

İŞLETİLEMİYEN KÖMÜR DAMARLARINDA KARBONDİOKSİTİN DEPOLANMASI

Carbon Dioxide Storage at Unminable Coal Seams

Geliş (received) 28 Ağustos (August) 2009; Kabul (accepted) 29 Ekim (Octoberber) 2009

Gökhan AYDIN (*)
İzzet KARAKURT (**)
Kerim AYDINER (**)

ÖZET

Endüstrileşme ve artan nüfus günümüzde bir sera gazı olan karbondioksitin atmosferdeki oranının yüksek seviyelere ulaşmasına neden olmaktadır. Tahminler gelecekte de artmasını öngörmektedir. Karbondioksitin küresel ısınma üzerindeki etkisinin azaltılabilmesi ve fosil yakıtların çevreye dost bir şekilde kullanılabilmesi karbondioksitin çeşitli ortamlarda depolanabilmesi ile mümkün olabilecektir. Bu alanlar petrol ve gaz sahaları, işletilemeyen kömür damarları, akiferler ve okyanuslardan oluşmaktadır. Baca gazları, çoğunlukla düşük oranlarda karbondioksit içeren bir atık gaz olarak açığa çıkmaktadır. Baca gazı içeriğindeki karbondioksit yanma öncesinde ve yanma sonrasında çeşitli teknolojiler kullanılarak tutulabilmektedir. Elde edilen karbondioksit tanklar, boru hatları ve gemiler kullanılarak depolama sahasına ulaştırılabilmektedir.

Bazı kömür damarları çok derinlerde olmalarından ya da ince damarlar halinde bulunmalarından dolayı işletilememektedirler. Bu kömür damarlarına enjekte edilen karbondioksit kömür matrisinde adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yer değiştirerek depolanmakta ve metanın üretilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada karbondioksitin işletilemeyen kömür damarlarında depolanması uygulaması tartışılmaktadır. Bu bağlamda kömürde karbondioksit depolama mekanizması, depolamada etkin rol oynayan kömür özellikleri, depolama maliyeti ve emniyeti değerlendirilmiş ve uygulama diğer depolama seçenekleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sera gazı, Karbondioksit Depolama, Kömür, Seçimli Adsorpsiyon, Desorpsiyon

ABSTRACT

Industrialization and increasing population have nowadays resulted in higher levels of concentration of CO₂, a greenhouse gas, in the atmosphere. Estimations anticipated that the concentration of CO₂ will keep increasing in the future. Being able to decrease the effect of CO₂ on global warming and to use fossil fuels in an environmentally friendly way can be possible with the storage of CO₂ at various media. These media consist of oil and gas basins, unminable coal seams, aquifers and oceans. Flue gases are released often as waste gases containing low concentrations of CO₂. Carbon dioxide in flue gas could be captured using various technologies in pre- and post-combustion stages. Captured CO₂ can be transported to the storage field by pipelines, tanks and ships.

Some coal seams can not be mined because of being very thin and too deep. CO₂, injected into these coal seams, is stored by replacing the methane absorbed in the coal matrix and provides methane production. In this study, the storage of carbon dioxide in unminable coal seams is discussed. In this sense, carbon dioxide storage mechanisms in coal, coal properties controlling the storage behavior, storage cost and safety are considered and the application is compared with other storage options.

Keywords: Greenhouse Gas, Carbon Dioxide Storage, Coal, Selective Adsorption, Desorption

(*) Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh., Böl., TRABZON, gaydin@ktu.edu.tr

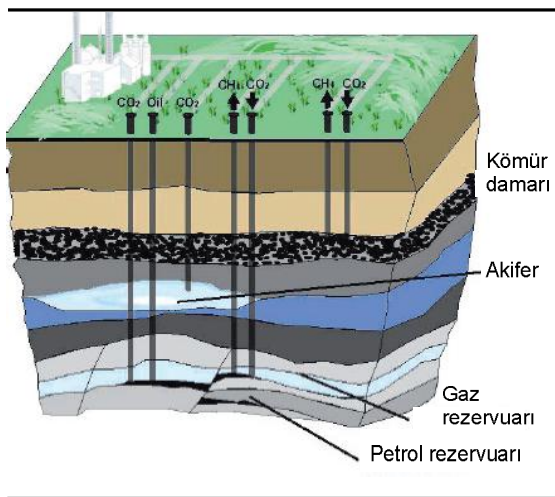
(**) Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh., Böl., TRABZON

(***) Yard.Doç.Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh., Böl., TRABZON

1. GİRİŞ

Tahminler dünya enerji ihtiyacının gelecek uzun yıllarda da önemli oranda fosil yakıtlara dayanacağını göstermektedir. Ancak fosil yakıtların kullanımı atmosferdeki karbondioksit oranını artırmaktadır. Bir sera gazı olan karbondioksitin sera etkisi %50 olarak tahmin edilmektedir (Benson, 2009). Küresel ısınmaya katkıda bulunan diğer gazlar nitrik oksit, Kloroflorokarbonlar (CFCs), metan ve ozondur. Fosil yakıtlar karbondioksit üretiminin % 73'ünden sorumludur. Diğer büyük kaynak ise ormansızlaştırmadır (%25) (Wildenborg ve Lokhorst, 2005). Geçen yüzyıllardan bu yana atmosferdeki karbondioksit oranı sürekli bir şekilde artmıştır. Sanayi öncesi dönemde oranı 280 ppm olan gaz günümüzde 370 ppm'e kadar yükselmiştir. Bu gün 20 milyon tonun üzerinde karbondioksit yıllık olarak atmosfere salınmaktadır (Bachu, 2008; Benson, 2009).

Atmosfere karışan CO₂ konsantrasyonun azaltılması/önlenmesi bir öncelik durumundadır. Bu amaçla üretilen ve atmosfere karışacak CO₂'in kaynağında ya da atmosferden tutulması ve bir depolama ortamında depolanması gereklidir. Bu ortamlar petrol ve gaz sahaları, işletilemeyen kömür damarları, akiferler gibi jeolojik formasyonlar ile okyanuslardan oluşmaktadır. Bu bağlamda karbondioksit emisyonlarını yutan bir rezervuar tipinin bulunması, fosil yakıtların çevreye zarar vermeden güvenli şekilde kullanımı konusundaki umutları artırmaktadır.



Şekil 1. CO₂ depolama seçenekleri (Anon, 2009).

Aşağıda depolama seçenekleri hakkında kısa bilgiler sunulmuştur.

Petrol ve doğal gaz sahaları: Petrol ve doğal gaz sahalarında karbondioksitin iki değişik şekilde depolanması söz konusudur. Bunlardan ilki üretimin sona erdiği veya sona ermek üzere olduğu rezervuarlarda karbondioksitin depolanması diğeri ise tükenmiş petrol ve doğal gaz sahalarında karbondioksitin depolanmasıdır. Geleneksel petrol üretim yönteminde yapılan sondajlarla petrol içeren tabakaya girilmekte ve sondaj kuyusunun boşluğuna akan petrol pompalanarak yeryüzüne çıkarılmaktadır. Ancak, bu yöntemle petrolün belli bir kısmı üretilebilmektedir. Yapılacak CO₂ enjeksiyonu, rezervde kalan petrol ya da gazın bir miktarının daha üretilmesini sağlamaktadır. Rezervuara enjekte edilen karbondioksit ham petrol ile karışarak petrolün viskozitesini azaltmakta ve petrolü hareketlendirmektedir. Gaz aynı zamanda rezervuar basıncının sürekli tutulmasını ya da artırılmasını da sağlamaktadır. Artan basıncın etkisiyle formasyonda bulunan petrol üretim kuyularına yönlendirilerek üretilebilmektedir. Üretim sonrasında rezervuar içerisinde belirli bir kısmı depolanabilmektedir. Kalan miktar ise üretim kuyusundan emilerek tekrar rezervuar içerisine gönderilmekte ve sistem bu şekilde devam ettirilmektedir. (Meer, 2005; Ravagnani vd, 2009)

İşletilemeyen yeraltı kömür damarları: Bazı durumlarda çok derinlerde yerleşmiş ya da ince damarların üretimi teknolojik olarak mümkün olamaz. Bu damarlar CO₂'nin depolanması için bir seçenek olmaktadır. Bu damarlara enjekte edilen CO₂ kömür matrisinde adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yer değiştirerek karbondioksitin depolanmasını ve metanın üretilmesini sağlar (Shi ve Durucan, 2005b; Zarrouk ve Moore, 2009).

