

# 1

---

## Giriş

**ÇEVİRİ (translation into Turkish Language) :**  
**JEOLJİ MUH. Ender Ragıp ARSLAN**  
**arsender@hotmail.com**

## Özet

IPCC'nin Üçüncü Değerlendirme Raporu'na göre;

- Son 50 yıl boyunca gözlenen ısınmanın büyük oranda insan aktivitelerinden kaynaklandığına dair yeni ve güçlü kanıtlar bulunmaktadır.
- İnsanoğlunun etkilerinin 21. yüzyıl boyunca atmosfer bileşimini değiştirmeye devam edeceği sanılmaktadır.

İnsan aktivitelerinden kaynaklanan sera gazına en büyük katkıyı CO<sub>2</sub> yapmaktadır. Fosil yakıtlarının yakılması ya da biyokütlenin yakıt olarak kullanılması: yakılması, örneğin arazi genişletme sırasında ormanların yakılması, ve bazı endüstriyel ve kaynak çıkarma işlemleri ile karbondioksit salınır.

- 21. yüzyıl boyunca atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının değişiminde, fosil yakıtlarının yakılmasına bağlı olarak oluşan CO<sub>2</sub> emisyonları hemen hemen kesin dominant etkidir.
- Tüm senaryolarda ortalama küresel sıcaklığın ve deniz seviyesinin yükseleceği tahmin edilmektedir.

189 ülke tarafından onaylanan UN Çatısı İklim Değişikliği Konvansiyonelinin ana amacı, iklim sistemine tehlikeli antropojenik müdahalesini önleyecek seviyede sera gazı konsantrasyonlarının stabilizasyonunu sağlamaktır.

Atmosferdeki net CO<sub>2</sub> emisyonlarını düşürmek için teknolojik seçenekler:

- Enerji tüketiminin azaltılması, örneğin, enerji dönüşüm ve/veya kullanımının verimliliğinin artırılması (daha az enerji yoğunluklu ekonomik aktivitelerin çoğaltılması dahil).
- Daha az karbon içerikli yakıtlara geçiş, örneğin kömür yerine doğal gaz kullanımı.
- Çok az ya da hiç CO<sub>2</sub> salınmayan yenilenebilir enerji kaynakları ya da nükleer enerji kullanımının artırılması;
- Ormanlarda ve toprakta biyolojik absorpsiyon (soğurma) kapasitesinin artırılması ile CO<sub>2</sub> tecridi (seküstrasyonu);
- Karbondioksitin kimyasal ya da fiziksel olarak tutum ve depolaması.

İlk dört seçenek IPCC'nin önceki raporlarında ele alınmıştı; bu raporun konusu olan beşinci seçenek, Karbondioksitin Tutum ve Depolamasıdır (KTD). Bu yöntemde fosil yakıtların ve/veya yenilenebilir yakıtların yakılmasından ve endüstriyel işlemlerden kaynaklanan

karbondioksit, atmosferden çok uzun zaman dilinimi için tutulup uzaklaştırılabilir. Bu rapor, diğer iklim değişikliği azaltıcı seçenekler ile arasındaki ilişkinin anlaşılması için bilimsel, teknik, ekonomik ve politik boyutları hakkında bugünkü mevcut verilerin durumunu analiz etmektedir.

Her geçen gün atmosferdeki küresel karbondioksit konsantrasyonu artmaktadır. Eğer karbondioksitin küresel emisyonlarındaki bugünkü artış devam ederse, dünya için sera gazı konsantrasyonlarının stabilizasyonu bakımından işler pek de yolunda gitmeyecektir. 1995 ve 2001 yılları arasında global CO<sub>2</sub> emisyonları %1.4 oranında artmıştır ki bu oran, daha önceki 5 yılın emisyon artışına göre çok daha fazladır. Taşıma sektörü CO<sub>2</sub> emisyonu için en hızlı gelişen kaynak olurken, elektrik üretimi de diğer tüm endüstriyel sektörlerin birleşmesi ile oluşacak salınımı karşılayan en büyük CO<sub>2</sub> emisyon kaynağı olmuştur. Bundan dolayı UNFCCC'nin toplanmasının esas amacı, emisyonları azaltacak yöntemler ile mevcut ve yeni teknolojinin daha da yaygınlaşmasını sağlamaktır.

Emisyonların gerekli indirgeme ölçüsü, hedeflenen atmosfer konsantrasyonu ile emisyonlarına bağlı olacaktır. Belirlenen stabilizasyon konsantrasyonunun düşük olması ve indirgeme yöntemlerinin yokluğunda beklenen emisyon oranlarının daha yüksek olması, emisyonlarda indirgemenin daha çok miktarlarda ve uygulamanın erkenden gerçekleştirilmesini gerektirir. IPCC tarafından önerilen çoğu model çalışmalarında atmosferdeki karbondioksitin 550 ppmv seviyesindeki stabilizasyonu, 2100 yılında bugünkü oranlarının %7-70 emisyon indirgemesi gerektirir. Daha düşük konsantrasyonlar için daha fazla indirgeme gereklidir.

