

Okyanusal Depolama

ÇEVİRİ (translation into Turkish Language) :

JEOLojİ MUH. Ender Ragıp ARSLAN

arsender@hotmail.com

Özet

Tutulan karbondioksit, büyük bir kısmının yüzyıllarca atmosferden tecrit edilmiş bir biçimde kalacağı okyanusun büyük derinliklerine enjekte edilebilir. Karbondioksit, okyanusa veya deniz tabanına bırakılması için boru hatları ya da gemi aracılığıyla taşınabilir. Karbondioksitin okyanusal depolamasının 25 yıllık teorik, laboratuvar ve modelleme çalışmaları yanında çok küçük çaplı bir saha deneyimi bulunmaktadır. Ancak okyanusal depolama henüz yaygın olarak ele alınmamış ve titiz bir şekilde test edilmemiştir.

Antropojenik emisyonlara bağlı olarak atmosferde karbondioksit konsantrasyonlarındaki artış sonucunda okyanuslar yaklaşık 7 GtCO₂/yıl (2 GtC/yıl) bir oranı tutmaktadır. Geçen 200 yıl boyunca okyanuslar, 1300 GtCO₂ toplam antropojenik emisyonlardan 500 GtCO₂ tutmuştur. Antropojenik karbondioksit ilk olarak okyanusun üst kısımlarında tutulur ve bundan dolayı okyanus yüzeyinin pH derecesinde yaklaşık 0.1 düşüş gerçekleşir. Bu esnada okyanusun derinliklerinde pH derecesi hemen hemen aynı kalmaktadır. Model çalışmaları karbondioksitin okyanus yüzeyinde dağılarak derin sulara karışması ile birlikte okyanusların birkaç yüzyıldır atmosfere salınan karbondioksitin çoğunluğunu zapt edeceğini göstermektedir.

Okyanuslar ortalama 3,800 m derinliktedir ve dünya yüzeyinin %70'inden fazlasını kapsamaktadır. Bundan dolayı okyanuslara yerleşecek antropojenik karbondioksitin miktarı için pratik hiçbir fiziksel sınır yoktur. Bununla birlikte milenyum zaman ölçeğinde okyanuslarda depolanan miktar, okyanusun atmosfer ile dengesine bağlıdır. Bin yıllık zaman diliminden sonra okyanusların büyük derinliklerine enjekte edilen karbondioksit, atmosfere salındığı miktar ile yaklaşık olarak aynı dengeye ulaşacaktır. Atmosferik karbondioksit konsantrasyonlarının 350'den 1000 ppmv değerine ilerlemesi, neticede okyanuslara yerleşen antropojenik karbondioksitin 2,300 ± 260 Gt'dan 10,700 ± 1,000 Gt'a çıkması anlamına gelir.

Okyanus gözlemleri ve modellerinden yapılan analizler, enjekte karbondioksitin yüzlerce yıl boyunca atmosferden arıtılacağını ve tutulan fraksiyonun daha derin enjeksiyon ile daha uzun vadeli olacağını göstermektedir. Ayrıca daha uzun vadede karbondioksit tecridinin, katı karbondioksit hidratları ve deniz tabanında sıvı karbondioksit gölleri oluşturulması, bundan başka mineral karbonatlarının çözünmesi gibi teknikler kullanılarak karbondioksit çözünürlüğünün arttırılması ile sağlanabileceği görüşü hakimdir. Yüzyıllar zarfında okyanus karışımı, enjekte karbondioksitin azalması ve atmosfer ile karşılıklı alışverişi ile sonuçlanır. Bu da okyanusun geniş bölgelerinden kademeli bir şekilde gerçekleşir. Enjekte karbondioksitin ani veya feci bir salınımına neden olacak bilinen hiçbir mekanizma yoktur.

Birkaç GtCO₂ enjeksiyonu, enjeksiyon bölgesi içerisinde okyanus kimyasında ölçülebilir değişimlere neden olur. Yüzlerce GtCO₂ enjeksiyonu, neticede tüm okyanus hacmi boyunca önemli değişimler meydana getirir.

Yapılan deneyler, enjekte edilen karbondioksitin deniz organizmalarına zarar vereceğini göstermiştir. Artan karbondioksit seviyesinin etkileri çoğunlukla birkaç aya varan zaman ölçeğinde ve okyanus yüzeyinin hemen yakınında yaşayan bazı organizmalar üzerinde çalışılmıştır. Gözlenen fenomena, azalan oranlarda kalsifikasyon, üreme, gelişim, sirkulator oksijen tedariki ve hareket yeteneği ile birlikte zamanla artan ölüm oranı şeklindedir. Bazı organizmalarda bu etkiler, karbondioksitin çok küçük miktarlarında dahi görülmektedir. En hızlı ölüm oranlarının, karbondioksitin enjeksiyon noktalarına veya karbondioksit göllerine yakın çevrede olacağı beklenmektedir. Karbondioksitin uzun vadede birikimlerinde kronik etkiler oluşabilir ve bu etkiler, enjeksiyon sahasından uzak noktalarda da görülebilir. Derin okyanus organizmaları için uzun vadedeki kronik etkiler henüz çalışılmamıştır.

Karbondioksit etkileri, ekosistem bakımından bazı sonuçlara da neden olabilir. Ancak henüz derin okyanuslarda hiçbir ekosistem deneyleri çalışılmamıştır. Bundan dolayı muhtemel ekosistem etkilerine dair sadece temel bir değerlendirme yapılabilir. Ekosistem etkilerinin artan karbondioksit konsantrasyonları ile orantılı olarak artacağı beklenmektedir. Türlerin ve ekosistemlerin sürekli olarak artan karbondioksit seviyelerine nasıl uyum göstereceği halen belirsizdir.

Bir enjeksiyon projesinin kimyasal ve biyolojik monitörlemesi, karbondioksit kabarcıklarının uzaysal ve zamansal değerlendirme gözlemleri ile beraber çözünen materyal miktarının, karbondioksit tecridinin ve bazı muhtemel çevresel etkilerin değerlendirmesine yardımcı olabilir.

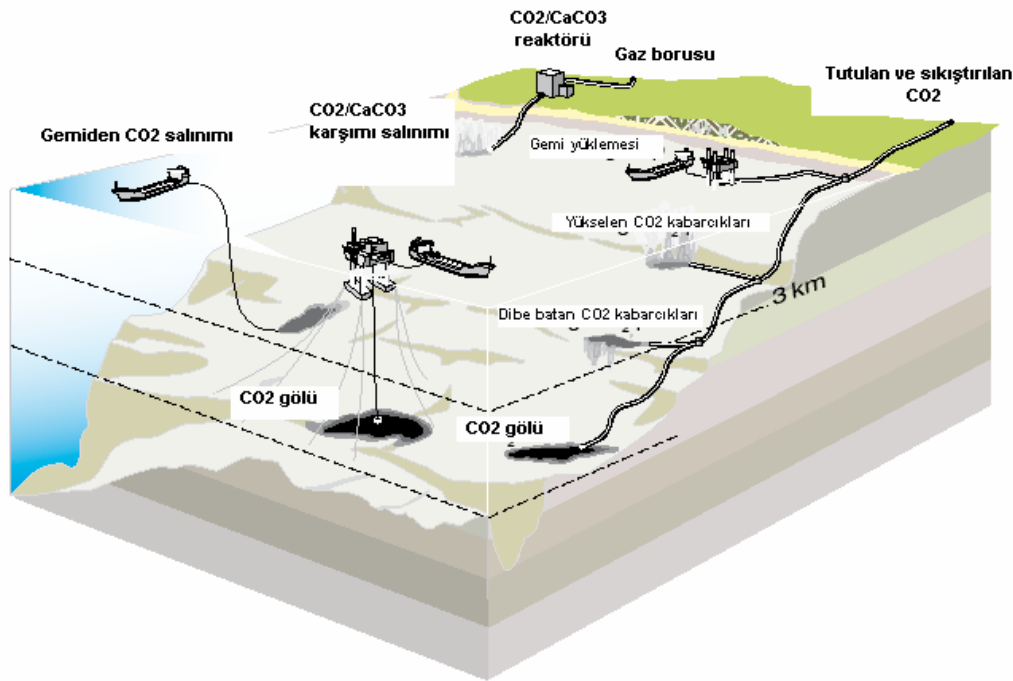
Karbondioksitin su sütununa ve deniz tabanına bırakılmasında tutum ve sıkıştırma/sıvılaştırma işlemlerinin en önemli maliyet faktörleri olacağı düşünülmektedir. Nakil (örn, boru hatları ile veya gemi ile nakil) maliyetinin daha sonraki en yüksek maliyeti oluşturacağı sanılmaktadır. Monitörleme, enjeksiyon vb. maliyetler, diğerleri ile kıyaslandığında daha düşüktür.

Karbondioksitin okyanusal depolamasına ilişkin denizlerle ilgili yasalarda birkaç global ve bölgesel antlaşmalar bulunabilir. Ancak okyanuslarda karbondioksit depolamasının yasal durumu henüz belirginleşmemiştir.

6.1 Giriş

6.1.1 Karbondioksitin okyanuslarda depolanması

Bu raporda, endüstriyel ölçekte uygulanabilen inorganik stratejiler ile okyanuslarda karbondioksit depolaması hakkındaki mevcut bilgiler değerlendirilmektedir. Karbondioksitin okyanusal depolamasını sağlayacak ve arttıracak çeşitli teknolojiler düşünülmektedir (Şekil 6.1). Bir seçenekte tutulan ve sıkıştırılan saf karbondioksit akımının depolanması düşünülmektedir. Tutulup sıkıştırılan karbondioksit gemilere konularak direkt olarak okyanusa enjekte edilebilir veya deniz tabanında biriktirilebilir. Gemilere yüklenen karbondioksit, çekilen bir boru ile dağıtılabılır veya sabit platformlara taşınarak deniz tabanında biriktirilen karbondioksit gölüne bırakılabilir. Oluşturulan karbondioksit gölleri, karbondioksitin su yoğunluğundan daha yoğun bir fazda olacağı 3 km'den daha derin mevkilerde olmalıdır. Bu yöntemlerden herhangi biri prensipte karbonat minerallerinin nötrilizasyonu ile beraber uygulanabilir.

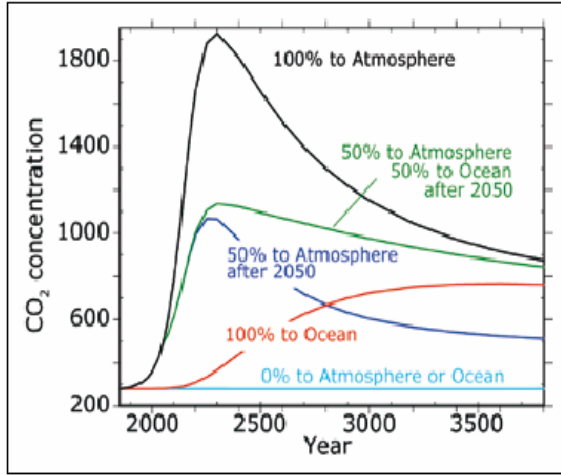


Şekil 6.1 Bu bölümde açıklanan okyanusal depolamanın şematik gösterimi.

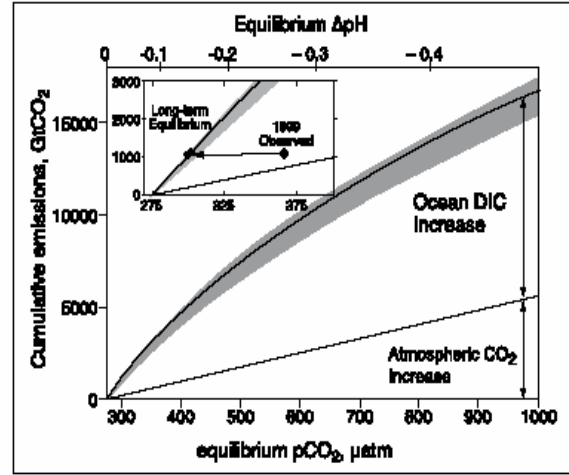
Karbondioksitin okyanusal depolamasının araştırma, geliştirme ve analiz çalışmaları, okyanusal depolamanın iklim değişikimine bir önlem seçeneği olarak uygulamasını etkileyecek

önemli soru ve sorunlar çerçevesinde yapılmaktadır. Okyanusal karbondioksit döngüsünün anlaşılması, karbondioksitin atmosferden yalıtılmış bir şekilde ne kadar süre kalacağını hesaplamak için önemlidir. Bu gibi hesaplamalar, okyanusal depolama seçeneğinin etkililiğini değerlendirmek için kullanılır.