Akiferler: Akiferler, içerisinde endüstri ya da tarımsal faaliyetlerin kullanımına uygun olmayan çözünmüş bileşenler bulunan ve önemli miktarlarda su iletimini sağlamak için yeterli gözenekli ve geçirgenliği olan jeolojik formasyonlardır. Akiferler, tuzlu su ya da formasyon suyu olarak da adlandırılabilirler (Meer, 2005). Kuyu vasıtasıyla akifere enjekte edilen CO₂, formasyon suyundan daha az yoğunluk ve viskoziteye sahip olduğundan değişen basıncın da etkisiyle kuyudan uzaklaşarak akifer içerisine

yayılır (Nordbotten vd, 2005; Zhang, 2009; Qi, 2009).

Okyanuslar: Bir diğer depolama alternatifi; tutulan karbondioksitin doğrudan derin okyanuslarda 1000 metrenin üzerinde derinliklere basılmasıdır. Karbondioksit su sütununun altına veya deniz tabanına enjekte edilerek depolanabilmektedir. Eriyen veya dağılan karbondioksit, global karbondioksit çevriminin bir parçası haline gelir (Herzog, 2009).

Bu çalışmada, işletilemeyen kömür damarlarında karbondioksitin depolanması yöntemi tartışılmaktadır. Depolanma mekanizması, depolama maliyeti, kömür damarına gazın enjeksiyonu, depolamada etkin rol oynayan kömür özellikleri ve depolama güvenliği faktörleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, uygulamanın alternatif yöntemlerle bir karşılaştırması da yapılmıştır.

2. KARBONDİOKSİTİN TUTULMASI

Baca gazları, çoğunlukla yüksek oranlarda nitrojen ve düşük oranlarda (% 5-15) karbondioksit içeren bir atık gaz olarak termik santrallerden ve diğer yanma kaynaklarından açığa çıkmaktadır. Baca gazı içerisindeki karbondioksitin yeraltında depolanabilmesi için diğer gazlardan arındırılması gerekmektedir. Baca gazındaki karbondioksitin oranının düşük olmasından dolayı (Çizelge 1) ayrıştırma işlemi oldukça pahalıdır ve büyük çaplı yüzey tesislerine ve fazla miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyar (Benson, 2009). Karbondioksit tutmanın amacı, yüksek basınçta ve yüksek konsantrasyonda bir karbondioksit akışı elde etmektir.

Çizelge 1 çeşitli kaynaklardan açığa çıkan baca gazlarının içerdiği karbondioksit miktarlarını, baca gazının basıncını ve karbondioksitin kısmi basıncını içermektedir. Karbondioksit tutmada baca gazı içerisindeki karbondioksitin kısmi basıncı en az konsantrasyonu kadar önemlidir. Karbondioksitin kısmi basıncı tutma yöntemi seçiminde en etkin parametredir. Ek olarak baca gazı içerisindeki karbondioksitin kısmi basıncının düşük olması maliyetleri arttırmakta ve işlemlerin daha da karmaşık olmasına yol açmaktadır (Dooley vd., 2006; IPCC, 2001 ; IEA, 2004).

Fosil yakıt ve biyokütle kullanılmasına bağlı olarak açığa çıkan karbondioksit emisyonlarının tutulmasında kullanılan temel sistemler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

2.1 Yanma öncesi karbondioksitin tutulması

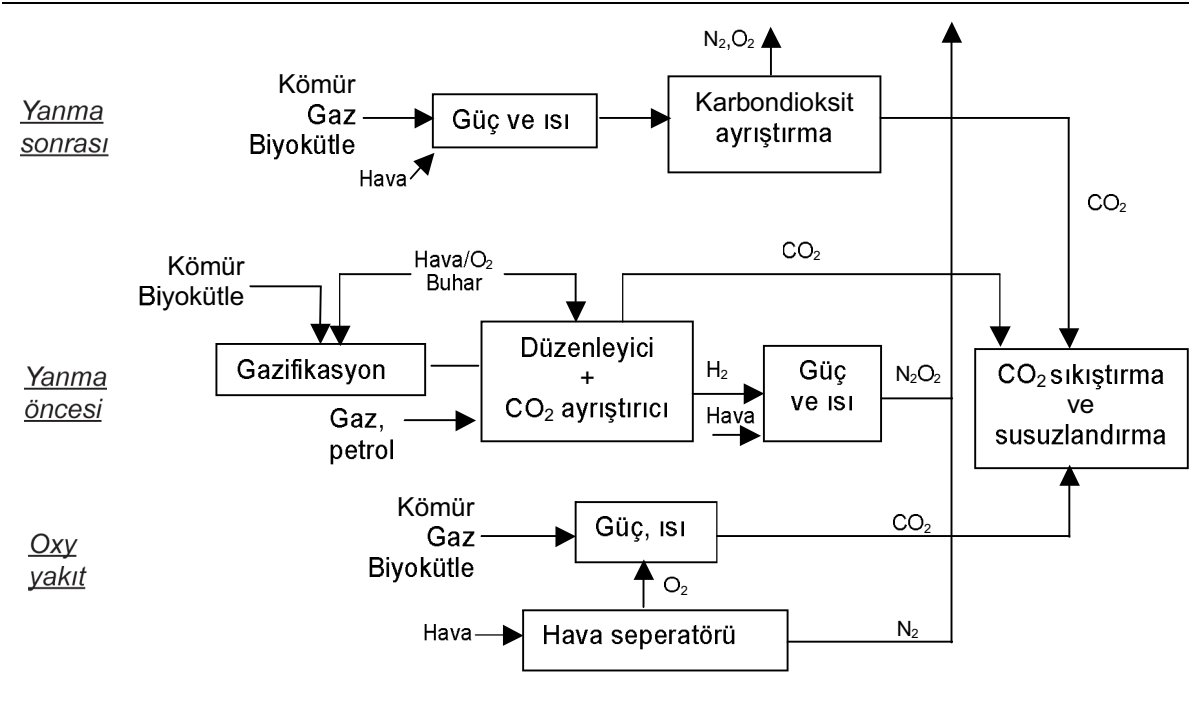
Bu proseste yakıt bir reaktör içerisinde buhar, hava veya oksijenle işleme tabi tutulmakta ve büyük ölçüde hidrojen ve karbon monoksitten oluşan bir karışım (sentetik gaz) elde edilmektedir. Bir başka reaktörde ise karbonmonoksit, buharla reaksiyona sokularak ilave hidrojenle birlikte karbondioksit elde edilmektedir. Bu karışımda hidrojen ve karbondioksit ayrıştırılmaktadır (Başaran, 2006).

2.2 Yanma sonrası karbondioksitin tutulması

Fosil yakıtların ve biyokütlelerin yakılması sonucu açığa çıkan baca gazından karbondioksitin ayrıştırılması işlemidir. Yöntemde ana öğesi azot olan baca gazından sıvı bir solvent kullanarak karbondioksitin belli bir yüzdesi ayrıştırılmaktadır (IEA, 2004; Gibbins ve Chalmers, 2008).