Bu raporun amacı, indirgeme rolü olarak karbondioksit tutum ve depolamasının karakteristiklerini değerlendirmektir. Bu işlemin üç esas elemanı; karbondioksitin tutulması, örneğin yakıt kullanım sistemlerinin gaz borularından çıkan gazın ayrıştırılması ve yüksek basınç altında sıkıştırılması; depolama sahasına nakli ve depolaması. Diğer indirgeme alternatifleri maliyetine yakın ya da daha düşük olacak tutum ve depolamanın indirgemesi azar azar olmakla beraber, iklim değişikliğine önemli derecede katkıda bulunması için CO<sub>2</sub> depolamanın her yıl gigaton karbondioksit miktarına uygulanması gerekir. Birkaç çeşit depolama rezervi, bu büyüklükteki depolama kapasitesini karşılayabilir. Bazı durumlarda karbondioksitin petrol ve gaz sahalarına enjekte edilmesi, maliyeti dengeleyecek gelişmiş hidrokarbon üretimine yol açabilir. CO<sub>2</sub> tutum teknolojisi, elektrik üretim tesislerinde ve diğer büyük endüstriyel emisyon kaynaklarında kullanılıyor olabilir; bundan başka enerji iletici olarak hidrojen üretiminde de uygulanıyor olabilir. Tutum işleminin bir çok aşaması, diğer amaçlar için geliştirilmiş mevcut teknoloji üzerine dayanmaktadır.

CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının iklim değişikliği indirgenmesinde üstleneceği rolü hesaplamak için bir çok faktör vardır. Bunlar, diğer seçenekler ile birlikte ya da ilgili emisyon indirgeme kapasitesi ve maliyeti, temel enerji kaynaklarına olan talep, uygulama dağılımı ve teknik risklerdir. Diğer önemli etkenler, sosyal ve çevresel sonuçlar, teknoloji ile depolamanın güvenliği ve bunların monitörlenmesi ile verifikasyonu ve de gelişmekte olan ülkelere teknoloji transferi olanağıdır. Bu niteliklerin çoğu, bir zincirin halkalarını oluşturur. Teknoloji üzerine yargılamanın nasıl yapıldığı gibi birçok faktörden etkilenen kamu görüşü, uygulamanın gerçekleştirilmesinde en önemli rolü üstlenecektir. Sonuç olarak; 21. yüzyıl boyunca atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının değişiminde, fosil yakıtlarının yakılmasına bağlı olarak oluşan CO<sub>2</sub> emisyonları hemen hemen kesin dominant etkidir ve tüm senaryolarda ortalama küresel sıcaklık ve deniz seviyesinin yükseleceği tahmin edilmektedir (IPCC, 2001c).

## 1.1 Rapora Giriş

IPCC Üçüncü Değerlendirme Raporu'nda "Son 50 yıl boyunca gözlenen ısınmanın büyük oranda insan aktivitelerinden kaynaklandığına dair yeni ve güçlü kanıtlar bulunmaktadır" görüşü belirtilmektedir. Ayrıca "İnsan etkisi, 21. yüzyıl boyunca atmosfer bileşimini değiştirmeye devam edeceği" de işaret edilmiştir. CO<sub>2</sub>, insan aktivitelerinden kaynaklanan en geniş ölçekteki sera gazıdır. Fosil yakıtlarının yakılması ya da biyokütle yakıt olarak kullanılması: yakılması, örneğin arazi genişletme sırasında ormanların yakılması, ve bazı endüstriyel ve kaynak çıkarma işlemleri ile karbondioksit salınır.

189 ülke tarafından onaylanan UN Çatısı İklim Değişikliği Konvansiyoneli, iklim sistemine tehlikeli antropojenik müdahalesini önleyecek seviyede sera gazı konsantrasyonlarının stabilizasyonunun sağlanması gerekliliğini belirtmiştir. Karbondioksitin antropojenik emisyonlarının indirgenmesine yönelik teknolojik seçenekler;

- (1) Fosil yakıtlarının kullanımının azaltılması,
- (2) Yüksek karbon içerikli fosil yakıtlarından düşük karbon içerikli fosil yakıtlara geçiş,
- (3) Fosil yakıt teknolojilerinin hemen hemen karbonsuz alternatifleri ile değiştirilmesi,
- (4) Doğal sistemler ile atmosferik karbondioksit absorpsiyonunun artırılması.

