

YERALTI JEOLJİK REZERVUARLARINDA KARBONDİOKSİTİN DEPOLANMASI

İzzet KARAKURT*, Gökhan AYDIN, Kerim AYDINER

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

Özet

Karbondioksit, fosil yakıtların (petrol ve türevleri, kömür ve doğal gazın) sanayide kullanılması sonucu atmosfere karışmaktadır. Bu yolla atmosfere karışan karbondioksit, toplam karbondioksit emisyonlarının % 80-85'ini oluşturmaktadır. Geriye kalanı, (%15-20) canlıların solunumundan ve mikroskobik canlıların organik maddeleri ayrıştırmasından kaynaklanmaktadır. Fosil yakıt kullanımının hızla artması ve fotosentez için tonlarca karbondioksiti harcayan ormanların ve bitkisel alanların tahribi, atmosferdeki karbondioksit miktarını son yılların en yüksek düzeyine ulaştırmıştır. Günümüzde, karbondioksiti geri kullanıma sokacak depo alanları sınırlıdır ve açığa çıkan karbondioksitin büyük miktarı sera etkisinin azaltılabilmesi için depolanmak zorundadır. Bu gaz, tüketilmiş petrol ve doğal gaz rezervuarlarında, derin tuzlu formasyonlar ve işletilemeyen kömür damarları gibi jeolojik yapılarda yüksek miktarlarda depolanabilmektedir. Bu çalışmada jeolojik depolama seçenekleri depolama mekanizmaları ve depolama kapasitesi gibi özellikler bakımından değerlendirilmiştir. Ayrıca jeolojik depolama seçenekleri çeşitli açılardan karşılaştırılarak değerlendirmeler de yapılmıştır. Çalışma sonucunda, petrol ve doğal gaz rezervuarlarının karbondioksitin jeolojik yapılarda depolanmasında en verimli yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbondioksit, CO₂ Depolaması, Küresel Isınma, Doğal Gaz

CARBON DIOXIDE STORAGE AT UNDERGROUND GEOLOGICAL RESERVOIRS

Abstract

Carbon dioxide is released to atmosphere as a result of burning of fossil fuels (oil and its products, coal and natural gas) in industry. Carbon dioxide, released to atmosphere by means of burning of fossil fuels creates 80-85 % of total carbon dioxide emissions. Other emissions (15-20 %) result from respiration and decomposition of organic materials by microorganisms. The rapidly increases of using of fossil fuels, destroying of both forests spent plenty of CO₂ for photosynthesis and plantal areas have caused the highest level of recent years of CO₂ amount in the atmosphere. At the present time, store for reusing the CO₂ is limited and large scale of CO₂ released has to be stored to be able to decrease the effects of greenhouse. Large amount of CO₂ can be stored at geological formations such as depleted oil and natural gas reservoirs, deep saline formations and unminable coal seams. In this study, geological storage options are considered in terms of storage mechanisms and storage capacity. Additionally, evaluations are made by comparing the geological storage options from various aspects. As a result of the study, it has been determined that oil and natural gas reservoirs are the most effective methods for geological storage of CO₂.

Keywords: Carbon Dioxide, CO₂ Storage, Global Warming, Natural Gas

* E-posta: karakurt@ktu.edu.tr

1. Giriş

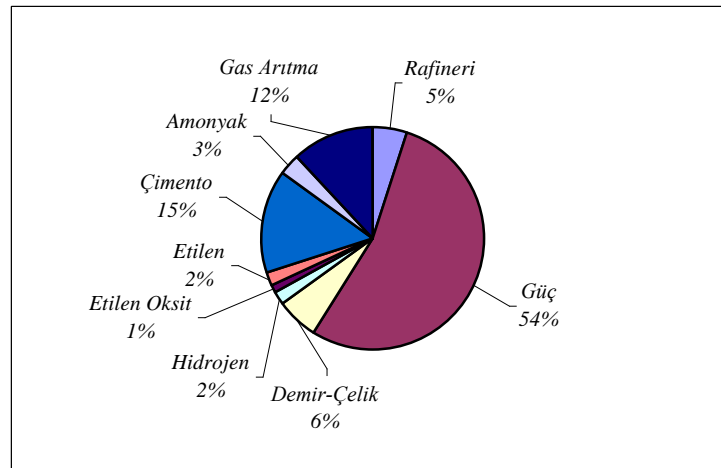
Meteorolojik koşulların şekillenmesinde en önemli parametreler atmosferdeki gazların mevcudiyeti, düşey dağılımları ve birbirlerine göre oranları olmaktadır. Atmosferde bulunan gazların % 75'i ve su buharının tamamı troposferde bulunmaktadır. İklim yönünden daha çok atmosferin alt kısımları belirleyici olmaktadır. Troposfer ve stratosferin alt katlarının kimyasal bileşimi incelendiğinde her zaman bulunan ve oranı değişmeyen gazlar; % 78 oranında azot, % 21 oranında oksijen, %1 oranında asal gazlar (Hidrojen, Helyum, Argon, Kripton, Ksenon, Neon)'dir. Her zaman bulunan ve oranı değişen gazlar ise su buharı ve karbondioksit iken daimi olarak bulunmayan gazlar ozon ve tozlardır. Karbondioksit atmosferin güneş ışınlarını emme ve saklama yeteneğini artırmaktadır. Miktarının artması sıcaklığı artırıcı, azalması ise sıcaklığı düşürücü etki yapmaktadır [1,2].

İnsan faaliyetleri sonucu atmosferdeki gaz emisyonlarına en büyük katkıyı yapan gaz, karbondioksittir. Karbondioksit fosil yakıtların yakılması ve biokütlenin parçalanması sonucunda açığa çıkmaktadır [3]. Doğal yeryüzü kaynağı olan fosil yakıtlarının yanması ile ortaya çıkan karbondioksit, küresel ısınmanın başlıca nedenlerinden biri olarak düşünülmektedir. Atmosfere karışan karbondioksitin % 80-85'i fosil yakıtlardan, %15-20'si de canlıların solunumundan ve mikroskobik canlıların organik maddeleri ayrıştırmasından kaynaklanmaktadır [4]. Çizelge 1'de antropojenik sera gazlarının toplama emisyon miktarına olan nispi katkıları verilmiştir. Karbondioksit emisyonları toplam emisyonların yaklaşık % 74'ünü oluşturmaktadır [5].