Çizelge 1. Çeşitli Kaynaklara Bağlı Olarak Açığa Çıkan Baca Gazlarının Özellikleri (IPCC, 2006)

CO ₂ Kaynağı	CO ₂ kons. % V (kuru)	Basınç MPa	CO ₂ 'nin P _{kısmi} MPa	
Güç istasyonları	<i>Doğal gaz yakan kazanlar</i>	7-10	0,1	0,007-0,010
	<i>Gaz türbinleri</i>	3-4	0,1	0,003-0,004
	<i>Petrol yakan kazanlar</i>	11-13	0,1	0,011-0,013
	<i>Kömür yakan kazanlar</i>	12-14	0,1	0,012-0,014
	<i>Yanma sonrası</i>	12-14	0,1	0,012-0,014
Rafinerileri ve petrokimya tesisleri	8	0,1	0,008	
Yüksek fırın	<i>Yanma öncesi</i>	20	0,2-0,3	0,040-0,060
	<i>Yanma sonrası</i>	27	0,1	0,027
Çimento fırınları	14-33	0,1	0,014-0,033	
Zenginleştirme sonrasında sentetik gaz	8-20	2-7	0,16-1,4	



Şekil 2. Karbondioksit tutma sistem ve süreçlerine genel bir bakış (IPCC, 2001).

Çizelge 2. Karbondioksit Tutmada Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması (Benson, 2009)

Teknoloji	Avantajlar	Dezavantajlar
Yanma sonrası	<ul style="list-style-type: none"> • Diğer uygulamalar için gelişmiş teknoloji (Ör.: doğal gazdan karbondioksitin ayrıştırılması) • Var olan güç üretim kapasitelerinin standart uyarlanması • İlave gelişimler ve teknolojik yenilikler ile maliyetin düşürülmesi mümkün 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek enerji kullanım cezası (~30%) • Yüksek maliyet
Yanma öncesi	<ul style="list-style-type: none"> • Yanma sonrası tutmaya göre daha düşük maliyetler • Yanma sonrası tutmaya kıyasla daha düşük enerji cezaları/yaptırımları • CO₂'nin yüksek basıncı sıkıştırma maliyetlerini azaltır • Ulaşım sektörü için H₂ üretimi ile kombine • İlave gelişimler ve teknolojik yenilikler ile maliyetin düşürülmesi mümkün 	<ul style="list-style-type: none"> • Gazlaştırma için karmaşık kimyasal süreçler gerekir • Mevcut kapasitelerin güçlendirilmesi ihtiyacı • Mevcut kapasitelerin kullanımı için yüksek yatırım maliyetleri
Oxy yakıt	<ul style="list-style-type: none"> • Kompleks yanma sonrası ayrıştırma için ihtiyaçlardan sakınır • Potansiyel olarak yüksek üretim verimi • İlave gelişimler ve teknolojik yenilikler ile maliyetin düşürülmesi mümkün 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimum performans için yeni yüksek ısılı materyallere ihtiyaç duyulur • Yerde oksijen ayırma ünitesine ihtiyaç duyulur • Mevcut kapasitelerin güçlendirilmesi ihtiyacı

2.3 Oksijenle yakma (Oxy yakıt sistemleri)

Bu yöntemde yakıt hava yerine oksijenle yakılmaktadır. Dolayısıyla baca gazı da su buharı ve karbondioksitten oluşmaktadır. Açığa çıkan baca gazındaki karbondioksit konsantrasyonu oldukça yüksektir (hacimsel olarak %80'lere ulaşır). Bacadan çıkan bu gaz soğutulur sıkıştırılmakta ve su buharından ayrıştırılmaktadır. (IEA, 2004; Reynen, 2008; Gibbins ve Chalmers, 2008). Şekil 2 tanımlanan proseslerin akım şemasını göstermektedir. Çizelge 2'de ise prosesler değişik parametreler bakımından karşılaştırılmıştır.

3. NAKLİYE

Karbondioksit üretilen tesisin depolanma sahasına uzak olması durumunda depolanma için taşınması gerekmektedir. Karbondioksit katı, sıvı ve gaz olarak taşınabilmektedir. Ticari ölçekli taşımalarda tanklar, boru hatları ve gemiler kullanılmaktadır.

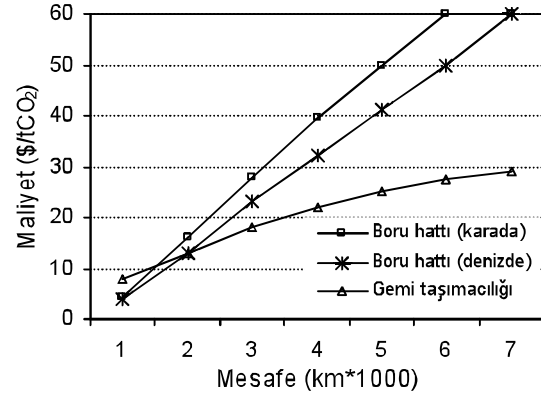
Atmosfer basıncına yakın basınçlarda taşınan karbondioksit büyük hacimleri işgal etmekte ve geniş çaplı donanımlara ihtiyaç duymaktadır (Hoff, 2009). Karbondioksitin hacmi sıvılaştırma, katılaştırma ya da hidratasyonla azaltılabilmektedir. Sıvılaştırma, gazların nakliyesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut teknoloji ve deneyimler sıvılaştırılmış karbondioksitin nakliyesinde de kullanılabilir. Katılaştırma ise diğer seçeneklerle kıyaslandığı zaman daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır.

Nakliye yönteminin seçiminde en önemli parametre gazın kaynağıyla depolama bölgesi arasındaki mesafenin uzunluğudur. Şekil 3 taşıma mesafesine bağlı olarak farklı taşıma seçeneklerinin maliyetlerinde meydana gelen değişimleri göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi kısa mesafeler için boru hattı uzun mesafeler için ise (yaklaşık > 2000km) gemi taşımacılığı daha ekonomik olmaktadır.

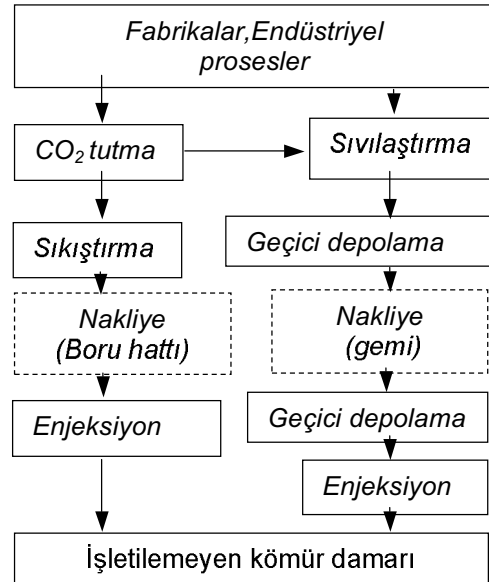
Şekil 4'te boru hattı ve gemi taşımacılığında gerek duyulan işlemler belirtilmektedir. Boru ile nakilde gaz sıkıştırmaya gemi ile nakilde ise sıvılaştırmaya ihtiyaç duymaktadır.

Karbondioksit karada sürekli olarak tutulur

ancak gemi taşımacılığı aşaması ayrıdır ve dolayısıyla bir deniz taşımacılık sistemi karada geçici depolama ve bir yükleme işlemi gerektirir. Kapasite, servis hızı, gemi sayısı ve gemicilik programı CO₂ tutum oranı, nakil uzaklığı, sosyal ve teknik kısıtlamalar göz önüne alınarak planlanır.