Bu raporda Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli yeni bir alternatif sunmaktadır: Karbondioksit tutum ve depolaması (KTD). Bu rapor, bu iklim değişikliği indirgeyici alternatifin teknik, ekonomik ve politik boyutlarını anlamak için mevcut verilerin durumunu değerlendirmektedir.

### 1.1.1 CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması nedir?

CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması, elektrik üretiminde olduğu gibi fosil yakıtların yakılmasından ya da doğal gaz işletmelerinde olduğu gibi fosil yakıtların hazırlanmasından kaynaklanan karbondioksitin tutulmasını kapsar.

Ayrıca biyokütle bazlı yakıtların yakılmasında ve hidrojen, ammonia, demir-çelik ve çimento üretimi gibi bazı endüstriyel işlemlerde uygulanabilir. Karbondioksit tutumu, karbondioksitin diğer gazlardan ayrılması işlemini gerektirir. Ardından karbondioksitin atmosferden çok uzun zaman diliminde boyunca depolanarak uzaklaştırılacağı depolama sahasına taşınması gerekmektedir. Karbondioksitin atmosferik konsantrasyonlarında önemli bir sonuç edinmek için, depolama rezervlerinin yıllık emisyonlara dair büyük olması gerekmektedir.

### 1.1.2 CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması hakkında neden özel rapor hazırlanmıştır?

Karbondioksitin tutum ve depolaması, CO<sub>2</sub> emisyonlarında ciddi bir indirgeme gerçekleştirmek için olanaklıdır. Esas olarak diğer amaçlara yönelik geliştirilen mevcut teknoloji ile uygulanabilse de, bu yöntemin iklim değişikliğine çare olabilecek muhtemel etkisi, diğer indirgeme seçenekleri kadar erken saptanamamıştır. Son yıllarda bu alandaki teknik literatür hızla gelişmiştir. İndirgeme seçeneklerine yönelik geniş bir yaklaşımda bulunmak için eksiklerin görülmesi, CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasına ilişkin sorunların potensiyel öneminin farkına varılması ve diğer alternatifler hakkındaki geniş literatürün tanınması için IPCC, CO<sub>2</sub> tutum ve depolama hakkında titiz bir değerlendirme hazırlamayı planlamıştır. Bu nedenlerden dolayı bu konu hakkında özel bir rapor hazırlanması uygun görülmüştür. Bu sayede diğer bilinen indirgeme seçeneklerinin mevcut verileri ile karşılaştırılabilir türde veri kaynağı edinilecektir.

### 1.1.3 Rapor hazırlıkları

Bu çalışma hazırlığında 2002 Kurulu, I. Ve II. Çalışma Grubunun uygulamaya yönelik tavsiyeleri ve III. Çalışma Grubunun yardımlarıyla IPCC'nin bir atölye (Workshop) planlamasına karar vermiştir. Bu atölye, 2002 Kasım'da Kanada, Regina'da kurulmuştur. Atölye'de üç seçenek düşünülmüştür: bir Teknik Rapor'un hazırlanması, bir Özel Rapor ya da Dördüncü Değerlendirme Raporu'na kadar herhangi bir hazırlığın ertelenmesi. Derin tartışmaların ardından Atölye, IPCC'e CO<sub>2</sub> tutum ve depolama hakkında Özel Rapor hazırlamasını önermiştir. IPCC'nin 2003 Şubat'taki Kurul Toplantısı'nda Panel, CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasına ilişkin sorunların önemini belirtmiş ve antropojenik karbondioksit tutumunun ve doğal rezervlerde depolamasının teknik, bilimsel ve sosyo-ekonomik anlamını değerlendirmek için Özel Rapor hazırlanmasının en uygun yol olacağına karar vermiştir. 2002 Kurul Toplantısı'nın kararını gerektiren rapor, şu sorunları ele almıştır:

- \* CO<sub>2</sub> kaynakları ve CO<sub>2</sub> tutum teknolojisi
- \* Karbondioksitin tutumdan depolama sahasına taşınması
- \* CO<sub>2</sub> depolama yöntemleri
- \* Teknolojisinin coğrafi dağılımı
- \* Tutulan karbondioksitin endüstriyel işlemlerde tekrar kullanılma olasılığı
- \* Diğer büyük ölçekli indirgeme alternatifleri ile karşılaştırıldığında CO<sub>2</sub> tutum ve depolamanın maliyeti ve enerji verimliliği

- \* Büyük ölçekte uygulama kavramında, tutum, taşıma ve depolama esnasında oluşacak riskler ve risk yönetimi ile çevresel etkileri
- \* CO<sub>2</sub> deposunun monitörleme metotları dahil, depolama güvenliği ve geçirimsizliği
- \* Depolama uygulamasının güçlükleri, enerji ve iklim modellerinde CO<sub>2</sub> tutum ve depolamanın modellenmesi
- \* Ulusal ve uluslar arası emisyon envanterleri, yasal yönleri ve teknoloji transferi kavramları.

