelişmiş petrol üretiminin ekonomik kazancı, kesinlikle petrol ve gaz fiyatlarına bağlıdır. Bu açıdan bu raporda literatür dayanağı olarak 2003'ten sonraki dünya petrol ve gaz fiyatları hesaba katılmamıştır ve petrol fiyatı bir varil için 15-20 US\$ olarak ele alınmıştır. Bir KTD projesinin uygulama ömrü boyunca olabilecek fiyat artışları ile, bu raporda belirtilen karbondioksit ekonomik değeri de daha yüksek olabilir.

Okyanusal Depolama

Muhtemel bir CO₂ depolama yöntemi de, karbondioksitin yüzyıllar boyunca atmosferden uzaklaştırılacağı derin okyanuslara (1000 m'den daha büyük derinliklerde) direkt olarak enjekte edilmesidir. Bu da karbondioksitin borular ya da gemiler aracılığı ile, su sütununda veya deniz tabanında enjekte edileceği depolama sahasına taşınmasıyla başarılabilir. Dağılmış ve çözülmüş CO₂, sonradan global karbon döngüsünün bir parçası haline gelebilir. Şekil T8'de uygulanabilecek temel metotların bir kısmı gösterilmiştir. Okyanusal depolama, henüz bir pilot ölçekte konumlandırılmamış ya da denenmemiştir ve halen araştırma fazındadır. Ancak küçük ölçekteki saha deneyimi ile CO₂ okyanusal depolamanın 25 yıllık teorik, laboratuvar ve modelleme çalışmaları bulunmaktadır.



Şekil T8 Okyanusal depolama metotları.

Depolama mekanizmaları ve teknolojisi

Okyanuslar, yeryüzünün yaklaşık dörtte üçün kaplamakta ve ortalama 3800 m derinliğe sahiptirler. Karbondioksitin suda çözünabilir olmasından dolayı atmosfer ile okyanus yüzeyi arasında denge oluşuncaya kadar doğal CO₂ alış-verişi gerçekleşir. Karbondioksitin atmosferdeki konsantrasyonunda artış meydana gelirse, okyanuslar dereceli olarak ek CO₂ hapseder. Bu yolla okyanuslar, son 200 yılda atmosfere salınan antropojenik emisyonların toplam 1300 Gton karbondioksitin (350GtC) yaklaşık 500Gt/CO₂ (140 GtC) gibi bir kısmını tutmuştur. Atmosferde, insan aktivitelerinden kaynaklanan CO₂ konsantrasyonlarının endüstri öncesi düzeye göre artması sonucu, okyanuslar bu dönemde yaklaşık 7GtCO₂/yıl (2 GtC/yıl) karbondioksiti hapsedmektedirler.

Bu karbondioksitlerin büyük bir bölümü, okyanusların üst seviyelerinde tutunmaktadır. Bundan dolayı, suda karbondioksitin asidik özelliği nedeniyle okyanusların pH derecesinde yaklaşık 0.1 oranında azalma meydana gelir. Ancak bugüne dek derin okyanustaki pH derecesinde hemen hemen hiçbir değişim gözlenmemiştir. Yapılan modeller birkaç yüzyıl sonra atmosfere salınan karbondioksitin büyük bir çoğunluğunun

tutulacağını, okyanus yüzeyinde çözünmesiyle derin okyanus sularıyla da karışacağını göstermiştir.

Okyanularda depolanabilecek antropojenik CO₂ miktarına hiçbir uygulamalı fiziki sınır yoktur. Ancak bin yıllık zaman ölçeğinde, depolama miktarı okyanus ile atmosfer arasındaki dengeye bağlı olacaktır. Atmosferde CO₂ konsantrasyonlarının 350 ppmv ile 1000 ppmv arasında dengelenmesi, uygulamalı CO₂ enjeksiyonu olmadığı takdirde 2000 ile 12000 Gton karbondioksitin okyanuslara yerleşmesi anlamına gelecektir. Dolayısıyla bu aralık, enjeksiyon uygulamasıyla depolanan CO₂ için okyanus kapasitesinin üst limitini göstermektedir. Kapasite ayrıca, kabul edilebilir maksimum pH değişimi gibi çevresel faktörler ile etkilenecektir.