Şekil 3. Mesafeye bağlı olarak farklı taşıma seçeneklerinin maliyetlerindeki değişim (IPCC, 2001).



Şekil 4. Karbondioksit tutma ve depolama aşamaları (IPCC, 2006).

Çizelge 3. Gemi ve Boru Hattı ile Nakliyenin Karşılaştırılması (Rennie, 2008).

Gemi taşımacılığı	Boru hattı
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Düşük ilk yatırım maliyeti ▪ Yüksek işletme maliyeti ▪ 3-10 yıllık taahhütlerle gerçekleştirilir ▪ Rekabetin yüksek olduğu taşımacılık sektörü için önemli bir maldır. ▪ Karlılığın yüksek oluşu seçilebilirliği artırır ▪ Aktarmalı taşımada ara-depolama veya yüklü miktarlarda taşıma kısıtlayıcıdır ▪ Esnek fakat dağıtımda geçici depolama alanlarına ihtiyaç duyulur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Yüksek ilk yatırım maliyeti ▪ Düşük işletme maliyeti ▪ 10-15 yıllık tesis ömürleri ▪ İhtiyaç ve amaçlara uygun tesis tasarımı ▪ Bespoke, improved by networking ▪ Yavaş kurma/tesis süreci ▪ Kısıtlı kapasite değişkenliği ▪ Kaynak ve depolama alanı arasında sabit ▪ Yüksek güvenilirlik

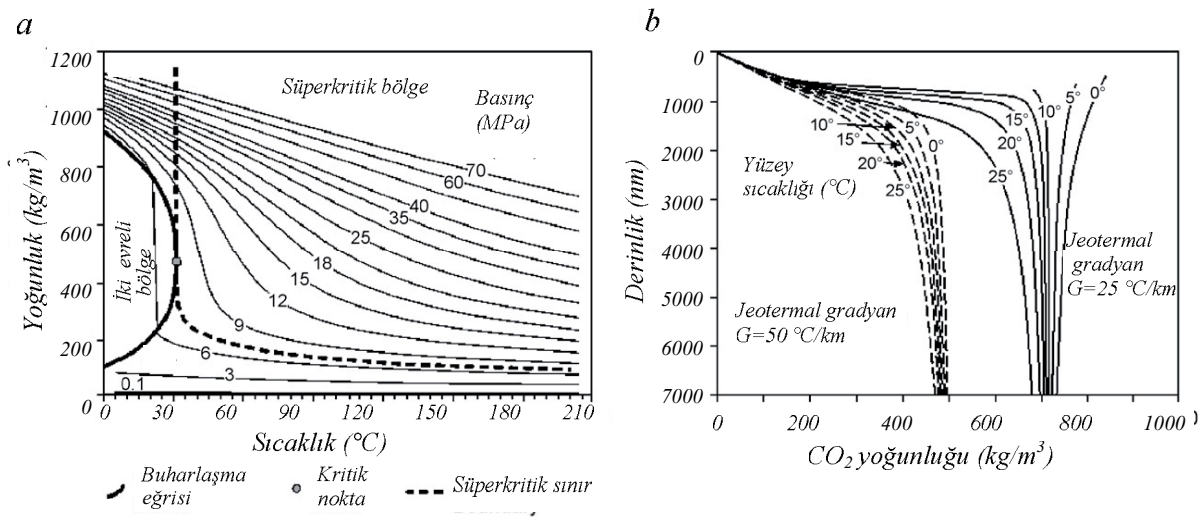
Çizelge 3'te gemi ve boru hattı nakliyesi karşılaştırılmıştır. Gemi taşımacılığında ilk yatırım maliyetleri düşük olmasına rağmen işletme maliyetleri yüksektir.

Karbondioksit bulunduğu kabın şeklini alan ve sıkıştırılabilen bir sıvı olarak davranır (yoğunluğu ise sıvı yoğunluğuna sahiptir).

4. KARBONDİOKSİTİN KÖMÜRDE DEPOLANMASI

Çok derinde yerleşmiş ya da ince olmaları nedeniyle üretilmeyen kömür damarları karbondioksitin depolanması için uygun bir ortamdır. Karbondioksit kömür damarlarında süperkritik bir sıvı olarak depolanabilir. Bu evrede sıvı ve gaz arasında ayırım yapılamaz.

Şekil 5a farklı basınçlarda karbondioksit yoğunluğunun sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil 5b ise karbondioksit yoğunluğunun derinliğe bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Grafikten görüleceği gibi yaklaşık 800-850 m derinliklerde karbondioksit maksimum yoğunluğuna ulaşmaktadır. Yani bu evrede karbondioksit süperkritik bir sıvıdır (Meer, 2005). Bu derinliğin üzerinde ise karbondioksit bir gazdır ve yoğunluğu ekonomik olarak depolanamayacak kadar düşüktür.



Şekil 5. Sıcaklık ve derinliğe bağlı olarak karbondioksitin yoğunluğunun değişmesi (Bachu, 2008).

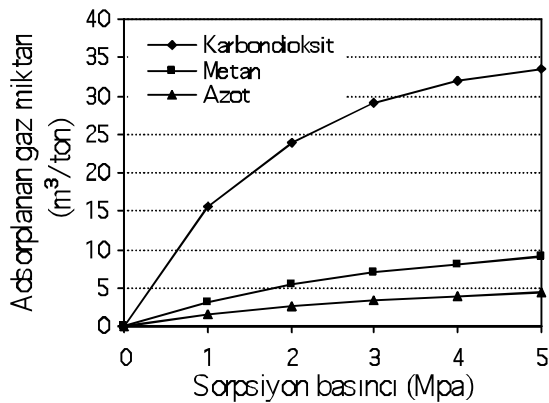
4.1 Depolama Mekanizması

Kömürün koloidal yapısı kömürün hacminin 1-40 katı kadar metan gazını içinde tutmasına olanak sağlar (Dallegge ve Barker, 1999). Yeraltında kömür ve beraberindeki metan basınç altında bir denge durumundadır. Bu basıncın miktarı kömürleşme derecesi (rank), damar derinliği ve kömürün gözenekliliği ile bağlantılıdır. Kömür damarları içerisinde depolanmış olan metan;

- i. çatlaklarda, kırıklarda ve gözenek içinde serbest gaz olarak,
- ii. çatlaklarda ve gözeneklerde kömür yüzeyine tutunmuş olarak ve
- iii. su içerisinde çözülmüş olarak bulunur.

Kömürde oluşan gaz önce adsorpsiyon yoluyla tutulur. Adsorplama kapasitesinin üzerine çıktığı durumlarda, gaz, formasyon suyu içerisinde çözünür ve/veya serbest gaz olarak gözenek ve çatlaklarda birikir (Gürdal ve Yalçın, 1992).

Kömürler iki ayrı porozite sistemiyle karakterize edilirler. Bunlar i) iyi tanımlanmış doğal çatlaklar ve ii) çatlaklar arasında heterojen gözenekli yapı içeren matris bloklarıdır. Doğal çatlaklar, rezerv boyunca süreklilik gösteren (face cleat) ve süreklilik göstermeyen çatlaklardan (butt cleat) oluşur. Çatlakların yerleşimi oldukça düzenlidir ve milimetreden santimetreye kadar değişir. Gaz akışı bu çatlaklar vasıtasıyla gerçekleşir (Wildenborg, 2005; Gruskiewicz vd, 2009)



Şekil 6. Çeşitli gazların kömürdeki adsorpsiyon miktarları (Durucan ve Shi, 2009).