Çizelge 1. Antropojenik sera gazı emisyonları [5].

Antropojenik emisyon gazları	Oran (%)
Karbondioksit (CO ₂)	74
Metan (CH ₄)	16
N ₂ O	9
CFCs, HFCs, PFCs, SF ₆ 'ların tüketimi	1

Şekil 1'de CO₂'in sektörel bazdaki emisyon oranları gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en yüksek CO₂ emisyonu % 54 ile güç sektörüne aittir. Bunu sırasıyla Çimento, gas arıtma, demir çelik, rafineri, amonyak, hidrojen, etilen ve etilen oksit sektörleri izlemektedir.

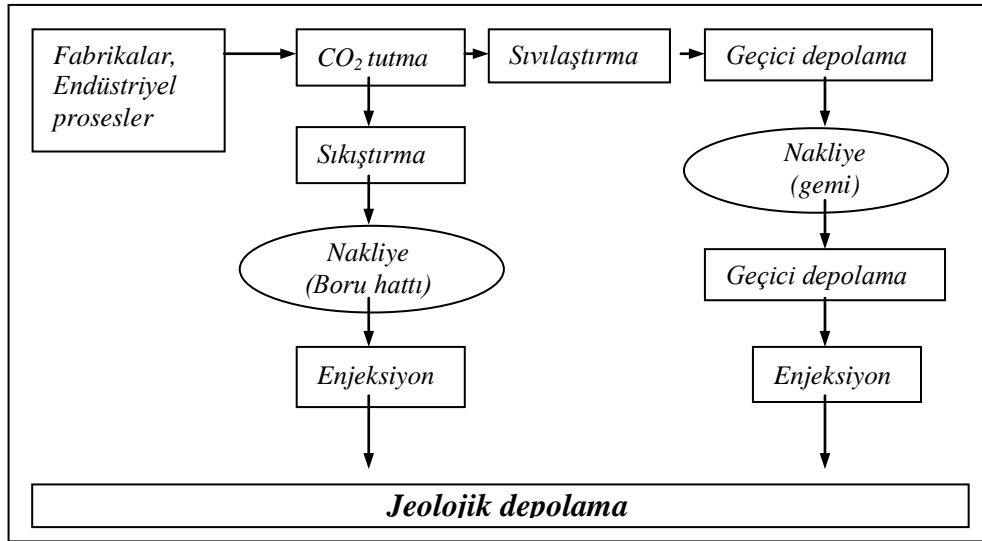


Şekil 1. Sektörel bazda CO₂ emisyon oranları [6]

Karbondioksit çeşitli depolama alanlarında depolanabilmektedir. Bazı formasyonlara ait jeolojik yapılar CO₂ gazını tutma özelliğine sahiptirler. Bundan dolayı, bu jeolojik yapılar CO₂ gazının hareketsiz kalmasını sağlarlar. Bu çalışmada, jeolojik depolama seçenekleri üzerinde durulmuş ve her bir seçeneğin farklı parametreler açısından bir değerlendirilmesi sunulmuştur. Ek olarak jeolojik depolamayla diğer depolama seçenekleri (okyanusta depolama, mineral karbonizasyonu) arasında kıyaslamalar yapılmıştır.

2. Karbondioksitin Tutulması ve Nakliyesi

Karbondioksit, elektrik üretim tesislerinden ve diğer yanma kaynaklarından çoğunlukla yüksek oranlarda nitrojen içeren ve düşük oranlarda % 5-15 karbondioksit içeren bir atık gaz olarak açığa çıkmaktadır. Karbondioksit yeraltında depolanmadan önce diğer gazlardan arındırılması gerekmektedir. Gazların içerisindeki karbondioksitin oranının düşük olmasından dolayı ayrıştırma işlemi oldukça pahalı olup, büyük çaplı yüzey tesislerine ve fazla miktarlarda enerjiye ihtiyaç vardır [7]. Santraller ve diğer büyük sanayi tesisleri karbondioksitin tutulması için en uygun yerlerdir. CO₂ tutmanın amacı, yüksek basınçta yüksek konsantrasyonda bir depolama sahasına nakledilebilecek bir CO₂ akışı elde etmektir. Karbondioksit tutma sistemleri yanma öncesinde karbondioksitin tutulması, yakma sonrası karbondioksitin tutulması, yakıtın oksitlendirilmesi ve endüstriyel proseslerden oluşmaktadır [8, 9]. CO₂'nin tutulmasından depolanmasına kadar geçen süreçler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Karbondioksit tutma ve depolama aşamaları [9]