Okyanusun sayısal modelleri, karbondioksitin derin okyanuslara yerleştirilmesi ile karbondioksitin çoğunluğunun yüzyıllar boyunca atmosferden arıtılacağını göstermektedir. Ancak daha uzun zamanlarda okyanus ve atmosfer dengelenecektir. Karbondioksitin okyanuslara direkt olarak enjekte edilmesi ile önümüzdeki birkaç yüzyıl için atmosferdeki maksimum karbondioksit miktarı ve oranı azaltılabilir. Ancak karbondioksit okyanuslara direkt olarak enjekte edilmesi, milenyum ölçeğinde atmosferin karbondioksit içeriğini azaltmayacaktır (Hoffert ve diğ., 1979; Khesghi ve diğ., 1994).



Şekil 6.2 Karbondioksitin atmosfere salınımından veya 3000 m derinlikte okyanusa enjekte edilmesinden kaynaklanan atmosferik karbondioksitin simülasyonu (Khesghi ve Archer, 2004). Emisyonlar 18,000 GtCO₂ kümülatif emisyonlar ile lojistik bir yörüngeyi izlemektedir. Çizgiler, emisyonların %100'ünün atmosfere salınması ile konsantrasyondaki doruk çizgisi, emisyonların %100'ünün okyanuslara salınması ile kırmızı çizgi ve hiçbir emisyonun olmadığı durumda da mavi çizgilerden oluşmaktadır (örn, diğer önlem yaklaşımları da kullanılmıştır). Ayrıca 2050 yılı için atmosferik emisyonlar ve 2050 yılı sonrası için %50 atmosfere, %50 okyanuslara (ya da diğer önlem seçenekleri) salınımın olduğu durumlar da eklenmiştir. Okyanusal enjeksiyon, atmosferik salınımdan daha düşük ancak diğer önlem seçenekleri kullanıldığında daha yüksek pik konsantrasyonları gösterir (örn, yenilenebilir veya sürekli depolama).



Şekil 6.3 Karbondioksitin okyanus ve atmosfer arasındaki dengesi. Milenyum zaman ölçeğinde okyanusların tamamen karışması sonucu, neticede okyanuslarda çözünmüş inorganik karbon olarak tecrit edecek emisyon hacmi ile atmosfer ve okyanus arasında bölünmüş kümülatif karbondioksit emisyonları oluşur. Okyanustaki bölüm, karbonat kimyasal eşitliğine göre karbondioksit konsantrasyonuna bağlı olur ve yüzey suyunun sıcaklığındaki değişimlere karşı sınırlı duyarlılığı bulunur (1,5-4,5 C iklim duyarlılık aralığı için şekilde gri alan ile gösterilmiştir) (Khesghi ve diğ., 2005; Khesghi, 2004a). 275 ppm pCO₂ den değerlendirilmiştir. Bu hesaplama, yüzyıllar zaman ölçeğine dayanmaktadır ve birkaç milenyum boyunca okyanusun karbondioksit tecridini arttıran okyanus alkalinitesindeki değişim göz ardı edilmiştir (Archer ve diğ., 1997).

Karbondioksitin okyanusal depolama teknolojilerine gelişim için bir temel oluşturabilecek derin denizlerde yönetimi üzerine sınırlı bir deneyim mevcuttur. Bu seçeneğin yayılmasından önce, ilgili teknolojinin daha fazla gelişime ve yerinde deney yapılmasına ihtiyaç duyulur. Gelişimin sınırlı seviyesi ile ilişkili olarak okyanusal depolama teknolojilerinin maliyet hesaplamaları da ilkel seviyededir. Bununla birlikte karbondioksitin

tutum ve derin denizlere nakli için gereken maliyet ile kıyaslandığında daha düşük olacağı beklenmektedir. Derin denizin yakın mevkide bulunması önemli bir etkindir ancak derin okyanuslar birçok karbondioksit kaynağına uzakta bulunmaktadır. Okyanusal depolama karbondioksitin gemi ile veya derin deniz boru hatları ile naklini gerektirir. Boru hatları veya sondaj platformları, özellikle petrol ve gaz uygulamalarında çok büyük derinliklere ulaşabilmektedir. Ancak henüz okyanusal depolamaya ilişkin derinlikte veya ölçekte denenmemiştir. Karbondioksitin okyanuslarda depolanması için yenilemez hiçbir teknik engel görülmemektedir.

Atmosferik CO ₂ stabilizasyon konsantrasyonu (ppmv)	Toplam kümülatif okyanus + atmosfer CO ₂ salınımı (GtCO ₂)	Denge halinde okyanusta depolanan antropojenik CO ₂ miktarı (GtCO ₂)
350	2880 ± 260	2290 ± 260
450	5890 ± 480	4530 ± 480
550	8350 ± 640	6210 ± 640
650	10,460 ± 750	7540 ± 750
750	12,330 ± 840	8630 ± 840
1000	16,380 ± 1000	10,730 ± 1000

Tablo 6.1 Farklı atmosferik stabilizasyon konsantrasyonları için atmosfer-okyanus dengesinden sonra okyanuslara yerleşen ek karbondioksit miktarı. Belirsiz aralık, 1.5°C-4.5°C arasında artan karbondioksitin iklim üzerindeki hassas etkisini temsil etmektedir(Khesghi ve diğ., 2005; Khesghi, 2004a). Bu tablo, karasal biyosferde karbon depolamasının artmış olduğu olasılığını ele alır. Böyle bir artış eğer sürekli ise toplam kümülatif emisyonlarında bir artışa neden olabilir. Bu tablo, antropojenik karbonun okyanusal depolamasını arttıracak olan karbonat minerallerinin planlanmış veya doğal çözünmesini hesaba katmamıştır. Okyanuslarda halihazırda bulunan miktar 500 Gton karbondioksiti aşmaktadır(1994 için 440 GtCO₂(Sabine ve diğ., 2004), ve o tarihten itibaren gerçekleşen karbondioksit absorpsiyonu). Okyanusta depolanan karbondioksitin uzun vadeli miktarı, karbondioksitin başlangıçta atmosfere veya okyanusa salınıp salınmamasından bağımsızdır.

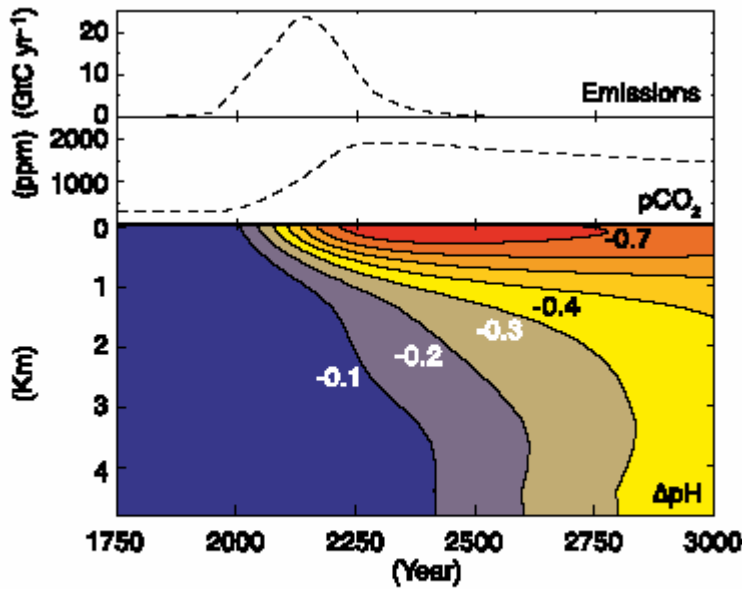
6.1.2 Fiziksel ve kimyasal okyanus bilimine dair bilgiler

Okyanus, atmosfer, bitki ve toprak, global karbon döngüsünün ve aktif olarak karbon alışverişinin başlıca elemanlarıdır(Prentice ve diğ., 2001). Okyanuslar ortalama 3,800 m derinlikte ve dünya yüzeyinin %71'ini kapsamaktadır. Ayrıca atmosferde tutulan karbon miktarının yaklaşık 50 mislini, bitki ve toprakta tutulan karbonun 20 mislini barındırmaktadır.

Okyanuslar, çok geniş hacimleri ve karbondioksitin deniz suyunda çözünerek çeşitli iyon türlerini oluşturması nedeniyle çok fazla miktarda karbondioksit içerir.

Geçen birkaç yüzyıl boyunca atmosferik karbondioksitte meydana gelen artış, karbondioksiti atmosferden okyanuslara sevk eder. Okyanuslar, atmosfere salınan karbondioksit için önemli bir yutak vazifesi görür. 1980-2000 yılları boyunca okyanusların 7 GtCO₂ (2 GtC/yıl) tecrit ettiği ve son 200 yıl boyunca 500 Gton'dan fazla karbondioksiti (135 GtC) tecrit ettiği hesaplanmıştır(Prentice ve diğ., 2001; Sabine ve diğ., 2004).

Okyanusların antropojenik karbondioksiti zapt etmesi, ilk olarak okyanus yüzeyinin kimyasal ortamında bir karışıklığa neden olur. Okyanusta karbondioksit konsantrasyonunun artması sonucu karbonat iyonu konsantrasyonunda ve hidrojen iyonu aktivitesinde bir artış gerçekleşir. Atmosferde karbondioksitin 1800 yılındaki 280 ppm düzeyinden 2000 yılında 380 ppm seviyesine artması, okyanus yüzeyi boyunca 8.2 olan pH seviyesinin yaklaşık 0.1 birim azalmasına neden olmuştur. Atmosferde karbondioksitin daha fazla artması, neticede derin sulara kadar ulaşacak okyanus yüzeyi kimyasında daha büyük değişimlere neden olacaktır. Okyanus kimyasının antropojenik rahatsızlığı, biyolojik aktivitenin yüksek olduğu okyanusun üst seviyelerinde daha fazladır.



Şekil 6.4 Karbondioksitin atmosfere salınımından etkilenen okyanusun pH değişimleri.

Atmosfere ya da okyanusa salınan karbondioksitin çoğunluğu, neticede okyanus kimyasının atmosfer ile dengelendiği duruma kadar okyanuslarda tutulacaktır. Bundan dolayı atmosferik karbondioksit konsantrasyonlarının 280 ppm olan doğal seviye üzerinde durağanlaştırılması, karbondioksitin uzun vadede okyanuslara eklenmesi anlamına gelir.

Dengede okyanuslarda tutulacak olan karbondioksit fraksiyonu atmosferik karbondioksit konsantrasyonuna bağılı olacaktır(Tablo 6.1; Şekil 6.3; Kheshgi ve diğ., 2005; Kheshgi, 2004a).

Okyanusların atmosfer ile denge durumunda karbondioksit absorblama kapasitesi, deniz suyu kimyasının bir fonksiyonudur. On yıllardan yüz yıllara değışen zaman ölçeğinde okyanus yüzey suyu ile derin okyanus suları arasında çözünmüş inorganik karbon alışverişı, okyanusun artan atmosferik karbondioksit konsantrasyonunu tecrit etmesini kısıtlayacak bir engel oluşturmaktadır. Yüzyıllar boyunca (Kheshgi, 2004a) inorganik karbon çözünmesindeki değışimler, tüm okyanus hacmini kümülatif karbondioksit emisyonlarının çoğunluğunu içeren okyanus suları ile karıştıracaktır. Daha uzun zaman diliniminde (milenyum) CaCO_3 çözünmesi, okyanuslara yerleşecek karbondioksitin daha yüksek fraksiyonlarına (%85-92) neden olacaktır(Archer ve diğ., 1997).

6.2 Karbondioksitin okyanusa salınım yöntemleri

6.2.1 Tutulan, sıkıştırılan ve nakil edilen karbondioksitin okyanuslara salınım yöntemleri

6.2.1.1 Temel yaklaşım

Karbondioksit depolamasının temeli, tutulan ve sıkıştırılan karbondioksitin okyanusa veya okyanus tabanına salınması amacıyla derin okyanuslara taşınmasına dayanır. Okyanusa bırakılan karbondioksit, yüzey suyunda çözünecek, dağılacak ve okyanusun karbon döngüsünün bir parçası haline gelecektir.