Şekil 6'da çeşitli gazların adsorpsiyon izotermi verilmektedir. Şekilden görüleceği gibi, kömürler karbondioksit oranla metana daha fazla yakınlık

göstermektedir. CO_2/CH_4 adsorpsiyon oranı antrasit gibi olgun kömürler için düşük; ancak, linyit gibi genç kömürler için daha yüksektir (10) (Prusty, 2007).

Kömür damarlarına enjekte edilen karbondioksit kömür matrisinde adsorbe edilmiş olarak bulunan metanla yer değiştirerek depolanır. Bu aynı zamanda kömür içinde yer alan metanın üretilmesini de sağlar. (Peole vd, 2008; Shi ve Durucan, 2005a; Zarrouk ve Moore, 2009).

4.2 Kömür Damarına Karbondioksitin Enjeksiyonu

Kömür damarlarında karbondioksit depolanması için gereken teknolojilerin birçoğu yıllardır çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Örneğin, petrol ve gaz sanayinde enjeksiyon kuyularının delinmesi ve işletilmesinde gelişmiş teknolojiler kullanılmaktadır. Kapsamlı petrol sanayii deneyimleri temelinde, karbondioksitin kömür damarlarında depolanması için gereken delme, enjeksiyon, izleme ve diğer teknolojiler mevcuttur ve çeşitli mevcut projelerde bazı adaptasyonlarla kömür damarlarına uygunluğu test edilmektedir.

Kömürde karbondioksit depolamada uygun enjeksiyon sahalarının seçiminde bir çok parametre bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i. Uygun permeabilite (henüz minimum değerleri saptanmamıştır);
- ii. uygun kömür geometrisi (birkaç adet kalın tabakalar, birleşik ince tabakalardan daha uygundur);
- iii. basit yapı (minimal faylanma ve kıvrımlanma);
- iv. yatay olarak sürekli ve dikey olarak ayrılmış, örtülü homojen kömür tabakaları;
- v. uygun derinlik (1500 m' ye kadar, daha yüksek derinlikler henüz araştırılmamıştır);
- vi. uygun gaz doygunluk koşulları (ECBM için yüksek gaz doygunluğu);
- vii. formasyondan suyu uzaklaştırma yeteneği (IPCC, 2006).

Bir enjeksiyon kuyusu ile kuyu başı parçaları, Şekil 7'de gösterilmiştir. Enjeksiyon kuyuları genellikle iki valf ile donatılmıştır. Bunlardan biri normal kullanım, diğeri ise güvenlik

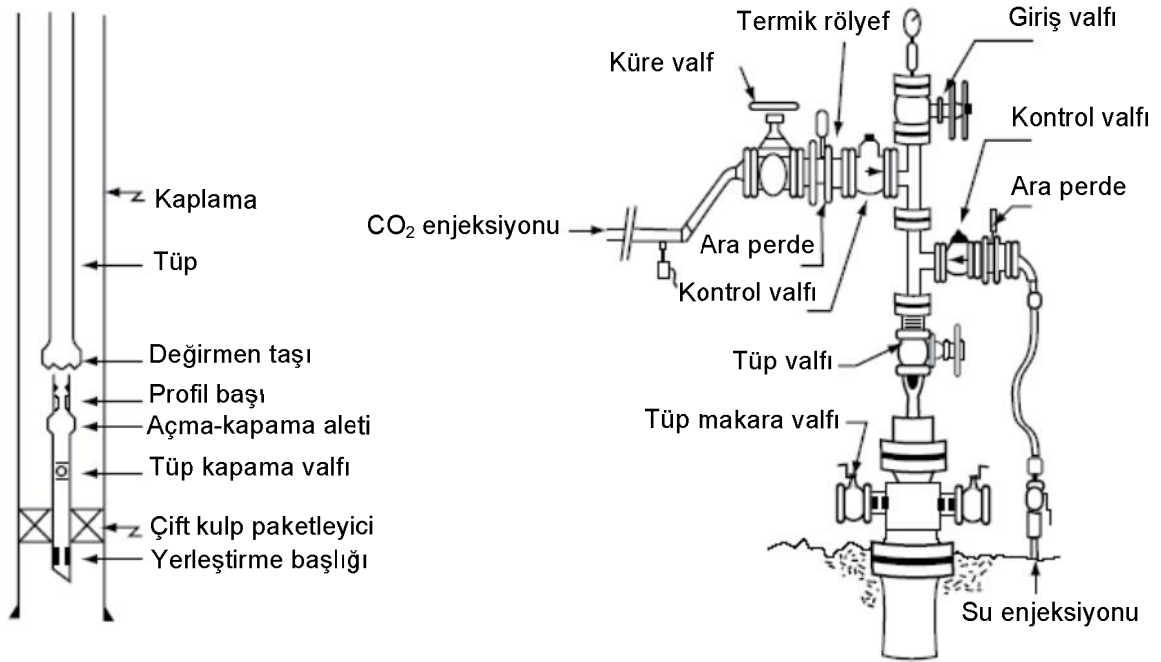
kesintisi amacıyla kullanılmaktadır. Jarrell vd (2002), sızıntı oluşmasını önlemek ve karbondioksitin enjeksiyon sistemine kazara geri akışını engellemek için bir otomatik valf ile donatılmasını önermiştir. Enjeksiyon kuyusu için tipik bir konfigürasyon çift kulp paketleyicisi, açma-kapama aleti ve güvenlik kesintisi valfi şeklindedir. Yüzeyledeki ekipmanlarda tehlikeli yüksek basınç artışının önüne geçmek ve karbondioksitin atmosfere salınmasını önlemek amacıyla karbondioksit enjeksiyonu, sızıntı oluşur oluşmaz durdurulmalıdır. Kırılma diskleri ve güvenlik valfleri, oluşan yüksek basıncı azaltmak için kullanılabilir. Karbondioksit enjeksiyon kuyularının düzgün bir şekilde sürdürülmesi için sızıntının ve kuyu başarısızlığının önüne geçilmelidir (Jarrell vd, 2002).

Kömür damarlarında karbondioksitin enjeksiyonunda düşey kuyular kullanılabilir. Enjeksiyon için gerekli kuyu sayısı bir dizi faktöre bağlıdır. Bunlar aşağıda sıralanmaktadır.

- i. Toplam enjeksiyon miktarı
- ii. Damar kalınlığı
- iii. Kömürün geçirgenliği
- iv. Maksimum enjeksiyon basıncı
- v. Enjeksiyon kuyuları için yüzeyde gerekli alanların varlığı

Geçirgenlik, kuyu sayısını etkileyen en önemli kömür fiziksel özelliğidir. Yüksek geçirgenliğe sahip kömür damarlarında daha az düşey kuyuyla üretim yapılabilir. Geçirgenlik azaldıkça gazın depolanması için gereken kuyu sayısı da artar (IPCC, 2006).

Karbondioksitin depo formasyonuna basılması için enjeksiyon basıncının hazne suyu basıncından daha yüksek olması gerekmektedir. Diğer taraftan, artan formasyon basıncı da formasyonda kırıklara neden olabilmektedir. Enjeksiyon formasyonunda kırık oluşmasını engellemek için maksimum kuyu basıncının sınırlandırılması gerekmektedir. Güvenli enjeksiyon basıncının oluşması için formasyonun in-situ gerilme ve boşluk suyu basıncı ölçümleri yapılmalıdır. Üretim sırasında boşluk suyu basıncının tükenmesi, haznedeki gerilim durumunu etkileyebilmektedir. Bazı tükenmiş haznelerin yapılan analizlerinde boşluk basıncının düşmesi sonucu kayaçtaki yatay gerilmelerin %50-80 düştüğü, dolayısıyla haznenin kırılma olasılığının arttığı gözlenmiştir (IPCC, 2006).