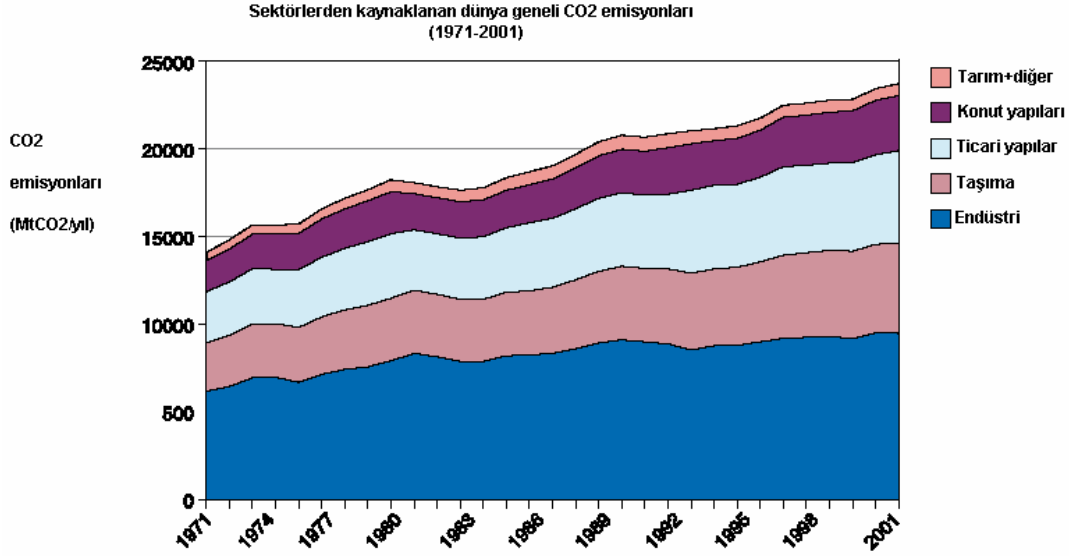
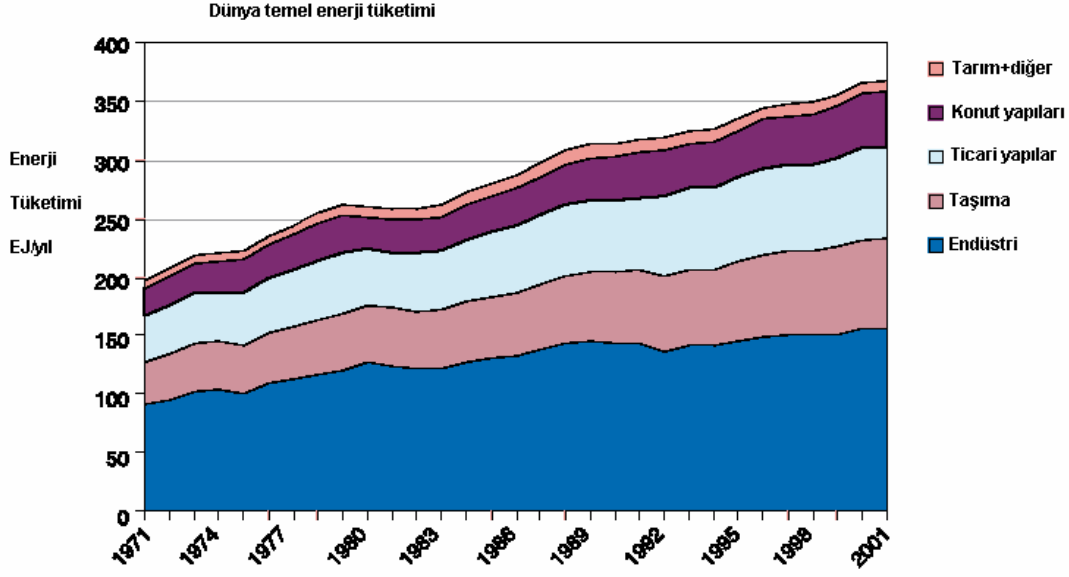
#### **1.1.4 Giriş Amacı**

Bu bölümde üç farklı yolla giriş sunulmaktadır: rapor için zemin ve kapsam, KTD teknolojisine giriş ve KTD değerlendirme metotları için bir iskelet sunmaktadır. Çünkü bu rapor, karbondioksitin fiziksel tutumu, nakli ve depolamasına ilişkindir ve karbon yerine, iklim değişikliği genel literatüründe olduğu gibi karbondioksitin fiziksel nicelikleri ele alınmıştır. Yine de sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla karbonun ton miktarları parantez içinde verilmiştir.

