

Yeraltında Jeolojik Depolama

ÇEVİRİ (translation into Turkish Language) :

JEOLOJİ MUH. Ender Ragıp ARSLAN

arsender@hotmail.com

Özet

Karbondioksitin yeraltındaki haznelerde doğal olarak kapatılması sonucu biriktirilmesi, yaygın bir jeolojik fenomendir. Büyük sayıda mevcut gelişmiş petrol kurtarımı ve asit gazı projelerinden karbondioksitin enjeksiyonu ve/veya depolaması üzerine bilgi ve deneyim sahibi olunmuştur. Bunun örnekleri olan Sleipner, Weyburn ve In Salah projeleri, CO₂ önleme seçeneği olarak karbondioksitin jeolojik formasyonlarda depolanmasının yapılabilir olduğunu göstermektedir. Yeraltında doğal gaz depolama projeleri ve asit gazı enjeksiyon projelerini içeren endüstriyel örnekler, karbondioksitin de iyi tanımlanan ve uygun bir biçimde denetim altında tutulan bir sahada güvenle enjekte edilip depolanabileceğinin belirtilerini göstermektedir. Karbondioksitin doğal olarak yığıldığı depolar ile mühendislik çalışmaları sonucu yapılan depolar arasında farklılıklar olmakla beraber, karbondioksitin seçilen bölgedeki derin jeolojik formasyonlara titizlikle enjekte edilmesi ile CO₂, uzun zaman dilimi boyunca yeraltında depolanabilir: enjekte edilen karbondioksitin %99 ve fazlası, 1000 yıl boyunca depoda kalabilir. Tükenmiş petrol ve gaz rezervleri, muhtemel kömür formasyonları ve özellikle tuz formasyonları (hafif tuzlu su veya brinel ile doymuş gözenekli, derin hazne kayaları), CO₂ depolaması için kullanılabilir. 800-1000 m derinliklerde CO₂, sedimanter kayaçların gözeneklerinde depolama alanının verimli kullanımı için potansiyel oluşturmasını sağlayacak sıvı benzeri yoğun bir fazda olacaktır. CO₂ yeraltında birkaç mekanik avantaj ile kapatılmış olarak kalabilir: üzerlenmiş geçirimsiz bir tabakanın (örtü kayacı) altında kapatma; depolama formasyonunun boşluklarında hareketsiz bir fazda kapatarak hapsetme; “in situ” formasyon suyunda çözünme; ve/veya kömür ve şistlerde organik madde üzerine adsorpsiyon. Bunlardan başka depolama formasyonunda ve örtü kayacında mineraller ile arasında karbonat minerallerini üretecek reaksiyonu sonucu kapatılabilir. Karbondioksitin yeraltına enjekte edilmesinden sonra neler olacağını önceden bildirecek modellemeler mevcuttur. Ayrıca kötü açılan kuyulardan veya fay ve kırıklardan sakınılarak enjekte karbondioksitin yeraltında çok uzun bir zaman boyunca kalması sağlanabilir. Dahası, çeşitli kapan mekanizmalarının bir sonucu olarak karbondioksit zamanla daha az hareketli bir duruma gelecek ve sızıntı ihtimali de azalacaktır.

Karbondioksitin derin jeolojik formasyonlara enjeksiyonu, petrol ve gaz endüstrisi için geliştirilip uygulanan teknolojileri kullanır. Petrol sondajı teknolojisi, enjeksiyon teknolojisi, depolama haznesi dinamiğinin ve görüntüleme metotlarının bilgisayar simülasyonu potansiyel olarak jeolojik depolamanın gereklerini karşılamak için mevcut uygulamalardan uyarlanabilir. Bilinen petrol ve gaz teknolojisi dışında başarılı diğer yer altı enjeksiyon çalışmaları (doğal gaz depolama, asit gazı elden çıkarımı ve sıvı atıkların derin enjeksiyonu), petrol havzası

brinellerin yeraltına saklanması ile edinilen endüstri deneyiminde olduğu gibi karbondioksitin uzun vadede depolaması için tasarı programları hakkında faydalı bilgiler sağlayabilir. Karbondioksitin jeolojik depolaması, bugün Kuzey Deniz’de, Sleipner projesinde yılda yaklaşık 1 MtCO₂ ile 1996 yılından beri başarı ile gerçekleştirilmektedir. Diğer bir örneği Cezayir’de In Salah projesidir. Karbondioksit yeraltına petrol kurtarımı için de enjekte edilmektedir. Bazılarının 1970’li yıllarda başladığı çoğu Batı Teksas’ta olmak üzere 50 özel projeden petrol kurtarımı için yılda yaklaşık 30 Mt antropojenik olmayan karbondioksit enjekte edilmektedir. Şu anda yıllık ortalama 1-2 Mt karbondioksitin enjekte edildiği Weyburn Projesi, karbondioksit depolamasını değerlendirmek için gelişmiş petrol kurtarımı ile anlaşılabilir monitörleme ve modelleme programını birleştirmektedir. Bugün birkaç depolama projesi daha gelişim aşamasındadır.

Uygun hidrokarbon birikimli arazilerde CO₂ tutum, nakil ve enjeksiyon maliyetini denkleştirebilecek şekilde petrol üretimindeki artışın ekonomik geliri nedeniyle CO₂-EOR beraber uygulanabilir. Kömür yataklarında karbondioksit depolamasının gelişmiş kömür yatağı metan (ECBM) üretimi ile beraber yürütülmesi de fosil yakıtların en temiz olan metanın gelişmiş üretimi sebebiyle potansiyel olarak caziptir. Ancak bu teknoloji henüz iyi gelişmemiştir ve kömürlerde enjeksiyon ve depolama işleminin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Tükenmiş petrol ve gaz rezervlerinde karbondioksitin depolanması, bazı bölgeler için yüksek ihtimal gösterirler. Çünkü buradaki yapılar iyi tanınmış ve bölgede yeterli altyapı halihazırda bulunmaktadır. Bununla birlikte bugün göreceli olarak bir miktar hidrokarbon rezervi tükenmiş veya tükenmeye yakındır. Derin tuz formasyonlarının CO₂ depolaması için en büyük kapasiteye sahip olduğu düşünülmektedir ve diğer seçeneklerden çok daha yaygındır.

Halen belirsizlikler olmakla beraber karbondioksitin derinliklerde depolanma kapasitesinin yüksek olduğu düşünülmektedir. Tükenmiş petrol ve gaz rezervlerinin 675-900 GtCO₂ depolama kapasitesinin olduğu hesaplanmıştır. Derin tuz formasyonlarının en az 1000 GtCO₂ depolama kapasitesinin olması muhtemeldir ve bazı çalışmalar bundan daha yüksek bile olabileceğini belirtmiştir. Ancak üst sınırın ölçülmesi, ek çalışmalar yapılınca kadar zordur. İşletilmeyen kömür formasyonlarının kapasitesi belirsizdir ancak 3-200 GtCO₂ arasında olduğu sanılmaktadır. Muhtemel depolama sahaları, dünya emisyon kaynaklarının çoğu ile aynı bölgede konumlu geniş bir şekilde dağılmış bulunan sedimanter havzaları içerisinde olması muhtemeldir.

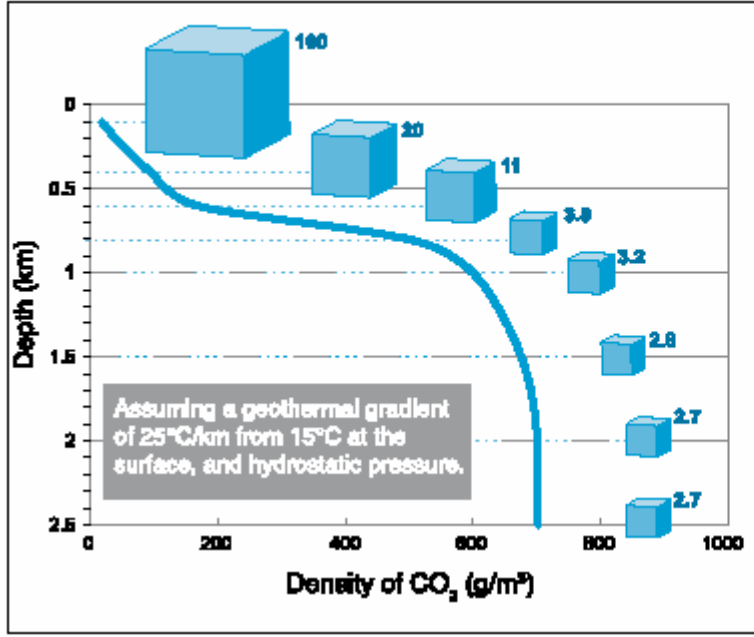
Karbondioksitin jeolojik depolama maliyeti depolama formasyonunun derinliği, enjeksiyon için gerekli kuyuların sayısı ve projenin karada veya denizde oluşu gibi birçok



Şekil 5.1 CO2 depolamanın planlandığı veya yürütüldüğü faaliyetlerin mevkileri

faktöre bağlı olarak yüksek oranda sahaya özgüdür. Ancak depolama maliyetinin monitörleme dahil, 0.6-8.3 US\$/tCO₂ (depolanan) aralığında olması beklenmektedir. Bu miktar, karbondioksitin baca gazlarından tutum maliyeti ile karşılaştırıldığında küçük bir miktardır. Bundan başka gelişmiş petrol kurtarımı da 15-20 US\$ petrol varil fiyatında 10-16 US\$ depolama maliyetinin düşürülmesine ve hatta daha yüksek petrol fiyatlarında daha fazla düşüşe neden olabilir.

Jeolojik depolamadan insanınluna ve eko-sistemele doğabilecekle riskler enjeksiyon kuyusundan sızıntı, terkedilmiş kuyular ve faylar boyunca sızıntı ve örtü kayacın verimsizliğinden kaynaklanabilir. CO₂ sızıntısı potansiyel olarak yer altı suyunun kalitesinin düşmesine, bazı hidrokarbon veya mineral kaynaklarının zarar görmesine ve bitkiler ile toprak



Şekil 5.2 Yüzeyle 15-25 °C / km jeotermal gradyan ve hidrostatik basınç varlığı varsayılarak karbondioksit yoğunluğunun derinlik ile değişimi (Angus ve diğ., 1973). Karbondioksit yoğunluğu, karbondioksitin süperkritik faza ulaştığı yaklaşık 800 m derinlikte hızla artar. Şekilde küpler, karbondioksitin kapladığı hacmi temsil etmektedir ve 800 m'ye doğru bu hacmin derinlik ile orantılı olarak azaldığı görülmektedir. 1.5 km'den daha derinlerde yoğunluk ve spesifik hacim hemen hemen sabit kalır.

altı canlılara öldürücü bir etki oluşturmasına neden olabilir. Karbondioksitin atmosfere geri kaçıışı ayrıca bölgesel sağlık ve güvenlik sorunları meydana getirebilir. Bu etkileri önlemek dikkatli bölge seçimi, etkili düzen yönetimi, depolama sahasının beklendiği gibi iş görmemesi durumunda erken uyarı verecek uygun bir monitörleme programı ve karbondioksit salınımını kontrol altına almak veya durdurmak için iyileştirme metotlarının uygulamasını gerektirir. Bunları başaracak metotlar geliştirilmekte ve denenmektedir.

Dünyanın farklı alanları için bölgesel depolama-kapasite hesaplamalarında olduğu gibi bazı görüş ayrılıkları mevcuttur. Benzer biçimde sızıntı oranlarının daha iyi hesaplanması, gelişmiş maliyet verileri, daha iyi müdahale ve iyileştirme seçenekleri, daha fazla pilot ve deneme projeleri ve uzun vadedeki sorunların ortaya konulması, hep dikkat gerektiren çalışmalardır. Teknolojinin geliştirilmesi ve belirsizliklerin giderilmesi için çok daha fazla

çalışma gerekse de, jeolojik depolamanın etkili bir önleme seçeneği olarak kavranmasına büyük teknik engeller bulunmamaktadır.

5.1 Giriş

5.1.1 Jeolojik depolama nedir?

Karbondioksitin tutum ve jeolojik depolaması, karbondioksitin temel durağan kaynaklardan ayrıştırılıp genellikle boru hatları ile taşınması ve uygun derin kaya formasyonuna enjekte edilmesi ile atmosfere salınmasını önlemeye yönelik bir yöntemdir. Bu bölümde jeolojik depolama özellikleri incelenmiş ve bir önleme seçeneği olarak potansiyeli araştırılmıştır.

Yerkabuğu, yüksek miktarlarda karbon tutan kömür, petrol, organikçe zengin şistler ve karbonat kayaçlarının bulunduğu dünyanın en büyük karbon rezervidir. Karbondioksitin jeolojik depolaması üst kabukta milyonlarca yıldır süregelen doğal bir işlemdir. Biyolojik aktiviteden, magmatik faaliyetlerden, kayaçlar ve akışkanlar arasındaki kimyasal reaksiyonlardan türeyen karbondioksit yerkabuğunda karbonat mineralleri gibi, çözelti, gaz veya süperkritik fazda, hem gaz karışımı hem saf CO₂ olarak birikmektedir. Karbondioksitin yerkabuğunda jeolojik formasyonlara enjeksiyon çalışmaları ilk kez 1970'li yılların başında Amerika, Teksas'ta gelişmiş petrol kurtarımı projesinin bir parçası olarak yürütülmüş ve bugüne kadar birçok farklı bölgelerde de uygulanmıştır.

Sera gazı önleme seçeneği olarak antropojenik karbondioksitin jeolojik depolaması, ilk kez 1970'lerde düşünülmüş, ancak birey ve araştırma gruplarının çalışmaları sonunda güvenilirliğinin kazanıldığı 1990'lı yılların başına kadar çok az bir çalışma yapılmıştır(Marchetti, 1977; Baes ve diğ., 1980; Kaarstad, 1992; Koide ve diğ., 1992; van der Meer, 1992; Gunter ve diğ., 1993; Holloway ve Savage, 1993; Bachu ve diğ., 1994; Korbol ve Kaddour, 1994).

Ortalama on yıllık bir zaman öncesinde karbondioksitin jeolojik depolaması ilgisiz bir genel yargıya sahipken şu anda tamamen önleme seçeneği olarak görülmeye başlanmıştır. Bunun için birkaç sebep vardır. İlk olarak, yapılan araştırma ve çalışmalar ile ticari projeler, başarı ile yürütülmekte ve teknoloji güvenilirliği de gitgide artmaktadır. İkincisi, iklim değişikliğini önleme seçeneklerinin gerekliliğine yönelik ortak karardır. Üçüncüsü, jeolojik

depolama (CO₂ tutumu ile beraber), atmosferdeki CO₂ emisyonlarının derin indirgenmesine olanak sağlayabilir.

Karbondioksitin jeolojik olarak depolanması için önce sıkıştırılması gerekir. Genellikle “süperkritik” olarak adlandırılan yoğun akışkan bir faza getirilir. Derinlik boyunca sıcaklığın artma oranına bağlı olarak (jeotermal gradyan) 800 m veya daha derine kadar, derinlikle CO₂ yoğunluğu artacaktır. Enjekte CO₂, yoğun süperkritik bir fazda olacaktır.

Karbondioksitin jeolojik depolanması, sedimanter havzalarda çeşitli jeolojik ortamlar içerisinde yapılabilir. Bu havzalar içerisinde petrol sahaları, tükenmiş gaz sahaları, derin kömür yatakları ve tuz formasyonlarının hepsi, elverişli depolama formasyonlarıdır.

Yerkabuğunda jeolojik depolama, hem karada hem denizde uygulanabilir. Deniz sahalarına karadan veya deniz platformundan boru hattı ile ulaştırılabilir. Kıta sahanlığı ve buna yakın bazı derin-deniz sedimanter havzaları, denizdeki muhtemel depolama sahalarıdır. Ancak derin okyanus tabanındaki sedimentlerin çoğunluğu, jeolojik depolama için çok ince ve geçirimsizdir(Cook ve Carleton, 2000).

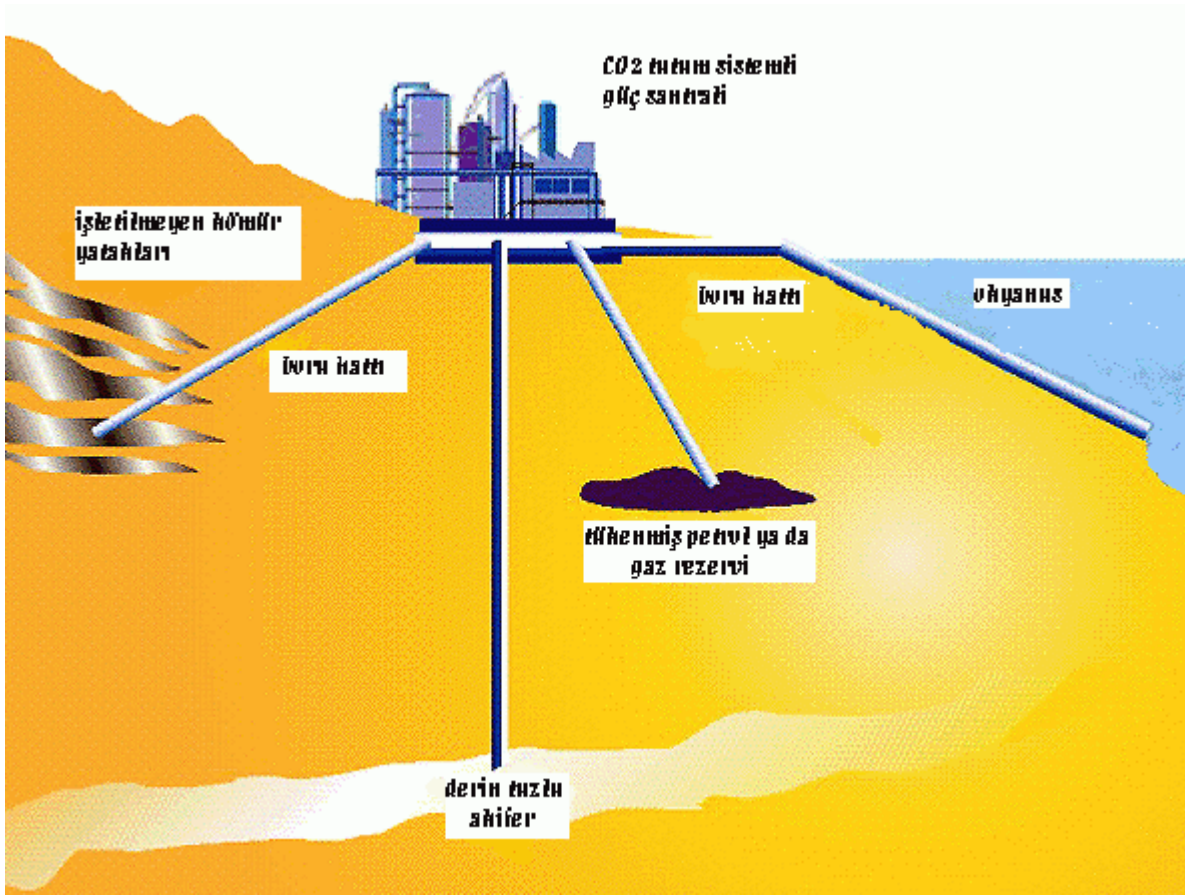
Uzun yıllardan beri istenmeyen kimyasal maddeler, kirleticiler veya petrol ürünlerinin elden çıkarılması, petrol ve gaz üretimi veya tükenmiş formasyonların tekrar doldurulması amacıyla sıvılar büyük ölçekte derin yerkabuğuna enjekte edilmektedir(Wilson ve diğ., 2003). Bundan başka doğal gaz da dünyanın çeşitli bölgelerinde enjekte edilip depolanmaktadır. Buna oranla CO₂ enjeksiyonu, çok küçük ölçekte yapılmıştır. Ancak eğer mevcut durağan kaynaklardan önemli derecede önleme için kullanılacaksa enjeksiyon oranları diğer işletmelerin ölçeğine benzer bir büyüklükte olması gerekmektedir.

Dünyanın jeolojik depolama kapasitesi nedir ve ihtiyacımız olan yerde mi bulunmaktadır? Bu bölümde CO₂ kaynaklarının jeolojik depolama sahaları ile olan coğrafi ilişkisi de ele alınmıştır. Tüm sedimanter havzalar, CO₂ depolanması için uygun değildir; bazıları çok sığ ve bazılarında da düşük geçirgenlikteki kayaçlar hakimdir veya zayıf örtü kayacı özelliklerine sahiptir. CO₂ depolanması için uygun havzalar kalın sediment yığınları, tuzlu su ile doymuş geçirgen kayaç formasyonları (tuz formasyonları), düşük poroziteli kayaçlardan oluşan yanal devamlı bir örtü kayacı (mühür görevi gören) ve yapısal kolaylık gibi bazı özelliklere sahip olması gerekir. Bu özellikleri gösteren birçok havza bulunurken, diğerleri de göstermezler.

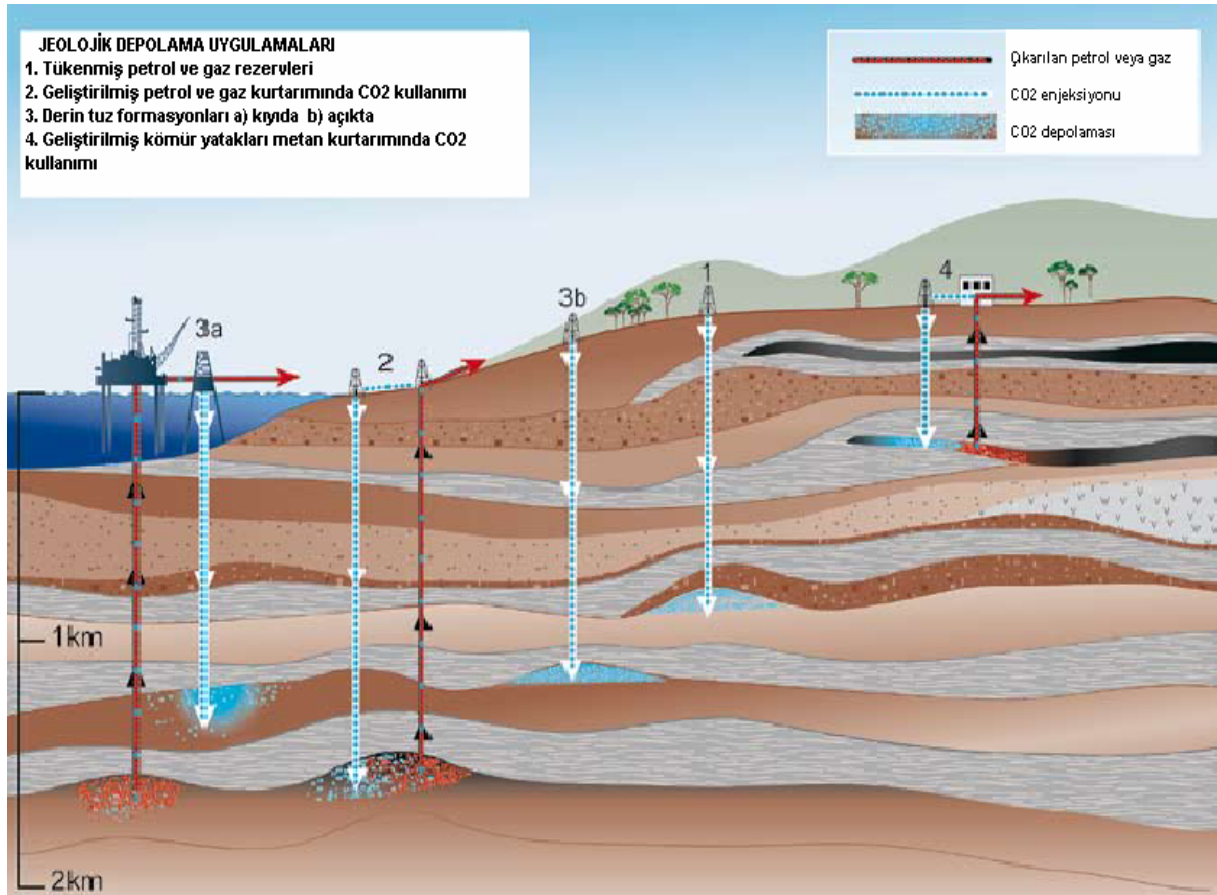
İlerideki yıllarda dünyanın ihtiyacını karşılayacak büyük depolama kapasitesi mevcut mudur? Bu sorunu düşünmek için “kaynak” ve “hazne” terimleri arasında paralellik çizmek faydalı olur(McKelvey, 1972). Jeolojik depolanmanın teknik kapasitesinin ekonomik depolama kapasitesine dönüştürülmesi için depolama projesi ekonomik olarak uygulanabilir, teknik

olarak mümkün, güvenli, çevresel ve sosyal olarak sürdürülebilir ve kabul edilebilir olmalıdır. Bu sınırlamalar göz önüne alındığında önemli ölçüde kullanılabilir depolama kapasitesinin teknik potansiyelden daha düşük olması kaçınılmazdır. Kullanılabilir depolama kapasitesinin, karbondioksitin büyük durağan kaynaklardan üretildiği ve insanların yaşadığı birçok bölgede bulunması olasıdır. Depolama-ihtiyaç ve depolama-kapasite ilişkisinin coğrafi uygunluğu bir sürpriz olmaz. Çünkü dünya nüfuzunun çoğunluğu, altında sedimanter havzaların bulunduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır(Gunter ve diğ., 2004).

Depolanan karbondioksitin nasıl güvenli bir şekilde ve ne kadar bir süre kapatılacağına bilinmesi de önemlidir. Toplum güvenliğini sağlamak için depolama sahası, sızıntının en az olacağı bir şekilde tasarlanmalı ve işletilmelidir. Bu nedenle monitörleme, ölçüm ve verifikasyon ihtiyacı gibi uygun tasarımı ve işleyimsel standartların kurulması amacıyla muhtemel sızıntı yolları belirlenmelidir.



Şekil 5.3 Muhtemel depolama seçeneklerinin basitleştirilmiş şekli



Şekil 5.4 Yeraltındaki derin jeolojik formasyonlara karbondioksit depolama seçenekleri

5.1.2 Mevcut ve planlanan CO₂ projeleri

Cezayir'deki In Salah Gaz Sahası'nda BP ve Statoil Şirketleri, gaz sahası sınırları dışındaki gaz rezervine doğal gazdan ayrıştırdıkları karbondioksiti enjekte etmektedir. Statoil, Snohvit bölgesinde gazdan ayrıştırılıp gaz bölgesi altında bir jeolojik formasyona karbondioksitin enjekte edileceği Barents Denizi'nde başka bir proje planlamaktadır. Chevron, Batı Avustralya yakınındaki Gorgon bölgesinde yaklaşık %14 oranında karbondioksit içeren gazın üretimi için ümit vermektedir. Karbondioksit, Barrow Adası'ndaki Dupuy Formasyonu'na enjekte edilecektir(Oen, 2003). Hollanda'da CO₂ denizde tükenmek üzere olan K12-B gaz sahasına pilot ölçekte enjekte edilmektedir(van der Meer ve diğ., 2005).

Batı Kanada'da 1990'lı yılların başından bu yana devam eden 44 adet karbondioksitçe zengin asit gazı enjeksiyon projesi sürdürülmektedir(Bachu ve Haug, 2005). Bu projeler küçük ölçekte olmakla beraber, karbondioksit ile H₂S gibi tehlikeli gazların enjeksiyonun etkili yönetimi hakkında önemli örnekler sağlamaktadır.

Açıklama 5.1 Sleipner Projesi

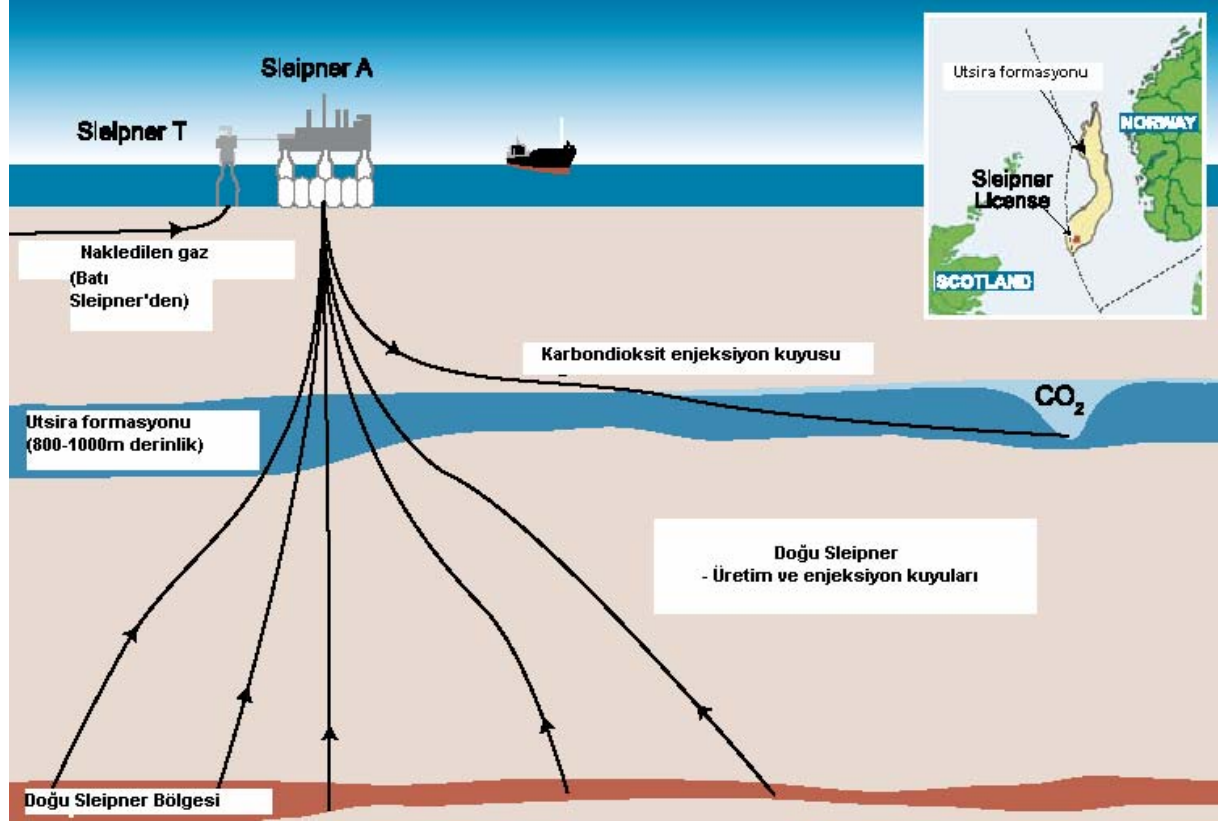
Sleipner Projesi, Kuzey Denizi

Statoil tarafından Norveç'in 250 km açıklarında Kuzey Denizi'nde yürütülen Sleipner Projesi, karbondioksitin bir tuz formasyonuna jeolojik depolamasına yönelik ticari ölçekte yapılan ilk proje özelliğindedir. Sleipner Batı Gaz Sahası'ndan ayrıştırılan karbondioksit, ardından Kuzey Denizi tabanının 800 m altındaki büyük, derin tuz formasyonuna enjekte edilir. Tuz Akiferi CO₂ Depolaması (SACS) olarak adlandırılan proje, karbondioksitin depolanması ve monitörlenmesi amacıyla kurulmuştur. 1995'ten beri monitörlemenin düzenlenmesi ve faaliyetlerin araştırılması amacıyla IEA Sera Gazı R&D Programı, Statoil ile birlikte çalışmaktadır. Üretilen doğal gazdan yaklaşık 1 MtCO₂ ayrıştırılmış ve düzenli olarak yer altına enjekte edilmiştir. CO₂ enjeksiyonu çalışması Ekim, 1996'da başlamış ve 2005'in başına kadar 7 Mt'dan fazla CO₂ enjekte edilmiştir (yaklaşık 2700 ton/gün bir oranla). Projenin çalışma ömrü boyunca toplam 20 MtCO₂ depolaması beklenmektedir.

Karbondioksitin enjekte edildiği tuz formasyonu, deniz tabanının yaklaşık 800-100 m altında brinel ile doymuş pekişmemiş kumtaşlarından oluşmaktadır. Formasyon ayrıca ikinci olarak, enjekte karbondioksitin formasyon içinde hareketini etkileyecek ince şist tabakası içermektedir.



Sleipner Projesi'nin basitleştirilmiş şekli



Açıklama 5.2 In Salah CO₂ Depolama Projesi

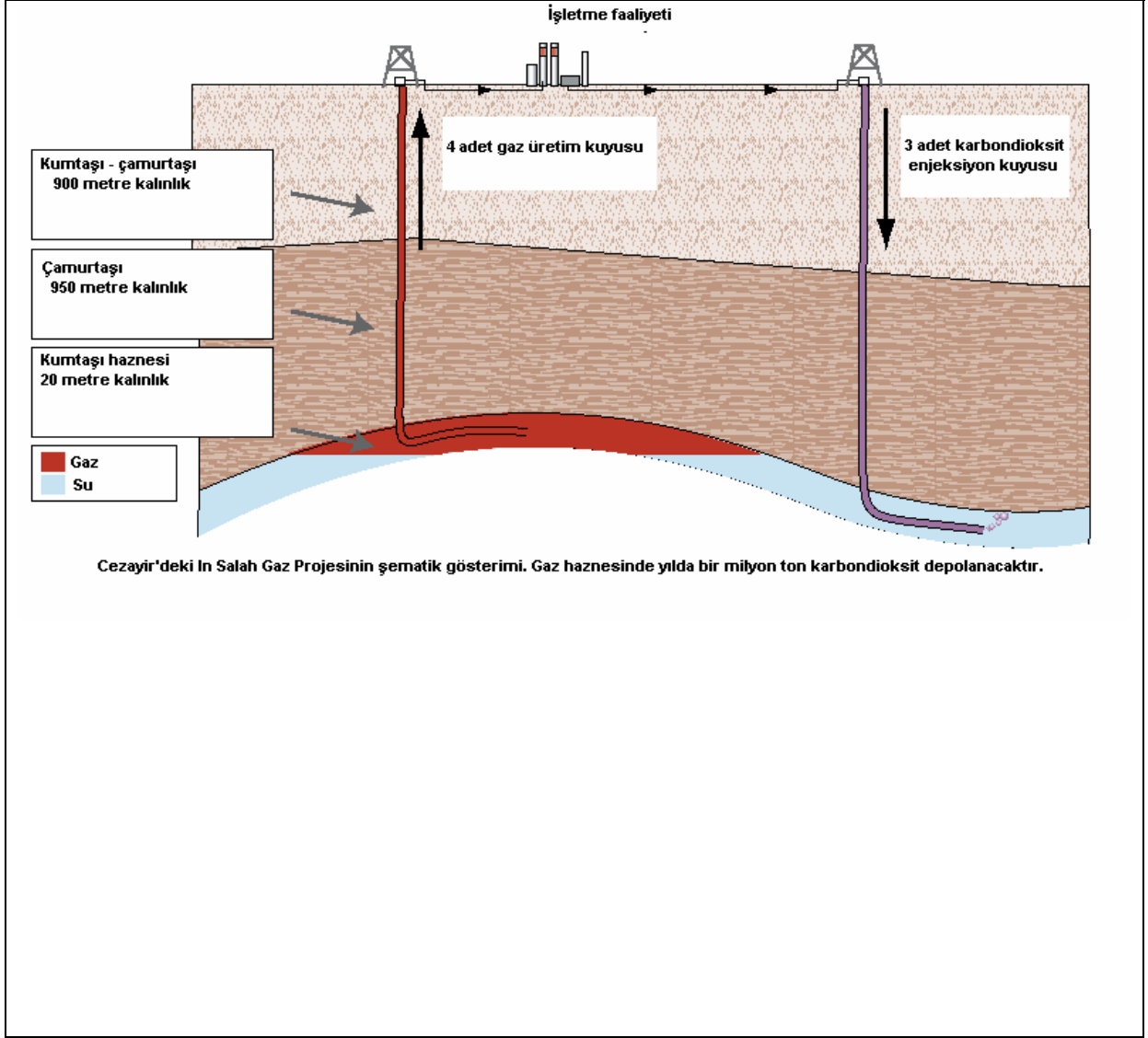
In Salah CO₂ Depolama Projesi, Cezayir

Cezayir'in Saharan bölgesi merkezinde Sonatrach, BP ve Statoil arasındaki ortak bir çalışma olan In Salah Gaz Projesi, dünyanın ilk büyük ölçekte CO₂ depolama projesi olmuştur(Riddifors ve diğ.,). In Salah'taki Krechba Sahası, birkaç jeolojik haznedan %10 CO₂ içerikli doğal gaz üretmekte ve ticari özellikleri karşılayacak işletme ve ayrıştırma işlemleri ardından Avrupa'daki pazarlarına dağıtmaktadır. Proje karbondioksitin 1800 m derinlikteki kumtaşı haznesine tekrar enjekte edilmesini ve yılda 1.2 MtCO₂ depolamasını kapsar. Karbondioksit enjeksiyonu Nisan, 2004'te başlamıştır. Projenin ömrü boyunca 17 Mt karbondioksitin jeolojik olarak depolanacağı hesaplanmıştır. Proje dört üretim ve üç enjeksiyon kuyusundan oluşur.