Şekil 7. Tipik bir karbondioksit enjeksiyon kuyusu ve kuyu başı konfigürasyonu (IPCC, 2006).

4.3 Kömür özelliklerinin sorpsiyon kapasitesine etkisi

Kömürde karbondioksit depolanmasında etkin olan kömür özellikleri rank, nem içeriği, maseral bileşimi ve gözenekliliktir.

4.3.1 Rank

Yapılan çalışmalarda (Busch vd, 2003; Levy vd, 1997; Prusty, 2007) metan sorpsiyon kapasitesinin ranka bağlı olarak lineer olarak arttığı belirlenmiştir. Busch ve arkadaşları (2003) rankın kömürde metan ve karbondioksitin sorpsiyon kapasitesini kontrol eden parametrelerden bir tanesi olduğunu öne sürmüşlerdir. Yüksek ranklı kömürlerde karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın seçimli desorpsiyonu gözlenirken düşük ranklı kömürlerde düşük basınçlarda metanın seçimli adsorpsiyonu ve tüm basınçlarda karbondioksitin seçimli desorpsiyonu gözlenmiştir. Ancak bu çalışmada kömürün seçimli adsorpsiyon davranışı ile rankı arasında keskin bir ilişki tanımlanamamıştır. Düşük ranklı Polonya kömürleri üzerine yapılan başka bir çalışmada ise düşük basınçta karbondioksit ve metanın seçimli adsorpsiyonu gözlenmiştir.

4.3.2 Maseral bileşimi

Bazı çalışmalarda (Ryan ve Lane, 2001; Prusty, 2007) kömürün maseral bileşiminin kömürde karbondioksit ve metanın sorpsiyonunu kontrol eden bir parametre olduğu kaydedilmiştir. Çeşitli maseraller arasında vitrinit benzer ranka sahip kömürlerde inertinitle karşılaştırıldığı zaman metana daha fazla çekim göstermektedir. Yüksek uçuculu bitümlü Amerikan kömürlerinde karbondioksit sorpsiyonu üzerine yapılan bir çalışmada karbondioksitin sorpsiyon kapasitesinin vitrinit içeriğiyle pozitif ilişkide olduğu, inertinit içeriğiyle ise zayıf ilişki içerisinde olduğu gözlenmiştir. Ryan ve Lane tarafından yürütülen bir çalışmada inertinitin karbondioksiti seçimli olarak adsorpladığı, metanın ise vitrinit tarafından adsorplandığı gözlenmiştir (Mastalerz vd, 2004).

4.3.3 Nem içeriği

Nem tek bir gazın ve ayrıca kömürün seçimli sorpsiyonu kontrol eden faktörlerden biri olarak tahmin edilmektedir. Clarkson ve Bustin (2000) nemin kömürde karbondioksitin sorpsiyonunu

engellediği ve seçimli adsorpsiyonunu azalttığını gözlemiştir. Busch vd (2003) tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise nemin metanın seçimli adsorpsiyonunu artırdığı tespit edilmiştir

4.3.4 Gözeneklilik

Kömürün karbondioksit ve metana seçimli sorpsiyonu ayrıca kömürdeki porozite sistemi tarafından da kontrol edilir. Kömürde porozitenin çoğunluğunu mikro gözenekler oluşturur. Karbondioksit kömürün mikro gözenekleri boyunca hareket edebilir ve seçimli olarak adsorplanabilir. Karbondioksit fizikokimyasal özelliklerinin (özellikle düşük aktivasyon enerjisi) bir sonucu olarak metanın giremediği çok sayıda kömür gözeneği içerisine nüfuz edebilir. Bu, karbondioksitin seçimli adsorpsiyonuna katkıda bulunur. Metan molekülleri mikro gözeneklere giremeyebilir ve makro gözeneklerde serbest olarak kalabilirler. Bu nedenle metan desorpsiyon boyunca kömürün yapısından hızlı bir şekilde ayrılır. Kömürün mikro gözenekliliği genellikle kömürün kalitesine bağlı olarak artış gösterdiğinden karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın desorpsiyonunun kömürdeki mikro gözenekliliğin artmasıyla artması gerekir. Ancak kömürün kılcalık yapısı ve maseral bileşimi gibi bazı özellikleri bu olayı değiştirebilir (Ceglarska ve Zarebska, 2005; Prusty, 2007)

4.3.5 Çevresel riskler ve önlemler

Kömür damarlarında karbondioksit depolanmasındaki eksikliklerden kaynaklanan riskler vardır. Bu risklerle ilgili olarak oluşabilecek iki tip senaryo söz konusudur. Birinci senaryo enjeksiyon kuyusunda oluşan aksaklıkların yol açtığı sızıntılardan kaynaklanır. Bu sızıntıların sonucu olarak ani karbondioksit yayılmaları meydana gelebilir. Bu yayılmalar öncelikle çalışanları etkiler (karbondioksitin havadaki konsantrasyonunun % 7-10' dan büyük olduğu durumlarda insan yaşamı tehlikeye girer). İkinci senaryoda ise sızıntı belirlenemeyen çatlak ve kırıklar boyunca gerçekleşir. Bu durumda, gaz içme sularını etkileyebilir ve su havzası üstü ile yüzey arasındaki zonda birikebilir. Ayrıca toprağın asitliği ve topraktaki oksijenin yer değiştirmesi ikinci senaryoya dahil riskler olarak değerlendirilir. (Shi ve Durucan, 2005a, IPCC, 2006).

İzleme kömür damarlarında karbondioksit depolama projeleri için toplam risk yönetiminin önemli bir parçasıdır. Enjeksiyon hızı ve enjeksiyon kuyu basıncı gibi bazı parametrelerin rutin olarak ölçülmesi çalışmaların emniyeti açısından oldukça önemlidir. Tekrarlanan sismik araştırmalar ile karbondioksitin yeraltı hareketi izlenebilir. Ek olarak yeraltı suyu ve topraktan örneklerin alınması karbondioksit sızıntısının belirlenmesi için yararlı olabilir (Heinrich, 2003; IPCC, 2001).

4.4 Maliyet

Karbondioksitin ele geçirilmesi, 300 km'lik bir mesafeye nakliyesi ve kömür damarında

depolanmasının maliyeti depolanan karbondioksitin her bir tonu için yaklaşık olarak 30-50 \$ olarak tahmin edilmektedir (IEA, 2009).

Karbondioksitin kömür damarında depolanması sonucunda açığa çıkan metan gazı tabloda belirtilen uygulamalarda kullanılabilirliği olanağı vardır. Gazın bu amaçlarla kullanılması depolama maliyetlerini azaltacaktır. Kömür kökenli metanın kullanım teknolojilerini gazın doğal gazın yerine kullanılması, gazın madende yada yakın bölgelerde kullanılması, elektrik üretiminde kullanılması ve gazın basit bir şekilde imha edilmesi olarak dört grupta toplamak mümkündür.