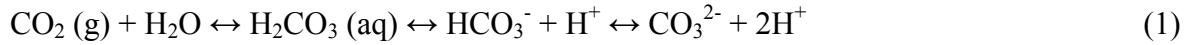
İlk olarak Marchetti (1977) tarafından önerilen görüşte, sıvılaştırılmış karbondioksitin Akdeniz'in Kuzey Atlantik'e eşiğinde enjekte edilmesi ile yüzyıllar boyunca atmosferden uzaklaştırılacağı belirtilmiştir. Bu görüş, karbondioksitin atmosferden arıtılacağı şekilde yüzey suyunun derin sularla yavaş alışverişine dayanır. Okyanusal depolamanın etkililiğı, karbondioksitin atmosferden ne kadar sürede arıtılmış bir şekilde kalacağına dayanır. Yüzyıllar ve milenyum boyunca derin okyanusa bırakılan karbondioksit okyanuslar ile tamamen karışacak ve atmosferik karbondioksit konsantrasyonlarını etkileyecektir. Karbondioksitin derin sulara taşınması hedeflenir. Çünkü yapılan izolasyonun derecesi genellikle okyanus derinliğı ile orantılı olarak artar. Önerilen bu metotlar ile daha etkili bir depolama için karbondioksit, termoklin altında enjekte edilir.

Lokal deniz tabanı topoğrafyasının ve salınımın ayrıntılarına bağılı olarak karbondioksit akımının depolanması, okyanusta çözünmek amacıyla veya batırılarak deniz

tabanında bir göl oluşturma amacıyla planlanabilir. Yüksek konsantrasyonlarda deniz suyunda çözünmüş karbondioksit yoğun fazda kabarcıklar oluşturabilir veya eğimli deniz tabanı boyunca çöküşü sağlanabilir. Eğer salınım yeterli bir derinlikte yapıyor ise, karbondioksit sıvısı dibine çökerek deniz tabanında birikecek, sıvı ve hidrat karışımı içeren bir havuz oluşturacaktır. Kısa vadede boruların döşenmesi, ticari ölçekte yaygın olarak mevcut teknolojiye dayanarak okyanusal karbondioksit salınımı için en uygulanabilir yöntem olarak görülmektedir.

Açıklama 6.1 Karbondioksitin kimyasal özellikleri

Okyanuslar büyük miktarlarda atmosferden karbondioksit absorblar. Çünkü karbondioksit zayıf bir asidik gazdır ve deniz suyunda çözünmüş mineraller okyanusu biraz alkalileştirirler. Atmosferik karbondioksitin okyanus su yüzeyi ile alışverişi, karbondioksit ile deniz suyundaki karbonik asit H_2CO_3 , atmosferde karbondioksitin kısmi basıncı (pCO_2) ve hava/deniz alışveriş hızına bağlı olarak değişir. Karbonik asit reaksiyonları ile bikarbonat iyonu HCO_3^- , karbonat iyonu CO_3^{2-} ve hidronyum iyonu H^+ na ayırır.



Toplam çözünmüş inorganik karbon, karbon içerikli H_2CO_3 , HCO_3^- ve CO_3^{2-} dir. Yüzey suyu ile dengedeki atmosferik karbondioksit konsantrasyonu, toplam çözünmüş inorganik madde, alkalinite, sıcaklık ve tuzluluğa bağlı iyi bilinen kimyasal eşitlik ile hesaplanabilir (Zeebe ve Wolf-Gladrow, 2001).

Karbondioksitin deniz suyuna eklenmesi ile bikarbonat oluşması;



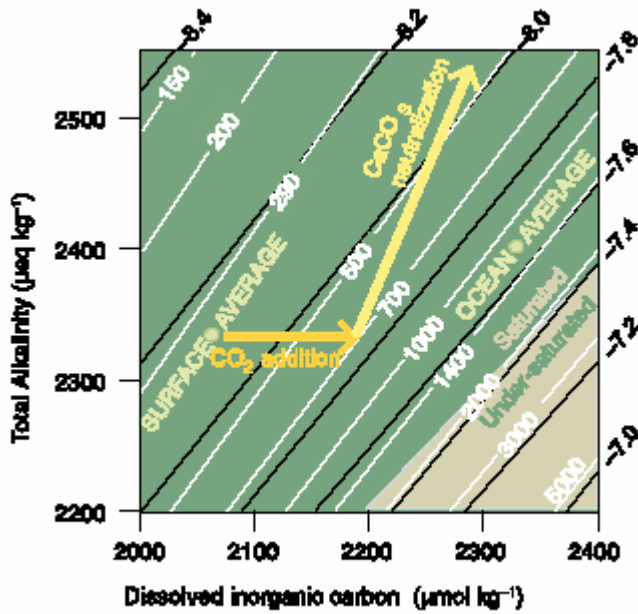
Ayrıca bazen karbondioksit su ile basit bir reaksiyona uğrayabilir;



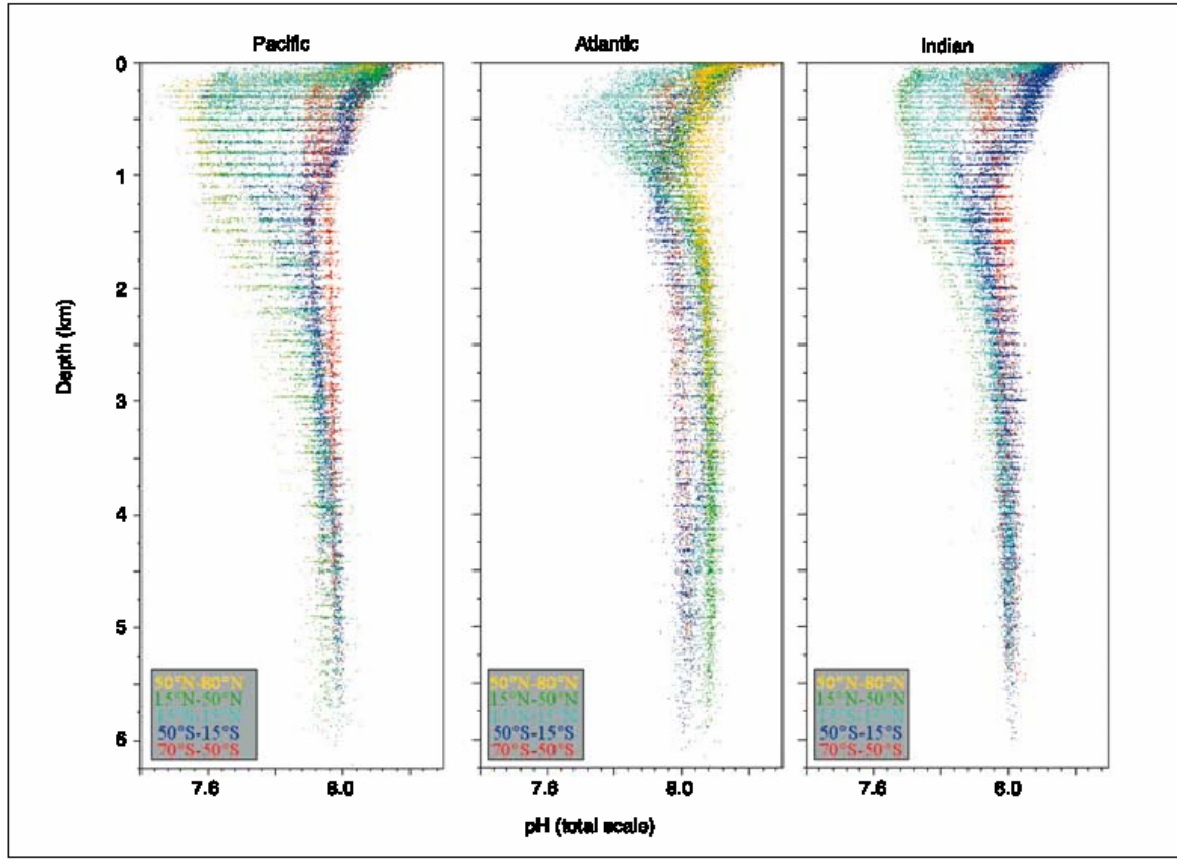
Toplam alkalinite, örneğin, $CaCO_3$ gibi alkaline minerallerinin deniz suyunda aşağıdaki reaksiyon ile çözünmesiyle artar;



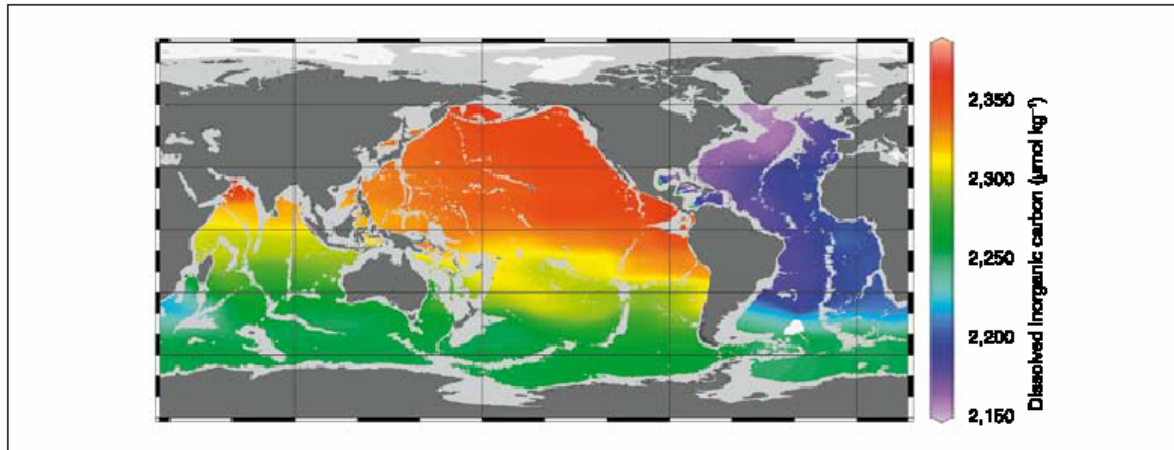
Toplam alkaliniteenin çözülmüş inorganik karbondan daha fazla artması sonucu, Şekil 6.5'te görüldüğü gibi karbondioksitin kısmi basıncında düşüş gerçekleşir. Çünkü çözünen çoğu inorganik karbonlar, CaCO_3 'ün yüzey suyunda çözünmesi ile HCO_3^- meydana getirirler(Bkn. Khesghi, 1995);



Şekil 6.5 15°C sıcaklıktaki okyanus yüzey suyu için bileşim diyagramı(Baes, 1982'den uyarlanmıştır). Beyaz çizgiler, aynı pCO_2 (ppm) değeri ile bileşimleri gösterir; siyah çizgiler aynı pH seviyesi ile bileşimleri gösterir. Bronz bölge, atmosfer basıncı altında kalsite göre az doymuş, yeşil bölge de aşırı doymuş kısmı göstermektedir(kalsit çözünürlülüğü derinlik ile artmaktadır). Yüzey suyu ve ortalama okyanus bileşimi de eklenmiştir. Karbondioksitin eklenmesi, toplam alkaliniteyi değiştirmeden çözülmüş inorganik karbonu artırır; CaCO_3 çözünmesi, hem toplam alkaliniteyi, hem de çözülmüş inorganik karbonu arttırmaktadır.



Şekil 6.6 1990'lı yıllar için açık okyanusların pH değişimi gözlenmiştir (toplam hidrojen ölçeğinde gösterilmiştir; Key ve diğ., 2004). Bu şekilde okyanuslar, üç farklı panele ayrılmıştır. Bu üç panelde aynı ölçeklidir ve ara suların pH derecesinde kuzey-güney değişimlerini göstermek için enlem şeritleri ile renklendirilmiştir. Endüstri öncesi yüzey değerlerinin, 1990'lı yıllardaki pH seviyesinden 0.1 birim daha büyük olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 6.7 3000 m derinlikte çözünmüş toplam inorganik karbon konsantrasyonundaki doğal değişim (Key ve diğ., 2004). Okyanusal karbon konsantrasyonu, derin okyanuslarda organik karbonun oksidasyonundan dolayı derin okyanus sularının Kuzey Atlantik'ten Kuzey Pasifik'e taşınması ile ortalama %10 artar.