Krechba Sahası bir antiklinal oluşturur. Bölgedeki gazın tamamen tükenmesinden sonra enjekte edilen karbondioksitin bu gaz bölgesine göçmesi beklenmektedir. Arazi üç boyutlu sismik yöntem ve kuyu verileri ile haritalanmıştır. Derinlerde faylar belirlenmiş, ancak sığ seviyelerde yapının fay bulundurmadığı gözlenmiştir. Hazne içindeki depolama hedefi, bu nedenlerden dolayı en düşük yapısal belirsizlik veya risk taşımaktadır. Mühür görevindeki örtü kayacı 950 m kalınlıktaki çamurtaşı ardalanmasıdır.



Cezayir'deki In Salah Projesi



Gelişmiş petrol kurtarımı fırsatları, CO₂ depolamasındaki ilgiyi arttırmıştır(Stevens ve diğ., 2001b; Moberg ve diğ., 2003; Moritis, 2003; Riddiford ve diğ., 2003; Torp ve Gale, 2003). CO₂-Gelişmiş petrol kurtarımı projeleri, CO₂ depolaması için tasarlanmış olmasa da CO₂ depolaması ile birlikte denenebilir. Ancak gelişmiş petrol kurtarımı projelerine ait kapsamlı monitörleme programlarının eksikliği, depolama ölçümünü yapmayı zorlaştırmaktadır.

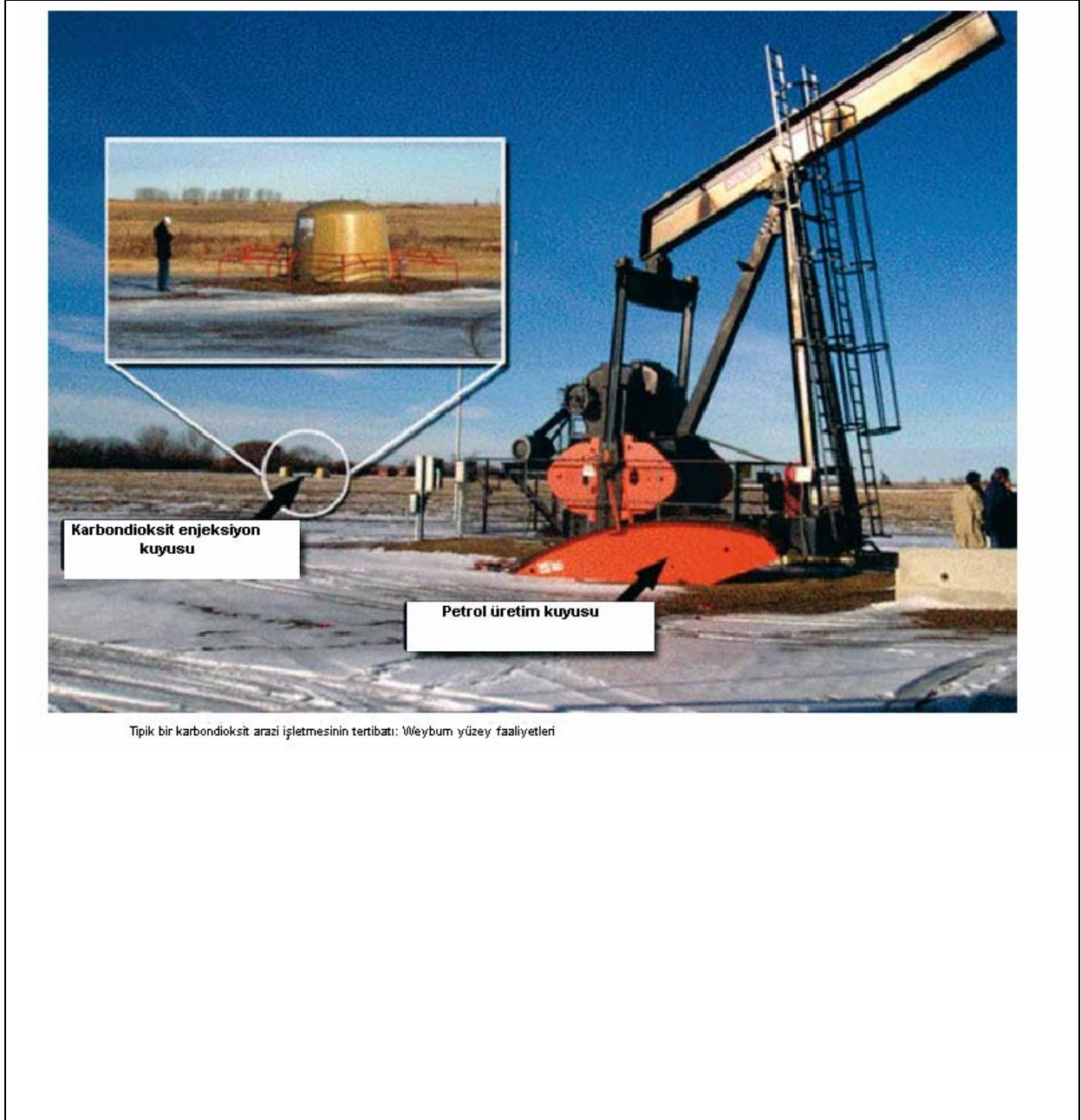
Açıklama 5.3 Weyburn CO₂ Gelişmiş Petrol Kurtarımı

Weyburn CO₂ Gelişmiş Petrol Kurtarımı Projesi

Weyburn CO₂ Gelişmiş Petrol Kurtarımı Projesi, Kanada'nın güneyinden Amerika'nın kuzeyine kadar uzanmış jeolojik bir yapı olan Williston Havzası'nda bulunmaktadır. Proje, enjekte karbondioksitin neredeyse tamamının sürekli olarak depolanmasını amaçlamaktadır. Projenin çalışma ömrü boyunca (20-25 yıl), şu anki ekonomik koşullar ve petrol kurtarımı teknolojisi ile bölgede 20 MtCO₂ depolaması beklenmektedir.

Weyburn CO₂Gelişmiş Petrol Kurtarımı Projesi için kullanılan CO₂ kaynağı, Beulah'taki (Amerika, Kuzey Dakota) Weyburn'un yaklaşık 325 km güneyinde bulunan Dakota Gazlaştırma Şirketi'dir. Bu santralde bir yan ürün olarak saf karbondioksit ile sentez gazların(metan) üretimi için kömür gazlaştırılır. Bu karbondioksit akımı dehidratlaştırılır, sıkıştırılır ve Kanada, Saskatchewan'ın güney doğusunda Weyburn'a borular ile gönderilir.

Petrol rezervuarı, 20-27 m kalınlıktaki karbonatlı kayaçlardır. Hazne için mühür görevi gören bir anhidrit zonu mevcuttur. Haznenin kuzey sınırında karbonatlar, bir bölgesel uyumsuzluğa doğru incelmektedir. Bazal örtü birimi de anhidrittir ancak hazne bölgesi boyunca daha az süreklidir. Kalın, yatay tabakalı şistler, uyumsuzluk üzerinde hazneden sızıntı oluşmasını önleyecek iyi bir engel oluştururlar. Ayrıca tuzlu yer altı suyu içeren yüksek geçirgenlikteki formasyonlar, karbondioksitin formasyon suyu içerisinde hızlı çözünmesi nedeniyle bu zonlara ulaşabileceği yanal göçü için iyi bir kanal oluşturacaktır.



5.1.3 Anahtar Sorular

Eğer CO₂ depolaması, atmosferdeki CO₂ emisyonlarında derin indirgemeler yapmak için gerekli olan ölçekte yürütülecekse, o halde yüzlerce, ve hatta binlerce büyük ölçekte jeolojik depolama projelerinin bulunması gerekmektedir. Bunun olma/olabilme ve uygulanabilme ölçüsü de aşağıda sıralanan anahtar soruların cevaplarına bağlı olacaktır:

- CO₂ yeraltına nasıl depolanacaktır? Karbondiyoksit enjekte olduktan sonra ne olur? Gereken kimyasal ve fiziko-kimyasal işlemler nelerdir? Jeolojik kontroller nelerdir?
- Karbondiyoksit yeraltında depolanmış olarak ne kadar kalabilir?

- Karbondioksit yerkabuğunda lokal, bölgesel ve küresel olarak nerede ve ne kadar depolanabilir? Toplam depolama kapasitesi günümüzde atmosfere salınan karbondioksitin önemli bir bölümünü zaptetmeye yeterli midir?
- CO₂-Gelişmiş Petrol Kurtarımı ve Gaz Kurtarımı için önemli fırsat ve olanaklar mevcut mudur?
- Uygun bir depolama sahası nasıl tanınabilir ve bunun jeolojik karakteristikleri nelerdir?
- Karbondioksitin jeolojik depolaması için bugün hangi teknolojiler mevcuttur?
- Karbondioksit jeolojik olarak depolandığı zaman monitörlenebilir mi?
- Jeolojik depolama sahası güvenle işletilebilir mi? İşletilebilirse nasıl?
- Jeolojik depolama için yasal ve düzenleyici sorunlar var mı ve bunun işletilmesine imkan sağlayacak bir yasal/düzenleyici çatı mevcut mu?
- Karbondioksitin jeolojik depolamasının olası maliyeti nedir?
- Elimizdeki mevcut verilerin incelenmesinden sonra halen bilmemiz gereken şeyler var mı? Verideki bu eksiklikler nelerdir?

Bu bölümün geri kalan kısmında, bu soruların cevapları aranacaktır.

5.2 Depolama mekanizmaları ve depolama güvenliği

Yerkabuğundaki jeolojik formasyonlar taşınmış ve depolanmış kayaç parçacıklarının organik materyal ve minerallerinden oluşur. Parçacıklar ve mineraller arasındaki boşluklar sıvılar ile doldurulur. Açık kırıklar ve oyuklar da sıvılar ile dolar. Geçirgen bir formasyonun boşluk ve kırıklarına enjekte olan CO₂, “in situ” sıvılarının yerini alabilir, sıvılar ile veya sıvıların içinde çözünebilir, mineral parçacıkları ile reaksiyona girebilir veya tüm bu işlemlerin bir kombinasyonunu gerçekleştirebilir.

5.2.1 CO₂ akımı ve taşıma işlemi

Derin jeolojik formasyonlara sıvıların enjeksiyonu, bir kuyu boyunca bu sıvıların pompalanması ile başarılabilir. Depolama alanındaki kuyu, karbondioksitin formasyona girmesini sağlayacak geçirgen bir perde ile kaplanabilir veya delinebilir. Delik açılan veya kaplanan aralık, formasyonun geçirgenliğine ve kalınlığına bağlı olarak 10-100 m kalınlıkta olabilir. Enjeksiyon, in situ formasyon sıvıları ile dolu boşluklara karbondioksitin girmesini

sağlayacak olan kuyu yakınındaki basıncı artırır. Formasyonda artan basıncın miktarı ve dağılımı enjeksiyon oranına, enjeksiyon formasyonunun geçirgenlik ve kalınlığına, formasyonda geçirgen engellerin olup olmayışına ve yer altı su sisteminin (hidrojeolojik) geometrisine bağlı olacaktır.

Formasyona enjeksiyon yapıldığında karbondioksitin yayılmasını kontrol eden başlangıç akımı ve taşıma mekanizmaları, aşağıdaki durumları içerir:

- Enjeksiyon işlemi ile basınç eğimine karşılık meydana gelen sıvı akımı (göç);
- Doğal hidrolik eğime karşılık oluşan sıvı akımı;
- Karbondioksit ve formasyon sıvıları arasındaki yoğunluk farkından oluşan kaldırma kuvveti;
- Difüzyon;
- Formasyon akışkanında çözünme;
- Mineralizasyon;
- Geçirgenliğe bağlı olarak boşluklarda hapsolme;
- Karbondioksitin organik materyale adsorpsiyonu.

Sıvının akım oranı, formasyondaki akışkan fazlarının özellikleri ve miktarına bağlıdır. Herhangi bir oranda iki veya daha fazla akışkanın karışması durumunda “karışabilir akışkanlar” olarak adlandırılır. Eğer karışmazlarsa, “karışmaz akışkanlar” olarak isimlendirilir. Birkaç farklı fazların varlığı geçirgenliği azaltıp göç oranını yavaşlatabilir. Eğer karbondioksit bir gaz haznesine enjekte ediliyorsa, doğal gaz ve karbondioksitten oluşan tek bir karışabilir akışkan fazı lokal olarak oluşabilir. Karbondioksit sıvı ya da sıvı benzeri süperkritik fazda derin bir tuz formasyonuna enjekte edilirse su ile karışamaz. Bir petrol haznesine enjekte edilen karbondioksit petrol bileşimi, sistemin basınç ve sıcaklığına bağlı olarak karışabilir veya karışamaz durumda olabilir. Kömür yataklarına enjekte edilen karbondioksit sonucu kömürün şişme ve büzüşmesi olduğu gibi kömürde önceden adsorbe olan gazların (özellikle metan) adsorpsiyon ve desorpsiyon olayları meydana gelir.

Süperkritik karbondioksitin su ve petrolden daha az vizkoz olması nedeniyle karbondioksitin ve in situ formasyon sıvılarının hareketindeki farklılıklar ile göçü kontrol edilir(Celia ve diğ., 2005; Nordbotten ve diğ, 2005a). Karbondioksitin bir dereceye kadar yüksek hareketliliği nedeniyle, %30-60 aralığında karbondioksit doygunluğu ile sonuçlanacak, sadece petrol veya suyun bir kısmının yerini alacaktır. Vizkoz dokunma, kayacın geçirgenliğinin anizotropisine ve heterojenliğine bağlı olarak, karbondioksitin yüksek oranda boşluklardan atlamasına neden olacaktır(van der Meer, 1995; Enis-King ve Paterson,

2001; Flett ve diğ., 2005). Doğal gaz haznelerinde karbondioksit, doğal gazdan daha vizkoz davranır. Dolayısıyla hareketi kararlı ve vizkoz dokunma sınırlı olacaktır.

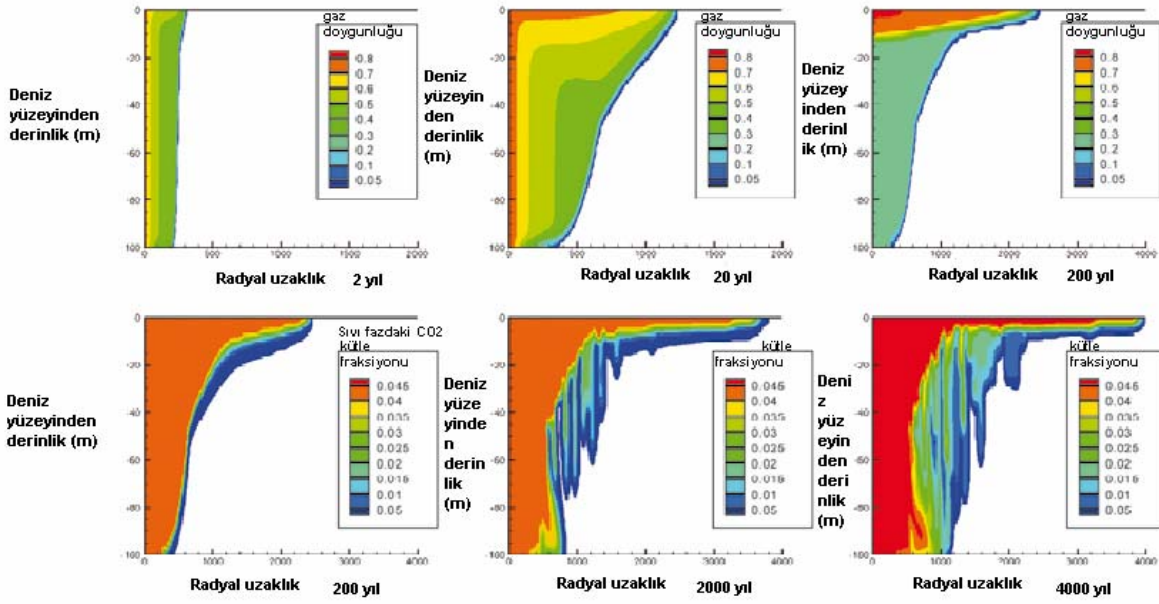
Dikey akımı sürdüren kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğü, formasyondaki akışkanın türüne bağlı olarak değişir. Tuz formasyonlarında karbondioksit ve formasyon suyu arasındaki bir dereceye kadar büyük yoğunluk farkı (%30-50), karbondioksiti yukarıya kaldıracak güçlü kaldırma kuvvetleri meydana getirir. Petrol haznelerinde yoğunluk farkı ve kaldırma kuvvetleri, özellikle petrol ve karbondioksit karışabilir özellikte olduğu zaman çok fazla değildir(Kovscek, 2002). Gaz haznelerinde, karbondioksitin doğal gazdan daha az yoğun olması nedeniyle, kaldırma kuvvetleri altında karbondioksitin aşağıya doğru göçmesi ile ters bir etki oluşacaktır(Oldenburg ve diğ., 2001).

Tuz formasyonları ve petrol haznelerinde enjekte karbondioksitin yüzen kabarcıkları yukarıya doğru tarafsızca göç eder. Bunun nedeni daha az geçirgenlikteki tabakanın bir engel olarak görev almasıdır ve karşılaşacağı stratigrafik veya yapısal bir kapan boyunca yayılarak karbondioksitin yatay olarak göç etmesine neden olur. Kayaç boyunca yükselen karbondioksit kabarcıklarının şekli, düşük geçirgenlikteki şistlerdeki gibi formasyon heterojenliğinden etkilenir(Flett ve diğ., 2005). Depolama formasyonu içindeki az geçirgen tabakalar, depolama formasyonunun daha derin kısımlarına karbondioksitin geçmesini engelleyen yukarıya doğru göçü yavaşlatacak bir etkiye sahiptirler(Doughty ve diğ., 2001).

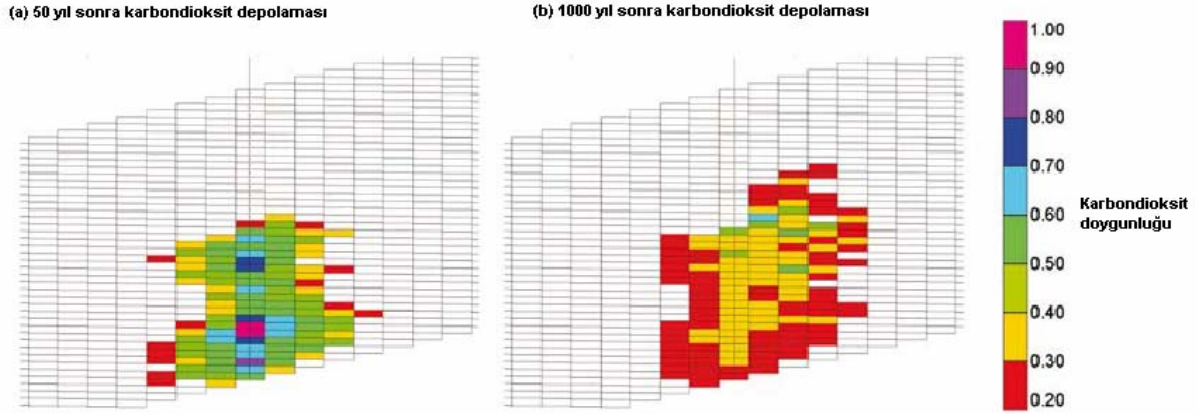
Karbondioksitin formasyon boyunca göç etmesi ile bir kısmı su içerisinde çözünecektir. Yavaş bir şekilde akan su halinde hazne-ölçek sayısal simülasyonları, enjekte karbondioksitin yaklaşık %30'unun on yıllar boyunca formasyon suyunda çözüneceğini göstermiştir(Doughty ve diğ., 2001). Havza-ölçek simülasyonları, tüm karbondioksit kabarcıklarının formasyon suyunda asırlar boyunca çözüneceğini göstermiştir(McPherson ve Cole, 2000; Enis-King ve diğ., 2003). Eğer enjekte karbondioksit kapalı bir yapıda (formasyon suyunun hiçbir akımının bulunmadığı) hapsedilirse, doymamış formasyon suyu ile temasının azalması sebebiyle karbondioksitin tamamen çözünmesi daha uzun zaman alacaktır. Karbondioksit formasyon suyunda çözüldüğünde yeraltı suyu akımı ile birlikte göç eder. Az geçirgen ve yüksek tuzluluk özelliklerine sahip derin sedimanter havzalar için yeraltı suyu akım hızları çok düşüktür; tipik olarak mm/yıl tarzındadır(Bachu ve diğ., 1994). Böylece çözülmüş karbondioksitin göç oranı, esas itibarıyla karbondioksitin farklı fazında olduğundan daha düşüktür.

Karbondioksit ile doymuş su, orijinal formasyon suyundan tuzluluğa bağlı olarak yaklaşık %1 oranında daha yoğundur(Enick ve Klara, 1990; Bachu ve Adams, 2003). Şekil 5.5, birkaç binyıl süresince karbondioksit çözünmesi ve konveksiyon hücrelerini

göstermektedir. Karbondioksitin brinel içerisinde çözünabilirliği artan basınç, düşen sıcaklık ve artan tuzluluk nedeniyle azalmaktadır. Hesaplamalar, tuzluluk ve derinliğe bağlı olarak 1 m³ formasyon suyunda 20-60 kgCO₂ çözünebileceğini göstermiştir(Holt ve diğ., 1995; Koide ve diğ., 1995). Heterojen modelden daha ziyade homojen model kullanılması ile tüm karbondioksitin çözünmesi için gereken zaman az çok tahmin edilebilir.



Şekil 5.5 1 km derinlikte ve 100 m kalınlıktaki homojen bir formasyona karbondioksit enjeksiyonunun radyal simülasyonu(10 MPa basınç ve 40°C sıcaklık koşulları altında). Enjeksiyon oranı 1 MtCO₂/20 yıl, yatay geçirgenlik 10⁻¹³ m² (yaklaşık 100mD) ve dikey geçirgenlik 10⁻¹⁴ m². Atık karbondioksit saturasyonu %20'dir. 2, 20 ve 200 yıl için belirtilen ilk üç şekilde gözenekli ortamdaki gaz saturasyonu gösterilmektedir. 200, 2000 ve 4000 yıl için belirtilen diğer şekillerde çözünmüş karbonidoksitin kütle fraksiyonu verilmektedir.



Şekil 5.6 Bir tuz formasyonuna karbondioksit enjeksiyonunun 50 yıl sonraki durumunun simülasyonu. Kapılar kuvvetler karbondioksiti sedimanter kayacın boşluklarına kapatır. (a) Enjeksiyondan sonraki 50 yıllık zaman diliminde kaldırma kuvvetleri etkisi altındaki karbondioksit, halen hareketli haldedir. (b) 1000 yıl sonra karbondioksit tarafından etkilenmiş olan hacmi yaymış ve artık karbondioksit doygunluğu ya da brinel içerisinde çözünme (şekilde gösterilmemiş) ile hapsedmiştir. Az bir karbondioksit hareketlidir ve enjekte karbondioksitin tamamı akifer içerisinde zaptedilmiştir(Kumar ve diğer, 2005).

Karbondioksitin bir formasyon boyunca göç etmesi ile bir kısmı, büyük miktardaki karbondioksiti durağanlaştıracak, genel olarak “artık karbondioksit kapanı” olarak adlandırılan kapılar kuvvetler ile boşluklarda tutulur(Obdam ve diğ., 2003; Kumar ve diğ., 2005). Şekil 5.6, kapan düzeyi yüksek iken ve karbondioksitin kalın bir formasyona enjekte edildiği zaman, formasyon üzerindeki örtü kayacına ulaşmadan önce bile tüm karbondioksitin bu mekanizma ile tutulabileceğini göstermektedir. Holtz (2002), bu etkinin formasyona özgü olduğu sürece artık karbondioksit saturasyonlarının tipik birçok depolama formasyonu için %15-20 oranı kadar yüksek olacağını göstermiştir. Zamanla kapatılan karbondioksitin büyük bölümü formasyon suyunda çözünür(Enis-King ve Paterson, 2003). Bununla birlikte uygun hazne hesaplamaları, kapanın çözünürlülüğü hızlandırabilir veya değiştirebilir(Keith ve diğ., 2005).

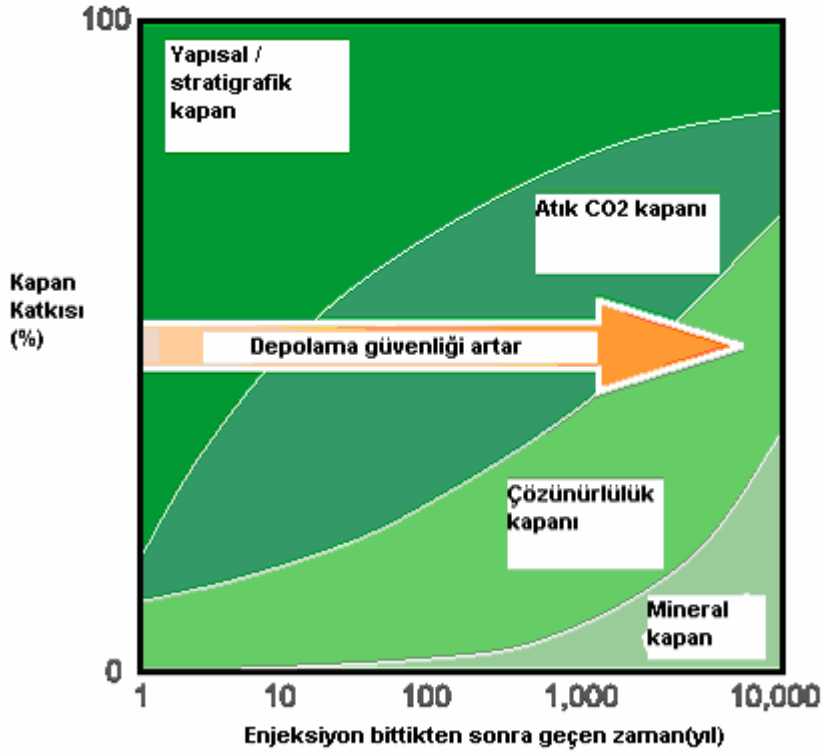
5.2.2 Jeolojik formasyonlarda CO₂ depolama mekanizmaları

Jeolojik depolamanın etkililiği fiziksel ve jeokimyasal kapan mekanizmalarının kombinasyonuna bağlıdır. En etkili depolama sahaları karbondioksitin kalın, az geçirgen bir

örtünün altında kapatıldığı, katı minerallere dönüştürüldüğü ya da kömürün mikro boşluklarının yüzeyinde adsorblandığı veya fiziksel ve kimyasal kapan mekanizmalarının kombinasyonu bulunan bölgelerdir.

5.2.2.1 Fiziksel kapan: stratigrafik ve yapısal kapan

İlk olarak karbondioksitin çok düşük geçirgenlikteki şistler veya tuz yatakları gibi az geçirgen örtü kayaçları altındaki fiziksel kapanı, jeolojik formasyonlarda karbondioksiti depolamak için esas yöntemdir(Şekil 5.4). Bazı yüksek bölgeler, sıg gaz hidratları muhtemelen mühür görevi görebilirler. Sedimanter havzalar esas olarak tuzlu su, petrol ve gaz ile doldurulmuş bu kapalı, fiziksel olarak bağlanmış kapan veya yapılara sahiptir. Yapısal kapanlar kıvrımlı veya çatlaklı kayaçlar ile oluşturulur. Faylar bazı durumlarda geçirgen bir engel gibi davranabilir ve tercihen bazı durumlarda sıvı akımı için bir yol oluşturabilir(Salvi ve diğ., 2000). Stratigrafik kapanlar kayaçların biriktiği ortamlardaki varyasyonlar sonucu değişen kayaç türü ile oluşur. Bu kapan türlerinin her biri, karbondioksit depolaması için uygundur ancak örtü kayacının çatlamasından veya fayların tekrar faaliyete geçmesinden sakınmak için üzerindeki basıncın izin verilebilir seviyeyi aşmamasına dikkat edilir(Streit ve diğ., 2005).



Şekil 5.7 Depolama güvenliği, fiziksel ve jeokimyasal kapan kombinasyonuna bağlıdır. Zamanla artık karbondioksit kapanının fiziksel işlemi ve çözünürlük kapan ile mineral kapanın jeokimyasal işlemi artar.

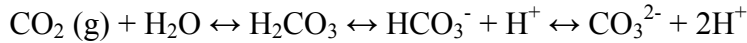
5.2.2.2 Fiziksel kapan: hidrodinamik kapan

Hidrodinamik kapanlar, kapalı bir kapana sahip olmayan ancak akışkanların uzun mesafeler boyunca çok yavaşça hareket edebileceği tuz formasyonlarında meydana gelir. Bir formasyona karbondioksit enjekte edildiği zaman tuz formasyon suyunun yerini alır ve ardından sudan daha az yoğun olduğu için yüzer vaziyette yukarıya doğru göç eder. Formasyonun üst doruğuna ulaştığı zaman, örtü formasyon içerisindeki yapısal veya stratigrafik kapan içinde ya da artık karbondioksit satürasyonu olarak kapatılıncaya kadar farklı bir farzda göçmesine devam eder. Uzun vadede karbondioksitin önemli miktarları formasyon suyu içerisinde çözünür ve ardından yeraltı suyu ile göç eder. Derin enjeksiyon sahasının üzerleyen geçirimsiz formasyona olan uzaklığı yüzlerce kilometredir ve akışkanın derin havzadan yeryüzüne ulaşması için gerekli olan zaman ölçeği, milyonlarca yıl olabilir (Bachu ve diğ., 1994).

5.2.2.3 Jeokimyasal kapan

Yerkabuğundaki karbondioksit, ileride depolama kapasitesi ve etkililiğini arttıracak şekilde kayaç ve formasyon suyu ile bir seri jeokimyasal etkileşime maruz kalabilir. İlk olarak formasyon suyunda karbondioksit çözüldüğünde, genelde çözünürlülük kapanı olarak adlandırılan olay meydana gelir. Çözünürlülük kapanının başlıca faydası, çözüldüğünde karbondioksiti yukarıya doğru götürecektir olan kaldırma kuvvetlerinin ortadan kalkması ile artık ayrı bir farzda olmamasıdır. Daha sonra kayacın çözünmesi ile pH oranındaki artışla birlikte iyonik boşluklar oluşacaktır. Son olarak bir miktar fraksiyon, jeolojik depolamanın kalıcı formu olan durağan karbonat minerallerine dönüşebilir(Gunter ve diğ., 1993). Mineral kapanın diğerlerine kıyasla yavaş ve potansiyel olarak binlerce yıl ya da daha fazla süre alabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte bazı jeolojik ortamlarda mevcut büyük depolama kapasitesi ile birlikte mineral depolama sürekliliği, uzun vadede depolama için arzu edilir bir özelliktir.

Formasyon suyunda karbondioksitin çözünmesi, aşağıdaki kimyasal reaksiyon ile gösterilebilir:



Formasyon suyunda karbondioksit çözünürlülüğü, sıcaklık ve tuzluluk artışı ile azalır. Formasyon suyu ve karbondioksit aynı boşluk oranını paylaştığı zaman çözünme hızlıdır ancak formasyon akışkanı karbondioksit ile doymuş olduğunda hız yavaşlar ve difüzyon ve konveksiyon oranları ile kontrol edilir.

Suda çözünen karbondioksit, bikarbonat iyonlarını oluşturan formasyon veya haznedeki sodyum ve potasyum bazik silikat veya kalsiyum, magnezyum ve demir karbonatları veya silikat mineralleri ile tepkiyen zayıf bir asit üretir. Bu kimyasal reaksiyon:



Mineraller ile çözülmüş karbondioksitin reaksiyonu, bazı karbonat mineralleri durumunda hızlı olabilir(günler) ancak silikat mineralleri olması durumunda yavaş olur(yüzlerce yıldan binlerce yıla kadar).

Perkins ve diğ., (2005), Weyburn Petrol Sahası'nda enjekte edilen tüm karbondioksitin depolama formasyonu içerisinde 5000 yıl süresinde karbonat minerallerine dönüşeceğini hesaplamıştır. Eşit olarak örtü kayacının ve üzerleyen kayaç formasyonunun mineralizasyon için bile daha büyük kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir. Bu da sızıntı tehlikesi

değerlendirmesi için önemlidir. Çünkü karbondioksit çözüldüğü zaman sızıntısı için farklı bir fazda bulunmaz. Holtz (2002) tarafından yapılan modellemeler, laboratuvar deneyleri oldukça düşük yüzde oranlarını gösterse de karbondioksitin %60'ından fazlasının enjeksiyon aşamasının sonunda artık karbondioksit kapağı ile kapatıldığını göstermiştir(1000 yıl sonunda %100). Karbondioksit artık satürasyonda kapatıldığında, etkin olarak hareketsizdir. Bununla birlikte örtü kayacı boyunca bir sızıntı meydana gelebilir ve doygun brinel, Şekil 5.5'te gösterildiği gibi yukarıya yükselmeden ziyade dibe batma eğilimine karşın basınç rahatlaması ile gazdan arıtılabilir. Karbondioksitin kayaçlar ve formasyon suyu ile reaksiyonu, kayaç porozitesini etkileyecek reaksiyon ürünleri ile sonuçlanabilir.

5.2.3 Karbondioksitin doğal jeolojik birikimleri

Karbondioksitin gaz birikimleri, doğal gaz ile karbondioksit karışımı ve formasyon suyunda karbondioksit çözünmesi gibi karbondioksitin doğal kaynakları oluşur(Şekil 5.8). Amerika, Avustralya ve Avrupa'da, yapay olarak yapılan depolama sahalarındaki sızıntı için olduğu gibi karbondioksit depolamasına benzer olarak bu doğal birikimler araştırılmıştır(Pearce ve diğ., 1996; Allis ve diğ., 2001; Stevens ve diğ., 2003; Watson ve diğ., 2004). Gelişmiş petrol kurtarımı ve diğer kullanımlar için karbondioksit üretimi, karbondioksit tutum ve depolamasına yönelik işleyimsel bir deneyim sağlamaktadır. Tabii ki doğal karbondioksit birikimleri ile yapay karbondioksit depolama sahaları arasında farklılıklar mevcuttur: karbondioksitin doğal birikimleri, çok uzun zaman periyotlarında ve bazılarının doğal olarak "sızdıran" özellikte olduğu gelişigüzel bölgelerde birikirler. Yapay sahalarda karbondioksit enjeksiyon hızı yüksek olacaktır ve saha muhakkak enjeksiyon kuyuları ile delinecektir(Celia ve Bachu, 2003; Johnson ve diğ., 2005). Bundan dolayı enjeksiyon basıncının örtü kayacına zarar vermemesi için düşük tutulmasına ve kuyuların düzgün bir biçimde kapatılmasına dikkat edilmelidir.