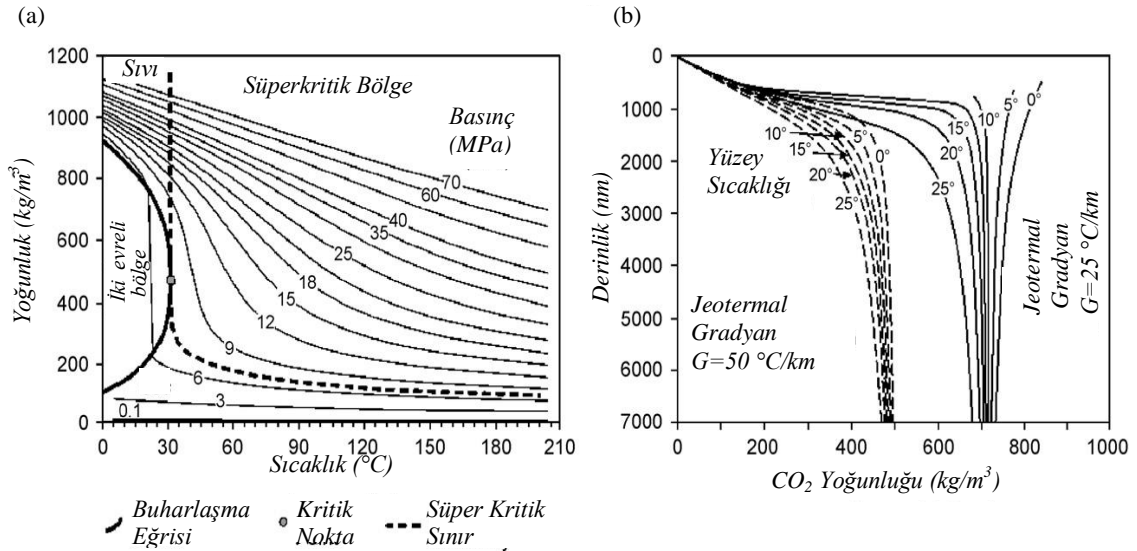
CO₂'nin açığa çıktığı tesis jeolojik depolama sahasının hemen üzerinde değilse, tutulan CO₂ depolama sahasına taşınmalıdır. CO₂ sıkıştırılmış gaz olarak boru hatlarıyla taşındığı gibi sıvılaştırılmış olarak izole tanklarla gemilerle, karayolu tankerleriyle veya demiryoluyla da taşınabilir. Kamyonlarla gaz taşıma işlemi daha çok küçük miktarlardaki CO₂'nin taşınması için yaygındır. Gemi ile taşıma işlemi, özellikle CO₂'nin uzun mesafelere taşınması gerektiği durumlarda boru hattı ile taşıma yerine alternatif bir yoldur [10].

3. Jeolojik Rezervuarlarda Karbondioksitin (CO₂) Depolanması

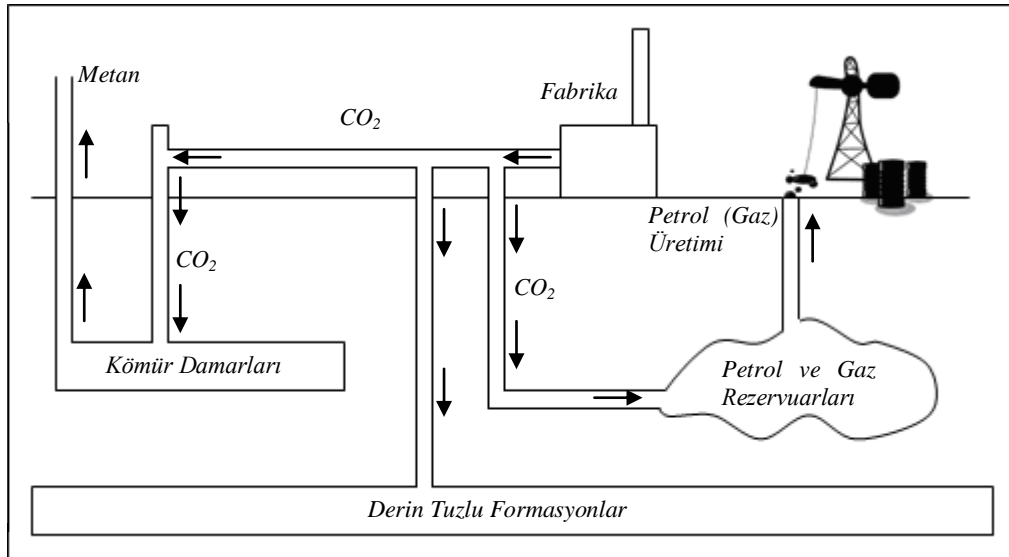
Karbondioksit, jeolojik formasyonlarda süper kritik bir sıvı olarak depolanmaktadır. Bu evrede, sıvı ve gaz arasında ayrımı yapılamamakta ve CO₂ bulunduğu kabın şeklini alan ve sıkıştırılabilen bir sıvı olarak davranmaktadır. Yoğunluğu ise sıvı yoğunluğuna sahiptir. Şekil 3, CO₂'nin faz diyagramını ve rezervuar koşullarını göstermektedir. Şekil 3a farklı basınçlarda karbondioksit yoğunluğunun sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösterirken, Şekil 3b de ise karbondioksit yoğunluğunun derinliğe bağlı olarak değişimi ifade edilmektedir. Anlaşılacağı gibi yaklaşık 800–850 m derinliklerde karbondioksit maksimum yoğunluğuna ulaşmaktadır ve bu evrede karbondioksit süper kritik bir sıvıdır. Bu derinliğin üzerinde CO₂ bir gazdır ve yoğunluğu ekonomik olarak depolanamayacak kadar düşüktür.

Belirlenen yer altı sıcaklık ve basınçlarda karbondioksit yoğunluğu 600 kg/m³(30°C, 8MPa), 800 kg/m³(160°C, 8MPa) ve viskozitesi 0,04 cP (30°C, 8MPa), 0,08 cP (160°C, 70MPa)'dır. Saf suyla karşılaştırılacak olursa saf su yoğunluğu yüzeyde 1000 kg/m³ ve 7000m derinlikte 920 kg/m³'tür ve viskozitesi 1,0'den 0,2 cP'ye kadar azalmaktadır. Tuzlu suda aynı zamanda yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahiptir [11].