Okyanus incelemeleri ve modellerinin analizleri göstermiştir ki, enjekte karbondioksit atmosferden en az birkaç yüzyıl boyunca uzaklaştırılacak ve saklanan(tutulan) fraksiyon da enjeksiyon derinliği ile doğru orantılı olacaktır (Bkn. Tablo 1.3). Tutulan fraksiyonun arttırılmasına ilişkin görüşler, deniz tabanında katı CO₂ hidratları ve/veya sıvı CO₂ göl modeli oluşturulması ve asidik karbondioksiti nötrleştirmek için kireçtaşıdaki gibi alkalın minerallerinin eritilmesine yöneliktir. Karbonat minerallerinin eritilmesi, uygulanabilir ise, okyanustaki pH derecesini ve CO₂ kısmi basıncını en aza indirgeyerek deponun etkinliğini yaklaşık 10.000 yıla kadar çıkarabilir. Ancak bu yaklaşımda büyük miktarda kireçtaşı ve enerjiye ihtiyaç duyulacaktır.

Tablo 1.3 2000'de başlayan üç farklı derinlikte 100 yıl boyunca sürecek enjeksiyon için yedi okyanus modelin simülasyonu ile hesaplanan okyanusal depolamada karbondioksitin tutulan fraksiyonu

YIL	Enjeksiyon derinliği		
	800 m	1500 m	3000 m
2100	0.78 ± 0.06	0.91 ± 0.05	0.99 ± 0.01
2200	0.50 ± 0.06	0.74 ± 0.07	0.94 ± 0.06
2300	0.36 ± 0.06	0.60 ± 0.08	0.87 ± 0.10
2400	0.28 ± 0.07	0.49 ± 0.09	0.79 ± 0.12
2500	0.23 ± 0.07	0.42 ± 0.09	0.71 ± 0.14

Ekolojik ve çevresel etkileri, riskleri

Birkaç Gton karbondioksitin enjeksiyonu, bölgedeki okyanus kimyasında ölçülebilir bir değişiklik meydana getirecektir. Kaldı ki yüzlerce Gton CO₂ enjekte edilirse, enjeksiyon bölgesinde daha büyük değişimler meydana gelir ve neticede tüm okyanus hacminde ölçülebilir değişimler ortaya çıkar. Yedi noktadan 3000 m derinlikteki CO₂ salınımı ve 550

ppmv'de stabilizasyon için %10 indirgeme sağlandığı okyanus depolaması üzerine yorumlanan model simülasyonları, okyanus hacminin yaklaşık %1'inde 0.4'ten yüksek asitlik değişimi (pH değişimi) ortaya koymuştur. Okyanusal depolamanın uygulanmadığı 550 ppmv stabilizasyon durumu ile karşılaştırma yapılırsa, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun yükselmesi sonucunda denge oluşumu için okyanus yüzeyinde 0.25'ten fazla bir pH değişimi tahmin edilmektedir. Her iki durumda da, 0.2-0.4 arasındaki bir pH değişimi, okyanus asitliğinin endüstri öncesi değişiminden önemli miktarda fazla olduğu görülmektedir. Yüzyıllar zarfında okyanus karışımı, enjekte karbondioksitin tecridinde kayıp ile sonuçlanacaktır. Daha fazla karbondioksitin okyanus yüzeyinde bulunmasıyla, okyanusun geniş bölgelerinden atmosfere salınım gerçekleşecektir. Enjekte karbondioksitin okyanustan atmosfere ani ve feci salınımın olacağı bilinen hiçbir mekanizma yoktur.