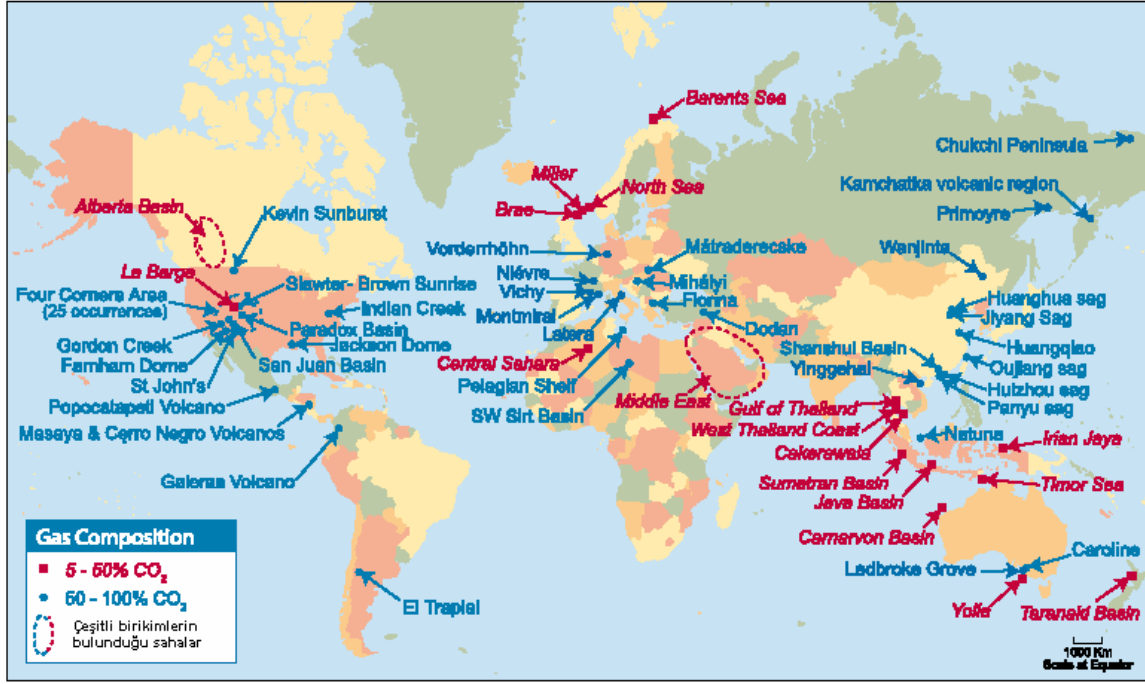
Göreceli olarak saf karbondioksitin doğal birikimleri, özellikle sedimanter havzalar, plaka içi volkanik bölgeler ve pasif volkanik yapılar gibi dünyanın bir seri jeolojik ortamlarında bulunmaktadır. Doğal birikimler özellikle örtü kayacı (çamurtaşı, şist, tuz ve anhidrit), çeşitli kapan tipi ve hazne derinliklerine sahip kireçtaşı, dolomit ve kumtaşı gibi birkaç farklı sedimanter kayaç içerisinde oluşur.

Colorado Plateau ve Rocky Dağları'ndaki (Amerika) karbondioksit sahaları, klasik doğal gaz hazneleri ile karşılaştırılabilir(Allis ve diğ., 2001). Bu sahaların üçünde yapılan çalışmalar (McElmo Domu, St. Johns Field ve Jackson Domu), ölçülebilir oranlarda sızıntı ile

birlikte her birinin 1600 MtCO₂ zapt edildiğini göstermiştir(Stevens ve diğ., 2001a). Jackson Domu yakınındaki Pisgah Antiklinali'nde tutulan ikiyüz milyon ton, 65 milyon yıl öncesinden oluştuğu sanılmaktadır ve sızıntıya ait hiçbir delil bulunmamaktadır(Studlick ve diğ., 1990). Avustralya'da Otway Havzası (Watson ve diğ., 2004), Fransa, Almanya, Macaristan ve Yunanistan'daki küçük ölçekli karbondioksit birikimleri üzerinde kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir(Pearce ve diğ., 2003).

Jeolojik depolama için tipik olarak kaplıca ve volkanik sistem gibi bazı sistemler sızdıran özelliktedir ve benzer yararları yoktur. Kileaua Yanardağı yılda ortalama 4 MtCO₂ salmaktadır. Mammoth Dağı bölgesinde sismisiteye bağlı sürekli değişimler ile birlikte günde 1200 Mt karbondioksitten fazla (438000 tCO₂/yıl) salınım gerçekleşmektedir(USGS, 2001b). Matraderecske (Macaristan) yakınında ortalama 80-160 tCO₂ m⁻² yıl⁻¹ sürekli değişim gözlenmiş ancak faylarla birlikte yoğunluk değişimi 6600 t m⁻² yıl⁻¹'e ulaşabilmektedir(Pearce ve diğ., 2003). Normal bir CO₂ değişim seviyesi 10-100 gCO₂ m⁻² gün⁻¹ arasında değişirken, bu yüksek sızıntı oranları faylı volkanik sistemlerinden salınım sonucu meydana gelmektedir(Pizzine ve diğ., 2002). Kamerun'daki Nyos Gölü'ne sızan karbondioksit, gölün derin sularının karbondioksit doygunluğu ile sonuçlanmaktadır(Kling ve diğ., 1987).

Karbondioksit bazı petrol ve gaz sahalarında ayrı bir gaz fazı veya petrol içinde çözülmüş olarak bulunmaktadır. Bu çeşit depolama Asya'nın güneydoğusunda, Çin'de ve Avustralya'da yaygın; Cezayir, Rusya, Paradox Havzası (Amerika) ve Alberta Havzası (Batı Kanada) gibi diğer bazı petrol ve gaz provenislerinde daha az yaygınlıkta bulunmaktadır. Kuzey Denizi ve Barents Denizi'nde Sleipner ve Snohvit dahil birkaç bölge %10'a kadar karbondioksit içermektedir. Amerika Wyoming'deki La Barge doğal gaz sahası, hacimce %65 karbondioksit bulduran 3300 Mt gaz rezervi içermektedir. Güney Çin denizi yakınlarında başlıca karbondioksit birikimleri, 9100 MtCO₂ (729 Mt doğal gaz)'dan fazla miktar ile dünyanın bilinen en büyük karbondioksit birikimi olan Hindistan'ın Natuna D Alpha arazisini kapsamaktadır.

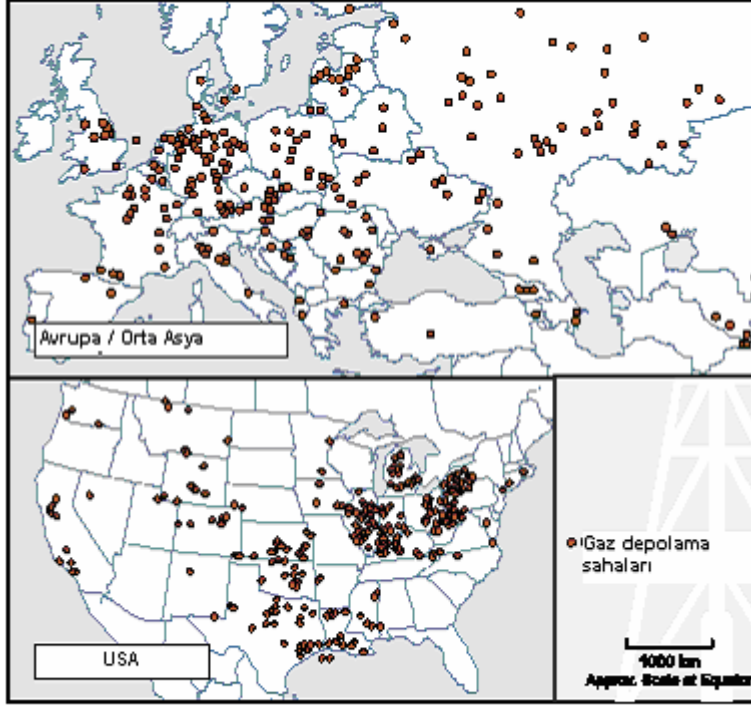


Şekil 5.8 Dünya genelinde karbondioksit birikimlerine örnekler. Birden fazla oluşumu kapsayan bölgeler kısa çizgiler ile çember içine alınmıştır. Doğal birikimler depolamanın etkinliği ve sızıntının çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için faydalı örnek teşkil ederler. Veri kalitesi bölgeden bölgeye değişir.

5.2.4 Karbondioksit depolaması için faydalanılabilecek endüstriyel örnekler

5.2.4.1 Doğal gaz depolama

Karbondioksit depolaması için tecrübe sağlayacak yeraltı doğal gaz depolama projeleri (Lippmann ve Benson, 2003; Perry, 2005), yaklaşık 100 yıldır dünyanın farklı bölgelerinde başarı ile yürütülmektedir (Şekil 5.9). Gaz depolama projelerinin çoğunluğu tükenmiş petrol ve gaz haznelerinde ve tuz formasyonlarında yer alır. Bu projelerin başarı ile yürütülmesi için birkaç faktör önemlidir; bunlar yeterince tanımlanmış uygun bir sahanın yanında depolama haznesinin geçirgenliği, kalınlık ve yayılımı, örtü kayacın sıklığı, jeolojik yapı, litoloji vb. özellikleridir. Enjeksiyon kuyuları düzgün bir biçimde tasarlanıp yerleştirilmeli, monitörlenmeli ve işletilmelidir. Proje sahasında veya yakınında bulunan terkedilmiş kuyular saptanmalı ve kapatılmalıdır. Ayrıca çözünürlülük, yoğunluk ve kapan koşulları göz önüne alınarak depolama haznesinin yüksek basınç altında kalmasından (gazın, in situ formasyon basıncından daha yüksek bir basınçla enjekte edilmesi) sakınılmalıdır.



Şekil 5.9 Bazı doğal gaz depolama sahalarının lokasyonları

Yeraltında doğal gaz depolaması güvenli ve etkili olmakla birlikte bazı projelerde, çoğunlukla tamamen bitirilmemiş, sıkı kapatılmamış ve terkedilmiş kuyular ile ya da faylar ile sızıntı meydana gelebilir (Gurevich ve diğ., 1993; Lippmann ve Benson, 2003; Perry, 2005). Terkedilmiş petrol ve gaz sahaları da doğal gaz depolama sahaları gibi, tuz formasyonlarından daha kolay değerlendirilebilir özelliktedir. Çünkü mevcut kuyular ile jeolojik yapı ve örtü kayacı yeteri kadar tanımlanır. Çoğu doğal gaz depolama sahalarında monitör gereksinimi, enjeksiyon kuyusunun sızdırmazlığını kontrol etmeye yöneliktir. Gözlem kuyuları bazen de gazın daha sıkı tabakalara sızmadığını denetlemek amacıyla kullanılır.

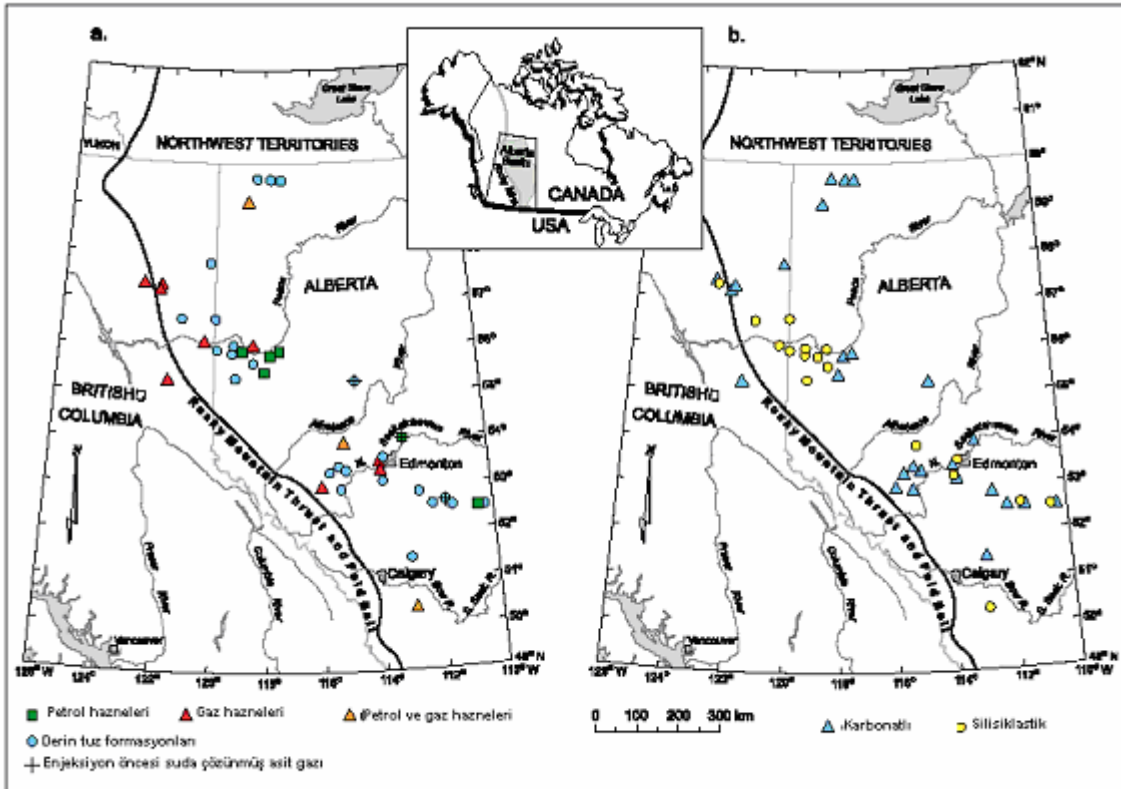
5.2.4.2 Asit gazı enjeksiyonu

Asit gazı enjeksiyon işlemleri, karbondioksitin jeolojik depolaması için bazı yönlerden ticari benzerlik gösterirler. Asit gazı, H_2S ve CO_2 ile petrol üretim ve işletmesinden kaynaklanan az miktarda hidrokarbon gazı karışımından oluşur. Batı Kanada'da işletmeler, giderek derin jeolojik formasyonlara asit gazının elden çıkarımı amacıyla enjeksiyonu işlemine geçmektedir. Asit gazı enjeksiyon işleminde H_2S 'nin elden çıkarımı amaçlansa da

önemli miktarda karbondioksit de beraberinde enjekte edilmektedir. Bunun nedeni, iki gazı ayırıştırma maliyetinin yüksek oluşudur.

Bugün Kanada'daki Alberta Havzası boyunca 44 farklı mevkide 51 farklı formasyona asit gazı enjekte edilmektedir(Şekil 5.10). Karbondioksit, genellikle enjekte edilen asit gazında en önemli bileşeni oluşturmaktadır(çoğu durumda hacimce %14-98). 2003 yılı sonu itibariyle Batı Kanada'daki bu sahalarda günlük 840-500,720 m³'lük bir miktar ile toplam 2.5 MtCO₂ ve 2 MtH₂S enjekte edilmiştir.

Batı Kanada'daki asit gazı enjeksiyonu, geniş bir çeşitlilikte formasyon ve hazne türü ile asit gazı bileşenleri ve işletme koşulları altında yürütülmektedir. Enjeksiyon 27 sahada derin tuz formasyonlarında, 19 sahada tüketilmiş petrol ve/veya gaz haznelerinde ve 4 sahada da tüketilmiş petrol ve gaz haznelerinin tabanında bulunan su birikintilerinde meydana gelmektedir. 29 sahada hazne karbonatlardan oluşmuştur ve 21 sahada kuvarsça zengin kumtaşları egemen durumdadır(Şekil 5.10). Çoğu durumda şistler, üzerleyen örtü kayacını oluşturmuştur. Diğer enjeksiyon sahalarında da örtü kayacı kireçtaşı, evaporit ve anhidrittir.



Şekil 5.10 Kanada, Alberta Havzası'ndaki asit gazı enjeksiyon sahalarının mevkileri: (a) enjeksiyon birimi ile sınıflanmış (b) aynı kayaç türü ile sınıflanmış kayaçlar(Bachu ve Haug, 2005).

5.2.4.3 Sıvı atık enjeksiyonu

Dünyanın çeşitli bölgelerinde her gün, derin yerkabuğuna büyük miktarlarda sıvı atık enjekte edilmektedir. Örneğin, son 60 yıl için Amerika'da her yıl açılan yaklaşık 500 kuyudan ortalama 9 milyar galon (34.1 milyon m³) sıvı atık, tuz formasyonlarına enjekte edilmiştir. Ayrıca 750 milyar galondan (2843 milyon m³) fazla petrol sahası brinelleri, her yıl açılan 150,000 kuyudan enjekte edilmektedir. Amerika'daki yıllık ortalama 3000 milyon m³ enjeksiyon hacmi, 1 km derinliğinde yaklaşık 2 GtCO₂ hacminin enjekte edilmesine eşdeğerdir. Bundan dolayı derin enjeksiyon projelerinden edinilen deneyim, karbondioksitin jeolojik depolaması için gereken işletme çeşidi ve benzer büyüklük bakımından ilişkilidir.

5.2.5 Karbondioksitin jeolojik formasyonlarda duraylılık ve güvenliği

Petrol ve gaz sahalarından edinilen bilgiler, hidrokarbonların ve CO₂ içeren diğer gaz ve akımların milyonlarca yıl kapatılmış olarak kalabileceğini işaret etmektedir (Magoon ve Dow, 1994; Bradshaw ve diğ., 2005). Karbondioksit, birçok fiziko-kimyasal hareketsizleştirme mekanizmaları yolu ile yerkabuğunda (hidrokarbonlarla ilişkili) hapsolme eğilimine sahiptir. Üstün nitelikli petrol provenşleri, petrol ve gaz için 5-100 milyon yıl ve diğerleri de 350 milyon yıl süre boyunca depolayacak özelliktedir. Bazı küçük petrol birikimleri de 1400 milyon yıla kadar depolanma süresine sahiptirler. Bununla birlikte bazı doğal kapanlar, saha seçimi için titiz bir araştırma, tanımlama ve enjeksiyon uygulamaları gereksinimlerini arttıracak sızıntı meydana getirebilirler.

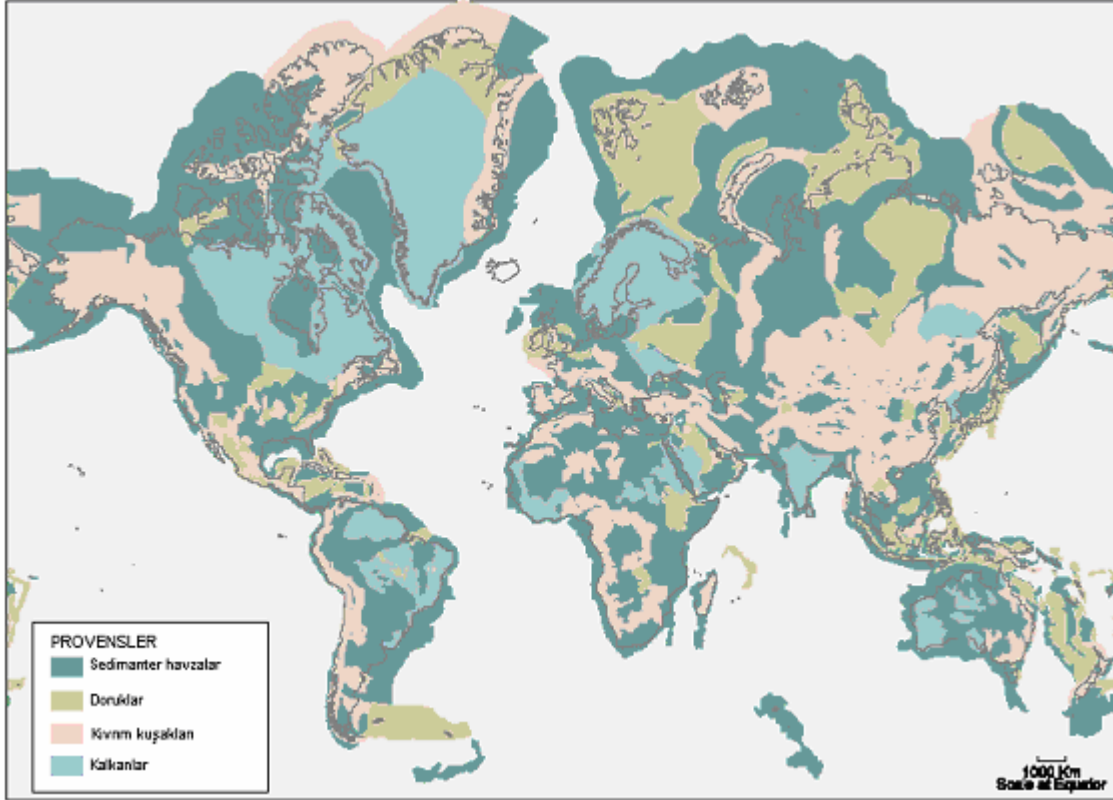
5.3 Depolama formasyonları, kapasiteleri ve coğrafi dağılımları

Bu bölümde bazı sorulara yanıt aranacaktır: Karbondioksit ne tür jeolojik formasyonlarda depolanabilir? Bu formasyonlar yaygın olarak bulunuyor mu? Ne kadar karbondioksit, jeolojik olarak depolanabilir?

5.3.1 Başlıca saha seçimi kriteri

Dünyada karbondioksit depolamasına elverişli çeşitli sedimanter sahalar mevcuttur (Şekil 5.11). Genel olarak jeolojik depolama sahaları, (1) yeterli kapasite ve enjeksiyon imkanı, (2) kapan görevi için uygun bir örtü kayacı ve üzerlemiş birim, (3)

depolama sahasının güvenliğini sağlamak için yeteri kadar süreklilik gösteren jeolojik koşullar. Havza uygunluğunu değerlendirmek için kriterler (Bachu, 2000, 2003; Bradshaw ve diğ., 2002) genel olarak ; havza özellikleri(tektonik aktivite, sediment türü, jeotermal ve hidrotermal sistemler); havza kaynakları(hidrokarbonlar, kömür, tuz), endüstriyel matürite ve altyapı; gelişim seviyesi, ekonomi, çevresel sorunlar, kamu eğitimi ve tutumu gibi bazı sosyal sorunları da içermektedir.



Şekil 5.11 Dünya genelinde sedimenter havzaların yayılımı. Sedimenter havzalar genellikle depolama sahaları için en muhtemel bölgeler olarak bulunmaktadır. Ancak bu sahalarda bazı kıvrım kuşakları ve yüksek doruklarda konumlanmış olabilir. Kalkanlar da depolama için düşük ihtimal sunan bölgelerdir.

Karbondioksit depolaması için sedimenter havzanın uygunluğu, kısmen kıtasal levha üzerindeki konumlarına da bağlıdır. Yarı kıtasal bölgelerde veya sürekli kıtasal levha kenarlarında oluşan havzalar, yapıları ve süreklilikleri dolayısıyla karbondioksitin uzun vadede depolaması için kusursuz bölgelerdir. Bu havzalar daha çok karalarda ve Atlantik, Kuzey Buz Denizi ve Hindistan Denizi yakınlarında bulunmaktadır. Levhaların çarpışması ile oluşan dağların ardındaki havzaların depolama potansiyelleri muhtemelen yüksektir. Buralarda

Amerika’da Rocky Dağları, Appalachian ve Andean Havzaları ile Alpler’in hemen kuzeyindeki Avrupa havzaları gibi yerlerdir. Pasifik Okyanusu veya Akdeniz’in kuzeyindeki gibi tektonik olarak aktif bölgelerde bulunan havzalar, karbondioksit depolaması için daha az uygun bölgeler olabilir ve bu bölgelerdeki sahalar karbondioksitin sızıntı ihtimali nedeniyle daha dikkatli seçilmelidir(Chiodini ve diğ., 2001; Granieri ve diğ., 2003). Dalma-batmanın meydana geldiği veya aktif sıra dağların arasında levha kenarlarında bulunan havzalar, muhtemelen şiddetli bir şekilde kıvrılmanmış ve faylanmış ve depolama için daha düşük ihtimal sunarlar. Örneğin, önemli hidrokarbon birikimlerinin bulunduğu Kalifornia’daki Sacramento Vadisi ve Los Angeles Havzası, iyi bölgesel depolama kapasitesi içerdiği saptanmıştır. Yetersiz CO₂ depolama kapasitesinin, muhtemelen (1) ince (≤ 1000 m), (2) yetersiz hazne ve örtü kaya ilişkisi, (3) yüksek derecede faylanmış ve kırılmış, (4) kıvrım bölgesi içerisinde yer alan, (5) önemli diskordans istifleri içeren, (6) yüksek derecede diyajenez uğramış veya (7) çok yüksek basınca maruz kalan havzalarda olacağı saptanmıştır.

Birim hacimde depolanan karbondioksit miktarı olarak tanımlanan (Brennan ve Burruss, 2003) karbondioksit depolamasının etkililiği, karbondioksit yoğunluğu ile orantılı olarak artar. Bundan başka depolama güvenliği de yoğunlukla beraber artacaktır. Çünkü yukarıya doğru göç etmeyi hızlandıracak olan yukarı kaldırma kuvveti, daha az yoğunluktaki bir akımda daha güçlü olacaktır. Karbondioksit gaz fazında iken az bir miktar artan veya gaz fazından yoğun bir faza geçişi sonrasında sabitlenen yoğunluk, derinlik ile birlikte önemli derecede artıp, daha yüksek bir derinlikte jeotermal gradyana bağlı olarak düşebilir(Enis-King ve Paterson, 2001; Bachu, 2003). Düşük sıcaklık eğilimi ile tanımlı olan “soğuk” sedimanter havzalar, karbondioksit depolaması için daha elverişlidirler. Çünkü karbondioksit, yoğun-akışkan koşullara daha yüksek derinliklerde (1000-1500 m) ulaşıldığı, yüksek sıcaklık eğilimleri ile tanımlanan “sıcak” sedimanter havzalardan daha sığ derinliklerde (700-1000 m) daha yüksek yoğunluğa sahip olur. Depolama formasyonunun derinliği (artan sondaj ve sıkıştırma maliyetine yol açar) depolama sahasının seçiminde etkili olabilir.

Uygun porozite ve kalınlık (depolama kapasitesi için) ve permeabilite (enjeksiyon için) önemlidir; porozite, genellikle depolama kapasitesini ve verimini düşüren sıkışma ve çimentolanma nedeniyle derinlikle birlikte azalır. Depolama formasyonu geniş örtü birimleri (şist, tuz veya anhidrit yatakları gibi) ile kaplanmış olmalıdır. Böylece karbondioksit, üzerleyen birime, daha sığ kayaç birimlerine ve son olarak da yeryüzüne kaçamaz. Özellikle sismik olarak aktif bölgelerde büyük faylara veya kırıklara sahip olan havzalar, karbondioksit depolamasına iyi bir aday olacaklarsa titiz bir biçimde tanımlanmalıdır. Tabii bu bölgelerde

faylar ve kırıklar, mühür görevi görmeli ve karbondioksit enjeksiyonu da bu yapıları açmamalıdır(Holloway, 1997; Zarlenga ve diğ., 2004).

Bir sedimanter havzadaki formasyon suyunun basınç ve akım sistemi, karbondioksit depolaması için saha seçiminde önemli etkenlerdir(Bachu ve diğ., 1994). Kompaksiyon ve/veya hidrokarbon üretimi ile yüksek basınç altında tutulan formasyonlara karbondioksitin enjeksiyonu, uygulamayı elverişsiz kılacak teknolojik ve güvenlik sorunlarını arttırabilir. Yarı kıtasal bölgelerde, kıtasal levha kenarlarında veya levha çarpışması ile oluşan dağların ardında basınç altındaki formasyonlar, karbondioksit depolaması için uygun sahalar olabilir. Akışkanların uzun zaman yer aldığı (milyonlarca yıl) derin tuz formasyonlarında karbondioksitin depolanması, hidrodinamik ve mineral kapan mekanizmalarına olanak sağlar.

Fosil yakıtların olası varlığı ve bir havzanın araştırma ve üretim matüritesi de depolama sahasının seçiminde göz önüne alınabilecek diğer faktörlerdir(Bachu, 2000). Hidrokarbon için az araştırma yapılmış havzalar, jeolojik veri eksikliği veya henüz keşfedilmemiş hidrokarbon kaynaklarının kirlilik potansiyeli nedeniyle karbondioksit depolaması için belirsiz hedefler olabilir. “Mature” sedimanter havzalar, karbondioksit depolaması için başlıca seçenekler olabilir. Nedeni: (1)özellikleri iyi tanınmış, (2) hidrokarbon birikintileri ve/veya kömür yatakları bulunup üretime açılmış, (3) bazı petrol hazneleri henüz tükenmiş, tükenmek üzere veya ekonomik olmayışı nedeniyle terkedilmiş, (4) bölgede karbondioksit nakli ve enjeksiyonu için gerekli altyapı, halihazırdadır. “Mature” sedimanter havzalarda açılmış kuyuların varlığı, depolama sahasının güvenliğini tehlikeye atacak muhtemel sızıntı yollarına neden olabilir(Celia ve Bachu, 2003). Bununla birlikte Weyburn’da önceden açılmış yüzlerce kuyunun varlığına rağmen, dört yıllık karbondioksit enjeksiyon ömründe henüz hiçbir ölçülebilir sızıntıya rastlanmamıştır(Strutt ve diğ., 2003).

5.3.2 Petrol ve gaz sahaları

5.3.2.1 Terkedilmiş petrol ve gaz sahaları

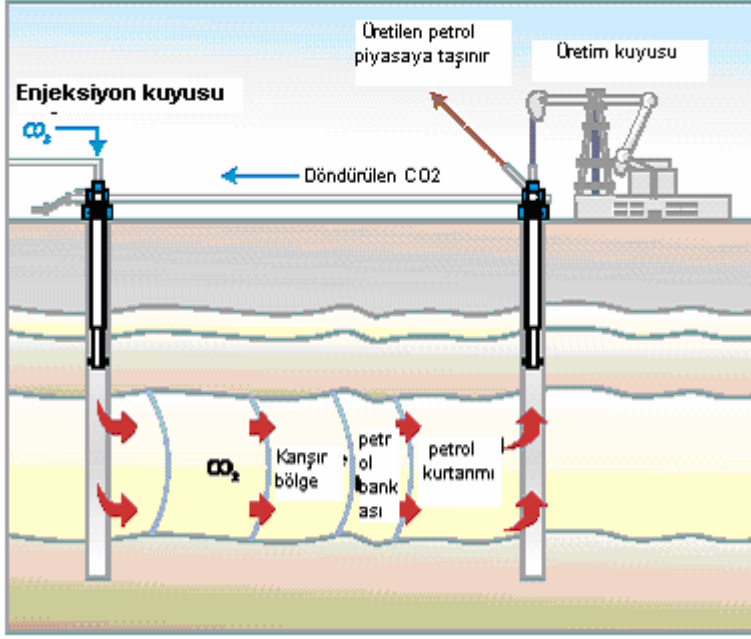
Terkedilmiş petrol ve gaz sahaları, yüzlerce nedenden dolayı karbondioksit depolaması için başlıca aday yerleridir. İlk olarak kapanlarda(yapısal ve stratigrafik) doğal olarak biriken petrol ve gaz, bu yerlerin güvenliğini kanıtlayarak uzun süre kaçmamışlardır(bazı durumlarda milyonlarca yıl). İkincisi, çoğu petrol ve gaz sahalarının jeolojik yapısı ve fiziksel özellikleri, kapsamlı bir şekilde çalışılmış ve tanımlanmıştır. Üçüncüsü, yeraltında hareketini, yerdeğiştirme şeklini ve hidrokarbon kapanımını önceden bildiren bilgisayar modelleri, petrol ve gaz endüstrisi için geliştirilmiştir. Son olarak bu

bölgelerde bazı altyapılar ve kuyular, karbondioksit depolama işlemlerinde kullanılmak üzere halihazırda bulunabilir. Tüketilmiş sahalar karbondioksitten etkilenmeyecektir ve eğer hidrokarbon sahaları halen üretime açık ise, petrol (veya gaz) üretimini arttırmaya yönelik bir karbondioksit depolama projesi yapılabilir.

5.3.2.2 Gelişmiş petrol kurtarımı

Karbondioksit basılması yoluyla (enjeksiyon) yapılan gelişmiş petrol kurtarımı, artan petrol üretimi nedeniyle ekonomik kazanç potansiyeli sağlar. Başlıca petrol üretiminden %5-40 oranında fazla petrol üretilir(Holt ve diğ., 1995). Ayrıca %10-20 petrol kazancı da, ikincil kurtarım olarak su basılması yolu ile elde edilebilir(Bondor, 1992). CO₂ gibi çeşitli karışabilir “agents”, gelişmiş petrol kurtarımı veya EOR için kullanılmakta ve %7-23 arasında fazla petrol elde edilmektedir(ortalama %13.2)(Martin ve Taber, 1992; Moritis, 2003).

EOR işletmelerinde gelişmiş karbondioksit depolama için petrol haznelerinin bazı ek kriterleri karşılaması gerekebilir(Klins, 1984; Taber ve diğ., 1997; Kovscek, 2002; Shaw ve Bachu, 2002). Genel olarak hazne derinliği, 600 m’den fazla olmalıdır. Karışmayan akışkanların enjeksiyonu genellikle ağırdan orta gravitedeki petroler için yeterli olmalıdır(petrol gravitesi 12-25 API). Daha çok arzu edilen karışabilir akışkanların hafif, düşük viskoziteli petroler için uygulanabilir olmasıdır(petrol gravitesi 25-48 API). Karışabilir akışkanlar için hazne basıncı, petrol bileşimi, gravitesi, hazne sıcaklığı ve karbondioksit saflığına bağlı olarak, hazne petrolü ve karbondioksit arasında karışabilirliği sağlamak için gerekli olan minimum basınçtan (10-15 MPa) daha yüksek olmalıdır(Metcalf, 1982). Petrolün verimli çıkarımını sağlamak için her iki akışkan türünde tercih edilen diğer kriterler, göreceli olarak ince hazneler (20 m’den az), yüksek hazne açısı, homojen formasyon ve alt dikey geçirgenlik şeklinde sıralanabilir.



Şekil 5.12 Gelişmiş petrol kurtarımı için bir miktar karbondioksit depolaması ile karbondioksit enjeksiyonu. Petrolün yanında elde edilen karbondioksit ayrıştırılıp tekrar formasyona enjekte edilir. Üretilen karbondioksitin döngüsü, satın alınması gereken karbondioksit miktarını azaltır ve atmosfere emisyon salınımını önler.

Hazne heterojenliği de karbondioksit depolama verimini etkiler. Hafif karbondioksit, hazne petrolü ve su arasındaki yoğunluk farkı, özellikle havza göreceli olarak homojen olduğunda karbondioksit depolama ve petrol kurtarımını olumsuz yönde etkileyecek şekilde havzanın üst sınırında karbondioksit hareketine sebep olur. Bu nedenle havza heterojenliği, karbondioksitin havza üst sınırına yükselmesini yavaşlatacak ve yanal yönde yayılmasını sağlayacak şekilde formasyonda tam istila imkanı ve daha büyük depolama potansiyeli açısından pozitif bir etkiye sahip olabilir (Bondor, 1992; Kovscek, 2002; Flett ve diğ., 2005).

5.3.2.3 Gelişmiş gaz kurtarımı

Sahasında %95'e kadar gazın üretilebilmesine karşın, haznenin tekrar basınç altında bırakılarak gaz kurtarımını arttırmak amacıyla karbondioksit potansiyel olarak tüketilmiş gaz haznelere enjekte edilebilir (van der Burgt ve diğ., 1992; Koide ve Yamazaki, 2001; Oldenburg ve diğ., 2001). Gelişmiş gaz kurtarımı bugüne kadar sadece pilot ölçekte uygulanmıştır (Gaz de France K12B Projesi, Hollanda) ve bazı yazarlar, karbondioksit

enjeksiyonunun özellikle yüksek homojenlikteki sahalarda daha düşük gaz kurtarım etkenleri ile sonuçlanabileceğini belirtmişlerdir(Clemens ve Wit, 2002).

5.3.3 Tuz formasyonları

Tuz formasyonları, yüksek konsantrasyonlu çözülmüş tuz içeren brineller veya formasyon suyu ile doygun haldeki derin sedimanter kayaçlardır. Bu formasyonlar yaygın şekilde bulunmaktadır ve çok büyük miktarda su içerirler. Ancak tarım ya da içme suyu olarak kullanmak için uygun değildir. Tuz brinelleri, lokal olarak kimya sanayinde kullanılır ve çeşitli tuzluluktaki formasyon suyu kaplıcalarda ve düşük entalpili jeotermal enerji üretimi için kullanılır. Jeotermal enerji kullanımının artması nedeniyle muhtemel jeotermal sahalarda, karbondioksit depolaması için uygun olmayabilir. Jeolojik depolama ve jeotermal enerji birlikte uygulanabilir olmasına karşın, jeotermal enerji potansiyeli bulunduran bölgeler, yüksek derecede faylanma ve kırıklı yapılar bulundurmaları ve derinlikle beraber sıcaklıktaki ani artışlardan dolayı genel olarak karbondioksit depolaması için daha az ilgi çekmektedir.