Karbondioksitin depolandığı jeolojik rezervuarlar; petrol ve doğal gaz rezervuarları, derin tuzlu formasyonlar ve işletilemeyen kömür damarlarından oluşmaktadır (Şekil 4). Takip eden bölümlerde bu seçenekler ele alınmış ve çeşitli açılardan karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 3. Karbondioksitin evre diyagramı (a) CO₂ yoğunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi, (b) CO₂ yoğunluğunun derinliğe bağlı değişimi [12]



Şekil 4. Jeolojik depolama seçenekleri

Petrol ve Gaz Rezervuarları

Konvansiyonel petrol üretim yönteminde, yeryüzünden yapılan sondajlarla petrollü rezervuara girilmekte ve sondaj kuyusuna petrol içerisinde çözülmüş gazın hareketlenmesi ile petrollü kuyuya taşımakta ve petrol yeryüzüne çıkarılmaktadır. Bu yöntemle ancak hafif ve orta graviteli petroller üretilebilmektedir. Ağır petrol denilen düşük API graviteli yoğun petroller üretilememektedir. Yapılacak CO₂ enjeksiyonu, rezervuarda kalan ağır petrolün üretilmesini sağlayacaktır. Karbondioksit petrol rezervuarına enjekte edildiği zaman ham petrol ile karışarak petrolün vizkozitesini azaltmakta ve petrollü hareketlendirmektedir. Gaz aynı zamanda rezervuar basıncının sürekli tutulmasını yada artırılmasını sağlamaktadır. Artan basıncın etkisiyle formasyonda bulunan petrol üretim kuyularına yönlendirilerek üretilebilmektedir [13]. Doğal gaz rezervuar alanları da CO₂ depolanması için en önemli alanlardır. Bu alanlar, genellikle derin rezervuarlar olup, yeraltı su girişine uygun ortamlar olmazlar. Ancak bazı bakteriyel kökenli sığ CH₄ (metan) gazı depoları tüketildikten sonra, eğer yeraltı suyu tarafından etkilenmemiş ise CO₂ gazının depolanması işlemlerinde kullanılabilir. Gazın tekrar enjeksiyon teknikleri bu alanlarda CO₂ depolanması için adapte edilerek karbondioksitin yeraltında depolanması sağlanabilmektedir [14].

Derin Tuzlu Formasyonlar

Derin tuzlu formasyonlar, yüksek miktarlarda çözülmüş tuz içeren suya doymuş derin sedimanter (tortul) kayalardan oluşmaktadır. CO₂ depolama kapasiteleri oldukça yüksek olan bu formasyonların, enjekte edilen CO₂'in kritik bir seviyede kalmasını sağlayacak yeterli bir derinlikte olması gerekir ($\geq 800-1000$ m) [3]. Bu nedenle tuzlu formasyonlarda depolama işleminde CO₂, tutma işlemini takiben eğer enjeksiyon için yeterli basınca sahip değilse sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Bu aşamadan sonra CO₂, tuzlu formasyonlarla bağlantıyı sağlayan kuyulara dağıtılır. Kuyu vasıtasıyla formasyona enjekte edilen CO₂, formasyon suyundan daha az yoğunluk ve viskoziteye sahip olduğundan değişen basıncın da etkisiyle kuyudan uzaklaşarak formasyon içerisinde yayılır [15].

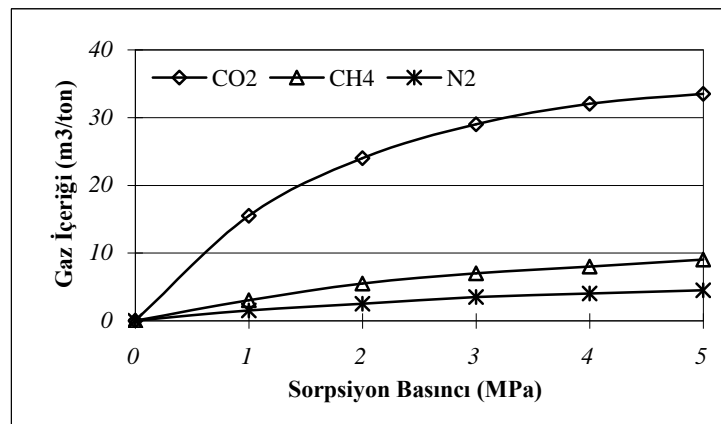
Tuzlu formasyonlara enjekte edilen CO₂, farklı fiziksel ve kimyasal tutunma mekanizmaları ile formasyon içindeki dengesini sürdürür. CO₂'in fiziksel tutunma mekanizması, gazın mevcut depolama hacmine bağlı olan serbest bir gaz ya da süper kritik akışkan olarak hareketsiz kaldığında iki şekilde meydana gelir. Birincisi, gazın belli bir bölgede hareketsiz kaldığı ancak akış yolu bulduğunda hareket edebileceği statik tutunma, ikincisi formasyon içindeki gözenek boşluklarında oluşan rezidüel tutunmadır. Bu tür bir fiziksel mekanizmada, CO₂ hareketsiz olarak kalır ve hareket edeceği bir yol olsa da formasyon ve CO₂ arasındaki yüzeysel gerilmeden dolayı belirli bir bölgede yada gözenek boşluklarında kalır [12].

CO₂'in formasyon içerisinde süper kritik bir akışkan ya da gaz olarak davrandığı fiziksel tutunma mekanizması hidrodinamik tutunma ya da gaz tutunması olarak da bilinir. Bu mekanizmayı CO₂'in yeraltı suyu içerisinde zamanla dağıldığı çözülebilirlik tutunma mekanizması ve özellikle kimyasal reaksiyonların rol oynadığı, CO₂'in formasyon içindeki ikincil karbonatların doğrudan ya da dolaylı çökmesine yol açan mineral gibi davrandığı mineral tutunma mekanizması takip eder. Hidrodinamik ve çözülebilirlik tutunma mekanizması depolamanın ilk safhalarında meydana gelen mekanizmadır. Çözülebilirlik tutunma mekanizmasında CO₂'in formasyon suyu içerisinde çözünmesi, formasyon suyunun asitliğini arttırdığı gibi çevre kayaç minerallerinin çözünürlüğünü de etkilemektedir. Bu mekanizmalar arasında en önemlisi ve en dengeli olanı başlıca etkenin kimyasal reaksiyonların olduğu, CO₂'in uzun dönemde hareketsiz olarak kalabilmesini sağladığı ve atmosfere dönüşünü engellediği için mineral tutunma mekanizmasıdır [16, 17, 18].