6.2.1.3 Farklı formlarda bırakılan karbondioksitin davranışları

Okyanuslara salınan karbondioksitin ortamdaki davranışı, karbondioksitin fiziksel özelliklerine ve salınım için uygulanan metoda bağlıdır. Çözünmüş karbondioksit deniz suyu

yoğunluğunu arttırır(örn, Bradshaw, 1973; Song ve diğ., 2005) ve bu da nakil ve karışımı etkiler.

Karbondioksit kabarcığı dinamikleri, karbondioksitin okyanus su sütununa hangi yol ile bırakıldığına bağlı olarak değişir. Karbondioksit, başlangıçta gaz, sıvı, katı veya katı hidrat formunda olabilir. Karbondioksitin tüm bu formları, belli bir sürede deniz suyunda çözünecektir. Karbondioksitin deniz suyunda çözünme oranı oldukça değişkendir ve karbondioksitin bulunduğu form, suyun derinlik ve sıcaklığına ve lokal su akımının hızına bağlıdır. Yüksek akım oranları, çözünme oranını da arttırır.

Gaz: Karbondioksit potansiyel olarak 500 m derinlikte gaz formunda bırakılabilir. Bu derinlik altında basınçlar, karbondioksitin gaz olarak bulunması için çok yüksek olacaktır. Gaz kabarcıkları, deniz suyundan daha az bir yoğunlukta olduğundan yüzeye doğru yükselmeye çalışacak ve yaklaşık 0.1 cm hr^{-1} ($0.26 \text{ to } 1.1 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Teng ve diğ., 1996) radyal hızla çözünecektir. 9°C 'den daha soğuk sularda kabarcık duvarı üzerinde bir karbondioksit hidrat zarı oluşabilir. Karbondioksit difüzörleri, yüzeye ulaşmadan önce tamamen çözülecek küçüklükte karbondioksit gazı kabarcıkları üretebilir.

Sıvı: Yaklaşık 500 m derinliğin altında karbondioksit, sıvı fazda bulunabilir. Karbondioksit ortalama 2500 m derinliğe kadar deniz suyundan daha az yoğunluktadır. Böylece 2500 m derinlikten daha sıkı ortamlara bırakılan karbondioksit, yüzeye doğru yükselmeye çalışır. Çünkü bu derinlik aralığında okyanus suyu genellikle 9°C 'den soğuktur ve CO_2 hidratları, damlacık duvarı oluşturmaya meyilli olacaktır. Bu koşullar altında damlacıkların çapı, yaklaşık 0.5 cm hr^{-1} ($\approx 3 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) hız ile azalacaktır(Brewer ve diğ., 2002). Bu koşullar altında 0.9 cm yarıçapındaki bir damlacık, tamamen çözünmeden önce bir saat içerisinde yaklaşık 400 m yükselecek; bu kütlenin %90'ı ilk 200 m'de kaybolacaktır(Brewer ve diğ., 2002). Bundan dolayı damlacıkların yaklaşık 100 m derinlik içerisinde çözüleceği karbondioksit difüzörleri tasarlanabilir. Eğer damlacık ortalama 500 m derinliğe ulaşırsa bir gaz kabarcığı haline gelecektir.

Karbondioksit deniz suyundan daha fazla sıkıştırılabilir; yaklaşık 3000 m derinlik altında sıvı karbondioksit, deniz suyundan daha yoğun olur. Kullanılan karbondioksit hortumları, deniz tabanına batacağı şekilde büyük damlacıklar veya deniz tabanına ulaşmadan önce suda çözünecek küçük kabarcıklar oluşturmak için tasarlanabilir.

Katı: Katı karbondioksit, deniz suyundan daha yoğundur ve bundan dolayı dibe çökmeye meyillidir. Katı karbondioksitin yüzeyi deniz suyunda yaklaşık 0.2 cm hr^{-1} hız ile çözünecektir(Aya ve diğ., 1997). Bundan dolayı katı karbondioksitin çok küçük miktarları

deniz tabanına ulaşmadan önce çözünür, büyük kütlesi tamamen çözünmeden önce deniz tabanına ulaşır.

Hidrat: Karbondioksit hidratı, su moleküllerinin her bir karbondioksit molekülünü sararak etrafında bir kafes oluşturduğu karbondioksit formudur. Bu form yaklaşık 400 m derinlik altındaki okyanus sularında oluşabilir. Tamamen oluşmuş bir kristalin karbondioksit hidratı sudan daha yoğundur ve dibe çöker(Aya ve diğ., 2003). Bu kütlenin yüzeyi yaklaşık 0.2 cm hr^{-1} ($0.47\text{-}0.60 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$) hız ile çözünecektir(Rehder ve diğ., 2004; Teng ve diğ., 1999). Hem deniz suyunda tamamen çözünmesi, hem de deniz tabanına batması ile kabarcıklar meydana gelir. Saf karbondioksit hidratı sert bir kristalin katıdır ve bir boru aracılığı ile nakledilemez. Ancak hidrat ve deniz suyundan oluşan hamur benzeri bir karışım oluşturulabilir(Tsouris ve diğ., 2004). Bu karışım, karbondioksit kabarcıkları ve saf karbondioksit hidratı arasında bir çözünme hızına sahip olacaktır.

6.2.1.4 Deniz tabanında oluşturulan karbondioksit gölünün davranışı

Eğer karbondioksit suda daha yoğun olduğu 3000 m altında derinlikteki deniz tabanında sıvı veya hidrat formunda depolanırsa, karbondioksitin uzun vadede depolaması daha etkili olabilir(Bkn. Karbondioksitin fiziksel özellikleri; Ohsumi, 1995; Shindo ve diğ., 1995). Sıvı karbondioksit belli bir derinlikte deniz tabanında bir karbondioksit gölü oluşturacaktır(Ohsumi ve diğ., 1993). Alternatif olarak, tasarlanan bir cihaz ile deniz tabanında bir hidrat yığını veya havuzu meydana getirmesi için karbondioksit hidratı oluşturulabilir(Saji ve diğ., 1992). Bugüne kadar deniz tabanında karbondioksit gölü düşüncesi sadece laboratuarlarda, küçük ölçekli (onlarca litrelik) in situ deneylerinde ve sayısal modellerde çalışılmıştır. Daha büyük ölçekte in situ deneyleri henüz gerçekleştirilmemiştir.

3 km derin deniz tabanına bırakılan karbondioksit, deniz suyundan daha yoğundur ve üzerinde ince bir hidrat tabakasının oluşacağı karbondioksit gölünün birikerek topoğrafik çöküntüleri dolduracağı beklenmektedir. İnce hidrat tabakası çözünmeyi yavaşlatabilir ancak gölü, üzerindeki sudan ayırmaz. Hidrat, üzerindeki su içerisinde çözünecektir (veya karbondioksit gölünün dibine doğru batacaktır). Ancak hidrat tabakası, yeni kristal oluşumları ile sürekli olarak yenilenir(Mori, 1998). Laboratuar deneyleri (Aya ve diğ., 1995) ve küçük çaplı derin okyanus deneyleri (Brewer ve diğ., 1999), derin denizde karbondioksit depolamasının karbondioksit hidrat oluşumuna neden olacağını göstermiştir(ve daha sonra çözünme).

Büyük ölçekte karbondioksit göllerinin davranışlarının belirlenmesi sayısal simülasyonlara dayanır. Çünkü henüz büyük çaplı saha deneyleri yapılmamıştır. 50 m derinliğe sahip bir karbondioksit gölünün lokal okyanus ve deniz tabanı ortamına bağlı olarak 30-400 yıl arasında bir sürede tamamen çözüneceği tahmin edilmektedir. Karbondioksit gölünün çözünmesi için geçen zaman gölün derinliğine, okyanus dibi sınır tabakanın karmaşık dinamiğine ve türbülans özelliğine, karbondioksit hidratının çözünme mekanizmasına ve çözelti karbondioksitin özelliklerine bağlıdır(Haugan ve Alendal, 2005). Bir karbondioksit gölünün ömrü, çukur veya çöküntü alanları içerisinde bulunması gibi kapatıldığı bazı ortamlarda göreceli olarak daha uzun olacaktır(Ohgaki ve Akano, 1992). Çukur alanlarında kuvvetli akıntılar gözlenmiştir(Nakashiki, 1997). Bununla birlikte derin bir çukurda karbondioksit depolamasının yapılan simülasyonları (Kobayashi, 2003), karbondioksitin çözünme hızını yavaşlatarak taban topoğrafyasının dikey momentini ve kütle transferini zayıflattığını göstermiştir. Sakin bir ortamda taşınma difüzyon ile kontrol edilecektir. Şiddetli katmanlaşma durumunda çift difüzyon göl ömrünü uzatabilir. Aksine göl yüzeyi boyunca deniz suyu akıntısı kütle transferini ve çözünmeyi arttıracaktır. Örneğin, 50 m kalınlıktaki bir karbondioksit gölünün ömrü, akıntısız ve tamamen difüzyon sistemi için 0.44 cm/yıl çözünme hızı ile 10,000 yıldan fazla olacağı hesaplanabilir(Ohsumi, 1997). Fer ve Haugan (2003), 0.05 m/s yatay hızdaki hareketin, karbondioksit gölünün 25 kat daha hızlı çözünmesine (12 cm/yıl) neden olacağını ortaya koymuşlardır. Ayrıca 0.20 m/s yatay hızdaki bir okyanus dibi fırtınasının çözünme hızını 170 cm/yıl'a kadar ulaştıracığını belirtmişlerdir.

6.2.2 Karbonat minerallerinin çözünmesi ile karbondioksit depolaması

Binlerce yıldan beri karbondioksitin eklenmesi sonucunda artan deniz suyu asitliği, deniz tabanı sedimentlerindeki karbonat minerallerinin yavaş doğal çözünmesi ile çoğunlukla nötrilize olacaktır. Bu nötrilizasyon, okyanusun pH derecesinde, karbonat iyonları konsantrasyonunda ve pCO_2 oranında az bir değişim ile okyanusun amosferden daha fazla karbondioksit absorplamasına olanak sağlar(Archer ve diğ., 1997, 1998). Karbonat nötrilizasyonunu hızlandırmak ve böylece karbonat minerallerinin çözünmesini ilerletmek amacıyla çeşitli yaklaşımlarda bulunulmuştur. Bu yaklaşımlar, esas olarak karbonat mineralizasyon yönteminden farklıdır. Bu yaklaşımlarda karbonat mineralleri okyanusta çözündürülerek, okyanus alkalinitesinin ve okyanusal depolamanın artırılması amaçlanır. Bu türden bir yaklaşımda çözelti okyanus alkalitesini arttıracak ise karbonatsız mineraller kullanılır. Bu yaklaşımlar (örn, Kheshgi, 1995; Rau ve Caldeira, 1999), önceden

karbondioksit tutum ve nakil basamaklarını gerektirmez. Bununla birlikte bu yaklaşımlar için denizde hiçbir deney yapılmamıştır. Karbondioksitin okyanusal depolamasının artırılması ve okyanusun pH derecesindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar, laboratuvar deneyleri (Morse ve Mackenzie, 1990; Morse ve Arvidson, 2002), hesaplamalar (Khesghi, 1995) ve modellemelere (Caldeira ve Rau, 2000) dayanmaktadır.

Karbonat mineralleri, karbondioksit asitliğinin nötrilizasyonu için başlıca alkalinite kaynağıdır(Khesghi 1995; Rau ve Caldeira, 1999). Karbonat minerallerinin hem tatlı suda, hem deniz suyunda çözünme ve çökelim kinetiğine ilişkin pek çok deney ve gözlem yapılmıştır(Morse ve Mackenzie, 1990; Morse ve Arvidson, 2002). Bununla birlikte deniz yüzeyinde çözünen karbonat mineralleri ve diğer alkalın bileşimleri (Na_2CO_3 gibi), fosil karbondioksit emisyonları ile kıyaslandığında karbonun okyanuslarda depolanması için yeterli miktarlarda bulunmamaktadır(Khesghi, 1995). Bol bulunan karbonat mineralleri okyanus yüzeyinde çözünmemektedir. Okyanus yüzeyi tipik olarak karbonat minerallerine göre aşırı doygundur(Broecker ve Peng, 1982; Emerson ve Archer, 1990; Archer, 1996).