Kuzey Denizi'ndeki Sleipner Projesi, bir tuz formasyonunda karbondioksit depolama projesinin bulunan en iyi örneğidir. Bu proje, karbondioksitin jeolojik depolamasına adanmış ilk ticari ölçekteki projedir. Yılda yaklaşık olarak 1 MtCO₂, üretilen doğal gazdan ayrıştırılmakta ve Sleipner'de yeraltına basılmaktadır. İşletme Ekim, 1996'da başlamıştır ve işletmenin çalışma ömrü boyunca toplam 20 MtCO₂ depolaması beklenmektedir(Açıklama 5.1). Karbondioksit, deniz tabanının 800-1000 m altındaki zayıf çimentolanmış kumtaşlarına enjekte edilmektedir. Kumtaşı, ikincil ince şistler ya da kil katmanları içerir ki bu da, karbondioksitin içerideki hareketini etkiler. Üzerleyen birim, büyük kalınlıktaki şist veya kil katmanıdır. Karbondioksitin basıldığı tuz formasyonu, çok büyük depolama kapasitesi içermektedir.

5.3.4 Kömür tabakaları

Kömür tabakaları, sisteme permeabilite kazandıran bazı kırıklar (cleats) içerir. Bu kırıklar arasında, gaz moleküllerinin yayılabildiği ve sıkıca adsorblandığı bir çok mikroboşluklar bulunmaktadır. Kömür fiziksel olarak çeşitli gazları adsorb edebilir ve bir tonunda 25 m³ (1 atm ve 0°C altında) metan içerebilir. Karbondioksit gazını adsorb etmeye metandan daha çok meyillidir(Şekil 5.13). Adsorblanabilir CO₂:CH₄'in hacimsel oranları, antrakit gibi matür kömürler için 1, linyit gibi matür olmayan kömürler için 10 olmak üzere

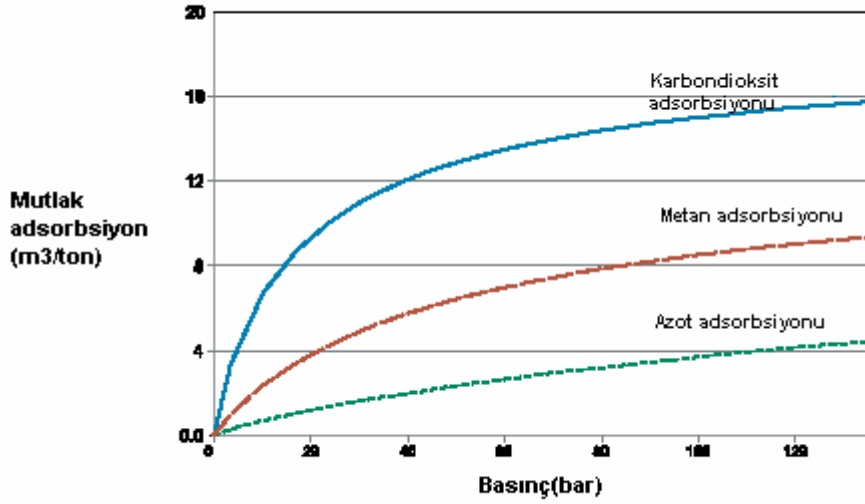
değişkenlik gösterir. Kuyular ile enjekte edilen karbonidoksit gazı kömürün kırık sistemleri boyunca hareket edecek, kömür matriksinde yayılacak ve metan gibi daha düşük adsorblanma meyiline sahip olan gazları serbest bırakacak şekilde kömürdeki mikroboşlukların yüzeylerine adsorbe olacaktır. Kritik nokta üzerindeki basınç ve sıcaklıklar için kömürdeki karbondioksit tecridi tam olarak açıklığa kavuşmamıştır(Larsen, 2003). Adsorbsiyonun yavaş yavaş yerini absorbsiyona bırakması ve karbondioksitin kömür içerisinde yayılması veya “çözülmesi” beklenmektedir.

Karbondioksit kömür yataklarına enjekte edildiğinde metanın yerini alabilir. Bundan dolayı gelişmiş kömür yatakları metan kurtarımında (ECBM) kullanılır. Karbondioksit, Allison Projesi’nde (San Juan Havzası, New Mexico) ve Alberta Havzası’nda (Kanada) yüksek derinliklerde başarı ile enjekte edilmektedir(Gunter ve diğ., 2005). ECBM için karbondioksit kullanımı, üretilen metanın %90 oranına kadar arttırılmasına imkan tanır(Stevens ve diğ., 1996).

Kömür permeabilitesi, bir depolama sahasının seçiminde etkili olan birkaç etkenden biridir. Kömür permeabilitesi farklılık gösterebilir ve genel olarak artan efektif gerilmelerin bir sonucu olarak kırıkların kapanmasından dolayı derinlik ile beraber azalır. Dünya genelinde metan kurtarımı için açılan kuyuların çoğu, 1000 m’den daha az bir derinliğe sahiptir.

CO₂-ECBM için uygun sahalarda seçiminde etkili olan kriterler(IEA-GHG, 1998):

- Uygun permeabilite(henüz minimum değerleri saptanmamıştır);
- Uygun kömür geometrisi(birkaç adet kalın tabakalar, birleşik ince tabakalardan daha uygundur);
- Basit yapı(minimal faylanma ve kıvrımlanma);
- Yatay olarak sürekli ve dikey olarak ayrılmış, örtülü homojen kömür tabaka(ları);
- Uygun derinlik(1500 m’ye kadar, daha yüksek derinlikler henüz araştırılmamıştır);
- Uygun gaz doygunluk koşulları(ECBM için yüksek gaz doygunluğu);
- Formasyondan suyu uzaklaştırma yeteneği.



Şekil 5.13 Tiffany kömürlerinde 55°C altında saf gazların mutlak adsorbsiyonu(Gasem ve diğ., 2002)

5.3.5 Diğer jeolojik medya

Diğer jeolojik medya ve/veya yapılar – bazalt, petrol ya da gaz şistleri, tuz mağaraları ve terk edilmiş madenler – karbondioksitin jeolojik depolamasına lokal olarak uygun seçenekler sağlayabilir.

5.3.5.1 Bazalt

Bazalt akımları ve tabakalanmış intrüzyonlar, dünya genelinde büyük hacimlerde global olarak oluşmuştur(McGrail ve diğ., 2003). Bazaltlar, karbondioksitin mineral kapını için potansiyel bulundurabilir. Çünkü enjekte edilen karbondioksit, bazalt içindeki silikatlar ile reaksiyona girerek karbonatları oluşturur(McGrail ve diğ., 2003). Daha fazla araştırma yapılması gereklidir ancak genel olarak bazaltlar, karbondioksit depolaması için pek de uygun görülmemektedir.

5.3.5.2 Petrol ya da gazca zengin şistler

Petrol ya da gaz şist veya organikçe zengin şist çökeltileri, dünyanın çeşitli bölgelerinde bulunmaktadır. Petrol şistleri için kapan mekanizması, kömür yataklarındaki benzerdir. Yani organik materyal üzerine karbondioksit adsorbsiyonu şeklindedir. Karbondioksit – gelişmiş şist-gaz üretimi, depolama maliyetini düşürmek için bir alternatif olabilir. Petrol ve gaz

şistlerinde karbondioksitin depolama potansiyeli günümüzde belirsizdir ancak büyük hacimli şistler, depolama kapasitesinin yeterli düzeyde olabileceğini işaret etmektedir. Eğer minimum derinlik gibi saha seçim kriteri geliştirilir ve bu şistlere uygulanır ise, o halde hacim sınırlanabilir ancak bu şistlerin çok düşük geçirgenlikleri de büyük miktarlarda karbondioksit enjeksiyonuna engel olabilecek bir husustur.

5.3.5.3 Tuz mağaraları

Tek bir tuz mağarası, 500,000 m³'ten fazla bir hacme ulaşabilir. Karbondioksitin tuz mağaralarında depolanması, doğal gaz ve sıkıştırılmış hava depolamasından farklıdır. Çünkü karbondioksit depolamasının etkili olabilmesi için yüzyıldan binlerce yıla kadar zaman ölçeğinde depolanması gerekirken, diğer durumda mağaralar döngüsel olarak basınç uygulanıp kaldırılarak günden yıla kadar zaman ölçeği altında işletilir. 100 m çapındaki tek bir mağara yaklaşık 0.5 Mt yüksek yoğunluklu karbondioksit tutabilmekle beraber, büyük ölçekli depolama için bir dizi mağaralar kurulabilir. Mağaranın örtüsü, büyük miktarda gaz kaçağı ile sonuçlanabilecek mağara tavanının çökmemesi ve sızıntı olmaması için önemlidir(Katzung ve diğ., 1996). Tuz mağaralarında karbondioksit depolamasının birim hacimde (kgCO₂ m⁻³) yüksek kapasite, verimlilik ve enjeksiyon akım hızı gibi avantajları vardır. Ancak sistemin başarısızlık ile sonuçlanması halinde karbondioksit salınımı, çoğu mağaralarda göreceli olarak düşük kapasite ve çözünen bir mağaradan brinellerin çıkarımı ile çevresel sorunlar ihtimalleri de dezavantajlı yönleridir. Tuz mağaraları ayrıca karbondioksit kaynakları ve yutakları arasında toplayıcı ve dağıtıcı sistemler ile karbondioksitin geçici depolanması için kullanılabilir.

5.3.5.4 Terkedilmiş madenler

Karbondioksit depolaması için madenlerin uygunluğu, cevherin olduğu kayacın doğal ve mühür görevindeki kapasitesine bağlı olarak değişir. Bol çatlaklı kayalar, tipik olarak magmatik ve metamorfik araziler, kapanım işlemi için güç olabilirler. Sedimanter kayalardaki madenler karbondioksit depolaması için bazı avantajlar sağlayabilir. Terkedilmiş kömür madenleri, işletilmiş bölgede kalan kömür üzerine karbondioksitin adsorpsiyonu gibi ek faydaları ile karbondioksit depolaması için avantajlar sağlar(Piessens ve Dussar, 2004). Ancak kömür madeni üzerindeki çatlaklı kayalar, gaz sızıntı riski oluşturur.

5.3.6 Kirletici maddelerin depolama kapasitesi üzerindeki etkileri

Karbondioksit akımında kirleticilerin varlığı tutum, nakil ve enjeksiyonun mühendislik çalışmalarını etkilediği gibi kapan mekanizmaları ve CO₂ depolama kapasitesi için de bir etki oluştururlar. Karbondioksit akımındaki bazı kirleticiler (örn, SO_x, NO_x, H₂S), enjeksiyon ve elden çıkarım gibi farklı gereksinimleri yüklediğinden tehlikeli olarak sınıflandırılabilir(Bergman ve diğ., 1997). Karbondioksit akımındaki kirletici gazlar, enjekte edilen karbondioksitin sıkışabilirliğini etkiler (ve dolayısıyla verilen bir miktardaki depolama için gerekli hacmi) ve bu gazların depolama boşluğunu doldurmaları nedeniyle depolama kapasitesini de düşürür. Ayrıca jeolojik depolamanın türüne bağlı olarak kirleticilerin varlığı diğer bazı spesifik etkilere de sahip olabilir.

EOR işletmelerinde kirleticiler petrol kurtarımını da etkiler. Çünkü karbondioksitin petrol içindeki çözünürlüğünü ve petrol bileşenlerini buharlaştırmada karbondioksit yeteneğini değiştirirler(Metcalf, 1982). Hidrojen sülfür, propan ve ağır hidrokarbonlar pozitif etki oluştururken metan ve azot petrol kurtarımını düşürür(Alston ve diğ., 1985; Sebastian ve diğ., 1985). SO_x varlığı petrol kurtarımını arttırabilirken NO_x varlığı da karışabilirliği yavaşlatıp petrol kurtarımını azaltır(Bryant ve Lake, 2005) ve O₂, haznede petrol ile ekzotermal olarak reaksiyona girebilir.

Derin tuz formasyonlarında karbondioksit depolaması için kirletici gazların bulunması halinde çözünme ve çökelim süresince karbondioksit depolama miktarı ve oranı etkilenir. Ayrıca SO₂ ve O₂ kirleticileri ile kayaç içerisindeki minerallerden ağır metallerin filtrelenmesi de mümkündür. Asit gazı enjeksiyonu ile bugüne kadar edinilen deneyimler, kirletici etkilerinin önemli derecede olmadığını gösterse de Knauss ve diğ., (2005), CO₂ ile birlikte SO_x enjeksiyonunun çok farklı kimyasal, mobilizasyon ve mineral reaksiyonları meydana getirdiğini belirtmiştir.

Kömür tabakalarında karbondioksit depolaması için kirleticiler ayrıca EOR işletmelerine benzer şekilde olumlu veya olumsuz etkiye sahip olabilir. Eğer H₂S veya SO₂ içeren bir gaz akımı kömür yataklarına enjekte ediliyorsa, o halde tercihli olarak adsorbe olmaları olasıdır. Çünkü bu gazlar, kömüre karbondioksitten daha yüksek bir çekime sahiptirler ve böylece karbondioksit için depolama kapasitesini azaltırlar(Chikatamarla ve Bustin, 2003). Şayet oksijen mevcut ise, kömürle tek yönlü olarak reaksiyona girerek sorpsiyon yüzeyini ve dolayısıyla adsorpsiyon kapasitesini azaltır. Diğer taraftan kömür yakımı ile oluşan baca gazları (örn, başlıca N₂ + CO₂) gibi kirli bazı CO₂ atık akımları da

ECBM işletimi için kullanılabilir. Çünkü karbondioksit, N_2 ve CH_4 'den daha yüksek sorpsiyon seçiciliğine sahiptir ve kömür haznesi tarafından tutulur.

5.3.7 Coğrafi dağılım ve depolama kapasitesi hesaplamaları

Karbondioksitin jeolojik depolaması için muhtemel sahaların tanımlanması ve bunların bölgesel veya lokal ölçekte kapasitelerinin hesaplanması, kavramsal olarak basit bir iş olabilir. Çeşitli mekanizmalar ve kapan araçları arasındaki farklılıklar, prensipte aşağıda sıralanmış metotları içerir:

- Hacimsel kapan için kapasite, in situ basınç altında ve sıcaklıktaki karbondioksit yoğunluğu ile mevcut hacmin ürünüdür.
- Çözünürlülük kapanları için kapasite, formasyon suyunda (petrol haznesinde petrol, tuz formasyonunda hafif tuzlu su veya brinel) çözünebilen karbondioksit miktarıdır.
- Adsorpsiyon kapanı için kapasite, kömür hacmi ile kömürün karbondioksit adsorblama kapasitesinin sonucudur.
- Mineral kapan için kapasite, karbonat çökeliminde mevcut minerallere ve bu reaksiyonlarda kullanılacak karbondioksit miktarına dayanarak hesaplanır.

Jeolojik medyada karbondioksit depolama kapasitesinin hesaplanması için bu basit metotların uygulanmasında önemli engeller veri eksikliği, belirsizlik, mevcut verilerin işletilmesinde gereken kaynaklar ve sık olarak birden fazla kapan mekanizmasının aktif olduğu gerçeğidir. Bu takdirde iki duruma ulaşılır:

- Küresel kapasite hesaplamaları, değerlendirmelerin basitleştirilmesi ve çok basit metotların kullanılması ile hesaplanmaktadır. Bundan dolayı güvenilir değildirler.
- Ülke, bölge veya havzaya özgü hesaplamalar daha titiz ve ayrıntılıdır ancak halen veri ve kullanılan metodoloji eksikliğinden dolayı karşılaştığı kısıtlamalardan etkilenirler. Ülke veya havzaya özgü kapasite hesaplamaları şu an sadece Kuzey Amerika, Batı Avrupa, Avustralya ve Japonya için bulunmaktadır.

5.3.7.1 Petrol ve gaz haznelerinde depolama

Karbondioksitin bu depolama seçeneği, sayısal olarak sedimanter havzaların yarısından az bulunan hidrokarbon üretim havzaları ile sınırlıdır. Genel olarak petrol ve gaz

haznelerinin rezervleri tüketildikten sonra karbondioksit depolaması için kullanımı uygulanır ancak gelişmiş petrol veya gaz üretimi ile beraber de uygulanabilir.

Az miktarda su bulunduran hidrokarbon haznelerinde enjekte edilen karbondioksit, genel olarak önceden petrol ve/veya doğal gaz ile işgal edilmiş boşluk hacminin yerini alır. Bununla birlikte önceden hidrokarbon ile doymuş olan tüm boşluk hacmi de karbondioksit için mevcut olmayabilir. Çünkü bazı artıklar, kapilarite, viskoz dokunma ve ağırlık etkilerine bağlı olarak boşluk hacminde kapatılmış olabilir(Stevens ve diğ., 2001c). Açık hidrokarbon haznelerinde (su istilası ile sürdürülen basınç altında) kapilarite ve diğer lokal etkiler sonucu kapasite azalmasına ek olarak, boşluk hacminin önemli bir fraksiyonu su ile istila edilerek karbondioksit depolaması için mevcut boşluk hacminin azalmasına neden olur.

Petrol ve gaz sahaları için depolama-kapasite hesaplamalarının çoğunluğu, petrol ve gaza ilişkin halihazırda üretilmekte olan kapasite ile geriye kalan rezerve ilişkin kapasite arasında ayırım yapmaz. Bazı küresel değerlendirmelerde hesaplamalar, henüz keşfedilmemiş ancak gelecekte keşfedilmesi beklenen petrol ve gaz sahalarının kapasitelerini de ele alır. Petrol ve gaz sahalarının ne zaman tükeneceği ve karbondioksit depolaması için hazır hale geleceği üzerine belirsizlikler mevcuttur. Petrol ve gaz sahalarının tüketimi, çoğunlukla teknik hususlardan daha ziyade ekonomik hususlar (özellikle petrol ve gaz fiyatları) ile etkilenirler.

Petrol ve gaz sahalarında depolama kapasitesinin farklı bir bölgesel ve global hesaplamaları yapılmıştır. Bölgesel ve ulusal değerlendirmeler, her bir bölgede mevcut ve keşfedilmiş petrol ve gaz sahalarının rezerv verilerine dayanarak bir “alt-üst” yaklaşımı kullanır. Kullanılan metodolojiler farklı da olsa, global hesaplamalardan daha fazla güven vermektedir. Günümüzde bu çeşit bir değerlendirme sadece Kuzeybatı Avrupa, Amerika, Kanada ve Avustralya’da mevcuttur. Avrupa’da petrol ve gaz haznelerinin karbondioksit depolama kapasitesini hesaplamak için üç farklı “alt-üst” girişi yapılmıştır ancak Avrupa’daki depolama kapasitesinin büyük çoğunluğu, Kuzey Denizi bu değerlendirmelere dahil etmeleri ile burada yer almıştır(Holloway, 1996; Wildenborg ve diğ., 2005b). Üç çalışmada da kullanılan metodoloji, hidrokarbonların tüm hazne hacminin karbondioksit ile doldurulabileceği varsayımına dayanmaktadır. Mevcut her arazi için “son kurtarılabılır rezerv”(ultimately recoverable reserves -URR) hesaplamaları kullanılmıştır. Hazne koşulları altında boşluklarda depolanabilecek karbondioksit miktarı ile URR tarafından tutulan yeraltı hacmi hesaplanmıştır. Henüz keşfedilmemiş rezerv tahminleri dahil edilmemiştir. Batı Kanada’da tüm hazneler, in situ basıncı, sıcaklık ve boşluk hacmine dayanarak, karbondioksitin (bir anlamda kapasite) üretilen rezervin yerini alabileceği varsayımı ile hesaplanıp, ardından akifer istilası ile diğer tüm etkiler için bir indirgeme katsayısı

kullanılmıştır(efektif kapasite). Bu değer, daha sonra derinlik (900-3500 m) ve boyut için indirgenmiştir(pratik kapasite)(Bachu ve Shaw, 2005).

Kuzeybatı Avrupa için depolama potansiyeli gaz hazneleri için 40 GtCO₂ ve petrol hazneleri için 7 GtCO₂ olarak hesaplanmıştır(Wildenburg ve diğ., 2005b). Avrupa hesaplamaları tüm rezervlere dayanarak yapılmıştır(800 m üzerinde oluşmuş hiçbir önemli saha dahil edilmemiştir). Karbondioksit yoğunluğu çoğu durumda sahaların basınç, sıcaklık ve derinliklerinden hesaplanmıştır; bu verilerin mevcut olmadığı durumlarda da 700 kg/m³ yoğunluk kullanılmıştır. Karbondioksit depolaması başlatılmadan ve EOR ile üçüncül kurtarım dahil edilmeden önce sahadan kurtarılacak petrol miktarı üzerine hiçbir varsayım yapılmamıştır. Batı Kanada'da birer MtCO₂ kapasiteli Alberta ve Williston havzalarında karbondioksit depolamasının pratik potansiyelinin, petrol haznelerinde yaklaşık 1 GtCO₂ ve gaz haznelerinde de yaklaşık 4 tCO₂ olduğu hesaplanmıştır. Keşfedilen tüm petrol ve gaz haznelerindeki kapasite ortalama 10 GtCO₂ civarındadır(Bachu ve diğ., 2004; Bachu ve Shaw, 2005). Kanada'da her bir hazne için karbondioksit yoğunluğu basınç ve sıcaklıktan hesaplanmıştır. Petrol ve gaz kurtarımı rezerv veri tabanından sağlanmış ya da gerçek üretime dayandırılmıştır. EOR için elverişli olan haznelerde ne kadar üretim yapılacağı ve ne kadar karbondioksit depolanacağı üzerine bir metot geliştirilmiştir(Shaw ve Bachu, 2002). Amerika'da petrol ve gaz sahalarındaki toplam depolama kapasitesi yaklaşık 98 G tCO₂ olarak hesaplanmıştır(Winter ve Bergman, 1993; Bergman ve diğ., 1997). Bugüne dek üretim verileri ile bilinen rezerv ve kaynaklar, Avustralya'da gaz haznelerinde depolama kapasitesinin 15 G tCO₂ ve petrol haznelerinde 0.7 G tCO₂ olduğunu göstermektedir. Avustralya hesaplamalarında, arazi koşulları altında üretilebilir hacmi doldurabilecek karbondioksitin tekrar hesaplanması için arazi verileri kullanılmıştır. Bu bölgeler için keşfedilmiş arazilerdeki alt-üst değerlendirmeleri ile toplam depolama kapasitesi 170 G tCO₂ olarak tahmin edilmektedir.

Henüz çalışma yapılmamış olsa da Ortadoğu, Rusya, Asya, Afrika ve Latin Amerika gibi dünyanın çeşitli bölgelerindeki diğer petrol ve gaz haznelerinde önemli depolama kapasitesinin olduğu neredeyse kesindir.

CO₂-EOR imkanları için küresel kapasitenin 61-123 G tCO₂ jeolojik depolama kapasitesine sahip olduğu hesaplanmıştır. Bununla birlikte henüz CO₂-EOR, karbondioksit depolamasını arttırmak için planlanmamıştır. Gelecekte eğer karbondioksit depolaması ekonomik bir değere sahip olacaksa, karbondioksit depolamasının en iyi şekilde kullanımı ve EOR, kapasite hesaplamalarını arttırabilir. Avrupa'daki kapasite çalışmalarında karbondioksit depolamasının yer alacağı tüm petrol arazilerinde EOR'un denenebileceği olasılığı ele

alınmıştır. Böylece ek bir gelir elde edilebilir. Wildenborg ve diğ., (2005)'nin hesaplamaları, petrolün API (American Petroleum Institute) ağırlığına dayanarak farklı kurtarım faktörlerini ala alır. Batı Kanada'da 10,000 petrol haznesinin tümü, EOR literatürü için geliştirilen bir dizi kriterler kullanılarak EOR'a uygunluğu saptanmıştır. Bu petrol hazneleri ileride depolama hesaplamalarında göz önüne alınabilir(Shaw ve Bachu, 2002).

Petrol rezervlerindeki depolama kapasitesinin küresel hesaplamaları, 126-400 G tCO₂ arasında değişir(Freund, 2001). Bu değerlendirmeler, henüz keşfedilmemiş haznelerin potansiyellerini de kapsar. Gaz haznelerinde karbondioksit depolaması için karşılaştırılabilir global kapasitenin 800 G tCO₂ olduğu hesaplanmıştır(Freund, 2001). Keşfedilmiş petrol ve gaz arazilerinde toplam kullanılabilen depolama kapasitesinin tüm hesaplamalarının böylece 675-900 G tCO₂ arasında olacağı olasıdır. Eğer henüz keşfedilmemiş petrol ve gaz sahaları da dahil edilirse, bu şekilde yaklaşık 900-1200 GtCO₂'e kadar artabilir ancak güvenilirlik seviyesi de düşer.

Tablo 5.1 Çeşitli jeolojik depolama seçenekleri için depolama kapasiteleri. Depolama kapasitesi, ekonomik olmayan depolama seçeneklerini de içerir.

Hazne tipi	Depolama kapasitesinin hesaplanan en düşük değeri (GtCO₂)	Depolama kapasitesinin hesaplanan en yüksek değeri (GtCO₂)
Petrol ve gaz hazneleri	675 ^a	900 ^a
İşletilmeyen kömür yatakları	3-15	200
Derin tuz formasyonları	1000	Belirsiz, ancak muhtemelen 10 ⁴

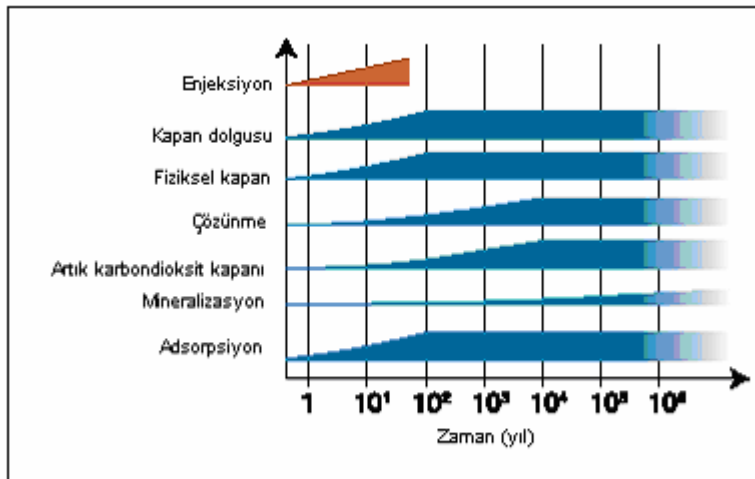
NOT: ^a Bu rakamlar, değerlendirmeye henüz keşfedilmemiş petrol ve gaz hazneleri de dahil edilirse %25 oranında artacaktır.

5.3.7.2 Derin tuz formasyonlarında depolama

Tuz formasyonları dünya genelinde sedimanter havzalarda, hem karada, hem de kıtasal şelflerde oluşur ve hidrokarbon provensleri veya kömür havzaları ile sınırlı değildir. Bununla birlikte derin tuz formasyonlarının karbondioksit depolama kapasitelerinin hesaplanmasında bir takım sebeplerden dolayı güçlükler ile karşılaşılabilir:

- Düşük permeabiliteli örtü kayacı, çözünme ve mineralizasyon altında fiziksel kapan dahil, depolama için birçok mekanizma mevcuttur.
- Bu mekanizmalar hem eş zamanlı olarak hem de farklı zaman ölçeklerinde işler ki, karbondioksit depolaması için zaman çerçevesi, kapasite hesaplamalarını etkiler; hacimsel depolama ilk olarak önemlidir ancak daha sonra karbondioksit çözünerek mineraller ile reaksiyona girer.
- Bu farklı mekanizmalar arasındaki ilişki ve etkileşimler çok komplekstir, zamanla değişir ve yüksek oranda bölgesel koşullara bağlıdır.
- Karbondioksit depolama kapasitesinin hesaplanması için hiçbir özel, birbiri ile uyumlu, geniş ölçekli metodoloji bulunmamaktadır(farklı çalışmalar, karşılaştırmaya olanak tanımayan farklı metotları kullanır).
- Sadece sınırlı sismik ve kuyu verileri mevcuttur(petrol ve gaz haznelerinden farklı olarak).

Derin tuz formasyonları için karbondioksit depolama kapasitesindeki farklılıkları anlamak için, karbondioksit kabarcıklarının değişimi süresince çeşitli kapan mekanizmalarının karşılıklı etkileşimlerini anlamamız gerekir. Ayrıca derin tuz formasyonlarının depolama kapasitesi, durumdan duruma göre farklı temellere dayanarak saptanabilir.



Şekil 5.14 Derin tuz formasyonlarında yürütülen çeşitli karbondioksit depolama mekanizmalarının enjeksiyon süresince ve sonrasında zamansal değişimini gösteren şematik şekil.

Bugüne dek derin tuz formasyonlarındaki karbondioksit depolama kapasitesinin hesaplamaları, fiziksel kapan ve/veya çözünmeye dayanarak yapılmıştır. Bu hesaplamalar, karbondioksit enjeksiyonu, akımı ve çözünmesi ile aynı zamanda meydana gelen hiçbir jeokimyasal reaksiyonları dahil etmeden basitleştirilmiş değerlendirmeler ile yapılır. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar, jeokimyasal reaksiyonların önemli bir etki yapması için birkaç yüz yıl zaman alacağını göstermiştir(Xu ve diğ., 2003). Mineral kapan ile karbondioksit depolama kapasitesi, formasyon porozitesi göz önüne alındığında sedimanter kayada çözünen birim hacimdeki kapasite ile karşılaştırılabilir(Bachu ve Adams, 2003; Perkins ve diğ., 2005). Ancak bu iki işlemin oran ve zaman ölçeği farklıdır.

Bu çeşitli yaklaşımların kullanıldığı kapasiteye yönelik ondörtten fazla global değerlendirme yapılmıştır(IEA-GHG, 2004). Bu çalışmaların hesaplama aralıkları geniştir(200-56,000 GtCO₂). Bu da hesaplamalar için kullanılan değerlendirmelerin farklarını ve bu parametrelerdeki belirsizlikleri yansıtmaktadır. Hesaplamaların çoğunluğu, yüzlerce Gton CO₂ aralığında değişmektedir. Karbondioksit enjeksiyonunun bölgesel ve hazne-ölçek sayısal simülasyonlarına dayanarak yapılan hacimsel kapasite hesaplamaları, ağırlık segregasyonu ve viskoz dokunmanın bir sonucu olarak ancak yüzde birkaç oranında karbondioksitin boşluk hacmini dolduracağını göstermektedir(van der Meer, 1992, 1995; Krom ve diğ., 1993; Ispen ve Jacobsen, 1996). Koide ve diğ., (1992), dünyada yaygın olarak bulunan sedimanter havzaların ancak %1'inin karbondioksit depolaması için kullanılabileceğini belirtmiştir. Diğer çalışmalar formasyon alanının %2-6'sının karbondioksit depolaması için kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte Bradshaw ve Dance (2005), hidrokarbonlar (petrol ve gaz rezervleri) veya karbondioksit depolaması için bir sedimanter havzanın coğrafi dağılımı ile bunun kapasitesi arasında hiçbir korelasyon olmadığını göstermişlerdir.

Avrupa'nın depolama kapasitesi 30-577 GtCO₂ olarak hesaplanmıştır(Holloway, 1996; Boe ve diğ., 2002; Wildenborg ve diğ., 2005b). Avrupa için ana belirsizlikler, kapan miktarı (%3 olarak hesaplanan) ve %2-6 arasında hesaplanan depolama verimi hesaplamalarıdır(geçirgen engeller ile kapanmış akiferler için %2; sonsuz olarak kabul edilen genişlik ile açık akiferler için %6), ve eğer kapalı/açık durumu bilinmiyorsa %4 olarak düşünülmektedir. Kapanlardaki hacim toplam boşluk hacmi ile orantılıdır ancak her zaman böyle olmayabilir. Amerika'nın derin tuz formasyonlarındaki toplam depolama kapasitesinin önceki hesaplamaları yaklaşık 500 GtCO₂ olduğunu göstermiştir(Bergman ve Winter, 1995). Amerika'daki tek bir derin formasyonun son olarak hesaplanan kapasitesi, Simon Dağı kumtaşlarında 160-800 GtCO₂ civarındadır(Gupta ve diğ., 1999) ve Amerika'nın toplam

depolama kapasitesinin önceki hesaplamalardan daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Bachu ve Adams (2003), karbondioksitin derin tüm formasyonlarda saturasyona ulaşincaya kadar çözüneceğini varsayarak, Batı Kanada'daki Alberta Havzası'nda depolama kapasitesinin 4000 GtCO₂ olduğunu hesaplamışlardır ki burada, teorik olarak Alberta Havzası'ndaki boşluk suyunun tamamının karbondioksit ile doygun hale geleceği yönünde gerçek dışı bir en yüksek seviye değerlendirmesi yapılmıştır. 740 GtCO₂'lik bir Avustralya depolama kapasitesi hesaplaması, 48 havzadan potansiyel olarak uygulanabilir 65 sahada kümülatif riskli-kapasite yaklaşımı ile saptanmıştır(Bradshaw ve diğ., 2003). Japonya'da toplam kapasite, çoğunluğu denizdeki formasyonlarda olmak üzere 1.5-80 GtCO₂ civarında hesaplanmıştır(Tanaka ve diğ., 1995).

Bu geniş aralıklar içerisinde en düşük seviye genel olarak karbondioksitin serbest fazda birikeceği derin tuz formasyonlar içindeki hacimsel kapanların depolama kapasitesidir. En yüksek seviye esas olarak çözünme, ancak bazen de mineral kapan gibi ek depolama mekanizmaları ile elde edilir. Bu kapasite hesaplamalarında kullanılan çeşitli metotlar ve veriler, derin tuz formasyonlarında bölgesel veya global depolama kapasitesi hesaplamaları için önemli seviyede belirsizliklerin bulunduğunu göstermektedir. Avrupa veya Japonya'daki örneklerde maksimum hesaplamalar, en düşük hesaplamalardan 15-50 kat daha yüksektir. Benzer şekilde depolama kapasitesinin global hesaplamaları 100-200,000 GtCO₂ gibi geniş bir aralık gösterir ki her birinde farklı metodolojiler, belirsizlik seviyeleri ve efektif kapan mekanizmaları hususları mevcuttur.

5.3.7.3 Kömür yataklarında depolama

Ticari hiçbir CO₂-ECBM işletmesi bulunmamaktadır ve kömür formasyonlarında karbondioksit depolama potansiyeli için kapsamlı gerçek değerlendirme henüz yapılmamıştır. Avrupa ve diğer yerlerdeki kömür madenciliği 1000 m derinliğe kadar ulaşırken, doğal olarak ticari CBM hazneleri 1500 m'den daha sığdır. Çünkü karbondioksit, potansiyel olarak işletilebilen kömürlerde depolanamaz. Bu yüzden karbondioksit depolamasında göreceli olarak derinlik için dar bir pencere mevcuttur.

ECBM kurtarım projeleri için teorik olarak karbondioksit depolama potansiyelinin ilk analizleri, dünya genelinde bitumlu kömür tabakalarında yaklaşık 60-200 GtCO₂ depolanabileceğini göstermiştir(IEA-GHG, 1998). Kuzey Amerika için yapılan son hesaplamalar, sub-bitumlu kömürler ve linyitler dahil edildiğinde, 60-90 GtCO₂ arasında değişmektedir(Reeves, 2003b; Dooley ve diğ., 2005). Teknik ve ekonomik hususlar bitumlu

kömürler için yaklaşık 7 GtCO₂ pratik depolama potansiyelini işaret etmektedir(Gale ve Freund, 2001; Gale, 2004).

5.3.8 Karbondioksit kaynakları ile jeolojik depolama sahalarının karşılaştırılması

Karbondioksit kaynaklarının jeolojik depolama ile karşılaştırılması, kaynak nitelik ve miktarı, taşıma, ekonomik ve çevresel faktörlerin ayrıntılı değerlendirmesini gerektirir. Eğer karbondioksit kaynakları, depolama sahasından uzak ise veya depolama sahası yüksek derecede teknik belirsizlikler ile ilişkili ise, o halde depolama potansiyeli hiçbir şekilde kavranamaz.