Deneyler, CO₂ eklenmesi ile deniz organizmalarının zarar göreceğini göstermiştir. CO₂ derecesinin yükselmesinin etkileri, birkaç aya varan zaman ölçeğinde, çoğunlukla okyanus yüzeyine yakın yerlerde yaşayan organizmalar üzerinde araştırılmıştır. Gözlenen fenomeni, ölüm oranının arttığı kadar, kalsifikasyon, üreme, gelişim, sirkülatuar oksijen tedarigi ve hareket yüzdesinde düşüşü göstermektedir. Bu etkiler bazı organizmalarda az CO₂ eklenmesinde dahi görülmektedir. CO₂ gölü ya da enjeksiyon noktasına yakın yerlerde ani ölümlerin olması beklenmektedir. Okyanuslarda direkt CO₂ enjeksiyonunun okyanus organizmaları ve ekosistemler üzerindeki kronik etkileri, henüz geniş okyanus alanları ve büyük zaman diliminde çalışılmamıştır.

Denetli ekosistem deneyleri derin okyanuslarda uygulanmamıştır. Dolayısıyla sadece muhtemel ekosistem etkilerinin başlangıç niteliğinde değerlendirilmesi yapılabilir.

Okyanusal depolama maliyeti

Okyanusal depolamaya ilişkin hiçbir deneyimin bulunmamasına karşın, bazı girişimler karbondioksiti deniz tabanı ya da derin okyanusta bırakan CO₂ depolama projelerinin maliyetlerini hesaplamaya zorlamıştır. CO₂ tutumu ve sahil şeridine taşınması maliyeti (örneğin, boru hattı yoluyla), okyanusal depolama maliyetine dahil edilmemiştir. Ancak denizdeki borular ve gemi masrafı ile ek enerji maliyeti, okyanusal depolama maliyetine dahildir. Okyanusal depolama masrafları Tablo 1.4'te verilmiştir. Bu rakamlar gösterir ki, kısa mesafeler için sabit boru hattı seçeneği, daha ucuza mal olacaktır. Uzak mesafeler için hem hareket halindeki gemiden, hem de gemi aracılığıyla taşınan platformdan yapılan sabit enjeksiyon uygulaması, daha cazip gelmektedir.

Tablo 1.4 3,000 m'den daha derinlikteki okyanusal depolama maliyetleri

Okyanusal depolama metodu	Maliyetler(US\$/tCO ₂ - net enjekte edilen)	
	100 km açıktaki	500 km açıktaki
Sabit boru hattı	6	31
Hareket halindeki gemi/platform*	12-14	13-16

* Hareket halindeki gemi seçeneği için maliyetler, 2,000-2,500 m derinlikte enjeksiyon içindir

Mineral karbonizasyon ve endüstriyel kullanımları

Bu bölümde daha çok iki farklı CO₂ depolama yönteminden bahsedilmiştir. İlki, karbondioksitin kimyasal reaksiyonlar ile katı inorganik karbonatlara dönüşümünü kapsar. İkinci yöntem ise, karbondioksitin çeşitli karbon içerikli kimyasal maddelerin üretimi için direkt ya da kaynak stoğu olarak endüstriyel kullanımı yöntemidir.