Aşırı doygun su yüzeyi probleminden kaçınmak için Khesghi (1995) kireçtaşlarının kalsine edilmesi ile, hızla çözünebilir özellikteki CaO üretilen reaksiyonu (5) ele almıştır. Eğer kalsine edilmesi için gereken enerji, karbondioksit emisyonuz bir kaynaktan sağlanır ve CaCO_3 'ten salınan karbondioksit tutulup depolanırsa, o halde bu işlem ile okyanusa bırakılan CaO 'nın bir molü için 1.8 mol karbondioksit depolanabilir. Eğer kalsine etme aşamasından edinilen karbondioksit depolanmazsa, CaO 'nın bir molü için 0.8 mol karbondioksit depolanmış olur. Bununla birlikte kalsinasyon işlemine enerji sağlamak için karbondioksit tutumu olmadan kömür kullanılırsa ve kalsinasyon işleminde üretilen karbondioksit tutulmaz ise, CaO 'in bir molü için sadece 0.4 mol karbondioksit depolanmış olur(Khesghi, 1995). Bu yaklaşım, okyanusun yutak özelliğini arttıracaktır ve bir karbondioksit kaynağı ile bağlanmasını veya derin denize nakliyatı gerektirmez. Ancak bu gibi bir işlemde, CaCO_3 'ün süratle tekrar çökmesini önlemek gerekir ki bu da başka bir kritik sorun oluşturur.

Karbonat nötrilizasyon yaklaşımları, büyük miktarlarda karbonat mineralleri gerektirir. Sedimanter karbonatlar 5×10^{17} ton olarak hesaplanan(Berner ve diğ., 1983) bir miktar ile, ki bu miktar fosil yakıt karbon kütlesinden yaklaşık 10,000 kat daha fazladır, bol olarak bulunurlar. Bununla birlikte okyanusta sürekli olarak depolanan antropojenik karbondioksitin her molü için yaklaşık 1.5 mole kadar karbonat minerali çözünmelidir(Caldeira ve Rau, 2000); bundan dolayı kullanılan CaCO_3 kütlesi, depolanan karbondioksit kütlesinin yaklaşık 3.5 katı olacaktır. Dünya genelinde yıllık 3 Gt CaCO_3 işletilmektedir(Khesghi, 1995). Bu sonuçla karbonat nötrilizasyonu yaklaşımlarının yayılması, yaygın bir şekilde madenciliğin ve

kireçtaşı naklinin genişletilmesini gerektirir. İlişkili çevresel sorunlar da orantılı olarak artacaktır. Ayrıca çözülmüş karbonat mineralleri içerisindeki kirleticiler, zararlı etkilere yol açabilir. Bunun üzerine halen araştırmalar yapılmaktadır.

6.2.3 Diğer okyanusal depolama yaklaşımları

Katı hidrat: Yeterli derinlikteki okyanus koşulları altında suyun konsantre karbondioksit ile reaksiyonu sonucu katı hidrat ($\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) oluşur(Løken ve Austvik, 1993; Holdren ve Baldwin, 2001). Rehder ve diğ., (2004), hidratın nispeten seyreltik okyanus sularında süratle çözüleceğini göstermiştir. Saf CO_2 hidratının yoğunluğu, deniz suyunun yoğunluğundan yüksek olacaktır ve bundan dolayı su sütununa salınan karbondioksit, dibe doğru çökmeye başlayacaktır. Saf karbondioksit hidratı sert bir kristalin katıdır ve bundan dolayı bir boru ile taşınmaz. Bundan dolayı akımın sağlanması için sulu karbondioksit çamuru hazırlanmalıdır(Tsouris ve diğ., 2004).

Su- CaCO_3 - CO_2 emülsiyonu: Mineral karbonatı, fiziksel olarak karbondioksitin deniz suyunda emülsiyonlaştırılması ve sürüklenmesi için kullanılabilir(Swerr ve diğ., 2005); Suda karbondioksitin 1:1 CO_2 : CaCO_3 emülsiyonu, pulverize kireçtaşları ile dengede tutulabilir. Emülsiyon kabarcıkları, deniz suyundan %40 daha fazla bir yoğunluğa sahip olacaktır. Emülsiyon kabarcıklarının daha ağır olması nedeniyle, CO_2 çamuru ile kaplı olan CaCO_3 her şekilde okyanus tabanına doğru çökecektir.

Karbonat sedimentlerinde yerleşme: Murray ve diğ., (1997), karbondioksitin deniz tabanında karbonat sedimentleri içerisine yerleşeceğini belirtmiştir. Karbondioksitin okyanustan arıtılmış olarak kalması nedeniyle bu işlem de bir jeolojik depolama şekli olarak sınıflandırılabilir.

Kuru buz torpidoları: Karbondioksit bir gemiden kuru buz olarak okyanus yüzeyine bırakılabilir(Steinberg, 1985). Bunun tek maliyetli işlemi, katı karbondioksit bloklarının üretilmesidir(Murray ve diğ., 1996). 1.5 t m^{-3} yoğunluk ile bu bloklar, hızla deniz tabanına doğru çökecektir ve potansiyel olarak deniz tabanı sedimentleri içerisine yerleşecektir.

Baca gazının direkt enjeksiyonu: Diğer bir öneri, elektrik santrallerinden alınan baca gazının, hiçbir karbondioksit ayırıştırma işlemi yapılmadan direkt olarak derin okyanuslara pompalanmasıdır. Ancak sıkıştırma maliyeti, bu öneriyi uygulanabilir kılmamaktadır.

6.3 Kapasite ve tutulan fraksiyon

6.3.1 Kapasite

Okyanuslarda karbondioksit depolamanın fiziksel kapasitesi, fosil yakıt kaynaklarına göre oldukça büyüktür. Kullanılacak olan kapasite düzeyi maliyet, pCO_2 dengesi ve çevresel sonuçlara dayanmaktadır.

Okyanusların karbondioksit depolama kapasitesi, atmosferik karbondioksit stabilizasyon konsantrasyonlarına ilişkili olarak açıklanabilir. Örneğin, 2,300-10,700 GtCO₂, 350-1000 ppmv arasında değişen atmosferik karbondioksit stabilizasyon konsantrasyonları ile dengede olan okyanuslara eklenebilir (Tablo 6.1, Şekil 6.3; Khesghi ve diğ., 2005; Sorai ve Ohsumi, 2005). Okyanusların karbondioksit depolama kapasitesi, okyanusa alkalinite eklenmesi ile (örn, çözünmüş kireçtaşı) arttırılabilir.

6.3.2 Tutulan fraksiyon ölçüsü

Okyanusal depolamanın etkililiği, farklı yollarla açıklanmıştır (Açıklama 6.3).

Birkaç yüzyıldır derin okyanuslara karışan karbondioksit, okyanus yüzeyine taşınabilir ve atmosfer ile etkileşime girebilir. Karbondioksitçe zengin su, kimyasal denge sağlanıncaya kadar atmosfer ile karbondioksit alışverişine girer. Bu kimyasal dengede enjekte edilen karbondioksitin çoğunluğu, atmosferden artık arıtılmış olarak kalmamasına rağmen okyanuslarda kalır (Tablo 6.1; Şekil 6.3). Atmosfer ile etkileşime giren karbondioksitin, doğal karbon döngüsünün bir parçası olması beklenir.

Enjekte karbondioksitin izolasyon kaybı, enjekte edilen tüm karbondioksitin kaybı demek değildir. 280 ppm CO₂ içeren atmosfer ile kimyasal dengede enjekte edilen karbonun yaklaşık %85'i okyanuslarda kalacaktır. Eğer atmosferik karbondioksit kısmi basınçları 1000 ppm'e yaklaşırsa, enjekte karbondioksitin %66'sı atmosfer ile denge sonrasında okyanuslarda kalır (Tablo 6.1). Böylece okyanusa enjekte edilen karbondioksitin 1/5 – 1/3'ü, uzun vadede atmosfer-okyanus CO₂ dengesine bağlı olarak değişen bu hava fraksiyonu ile atmosfere yerleşecektir (Khesghi, 1995, 2004b). Hava fraksiyonu, okyanusal depolamanın atmosferik bileşimi üzerindeki etkisini ölçmek için uygun bir ölçü olarak kullanılabilir.

Açıklama 6.2 Depolamada tutulan karbondioksitin fraksiyon ölçümleri

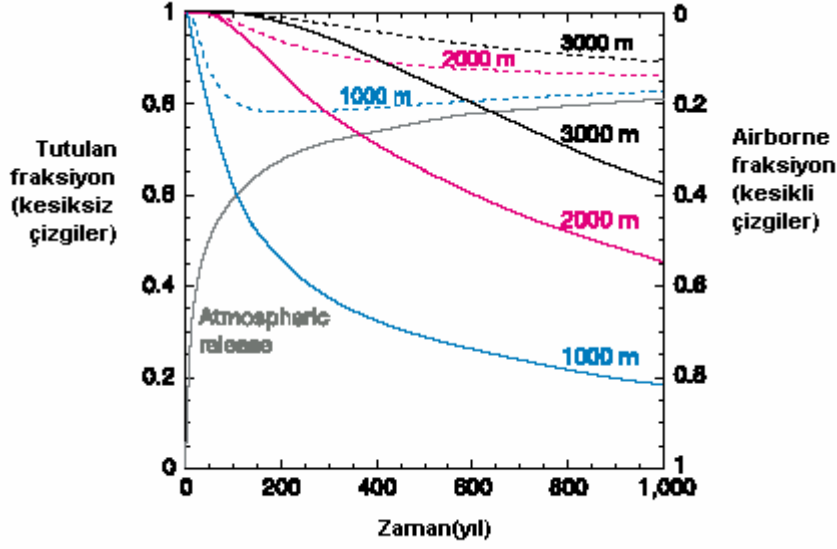
Tutulan fraksiyon: Belirli bir zaman periyodunda depo haznesinde tutulan enjekte karbondioksitin kümülatif miktarının fraksiyonu olarak tanımlanır(Mignone ve diğ., 2004). Tutulan fraksiyon uzun zaman diliniminde sifıra yaklaşır. Enjekte karbondioksitin tümü (az bir bölümü ilk olarak karbonat sedimentleri ile etkileşime girse de) atmosfer ile etkileşime girecektir.

Airborne fraksiyonu: Atmosferin karbondioksit içeriğine eklenen salınmış karbondioksit fraksiyonudur(Khesghi ve Archer, 2004). Atmosferik salınım için airborne fraksiyonu, başlangıçta 1'dir ve eklenen karbondioksitin tüm okyanus ile karışması sonucu yaklaşık 0.2 birim düşer(atmosferik karbondioksit konsantrasyonlarına bağlı olarak) ve karbondioksitin sedimentler ile reaksiyona girmesi ile de yaklaşık 0.08 birim daha düşer(Archer ve diğ., 1997). Derin deniz salınımı için airborne fraksiyonu başlangıçta sıfırdır ve daha sonra atmosferik salınım değerine doğru yaklaşır. Asimptotik airborne fraksiyonunun yüzey suyunun karbondioksit konsantrasyonuna bağlı olduğuna dikkat ediniz(Şekil 6.8).

Bu raporda tutulan fraksiyon, karbondioksitin depolanmış bir şekilde ne kadar kalacağının göstergesi olarak kullanılmıştır. Bundan başka okyanusal karbon depolaması etkililiğinin diğer seçenekler ile kıyaslanması için aşağıdaki ölçüler de kullanılabilir:

Net Mevcut Değer(NPV): Bu yaklaşım (Herzog ve diğ., 2003), ertelenen karbondioksit emisyonu salınımına eşdeğer geçici depolamayı ele alır. Atmosfere salınması ertelenen karbondioksit emisyonları, gelecekteki karbondioksit emisyonu fiyatlarına ve ekonomik indirim oranlarına bağlı olarak değişir. Eğer karbondioksit emisyonlarının fiyatı indirim oranından daha düşük bir seviyede ise, o halde geçici depolamanın ekonomik bir değeri vardır(Herzog ve diğ., 2003).