Kısa dönemli depolama alanı kapasitesinin yanı sıra CO₂ enjekte edilebilir oran, değişen basınç ve derin tuzlu formasyon geçirgenliğinin bir fonksiyonudur. Diğer taraftan tuzlu formasyonlara uzun dönemli CO₂ depolama kapasitesi ve CO₂ sızması açısından depolama güvenliği tutma mekanizmalarının bir fonksiyonudur [19, 20].

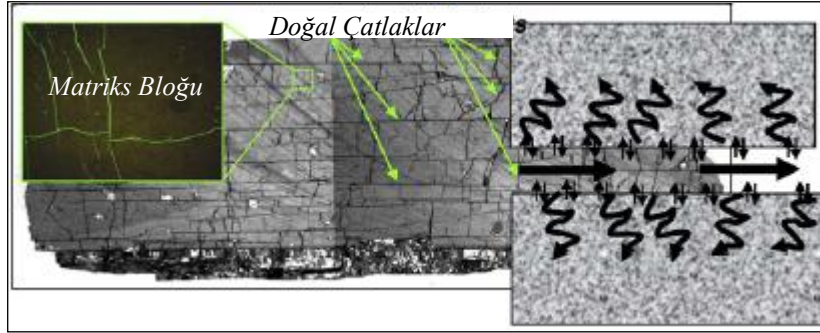
Kömür Damarları

Bazı durumlarda kömür damarları çok derinlerde yada ince damarlar halinde olduklarından ötürü işletilememektedirler. 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 [21, 22].



Şekil 5. Farklı gazların adsorpsiyon eğrileri [23]

Kömür damarlarında karbondioksitin depolanması petrol ve gaz rezervuarlarında ya da derin tuzlu formasyonlarda depolanmasından oldukça farklıdır. CO₂ tercihen kömür damarlarında metanın mevcut olduğu durumlarda metanla yer değiştirerek kömürün mikro gözeneklerinin yüzeylerine adsorplanır. Gözeneklerin hacimleri ve kömürdeki dağılımlarının hesaplanması, kömür damarlarında CH₄ ve CO₂ gibi gazların nasıl depolandığının anlaşılması açısından önemli olmaktadır. [21, 24].



Şekil 6. Kömür damarlarında metan akışının gerçekleştiği açıklıklar [25]

Kömürün kolloidal yapısı, kömürün hacminin 1-40 katı kadar metan gazını içinde tutmasına imkan vermektedir [26]. Yeraltında, kömürle beraberindeki metan gazı bir basınç altında denge durumundadır. Bu basıncın miktarı, kömürleşme derecesi (rank), damar derinliği ve kömürün gözenekliliği ile bağıntılıdır. Kömür damarları içerisinde depolanmış olan metan;

- Çatlaklarda, kırıklarda ve gözenek içinde serbest gaz olarak,
- Çatlaklarda ve gözeneklerde kömür yüzeyine tutunmuş olarak ve
- Su içerisinde çözünmüş olarak bulunmaktadır.

Bunlar arasında yalnızca ilk ikisi metan emisyonu açısından önemlidir. Kömürde oluşan gaz önce adsorpsiyon yoluyla tutulmaktadır. Adsorplama kapasitesinin üzerine çıktığı durumlarda, gaz, formasyon suyu içerisinde çözünmekte ve/veya serbest gaz olarak gözenek ve çatlaklarda birirmektedir [27]. Şekil 5, farklı gazların adsorpsiyon eğrilerini göstermektedir. Kömürler iki ayrı porozite sistemiyle karakterize edilmektedir. Bunlar iyi tanımlanmış doğal çatlaklar ve çatlaklar arasında heterojen gözenekli yapı içeren matriks bloklarıdır (Şekil 6). Doğal çatlaklar rezerv boyunca sürekli olan yüzey çatlakları ve süreksiz olan ve yüzey çatlaklarının kesişim bölgelerinde sınırlandırılan butt çatlaklardan oluşmaktadır. Çatlakların yerleşimi oldukça düzenlidir ve milimetreden santimetreye kadar değişmektedir. Ortama karbondioksit enjekte edilmesi durumunda kömür içerisinde belirtilen şekillerde depolanan metan karbondioksitle yer değiştirerek karbondioksitin depolanmasını sağlayacaktır.

4. Jeolojik Depolama Seçeneklerinin Karşılaştırılması

Takip eden çizelgede jeolojik depolama seçenekleri mevcudiyet, maliyet, depolama güvenliği ve uygulanabilirliği açısından karşılaştırılmıştır. Derin tuzlu alanlar mevcut rezervuarlar bakımından en yüksek depolama alanlarına sahipken onu sırasıyla tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri ve aktif petrol kuyuları takip etmektedir. Çizelgede 3'de farklı tipteki bu jeolojik formasyonlarda depolanabilecek en düşük ve en yüksek karbondioksit miktarı verilmiştir. Kömür yataklarının karbondioksit depolama kapasiteleri tam olarak bilinmemesine rağmen 3-200 Gton arasında olduğu tahmin edilmektedir.

Çizelge 2. Jeolojik depolama seçeneklerinin karşılaştırılması [28]

Depolama seçeneği	Nispi kapasite	Depolama güvenliği	Uygulanabilirliği
<i>Aktif petrol kuyuları</i>	Küçük	İyi	Yüksek
<i>Kömür yatakları</i>	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Bilinmiyor
<i>Tük. petrol ve gaz rezervleri</i>	Orta	Çok İyi	Yüksek
<i>Derin tuzlu formasyonlar</i>	Yüksek	Bilinmiyor	Bilinmiyor

Maliyetler açısından bir değerlendirme yapılırsa aktif petrol kuyularında CO₂'nin depolama maliyeti en az olmaktadır. Kömür yatakları, tüketilmiş petrol ve gaz rezervlerinde depolama maliyetleri aktif petrol kuyularına

oranla daha fazladır. Aktif petrol kuyuları ve tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri yüksek depolama güvenliğine ve uygulanabilirliğe sahipken diğer depolama seçenekleri için bu yöndeki çalışmalar devam etmektedir.