Mineral karbonizasyonu: teknoloji, etkileri ve maliyeti

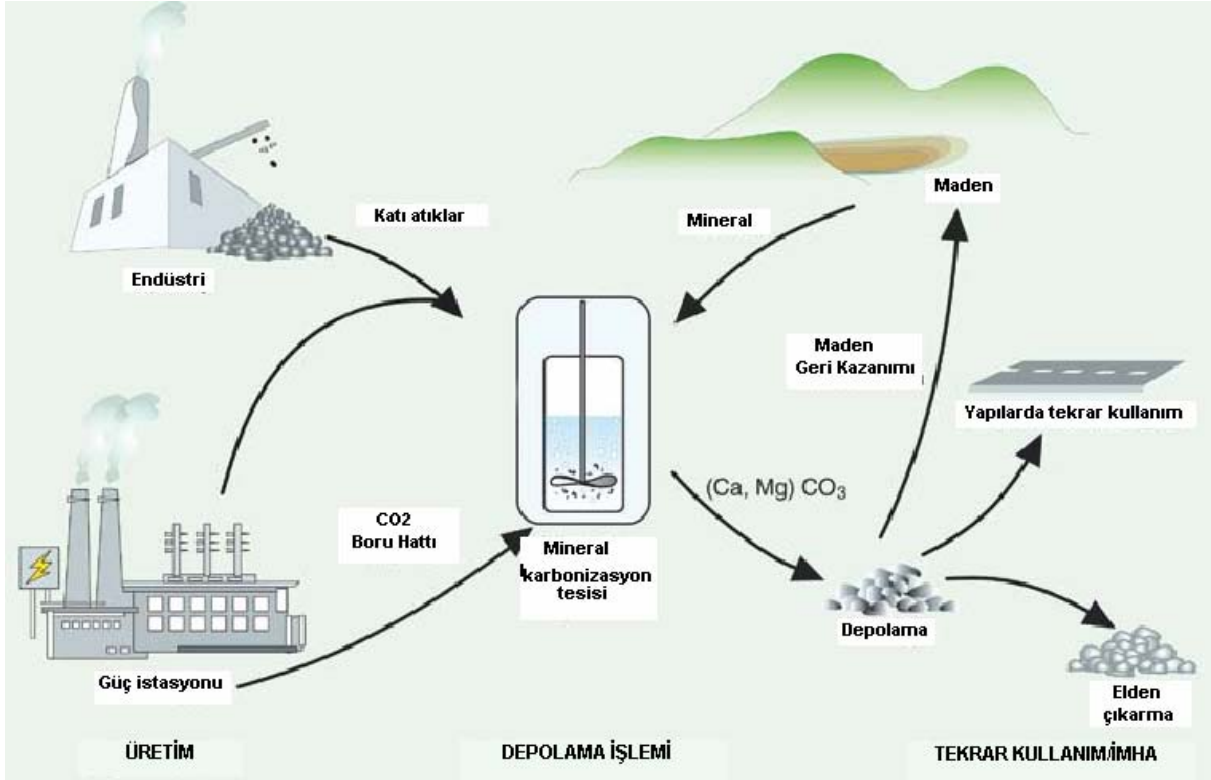
Mineral karbonizasyon, karbondioksitin silikat kayaçlarını (serpantin, olivin) oluşturan kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) gibi alkalın ve alkali-toprak oksitleri kullanılarak tutulmasından bahseder. Bu materyaller ile CO₂ arasındaki kimyasal reaksiyonlar, magnezyum karbonat (MgCO₃) ve kalsiyum karbonat (CaCO₃, çoğunlukla kireçtaşı olarak bilinir) gibi bileşikler oluşturur. Yer kabuğunda bulunan silikat kayaçlarındaki metal oksitlerin miktarı, var olan tüm fosil yakıt rezervlerinin yakılması ile oluşacak karbondioksitin tamamını yerleştirmek için gerekli miktardan daha fazladır. Bu oksitler ayrıca günümüzde paslanmaz çelik çürüf ve külleri gibi bazı endüstriyel atıklarda az miktarda bulunur. Mineral karbonizasyon ile uzun zaman boyunca kalıcı silikat ve karbonatlar elde edilebilir ve silikat mineralleri olarak arazilerde ya da tekrar kullanılmak üzere yapı amaçlı olarak elden çıkarılabilir. Ancak bu gibi tekrar kullanım amaçları için az bir miktardan faydalanılabilir. Karbonizasyon sonrasında CO₂ atmosfere salınmayacaktır. Sonuç olarak düzenleme sahasında kısa bir monitörleme gerekecek ve olabilecek tehlikeler çok düşük ihtimallerde meydana gelecektir. Depolama potansiyelinin bu erken gelişim safhasında hesaplanması zordur. Sınırlamaları, teknik olarak işletilebilen silikat rezervlerinin fraksiyonu, çevresel sorunlar, depolama sahasındaki yasal ve sosyal kısıtlamalar ile belirlenebilir.