### **1.2 CO<sub>2</sub> tutum ve depolama için genel kapsam**

#### **1.2.1 Enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonları**

CO<sub>2</sub>, 21. yüzyılın başından itibaren artan bir eğilim göstermiştir (Şekil 1.1, 1.2). Fosil yakıtları, dünya genelinde kullanılan enerjinin (%86) dominant kalıbını oluşturur ve bugünkü antropojenik CO<sub>2</sub> emisyonlarının %75'ini karşılar. 2002'de dünya ekonomisinde, 149 exajoule (EJ) petrol, 91 EJ doğal gaz ve 101 EJ kömür tüketimi gerçekleşmiştir (IEA, 2004). Global temel enerji tüketimi, özellikle 1990 ve 1995 yılları arasında %1.4 oranında bir artış göstermiş (1995 ve 2001 yılları arasında yıllık %1.6); endüstri sektöründe %0.3, taşıt sektöründe %2.1, inşaat sektöründe %2.7 ve tarım ile diğer sektörlerde %2.4 yıllık artışlar gerçekleşmiştir.



Özel sektörlerde 1990-1995 yılları arasında endüstriden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyon artışı meydana gelmemiştir (1995-2001 arasında yıllık %0.9); taşıma sektöründe %1.7 ve yapım sektöründe %2.3 yıllık artış meydana gelirken, tarım ve diğer sektörlerde yıllık %2.8 düşüş gözlenmiştir (IEA, 2003).



Fosil yakıtların tüketimi ile doğal gazdan kaynaklanan toplam emisyonlar 2001 yılı itibari ile yıllık 24 GtCO<sub>2</sub> (6.6 GtC/yıl) olmuştur ki sanayileşmiş ülkeler enerjiye ilişkin CO<sub>2</sub> emisyonlarının %47 gibi bir oranından sorumludurlar.

Tablo 1.1 Fosil yakıt kullanımından oluşan CO<sub>2</sub> emisyon kaynakları (2001)

	Emisyonlar	
	MtCO <sub>2</sub> /yıl	MtC/yıl
Elektrik ve ısı üretimi	8,236	2,250
Otomobil üretimi	963	263
Diğer enerji endüstrileri	1,228	336
İmalat/İNŞAAT	4,294	1,173
Taşıma	5,656	1,545
Diğer sektörler	3,307	903
Ticari sektörler	1,902	520
<b>TOPLAM</b>	<b>23,684</b>	<b>6,470</b>

Kaynak: IEA, 2003

### 1.2.2 Sektörel CO<sub>2</sub> emisyonları

Dünya genelinde çeşitli kaynaklardan oluşan CO<sub>2</sub> emisyonları, IEA (2003) tarafından hesaplanmıştır. Bunlar Tablo 1.1’de görülmektedir ki, burada elektrik üretiminin en büyük emisyon kaynağı olduğu görülmektedir. Emisyonların büyük alanlardan kaynaklandığı diğer sektörler, Diğer Enerji Endüstrileri (petrol rafineleri, katı yakıt üretimi, kömür madenciliği, petrol ve gaz çıkarma işletmeleri ve diğer enerji üreten endüstriler) ile inşaat ve yapım sektörünün parçalarıdır.

Tablo 1.1’deki en büyük ikinci sektör olan taşıma sektörü son birkaç on yılda enerji ve endüstrinin gelişiminden daha hızlı bir gelişim göstermiştir (IPCC, 2001a); asıl farkı, taşıma emisyonlarının küçük, dağılmış kaynaklar halinde olmasıdır.

### 1.2.3 Diğer sera gazı emisyonları

Antropojenik iklim değişikliği esas olarak CO<sub>2</sub> emisyonlarından kaynaklanmakta, ancak diğer sera gazları da rol almaktadır. Biraz endüstriyel işlemlerden, biraz da arazi kullanımının değişmesinden (özellikle ormanların tahribi) antropojenik karbondioksitin

meydana gelmesinden bu yana sadece fosil yakıtlarının kullanılmasının iklim değişikliğine katkısı bile diğer tüm sera gazlarının toplamının yarısını karşılamaktadır.

Metan, karbondioksitten sonra gelen en önemli antropojenik sera gazıdır (şu anda toplam etkinin %20'sini karşılamakta) (IPCC, 2001b). Enerji sektörü önemli bir metan kaynağıdır ancak tarım ve evsel atıkların elden çıkarılması, küresel anlamda daha çok katkı yapmaktadır. Azotoksit, iklim değişikliğine direkt katkıda bulunmaktadır (şu anki sera gazlarının toplam etkilerinin %6'sını karşılar); esas kaynağı tarımdır ancak diğer kaynağı da bazı kimyasal maddelerin endüstriyel üretimidir; diğer azot oksitlerinin dolaylı etkisi vardır (IPCC, 2001c).