5.3.8.1 Bölgesel çalışmalar

Gelecekteki sosyo-ekonomik gelişmelere yönelik projeksiyonların göz önüne alınarak karbondioksit kaynaklarının muhtemel depolama sahaları ile karşılaştırılması, özellikle hızla gelişen bazı ülkeler için önemli olacaktır. Avrupa'da bir çok bölgede kaynak ve depolama sahası değerlendirmesi, sayısal simülasyonlarla birlikte nakil yolunun saptanması ve emisyon haritası çalışılmıştır(Holloway, 1996; Larsen ve diğ., 2005). Japonya'da karadaki 20 emisyon bölgesi ve denizdeki 20 depolama bölgesi (okyanusal depolama ve jeolojik depolama beraber) arasındaki bağlantılar çalışılmış ve en iyi şekilde değerlendirilmiştir(Akimoto ve diğ., 2003). Ayrıca Hindistan'da(Garg ve diğ., 2005) ve Arjantin'de(Amadeo ve diğ., 2005) ilk çalışmalar başlatılmıştır. Amerika'da Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System) kullanılan bir çalışma ve geniş ölçekli bir ekonomik analiz (Dooley ve diğ., 2005), elektrik santrallerinin üçte ikisinin muhtemel jeolojik depolama sahalarına yakın olduğunu, ancak geri kalanların da yüzlerce kilometre nakil gerektirdiğini göstermiştir.

Bachu (2003) tarafından Kanada'daki sedimanter havzaların değerlendirme işleminin akış diyagramı ile veri çeşitlerinin tanımlamasını içeren bir çalışma yapılmıştır. Batı Kanada sedimanter havzaları için elde edilen sonuçlar, havzadaki petrol ve gaz haznelerinin toplam kapasitesinin birkaç Gton CO₂ iken derin tuz formasyonları kapasitesinin de bunun iki-üç katı kadar olacağını göstermiştir.

Avustralya'da, bir dizi jeolojik depolama sahalarının tanımlanması amacıyla bir çalışma yürütülmüştür(Rigg ve diğ., 2001; Bradshaw ve diğ., 2002). İlk değerlendirmelerde 300 sedimanter havzadan 65 arazide 48 havza ele alınmıştır. Depolama sahalarının sınıflandırılması (teknik ve ekonomik riskler ile) ve büyük karbondioksit emisyon sahalarına

yakınlığı bakımından metodoloji geliştirilmiştir. Çalışmada üç depolama hesapları geliştirilmiştir:

- Hiçbir ekonomik engel olmadan, 1600 yıla kadar mevcut emisyonlara eş değer 740 GtCO₂ toplam kapasite.
- Kaynaklar ile en yakın uygulanabilir depolama sahasının karşılaştırılması ve depolama için ekonomik dürtülerin olduğu varsayımıyla saptanan, 100-115 MtCO₂ miktarındaki “gerçek” kapasite veya yıllık durağan emisyonların %50’si.
- Gelecekteki karbondioksit fiyatlarına dayanarak artan depolama kapasitesi ile, 20-180 MtCO₂ “maliyet eğrisi” kapasitesi.

5.3.8.2 Metodoloji ve değerlendirme kriterleri

Her çalışma mevcut veri ve kaynak, özel çalışmaların amaçları ve lokal ya da tüm bölgesel çözümlerin arandığı duruma göre etkilenir. Analizin bir sonraki aşamasında bölgesel yönleri ile proje seviyesindeki veya araştırmasındaki ayrıntılar ele alınır. Bu aşama, muhtemel karbondioksit depolama sahasının teknik, çevresel, güvenlik ve ekonomik kriterler göz önüne alınarak seçilmesini kapsar. Son olarak, çeşitli senaryoların tamamlanması ve analizleri sonucu mühendislik ve ekonomi çalışmaları ile ayrıntılanan hedef halindeki muhtemel depolama sahaslarının tanımlanmasına ulaşılır.

Karbondioksit depolama sahasının seçilmesi ve kaynakları ile karşılaştırılmasında göz önüne alınabilecek etkenler şunlardır(Winter ve Bergman, 1993; Bergman ve diğ., 1997; Kavscek, 2002): karbondioksit akımının saflığı, oranı, hacmi; örtü kaya ile birlikte depolama sahasının uygunluğu; kaynak ile depolama sahasının yakınlığı; karbondioksitin tutum ve dağıtımı için altyapı; çeşitliliğe imkan tanıyacak bir seri depolama sahasının var oluşu; depolamayı tehlikeye atabilecek bilinen ve bilinmeyen yeraltı su kaynakları, enerji ve maden; depolama sahasının uygulanabilirliği ve güvenliği; enjeksiyon stratejileri; EOR ve ECBM bulunması halinde üretim stratejileri; arazi ve geçiş hakkı; popülasyon merkezlerinin konumu; bölgesel raporlar; ve tüm maliyet ile ekonomik durumu.

Muhtemel karbondioksit depolama sahaslarının belirlenmesinde teknik uygunluk başlıca göstergeç olsa da, en uygun sahaslar seçildiğinde daha sonraki hususlar ekonomik, güvenlik ve çevresel etkiler olarak sıralanabilir. Bu kriterler, depolama kapasitesinin tedarik hacmini ve enjeksiyon oranının da tedarik oranını karşılayıp karşılamadığını araştırma amacıyla işletmenin beklenen çalışma ömrü boyunca değerlendirilmelidir. Diğer sorunlar karbondioksit kaynaklarının depolama sahasları ile bire bir kaynakta karşılaştırılması veya

entegre endüstriyel sistemin oluşturulması amacıyla bir toplama ve dağıtım sisteminin uygulanması şeklinde sıralanabilir. Bu gibi tartışmalar, ekonomi ölçeği süresince maliyet sonuçlarını etkilediği gibi tedarik oranını da etkiler. Kaynak-depolama karşılaştırması için ilk fırsatlar, petrol veya gazın gelişmiş üretimi sayesinde ekonomik kazancın artacağı sahaları kapsayabilir(Holtz ve diğ., 2001; van Bergen ve diğ., 2003b).

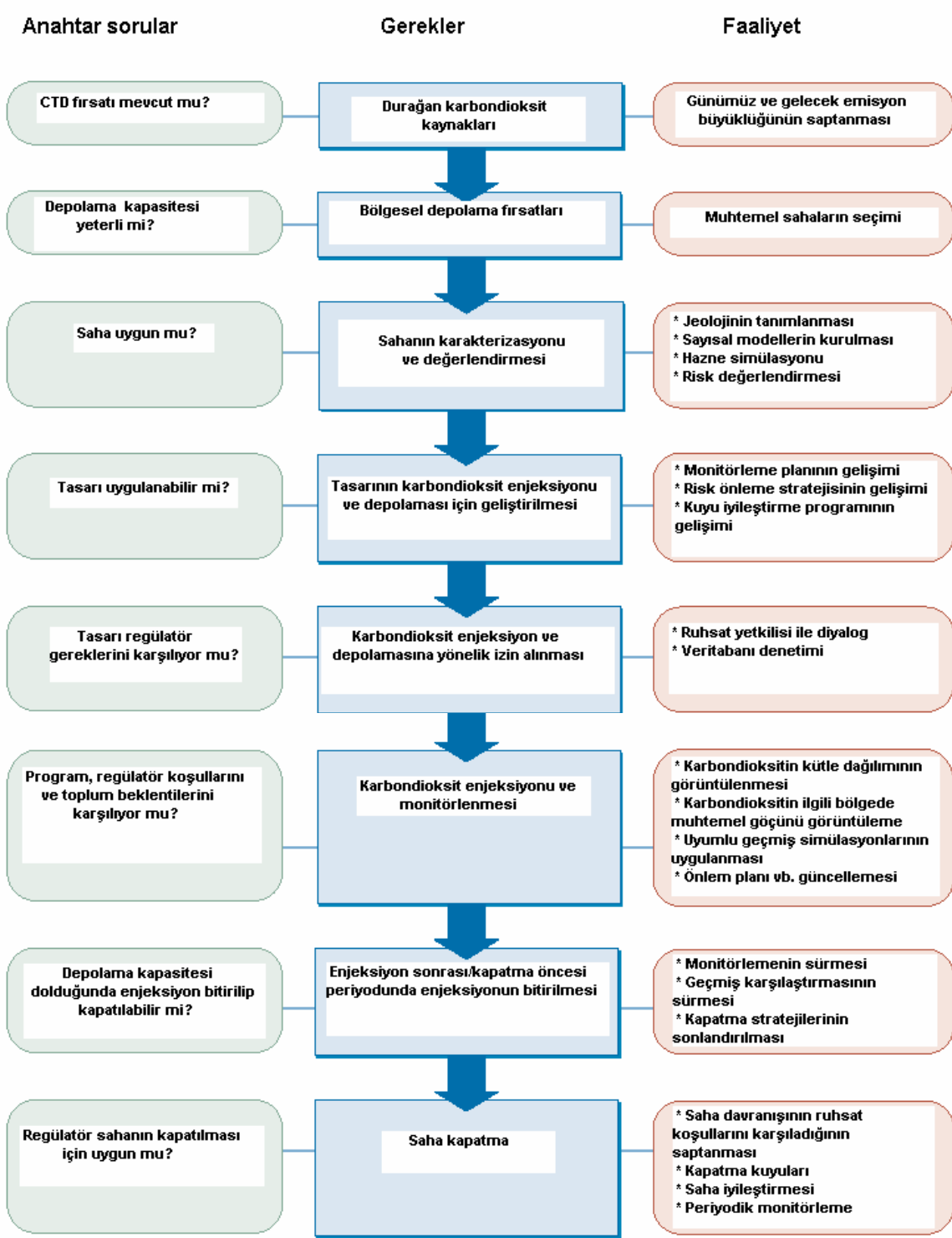
Karbondioksit kaynakları ile depolama sahalarının karşılaştırılmasında teknik risklerin belirlenmesi, sıralanan 5 etkenden dolayı önemlidir: depolama kapasitesi, enjeksiyon, denetim, arazi ve doğal kaynaklar(Bradshaw ve diğ., 2002, 2003). Belirtilen bu kriterler, depolama-kapasite hesaplamalarına gerçek kontroller ortaya koyar ve gelecekte hangi bölgelerin ayrıntılı çalışmalarda ele alınacağını gösterir.

5.4 Belirlenen sahalar için karakterize etme ve performans tahmini

Karbondioksitin jeolojik depolaması saha nitelemesi için önemli bir amacı, muhtemel depolama sahasında ne kadar karbondioksitin depolanabileceği ve sahanın gerekli depolama performansı kriterlerini karşılama becerisini göstermesi amacıyla değerlendirilmesidir(Şekil 5.9). Saha nitelemesi, bu amaçları yerine getirmek için gerekli olan geniş bir çeşitlilikteki jeolojik verilerin toplanmasını gerektirir. Bu verilerin çoğunluğu, sahaya özgü veriler olacaktır. Bu veriler, simulasyon yapmak ve sahanın performansını önceden kestirmek amacıyla kullanılacak olan jeolojik modeller ile bütünleştirilir.

5.4.1 Belirlenen sahanın karakterize edilmesi

Depolama sahası gereksinimleri, büyük oranda depolamanın amaçlandığı jeolojik ortam(örn, derin tuz formasyonu, tüketilmiş petrol ve gaz hazneleri veya kömür tabakaları) ve kapan mekanizmasına göre değişmektedir. Veri mevcudiyeti ve kalitesi, her bir seçenek için değişiklik gösterir(Tablo 5.2). Bir çok durumda petrol ve gaz sahaları, ilişkili verilerin hidrokarbon araştırması ve üretimi esnasında edinilmesi nedeniyle derin tuz formasyonlarından daha iyi tanımlanmış olacaktır. Ancak her zaman bu durum görülmeyebilir. Tuz formasyonlarının özellik ve performansının karbondioksit depolaması için çok geniş bir alanda önceden kestirilebilir şekilde güvenli olabileceği, bir çok örnekte mevcuttur(Chadwick ve diğ., 2003; Bradshaw ve diğ., 2003).



Şekil 5.15 Bir seri regülâtör, monitörleme, ekonomik ve mühendislik sorunları ile beraber saha karakterizasyonunun önemini gösteren bir karbondioksit depolama projesinin yaşam döngüsü.

Tablo 5.2 Karbondioksitin jeolojik depolama sahalarının seçimi ve karakterize edilmesi için kullanılan veri tipleri.

<p>¹ Tercihen üç boyutlu veya yakın aralıklarla iki boyutlu incelemeler ile ilgilenilen saha boyunca sismik profiller</p> <p>² Hazne, örtü birimleri ve akiferlerin yapısal kontur haritaları</p> <p>³ Karbondioksitin biriktiği kapanın yapısal sınırların ayrıntılı haritaları</p> <p>⁴ Karbondioksitin enjeksiyon noktasından hangi yollar ile güç edebileceğini gösteren haritalar</p> <p>⁵ Fay ve kırıkların haritaları ve raporları</p> <p>⁶ Haznelerde veya örtü birimlerinde yanal fasiyes değişimlerini gösteren fasiyes haritaları</p> <p>⁷ Kuyu logları, jeolojik, jeofiziksel ve mühendislik logları</p> <p>⁸ Sondaj numunesinden ve üretim testlerinden akışkan analiz ve deneyleri</p> <p>⁹ petrol ve gaz üretim verileri (eğer hidrokarbon sahası ise)</p> <p>¹⁰ Hazne ve örtü permeabilitesinin ölçülmesi için geçici basınç testleri</p> <p>¹¹ Porozite, permeabilite, mineraloji (petrografi), örtü kapasitesi, basınç, sıcaklık, tuzluluk ve laboratuarda kayaç dayanım deneyleri dahil petrofiziksel ölçümler</p> <p>¹² Fayın tekrar aktif olma olasılığı ve fayın kayma eğilimini saptamak için in situ gerilim analizleri</p> <p>¹³ Su akımının yönü ve şiddetini, formasyonların hidrolik ara bağlantılılığının ve hidrokarbon üretimine ilişkin basınç düşüşünün saptanması için hidrodinamik analizler</p> <p>¹⁴ Neotektonik faaliyeti göstermek için sismolojik veri, jeomorfolojik veri ve tektonik araştırmaları</p>
--

5.4.1.1 Veri tipi

Depolama sahası ile çevresi jeoloji, hidrojeoloji, jeokimya ve jeomekanik (yapısal jeoloji ve gerilim değişikliğine karşı deformasyon) açıdan tanımlanmalıdır. En önemli konu da hazne ve bunun sınır çevreleri olacaktır. Bununla birlikte depolama formasyonu üzerindeki stratigrafi ve örtü kayacı da değerlendirilmelidir. Çünkü eğer karbondioksit sızıntı gerçekleştirirse, bu yapıların arasında göç edecektir (Haidl ve diğ., 2005). Herhangi bir depolama sahasının özelliklerinin raporlanması, amaçlanan depolama sahası üzerinde veya yakınında açılan kuyulardan elde edilen cevher ve akışkanlar gibi haznedeki direkt olarak edinilen gözlemler ile bölgesel hidrodinamik basınç gradyanları ve sismik yansıma verileri gibi dolaylı olarak uzaktan algılama ölçümlerine dayalı olarak yapılmaktadır. Farklı verilerin toplanması, sahanın karbondioksit depolaması için uygun olup olmadığını değerlendirme amacıyla kullanılacak güvenilir bir model geliştirmek için gereklidir.

Saha seçimi işlemi sırasında ayrıntılı bir hazne simülasyonu, muhtemel depolama sahasının değerlendirilmesinde gerekli olacaktır. Hazne simülasyonu ile ilişkili modelleme oluşturmak için bir seri jeofiziksel, jeolojik, hidrojeolojik ve jeomekanik veriler gereklidir. Bu veriler, üç boyutlu jeolojik model ile incelenerek uygun bir ölçekte bilinen ve tahmin edilen verilere oturtulmalıdır. Yararlı olabilecek basit veri tipi ve ürünlerinin örnekleri, Tablo 5.2'de sıralanmıştır.

5.4.1.2 Saha güvenilirliğini etkileyen stratigrafik faktörlerin değerlendirilmesi

Örtü birimleri veya örtü kayaları, karbondioksitin enjeksiyon sahasından göçünü engellemek için permeabilite bariyerleridir(çoğunlukla dikey, ancak bazen yatay engeller). Bir örtünün güvenilirliği, yarı sonsuz dağılımı ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. İdeal olarak bir örtü kaya birimi, özellikle tabanında olmak üzere litolojik anlamda üniform ve bölgesel özellikte olmalıdır. Bir örtü kayanın taban birimlerinde yatay değişimler olduğunda, enjeksiyon haznesinden daha yukarıdaki aralıklara göç olasılığı da artar. Bununla birlikte eğer örtü kayası üniform, bölgesel olarak büyük ve kalın ise, o halde esas sorunlar kayacın fiziksel dayanımı, herhangi doğal veya antropomorfik penetrasyonlar (faylar, kırıklar ve kuyular) ve örtü kayacı zayıflatacak veya bunun porozitesi ile permeabilitesini arttıracak muhtemel CO₂-su-kayaç reaksiyonları olacaktır.

5.4.1.3 Saha güvenilirliğini etkileyen jeomekanik faktörler

Gözenekli ve geçirgen bir hazne kayaya karbondioksit enjekte edildiği zaman, karbondioksit çevre formasyonlardan daha yüksek bir basınç altında boşluklara nüfuz edecektir. Bu basınç, bir fay düzlemi boyunca hareket veya kırıkların açılması ile sonuçlanabilecek örtü kayanın veya hazne kayanın deformasyonuna neden olabilir. Bir depolama sahası değerlendirmesinde yerkabuğunun jeomekanik modellenmesi gereklidir ve depolama sahasında bulunabilecek en büyük formasyon basıncı üzerine odaklanabilir. Bir örnek olarak hazne basıncının 14.2 MPa olduğu Weyburn'da, maksimum enjeksiyon basıncı 25-27 MPa arasındadır ve kırık basıncı(fracture pressure) 29-31 MPa arasında değişmektedir. Jeomekanik-jeokimyasal çifti modellenmesi de kırık veya boşluklardaki karbonat çökeli ile sınırlanan kırıkların ortaya konulması için gereklidir. Bunların modellenmesi boşluk suyu bileşimi, mineraloji, in situ gerilme, boşluk suyu basıncı ve önceden mevcut fayların yönelimi ile bunların sürtünme özellikleri hakkında veri gerektirir(Streit ve Hillis, 2003; Johnson ve diğ., 2005). Bu hesaplamalar alışılmış kuyu ve sismik veriler ile sızıntı testlerinden elde edilir ancak sonuçlar kaya dayanımının fiziksel ölçümleri kullanılarak desteklenebilir. Bu metodolojinin bölgesel bir ölçekte uygulaması Gibson-Poole ve diğ., (2002) tarafından raporlanmıştır.

5.4.1.4 Saha güvenilirliğini etkileyen jeokimyasal faktörler

Hazne kayanın boşluk sisteminde su ve karbondioksitin karışması çözülmüş karbondioksit, karbonik asit ve bikarbonat iyonları oluşturacaktır. Boşluk suyunun asitleşmesi, çözünebilir karbondioksit miktarını azaltır. Bir sonuç olarak boşluk suyu pH'ını daha yüksek değerlere çıkararak (asitliği azaltan) kayaçlar, karbondioksitin çözülmüş bir fazda depolanmasını kolaylaştırır. Karbondioksitçe zengin su, hazne kaya veya örtü kayadaki mineraller ile ya da boşluk suyu ile reaksiyona girebilir. Ayrıca “borehole cements” ve “steels” ile reaksiyona girebilir. Bu gibi reaksiyonlar mineral erimesi ve kaya matriksinin (veya çimentonun) potansiyel bozunmasına ya da mineral çökelişi ile boşluk sisteminin kapanmasına(böylece permeabilitede bir azalma meydana gelir) neden olabilir.

Karbonat minerallerinden oluşan bir formasyon, karbondioksiti etkili bir şekilde hareketsiz bir fazda tutabilir. Eğer kaya matriksinin mineralojik bileşimi egemen olarak kuvarstan oluşuyorsa, jeokimyasal reaksiyonlar brineller içinde çözünme ile etkili olacaktır ve CO₂-su-kayaç reaksiyonları böylece gerçekleşmeyebilir. Bu durumda kayaç-su etkileşimlerine ait kompleks jeokimyasal simülasyonlar gerekli değildir. Bununla birlikte daha kompleks mineralojiler için, hazne ve örtü kaya örnekleri ile doğal boşluk suyunu kullanan laboratuvar deneylerine dayalı karmaşık simülasyonlar, daha kompleks sistemlerdeki bu gibi reaksiyonların muhtemel etkilerini bütünüyle değerlendirmek için gerekli olabilir(Bachu ve diğ., 1994; Czernichowski-Lauriola ve diğ., 1996; Rochelle ve diğ., 1999, 2004; Gunter ve diğ., 2000). Karbondioksitçe zengin doğal sistemlerden elde edilen kayaç örnekleri çalışmaları, çok uzun vadelerde ne tür reaksiyonların oluşabileceğinin belirtilerini sağlayabilir(Pearce ve diğ., 1996). “boreholes” içindeki reaksiyonlar Crolet (1983), Rochelle ve diğ., (2004) ve Schremp ve Roberson (1975) tarafından ele alınmıştır.

5.4.1.5 Depolama güvenliğini etkileyen antropojenik faktörler

Aktif veya terk edilmiş kuyular, maden shaftları ve yeraltı üretimi gibi antropojenik faktörler depolama güvenliğini etkileyebilir. Depolama formasyonunda bulunan terk edilmiş kuyular, sahaya özgü bir sorun olabilir çünkü karbondioksitin depolama formasyonundan yeryüzüne sızmasını sağlayabilir(Celia ve Bachu, 2003; Gasda ve diğ., 2004). Bundan dolayı terk edilmiş ve aktif kuyuların yerlerinin saptanması ve değerlendirilmesi, sahanın karakterize edilmesinde önemli bir konu durumundadır. Terk edilmiş kuyuların havadan magnetometre incelemeleri ile saptanması mümkündür. Çoğu durumda terk edilmiş kuyular metal bir

kaplamaya sahip olacaktır. Ancak bu da kuyunun uzun zaman önce açıldığı veya petrol ve gaz üretimi için açıldığı anlamına gelmeyebilir. Petrol ve gaz üretimi bulduran ülkeler, yakın zamanda açılan kuyuların, derinliklerinin ve coğrafi veritabanında bulunan diğer bilgilerin bazı kayıtlarına sahip olabilirler. Açılmış kuyuların (petrol ve gaz, su ve madencilik araştırması) tutulan kayıtlarının yeterliliği ve kalitesi, son zamanlarda açılan kuyularda kusursuz iken, özellikle daha eski kuyular için yoksun olabilir(Stenhouse ve diğ., 2004).

5.5 Enjeksiyon kuyusu teknolojisi ve arazi işlemleri

Bu raporda bu bölüme kadar, depolama sahasının özellikleri ele alınmıştır. Ancak uygun bir saha seçildikten sonra yerkabuğuna büyük miktarlardaki karbondioksiti enjekte edecek teknolojiye sahip miyiz ve bu araziyi güvenli ve etkili bir şekilde işletebilir miyiz? Bu bölümde bu sorunlar ele alınacaktır.

5.5.1 Enjeksiyon kuyusu teknolojisi

Karbondioksitin büyük ölçekte jeolojik depolaması için halihazırda birçok teknoloji imkanı bulunmaktadır. Petrol endüstrisindeki kapsamlı deneyime dayanarak karbondioksit enjeksiyonu için sondaj, enjeksiyon ve simülasyon teknolojileri mevcuttur ve bugünkü CO₂ depolama projelerinde bazı uyarlamalar ile uygulanmaktadır. Bir karbondioksit enjeksiyon kuyusunda başlıca kuyu tasarısı basınç, aşınmaya karşı dayanıklı materyaller, üretim ve enjeksiyon hızı gibi hususları kapsar.

Karbondioksit enjeksiyonu tasarısı, bir petrol arazisi veya doğal gaz depolama projesindeki gaz enjeksiyon kuyularına benzer biçimde yapılmaktadır. Sondaj parçalarının birçoğu, daha yüksek basınç oranları ve aşınmaya karşı dayanıklılık açısından geliştirilebilir. Karbondioksitin kontrol edilmesi için gereken teknoloji, EOR işletmeleri ve asit gazı elden çıkarımı için zaten geliştirilmiş bulunmaktadır.

Bir depolama projesi için gerekli olan kuyu sayısı, birçok faktöre bağlı olacaktır. Bunlar toplam enjeksiyon oranı, formasyonun kalınlığı ve permeabilitesi, maksimum

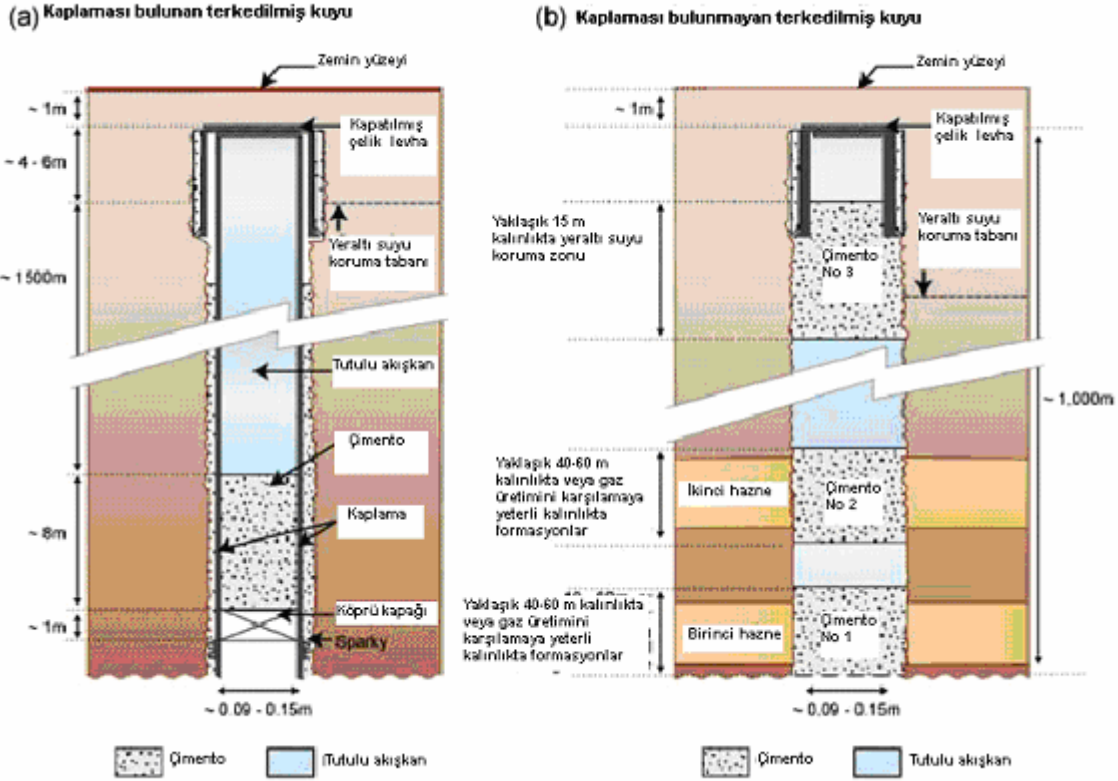
Karbondioksit enjeksiyon kuyularının düzgün bir şekilde sürdürülmesi için sızıntının ve kuyu başarısızlığının önüne geçilmelidir. Karbondioksit püskürmesi ihtimalinin zayıflatılması (kontrol dışı akımı) ve olması halinde ters etkilerinin azaltılması için birkaç pratik prosedür uygulanabilir. Bunlar açılan enjeksiyon kuyusunda periyodik kuyu borusu güvenlik incelemeleri, geliştirilmiş püskürme önlemi (BOP) bakımı, şüpheli kuyulara ek BOP donatımı, ekibin bilgilendirilmesi, olasılık planlaması ve acil müdahale eğitimi gibi konuları içerir.

5.5.2 Kuyu kapatma prosedürleri

Petrol, gaz ve enjeksiyon kuyuları için kapatma prosedürleri, içme suyu akiferlerinin kirlenmesini önleme amacı ile tasarlanır. Eğer bir kuyu kullanımını tamamladıktan sonra açık kalırsa brineller, hidrokarbonlar veya karbondioksit kuyu boyunca yukarıya doğru göç ederek sığ içme suyu akiferlerine karışabilir. Bunu önlemek için bir çok ülkede terk edilen veya kapatılan kuyular için düzenlemeler getirilmiştir. Bu prosedürler genellikle kuyunun tamamı ya da bir kısmına çimento basılmasını veya mekanik kapaklar ile kapatılmasını gerektirir. İçme suyu akiferlerine yakın olan kuyuların kapatılması genellikle daha titiz çalışma gerektirir. Kaplanmış veya kaplanmamış kuyular için gereken kapatma prosedürlerinin örnekleri Şekil 5.21’de gösterilmiştir.

Karbondioksit kuyuları için kapatma prosedürlerinin, asit gazı elden çıkarım, petrol ve gaz kuyuları için kullanılan kapatma metodolojisine geniş bir ölçüde uyması beklenebilir. Bununla birlikte karbondioksitten dolayı yıkılmaya dayanıklı çimento ve kapakların kullanımı, titiz bir şekilde yapılmalıdır. Karbondioksite karşı dayanıklı çimentolar, petrol sahası ve jeotermal uygulamaları için geliştirilmiştir. Daha ileride sızıntı için kanal oluşturabilecek çelik aşınmasını engellemek amacıyla örtü kayacından geçen kaplamanın ve kaplama maddesinin kaldırılması önerilmiştir. Kaplamanın kaldırılmasından sonra açıklık, Şekil 5.17’de gösterildiği gibi çimento kapağı ile kapatılabilir.

Çimento ile oluşturulan kapak, gelecekteki karbondioksit göçüne en önemli engel durumundadır. Buradaki asıl sorun, mühür görevindeki çimento kapağının kapatma becerisi ve kazılan örtü kayaca yapışma özelliğidir. Sondaj işlemleri sırasında açıklığın yanında oluşan mikro kanallar çimento ile doldurulabilir. Ayrıca depolama haznesine püskürtülen akışkan ile de karbondioksit daha derinlere ilerletilebilir ve çimentonun kalitesi ve örtü kayaca yapışma becerisi artırılabilir. Kapatılmış (terkedilmiş) kuyuların davranışları, depolama işlemleri tamamlandıktan bir süre sonra monitörlenebilir.

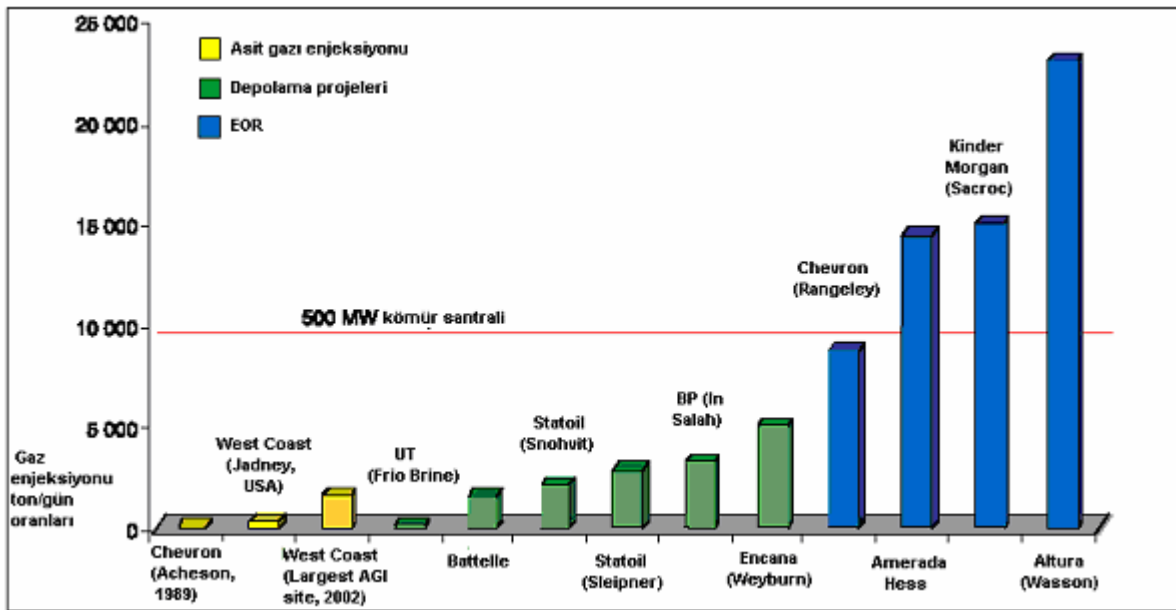


Şekil 5.17 Günümüzde kaplamalı veya kaplamasız kuyuların nasıl kapatıldıklarının örnekleri. Aşınmaya dayanıklı çimento kapaklarının kullanılması, enjeksiyon perdesinde ve örtü kayacındaki kaplamanın tamamının veya bir kısmının kaldırılması gibi bazı özel gereksinimler geliştirilebilir.

5.5.3 Enjeksiyon kuyu basıncı ve hazne kısıtlamaları

Enjektivite, bir jeolojik formasyona ne tür bir akışkanın enjekte edilebileceği durumu nitelendirir ve enjeksiyon noktasında bulunan kuyu ve formasyon arasındaki basınç farkı ile ayrılan enjeksiyon oranı olarak tanımlanır. Karbondioksit enjektivitesi, brinel enjektivitesinden çok daha fazla olabilir de (çünkü karbondioksit, brinelden daha düşük viskoziteye sahiptir), bu her zaman böyle olmayabilir. Grigg (2005), Batı Teksas'ta karbondioksit akımının davranışlarını incelemiş ve enjektivitenin beklenenden daha düşük olduğu veya zamanla azaldığı sonucuna varmıştır. Christman ve Gorell (1990) EOR işletmelerinde beklenilmedik CO₂-enjektivite davranışının öncelikle akış geometrisi farklılıkları ve petrolün akışkan özelliklerinin bir sonucu olduğunu göstermiştir. Enjektivite değişimi, ayrıca yeteri kadar bilinmeyen permeabilite etkileri ile ilişkili olabilir.

Karbondiyoksitin depo formasyonuna basılması için enjeksiyon basıncının hazne suyu basıncından daha yüksek olması gerekir. Diğer taraftan, artan formasyon basıncı da formasyonda kırıklara neden olabilir. Enjeksiyon formasyonunda kırık oluşmasını engellemek için maksimum kuyu basıncı sınırlandırılmalıdır. Güvenli enjeksiyon basıncının oluşması için formasyonun in situ gerilme ve boşluk suyu basıncı ölçümleri yapılmalıdır. Üretim sırasında boşluk suyu basıncının tükenmesi, haznedeki gerilim durumunu etkileyebilir. Bazı tükenmiş haznelerin yapılan analizlerinde boşluk basıncının düşmesi sonucu kayaçtaki yatay gerilmelerin %50-80 düştüğü, dolayısıyla haznenin kırılma olasılığının arttığı gözlenmiştir (Streit ve Hillis, 2003).



Şekil 5.18 Tipik bir 500-MW kömür santralinde depolama işletmelerinin mevcut karbondiyoksit enjeksiyon işletmeleri ile karşılaştırılması

Güvenli enjeksiyon basıncı, havzanın gerilim durumuna ve tektonik tarihçesine bağlı olarak çok geniş bir aralıkta değişebilir. Belirli petrol ve gaz provenislerinden edinilen deneyim sonucu bazı düzenlemeler ile güvenli enjeksiyon basıncı saptanmıştır. Van der Meer (1996), maksimum güvenli enjeksiyon basıncı için bir ilişki kurmuştur. Bu ilişki, maksimum enjeksiyon basıncı 100 m'ye kadar olan derinlikte hidrostatik basıncın 3.5 katı, 1-5 km derinlikte de 2.4 katı olarak hesaplanmıştır. Almanya'daki bir akiferde depolanan doğal gaz için izin verilen maksimum basınç eğilimi 16.8 kPa m^{-1} 'dir (Sedlacek, 1999). Bu değer, Almanya'nın güneybatısındaki formasyon suyunun $10.5-13.1 \text{ kPa m}^{-1}$ olan doğal basınç eğilimini aşmaktadır. Danimarka veya İngiltere'de doğal gazın akifer depolanması için gereken

maksimum basınç eğilimi, hidrostatik değerleri aşmaz. Amerika'da endüstriyel atığı enjeksiyon kuyuları için enjeksiyon basıncı, enjeksiyon formasyonunda kırıkların açılması ve yayılması için gereken basıncı aşmamalıdır(USEPA, 1994). Petrol ve gaz arazisi enjeksiyon kuyuları için enjeksiyon basıncı, örtü birimdeki kırıkların açılması ve yayılması için gereken basıncı aşmamalıdır. Amerika'da her durum için maksimum enjeksiyon basıncının ortaya konulması amacıyla uzmanlar görevlendirilmiştir. Son zamanlarda maksimum basınç eğiliminin belirlenmesi amacıyla bölgeye özgü testlerin uygulanmasına yönelik düzenlemeler yapılmıştır. USEPA'nın Yeraltı Enjeksiyon Kontrol Programı'ndan (Underground Injection Control Program) edinilen pratik deneyimler, kırılma basınçlarının 11-21 kPa m⁻¹ arasında değiştiğini göstermiştir.