Mineral karbonizasyon işlemi doğal olarak meydana gelir ki buna, “weathering” denilir. Doğada, bu işlem çok yavaş gerçekleşir; bu nedenle antropojenik kaynaklardan

tutulan karbondioksite uygulanabilir bir depolama metodu olması için oldukça hızlandırılmalıdır.

Doğal silikatlar ile mineral karbonizasyon teknolojisi araştırma safhasındadır ancak endüstriyel atıklar kullanılan bazı işlemler, demonstrasyon safhasındadır.

Ticari bir süreçte mineral içerikli cevherlerinin işletilme, ezilme, öğütülme ve sonra da bir tutum tesisinden yoğun CO₂ akışını karşılayan santrale taşınması gerekir.



Şekil T9 Silikat kayaçları ya da endüstriyel atıkların mineral karbonizasyon ile ilişkili materyal değişim ve işlem basamakları(Courtesy ECN).

Karbonizasyon işlemi için tutum santralinin %30-50'si kadar bir enerji çıktısı gereklidir. CO₂ tutumu için ek enerji ekipmanları düşünülürse, mineral karbonizasyonlu bir KTD sistemi, tutum veya mineral karbonizasyon içermeyen bir santralden her kilowatt için %60-180 daha fazla enerji girdisine gereksinim duyar. Bu enerji ekipmanları, tüm sistem için önlenen her CO₂ tonu için maliyeti önemli derecede artırır. Bugüne kadar yapılan en iyi çalışma, doğal silikat olivinin yaş karbonizasyonudur. Bu işlem için hesaplanan maliyet, toplam minerelleştirme için yaklaşık 50-100 US\$/tCO₂'dir (ayrıca CO₂ tutum ve nakliye masrafları, ancak ek enerji ekipmanları hesaba katılmıştır). Mineral karbonizasyon işlemi, işlenen karbondioksitin bir tonu için 1.6-4.7 ton silikat gerektirir ve karbonat olarak

depolanan bir ton CO₂ için 2.6-4.7 ton elden çıkarılacak materyal üretilir. Bundan dolayı günümüzde büyük ölçekteki açık maden işletmelerine benzer çevresel etkileri bulunan geniş bir işlem gerçekleşir. Serpantinler ayrıca, asbestin doğal bir türü olan krosotiller de içerir. Ancak mineral karbonizasyonun ürünleri, krosotilin en reaktif bileşen olmasından dolayı, krosotil bulundurmazlar. Krosotiller, karbonatlara dönüşen ilk materyallerdir.

Mineral karbonizasyonun depolama potansiyeli hesaplamaları verilmeden önce, bir dizi sorunun açıklığa kavuşturulması gerekir. Sorunlar, büyük ölçeklerde teknik uygunluk değerlendirmesi ve enerji ekipmanlarının karşılanmasıdır. Ayrıca CO₂ depolaması için teknik ve ekonomik olarak işletilebilir silikat rezervlerinin fraksiyonu da değerlendirilmelidir. Maden işletmesinin çevresel etkileri, atık imhası ve ürün depolaması da potansiyeli kısıtlamaktadır. Çevresel sorunlar ile teknik olarak işletilebilecek silikat rezervlerinin miktarının bilinmemesinden dolayı mineral karbonizasyonun yapılabileceği ölçek şu aşamada belirlenemez.

Endüstriyel kullanımlar

Bahçecilik endüstrisi, soğutmacılık, yiyecek ambalajlama, meşrubat, kaynakçılık ve yangın söndürücüler için olduğu gibi karbondioksitin direkt olarak kullanıldığı çok sayıda teknolojik uygulamalar olduğu kadar, üretilen ve metanol üretiminde karbondioksitin reaktif olarak kullanıldığı biyolojik ve kimyasal işlemler, karbondioksitin endüstriyel kullanımları kapsamındadır. Günümüzde CO₂, EOR için kullanımı hariç, yaklaşık 120 MtCO₂/yıl gibi bir oranda dünya genelinde kullanılmaktadır. Bunun bir çoğu, gübre imalatında ve diğer ürünlerde yararlanılan üretilen için kullanılır. Bir kısım karbondioksit doğal kuyulardan çıkarılır ve bir kısmı da, üretim işleminin bir parçası olarak karbondioksiti tutan endüstriyel kaynaklardan –genellikle ammonia ve hidrojen üretim santralleri gibi yüksek konsantrasyonlu kaynaklar- edinilir.