Çizelge 3. Farklı tipteki jeolojik formasyonların karbondioksit depolama kapasiteleri [29]

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

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

Petrol ve gaz rezervuarları aşağıda belirtilen nedenlerden ötürü CO₂'nin depolanmasında birincil seçenek olarak değerlendirilmektedir.

- Petrol ve gaz rezervuarları genellikle detaylı olarak araştırılmış yerlerdir ve CO₂ depolanması için güvenilir oldukları düşünülür. Çünkü bu rezervuarlar milyonlarca yıl boyunca petrol ve gaz tutmuşlardır.
- Petrol ve gaz rezervuarlarının jeolojik özellikleri daha önceden çalışılmış ve karakterize edilmiştir.
- Hidrokarbonların rezervuar içerisindeki hareketi ve yer değiştirme karakteristikleri bilgisayar programları kullanılarak tahmin edilebilmektedir.

Genellikle başlangıçtaki rezerv basıncının aşılması istenildiği için, depolama işlemlerinde maksimum depolama basıncında bir sınırlama olmaktadır. Küresel olarak 130 Gton CO₂ petrol üretimini artırmak amacıyla depolanabilirken, 900 Gton CO₂ tüketilmiş doğal gaz alanlarında depolanabilir.

Derin tuzlu formasyonlarda CO₂ depolama işlemi petrol alanlarındaki depolama işlemine göre oldukça kolaydır. Ancak bu formasyonlarda depolama işleminde enjeksiyon derinliği ve CO₂ yoğunluğu önemlidir [20]. Rezervuar içine enjekte edilen CO₂'in yayılımı, rezervuarın heterojen/homojenliğinden etkileneceği gibi depolanmış CO₂ içindeki diğer gaz ya da safsızlıklardan da etkilenir. Rezervuar ile CO₂ (daha hafif yoğunlukta) arasındaki yoğunluk farkı CO₂'in rezervuar üst kısımlarına doğru ya da üst kısımları boyunca hareket etmesine sebep olabilir. Rezervuarın nispeten homojen ve yüksek geçirgenliğe sahip olması CO₂ depolanması için çok daha uygundur. Diğer taraftan, rezervuar heterojenliğinin CO₂'in yoğunluk farkından dolayı rezervuar üst kısımlarına akışını yavaşlatmak ve yatay yayılımına sebep vermek gibi bir pozitif etkisi olabilir. Ancak bu durum çözülmeye arttırıcı yönde katkıda bulunduğu için uygun olmamaktadır. Depolanacak CO₂ içerisinde safsızlıkların (SO_x, NO_x, H₂S vs) varlığı CO₂'in tutulmasını, taşınmasını, rezervuara enjekte edilmesini, rezervuarda tutunma mekanizmasını ve depolama kapasitesini etkiler. CO₂ içerisindeki bu safsızlıklar, gazın sıkıştırılabilirliğini olumsuz yönde etkileyerek depolanması gereken toplam hacmin çok daha azı rezervuara gönderilir. Ayrıca bu safsızlıklar CO₂ ile birlikte rezervuara gönderildiğinde, CO₂'nin tek başına serbest bir gaz olarak yer kaplayacağı alanlarda kendilerine yer bularak CO₂ depo alanlarını sınırlayacaklardır [3]. Kuzey Amerika başta olmak üzere, Avrupa ve Kanada da yüzlerce alanlarda CO₂ tüketilmiş petrol ve gaz alanları ile derin tuzlu rezervuarlarda depolanmaktadır [12].

Kömür damarlarından karbondioksitin depolanması için jeomekanik, jeokimya, çoklu gaz absorpsiyonu ve kömürü etkileyen diğer tüm parametrelerin iyi anlaşılması ve bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Yöntemin başarılı olması için dikkat edilmesi gereken diğer bir konu kısa dönemli araştırma önceliğidir. Burada, laboratuvar ölçümlerinin yerinde yapılan ölçümler ile aynı olduğunu ispatlamak yöntemin desteklenmesine önemli katkılar sunacaktır. Örneğin, laboratuvar ortamında elde edilen tekli gaz absorpsiyonunun, çok farklı jeomekanik şartlar altındaki çoklu gaz absorpsiyonunu tam olarak tahmin etmek için kullanılabilmesi açık değildir. Kanada, Çin, Japonya ve Polonya'da kömür kökenli metanın üretiminin artırılması için kömür damarlarına CO₂ enjekte edilmektedir [22]. Ancak bu bölgelerde depolanmış karbondioksit miktarı nispeten düşüktür.

Gaz adsorpsiyonu öncelikle kömür matrisinin mikro gözeneklerinde oluşmaktadır. Mikro gözenekler toplam gözenek hacminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Metanın üzerine adsorplandığı kömür yüzeyi oldukça büyüktür (20-200 m²/g). Bu sebepten ötürü geleneksel gaz depolama alanlarıyla karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 5 kat daha fazla gaz içerebilmektedir. Kömür damarlarındaki CO₂ gazı toplam ayırma potansiyelini 0-1500 Gton arasındaki belirsizlikle birlikte yaklaşık 250 Gton olduğu tahmin edilmektedir. Bu değerlendirmelerde her bir metan molekülü için 2 karbondioksit molekülünün depolanacağı varsayımına dayandırılmıştır ve bu sebepten ötürü belirsizlikler içermektedir. Metan CO₂'ye oranla 21 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahip olduğundan açığa çıkan metan ele geçirilmeli ve çeşitli uygulamalarda kullanılmalıdır [13,30].