### 1.3 İklim Değişikliğini Önleme Seçenekleri

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Kongresinde belirtildiği gibi sera gazlarının atmosferdeki stabilizasyonunun sağlanması gerekir ancak bunun hangi spesifik seviyede yapılacağı üzerine araştırmalar devam etmektedir. Bununla birlikte, atmosfere karışan sera gazları oranının doğal sistemin temizlediği oranına eşitlendiği takdirde duraylılık sağlanabilir. Diğer bir deyimle antropojenik emisyonların atmosferik reaksiyonları, okyanuslardaki dönüşüm ve biyosferin kavraması gibi doğal işlemlerle kavrandığı oran ile dengelendiği takdirde stabilizasyon sağlanabilir.

Genel olarak daha düşük stabilizasyon hedefi ve daha yüksek emisyon değişim seviyesi, emisyonlarda gerekli olan daha da büyük indirgeme demektir ve daha erken meydana gelmelidir. Örnek olarak, karbondioksitin 450 ppmv'deki stabilizasyonu için CO<sub>2</sub>, 650 ppmv'deki stabilizasyonundan daha önce ve 20-30 yıl boyunca çok hızlı emisyon indirmeleri ile azaltılmalıdır (IPCC, 2000a). Bu da fiyat bakımından en uygun potansiyel indirgeme seçeneği ile çalışmayı gerektirir (IPCC, 2001a). Diğer bir sonuçta değişim senaryolarında gelecek ekonomi politikaları, özellikle iklim değişikliğine yönelik politika ve teknolojilerin gelişimi kadar sera gazı emisyonları üzerinde etkili olacağı belirtilmektedir. Bazıları da iklim değişikliğinin gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için, bunun bir çevre sorunundan çok, ekonomik gelişim sorunu olduğunu belirtmektedir (Moomaw ve diğ., 1999).

Üçüncü Değerlendirme Raporu (IPCC, 2001a), IPCC'nin ele aldığı birçok modellemelerde 550 ppmv seviyesindeki duraylılığın sağlanması için, 2100 yılında 2001 yılındakine göre %7-70 oranında global emisyonların indirgenmesi gereklidir. Eğer hedeflenen seviye daha düşük olursa (450 ppmv), daha da fazla indirgeme (%55-90)

gerekecektir. Bu amaçla %80 ya da daha yüksek indirgemeler için “derin indirgeme” (deep reductions) terimi kullanılmıştır.

Birçok özel senaryolarda, enerji temini ve kullanımından sağlanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını etkileyen temel faktörleri hesaplamak için aşağıdaki basit tanım kullanılmaktadır(Kaya, 1995).

CO<sub>2</sub> emisyonları=

$$\text{Popülasyon} \times \left( \frac{\text{KZS}}{\text{Popülasyon}} \right) \times \left( \frac{\text{Enerji}}{\text{KZS}} \right) \times \left( \frac{\text{Emisyonlar}}{\text{Enerji}} \right)$$

Bu tanım ile CO<sub>2</sub> emisyonlarının direkt olarak insan popülasyonuna, küresel zenginlik seviyesine, küresel ekonominin enerji yoğunluğuna ve üretim ve enerji kullanımından doğan emisyon artışına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bugün nüfus ve enerji düzeyi artarken KZS birimi üzerine düşen enerji miktarı da yavaş yavaş düşmektedir(IPCC, 2001d).

Geniş bir çeşitlilikteki teknolojik yöntemler, net CO<sub>2</sub> emisyonlarını ve/veya karbondioksitin atmosferik konsantrasyonlarını indirmek için imkan sunmaktadır ve daha da fazla seçenekler gelecekte geliştirilecektir. Hedeflenen emisyon indirgemeleri, ne tür tekniklerin kullanılacağını etkileyecektir.

### ***1.3.1 Enerji verimliliğinin artırılması***

Fosil yakıtlarının tüketiminin azaltılması, enerji dönüşüm verimliliğinin artırılması, taşıma ve atık kullanımı, geliştirilmiş daha az enerji yoğunluklu ekonomik aktivitelerin kapsamında sağlanabilir. Enerji dönüşüm verimliliği, elektrik üretimi ile artmaktadır. Örnek olarak geliştirilmiş türbinler; kombine ısıtma, soğutma ve elektrik-güç üretim sistemleri, CO<sub>2</sub> emisyonlarını daha ileride azaltabilir.

### ***1.3.2 Daha düşük karbon içerikli fosil yakıtlara geçiş***

Yüksek karbon içerikli fosil yakıtlardan düşük karbon içerikli fosil yakıtlara geçiş, doğal gazın uygun tedarik sistemlerinin bulunduğu günümüzde fiyat bakımından uygun olabilir. Elektrik üretiminde kömürden gaza geçiş için tipik emisyon indirgemesi, 420 kg CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup> dir(IPCC, 1996b). Eğer ısıtma, soğutma ve elektrik gücün kombine üretimi ile birleştirilirse emisyondaki indirgeme daha da fazla olacaktır. Bu, belirli bir santralden

emisyona indirgemesi için önemli bir katkı meydana getirecektir ancak düşük karbon içeriğindeki yakıtların temin edildiği santraller ile sınırlı kalacaktır.