Karbondioksitin endüstriyel kullanımı, uygulama olarak, “kimyasal karbon havuzu (carbon chemical pool)”nda depolanmasından dolayı karbondioksitin atmosferde toplanmasını önlemeye katkıda bulunur. Ancak iklim değişikliğini önleme yöntemi olarak bu seçenek, sadece depolanan karbondioksitin miktarı ve süresi önemli düzeyde olur ise ve CO₂ emisyonlarının gerçek toplam azalımı gerçekleşecek ise anlamlı olur. Bu yolla günümüzde endüstriyel işlemlerde kullanılan karbondioksitin büyük çoğunluğu, günlerden aylara değişen zamanlarda depolama ömrüne sahip olurlar. Depolanan karbon, sonradan karbondioksite indirgenir ve tekrar atmosfere kaçar. Bu gibi kısa zaman diliminde, iklim değişikliğini

indirgemeye yönelik anlamlı bir katkı sağlanamaz. Ek olarak, 120 MtCO₂/yıl gibi toplam endüstriyel kullanım miktarı, esas antropojenik kaynaklarda meydana gelen emisyonlarla karşılaştırıldığında çok düşük seviyede kalır.

Diğer bir önemli soru, karbondioksitin endüstriyel kullanımlarının, diğer endüstriyel işlem veya ürünler için yer değiştirmesi ile sonuçtaki net CO₂ emisyonlarının indirgenmesini sağlayıp sağlamayacağıdır. Bu da ancak, enerji için gerçek sistem sınırlarının ve CO₂ kullanım işlemlerinin malzeme dengelerinin ele alınması ile ve karbondioksitin önerilen kullanımının ayrıntılı yaşam döngüsü analizlerinin ortaya konulması ile değerlendirilebilir. Bu kapsamdaki literatür sınırlıdır ancak tam değerlerin hesaplanması da zordur ve çok kez endüstriyel kullanımlar, indirgeme sağlayacağı yerde toplam emisyonlarda bir artışa neden olabilir.

Maliyet ve ekonomik potansiyel

Sera gazı emisyonlarının kontrolü için gelecekteki gereksinimlerin zorunluluğu ve KTD sistemlerinin beklenen maliyeti, büyük bir alanda, diğer sera gazı indirgeme yöntemlerine ilişkin KTD teknolojilerinin gelecekteki yaygınlığını belirleyecektir. Bu raporda hesaplanan maliyetler, sadece piyasa fiyatlarını kapsamakta ve çevresel zararlar ile KTD'nin kullanımına ilişkin daha geniş sosyal masrafları içermemektedir.

KTD sistemlerinin maliyeti

Daha önceden de bahsedildiği gibi, halen tamamen KTD sistemiyle üniteli CO₂ tutum, taşıma ve depolama kombinasyonuna dair küçük bir deneyim bulunmaktadır. Üstelik bir kısım endüstriyel uygulamalar için bazı KTD elemanlarının gelişmiş pazarda bulunmasına rağmen, KTD halen büyük ölçekteki bir elektrik santralinde uygulamaya konulmamıştır.

Literatürde KTD elemanlarının maliyeti için oldukça geniş bir aralık görülmektedir. Bu aralık, ilk olarak bölgeye özgün etkenlerin değişkenliğine, özellikle KTD'nin kullanıldığı endüstriyel olanaklar ya da güç santrallerinin tasarımı, işletmesi ve mali karakteristiklerine, kullanılan yakıtın maliyetine ve çeşidine, gerekli uzaklığa, CO₂ nakliyesine dair nicelik ve arazi durumuna bağlı olarak değişir. Ek olarak, sonuca ilişkin ve bugünkü ile gelecekteki KTD teknoloji elemanları ile üniteli sistemin maliyetine ilişkin belirsizlik halen sürmektedir.