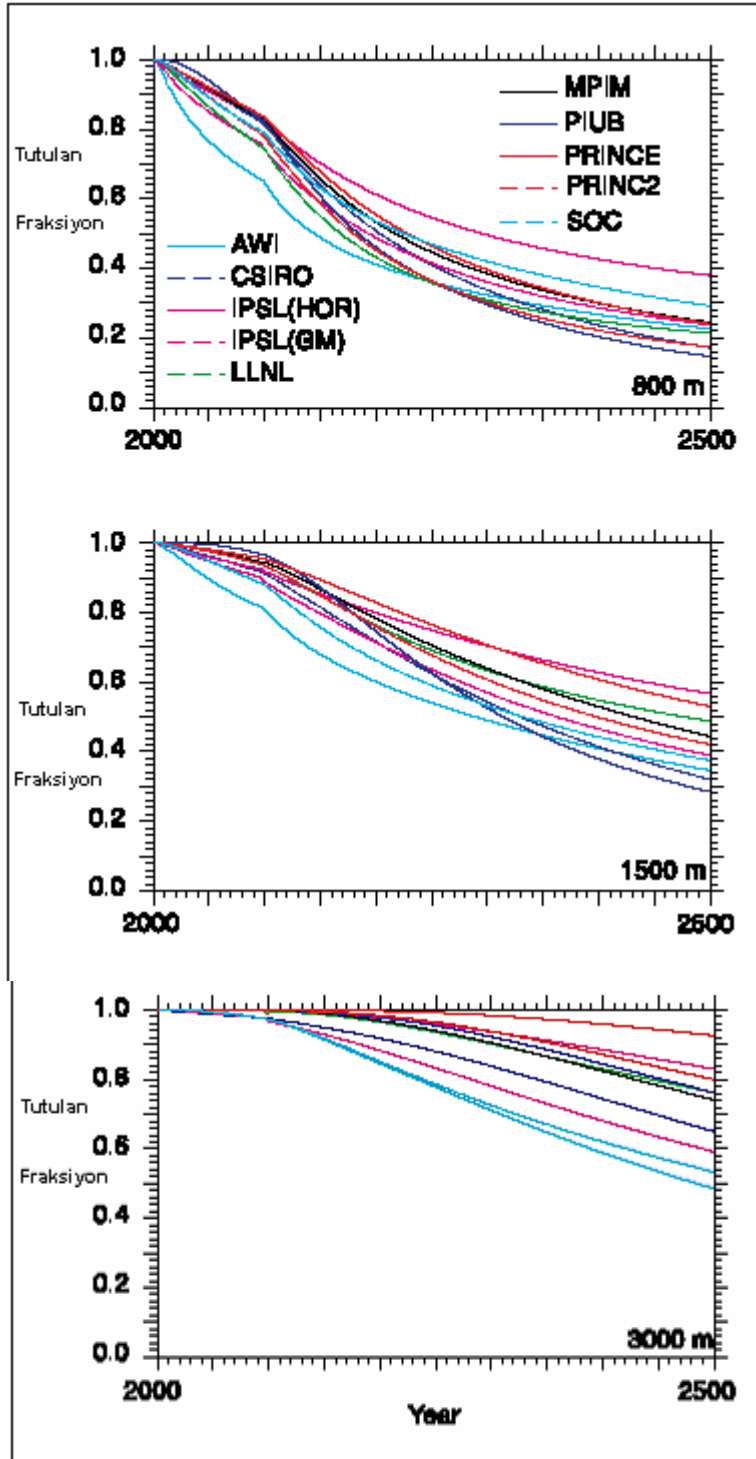
Küresel Isınma Potansiyeli(GWP): IPCC tarafından belirlenen ve farklı sera gazı emisyonlarının iklimsel etkisini karşılaştırmak için kullanılan bir ölçüdür.



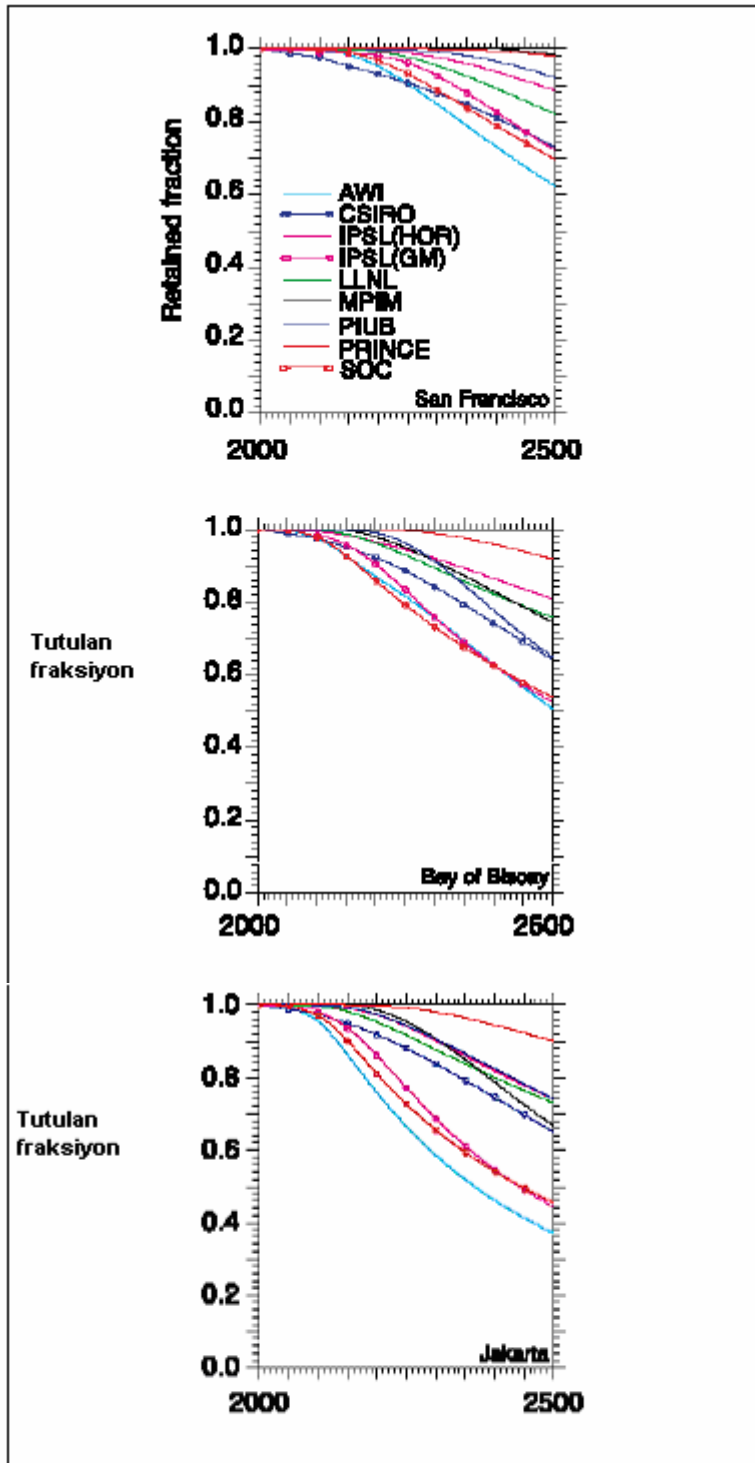
Şekil 6.8 Üç farklı derinlikten enjeksiyon yapılan okyanusta ve atmosferde karbon fraksiyonunun şematik bir modelden sonuçları gösterilmiştir(Herzog ve siğ., 2003). Hesaplamalar, atmosferde 280 ppm karbondioksit bulunduğu üzerine yapılmıştır.

6.4 Mevki seçimi

Karbondioksitin okyanusal depolamasında özellikle mevki seçimi üzerine yayınlanmış hiçbir çalışma yoktur. Bundan dolayı sadece okyanusal depolama için mevki seçilirken ele alınabilecek genel faktörler tartışılabilir. Bu hususlar arasında çevresel etkiler, maliyet, güvenlik ve ulusal sorunlar bulunmaktadır.



Şekil 6.9 Sonuçlar, yedi enjeksiyon bölgesinin ortalamasıyla üç farklı derinlikte yedi okyanusal genel sirkülasyon modelleri için bulunmuştur (Orr, 2004). Gösterilen etkililik yüzdesi, 2000-2100 arasında sabit bir orandaki enjeksiyon için tutulan fraksiyondur. Modeller, derin enjeksiyonun sığ enjeksiyonlardan daha uzun olarak karbondioksiti atmosferden uzak tuttuğunu göstermiştir. 3000 m'deki salınım için eklenen karbonun çoğu, 500 yıllık bir zaman için yapılan simülasyonlarda bu sürenin sonunda hala atmosferden yalıtılmış bir şekilde tutulduğu görülmüştür.



Şekil 6.10 3000 m derinlikteki üç enjeksiyon lokasyonu için on ayrı okyanusal model simülasyonlarında hazırlanan depolama sonuçlarının karşılaştırılması(Orr, 2004). Modeller, farklı okyanuslardaki salınımlar için karbondioksitin tutulan fraksiyonunun ön tahminlerini ayırmaktadır.

6.4.1 Su sütununa bırakma

Derin suların yakınında bulunan büyük karbondioksit kaynak noktaları, genel olarak karbondioksitin direkt enjeksiyonunu uygulamak için mali açıdan en uygun ortamlardır. Yapılan modellemeler sahaya özgü farklılıkların bulunduğunu gösterse de, henüz karbondioksitin direkt olarak enjeksiyon işletmesinin etkililiği için muhtemel mevkilerin sınıflandırılması yapılmamıştır(Orr. 2004).

6.4.2 Deniz tabanında karbondioksit gölleri

Karbondioksit gölleri, en az 3000 m derinlikteki deniz tabanında olmalıdır. Çünkü sıvı karbondioksit, etrafını saran sudan daha yoğun olmalıdır.

Okyanusun genel sirkülasyon model hesaplamaları, CaCO_3 sedimentleri veya deniz canlıları ile etkileşimini ele almamıştır. Okyanusta artan karbondioksit konsantrasyonları, karbondioksit tecridini arttırmaya meyilli olacak şekilde CaCO_3 sedimentlerinin çözünmesini hızlandırır. Bu olay, Atlantik'te daha büyük oranda tecrit sonucu ile derin deniz için modellenmiştir. Çünkü Atlantik sedimentlerinde yüksek CaCO_3 envanteri mevcuttur(Archer ve diğ., 1998).

6.4.3 Kireçtaşı nötrilizasyonu

Eklenen karbondioksitin asitliğini nötrile etmek için gerekli olan kireçtaşı ve suyun miktarları, kireçtaşı nötrilizasyonunun hem okyanusa yakın, hem de büyük kireçtaşı çökeltilerine yakın olan karbondioksit kaynak noktalarında elverişli olacağını göstermektedir(Rau ve Caldeira, 1999).

6.5 Enjeksiyon teknolojisi ve işletmeler

Okyanusal depolama teknolojisinin gelişimi genel olarak kavramsal bir aşamadadır. Okyanusal depolama için bu kavramsal teknolojilerin planlanan analizleri ve deneysel çalışmaları sınırlı olarak yapılmıştır(Nihous, 1997) ve hiçbir saha deneyi yoktur. Hiçbir işleyimsel deneyim mevcut değildir. Okyanusa enjekte edilen karbondioksitin çevresel etkilerini azaltmak ve atmosferden yalıtımı geliştirmek için çeşitli teknoloji kavramları

düşünülmüştür. Teknolojileri olanaklı kılmak için daha fazla araştırma ve geliştirme gerekse de, hiçbir teknik engelin olmadığı düşünülmektedir.

6.5.1 Su sütununa bırakma

1000 m veya daha derinlerde sıvı karbondioksitin yayılması, teknolojik olarak uygulanabilir. Sıvı karbondioksitin uygun derinliklere taşınması ile tercih edilen salınım biçimi, bu aşamada sıvı veya yoğun gaz fazı(72.8 bar ve 31°C altında sıkıştırma ile sağlanabilir) olarak düşünülmektedir. Karbondioksiti derin okyanusa taşıyacak olan borular, ticari olarak CO₂ gelişmiş petrol kurtarımı projelerinde karbondioksit nakli için kullanılan borulara benzerdir(Ozaki ve diğ., 1997). Yapılan modelleme çalışmaları (Liro ve diğ., 1992; Drange ve Haugan, 1992), uygun bir biçimde tasarlanan bir difüzör ile yaklaşık olarak tüm karbondioksitin 100 m enjeksiyon derinliği içerisinde tüm okyanusta dağılacığını göstermiştir. Bu durumda karbondioksitçe zengin su, sabit yoğunluktaki yüzey boyunca yatay olarak dağılması ile seyreltilecektir.

Karbondioksit, sabit bir platformdan salınım için tanker ile (Ozaki ve diğ., 1995) veya çekilen bir boru ile taşınabilir(Ozaki ve diğ., 2001). Her iki durumda da karbondioksit tankerlerinin tasarısı, günümüzde sıvılaştırılmış petrol gazının (LPG) nakli için kullanılan tankerlere benzer olarak yapılacaktır. Basınç gereksinimini azaltmak için -55°C ve 6 bar basınç koşulları ile soğutma işlemi yapılabilir(Ormerod ve diğ., 2002). Difüzörler, karbondioksit kabarcıklarının sıvı-gaz fazı sınırına ulaşmadan önce tamamen çözünmesine yönelik tasarlanabilir.