### ***1.3.3 Düşük ve sıfıra yakın karbon enerji kaynaklarının kullanımının artırılması***

Durağan kaynaklardan sağlanan emisyonlardaki derin indirgeme, yaygın olarak yenilenebilir enerji ya da nükleer güce geçmekle sağlanabilir(IPCC, 2001a). İmkan dahilinde geniş bir yenilenebilir enerji tedarikleri mevcuttur: coğrafi konumuna bağlı olarak rüzgar, güneş, biyokütle, hidro, jeotermal ve gel-git gücü dahilinde ticari amaçlı olarak. Birçoğu, fosil yakıtların değiştirilmesi suretiyle elektrik üretimi, taşıt yakıtı, ısıtma soğutma alanlarında önemli katkılar sağlamaktadır(IPCC, 2001a). Yenilenebilir kaynakların birçoğu, maliyet, tedarik, arazi kullanımı ve diğer çevresel etkilere ilişkin kısıtlamalarla yüzleşmektedir. 1992 ve 2002 arasında kurulan rüzgar güç santralleri kapasitesi yıllık ortalama %30 oranında artış göstermiş ve 2002 sonu itibari ile 31 GW üzerine çıkmıştır(Gipe, 2004). Solar elektrik üretimi hızla artarak (yılda ortalama %30) esas olarak küçük ölçekte 2001 yılı için 1.1 GW kapasiteye ulaşmıştır(Dünya Enerji Değerlendirmesi, 2004). Bu da ancak bazı ülkelerde destekleyici politikalar kadar maliyet düşüşü ile gerçekleşmiştir. Biyokütleden elde edilen sıvı yakıtlar, ayrıca önemli derecede genişlemiş ve Brezilya gibi birkaç ülkede dikkat çekmiştir. Elektrik üretimi için kullanılan biyokütle yılda ortalama %2.5 oranında artmış ve kapasitesi 2001'de 210 GW<sub>e</sub> ulaşmıştır. Isıtma için kullanılan biyokütlenin 2001'deki kapasitesi 210 GW<sub>e</sub> olarak hesaplanmıştır. Elektrik için kullanılan jeotermal enerji de 3 GW<sub>e</sub> kapasite ile gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaygınlaşmaktadır(Dünya Enerji Değerlendirmesi, 2004). Bundan dolayı, bazılarında maliyetinin önemli olması ve potansiyeli bölgeden bölgeye değişmesine rağmen fosil yakıtlarının değiştirilmesi ile derin indirgemeleri sağlayabilecek birçok yöntem mevcuttur(IPCC, 2001a).

### ***1.3.4 Geliştirilmiş doğal, biyolojik yutak boyunca karbondioksitin tecridi***

Atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonunun saptanmasında doğal yutaklar, önemli bir rol oynamaktadır. Atmosferden karbon toplayacak kadar gelişmiş olabilirler. Ormanları ve toprakları içeren doğal yutak örnekleri bu amaçla kullanılabilir(IPCC, 2000b). Tarım ve orman uygulamalarında bu tür yutakların geliştirilmesi, depolama kapasitelerinin artmasında önemlidir ancak bu da arazi kullanım çalışmaları ve sosyal ya da çevresel faktörler ile

sınırlıdır. Biyolojik olarak depo edilen karbon, büyük miktarlarda salınmış bulunan CO<sub>2</sub> içerebilir. Fakat depolama sürekli olmayabilir.

### ***1.3.5 CO<sub>2</sub> tutum ve depolama***

Bu yöntem, yakıt yakılmasıyla ortaya çıkan ya da endüstriyel işlemlerden salınan karbondioksitin tutulmasını ve sonrasında atmosferden uzun vadede uzaklaştıracak şekilde depolanmasını içerir. Üçüncü Değerlendirme Raporu'nda (IPCC, 2001a) bu yöntem birkaç belgelenmiş proje ile desteklenmiştir(Norveç'te Sleipner Vest gaz projesi, Kanada ve ABD'de geliştirilmiş petrol kurtarımı uygulamaları ile Meksika ve Kanada'da geliştirilmiş kömür yatağı metan kurtarımı). Ayrıca karbondioksitin tükenmiş petrol ve gaz sahalarında, derin tuz formasyonlarında ve okyanuslarda depolanmasına yönelik geniş kapasitesi kadar, fosil yakıt rezervleri ve kaynaklarının potansiyeli üzerine de çalışılmıştır. CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının ana güç(elektrik) santralleri, ammonia, demir ve çelik santralleri gibi büyük kaynakları için dağılmış emisyon kaynaklarına göre daha uygun olduğunu göstermektedir.