KTD sistemlerinin genelinde tutum maliyeti (sıkıştırma dahil), en fazla maliyeti olan

elemandır. Elektrik ve yakıt masrafı, ülkeden ülkeye oldukça değişir. Bu gibi etmenler, KTD yönteminin ekonomik uygulamasını etkiler.

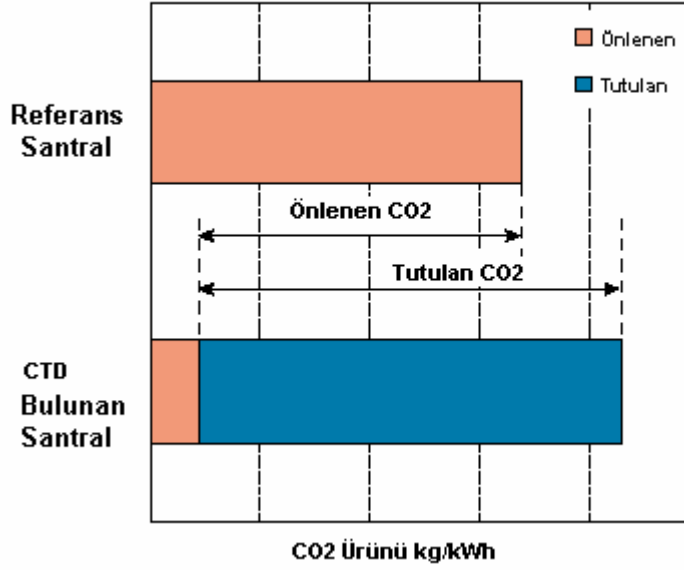
Jeolojik depolamalı santraller için (ve EOR bulunmayan), KTD maliyeti PC santrallerinde 0.02-0.05 US\$/kWh ve NGCC santrallerinde 0.01-0.03 US\$/kWh arasında değişir (her iki santralde *post-combustion*-yanma sonrası tutum yöntemi). IGCC santralleri için (*pre-combustion*-yanma öncesi tutum) KTD maliyeti, KTD içermeyen benzer bir santrale göre 0.01-0.03 US\$/kWh arasında değişir. Tüm elektrik sistemlerinde KTD uygulamasının maliyeti, CO₂ depolama ile EOR kullanıldığında yaklaşık 0.01-0.02 US\$/kWh düşebilir. Çünkü EOR gelirleri kısmen, KTD maliyetini karşılamaktadır. En fazla maliyet indirimi, en çok miktarda karbondioksitin tutulduğu kömür-bazlı santrallerde görülür.

Fosil yakıt bazlı enerji dönüşüm işletmelerine ek olarak, karbondioksit biyokütle yakıtı olarak kullanılan güç santrallerinde de kullanılabilir ya da biyokütle eşyakıtlı (co-firing) fosil yakıt santrallerinde kullanılabilir. Günümüzde biyokütle santralleri küçük ölçekte (100 MW_e'den az). Bu da KTD'li üretimin son maliyetinin fosil alternatiflerine oranla yüksek olması anlamına gelir. Biyokütle için tüm KTD maliyeti, 110 US\$/önlenecek CO₂ tonu eder. Biyokütle yakıtlı ya da eşyakıtlı (co-firing) dönüşüm tesislerine KTD uygulaması, daha düşük ya da negatif CO₂ emisyonlarına götürür. Bu yöntemle CO₂ emisyonları indirgemesinin pazar değerine bağlı olarak maliyet düşebilir. Benzer şekilde CO₂ tutumu, biyokütle yakıtlı H₂ santrallerinde de uygulanabilir. Günde 1 milyon Nm³ H₂ üreten bir santral için belirlenen maliyet, 22-25 US\$/önlenecek tCO₂ 'dir (80-92 US\$/tC). Bu da üretilen H₂ maliyetinde yaklaşık 2.7 US\$ GJ⁻¹ artışa tekabül eder. KTD sistemlerinin maliyetinin genel olarak kömür santrallerininkine benzer bir seviyeye indirilmesi ile, önemli büyük biyokütle santralleri imkan dahilinde ekonomik seviyeden faydalanabilir. Ancak bugüne dek büyük ölçekli biyokütle santrallerine ilişkin az bir deneyim vardır. Bundan dolayı uygulanabilirliği henüz kanıtlanmamıştır ve maliyet ile potansiyelinin hesaplanması güçtür.