6.5.2 Bir karbondioksit gölü oluşturulması

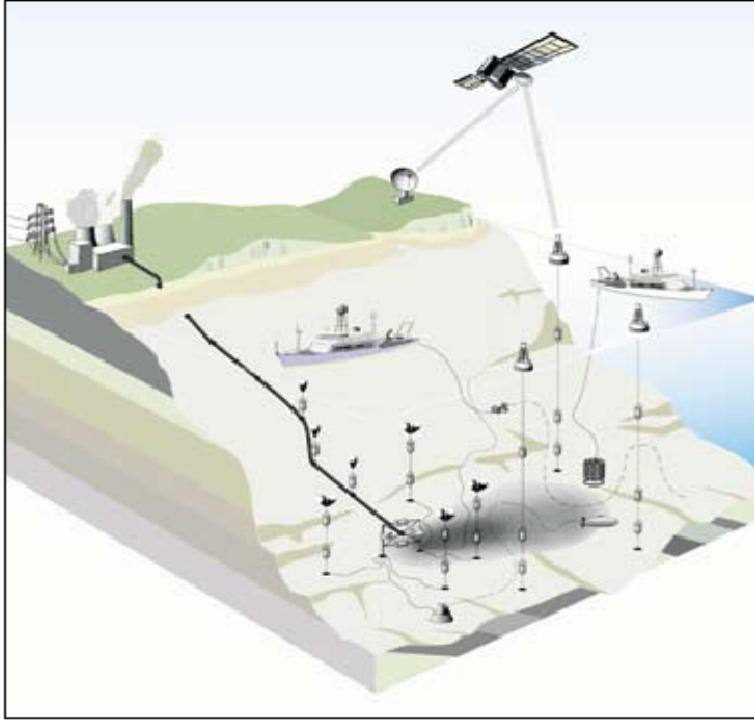
Nakashiki (1997), deniz tabanında bir karbondioksit gölü oluşturması için sıvı karbondioksit tankerinde kullanılan boşaltma borularının farklı tipleri üzerine araştırma yapmıştır. “Hareketli boşaltım boruları”nın bu anlamda en iyi seçenek olacağını düşünmüştür. Çünkü diğer alternatiflerinden daha basittir ve fırtına koşullarında rüzgar ve dalgalara karşı daha dayanıklıdır.

Aya ve diğ., (2003), kuru buz ile karıştırılmış sıvı karbondioksit içeren bir çamurun hazırlanmasını ve 200-500 m derinlikte okyanusa bırakılmasını önermiştir. Kuru buz, kendisini saran deniz suyundan daha yoğundur ve böylece çamurun batmasını sağlar. Kaliforniya açıklarında yapılan in situ deneyinde yaklaşık 8.0 cm çapındaki kuru buz kütlesi

ve karbondioksit çamurunun, kuru buz erimeden önce iki dakika içerisinde yaklaşık 50 m derinliğe battığı gözlenmiştir(Aya ve diğ., 2003). Karbondioksit çamurunun ve kuru buzun başlangıç boyutları, en az 3000 m derinlikteki deniz tabanına batmasını mümkün kılmak için kritik bir faktördür. Performans kriterini karşılamak için kuru buz içeriği bir güç motoru, kompresör, kondansatör ve bazı boru sistemlerinden oluşan bir sistem ile kontrol edilir.

6.6 Monitörleme

Monitörleme, iki farklı amaç için yapılabilir: (1) belirli bir karbondioksit depolama işletmesine dair spesifik bilgilerin elde edilmesi, (2) genel bilimsel kavramanın sağlanması. Bir monitörleme programı, her bir kaynak noktasından karbondioksit dağılımı ve kütlesini ölçmek için kullanılır ve ilişkili biyolojik ve jeokimyasal parametreler kaydedilir.



Şekil 6.11 Karbondioksitin derin okyanusa boru hattı ile enjeksiyonunun monitörlenmesi için olası yöntemlerin şematik gösterimi. Gri bölge, boru hattının ucundan yayılan yüksek karbondioksit/düşük pH su kabarcıklarını temsil etmektedir. Boru hattının sonunda kimyasal ve biyolojik sensörler ile iki yeraltı su kamerası bulunmaktadır. Borunun etrafında kabarcıkların yön ve şiddetini monitörlemek için seri olarak bağlanmış sensörler görülebilir ve bunlar ayrıca boru hattı boyunca sızıntıların monitörlenmesi için sıralanmıştır. Kıyıda bir tesis sensörlere elektrik sağlar ve su altında bağımsız hareket eden bir araç kabarcıkların yakın

mevkilerdeki dağılımını haritalamak için konumlanmıştır. Bir pompalama sistemi, enjeksiyon sahasının birkaç kilometreden daha uzak mesafelerin monitörlenmesi amacıyla kullanılır. Denize çekilen dalgalı görünümdeki bu sistem, daha güvenli ve kesin ölçümler sağlayabilir ancak göreceli olarak kısa zaman periyodu için de büyük bölgeler boyunca ölçüm sağlayabiliyor olmalıdır. Birbirine bağlanan sistemler, haritalama için kullanılan gemilerin arasında kabarcıkların monitörlenmesi için kullanılır. Bu sistemler yüzeyde bir şamandıraya sahiptir ve her gün uydu aracılığıyla monitörleme tesisine veri gönderir. Enjeksiyon noktasına çok uzak noktalardaki dağılımlar, her 2-5 yılda standart numunelendirme yöntemleri kullanılan hidrografik kesit gemileri ile monitörlenir. Bu yöntemler, geçmişteki değişim oranlarına eklenen küçük karbondioksit belirtilerinin bulunması için gerekli olan doğru ve kesin verileri sağlarlar.

6.7 Çevresel etkiler, riskler ve risk yönetimi

6.7.1 Biyolojik etkiler

Derin deniz popülasyonu, topluluk yapısı ve derin deniz ekolojik etkileşimleri hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Bundan dolayı derin okyanus ekosistemlerinin karbon depolamasına duyarlılığı ile tanımlanmamış muhtemel yük ve vazifeleri üzerindeki etkileri büyük ölçüde bilinmemektedir.

Okyanusal depolama önerilerinin çoğunluğunda, karbondioksitin büyük hacimli sulara seyretilmesi ya da küçük hacimlerde (örn, CO₂ gölleri gibi) izole edilmesi ile yüksek karbondioksit konsantrasyonu içeren suların hacimlerini azaltmak için çalışılır. Bununla birlikte eğer geniş olarak yayılmış ise, karbondioksit enjeksiyon stratejileri sonuçta büyük hacimlerde oldukça artan karbondioksit konsantrasyonlu sular meydana getirecektir.

Okyanusal depolama, neredeyse hiç ışığın ve fotosentez organizmaların bulunmadığı okyanusun derinliklerinde gerçekleşir. Suda ve derin deniz sedimentleri içerisinde yaşayan çeşitli faunalar, karbondioksit depolamasından etkilenebilirler. Sonuçta ekosistem bileşimi ve fonksiyonunda değişim meydana gelebilir. Bu sonuçla karbondioksitin etkileri, hem bireysel (fizyolojik), hem de ekosistem açısından incelenmelidir.

Karbondioksitin deniz suyuna direkt olarak bırakılması veya deniz tabanında bir göl oluşturulması, çözünmüş karbondioksitin hem boşalım noktası yakınında, hem de daha derinliklerde değişimi ile sonuçlanır. Deniz suyunda karbondioksit çözünmesi, karbondioksitin kısmi basıncını (pCO₂, µatm tarzında atmosfer basıncının bir ppm fraksiyonu

olarak ifade edilir) arttırarak pH seviyesinin ve CO_3^{2-} konsantrasyonlarının düşmesine (daha az doygun olarak) neden olur. Bu da, sedimentlerde ve organizma kabuklarında CaCO_3 çözünmesine sebep olabilir. Bu durumda karbonatlardan (CO_3^{2-}) bikarbonat (HCO_3^-) meydana gelir.

Evrimsel zaman ölçeğinde günümüze kadar gelen canlı yaşamı, bulunduğu ortamdaki düşük CO_2 seviyelerine adapte olmuştur. Bunun için günümüzdeki canlı yaşamı, bu düşük pCO_2 değerlerine bağlıdır ve türlerin sürekli olarak yükselen karbondioksit seviyelerine ne ölçüde adaptasyon göstereceği belirsizdir. Yüksek karbondioksit seviyeleri ve oldukça fazla asidik sulara maruz kalma, toplu ölümlere neden olabilir. Ancak karbondioksit, pH ve karbonat seviyelerindeki daha sınırlı değişimler, en azından geçici olarak tahammül edilebilir. Sığ sulardaki organizmalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucu faunayı etkileyebilecek kimyasal ortamdaki değişimlerin olduğu çeşitli fizyolojik mekanizmalar saptanmıştır. Bu mekanizmalar, derin okyanusta yaşayan organizmalarda da etkili olabilir. Bununla birlikte bilinen fizyolojik mekanizmalar tek başına ekosistem düzeyindeki etkilerin tamamen değerlendirilmesi için yeterli olmaz.

Açık okyanuslarda yaşayan türler düşük ve göreceli olarak sabit karbondioksit seviyelerine maruz kalır. Bundan dolayı bu türler, karbondioksit maruzuna karşı hassas olabilirler. Aksine deniz sedimentleri içerisinde, özellikle de intertidal bölgede yaşayan türler, düzenli olarak karbondioksit dalgalanmalarına maruz kalırlar. Bundan dolayı yüksek ve değişken karbondioksit konsantrasyonlarına daha iyi adapte olabilirler. Karbondioksit adaptasyonuna ilişkin fizyolojik mekanizmalar çoğunlukla bu organizmalar üzerinde çalışılmıştır. Sonuçta deniz omurgasızlarının balıklardan daha hassas olduğu gözlenmiştir(Pörtner ve diğ., 2005).

6.7.2 Risk yönetimi

Okyanusal karbon depolaması için direkt olarak risk yönetimi ile ilgili örnek temsil edecek hiçbir literatür bulunmamaktadır. Bununla birlikte okyanusun diğer amaçlar için kullanımına ilişkin risk yönetimi çalışmaları mevcuttur.

Deniz tabanındaki bir gölden sıvı karbondioksitin geri kazanımı mümkün olabilir. Karbondioksit gölleri oluşturulmasının potansiyel reversibilitesi, bu seçeneğe ilişkin risklerin azaltılması için etkili bir faktör olarak düşünülebilir.

6.8 Maliyet

6.8.1 Giriş

Karbondiyoksitin okyanusal depolamasının mühendislik maliyeti üzerine yayınlanmış çalışmalar, kıyıya yakın bir elektrik santralinden karbondiyoksitin gemi ile bir deniz enjeksiyon platformuna veya deniz tabanında boru hattı ile enjeksiyon başına taşındığı durumlara yöneliktir.

6.8.2 Okyanus platformundan veya hareketli bir gemiden karbondiyoksit yayılımı

Düşey bir boru ile derin veya orta derinlikteki okyanus suyuna enjeksiyon işlemini bulunduran bir enjeksiyon platformuna karbondiyoksitin gemi ile taşınması veya bir enjeksiyon borusu sürükleyen gemiden yayılması üzerine maliyet hesaplamaları yapılmıştır (Akai ve diğ., 2004; IEA-GHG, 1999; Ozaki, 1997; Akai ve diğ., 1995; Ozaki ve diğ., 1995). Bu durumlarda tanker gemileri düşük sıcaklıkta (-55'den -50°C'ye kadar) ve yüksek basınçta (0,6-0,7 MPa) sıvı karbondiyoksit taşır.

Tablo 6.2, bir enjeksiyon platformu kullanılan okyanusal depolama durumları (Akai ve diğ., 2004) için depolama maliyetini göstermektedir. Bu durumlarda üç elektrik santralinden tutulan karbondiyoksit, 3000 m derinlikte enjeksiyon için yüzdürülen tek bir boşalım platformuna tanker gemisi ile taşınmaktadır. Okyanusal depolamanın maliyeti, üç ana bileşenin toplamıdır; karbondiyoksitin gemi ile taşınması; enjeksiyon platform borusu ve püskürtme başı (nozzle). Bu üç bileşenin toplamı, 100-500 km taşınan karbondiyoksitin bir tonu için 11.5-12.8 US\$ arasındadır. Kaynama ve yakıt tüketiminden gemideki karbondiyoksitin %3 emisyonu azaldığı varsayılırsa maliyet, 11.9-13.2 US\$/tCO₂(net depolanan) arasındadır.