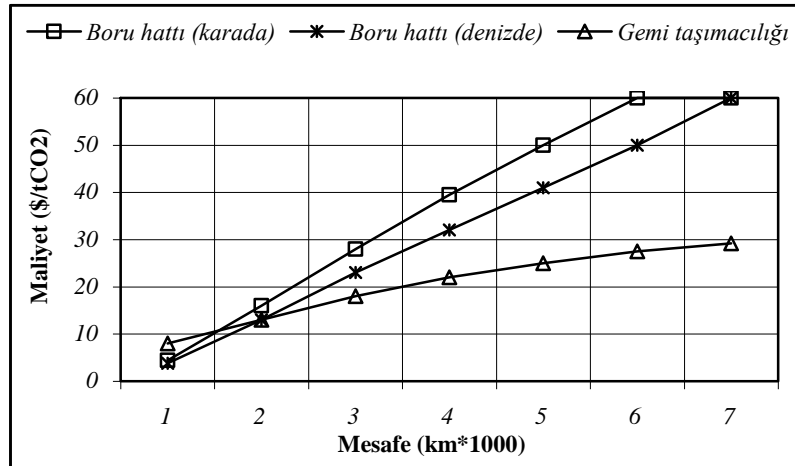
5. Depolama Maliyeti

Çizelge 4, karbondioksitin ele geçirilmesinden kömür damarında depolanmasına kadar geçen her bir aşamadaki birim maliyetleri göstermektedir. Anlaşılabacağı gibi karbondioksitin tutulması en fazla maliyete sahiptir ve onu sırasıyla karbondioksitin nakliyesi ve kömür damarlarında depolanması takip etmektedir.

Çizelge 4. Kömür damarlarında karbondioksit depolamanın maliyeti [31]

Karbondoksit tutma ve depolama işlemleri bileşeni		Maliyet (\$/tCO ₂)
Tutma	Güç üretiminde kömür ya da gaz kullanan fabrikalardan açığa çıkan karbondioksitin ele geçirilmesi	15-75
	Hidrojen ve amonyak üretimi yada gaz işletmesinde ele geçirme	5-55
	Diğer endüstriyel kaynaklardan ele geçirme	25-115
Nakliye		1-8
Jeolojik depolama		0,5-8

Taşıma maliyeti, taşıma miktarı ve taşınan uzaklığa göre değişmektedir. Şekil 7, taşıma maliyetinin farklı alternatifler için taşıma uzaklığına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Anlaşılabacağı gibi kısa mesafelerde borularla nakliye ekonomikken, uzak mesafelerde gemi taşımacılığı en ekonomik seçenek olmaktadır.



Şekil 7. Farklı nakliye seçeneklerinin maliyetlerinin taşıma mesafesine bağlı olarak değişimi [29]

Jeolojik formasyonlarda karbondioksitin depolanması diğer depolama seçenekleriyle kıyaslandığı zaman en ekonomik yöntem olmaktadır ve birim maliyeti depolanan karbondioksitin her bir tonu için 0,5-8 \$ olmaktadır (Çizelge 5). Jeolojik depolama seçenekleri arasında maliyetler açısından bir değerlendirme yapılırsa aktif petrol kuyularında CO₂'nin depolama maliyeti en az olmaktadır. Bunu sırasıyla kömür yatakları ve tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri takip etmektedir. Derin tuzlu formasyonlarda jeolojik depolamanın maliyeti ise net olarak bilinmemektedir [28].

Çizelge 5. Diğer depolama seçenekleriyle maliyet açısından kıyaslanması [9]

Karbondoksit ele geçirme ve depolama işlemleri bileşeni	Maliyet \$/tCO ₂
Jeolojik depolama	0,5-8
Jeolojik depolama: İzleme ve denetleme*	0,1-0,3
Okyanus depolama	5-30
Mineral karbonasyonu	50-100

6. Sonuçlar

İnsan faaliyetleri sonucu atmosferdeki gaz emisyonlarına en büyük katkıyı yapan gaz, karbondioksittir. Karbondioksitin, küresel sera gazlarına olan katkısı % 74 civarındadır. Artan nüfusla birlikte enerji gereksinimlerini karşılayabilmek için son yıllarda fosil yakıtların yakılmasına bağlı olarak ortaya çıkan karbondioksit emisyonlarında

yüksek artışlar gözlenmiştir. Karbondioksitin jeolojik formasyonlarda depolanma seçeneklerinin değerlendirildiği bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

- i. Jeolojik formasyonlarda karbondioksitin depolanması, diğer depolama seçenekleriyle kıyaslandığı zaman en ekonomik yöntem olmaktadır ve birim maliyeti depolanan karbondioksitin her bir tonu için 0,5-8 \$ olmaktadır.
- ii. Jeolojik depolama seçenekleri arasında maliyetler açısından bir değerlendirme yapıldığında, aktif petrol kuyularında CO₂'nin depolama maliyeti en az olmaktadır. Bunu sırasıyla, kömür yatakları ve tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri takip etmektedir. Derin tuzlu formasyonlarda jeolojik depolamanın maliyeti ise net olarak bilinmemektedir.
- iii. Derin tuzlu formasyonlar en yüksek depolama kapasitesine sahiptirler. Bu formasyonlardan sonra sırasıyla tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri ve aktif petrol kuyuları yüksek miktarda CO₂ depolama kapasitesine sahiptirler.
- iv. Aktif petrol kuyuları ve tüketilmiş petrol ve gaz rezervleri yüksek depolama güvenliğine ve uygulanabilirliğe sahipken diğer yöntemler için bu yöndeki çalışmalar devam etmektedir.
- v. Petrol ve gaz rezervleri sahip oldukları önemli avantajlardan ötürü CO₂ depolamada genellikle birincil tercihtirler. Bu alanlar detaylı olarak araştırılmış yerler olduğu için CO₂ depolanması için güvenilir oldukları düşünülür. Ayrıca, daha önceden mevcut kuyular ve alt yapılar CO₂ depolanması için kullanılabileceğinden yeniden bu tür hazırlığa gerek kalmayacaktır. Bu da hazırlık maliyetinde düşüşe yol açacaktır.