KTD uygulaması, santralsiz uygulamalar için aynı derinlikte çalışılmıştır. Çünkü kaynaklar, CO₂ konsantrasyonu ve gaz akım basıncı açısından farklıdır, mevcut maliyet çalışmaları çok büyük farklılıklar göstermiştir. En düşük maliyet, hidrojen üretiminde olduğu gibi CO₂ ayrışmasının, üretim sürecinin zaten bir parçası olduğu işlemlerde elde edilmiştir. Tüm KTD maliyeti, nakil ve depolama dahil, hidrojen üretimini jeolojik depolama uygulaması halinde 0.4-4.4 US\$ GJ⁻¹ ve EOR uygulamasında -2.0-2.8 US\$ GJ⁻¹ arttırmaktadır.

Önlenen CO₂ maliyeti

KTD enerji gereksinimi, net ürünün birimi başına yakıt girdisi miktarını da yükseltmektedir (ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını). Sonuç olarak ürünün her bir biriminde (bir kWh elektrik) edinilen CO₂ miktarı KTD içeren elektrik santrali için, referans santralden daha fazladır (Şekil T10).



Şekil T10

İklim değişikliği indirgenmesine yönelik KTD'nin ekonomik potansiyeli

KTD'nin ekonomik potansiyeli değerlendirmeleri enerjiye ve, ekonomik olarak verimliliğe, yani atmosferde CO₂ konsantrasyonlarının stabilizasyonuna en düşük maliyetli tekniklere yönelen senaryolar bağlamında gelecekte KTD yaygınlığı ve maliyeti üzerinde çalışılan ekonomik modellere dayanmaktadır.

Bu modellemelerden elde edilen nicel sonuçlarda önemli belirsizlikler bulunurken, tüm bu modeller, atmosfere sera gazı emisyonları salınımına yeteri kadar sınırlandırmalar getirecek belli politikaların yokluğunda KTD sistemlerinin büyük ölçekte yayılmasını olanak dışı göstermektedir. Sera gazı emisyon sınırlamalarının getirilmesi ile beraberindeki değerlendirmeler, önemli iklim değişikliği indirgeme rejiminin başlatılmasından itibaren birkaç on yıl sonra KTD sistemlerinin büyük ölçekte yayılması üzerine olabilir. Enerji ve

ekonomik modeller göstermektedir ki, KTD sistemlerinin güç sektöründe yaygınlaşmaması halinde iklim değişikliğine önemli derecede katkıda bulunması imkansızdır. Bunun gerçekleşmesi için karbondioksit indirgeme fiyatının 25-30 US\$/tCO₂'i aşması ya da CO₂ emisyonlarına yönelik eşdeğer bir sınırın getirilmesi gerekmektedir.

Modellemeler ayrıca, KTD sistemlerinin diğer nükleer enerji ve yenilenebilir enerji teknolojileri gibi büyük ölçekli indirgeme seçenekleri ile rekabete girebileceğini belirtmiştir. Bu çalışmalar, indirgeme amaçla KTD bulundurmanın, CO₂ konsantrasyonlarını sabitleştirmede maliyetin %30 ve daha fazla düşürüleceğini göstermiştir. Bir yönde KTD teknolojilerinin mali rekabetçiliği, günümüz enerji altyapısı ile de tutarlılık göstermektedir.