Çizelge 4: Kömür Kökenli Metanın Kullanım Seçenekleri (Su ve Agnew, 2005; Bibler ve Carothers, 2001)

		Doğal gaz yerine gazın kullanılması
Kullanım/azaltım seçenekleri	Doğrudan kullanım	Kömürle birlikte gazın müşterek yakılması (ısı üretmek için) Kömürün kurutulması Ağır metaller içeren suyun buharlaştırılması Maden binalarının ve havasının ısıtılması Yerel sanayiler tarafından değişik amaçlarda kullanımı Havalandırma havasının oksidasyonu (ısı üretmek için)
	Elektrik üretimi ve kojenerasyon	Kömürle birlikte gazın müşterek yakılması (elektrik üretmek için) İçten yanmalı motorlar Türbinler Yakıt hücreleri Havalandırma havası oksidasyonu
		İmha (yakma, havalandırma havasının oksidasyonu)

4.5 Diğer depolama seçenekleriyle karşılaştırılması

Petrol ve gaz sahalarında ve akiferlerde karbondioksitin depolanmasına yönelik çeşitli uygulamalar bulunmasına rağmen kömürde karbondioksitin depolandığı geniş çaplı bir uygulama bulunmamaktadır. Günümüzde kömür kökenli metanın üretiminin artırılmasında karbondioksit yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kömürde karbondioksitin depolanmasıyla ilgili çalışmalar genellikle laboratuvar ölçeklidir ve araştırma safhasındadır. Çizelge 5'de karbondioksitin tutulmasından depolanmasına kadar olan aşamalar çeşitli açılardan değerlendirilmiştir. Kömür damarlarında gazın depolanması için gereken tutma ve taşıma sistemleri mevcuttur ve uygulama araştırma safhasındadır.

Çizelge 6'da bazı jeolojik depolama seçeneklerinin kapasiteleri verilmektedir. Kömür damarlarının karbondioksit depolama potansiyelinin 0-1500 Gton gibi geniş bir aralıkta olduğu tahmin edilmesine karşılık yaklaşık 250 Gton olduğu kabul edilmektedir (IEA, 2009). Bu değerlendirmeler her bir metan molekülü için 2 karbondioksit molekülünün depolanacağı varsayımına dayandırılmıştır ve bu nedenle belirsizlikler içermektedir (Wildenborg ve Lokhorst, 2005; Torvanger, 2004).

Terk edilmiş petrol ve gaz rezervuarları aşağıda belirtilen nedenlerle karbondioksitin depolanmasında genellikle birincil seçenek olarak değerlendirilmektedir.

- Petrol ve gaz rezervleri genellikle detaylı olarak araştırılmış yerlerdir ve karbondioksit depolanması için güvenilir

oldukları düşünülür. Çünkü bu rezervler milyonlarca yıl boyunca petrol, gaz ve çoğu zaman da karbondioksit tutmuşlardır.

- ii. Petrol ve gaz rezervuarlarının fiziksel ve yapısal özellikleri daha önceden çalışılmış ve karakterize edilmiştir.
- iii. Daha önceden mevcut olan kuyular ve alt yapıları karbondioksit depolama için kullanılabilir (Meer, 2005).
- iv. Karbondioksit depolama sürecinde

fazladan üretilecek petrol ya da gazdan sağlanan kazanç, karbondioksit depolaması sırasında yapılacak harcamalar için kullanılabilir (Ravagnani, 2009).

- v. Hidrokarbonların rezervuar içerisindeki hareketi ve yer değiştirme karakteristikleri bilgisayar programları kullanılarak tahmin edilebilir.

Çizelge 5: Karbondioksit Tutma ve Depolama Sistemlerinin Bileşenleri ve Uygulanabilirliği(IPCC, 2006)

Karbondioksit tutma ve depolama işlemleri bileşeni	Karbondioksit tutma ve depolama teknolojisi	Araştırma aşaması	Deneme aşaması	Özel koşullarda ekonomik uygunluğu	Gelişmiş pazar
Tutma	Yanma sonrası			√	
	Yanma öncesi			√	
Nakliye	Oxy yakıt kullanımı		√		
	Endüstriyel ayrıştırma				√
Jeolojik depolama	Boru hattı				√
	Gemi taşımacılığı			√	
Okyanusta depolama	Petrol üretimini artırmak için				√
	Gaz ve Petrol sahaları			√	
Okyanusta depolama	Tuzlu formasyonlar			√	
	KKM'nin üretiminin artırılmasında		√		
Okyanusta depolama	Direkt enjeksiyon (çözündürme modeli)	√			
	Direkt enjeksiyon (göl tipi)	√			

Akiferlerde karbondioksit depolama işlemi diğer jeolojik depolama seçeneklerine göre oldukça kolaydır. Ancak, bu formasyonlarda depolama işleminde enjeksiyon derinliği ve karbondioksit yoğunluğu önemlidir. Formasyon içine enjekte

edilen karbondioksitin yayılımı, formasyonun homojenliğinden etkileneceği gibi formasyon içindeki diğer gaz ya da safsızlıklardan da etkilenebilir (Mito, 2008).

Çizelge 6: Farklı Tipteki Jeolojik Formasyonların Karbondioksit Depolama Kapasiteleri (IPCC, 2001)

Rezev tipi	En düşük depolama kapasitesi (GtCO ₂)	En yüksek depolama kapasitesi (GtCO ₂)
Petrol ve gaz bölgeleri	675*	900*
Kazılamayan kömür damarları	3-15	200
Derin tuzlu formasyonlar	1000	Belirsiz, fakat imkan dahilinde 10 ⁴

* İşletilmemiş petrol ve gaz bölgelerine enjeksiyon yapıldığı zaman bu oran %25 değerine kadar artış gösterecektir.

Yöntemler maliyetler açısından karşılaştırılırsa aktif petrol kuyularında karbondioksit depolama maliyetinin en az olduğu görülür (IPCC, 2001). Kömür yatakları, terk edilmiş petrol ve gaz rezervuarlarında depolama maliyetleri aktif petrol kuyularına oranla daha fazladır (Herzog, 2009).

Aktif petrol kuyuları ve tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri yüksek depolama güvenliğine ve uygulanabilirliğe sahipken diğer yöntemler için bu özellikleri belirlemesine yönelik araştırmalar devam etmektedir (Herzog, 2009).

5. SONUÇLAR

Fosil yakıtların kullanımının atmosferdeki karbondioksit oranını artırdığı bilinmektedir. Sera gazları içerisinde karbondioksit sera etkisi bakımından en etkili gazdır. Karbondioksitin işletilemeyen kömür damarlarında depolanabilmesiyle (ya da diğer seçenekler) fosil yakıtların çevreye zarar vermeden güvenli şekilde kullanımı söz konusu olacaktır.

Karbondioksitin tutulmasında çeşitli yöntemler kullanılabilen olup yöntem seçiminde etkili parametre açığa çıkan gazdaki karbondioksit miktarıdır. Nakliyede ise taşıma yönteminin seçiminde etkin parametre gaz kaynağıyla depolama kaynağı arasındaki mesafedir. Uzun mesafelerde gemi taşımacılığı daha ekonomik bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Kömür özelliklerinin adsorpsiyon kapasitesine etkisini konu alan çalışmalar devam etmektedir. Geçmiş çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- i. Yüksek ranklı kömürlerde karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın seçimli desorpsiyonu gözlenmiştir. Düşük ranklı kömürlerde ise düşük basınçlarda metanın seçimli adsorpsiyonu ve tüm basınçlarda karbondioksitin seçimli desorpsiyonu gözlenmiştir.
- ii. Karbondioksitin sorpsiyon kapasitesi vitrinit içeriğine bağlı olarak artmaktadır.
- iii. Nem, kömürde karbondioksitin sorpsiyonunu engelleyen ve seçimli adsorpsiyonunu azaltan bir faktördür.
- iv. Karbondioksitin seçimli adsorpsiyonu ve metanın desorpsiyonunun kömürde mikroközenekliliğin artmasıyla artmaktadır

Kömür damarlarında karbondioksit depolamanın birim maliyeti 30-50 \$ olarak tahmin edilmektedir. Bu maliyet açığa çıkan metanın pazarlanması ya da çeşitli amaçlarda kullanılmasıyla düşebilir. Kömür damarlarında karbondioksit depolanmasındaki eksiklikler ya da hatalardan kaynaklanan riskler mevcut teknolojiler kullanılarak izlenebilmekte ve gerekli tedbirler alınabilmektedir.