5.5.4 Arazi işlem ve tesisleri

CO₂-EOR işletmeleri, aşağıda sıralanan üç grupta toplanabilir(Jarrel ve diğ., 2002):

- Hazne yönetimi – ne enjekte edileceği, ne kadarlık bir hızla enjekte edileceği, nasıl enjekte edileceği, su-gaz değişiminin(WAG) nasıl denetleneceği, geniş bir alanda verimin en yüksek seviyeye nasıl çıkarılacağı gibi hususlar;
- Kuyu yönetimi – üretim metodu ve iyileştirme çalışmaları;
- Tesis yönetimi – enjeksiyon tesisi, ayrıştırma, ölçüm, aşınma kontrolü ve işletme organizasyonu.

Karbondioksit tipik olarak kaynağından EOR sahasına bir boru hattı aracılığı ile taşınıp, genellikle sıkıştırma işleminden sonra bir enjeksiyon kuyusu ile hazneye basılır. Sıkıştırma işlemine girmeden önce karbondioksit akımında var olan artık sıvılar, bir emme temizleyicisi ile uzaklaştırılır. EOR işletmelerinde üretim kuyusundan petrol ve su ile birlikte elde edilen karbondioksit, ayrıştırılarak enjeksiyon kuyuları aracılığı ile tekrar enjekte edilir.

CO₂-ECBM teknolojisi uygulamaları geniş bir ölçüde EOR işletmelerine benzer. Karbondioksit CBM sahasına taşınarak açılan enjeksiyon kuyuları ile kömür tabakasına enjekte edilir. Üretim kuyusunda kömür damarı gazı ve formasyon suyu, elektrik pompaları ile ortadan kaldırılır.

Jarrell ve diğ. (2002)'e göre CO₂-EOR projeleri için arazi hizmetleri;

Üretim sistemleri – akışkan ayrıştırma, gaz toplama, üretim yoğunluğu, sıvı toplama, merkezi batarya, sıkıştırma ve acil kesinti sistemleri;

Enjeksiyon sistemleri – gazın tekrar basınca tutulması, su enjeksiyonu ve karbondioksit dağıtım sistemleri;

Gaz işletme sistemleri – gaz işletme tesisi, H₂S temizleme sistemleri ve sülfür geri kazanımı ve elden çıkarım sistemleri.

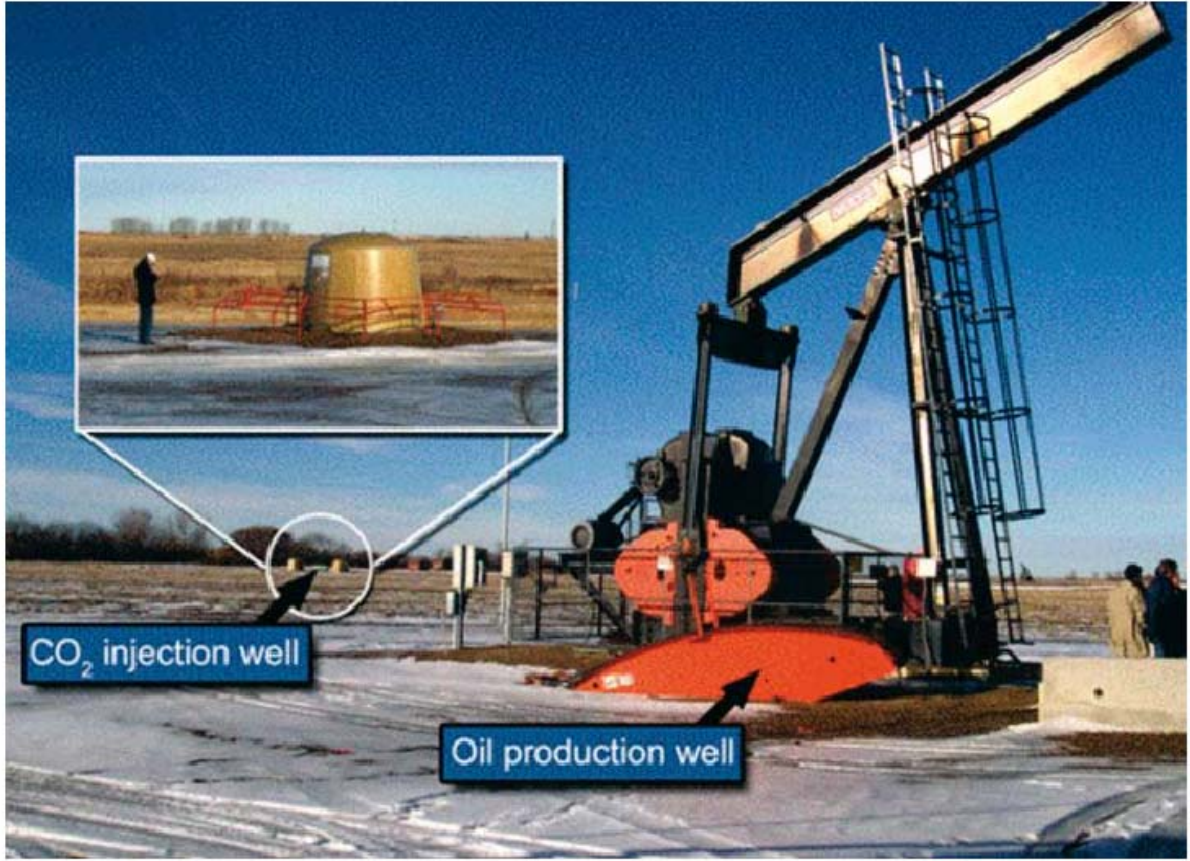
5.6 Monitörleme teknolojisi

Yerkabuğunda karbondioksit ne tür olaylar geçirir ve neler olduğunu nasıl bilebiliriz? Yani karbondioksit enjekte edildiği zaman monitörlenebilir mi? Karbondioksitin depo formasyonundan sızıp sızmadığını görüntülemek için hangi teknikler mevcut ve ne kadar duyarlı? Karbondioksitin yeraltında güvenli ve etkili bir biçimde depolandığını ortaya koyabilir miyiz? Ne kadar sürede monitörleme gerekir? Bu bölümde bu sorulara cevap aranacaktır.

5.6.1 Monitörleme amaçları

Monitörleme, çok çeşitli amaçlar için gereklidir. Bunlar;

- Özellikle enjeksiyon kuyusu koşullarının görüntülenmesi ve enjeksiyon oranlarının ölçülmesi için etkili enjeksiyon kuyusu kontrollerinin ortaya konulması ve raporlanması. Petrol endüstrisi deneyimleri, kaplama, paketleyici veya çimentonun yanlış tamamlanması veya bozulması, enjeksiyon kuyusunun kendisinden oluşacak sızıntı için en önemli olası başarısızlık nedenleri olduğunu göstermektedir (Apps, 2005; Perry, 2005);
- Çeşitli mekanizmalar ile depolanan enjekte karbondioksitin miktarını saptamak;
- Depolama hacminin kullanımı, enjeksiyon basıncı ve yeni enjeksiyon kuyularının açılması dahil, depolama projesinin verimini en iyi şekilde kullanmak;
- Karbondioksitin planlanan depolama formasyonu içerisinde zapt edilmiş bir biçimde kaldığını göstermek için uygun görüntüleme teknikleri ile ortaya koymak. Bu temel metot, karbondioksitin depolanmış olarak kaldığını göstermeyi amaçlar ve böylece karbondioksitin davranış tahminleri ortaya konulabilir;
- Olası sızıntıyı tespit etmek ve önlem alınması gerektiğinde erken uyarı sağlamak.



Şekil 5.18 Tipik bir CO₂ arazi işletmesi kurulumu: Weyburn yüzey faaliyetleri.

Etkili bir şekilde yapılabilecek depo görüntülenmesinden önce bir veri tabanı incelemesi yapılmalıdır. Bu inceleme, sonraki gözlemlerin karşılaştırılmasında fayda sağlar. Veritabanı monitörlemesi, önceki konsantrasyonlara ilişkin anomalilerin saptandığı jeokimyasal görüntüleme için bir gereksinimdir. Ayrıca karbondioksitin ekosistem döngüsünden kaynaklanan değişimine ait bir veritabanının oluşturulması, muhtemel depolamaya ilişkin salınımlardan kaynaklanan doğal değişimler ile ayırt edilmesi bakımından önemlidir.

Yukarıda bahsedilen görüntüleme teknolojisinin çoğunluğu, petrol ve gaz endüstrisinde geliştirilmiştir. Bu tekniklerin birçoğu, jeolojik formasyonların tüm tiplerinde depolama projelerinin görüntülenmesi için uygulanabilir. Ancak kömür formasyonlarının monitörlenmesi için daha fazla araştırma yapmak gerekebilir.

5.6.2 Yerkabuğunda karbondioksit dağılımının görüntülenmesi için teknoloji seçenekleri

Karbondioksitin yerkabuğunda dağılımı ve göçünü görüntülemek için bir çok teknik mevcuttur. Tablo 5.3'te bu teknikler ile karbondioksit depolama sahasına nasıl uygulanabileceği sıralanmıştır. Bu tekniklerin uygulanabilirliği ve duyarlılığı oldukça bölgeye özgü özelliklerdir.

5.6.2.1 Karbondioksit göçünü görüntülemek için dolaysız teknikler

Görüntüleme için dolaysız teknikler günümüzde sınırlıdır. EOR için karbondioksit enjeksiyonu süresince, haznedeki permeabilite farklılığından dolayı enjekte karbondioksit hazne boyunca heterojen bir biçimde yayılacaktır(Moberg ve diğ., 2003). CO₂-EOR uygulamasında karbondioksit üretim kuyusuna vardığı zaman, üretilen hacim hemen saptanabilir. Weyburn'da enjekte karbondioksit içerisindeki karbon, haznedeki karbondan daha farklı bir izotopik kompozisyona sahiptir(Emberley ve diğ., 2002) ve dolayısıyla karbondioksitin dağılımı, karbondioksitin farklı üretim kuyularına ulaşımının değerlendirilmesi ile saptanabilir. Bir üretim sahasındaki birçok enjeksiyon kuyuları ile karbondioksitin ulaşımı, sadece haznedeki dağılımının genel bir göstergesini sağlayabilir.

Daha sağlıklı bir yaklaşım da, belirli kuyulara enjekte edilen izleyicilerin(tracers)(hazne sisteminde bulunmayan gazlar veya gaz izotopları) kullanılmasıdır. Üretim veya görüntüleme kuyularındaki izleyicilerin varış zamanı, karbondioksitin hazne boyunca izlediği yol hakkında bilgi sağlayacaktır. Monitörleme kuyuları, kuyu boyunca ilerleyen karbondioksitin hareketini pasif olarak kayıt etmek için de kullanılabilir. Ancak unutulmamalıdır ki, bu gibi istilacı tekniklerin kullanımı potansiyel olarak yeryüzüne doğru yeni sızıntı yolları oluşturabilir.

Ölçüm Teknikleri	Ölçüm parametreleri	Önemli Uygulamalar
Dağıtılan ve doğal izleyiciler	Hareket süresi Karbondiyoksit'in brinel veya petrolde ayrışması Karbondiyoksit kaynaklarının saptanması	Depolama formasyonunda karbondiyoksit hareketinin izlenmesi Çözünürlük kapasitesinin ölçülmesi Sızdırmanın izlenmesi
Su bileşimi	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ Esas iyonlar İz elementler Tuzluluk	Çözünürlük ve mineral kapasite ölçülmesi CO ₂ -su-kayaç etkileşiminin ölçülmesi Sığ akiferlere olabilecek sızdırmanın bulunması
Yeraltı basıncı	Formasyon basıncı Kuyu basıncı Yeraltı suyu akifer basıncı	Kırılma gradyanı altındaki formasyon basıncının denetlenmesi Kuyu ve enjeksiyon tüpü konumları Depolama formasyonu dışına olabilecek sızdırma
Kuyu logları	Brinel tuzluluğu Sarımsık hız CO ₂ saturasyonu	Depolama formasyonu içinde ve üzerinde CO ₂ hareketinin izlenimi Brinellerin sığ akiferlere olası gücünün izlenmesi 3D sismik gözlemlerinde sismik hızların ölçülmesi
Time-lapse 3D sismik gözlem	P ve S dalga hızı Sismik yansımalar Sismik amplitüd incelleme	Depolama formasyonu içinde ve üzerinde CO ₂ hareketinin izlenmesi
Düşey sismik profil ve kırıklıklı kuyu sismik gözlemleri	P ve S dalga hızı Sismik yansımalar Sismik amplitüd incelleme	Depolama formasyonunda ayrıntılı olarak karbondiyoksit dağılımının ortaya konulması Fay ve kırıklar boyunca sızdırmanın bulunması
Passif sismik monitörleme	Sismik olayların lokasyon, magnitüd ve kaynak özellikleri	Formasyon ve örtü kayacında mikro kırıkların gelişimi Karbondiyoksit göç yolları
Elektrik ve elektromanyetik teknikler	Formasyon iletkenliği Elektromanyetik indüksiyon	Depolama formasyonu içinde ve üzerinde CO ₂ hareketinin izlenmesi Brinellerin sığ akiferlere olası gücünün bulunması
Time-lapse gravite ölçümleri	Akışkanların yer değiştirmesinden dolayı oluşacak yoğunluk değişimleri	Depolama formasyonu içinde ve üzerinde CO ₂ hareketinin izlenimi Yerkabuğunda CO ₂ kütle dengesi
Zemin deformasyonu	Eğim İnterferometre ve GPS kullanarak yatay ve düşey değişimin gözlenmesi	Depolama formasyonu ve örtü kayacı üzerindeki jeokimyasal etkilerin bulunması CO ₂ göç yollarının belirlenmesi
Havadan görünür ve kızıl ötesi izlenim	Zemin yüzeyinin hiperspektrel izlenimi	Bitki örtüsündeki etkilerin izlenmesi
Zemin karbondiyoksit değişiminin monitörlenmesi	Zemin yüzeyi ile atmosfer arasında karbondiyoksit değişimi	CO ₂ sınırlarının bulunması, saptanması ve ölçülmesi
Toprak gazının incelenmesi	Zemin gazı bileşimi Karbondiyoksit'in izotopik analizi	Artan CO ₂ seviyelerinin belirlenmesi Zemine artan CO ₂ gaz kaynağının saptanması Ekosistem etkilerinin değerlendirilmesi

Tablo 5.3 Karbondiyoksit depolama projesinin görüntülenmesi için kullanılacak dolaylı ve dolaysız tekniklerin özeti.

5.6.2.2 Karbondiyoksit'in göçünü görüntülemek için dolaylı teknikler

Yerkabuğunda karbondiyoksit dağılımını ölçmeye yönelik dolaylı teknikler, çeşitli sismik ve sismik olmayan jeofizik ve jeokimyasal teknikleri içerir (Benson ve diğ., 2004; Arts ve Winthagen, 2005; Hoversten ve Gasperikova, 2005). Sismik teknikler kayaç içerisinde yapay veya doğal olarak üretilen dalgaların hız ve enerji absorpsiyonu ölçmeye yarar. Yayılımı kayacın doğası ve içerdiği akışkanlar ile değişime uğrar. Genel olarak enerji dalgaları patlatmalar veya zeminin titreşimi ile oluşturulur. Dalga üreticileri ve sensörleri yüzeyde veya açılan kuyular içerisine modifiye edilmiş olabilir. Ayrıca hazne içerisinde yatay olarak dalgaların yayılması için sensörler ve kaynaklar, yeraltına yerleştirilebilir. Zamanla bir seri gözlemlerin yapılması sonucu karbondiyoksit'in hazne içerisindeki dağılımını izlemek

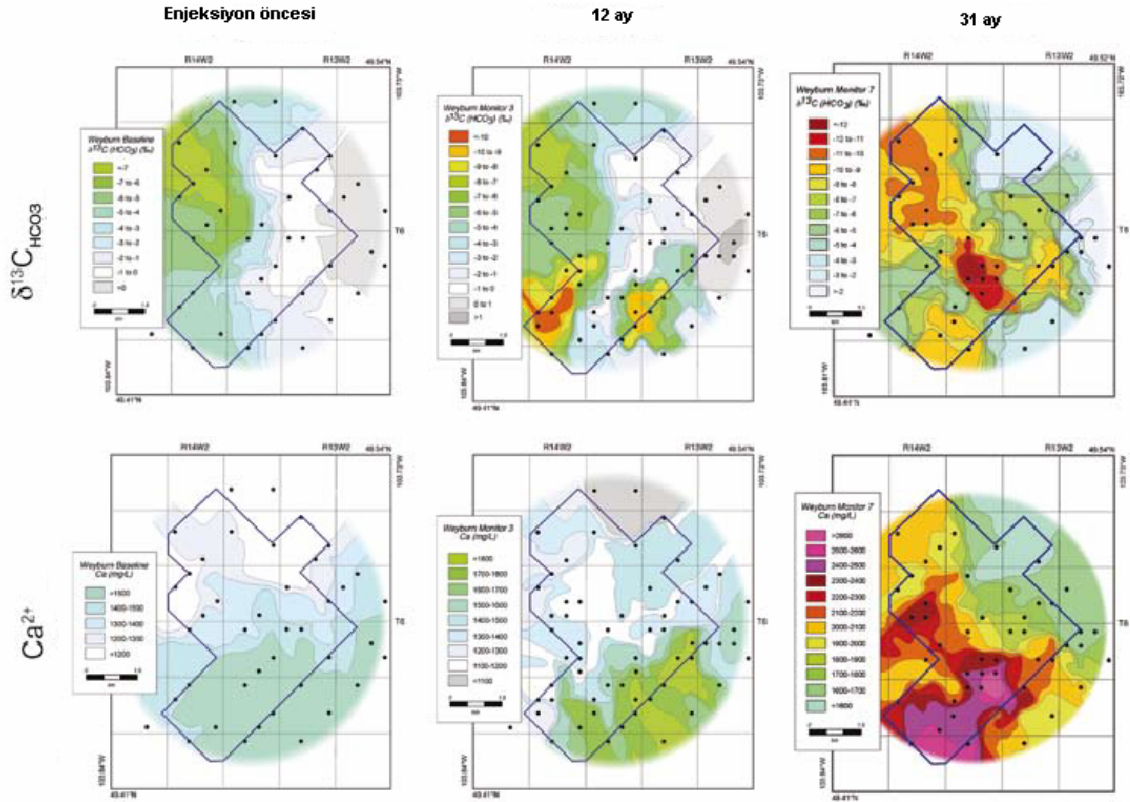
mümkündür. Karbondioksitin bulunmadığı bir veri tabanı incelemesi de karşılaştırma için bir temel sağlayabilir. Düşük hacimde (yaklaşık %5 civarı) serbest fazdaki karbondioksit, bu teknikler ile izlenebilir; günümüzde kayaçların boşluklarındaki karbondioksit miktarını ölçmek ve hazne içerisindeki dağılımını incelemek için çalışmalar yapılmaktadır(Hoversten ve diğ., 2003).

5.6.2.3 IEA-GHG Weyburn görüntüleme ve depolama projesi

Weyburn'da karbondioksitin izlenmesine yönelik metotların geliştirilmesi ve değerlendirilmesi için ticari bir EOR projesine bir monitörleme programı eklenmiştir. Karbondioksit enjeksiyonu öncesinde veritabanı toplanmıştır(2000 yılı sonlarına doğru). Bu veriler akışkan örnekleri (su ve petrol) ile sismik incelemeleri kapsar. Enjeksiyon arazisi üzerinde kapsamlı bir üç boyutlu (3D), üç-bileşen incelemeleri ve enjeksiyon arazisinin bir bölümünde de ayrıntılı 3D, 9-bileşen incelemeleri olmak üzere iki seviyede sismik incelemeler yapılmıştır. Ayrıca dikey sismik profili ile karşılıklı kuyu sismik tomografisi (iki düşey veya yatay kuyu arasında) uygulanmıştır. Pasif sismik (mikro sismik) görüntüleme de sahada kurulmuştur. Yüzey gaz incelemeleri (Strutt ve diğ., 2003) ve içme suyu görüntüleme teknikleri de dahil edilmiştir. Enjekte edilen miktar (karbondioksit ve su) da görüntülenmiştir. Oluşabilecek herhangi bir sızıntı da titiz bir şekilde gözlem altına alınmıştır. Hazneye ulaşan bazı kuyular da gözlem kuyusuna çevrilmiştir. Daha sonra bir kuyu kapatılmış, ancak kuyuda pasif sismik monitörlemenin yürütülmesi amacıyla sismik monitörler yerleştirilmiştir.

Enjeksiyon başlatıldığında hazne akışkanları düzenli olarak toplanmış ve analiz edilmiştir. Bu analizler, hazne suyu örneklerinin kimyasal ve izotopik analizleri olduğu kadar, petrol ile enjekte karbondioksit arasında karışabilirlik ilişkilerinin anlaşılmasına yönelik çalışmalardır. Haznede karbondioksitin hareketini açıkça gösteren verilerin işlenmesi ile farklı sismik incelemeler yürütülmüştür(karbondioksit enjeksiyonunun başlamasından itibaren bir veya iki yıl). Bu analizler sentezlenerek hazne kayacı içerisindeki jeokimyasal etkileşimleri anlamak ve uzun vadeli bir depo olarak haznenin güvenliğini belirlemek için haznedeki karbondioksit göçüne ait kapsamlı bir bilgi elde edilir. Ayrıca mevcut veya kapatılmış kuyuların sızıntıdaki muhtemel rolünü değerlendirmek için program mevcuttur. Bu program kuyuların yaşı, çimento türü ile yapılaşılma becerisi üzerine mevcut bilgilerin kullanımı, çimentoda ve kuyunun çelik kaplamasında geçmişte olan ve sürekli değişen akışkan kimyasının etkilerini daha iyi anlamak için çalışmaları kapsar.

Weyburn özet raporu (Wilson ve Monea, 2005), özellikle karbondioksitin yayılımını saptamak için sismik görüntülemenin ve karbondioksitin üretim kuyularına varması ile saptanan jeokimyasal analizlerin etkililiği dahil, araştırma projesinin tüm sonuçlarını yansıtmaktadır. Jeokimyasal veriler ayrıca, haznenin kendisinde süregelen işlemleri ve yeni bir kimyasal eşitliğin oluşması için gereken zamanı açıklamaya yardımcı olur. Şekil 5.24'te uzun vadeli depolama güvenliğine ne tür çözünürlülük ve mineral kapanım katkıda bulunacağı kapsamındaki bir değerlendirme için temel oluşturacak şekilde, formasyon suyunun kimyasal bileşimindeki değişimi gösterilmektedir(Perkins ve diğ., 2005). $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$ içindeki ilk değişim, süperkritik karbondioksitin su içerisinde çözünmesinin bir sonucudur. Bu değişim daha sonra haznedeki karbonat minerallerinin kısa sürede çözünmesi ile (Şekil 5.19'da gösterildiği gibi kalsiyum konsantrasyonlarında artış) azalır.



Şekil 5.19 Weyburn'da çeşitli üretim kuyularından alınan sıvı örneklerinden karbondioksit enjeksiyonu öncesinde, enjeksiyonun 12. ve 31. aylarında suyun kimyası konturlanmıştır. Siyah noktalar, örnek kuyularının lokasyonlarını göstermektedir: (a) üretilen sudaki $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$ süperkritik CO_2 çözünmesini ve mineral reaksiyonunu, (b) kalsiyum konsantrasyonları mineral çözünmesinin sonucunu göstermektedir(Perkins ve diğ., 2005).

5.6.3 Enjeksiyon kuyusu güvenliğinin görüntülenmesi için teknoloji seçenekleri

Aktif enjeksiyon kuyularının güvenliğinin monitörlenmesi için mevcut birçok standart teknolojiler bulunmaktadır. Kuyu kaplaması çevresindeki çimentonun sürekliliğini ve yapışma becerisini değerlendirmek için çimento bağı logları kullanılmaktadır. Periyodik çimento bağı logları, kuyunun çimentolanmış kısmındaki bozulmayı ortaya koymaya yardımcı olabilir ve ayrıca asitleşmiş formasyon suyunun çimento ile arasındaki kimyasal etkileşimini gösterebilir. Kuyu güvenliği testlerinin bir parçası olarak çimento bağı loglarının kullanımı, çimentonun olmadığı durumlarda dahi yapışma ile ilgili sorunları yansıtabilir.

Karbondioksit enjeksiyonu gibi kuyunun diğer kullanımlara dönüştürülmesinden önce kuyu, genellikle basınç altındaki güvenilirliğini denetlemek için bazı testlere tabi tutulur. Bu testler, kuyunun tavanında ve tabanında basınç artışı ile kuyunun ölçülen basınç altındaki davranışına yöneliktir. Genel olarak özellikle karada olmak üzere eğer kuyu bu testlerde başarısız olursa ve bu kusurlu kuyudaki iyileştirme çalışmaları da sonuç vermezse, kuyu kapatılarak yeni bir kuyu açılabilir.

Enjeksiyon basıncı, herhangi bir problemin oluşup oluşmadığını göstermek için dikkatli bir şekilde monitörlenir. Basıncıdaki ani bir artış kuyuda problem oluşturabilir. Bununla birlikte endüstri deneyimleri, böyle bir kuyuda haznenin enjektivitesinde azalma olabileceğini göstermektedir.

Doğal gaz depolama projelerinde kuyudaki sorunları ortaya çıkarmak için genellikle sıcaklık logları ve ses logları kullanılmaktadır. Kuyunun derinliği boyunca sıcaklıktaki ani değişimler, sızıntı halinde bir belirti olabilir. Benzer olarak enjeksiyon borusundaki sızıntı ile ilişkili kaydedilen ses, küçük sızıntılarının yerinin saptanmasında kullanılabilir(Lippmann ve Benson, 2003).

5.6.4 Bölgenin çevresel etkilerinin monitörlenmesi için teknoloji seçenekleri

5.6.4.1 Yeraltı suyu

Eğer karbondioksit derin depolama formasyonundan sızarak, üzerinde bulunan sığ yeraltı suyu akiferlerine ulaşırsa, bunu ortaya koyarak yeraltı suyundaki değişimi değerlendirmek için bazı metotlar mevcuttur. Tabii ki karbondioksitin hemen sızıntıdan sonra ve yeraltı suyuna karışmadan önce bunun tespit edilmesi daha iyi olur. Böylece müdahale için ve daha fazla göçünü engellemek için ölçümler yapılabilir. Sismik monitörleme metotları ile

potansiyel olarak diğeri de, karbondioksitin yeraltı suyu bölgesine ulaşmadan önce sızıntı tespiti için kullanılabilir.

Ancak karbondioksit bir yeraltı suyu akiferine ulaşır, su örneklerinin toplanarak iyon analizleri (örn, Na, K, Ca, Mg, Mn, Cl, Si, HCO_3^- ve SO_4^-), pH, alkalinite, duraylı izotop (örn, ^{13}C , ^{14}C , ^{18}O , ^2H), gaz(hidrokarbon gazları dahil), CO_2 ve ilişkili izotop analizlerinin yapılması ile muhtemel etkileri değerlendirilebilir(Gunter ve diğ., 1998). Ek olarak eğer yeraltı suyu kirliliği oluşursa örnekler, arsenik ve kurşun gibi iz elementleri için analiz yapılabilir. Atomik adsorpsiyon ve çift plazma kütle spektroskopisi de su kalitesinin ölçülmesi için kullanılabilir. Daha az duraylı olan arazi deneyleri veya diğeri analitik metotlar da mevcuttur(Clesceri ve diğ., 1998). Bazı jeokimyasal parametreler için gerçek zamanlı görüntüleme olasılıkları dahil, tüm bu parametrelerin görüntülenmesinde standart analitik metotlar mevcuttur.

5.6.4.2 Hava kalitesi ve atmosferik değişimler

Havada karbondioksitin monitörlenmesi için HVAC (ısıtma, havalandırma ve hava düzenleme) sistemleri, sera gazları, yakım emisyonları ölçümleri ve karbondioksitin önemli seviyede tehlikeli olduğu çevreler (bira fabrikaları gibi) dahil, çeşitli uygulamalar altında devamlı sensörler kullanılmaktadır. Bu uygulamalar kızıl-ötesi araştırma prensiplerine dayanır ve kızıl-ötesi gaz analizörleri olarak adlandırılır. Bu gaz analizörleri küçük, taşınabilir özellikte ve genellikle mesleki çalışmalarda kullanılmaktadır.

Çevre araştırmalarında genel arazi uygulamaları zemin içerisindeki havanın karbondioksit konsantrasyonları, topraktaki değişimler ile eko-sistem ölçekte karbon dinamiklerinin ölçümünü kapsar. Dağınık toprak değişim ölçümleri, basit kızıl-ötesi analizörleri ile yapılmaktadır(Oskarsson ve diğ., 1999).

Karbondioksitin güvenli bir şekilde monitörlenmesi, genel olarak iyi anlaşılmış bir konudur. Diğeri taraftan çevresel görüntüleme ve sızıntı keşfi için bazı teknolojiler gelişim sürecinde iken, jeolojik depolamaya ilişkin zamansal ve uzaysal boyuttaki ölçüm ve görüntüleme yaklaşımlarının tam olarak etkili olması için geliştirilmeye ihtiyaç duyarlar.

5.6.4.3 Ekosistemler

Yeraltı ve yeryüzü ekosistemlerinin sağlığı, fauna-floranın etkililik ve biyo-çeşitlilik ölçümleri ile direkt olarak ve bazı durumlarda hiperspektral izlenim gibi uzaktan algılama

tekniklerinin kullanılmasıyla (Kaliforniya'daki Mammoth Dağları'nda olduğu gibi) indirekt olarak denetlenebilir (Martini ve Silver, 2002; Onstott, 2005; Pickles, 2005). Doğal karbondioksit sızıntısının bulunduğu birçok bölgede bu sızıntılar, çarpıcı özelliklere sahiptir. Bu sızıntılar nüfuzlu bölgelerde, hem tarımda hem de doğal bitki örtüsünde bitki gelişimindeki azalma ve asidik sular ile kayaçlardan filtrelenen minerallerde presipitant varlığı ile kolaylıkla saptanabilir. Bundan dolayı bazı belirgin sahalar, herhangi bir uzaktan algılamalı ekosistem çalışmaları veya incelemeleri olmadan yüksek karbondioksit konsantrasyonları için kolaylıkla ve hızlı bir şekilde denetlenebilir. Bununla birlikte bitki örtüsünün seyrek bulunduğu çöl ortamlarında direkt gözlem yapılması mümkün olmayabilir. Direkt olarak yapılan ekosistem gözlemlerine ek olarak, zeminin gaz bileşimi ile zemin mineralojisi analizleri de karbondioksit varlığını ve bunun toprak özelliklerine etkisini göstermek için kullanılabilir.

Suda yaşayan canlıların ekosistemleri için su kalitesi ve özellikle düşük pH, oluşacak muhtemel etkilere bir kanıt sağlayabilir. Ekosistem etkililiğinin ve biyolojik çeşitliliğinin direkt olarak ölçümleri, göller ve deniz eko sistemleri için geliştirilen standart tekniklerin kullanılması ile de yapılabilir.

5.7 Risk yönetimi, risk değerlendirme ve iyileştirme çalışmaları

Karbondioksitin derin jeolojik formasyonlarda depolamasının riskleri nelerdir? Bir jeolojik depolama, güvenli bir şekilde işletilebilir mi? Eğer bir depo sahasında sızıntı olursa, meydana gelebilecek güvenlik sorunları ve çevresel etkileri nelerdir? Bir depolama sahasında ters bir etki olursa düzenleme yapılabilir mi? Bu bölümde bu sorunlara değinilecektir.

5.7.1 Çevresel risklerin değerlendirilmesi için bir iskelet yapısı oluşturulması

Jeolojik depolamadan kaynaklanan çevresel etkiler, iki geniş kategoride ele alınır: bölgenin çevresel etkileri ve global etkiler. Global etkiler, karbondioksit depolamasının etkililiğinde bir belirsizlik olarak değerlendirilebilir.

Bölgesel sağlık, güvenlik ve çevresel tehlikeler, üç farklı nedenden kaynaklanır:

- Sığ yer kabuğunda ve yeryüzüne yakın ortamlarda gaz fazında karbondioksit konsantrasyonlarındaki artışın direkt etkileri.
- Yeraltı suyundaki çözülmüş karbondioksitin etkileri.

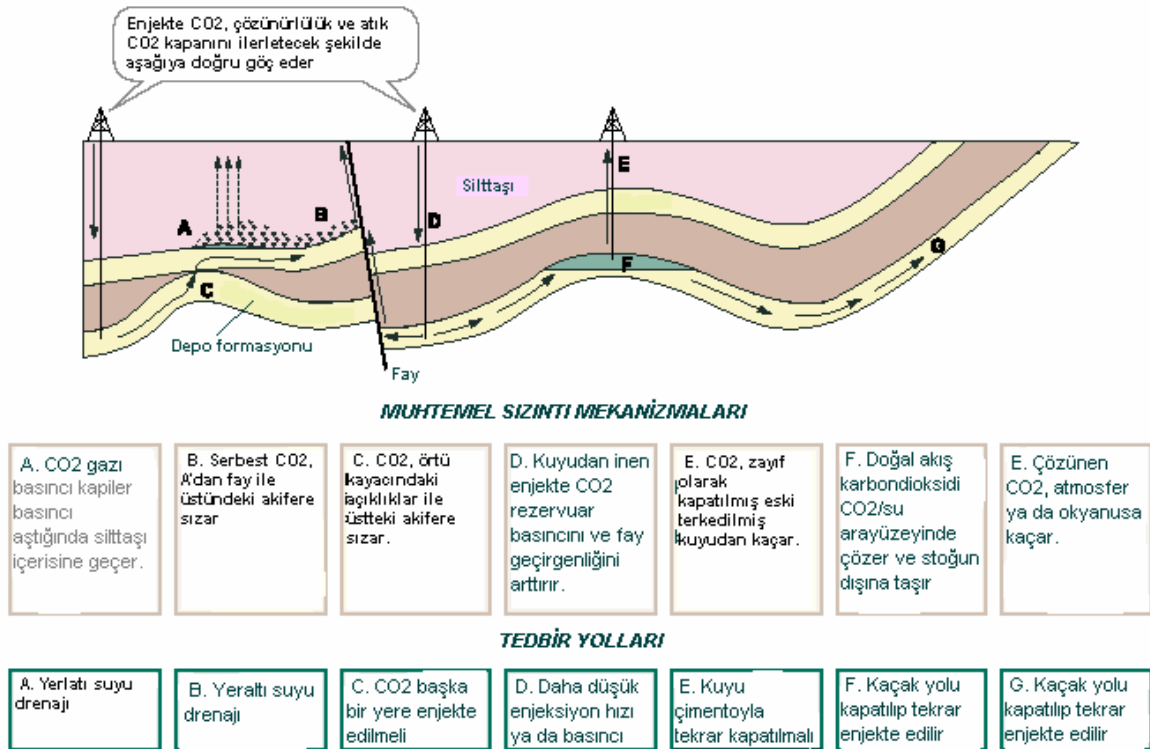
- Karbondioksit enjeksiyonu ile akışkanların yer değiştirmesinden kaynaklanan etkiler.

Riskler, muhtemel tehlike şiddeti ile ve bu tehlikelerin oluşma ihtimali ile orantılı olarak artar. Bölgesel olarak karbondioksit konsantrasyonlarındaki artıştan kaynaklanan tehlikeler için riskler, depolama sahasından yeryüzüne oluşabilecek sızıntı ihtimaline bağlı olarak değişir.

5.7.2 Karbondioksitin jeolojik depolama sahalarından salınımında izleyeceği yol ve işlemler

Karbondioksit bazı işlemler sonunda jeolojik depolama için kullanılan formasyonlardan kaçabilir. Bu işlemler:

- Eğer karbondioksit örtü kayacına girdiğinde “kapılar giriş basıncı” yüksekse, sist gibi düşük permeabiliteli örtü kayaçların boşluk sistemleri boyunca;
- Örtü kayacındaki açıklıklar, kırıklar ve faylar boyunca;
- Zayıf bir şekilde kapatılmış ve/veya terkedilmiş kuyular gibi antropomorfik kanallar boyunca karbondioksit formasyondan kurtulabilir.