Gemi nakil uzaklığı	100 km	500 km
Karada CO ₂ depolama (US\$/tCO ₂ -gemi ile nakledilen)	3.3	3.3
Enjeksiyon platformuna gemi nakli (US\$/tCO ₂ -gemi ile nakil)	2.9	4.2
Enjeksiyon platformu ve boru hattı (US\$/tCO ₂ gemi ile nakil)	5.3	5.3
Okyanusal depolama maliyeti (US\$/tCO ₂ -gemi ile nakledilen)	11.5	12.8
Okyanusal depolama maliyeti (US\$/tCO ₂ -net depolanan)	11.9	13.2

Tablo 6.2 Su üzerinde sabit bir platformdan 3000 m derinliğe karbondiyoksit nakil ve enjeksiyonu için okyanusal depolama maliyet hesaplamaları. Hesaplamalar, 600MW net

üretim kapasitesine sahip üç adet pulverize kömür yakıtlı elektrik santrali üzerine ve santrallerinin her birinin bir boşalım platformuna 80,000 m³ kapasiteye sahip CO₂ tanker gemilerinin 100-500 km mesafe ile nakil yaptığı farzedilerek bulunmuştur.

Sıvı karbondioksit, bir karbondioksit nakil gemisi ile enjeksiyon bölgesine ulaştırılarak, daha sonra 2,000-2,500 m arasındaki bir derinlikte karbondioksiti okyanusa enjekte edecek bir boru sürükleyen enjeksiyon gemisine nakledilebilir. Okyanusal depolamanın hesaplanan maliyeti (Tablo 6.3), yine üç bileşenden oluşur: kıyıda gemi naklinden önce karbondioksitin tanker depolaması; karbondioksitin gemi ile taşınması; ve enjeksiyon gemisi, borusu ve püskürtme başlığı(nozzle)(Tablo 6.3; Akai ve diğ., 2004). Bu üç bileşenin tutarı, 100-500 km gemi ile taşınan karbondioksitin bir tonu için 13.8-15.2 US\$/tCO₂ arasındadır. Kaynamadan ve yakıt tüketiminden kaynaklanan %3 kayıp ile maliyet 14.2-15.7 US\$/tCO₂ arasında değişir.

Gemi nakil uzaklığı	100 km	500 km
Karadaki CO ₂ depolaması (US\$/tCO ₂ taşınan)	2.2	2.2
Enjeksiyon gemisine nakil (US\$/tCO ₂ taşınan)	3.9	5.3
Enjeksiyon gemisi, boru ve nozzle (US\$/tCO ₂ taşınan)	7.7	7.7
Okyanusal depolama maliyeti (US\$/tCO ₂ taşınan)	13.8	15.2
Okyanusal depolama maliyeti (US\$/tCO ₂ net depolanan)	14.2	15.7

Tablo 6.3 Karbondioksit nakli ve hareketli bir gemiden 2000-2500 m derinlikteki enjeksiyonu için okyanusal depolama maliyet hesaplamaları.

6.8.3 Kıyıdan sığ-derin sulara uzatılan boru hattı ile karbondioksit yayılımı

Gemi nakli seçeneği ile kıyaslandığında karbondioksitin boru hattı ile nakli, kısa mesafelerde nakil için daha düşük maliyetli (örn, 100 km), daha uzun mesafeler için daha fazla maliyetli (örn, 500 km) olacağı hesaplanmıştır.

Kıyıda bulunan bir elektrik santralinden karbondioksitin deniz tabanından çekilen bir boru hattı ile enjeksiyon başına taşınması için gerekli olan maliyet, IEA-GHG (1994) ve Akai ve diğ., (2004) tarafından hesaplanmıştır. Akai ve diğ., (2004) tarafından yapılan son çalışmada, 600 MW_e net üretim kapasitesine sahip pulverize kömür yakıtlı bir elektrik santralinden tutulan karbondioksitin 3000 m derinlikte enjeksiyonu için 100 km ve 500 km boyunca bir CO₂ boru hattı ile taşınmasının maliyeti, 100 km için 6.2 US\$/tCO₂(net depolanan) ve 500 km için 31.1 US\$/tCO₂(net depolanan) olmaktadır.

Deniz tabanında karbondioksit gölü oluşturulmasına özgü yayınlanmış hiçbir maliyet hesaplaması bulunmamaktadır; bununla birlikte karbondioksit gölü oluşturulması ve su sütununa enjeksiyon maliyetleri arasında önemli bir farkın bulunmadığı farz edilir.

6.9 Okyanusal depolama üzerine görüş ayrılıkları

Okyanusal karbon depolaması bilim ve teknolojisi, aşağıda sıralanan eksikliklerin giderilmesi ile daha da ilerleyebilir:

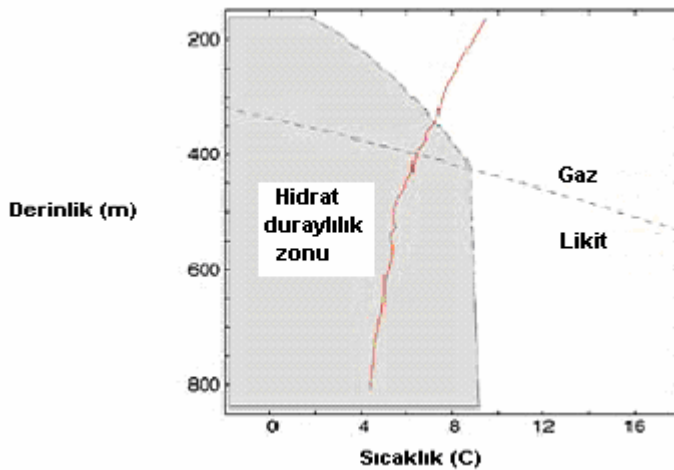
- *Biyoloji ve ekoloji:* Karbondioksit eklenen derin denizdeki biyolojik sistemlerin etkileri çalışmaları. Şu ana kadar yapılandan daha uzun sürede ve daha büyük ölçekteki çalışmalar.
- *Araştırma faaliyetleri:* Okyanusal depolama kavramlarının (örn, karbondioksitin bir boru veya gemi ile bırakılması veya karbonat nötrilizasyon yaklaşımları) araştırma faaliyetleri uygulanarak etkileri ve etkililiği hem bilimsel araştırma, hem de teknoloji gelişimi amacıyla küçük ölçekte yerinde değerlendirilebilir.
- *Mühendislik çalışmaları:* Derin denizde çalışmak için teknoloji araştırma ve geliştirilmesi ve boruların, enjeksiyon başlarının, difüzörlerin v.b geliştirilmesi.
- *Monitörleme:* Karbondioksit kabarcıklarının ve biyolojik-jeokimyasal etkilerinin ortaya çıkarılması için tekniklerin ve sensörlerin geliştirilmesi.

Açıklama 6.3 Karbondioksitin fiziksel özellikleri

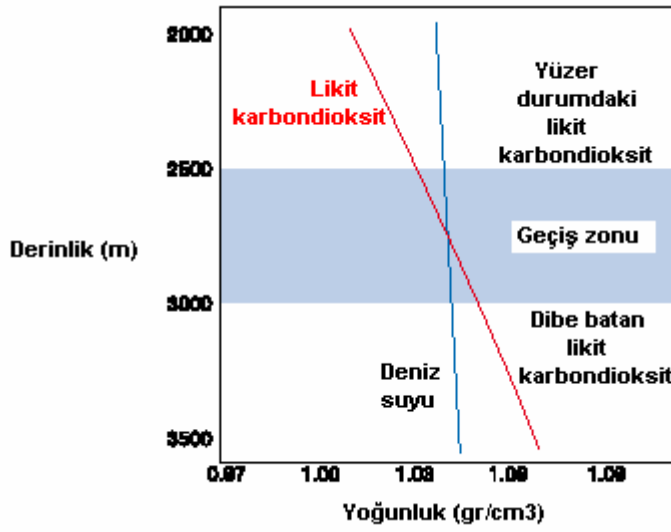
Deniz suyu içerisindeki karbondioksitin derin deniz ortamı üzerindeki etkileri, fiziksel özellikleri ile kontrol edilir. Şekil 6.12’de deniz suyunda gaz, sıvı, katı ya da sulu fazda bulunabilen karbondioksit koşulları verilmiştir.

Okyanuslarda tipik basınç ve sıcaklık altında saf karbondioksit, yaklaşık 500 m derinliğe kadar gaz, daha derinlerde ise sıvı olarak bulunur. 500-2700 m derinlik arasında sıvı karbondioksit, deniz suyundan daha hafif olur. 3000 m’den daha yüksek derinliklerde ise deniz suyundan daha yoğun olacaktır. Okyanuslara bırakılan karbondioksitin içinde bulunduğu yoğunluk, karbondioksitin yukarıya çıkmasını ya da deniz tabanına doğru batmasını belirleyen etkidir(Şekil 6.13). Karbondioksit, gaz fazında deniz suyundan daha hafiftir ve yukarıya çıkar. Sıvı fazda iken deniz suyu ile kıyaslandığında yüksek derecede sıkıştırılabilir özelliktedir. Tamamen kristallenmiş karbondioksit hidratı, deniz suyundan daha yoğun olacaktır ve dibe doğru batan bir kütle biçiminde olacaktır(Aya ve diğ., 2003); böylece hidrat oluşukları, hızlı batmasından ve çözünmesinin yavaş olmasından dolayı karbondioksit depolamasını avantajlı kılar. Ancak boru hatlarında veya enjektörlerde akım halinde nakli bir sorun teşkil eder.

Katı karbondioksit hidratı oluşumu (Sloan, 1998) dinamik bir işlemdir(Şekil 6.14; Brewer ve diğ., 1998, 1999, 2000) ve bu gibi sistemlerde hidrat nükleasyon özellikleri tam olarak anlaşılmamıştır. Karbondioksit deniz suyuna maruz kalması ile çözünerek sonuçta çevresindeki deniz suyundan daha yoğun olan sulu faza dönüşecektir. Gaz, sıvı, hidrat ya da sulu fazda yoğun veya hafif karbondioksit, dağılıncaya kadar batan ya da yükselen karbondioksit kabarcıklarını oluşturacaktır.



Şekil 6.12 Deniz suyu içerisindeki karbondioksitin faz diyagramı. Sıcaklık ve basıncın (derinlik ile artar) şekildeki mavi çizgi altına düşen bölgedeki koşullarında karbondioksit likit fazda duraylıdır; mavi çizginin üzerinde ise gaz fazındadır. Gri bölgedeki basınç ve sıcaklık koşullarında ise karbondioksit, hidrata benzer katı buz ($\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) oluşturacak şekilde deniz suyu ile reaksiyona girer. Karbondioksit, kendisiyle doygun olmayan deniz suyunda çözünür. Kırmızı çizgi, Kaliforniya açıklarındaki bir bölgede sıcaklığın derinlik ile değişimi gösterilmiştir; likit ve hidratlaşmış karbondioksit, 400 m derinlik altında var olabilir (Brewer ve diğ., 2004)



Şekil 6.13 2500 m'den sığ derinliklerde likit karbondioksit, deniz suyundan daha az yoğunlukta olacaktır ve böylece yüzeye doğru çıkmaya meyillidir. 3000 m'den daha yüksek derinliklerde ise deniz suyundan daha yoğundur ve deniz dibine doğru batacaktır. Bu iki derinlik arasında karbondioksitin davranışı bölgeye göre değişebilir (yoğunlukla sıcaklığa bağlı olarak), suda asılı olarak kalabilir. Burada Kuzeybatı Atlantik Okyanusu'nun koşullarına göre değerlendirilmiştir.



Şekil 6.14 Yapılan bir derin okyanus deneyinde 3600 m derinliğe bırakılan karbondioksit, başlangıçta deniz tabanında bir likit karbondioksit birikintisi oluşturur(soldaki resim). Likit karbondioksit zamanla deniz suyu ile reaksiyona girerek, bir katı karbondioksit hidratı oluşturur(sağdaki resim).