İşletilemeyen kömür damarlarındaki karbondioksitin depolanmasıyla ilgili çalışmalar laboratuvar aşamasında olup ilerleyen dönemlerde geniş uygulama alanları bulacağı tahmin edilmektedir. Bu bağlamda işletilemeyen kömür damarlarının rezervlerinin ve çoklu adsorpsiyon özelliklerinin belirlenmesi ileriki uygulamalara ışık tutacaktır.

6 KAYNAKLAR

Anon, 2009; <http://images.chron.com/blogs/newswatchenergy/archives/carbon%2520sequestration.gif>

Ceglarska-Stefan'ska, G. and Zarebska, K., 2005; "Sorption of carbon dioxide-methane mixtures" *International Journal of Coal Geology* **62**, 211- 222.

Bachu, S., 2008; "CO₂ Storage in Geological Media: Role, Means, Status And Barriers to Deployment", *Progress in Energy and Combustion Science*, **34**, 254-273.

Başaran, M., 2006; "Karbondioksit (CO₂) Tutma ve Depolama" TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumu-Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği. 442-456.

Benson, S., 2009; "Overview of geological Storage of CO₂", <http://dels.nas.edu/besr/docs/BENSON.pdf>

Bibler, C. and Carothers, P., 2001. Overview of Coal Mine Gas Use Technologies, <http://www.ravenridge.com/Utilization.PDF>

Busch, A. Krooss, M.B, Gensterblum, Y., Bergen, F. and Pagnier, M.J.H., 2003; "High-Pressure Adsorption Of Methane, Carbon Dioxide and Their Mixtures On Coals With A Special Focus on the Preferential Sorption Behavior" *Journal of Geochemical Exploration*, **78-79**, 671-674.

- Clarkson C R and Bustin R M., 2000; "Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane" *International Journal of Coal Geology*, **42(4)**, 241-271.
- Dallegge, T. and Barker, C., 1999. Coal-Bed Methane Gas-In-Place Resource Estimates Using Sorption Isotherms and Burial History Reconstruction: An Example from the Ferron Sandstone Member of the Mancos Shale. http://pubs.usgs.gov/pp/p1625b/Reports/Chapters/Chapter_L.pdf
- Dooley, J., Dahowski, T., Davidson, C., Wise, M., Gupta, N., Kim, S. and Malone, E., 2006. "Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage: A Core Element Of A Global Energy Technology Strategy To Address Climate Change", A technical Report from the Second phase of Global Energy Technology Strategy Program.
- Durucan, S. and Shi, J., 2009; "Improving the CO₂ well injectivity and enhanced coalbed methane production performance in coal seams", *International Journal of Coal Geology*, **77**, 214-221.
- Gruszkiewicz, M.S., Naney, M.T., Blencoe, J.G., Cole, D.R., Pashin, J.C. and Carroll R.E., 2009; "Adsorption kinetics of CO₂, CH₄, and their equimolar mixture on coal from the Black Warrior Basin, West-Central Alabama" *International Journal of Coal Geology*, **77**, 23–33.
- Gibbins, J. and Chalmers, H., 2008; "Carbon capture and storage" *Energy Policy*, **36**, 4317–4322.
- Gürdal, G. ve Yalçın, E., 1992; "Kömürde Gaz Birikmesini Kontrol Eden Parametreler-Genel Bakış", Türkiye 8. Kömür Kongresi, Bildiriler Kitabı, 307-318.
- Heinrich, J.J., Herzog, H.J. and Reiner, D.M.: 2003, 'Environmental Assessment of Geologic Storage of CO₂', The Second Annual Conference on Carbon Sequestration, Alexandria, VA, United States Department of Energy.
- Herzog, 2009 "CO₂ Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change", A White Paper, Final Report, <http://sequestration.mit.edu/pdf/WhitePaper.pdf>
- Hoff, T., 2007 "CO₂ Storage in Depleted Gas Field" http://www.deloitte.com/dtt/cda/doc/content/nl_en_Deloitte_OilGasConf07_Hoff.pdf
- IEA, 2009 "Storing CO₂ in Unminable Coal Seams" <http://www.ieagreen.org.uk/8.pdf>
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 'Carbon Dioxide Transport, Injection And Geological Storage' http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_5_Ch5
- IPCC, 2001; "IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage" http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports_carbon_dioxide.htm
- Jarrell, P.M., Fox, E.C., Stein, H.M. and Webb, L.S., 2002: Practical Aspects of CO₂ Flooding. SPE Monograph Series No. 22, Richardson, TX, 220 pp.
- Levy, J.H., Day, S.J. and Killingley J.S., 1997 "Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties" *Fuel*, **76(9)**, 813-819.
- Mastalerz, M., Gluskoterb, H. and Rupp, J., 2004; "Carbon dioxide and methane sorption in high volatile bituminous coals from Indiana, USA" *International Journal of Coal Geology*, **60**, 43– 55.
- Meer, V., 2005 "Carbon Dioxide Storage in Natural Gas Reservoirs, Oil & Gas Science and Technology", **60(3)**, 527-536.
- Mito, S., Xue, Z. Ve Ohsumi, T., 2008 "Case study of geochemical reactions at the Nagaoka CO₂ injection site, Japan *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2**, **30**, 9–31.
- Nordbotten, J., Celia, M. and Bachu, S., 2005; "Injection and Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers: Analytical Solution for CO₂ Plume Evolution During Injection", *Transp Porous Med*, **58**, 339–360.
- Prusty, K. B., 2008; "Sorption of Methane and CO₂ for Enhanced Methane Recovery and Carbon Dioxide sequestration" *Journal of Natural Gas Chemistry*, **17**, 29-38.
- Qi, R., La Force, T and Blunt, M., 2009; "Design

of carbon dioxide storage in aquifers”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3**, 195–205.

Ravagnani, G., Ligerio, E. And Suslick, S., 2009; “CO₂ Sequestration through Enhanced Oil Recovery in a Mature Oil Field” *Journal of Natural Gas Chemistry*, **17**, 29-38.

Rennie, E., 2008 ” Carbon Capture And Storage Financing Challenges And Opportunities” http://www.worldenergy.org/documents/alastair_rennie.pdf

Reynen, B., 2008 ” CO₂ Storage Potential in Canada” http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/nrgyrprt/nrgyftr/cnslttrnd3/bill_reynen.pdf

Ryan B and Lane B., 2001; *Geological Fieldwork 2001*, Paper 2002-1. British Columbia Ministry of Energy and Mines, 83pp.

Shi, Q and Durucan, S., 2005a; “CO₂ Storage in Deep Unminable Coal Seams” *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, **60(3)**, 547-558.

Shi, Q and Durucan, S., 2005b; “CO₂ Storage in Caverns and Mines” *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, **60(3)**, 569-571.

Su, S. and Agnew, J., 2005 “Catalytic Combustion of Coal Mine Ventilation Air Methane”, *Fuel*, **85**, 1201-1210

Wildenborg, T. and Lokhorst, A.; 2005 “Introduction on CO₂ Geological Storage. Classification of Storage Options”, *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, **60(3)**, 513-515.

Zhang, W., Li, Y., Xu, T., Cheng, H., Zheng, Y. and Xiong, P., 2009; “Long-term variations of CO₂ trapped in different mechanisms in deep saline formations: A case study of the Songliao Basin, China”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3(2)**, 161-180.

Zarrouk, S. and Moore, T., 2009 “Preliminary reservoir model of enhanced coalbed methane (ECBM) in a subbituminous coal seam”, *Huntly Coalfield, New Zealand, International Journal of Coal Geology*, **77**, 153-161.