Şekil 5.20 Tuz formasyonlarına enjekte edilen karbondioksitin bazı olası kaçış yolları

Kıyıdaki depolama sahalarında sızan karbondioksit, su tablasına ulaşabilir ve üzerindeki vadoz zona göç edebilir. Bu olay ile karbondioksitin içme suyu akiferlerine temas etmesi olasıdır. Yeraltı suyu akiferi veya vadoz zon içerisindeki kayaç matriksinin mineralojik bileşimine bağlı olarak, karbondioksitin kayaç matriksi ile reaksiyonu kirliliğe yol açabilir.

Vadoz zon, kısmen su ile doymuş bölgedir; boşlukların kalanı da gazlar (hava) ile doludur. Havadan daha ağır olması nedeniyle karbondioksit, ortamdaki gazların yerini alacak ve konsantrasyonu vadoz zondaki boşluklarda potansiyel olarak %100'e yaklaşacaktır. Yeryüzüne doğru olacak sızıntının etkileri çoğunlukla basınç altındaki akım ve difüzyon ile kontrol edilecektir(Oldenburg ve Unger, 2003).

Denizdeki depolama sahaları için sızıntı meydana geldiğinde karbondioksit ilk olarak okyanus tabanındaki sedimentlere ulaşacak, eğer ortam suyundan daha hafif ise, atmosfere ulaşmaya kadar su sütununda yukarı göç edecektir. Sızıntı oranına göre karbondioksit ayrı bir fazda kalabilir veya su içerisinde tamamen çözünmüş olarak bulunabilir. Karbondioksit çözündüğünde, bu defa okyanus tabanındaki ve okyanus organizmalarındaki biyolojik etkileri sorun oluşturabilir. Bu sahalarda karbondioksit okyanus yüzeyine ulaştığında, platformdaki işçiler için de tehlike oluşturabilir.

Vadoz zon boyunca karbondioksitin ilerlemesi sonucu atmosfere ulaşması ile çevrede yaşayan canlılar da korunmasız kalabilirler. Karbondioksitin havaya karışması ile azalan karbondioksit konsantrasyonlarının, insanlardan daha çok toprakta yaşayan canlıları etkilemesi olasıdır(Oldenburg ve Unger, 2004). Ancak yoğun gaz içeren sakin hava koşulları ve bölgesel topoğrafya eğilimi, karbondioksitin dağılması ve karışmasını engelleyecek yönde olabilir. Ancak bu gibi durumlar istisnadır ve genellikle yüzey tabakada sızıntı karbondioksitin seyreltileceği düşünülebilir. Ancak yine de, sakin ortamlarda karbondioksit konsantrasyonlarının birikmesine ilişkin muhtemel sorunlar, karbondioksit depolama sahasının risk değerlendirmesinde dikkatlice ele alınmalıdır.

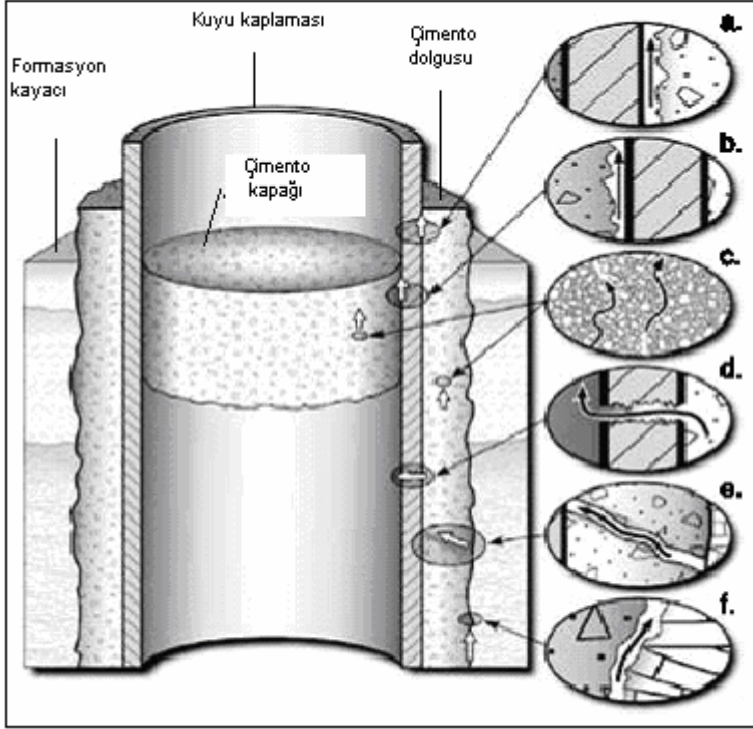
Kömür tabakalarına enjekte edilen karbondioksit, sadece serbest fazda olduğu (örn, kömüre adsorbe olmamış) durumlarda, sıralanan nedenler ile kaçabilir(Wo ve Liang, 2005; Wo ve diğ., 2005); enjeksiyon sırasında düşük permeabiliteli kömüre karbondioksitin basılması için yüksek basınçlar kullanıldığında çevre tabakalara olabilecek akım; kömür tabakasını kesen faylar veya diğer doğal açıklıklar; zayıf bir şekilde kapatılmış kömür veya CBM araştırma kuyuları; çökme kırıklarına neden olabilecek madencilik faaliyetleri gibi antropomorfik nedenler.

Bununla birlikte kömür tabakasındaki basınç indirilmedikçe (örn, madencilik çalışması ile), kömüre sorpsiyonlanan karbondioksit, örtü kayacı olmadan tabakada

hapsedilmiş bir şekilde kalacaktır. Basınç ve/veya sıcaklıktaki değişimler, maksimum gaz içeriği ile sonuçlanabilir. Eğer basınç önemli bir derecede düşürülürse karbondioksit kömür üzerinden ayrılacak ve serbest hale gelecektir.

Karbondioksit depolama projeleri için en olası sızıntı yollarında biri de, enjeksiyon kuyuları ile terk edilmiş kuyular olarak saptanmıştır(Gasda ve diğ., 2004; Benson, 2005). Bir kuyu açıldığında toprak yüzeyi ile yer kabuğunun derinlikleri arasında sürekli, açık bir kanal oluşturulur. Eğer kuyunun açılması sırasında operatör, hedef formasyonun yeteri kadar verimli olmadığı kanaatine varırsa, prosedürüne uygun bir şekilde kuyu kapatılır. Bu prosedür genellikle kuyunun çimento ile doldurulması gibi konuları içerir.

Bir kuyunun açılması ve tamamlanması sadece zeminde bir kanal açılmasından ibaret değildir. Bundan başka kuyu çimentosu ve kuyu kaplaması gibi planlanmış materyallerin tanıtımı da gerekir. Açılan bir kuyuda sonuçta küçük ancak potansiyel olarak önemli kayaç hacimlerinin materyalin türüne göre farklı özelliklere sahip antropomorfik materyaller ile yer değiştirmesi söz konusudur. Şekil 5.21'de gösterildiği gibi terk edilmiş kuyular boyunca birçok muhtemel sızıntı yolları oluşabilir(Gasda ve diğ., 2004). Bu sızıntılar çimento ile kaplamanın dış yüzü arasında(Şekil 5.21a), çimento ile kaplama yüzeyinin iç yüzeyi arasında(Şekil 5.21b), kapak olarak kullanılan çimento içerisinde(Şekil 5.21c), metal kaplamanın bozulması (aşınması) ile(Şekil 5.21d), annulus içindeki bozunma ile(Şekil 5.21e) ve formasyon ile çimento arasındaki halka biçimindeki bölgede sızıntı ile(Şekil 5.21f) meydana gelebilir. Karbondioksit varlığında metal kaplama ve çimentonun uzun vadede yıkılma potansiyeli, bugün kapsamlı araştırma konularından biridir(örn, Scherer ve diğ., 2005).



Şekil 5.21 Terkedilmiş bir kuyuda muhtemel sızıntı yolları: (a) ve (b) sırasıyla kaplama ile çimento duvarı arasından ve kaplama ile kapak arasından; (c) çimento kapağı içerisinde; (d) kaplama içinden; (e) çimento duvarı içerisinde; (f) çimento duvarı ve kayadan(Gasda ve diğ., 2004).

5.7.3 Jeolojik depolama sahasında sızıntı oluşma ihtimali

Depolama sahaları tahminen tüm enjekte karbondioksitin jeolojik zaman ölçeğinde hapsedilmesi üzerine tasarlanır. Bununla birlikte planlanan sistemlerin deneyimleri, işletilen depolama sahasının küçük bir bölümünün karbondioksiti atmosfere salacağını göstermiştir. Güvenli bir depolama sahasında oluşabilecek sızıntı olasılıklarını ve büyüklüğünü sistematik olarak hesaplayabilecek hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu bölümde bu gibi çalışmaların yokluğunda depo sahada tutulan fraksiyonların yaklaşık nicel hesaplamalarını olanaklı kılacak bazı ipuçları sentezlenecektir. Depolamanın etkililiğini denetlemeye ilişkin beş çeşit yol vardır;

- Petrolde olduğu gibi doğal gaz ve karbondioksitin kapatılmış birikimlerini içeren doğal sistemlerden toplanacak veriler;
- Doğal gaz depolama, asit gazın veya diğer sıvıların elden çıkarımı gibi bazı mühendislik çalışmaları ile planlanan sistemlerden edinilen veriler;

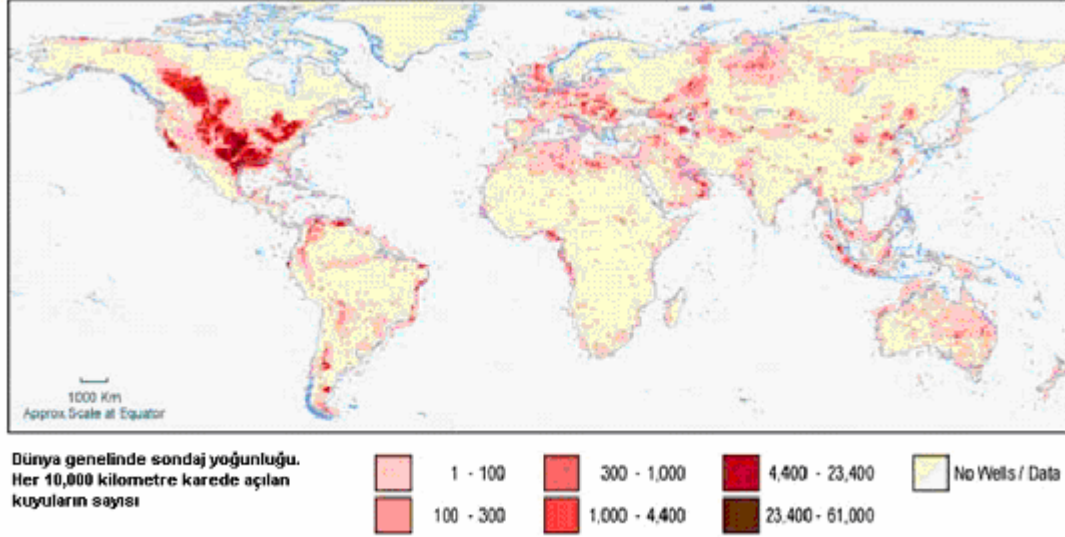
- Yerkabuğunda karbondioksitin geleceğine ve hareketine dair temel fiziksel, kimyasal ve mekaniksel işlemleri;
- Karbondioksit nakliyesinin sayısal modellerinden edinilen sonuçlar;
- Mevcut jeolojik depolama projelerinden edinilen sonuçlar.

5.7.3.1 Doğal sistemler

Doğal sistemler, karbondioksit depolaması için kullanılacak depo formasyonların özellik ve niceliği hakkında yorum yapmamıza yardımcı olurlar. Milyonlarca yıl sedimanter havzalardaki formasyonlarda kapatılmış petrol, gaz ve karbondioksit varlığı, jeolojik zaman periyodunda karbondioksiti hapsetmek için yeterli özellikte geçirimsiz formasyonların (örtü kayaçların) bulunduğu anlamına gelir. Örneğin, Jackson Domu'nun (Mississippi) kuzeydoğusundaki Pisgah Antiklinali'nde kapatılmış olarak bulunan yaklaşık 200 Mt karbondioksitin, 65 milyon yıl önce Geç Kretase'de oluştuğu tahmin edilmektedir(Studlick ve diğ., 1990). Dünyanın birçok petrol havzasında 10 milyon yıldan fazla tutum zamanı saptanmıştır(Bradshaw ve diğ., 2005). Bundan dolayı doğal sistemlerde görülen kanıtlar, karbondioksitin milyonlarca yıl ve daha fazla sürede hapsedebilecek hazne kapanlarının bulunduğunu göstermektedir.

5.7.3.2 Mühendislik çalışmaları ile planlanan sistemler

Doğal gaz depolama sistemlerinden edinilen veriler, mühendislik hesaplamaları ile kurulan engeller (kuyular ve ilgili yönetim ve iyileştirme çalışmaları) ile doğal sistemlerin performans değerlendirmesine olanak verir(Lippmann ve Benson, 2003; Perry, 2005). Günümüzde yaklaşık 470 doğal gaz depolama tesisi, toplam 160 M tonu aşan doğal gaz depolama kapasitesi ile Amerika'da işletilmektedir(Şekil 5.12). 9 adet önemli sızıntı kazası rapor edilmiştir: bunlardan beşi kuyu güvenliği ile ilgili ve üçü örtü kayacında oluşan sızıntılardan kaynaklanmıştır ki bu üç kuyudan ikisinde iyileştirme çalışmaları yapılmış, diğeri kapatılmıştır. Geri kalan son kaza; yanlış arazi seçiminden dolayı kapatılmış bir projedir(Perry, 2005). Hiçbir projede sızıntıdan kaynaklanan gaz kaybının toplam hacmine yönelik kesin hesaplamalar mevcut değildir. Ancak Kansas'taki bir işletmede meydana önemli bir sızıntı örneğinde yaklaşık 3000 t gazın salındığı tahmin edilmektedir(Lee, 2001) ki bu miktar, Amerika ve Kanada'daki depolanan toplam gazın %0.002'den daha az bir orana



Şekil 5.21 Dünya genelinde petrol ve gaz sondajlarının dağılımı ve yoğunluğu

eşittir. Bu salınım oranlarının tahmini hesaplamaları depolama etkililiğinin ölçülmesinde faydalı olsa da, bu salınımın süregelen bir işlem olacağı şeklinde yorumlanmalıdır.

Doğal gaz depolama sistemlerinin davranışı, karbondioksit depolamasının bir alt sınırı olarak ele alınabilir. Çünkü doğal gaz sistemleri, örtü kayacın sızıntı ihtimalini arttıracak şekilde hızlı basınç döngüsü için tasarlanır. Diğer taraftan karbondioksit, sızıntı riskini azaltacak bir şekilde boşluk suyu(eğer mevcutsa) içerisinde çözünür. Doğal gaz depolama sistemlerinin düşük risk gösterdiği tek nokta, kuyu kaplamaları gibi metalik parçalara CH₄'in karbondioksitten daha az aşındırıcı etkisi göstermesi olabilir. Doğal gaz depolama sahalarında sızıntı oluşması halinde, gazın yanma özelliğinden dolayı daha yüksek riskler mevcuttur.

5.7.3.3 Karbondioksitin yerkabuğundaki geleceğine ve hareketine dair başlıca fiziksel, kimyasal ve mekanik işlemler

Özellikle depolama sistemlerinin performansı ve karbondioksit depolamasının bilimsel olarak kavranması açısından geniş bir hidrojeoloji, petrol jeolojisi, hazne mühendislik çalışmaları ve ilişkili jeoloji bilimi bilgisi gerekmektedir. Bir seri işlemlerin tek başına veya kombinasyonu ile edinilen mevcut değerlendirme, çok uzun bir vadede depolama ile sonuçlanabilir. Özellikle düşük permeabiliteli örtü kayaçların altındaki ayrı fazda bulunan karbondioksitin yapısal ve stratigrafik kapanları, artık karbondioksit kapanı, karbondioksitin çözülebilirlik kapanı ve mineral kapanının kombinasyonu ile jeolojik zaman ölçeğinde güvenli bir depolama sağlanabilir.

5.7.3.4 Uzun vadede depolama performansının sayısal simülasyonları

Büyük ölçekli depolama projelerinde karbondioksit hapsinin yapılan simülasyonları (terkedilmiş kuyuları göz ardı ederek) karbondioksitin yerkabuğundaki hareketinin çok yavaş olacağını göstermiştir. Örneğin Cawley ve diğ., (2005), Kuzey Denizi'nde Forties Gaz Sahası'ndaki karbondioksit depolaması incelemelerinde örtü kayaca uygulanan kapilar basınç ile akifer içinde akım hızı gibi parametrelerdeki belirsizliklerin etkilerini çalışmıştır. Cawley ve diğ., (2005), çalışmaları sonucu 1000 yıllık bir süre zarfında depolanan karbondioksitin örtü birime giren oranının %0.2'den daha az olduğunu ve hatta en kötü durumda bile karbondioksitin ilerlediği maksimum düşey mesafenin deniz tabanına olan uzaklığının yarısından daha az olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Depolanan karbondioksitin biyosfere sızıntısını ortaya çıkarmak için tasarlanan simülasyonlar, genel risk değerlendirme aktivitelerinin bir parçası haline gelmektedir. Örnek olarak Weyburn sahasında yapılan iki çalışmada biyosfere olabilecek sızıntı değerlendirilmiştir. Walton ve diğ., (2005), biyosfere salınan kümülatif fraksiyon için olasılık dağılımını hesaplamak amacıyla, karbondioksit hareketinin basitleştirilmiş gösterimi ile bir olasılık modeli kullanmıştır. Walton ve diğ., 5000 yıl sonra salınan kümülatif miktarın ortalama %0.1'e eşit olacağına ve %95 olasılıkla depolanan toplam miktarın %1'inden azının salınacağını göstermiştir.

Yüksek brinel içerikli petrol ve gaz haznelerinde ve tuz formasyonlarında karbondioksitin çoğunluğu, brinel içerisinde çözünmüş(Şekil 5.5), artık olarak ve hareketsiz fazda kapatılmış(Şekil 5.6) veya jeokimyasal reaksiyonlar ile hareketsizleştirilmiş olacaktır. Tipik olarak karbondioksitin diğer işlemler ile depolamadan göç etmesi için geçen zamanla karşılaştırıldığında çözünme için geçen zaman kısadır(Enis-King ve Paterson, 2003; Lindeberg ve Bergmo, 2003; Walton ve diğ., 2005). Karbondioksit çözüldüğü zaman havza ölçekte sirkülasyon veya yukarıya doğru göç ile enjeksiyon sahasının dışarısına taşınabilir. Ancak böyle bir hareketin zaman ölçeği (milyonlarca yıl), tipik olarak sızıntı riskinin değerlendirilmesinde göz ardı edilebilecek kadar uzundur.

5.7.3.5 Karbondioksitin uzun zaman periyodunda depolanması için işleyimsel jeolojik depolama projelerinin yeterlilik değerlendirmesi

Jeolojik depolama projeleri için saklanan fraksiyonun değerlendirmesi çoğunlukla bölgeye özgüdür. Etkileyen faktörler; (1) seçilen depolama sahasının jeolojik özellikleri dahil,

depolama sisteminin tasarısı, (2) enjeksiyon sistemi ve ilişkili hazne mühendislik çalışmaları ve (3) kuyu kapatma teknolojilerinin performansları dahil kapatma metotlarıdır.

Büyük ölçekte işleyimsel karbondioksit depolama projeleri için, iyi seçilip işletilen ve uygun bir şekilde monitörlenmiş sahanın değerlendirilmesi ile mevcut verilerin bilançosunda;

- İlk yüz yıl için depolanmış karbondioksitin saklanan fraksiyonunun %99'dan fazla olması büyük bir olasılıktır.
- İlk bin yıl için depolanmış karbondioksitin saklanan fraksiyonunun %99'dan fazla olması büyük bir olasılıktır.

5.7.4 Lokal ve bölgesel açıdan muhtemel çevre riskleri

5.7.4.1 İnsan sağlığı ve güvenliğini etkileyecek muhtemel tehlikeler

Karbondioksit konsantrasyonlarının açık havada, mağarada veya yapılarda yükselmesi ile insan sağlığı ve güvenliği için bazı riskler doğabilir. Yükselen karbondioksit konsantrasyonlarından kaynaklanan hem fizyolojik, hem de zehirli etkileri iyi anlaşılmalıdır. %2'den fazla konsantrasyonlarda karbondioksit, solunum ile ilgili güçlü etkilere yol açabilir ve %7-10 arasındaki konsantrasyonlarında bilinç kaybı ve hatta ölüme yol açabilir.

Depolama sahasında oluşabilecek karbondioksit sızıntısından kaynaklanan risklerin değerlendirilmesindeki asıl sorun, sığ yeraltına ulaşan karbondioksit hareketinin uzaysal ve zamansal dağılımının ortaya konulması ve çevreyi saran karbondioksit konsantrasyonunun önceden tahmin edilebilmesidir. Yüzeye çıkarak havaya karışan konsantrasyonlar, yeryüzü topoğrafyası ve atmosferik hava koşulları ile etkilenecektir. Çünkü karbondioksit havadan %50 daha yoğundur ve bu yoğunluk, karbondioksiti aşağıya çökmesine neden olur. Yüzeye çöken karbondioksit zemini izleyerek, potansiyel olarak açık arazilerden çok kapalı boşluklarda daha yüksek konsantrasyonlar oluşturacak şekilde sığ çukurluklarda birikir.

Karbondioksit sızıntısı, volkanizmanın etkin olduğu bölgelerde nadir olan bir olay değildir. Karbondioksit sızıntılarının doğal oluşumu, karbondioksitin vadoz zondan atmosfere taşınmasını anlamak için bir temel oluşturduğu gibi, sığ yeraltındaki karbondioksit hareketini çevreyi saran havadaki karbondioksit konsantrasyonları ile birleştiren deneysel bir veri sağlar.

5.7.4.2 Karbondioksit sızıntısı ve brinellerin yer değiştirmesi ile yeraltı suyunda oluşan tehlikeler

Bir depolama haznesinden karbondioksitin göç etmesi ile oluşabilecek znmş karbondioksit konsantrasyonlarındaki artışlar, yeraltı suyunun kimyasını değiştirerek içme suyu, endüstriyel ve tarımsal ihtiyaçlar için kullanılan sığ yeraltı suyunu potansiyel olarak etkileyecektir. znmş karbondioksit, çözeltinin pH'ını değiştirecek şekilde karbonik asit oluşumuna neden olur ve (zehirli) metallere, sülfat veya kloritin mobilizasyonu gibi bazı dolaylı etkilere sebep olur; ve suyun değişik bir koku, renk veya tat almasına yol açar. En kötü durumda yeraltı suyunun kirlenmesi sonucu içme veya sulama suyu olarak kullanımı ile tehlikeli boyutlara ulaşabilir.

Karbondioksitin veya diğer bir akışkanın yeraltının derinliklerine enjeksiyonu, boşluk suyu basıncında ve enjekte akışkanın kapladığı alandan çok daha öteye ulaşan jeomekanik gerilim alanlarında mutlaka bir değişime neden olur. Enjekte karbondioksit ile derin formasyonlarda yer değiştiren brineller, potansiyel olarak kırıklar veya kusurlu kuyular boyunca sığ akiferlere hareket edebilir ve tuzluluğun artması sonucu sığ içme suyu formasyonlarını kirlitebilir. En kötü durumda tuzlu suyun yeraltı suyuna veya sığ yeraltına szlmesi sonucu yabancı hayvan ve bitki yaşamı etkilenebilir, toprağın tarımsal kullanımı sınırlanabilir ve yüzey suları kirlenebilir.

5.7.4.3 Kara ve deniz eko sistemlerinde olabilecek tehlikeler

Karbondioksitin ve beraberinde bazı materyallerin depolanması ile bu materyallerin temas ettiği fauna-flora etkilenebilir. Derin yer kabuğundaki mikroplar ve sığ toprakta ve yüzeydeki bitkiler ve canlılar üzerinde bazı etkilerin olması beklenebilir.

Son otuz yılda bazı yeraltı habitatlarında “extremofil” olarak adlandırılan mikroplar saptanmıştır ki bu canlılar, önceden yaşamın mümkün olmadığı sanılan ortamlarda yaşamaktadır. Bu mikroorganizmalar, çok sınırlı besin olanağına sahiptir ve çok düşük metabolik faaliyet gösterirler(D'Hondt ve diğ., 2002). Yapılan son çalışmalarda derin tuz formasyonlarında(Haveman ve Pedersen, 2001), petrol ve gaz haznelerinde(Orphan ve diğ., 2000) ve deniz tabanından 850 m derinliğe kadar olan sedimentler içerisinde(Parkes ve diğ., 2000) bulunan canlılar saptanmıştır. Yeraltında yaşayan canlılar kümesi, yeryüzünde yaşayan canlılardan daha fazla olabilir(Whitman ve diğ., 2001). alışmalar, karbondioksit depolaması

için düşünölen her derinlikte mikroorganizmaların var olabileceğini ve bu organizmaların enjekte karbondioksitten etkilenebileceğini göstermektedir.

Yerkabuğundaki enjekte karbondioksitin, mikroorganizmalar üzerindeki etkileri yeteri kadar çalışılmamıştır. Düşük pH'lı, yüksek karbondioksitli bir ortam, bazı türlere faydalı olabilir ve diğerleri için de zararlı olabilir. Karbondioksite maruz bırakılan bazı ortamlarda, karbondioksiti CH₄'e indirgeyecek mikrobiyel topluluklar bulunabilir; diğer bazı haznelerde karbondioksit enjeksiyonu, demir(3) indirgeyen canlıların kısa vadede bir stimölasyonuna neden olabilir(Onstato, 2005).

Karbondioksitin depolama sahasından sızması ve yüzeye doğru ilerlemesi ile karbondioksit, biyolojik olarak aktif daha çok alana girecektir. Havada karbondioksit konsantrasyonlarının artması, bitki gelişimini hızlandırabilse de, bu gibi faydaları toprakta artan karbondioksitin zararlı etkileri ile bastırılır. Çünkü karbondioksit akımının havadaki konsantrasyonlarını arttırmaya yetecek kadar fazla olması, tipik olarak toprakta daha yüksek karbondioksit konsantrasyonları ile orantılıdır. Artan karbondioksit konsantrasyonlarının etkileri, bazı faktörler ile ilişkili olabilir: bitki örtüsünün çeşidi ve yoğunluğu, diğer çevresel etkilere maruz kalma, rüzgar hızı ve yağış miktarı gibi çevresel koşulların egemenliği, alçak bölgelerin varlığı, yakındaki havyan topluluklarının yoğunluğu vb...

Uzun vadede artan karbondioksit konsantrasyonlu bölgelerin karakteristik özelliği, yüzeyde bitki örtüsünün bulunmayışıdır. Bitki örtüsünün bulunduğu bölgelerde oluşacak karbondioksit sızıntıları, fark edilir şekilde bitki ölümüne yol açabilir. Bitki örtüsüne önemli etkiler yapabileceği bu bölgelerde karbondioksit, zemin gazının yaklaşık %20-95'ini oluşturur. Normalde topraktaki gazın yaklaşık %0.2-4'ü karbondioksittir. %5 üzerindeki karbondioksit konsantrasyonları, bitki örtüsü için tehlikeli olabilir ve %20'ye yaklaştıkça bitkiler için zehir etkisi yapar. Karbondioksit, düşük oksijen konsantrasyonu ile beraber kök anoksiyası boyunca bitkilerin ölümüne neden olabilir(Leone ve diğ., 1977; Flower ve diğ., 1981).

Bitki ölümlerinin bir örneği, volkanik aktiviteler sonucu yüksek karbondioksit akımlarının oluştuğu Kaliforniya'da Mammoth Dağı'nda görölmüştür. 1989 yılında Mammoth Dağı yakınında bir seri küçük depremler meydana gelmiştir. Bir yıl sonra çam ağaçlarının yapraklarını kaybetmeye başladığı gözlenmiş ve 1997 yılı itibariyle ölü ağaçların bulunduğu arazi 40 ha'lık bir alana yayılmıştır(Farrar ve diğ., 1999). Toprakta %10-20 üzerinde karbondioksit seviyesi bitkilerin kök gelişimini de engeller. 1994'te Mammoth Dağı'nda yapılan zemin petrol-gaz deneylerinde toprak gazında hacimce %95'e varan karbondioksit konsantrasyonu belirlenmiştir. Etkili bölgedeki toplam karbondioksit akımı,

1996 yılında ortalama 530 t/gün olarak belirlenmiştir. 2001 yılında yapılan ölçümler, etkilenen en geniş bölgede (Horseshoe Gölü) ortalama 90-100 tCO₂/gün akım oranları ile %15-90 toprak karbondioksit seviyesini göstermiştir(Gerlach ve diğ., 1999; Rogie ve diğ., 2001).

Mevcut karbondioksit depolama projelerinde, karasal canlılar üzerindeki etkiyi gösteren hiçbir veri edinilmemiştir. Aynı şekilde EOR projelerinde yukarıda bahsedildiği şekilde bitki örtüsünün etkilendiği hiçbir veri edinilmemiştir. Bununla birlikte mevcut EOR projelerinden kaynaklanan karasal canlılar üzerindeki etkiyi araştırmak için hiçbir sistematik çalışma bulunmamaktadır.

Bu nedenle volkanik bölgelerdeki doğal karbondioksit sızıntıları, sızıntıdan kaynaklanan muhtemel etkilerin örneklerini sağlayabilir. Ancak volkanik bölgelerdeki sızıntılar, sedimanter havzalardaki karbondioksit depolama sahalarında oluşan sızıntılardan biraz farklı özellikler gösterebilir. Yukarıda bahsedildiği gibi karbondioksit sızıntıları, önemli tehlikelere yol açabilir. Örneğin, Roma'nın (İtalya) güneyindeki Alban tepelerinde Eylül, 1999 ile Ekim, 2001 tarihleri arasında meydana gelen olaylarda 29 inek ve 8 koyun boğularak ölmüştür(Carapezza ve diğ., 2003). Ölçülen karbondioksit akımı belirlenen bölgelerde özellikle de sakin atmosfer koşullarında ölümcül seviyelere ulaşacak şekilde %98 karbondioksit ve %2 H₂S içerikle 60 t/gün olarak saptanmıştır. Yüksek CO₂ ve H₂S akımları, magmatik aktivite ve faylanmanın bir kombinasyonu sonucu ortaya çıkmıştır.

Denizdeki jeolojik depolama sahalarında oluşan sızıntı, karbondioksitin derin jeolojik yapılardan bentik sedimentler boyunca okyanusa doğru yükselmesi ile bentik ortamlar ve organizmalar için bir tehlike oluşturabilir. Karbondioksit sızıntısı bentik ortamlara zararlı olabilirken, deniz tabanı ve üzerindeki deniz suyu da karbondioksit sızıntısının atmosfere kaçışını durduracak şekilde bir engel oluşturabilir. Bu tehlikeler çözünmüş karbondioksitin su yaşamındaki çevresel etkilerinden tamamen ayrı tutulur. Deniz tabanı altındaki jeolojik depolama sahalarında oluşacak sızıntının çevresel etkilerini ortaya koyacak özel hiçbir çalışma henüz bulunmamaktadır.

5.7.4.4 Sismisite ihtimali

Karbondioksit veya diğer akışkanların formasyon basınçlarından daha yüksek basınçlarla yeraltındaki gözenekli kayalara enjeksiyon edilmesi, kırık oluşumuna ve fayların hareketlenmesine neden olabilir(Healy ve diğ., 1968; Gibbs ve diğ., 1973; Raleigh ve diğ., 1976; Sminchak ve diğ., 2002; Streit ve diğ., 2005; Wo ve diğ., 2005). Artan kırık ve fay

aktivasyonu, iki tür riske neden olabilir. Birincisi, gevrek yenilme ve yüksek basıncın neden olduğu mikro sismisite, kırık permeabilitesine neden olabilir veya arttırabilir, dolayısıyla arzu edilmeyen karbondioksit göçü için kanal oluşabilir (Streit ve Hillis, 2003). İkincisi, fay aktivasyonu prensipte zarara neden olabilecek büyüklükte deprem üretebilir (örn, Healy ve diğ., 1968).

Kırık veya fay aktivasyonunu değerlendirme ve kontrol etmeye yönelik, kolay uygulanabilir metotlar mevcuttur. Karbondioksit depolaması için fayların duraylılığını değerlendirmek ve maksimum boşluk suyu basınçlarını hesaplamak için bazı jeomekanik metotlar geliştirilmiştir (Streit ve Hillis, 2003). in situ gerilmelerin, fay geometrilerinin ve ilişkili kayaç dayanımlarının belirlenmesini gerektiren bu tür metotlar gevrek yenilme kriterlerine dayanmaktadır ve muhtemel CO₂ depolaması için birkaç çalışma sahasında uygulanmıştır (Rigg ve diğ., 2001; Gibson-Poole ve diğ., 2002). Bunun dışında özellikle enjeksiyon kuyularının bulunduğu bölgelerde mikro sismik olayların görüntülenmesi sonucu akışkan basınçlarının lokal olarak fay, kırık veya kayaç dayanımını aşmış aşmadığı da belirlenebilir. Karbondioksit depolama sahalarının monitörleme kuyularında mikro sismik olayları kaydeden akustik transduserler de enjeksiyon basınçlarının sismisite üretecek seviyelerin altında tutulması amacıyla gerçek zamanlı kontrol için kullanılabilir.

5.7.4.5 Gaz kirliliği

Bazı koşullar altında H₂S, SO₂, NO₂ ve diğer bazı gazlar karbondioksit ile beraber depolanabilir (Bryant ve Lake, 2005; Knauss ve diğ., 2005). Bundan dolayı risk seviyesi etkilenebilir. Örneğin H₂S, karbondioksitten daha fazla zehirlidir ve H₂S içeren kuyu püskürmeleri, sadece CO₂ içeren kuyu püskürmelerinden daha büyük tehlikeler meydana getirebilir. Benzer olarak yeraltı suyunda SO₂ çözülmesi, çok daha kuvvetli asit meydana getirebilir. Bundan dolayı yeraltı suyundaki ve topraktaki metallerin mobilizasyonu daha yüksek olabilir ki bunun sonunda iz metallerin tehlikeli seviyelerinden kaynaklanan daha önemli tehlikeler meydana gelebilir. Bugüne dek risk değerlendirme çalışmalarının çoğu, sadece karbondioksitin depolandığını farz etmiştir. Bundan dolayı gaz kirliliğine ilişkin risklerin değerlendirilmesi için henüz yeterli bilgi edinilmemiştir.

5.7.5 Risk yönetimi

Jeolojik depolama için efektif risk önleme, birbiriyle ilişkili dört etkinlikten oluşur:

- Performans ve risk değerlendirmesi, sosyo-ekonomik ve çevresel faktörler dahil titiz saha seçimi;
- Depolama projesinin planlandığı gibi işlendiğine dair kanaat sağlayacak ve sızmaya başladığı durumlarda erken bir uyarı sağlayacak şekilde monitörleme;
- Etkili düzenleme yönetimi;
- Sızıntı etkilerinin ve nedenlerinin ortadan kaldırılması veya azaltılması için iyileştirme çalışmaları.

Risk yönetim stratejileri, çeşitli ölçümler ile sağlanabilecek risk önleme kademesinin nicel hesaplarını olanaklı kılmak ve uygun görüntüleme düzeyini kurmak için eğer gerekirse mevcut müdahale seçeneklerini kullanarak risk değerlendirme işleminin girdilerini kullanmalıdır. Doğal gaz depolama projelerinden ve sıvı atıkların elden çıkarımından edinilen deneyimler, risk önlemeye yönelik bu tür yaklaşımların etkililiğini ortaya koymaktadır(Wilson ve diğ., 2003; Apps, 2005; Perry, 2005).