Kaynaklar

- [1] Kayhan, M., “Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye” <http://www.meteor.gov.tr/FILES/iklim/kuresel iklim degisimiveturkiye.pdf>, Erişim Aralık 2008.
- [2] Aksay, C., Ketenoglu, O. ve Kurt, L., “Küresel Isınma ve İklim Değişikliği”, SÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 25, 29-41, 2005.
- [3] Solomon, S., Carpenter, M. ve Flach, T., “Intermediate storage of carbon dioxide in geological formations: A technical perspective”. International journal of greenhouse gas control 2, 502-510, 2008.
- [4] Çepel, N. ve Ergün, C., 2005. Küresel Isınma ve Küresel İklim Değişikliği. <http://www.tema.org.tr/CevreKutuphanesi/KureselIsinma/pdf/KureselIsinma.pdf> Erişim 05 Mayıs 2008.
- [5] Kruger, D. ve Franklin, P., “The Methane to Markets Partnership: Opportunities for coal mine methane utilization”, 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, University Park, Pennsylvania, June 5-7, 2006.
- [6] Li, X., “Geological Storage of CO₂ in China: Potential and Early opportunities”, http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/18-xiaochun_li.pdf, Erişim Mart 2009.
- [7] Benson, S., “Overview of geological Storage of CO₂”, <http://dels.nas.edu/besr/docs/BENSON.pdf>, Erişim Şubat 2009.
- [8] Gibbins, J. ve Chalmers, H., “Carbon capture and storage” Energy policy 36, 4317–4322, 2008.
- [9] IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. ‘Carbon Dioxide Transport, Injection And Geological Storage’, www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_5_Ch5, Erişim Ocak 2009.
- [10] Zhang, Y., Oldenburg, C., Finsterle, S. ve Bodvarsson G., “System-level modeling for economic evaluation of geological CO₂ storage in gas reservoirs” Energy Conversion and Management, 48, 1827–1833, 2007.
- [11] B. van der Meer1., “Carbon Dioxide Storage in Natural Gas Reservoirs”, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, 60 No. 3, 527-536, 2005.
- [12] Bachu, S., “CO₂ Storage in Geological Media: Role, Means, Status And Barriers to Deployment”, Progress in Energy and Combustion Science, 34, 254–273, 2008.
- [13] Torvanger, A., Kallbekken S. ve Rypdal, K., 2004 ‘Prerequisites for Geological Carbon Storage as a Climate Policy’ <http://www.cicero.uio.no/media/2743.pdf>, Erişim Kasım 2008.
- [14] Dooley, J., Dahowski, T., Davidson, C., Wise, M., Gupta, N., Kim, S. ve 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, Erişim Aralık 2008.
- [15] Nordbotten, J., Celia, M. ve Bachu, S., “Injection and Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers: Analytical Solution for CO₂ Plume Evolution During Injection”, Transp Porous Med, 58, 339–360, 2005.

- [16] Mito, S., Xue, Z. ve Ohsumi, T., “Case study of geochemical reactions at the Nagaoka CO₂ injection site, Japan international journal of greenhouse gas control 2, 30, 9–31, 2008.
- [17] Barbara, C., Montegrossi, G., Vaselli, O., Tassi, F., Quattrocchi, F., ve Perkins, E., “Geochemical modeling of CO₂ storage in deep reservoirs: The Weyburn Project (Canada) case study”, Chemical Geology, Accepted Manuscript, 2009.
- [18] Zhang, W., Li, Y., Xu, T., Cheng, H., Zheng, Y. ve Xiong, P., “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, 161–180, 2009.
- [19] Qi, R., La Force, T ve Blunt, M., “Design of carbon dioxide storage in aquifers”, International journal of greenhouse gas control, 3, 195–205, 2009.
- [20] McCoy, S., “The Economics of CO₂ Transport by Pipeline and Storage in Saline Aquifers and Oil Reservoirs”, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering & Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, April, 2008.
- [21] Shi, Q ve Durucan, S., “CO₂ Storage in Deep Unminable Coal Seams” Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, 60 No. 3, 547-558, 2005.
- [22] Zarrouk, S. ve Moore, T., “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, 2009.
- [23] Durucan, S. ve Shi, J., “Improving the CO₂ well injectivity and enhanced coalbed methane production performance in coal seams”, International Journal of Coal Geology, 77, 214-221, 2009.
- [24] Yamazaki, T. ve Aso, K., “Jiro Chinju Japanese potential of CO₂ sequestration in coal seams”, Applied Energy, 83, 911-920, 2006.
- [25] Ozdemir, E., “Modeling of coal bed methane (CBM) production and CO₂ sequestration in coal seam”, International Journal of Coal Geology, 77, 145-152, 2009.
- [26] Dallegge, T. ve 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, Erişim Ekim 2008.
- [27] Gürdal, G. ve Yalçın, E., “Kömürde Gaz Birikmesini Kontrol Eden Parametreler-Genel Bakış”, Türkiye 8. Kömür Kongresi, Bildiriler Kitabı, 307-318, Mayıs 1992.
- [28] Herzog, H., Drake, E., Adams, E., “CO₂ Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change”, A White Paper, Final Report, <http://sequestration.mit.edu/pdf/WhitePaper.pdf>, Erişim Mart 2009.
- [29] IPCC, 2001. IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, Erişim Mart 2009
- [30] Wildenborg, T. ve Lokhorst, A., “Introduction on CO₂ Geological Storage. Classification of Storage Options”, Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, 60 No. 3, 513-515, 2005. [30] Ravagnani, G., Ligerio, E. ve Suslick, S., “CO₂ sequestration through enhanced oil recovery in a mature oil field”, Journal of Petroleum Science and Engineering, Baskıda, 2009.
- [31] Smith, A. ve Petrenel, S., 2007 ‘Carbon Capture and Storage II: Projects and Costs’, http://www.oilvoice.com/ov_features/Oct%20CCS_PartII_Projects+Costs.pdf, Erişim Şubat 2009.