5.7.6 Sızıntı oluşan depolama projelerinin iyileştirme çalışmaları

Jeolojik depolama projeleri, sızıntının oluşmasını önleyecek şekilde seçilerek işletilir. Ancak bazı durumlarda sızıntı oluşabilir ve hem sızıntıyı durdurmak, hem de insan ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek için iyileştirme önlemlerinin yapılması gerekir. Bundan başka iyileştirme seçeneklerinin bulunması, toplum için jeolojik depolamanın güvenli ve etkili olabileceğine dair bir güven ölçüsü sağlayabilir. İyileştirme seçenekleri üzerinde çok az bir çalışma yapılmış olsa da, Benson ve Heple(2005), derin jeolojik formasyonlarda sıvı atıkların elden çıkarımı, yeraltı suyu ve toprak kirliliği ve doğal gaz depolama projelerinin iyileştirme çalışmaları için kullanılan uygulamaları incelemiştir. Bu incelemelere dayanarak, en muhtemel sızıntı senaryoları için iyileştirme seçenekleri saptanmıştır. Yani;

- Depolama haznesi içerisinde sızıntı;
- Depolama formasyonundaki faylar ve kırıklarda oluşan sızıntı;
- Sığ yeraltı suyu;
- Vadoz zon ve toprak;

- Yüzey akımları;
- Özellikle bodrum katlarında, oturlan yerlerdeki karbondioksit;
- Yüzey suları.

Aktif veya terkedilmiş kuyularda oluşan karbondioksit sızıntısının iyileştirilmesi için seçeneklerin saptanması da önemlidir, çünkü bunlar da bilinen zayıflıklardır (Gasda ve diğ., 2004; Perry, 2005). Enjeksiyon kuyusunda veya terkedilmiş kuyularda oluşan sızıntı ya da püskürmelerin durdurulması, kuyu kaplaması içerisine ağır çamurun enjekte edilmesi gibi bazı standart teknikler ile yapılabilir. Eğer kuyu başı kolay ulaşılabilir bir konumda değilse, kuyu kaplamasını yeraltında kesecek şekilde yakın bir kuyu açılarak, bu kuyudan çamur pompalanabilir. Sızdıran enjeksiyon kuyuları, enjeksiyon borusunun veya paketleyicinin değiştirilmesi ile onarılabilir. Eğer kaplamanın arkasındaki halka biçimli boşluk sızdırıyor ise, sızıntı durduruluncaya kadar çimento basılmasına olanak verecek şekilde bu kaplama delinebilir.

Senaryo	İyileştirme Seçenekleri
Faylar, kırıklar ve çökme noktalarında oluşacak sızıntı	<ul style="list-style-type: none"> * Daha düşük oranda veya daha fazla kuyu boyunca enjeksiyon yapılması ile düşük enjeksiyon basıncı (Buschbach ve Bond, 1974) * Depo yapısından suyun veya diğer akışkanların uzaklaştırılmasıyla düşük hazne basıncı * Sızıntı varlığında çökme kuyularının sızıntı ile kesilmesi * Sızıntının akıntı yönüne karşı hazne basıncının artırılması ile hidrolik bir bariyer oluşturma * Depolama haznesinde yeni bölmelere giriş yolu açılması ile daha düşük hazne basıncı * Projenin dengede tutulması için enjeksiyonun durdurulması * Enjeksiyonun durdurulması, depolama haznesinden karbondioksitin alınarak daha uygun bir depolama yapısına tekrar enjekte edilmesi
Aktif veya terkedilmiş kuyular boyunca oluşan sızıntı	<ul style="list-style-type: none"> * Enjeksiyon tüpü ve paketleyicinin değiştirilmesi gibi standart kuyu kapatma teknikleri ile enjeksiyon kuyularındaki sızıntının onarımı * Kaplamanın arkasındaki sızıntıların kapatılması için kuyu kaplamanın arkasına çimento doldurulması ile enjeksiyon kuyularındaki sızıntının onarımı * Yukarıdaki metotlar ile onarılmayan enjeksiyon kuyularının tamamen kapatılması ve terkedilmesi * Kuyu kaplamasına ağır çimentonun girdiği bir kuyuyu sonlandırmak için standart tekniklerle enjeksiyonda veya terkedilmiş kuyularda meydana gelen püskürmeleri durdurmak. Kuyunun tekrar kontrol altına alınması sonrasında kapatma veya berketme için yukarıda açıklanan uygulamalar kullanılabilir. Eğer kuyu başının yanına varılmıyorsa ise, o halde yakın bir kuyu açılarak yeraltında esas kuyunun kaplaması ile kesilebilir ve bu ikincil kuyudan çamur basılarak, ana kuyunun işlemi sona erdirilebilir (DOGOR, 1974).
Vadoz zon ve zemin gazında karbondioksit birikimleri	<ul style="list-style-type: none"> * Yeraltı suyu karbondioksit gazı birikimleri kaldırılabilir ya da en azından hareketsizleştirilebilir. Bunun için bu birikimler ile kesilen kuyular açılır ve karbondioksit çıkarılır. Çıkarılan karbondioksit atmosfere salınabilir ya da uygun bir depolama sahasına tekrar enjekte edilebilir. * Hareketsiz bir gaz fazı olarak kapılabilir artık karbondioksit, suda çözünürlükle kaldırılabilir ve yeraltı suyu pompaj kuyularından çözülmüş fazda çıkarılabilir. * Eğer yeraltı suyu çözülmüş karbondioksit, eğer gerekirse pompalanarak buradan kaldırılabilir. Ardından yeraltı suyu direkt olarak kullanılabilir ya da yeraltına tekrar enjekte edilebilir. * Eğer metaller veya diğer iz kirlenimler yeraltı suyunun asitleşmesi ile meydana gelmişse, "pump-and-treat" metotları ile bunlar uzaklaştırılabilir. Alternatif olarak uygun olarak yerleştirilen enjeksiyon ve pompaj kuyuları ile kirlenimlerin hareketsizleştirilmesi ve zapt edilmesi için hidrolik bariyerler oluşturulabilir. İyileştirme çalışmalarının bu aktif metotlarına ek olarak, doğal biyolojik kimyasal işlemlere dayanan pasif metotlar da kullanılabilir.

Vadoz zona oluşun sızıntı ve toprak gazında birikimler(Looney ve Falta, 2000)	<p>* Karbondioksit vadoz zondan ve zemin gazından standart buhar çıkarma teknikleri ile çıkartılabilir.</p> <p>* Vadoz zondan zemin yüzeyine değışimler artabilir ya da örtü birimler veya buhar bariyerleri ile durabilir. Örtü biriminin ya da buhar bariyerinin altında pompalama, vadoz zondaki karbondioksit birikimlerinin tüketilmesi amacıyla yapılabilir.</p> <p>* Karbondioksit yoğun fazda olduğunda yerkabuğundaki çukurluklarda toplanabilir. Biriken gaz çukurluklardan pompalanıp atmosfere salınabilir ya da tekrar yeraltına enjekte edilebilir.</p> <p>* Sadece difüzyon ve "barometrik pompalama"ya dayanan pasif iyileştirme çalışmaları, karbondioksitin vadoz zona salınımlarını tüketmek için kullanılabilir. Bu metod, sürekli devam eden salınımların denetim altına alınması için etkili değildir, çünkü göreceli olarak yavaştır.</p> <p>* Toprağın karbondioksit ile temasından dolayı asitleşmesi, sulama ve drenaj ile iyileştirilebilir. Alternatif olarak kireç gibi tarımsal ilaveler toprağın nitrileşmesi için kullanılabilir.</p>
Atmosfere büyük miktarlarda karbondioksit salınımı	<p>* Bir yapının ve kapalı bir alanın içindeki salınımlarda, karbondioksitin hemen güvenli seviyelere seyreltilmesi için büyük fanlar kullanılabilir.</p> <p>* Büyük bir alanda yayılı büyük salınımlarda doğal atmosferik karışım (rüzgar)dan seyreltme, karbondioksitin seyreltilmesi için tek pratik metod olacaktır.</p> <p>* Kurulu bir alanda devam eden sızıntılarda, kapalı alanlarda veya çok düşük rüzgar periyodu sırasında yüksek karbondioksit konsantrasyonlarına maruz kalmanın tehlikeleri için; hava sirkülasyonu uygun dilüsyonu sağlayacak yeterlilikte tutmak için fanlar kullanılabilir.</p>
Krojenik düşük-seviye sızıntı ile bina ortamında karbondioksit birikimi	<p>* Yapılar içerisine yavaş salınımlar, inşaatlar içerisinde uçuşu organik bileşimlerin ve radon salınımlarının kontrolü için geliştirilmiş tekniklerin kullanılması ile arttırılabilir. Bir binada salınımların denetlenmesi için başlıca iki metod, bodrum/alyapı havalandırma veya basınç altında tutma şeklinde sıralanabilir. Bu metodların her ikisi de karbondioksitin bir bina içerisine girmesinden önce seyreltilmesini sağlar(Gadgil ve diğ., 1994; Fischer ve diğ., 1996).</p>
Yüzey suyunda birikme	<p>* Sığ yüzey su küleleri çözülmüş karbondioksiti atmosfere hızlıca salar.</p> <p>* Derin, stabil tabakalınlmış göllerde gaz birikimlerinin havalandırılması için aktif sistemler geliştirilmiş ve Kamerun'da Monoun ve Nyos Gölünde uygulanmıştır(http://perso.wanadoo.fr/mhalb/nyos/).</p>

Tablo 5.4 Karbondioksitin jeolojik depolama projeleri için iyileştirme seçenekleri(Benson ve Heple, 2005).

Treaty	Adoption (Signature)	Entry into Force	Number of Parties/Ratifications
UNFCCC	1992	1994	189
Kyoto Protocol (KP)	1997	2005	132 ^a
UNCLOS	1982	1994	145
London Convention (LC)	1972	1975	80
London Protocol (LP)	1996	No	20 ^a (26)
OSPAR	1992	1998	15
Basel Convention	1989	1992	162

NOT: ^a işareti, belirtilen antlaşmaya sonradan bazı ülkelerin katıldığını göstermektedir.

Tablo 5.5 Karbondioksitin jeolojik depolaması hakkında başlıca uluslar arası antlaşmalar

5.8 Jeolojik depolama maliyeti

Jeolojik depolama maliyeti nedir? Depolamayı sürdüren temel etkenlerin maliyeti nedir? Maliyet, gelişmiş petrol ve gaz üretimi ile düşürülebilir mi? Bu bölümde bu sorulara yanıt aranacaktır. Tutum, sıkıştırma ve sahaya nakil maliyeti, depolama maliyeti içerisine dahil edilmemiştir.

5.8.1 Jeolojik depolama için maliyet unsurları

Karbondioksit depolaması için en önemli maliyet kuyuların açılması, altyapı ve proje yönetimidir. Bazı depolama sahalarında merkezileştirilmiş tesislerden saha içindeki kuyulara karbondioksitin dağıtılması için boru hatları mevcut olabilir. Kurulması gerektiğinde depolama maliyeti hesaplamalarına dahil edilir. Gelişmiş petrol, gaz ve kömür yatağı metanı seçenekleri için ek tesislerin kurulması gerekebilir. Bazı sahalarda altyapı sisteminin ve kuyuların tekrar kullanımı maliyeti düşürebilir. Bazı sahalarda elverişli terkedilmiş kuyuların iyileştirme çalışmaları için ek maliyet gerekebilir. İşletme maliyetleri insan gücü, bakım ve yakıt masraflarını içerir. Saha seçimi için gerekli olan ruhsat alımı, jeolojik, jeofizik ve mühendislik açıdan denetleme çalışmaları, depolama başlamadan önce hazne çalışmaları maliyeti de, maliyet hesaplamalarına dahil edilir. Bock ve diğ., (2003), Amerika'daki tuz formasyonları, tükenmiş petrol ve gaz haznelerinde yapılacak depolama çalışmasının maliyetinin 1.685 US\$ olacağını hesaplamışlardır.

Depolamanın görüntülenmesi ek bir maliyet oluşturacaktır ve literatürde genellikle depolama maliyetinden ayrı olarak hesaplanır. Bu maliyet, düzenleme gereksinimlerine ve monitörleme süresine göre değişken olacaktır. Uzun vadede engeller ve iyileştirme çalışmaları için de ayrı bir maliyet oluşabilir.

Karbondioksitin jeolojik depolama maliyeti, bölgeye özgü olarak değişkenlik gösterir. Maliyetler depolama seçeneği (örn, petrol veya gaz haznesi, tuz formasyonu), lokasyon, derinlik, depolama haznesi formasyonunun özellikleri, herhangi satılabilir bir ürünün karı ve fiyatına bağlı olarak değişir. Karada yapılan depolama faaliyetinin maliyeti lokasyon, arazi ve diğer coğrafi faktörlere bağlıdır. Denizde yapılan depolamada ünite maliyeti, platform veya deniz tabanı altındaki faaliyetler ve daha yüksek işletme maliyetine bağlı olarak, karada yapılandan daha maliyetli olacaktır ki bu da, Avrupa'da(Hendriks ve diğ., 2002) ve Avustralya'da(Allinson ve diğ., 2003) yapılan ayrı çalışmalarda gösterilmiştir. Depolama için gereken ekipman ve teknoloji maliyeti geniş bir ölçüde enerji endüstrisinde kullanılmaktadır ve bundan dolayı daha sağlıklı bir biçimde hesaplanabilir.

5.8.2 Maliyet hesaplamaları

Amerika, Avustralya ve Avrupa için depolama maliyetlerine yönelik kapsamlı değerlendirmeler mevcuttur(Hendriks ve diğ., 2002; Allinson ve diğ., 2003; Bock ve diğ., 2003). Bu değerlendirmeler, bölgeleri temsil eden jeolojik özelliklere dayanmaktadır. Bazı

durumlarda maliyet hesaplamalarında sıkıştırma ve boru hattı masrafları dahil edilmiş ve depolama maliyetini çıkarmak için düzeltmeler yapılmıştır. Bu hesaplamalar sermaye, işletme ve bölge nitelme maliyetlerini içermektedir ancak monitörleme, iyileştirme çalışmaları ve diğer ek maliyetler dahil edilmemiştir.

Depolama seçeneğinin tipi, derinliği ve jeolojik özellikler, tesislerin maliyetini etkilediği gibi kuyu sayısı, kuyuların arasındaki mesafe ve kuyu masraflarını da etkiler. Kuyu ve sıkıştırma maliyeti, derinlikle orantılı olarak artar. Kuyunun maliyeti önemli bir unsurdur; özel kuyuların açılması karada yaklaşık 200,000 US\$ (bock ve diğ., 2003) ve denizde yatay kuyuların açılması 25 milyon US\$ bulan bir maliyettir(Tablo 5.6; Kaarstad, 2002). Derinlikle artan depolama maliyeti, Hendrisk ve diğ., (2002) tarafından ortaya konmuştur. Enjeksiyon sahasının jeolojik özellikleri, maliyeti belirleyen diğer bir unsurdur. Hazne kalınlığı, permeabilite ve karbondioksit enjeksiyonunun hız ve miktarını etkileyen sahanın etkili çapı ve dolayısıyla gerekli olan kuyu sayısı, maliyeti etkileyen diğer unsurlardır. Tutum maliyeti düşürülebilse de, karbondioksit ile birlikte diğer gazların (NO_x, SO_x, H₂S) enjekte edilmesi, bu gazların aşındırıcı ve tehlikeli özelliklerinden dolayı maliyeti arttıran faktörlerdir(Allinson ve diğ., 2003).

Proje	Sleipner	Snohvit
Ülke	Norveç	Norveç
Başlangıç yılı	1996	2006
Depolama türü	Akifer	Akifer
Yıllık karbondioksit depolama hızı (MtCO ₂ yr ⁻¹)	1	0.7
Kara/deniz	Deniz	Deniz
Kuyu sayısı	1	1
Boru hattı uzunluğu (km)	0	160
SERMAYE YATIRIM MALİYETLERİ (US\$ MİLYON)		
Tutum ve nakil	79	143
Sıkıştırma ve dehidrasyon	79	70
Boru hattı	none	73
Depolama	15	48
Sondaj ve kuyu kapatma	15	25
Tesisler	*	12
Diğer	*	11
Toplam sermaye yatırım maliyeti (US\$ milyon)	94	191
İŞLETME MALİYETLERİ (US\$ MİLYON)		
Yakıt ve karbondioksit vergisi	7	
Referanslar	Torp and Brown, 2005	Kaarstad, 2002

Tablo 5.6 Karbondioksit depolama projeleri endüstrisi için yatırım maliyetleri

NOT: ^a Hiçbir çalışılmış rakam mevcut değildir.

5.8.3 Karbondioksitin jeolojik depolaması için maliyet hesaplamaları

5.8.3.1 Tuz formasyonları

Allinson ve diğ., (2003) tarafından Avustralya'nın 50 farklı bölgesi için yapılan depolama maliyeti çalışmasında, ulusal veya bölgesel ölçekteki bir seri sahalarda maliyetin değişkenlik gösterdiği ortaya konulmuştur. Karadaki 20 sahada yapılan maliyet çalışmasında, 0.2-5.1 US\$/tCO₂ arasında değişmekle beraber, ortalama 0.5 US\$/tCO₂ olduğu belirtilmiştir. Denizdeki 37 saha için maliyetin 0.5-30.2 US\$/tCO₂ arasında değişmekle beraber ortalama 3.4 US\$/tCO₂ olduğu belirtilmiştir. Bu incelemede "Monte Carlo" denilen maliyet hesaplama analizleri kullanılarak hassas bir çalışma yapılmıştır. Depolama maliyetini esas olarak belirleyen, depolama tipinden ziyade enjeksiyon ve kuyu masraflarını etkileyecek olan permeabilite, kalınlık ve hazne derinliği gibi hazne ve enjeksiyon özellikleri olur.

Bock ve diğ., (2003), Amerika'da karadaki tuz formasyonları üzerine depolama için bir seri maliyet hesaplamaları yapmışlardır. 20'den fazla sayıdaki formasyonların istatistiksel incelemeler ile jeolojik özelliklerini saptamışlardır. Bu formasyonlar farklı derinlik (700-1800 m), kalınlık, permeabilite, enjeksiyon oranı ve kuyu sayıları içermektedir. Bu özelliklerden edinilen ortalama bir maliyet verisinde, 0.5 US\$/tCO₂ depolama maliyeti elde edilmiştir. Farklı formasyon türü ile girdi parametrelerinin sonucunda elde edilen en yüksek ve en düşük maliyet, 0.4-4.5 US\$/tCO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, girdi parametrelerinden ortaya çıkan değişkenliği göstermektedir.

Avrupa'da karadaki tuz formasyonları için yapılan depolama maliyeti çalışmasında, 1000-3000 m derinliklerde 1.9-6.2 US\$/tCO₂ arasında değiştiği ve ortalama olarak 2.8 US\$/tCO₂ olduğu belirtilmiştir(Hendriks ve diğ., 2002). Bu çalışma ayrıca aynı derinlik aralığında denizdeki depolama için hesaplanan maliyeti de ortaya koymuştur. Bu hesaplamalar, mevcut petrol ve gaz platformlarının tekrar kullanımını da kapsar(Hendriks ve diğ., 2002). Denizdeki depolama maliyetinin karadan daha fazla olduğunu belirtecek şekilde, bu depolama maliyeti 4.7-12.0 US\$/tCO₂(depolanan karbondioksit) aralığında değişmektedir.

5.8.3.2 İşletmesi bitmiş petrol ve gaz hazneleri

Kuzey Amerika ile Avrupa'daki işletilmeyen petrol ve gaz haznelerinin depolama maliyetinin, tuz formasyonlarındaki depolama maliyetine yakın olduğu belirtilmiştir(Hendriks ve diğ., 2002; Bock ve diğ., 2003). Bock ve diğ., (2003), örnek olarak Permian Havzası'nda (Batı Teksas, USA) işletilmeyen petrol ve gaz haznelerinin maliyetini çalışmıştır. İşletilmeyen

gaz sahası için en düşük 0.5 US\$/tCO₂ ve en yüksek 12.2 US\$/tCO₂ maliyeti arasında ortalama 2.4 US\$/tCO₂ depolama maliyetinin olacağını hesaplamıştır. Tüketilmiş petrol havzaları için en düşük 0.5 US\$/tCO₂ ile en yüksek 4.0 US\$/tCO₂ arasında ortalama 1.3 US\$/tCO₂ depolama maliyetinin olacağını belirtmiştir. Bu arazideki mevcut kuyuların tekrar kullanılması ile maliyette bazı düşüşler yapılabilir ancak eğer gerekli ise terkedilmiş kuyuların iyileştirme çalışmaları da maliyeti arttıracaktır.

Avrupa'da karadaki 1000-3000 m derinlikteki işletilmeyen petrol ve gaz sahalarının depolama maliyetleri 1.2-3.8 US\$/tCO₂ arasında değişmektedir. Ortalama değer 1.7 US\$/tCO₂ olmaktadır. Denizde aynı derinlikteki petrol ve gaz sahalarının depolama maliyeti, 3.8-8.1 US\$/tCO₂ arasında değişmektedir(ortalama 6.0 US\$/t depolananaCO₂). Maliyetler, haznenin derinliğine ve mevcut platformların tekrar kullanımına bağlı olarak değişir. İşletmesi bitmiş arazilerde keşif ve monitörleme maliyetlerinin düşmesi ile kara geçilebilir.

5.8.4 Gelişmiş petrol ve gaz kurtarımı ile depolama için maliyet hesaplamaları

Karbondiyoksit enjeksiyon ve depolamasının gelişmiş petrol veya gaz kurtarımı ya da ECBM ile birlikte işletilmesi, petrol veya gaz üretiminden ek gelir elde edilmesinden dolayı karbondiyoksitin jeolojik depolama maliyetini düşürebilir. Günümüzde karbondiyoksit enjeksiyonunu kullanan ticari EOR ve ECBM projeleri için karbondiyoksit satın alınır. Satın alınan karbondiyoksit, işletme maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturur. Gelişmiş üretimden edilen ekonomik kazanç, EOR ve ECBM projelerini karbondiyoksitin jeolojik depolaması için potansiyel olarak öncelikli tercih seçeneği durumuna getirir.

5.8.4.1 Gelişmiş petrol kurtarımı

Karbondiyoksit EOR projeleri, petrol kazanımını arttırmaya yönelik ticari bir girişimdir. Bu projelerde karbondiyoksit enjekte edilip depolansa da, öncelikli amaç karbondiyoksitin depolanması değildir ve EOR projeleri karbondiyoksit depolaması için tasarlanmaz.

CO₂-EOR işletmelerinin ticari dayanağı, artan petrol üretiminden elde edilen gelirin ek maliyetleri (CO₂ satın alınması dahil) karşılayarak kazanç sağlanmasıdır. Maliyetler projenin tipine göre değişir. Sermaye yatırımı kompresörler, ayırıştırma ekipmanı ve H₂S uzaklaştırma, kuyu açılması ve kuyu dönüşümleri ile kapatılmasına yöneliktir. İşletme maliyeti

karbondioksitin satın alınması, yakıt masrafları ve arazi işletme maliyetleri şeklinde sıralanabilir.

Tektaş'ta karbondioksit satın alma maliyeti, bir çok EOR arazileri için toplam maliyetin %55-75 arasını teşkil eder(ortalama %68). Vergi ve mali dürtüler, yasal yönetmelikler, petrol ve gaz fiyatları, karbondioksit maliyeti ile beraber EOR için yatırım belirsizliklerini teşkil eder(örn, Jarrel ve diğ., 2002).

Karbondioksit fiyatları genellikle petrol fiyatlarına endekslidir. Örneğin, Batı Tektaş'ta petrol varil fiyatı 18 US\$ iken 11.7 US\$/tCO₂, 25 US\$ petrol varil fiyatında 16.3 US\$/tCO₂ ve 50 US\$ petrol varil fiyatı için 32.7 US\$/tCO₂ civarında değişmektedir(Jarrel ve diğ., 2002). Satın alınan karbondioksitin fiyatı, karbondioksitin depolama maliyetini düşürmeye yönelik bir EOR projesi için kazanç ölçüsünü gösterir.

5.8.4.2 Gelişmiş gaz kurtarımı ile karbondioksit depolamasının maliyeti

Yapılan son çalışmalarda EOR proje sahalarında karbondioksitin depolama maliyeti hesaplanmıştır(Bock ve diğ., 2003; Hendriks ve diğ., 2002). Kuzey Amerika'da karada işletilen EOR seçenekleri için karbondioksit depolamasının maliyet hesaplamaları Bock ve diğ., (2003) tarafından yapılmıştır. 2 MtCO₂/yıl depolaması senaryosu için yapılan bu hesaplamalar, mevcut EOR işletmeleri ve endüstri maliyet verilerinden edinilen bazı parametrelere ve varsayımlara dayanmaktadır. Her bir ilave petrol varili için enjekte edilen karbondioksit açısından CO₂-EOR işletmesinin etkililik maliyetleri de hesaplamalara dahil edilmiştir. Depolama maliyetlerinin bu hesaplamalarına yönelik metodoloji, karbondioksit fiyatlarının karşılanmasını planlamaktır.

Kuzey Amerika'daki arazi işletmelerinden elde edilen tecrübe, EOR işletmesi sırasında enjekte karbondioksitin ne kadarının petrol haznesinde kalacağı hakkında bilgi sağlar. Gelişmiş petrol üretiminin her bir varili için 85(0.15 tCO₂)-227(0.4 tCO₂) standart metreküp arasında ortalama 170 m³ CO₂ gereklidir(Bock ve diğ., 2003). Üretilen karbondioksit petrolden ayrıştırılarak, satın alınan karbondioksit maliyetini düşürecek şekilde tekrar yeraltına enjekte edilir.

1219 m derinlikteki bir hazne için, 15US\$ petrol varil fiyatı ile Amerika'daki ortalama EOR parametrelerine dayanarak, 14.8 US\$/tCO₂(depolanan) net depolama maliyeti hesaplanmıştır. Negatif maliyet, belirli bir depolama seçeneğinin tüm tutum ve depolama sistemine sunduğu maliyet indirim miktarını gösterir. Karbondioksit etkililiği, derinlik, nakil uzaklığı ve petrol fiyatına bağlı olarak en düşük ve en yüksek maliyet, -92.0 ile +66.7

US\$/tCO₂(depolanan) arasındadır. En düşük maliyet 20 US\$ petrol varil fiyatı ve tüm parametrelerde (etkililik, hazne derinliği, verimlilik) en uygun varsayımlar için hesaplanmıştır. 2005 yılının 50 US\$ petrol varil fiyatı (USA) gibi daha yüksek petrol fiyatları, CO₂-EOR projelerinin ekonomisini oldukça değiştirecektir. Bu yüksek petrol fiyatları için henüz yayınlanmış hiçbir çalışma bulunmamaktadır.

5.8.4.3 Gelişmiş gaz kurtarımı ile karbondioksit depolaması maliyeti

CO₂-Gelişmiş gaz kurtarımı, EOR işletmelerinden daha az gelişmiş teknolojiye sahiptir ve henüz ticari anlamda kullanılmamaktadır. Yapılan maliyet çalışmalarında CO₂-EGR (gelişmiş gaz kurtarımı) işletmesinin gaz fiyatı ve kurtarım etkililiğine bağlı olarak 4-16 US\$/tCO₂ bir kazanç sağlayabileceği hesaplanmıştır.

5.8.4.4 Gelişmiş kömür yatağı metan gazı ile karbondioksit depolaması maliyeti

ECBM (gelişmiş kömür yatağı metan gazı) üretimi için karbondioksit enjeksiyonu, henüz ticari kullanımda yaygın olmayan bir teknolojiye sahiptir. CO₂-ECBM işletmesinde üretilen gazdan elde edilen kazanç, yatırım maliyetini düşürebilir ve yatırımcılar için bir gelir kaynağı sağlayabilir. Maliyet verileri kullanımda olan CBM işletmelerinin diğer tiplerine dayandırılarak yapılmıştır.

ECBM ile beraber kömür yatağında karbondioksit depolamasının etkililiği üzerine halen önemli belirsizlikler vardır. Çünkü bunun üzerine ticari deneyim mevcut değildir. Karbondioksit zaptı için önerilen metrik, üretilen her metreküp metan gazı hacmi için 1.5-10 m³ CO₂ civarındadır. Gelişmiş üretimin gelir kazancı, gaz fiyatlarına bağlı olarak değişir.

ECBM işletmelerinde kuyu maliyetleri önemli bir etkidir. Çünkü çok sayıda kuyu açılması gerekir. Bir ECBM projesi için yapılan çalışmada (Schreurs, 2002), her bir üretim kuyusu için maliyet yaklaşık olarak 750,000US\$ olarak hesaplanmıştır. Kömür tabakasının delinmesi için ayrıca 1500 US\$/m, bu hesaba dahil edilmelidir. Her bir enjeksiyon kuyusunun maliyeti yaklaşık olarak 430,000US\$ olarak hesaplanmıştır.

Bugüne kadar endüstriyel ölçekte sadece bir CO₂-ECBM deneme projesi işletilmiştir; Amerika'daki Allison projesinde karbondioksit enjeksiyonu artık yapılmamaktadır. Allison projesinin yapılan bir analizinde belirtildiği üzere, sahanın son derece elverişli jeolojik özellikleri göstermesine rağmen, mevcut mali koşullar ve gaz fiyatları altında Amerika'da ECBM işletmeleri ekonomisine şüpheli yaklaşılmaktadır(IEA-GHG, 2004).

5.8.5 Monitörleme maliyeti

Literatürde ve uygulanabilir teknolojiye muhtemel monitörleme stratejileri için geniş tartışmalar olmakla beraber, monitörleme maliyeti üzerine sınırlı bilgi mevcuttur. Maliyet, kullanılan monitörleme stratejisi ve teknolojilerine, ve bunların depolama projesi süresince nasıl uyarlanacağına bağlı olarak değişir. Kullanılması muhtemel teknolojilerin bazıları petrol, gaz ve CBM endüstrisinde yaygın olarak bulunmaktadır.

Sismik incelemelerin tekrarlanan kullanımı, Sleipner’de etkili görüntüleme teknolojisi olarak ortaya atılmıştır. Bunun uygulanabilirliği, depolama seçenekleri ve sahaları arasında farklılık gösterecektir. Sismik inceleme maliyetleri kullanılan teknoloji, arazi ve karmaşıklığa bağlı olarak oldukça değişkenlik gösterir. Karadaki bir depolama projesinde 30 yıl çalışma ömrüne sahip bir 1000 MW’lık elektrik santrali için sismik monitörleme maliyeti hesaplanmıştır(Myer ve diğ., 2003). Enjeksiyon süresi boyunca 5 yıl aralıklarla incelemelerin tekrarlandığı varsayılarak monitörleme maliyetinin 0.03 US\$/tCO₂ olacağı saptanmıştır ki bu miktar, tüm depolama maliyetinin çok küçük bir bölümünü oluşturur.

5.8.6 Sızıntı oluşan depolama projelerinin iyileştirme maliyeti

Sızıntı meydana gelen depolama projelerinin iyileştirme çalışmaları için henüz hiçbir maliyet çalışması yapılmamıştır. Diğer uygulamalarda kullanılan iyileştirme çalışmaları Tablo 5.4’te sıralanmıştır.

5.9 Karbondioksit depolaması üzerine görüş ayrılıkları

Karbondioksit depolaması yeni bir teknoloji uygulamasıdır ve bununla ilgili cevaplanmamış bir çok soru bulunmaktadır. Bu kısımda hangi konuların iyi bilindiği ve hangi konularda veri eksikliğinin bulunduğu özetlenmiştir.

1. Bilinen depolama kapasitesi hesaplamaları eksiktir:

- Değerlendirme metodolojileri üzerinde daha fazla gelişime ihtiyaç vardır.
- Global, bölgesel ve lokal ölçülerde kapasite hesaplamalarında bir çok görüş ayrılıkları mevcuttur.
- Jeolojik depolama için mevcut veri tabanı Avustralya, Japonya, Kuzey Amerika ve Batı Avrupa verilerine dayanmaktadır.

- Diğer bölgelerde depolama kapasitesi üzerine daha fazla veri sağlanması gereklidir. Bu bölgeler Çin, Güneydoğu Asya, Hindistan, Rusya, Doğu Avrupa, Ortadoğu, Kuzey ve Güney Afrika'nın belirli yerleri gibi enerji kullanımında gelişme gösteren bölgelerdir.

2. Genelde depolama bilimi anlaşılmıştır, ancak belirli mekanizmalar için daha fazla bilgiye gereksinim vardır. Bu mekanizmalar:

- Jeokimyasal kapan kinetiği ve karbondioksitin uzun vadede hazne akışkanları ve kayaçları üzerine etkisi.
- Depolama faaliyeti boyunca karbondioksit adsorpsiyonunun ve CH₄ desorpsiyonunun esas işlemleri.

3. Petrol ve gaz endüstrisindeki benzer işletmelerden edinilen mevcut bilgiler, uygun özellikteki ve iyi tanımlanmış bir sahada jeolojik depolama işletmelerinin sağlık ve lokal çevre için büyük tehlikeler oluşturmadan yürütülebileceğini göstermektedir. Ancak bilgilerin ve değerlendirme becerisinin artırılması ile daha fazla güven sağlanacaktır. Bunun için gerekli veriler:

- Terkedilmiş kuyulardan materyal ve çimento bozunması ile oluşacak sızıntı tehlikeleri.
- Elverişsiz depolama sahalarında oluşabilecek sızıntıların zamansal değişkenliği ve uzaysal dağılımı.
- Derin yeraltında mikrobiyel etkiler.
- Karbondioksitin deniz tabanındaki çevresel etkileri.
- İnsan sağlığına ve lokal çevreye oluşacak risklerin nicel değerlendirme metotları.

4. Karbondioksit depolamasının jeolojik depolama sahalarında uzun vadeli olacağına dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır. Ancak bazı bilgilerin de edinilmesi faydalı olur:

- Daha fazla depolama sahalarında muhtemel sızıntı oranlarının ölçümü.
- Uzun vadede depolama davranışını kesin olarak önceden bilmek için güvenilir hidrojeolojik-jeokimyasal-jeomekanik simülasyon modelleri.
- Depolama sahalarında oluşacak sızıntı oranlarını önceden bilmek için güvenilir olasılık metotları.
- Doğal karbondioksit birikimlerinin tarihçesi hakkında daha fazla bilgi.
- İstenilen depolama süresini ve lokal güvenliğini sağlamak için etkili ve ispat protokolleri.

5. *Karbondioksitin yüzeyde veya yeraltında davranışını saptamaya yönelik monitörleme teknolojisi mevcuttur. Ancak bazı konularda ilerleme kaydedilmesi gereklidir:*

- Jeofiziksel teknikler ile yerkabuğundaki karbondioksitin ölçümü.
- Su altında karbondioksit sızıntısının bulunması ve monitörlenmesi.
- Özellikle dağılmış sızıntılarda, geçici olarak değişken sızıntı bulma ve ölçümü için uzaktan algılama ve ekonomik yüzey metotları.
- Sızıntı potansiyeli bulunduran kırıkların bulunması ve karakterizasyonu.
- Uzun vadeli uygun monitörleme yaklaşım ve stratejilerinin geliştirilmesi.

6. *Sızıntı karbondioksit için önleme ve iyileştirme seçenekleri ile teknolojileri mevcut iken, hiçbir örnek iyileştirme kaydı bulunmamaktadır. Bu çalışmalar mümkün görünse de, tecrübe edinmek amacıyla bir sızıntı olayının çalışılıp kontrol edilmesi faydalı olabilir.*

7. *Jeolojik depolamanın olası maliyeti oldukça iyi anlaşılmıştır. Ancak:*

- EOR işletmesi bulundurmayan CO₂ depolama projesine ait çok az tecrübeye dayalı bilgiler bulunmaktadır.
- Düzenlemelere uyum maliyetine yönelik az bir bilgi mevcuttur.
- Maliyeti etkileyen monitörleme stratejileri ve gereksinimleri hakkında yetersiz bilgi mevcuttur.

8. *Karbondioksit depolaması için düzenleme ve sorumluluk çatısı henüz oluşturulmaktadır ve henüz açık değildir. Aşağıdaki sorunların ele alınması gerekir:*

- Pilot ve deneme projelerinin geliştirilen düzenlemelerde rolü.
- Mali amaçlara yönelik karbondioksit depolama verifikasyonu yaklaşımları.
- Uzun vadede depolama için kullanılacak gemilere yönelik gereksinim ve yöntemler üzerine anlaşılabilirlik.
- Depolama projesinin gereksinimleri.

Tüm bu konulardaki ek bilgiler teknolojileri arttıracak ve belirsizlikleri azaltacaktır. Bununla birlikte jeolojik depolamanın bir önlem seçeneği olarak kavranmasına aşılmaz hiçbir teknik engelin bulunmadığı düşünülmektedir.