Bu tür teknolojinin potansiyel katkısı, çeşitli faktörlerden etkilenecektir: diğer yöntemlere oranla maliyeti, karbondioksitin depoda kalacağı süre, depolama sahasına nakil yolu, çevresel sorunlar ve bu yöntemin kabul edilebilirliği.

Son zamanlarda CO<sub>2</sub> tutum ve depolama ile kullanılan biyokütle enerjisinin (BECS) atmosferden CO<sub>2</sub> temizliği için avantajlı olduğu görülmüştür. Çünkü depolanan CO<sub>2</sub>, atmosferden CO<sub>2</sub> soğuran biyokütleden ileri gelmektedir(Möllersten ve diğ., 2003; Azar ve diğ., 2003). Tüm bu etkisi, "negatif net emisyonları"(negative net emissions) olarak adlandırılmıştır. BECS günümüzde teknik literatürde ve politik tartışmalarda küçük bir analize sahip yeni bir kavramdır.

### ***1.3.6 CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması potansiyeli***

Sera gazı emisyon indirgemesinin dünya genelindeki potansiyeli için yukarıda bahsedilen teknolojik yöntemlerin kullanılması ile 2010 yılı itibari ile 6,950 ve 9,500 MtCO<sub>2</sub>/yıl (1,900-2,600 MtC/yıl) olarak saptanmıştır ki bu da global emisyonların yaklaşık %25-40 oranına eşittir. Potansiyel, 2020 yılı itibari ile 13,200-18,500 MtCO<sub>2</sub>/yıl (3,600-5,050 MtC/yıl) oranına ulaşmaktadır. Bu hesaplamaların dayandığı deliller kapsamlıdır ancak bazı kısıtlamaları vardır: örneğin, kullanılan veriler 1990'lı yıllara aittir ve o zamandan bu yana yeni teknolojiler ortaya çıkmıştır. Ayrıca henüz dünya genelinde kapsamlı bir teknolojik ve

ekonomik potansiyel çalışmaları yapılmamıştır; bölgesel ve ulusal çalışmalar genellikle farklı konuları ele almış ve anahtar parametreler üzerinde farklı değerlendirmeler yapılmıştır(IPCC, 2001a).

Üçüncü Değerlendirme Raporu, yakın dönemde kömürden 73-183 MtCO<sub>2</sub>/yıl (20-50 MtC/yıl) ve doğal gazdan da buna yakın bir miktar ile CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması potansiyelinin makul olduğunu belirtmesi ile birlikte kısa vadede de (2020'ye kadar) en olası emisyon indirgemesinin enerji verimliliğinin artırılması olduğunu ortaya koymuştur (IPCC,2001a). Bununla birlikte uzun vadede iklim değişimine karşı yukarıda bahsedilen indirme yöntemi ele alındığında, ki bu yöntem ilgisiz gitgide artmaktadır, bu teknolojinin ayrıntılı potansiyel çalışmaları önem kazanmaktadır.

### ***1.3.7 İndirgeme seçeneklerinin karşılaştırılması***

İndirgeme seçeneklerinin karşılaştırılmasında bir çok etken göz önüne alınmalıdır. Bu bölümde KTD konusunda karar verecek yetkililere yönelik birçok etken ele alınacak, ayrıca diğer indirme seçenekleri ile karşılaştırılması gibi daha geniş sorunlar değinilecektir. Bu soruların cevabı, uygulanacak her bir indirme seçeneklerinin potansiyelleri, ulusal kaynak mevcudiyeti, ilgili ülkede teknolojinin temini, emisyon indirgemesinde ulusal sorumluluk, finans kaynağı, kamu algısı, muhtemel altyapı değişiklikleri, çevresel etkiler gibi birçok etkene dayanmaktadır. Bu açıdan her biri için konuyla ilişkili şartlar araştırılmalı (örn, diğer yöntemler ile nasıl mukayese edilmeli?), teknoloji ilerledikçe değişebilecek şartlar kesin olarak ortaya konulmalıdır(örn, maliyetinin ne kadar olacağı?).

IPCC (2001a) enerji verimliliğindeki gelişmelerin 30 US\$/tCO<sub>2</sub> (100 US\$/tC) fiyatından düşük bir maliyette eldeki teknolojilerin kullanılması sonucu global CO<sub>2</sub> emisyonlarının %30 oranında 2000 yılı seviyesi altına indirebilecek potansiyel bulundurduğunu dikkat çekmiştir. Bu indirgemenin yarı miktarı, sıfır ya da “net negatif maliyet” ile eldeki teknoloji ile sağlanabilir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının geniş kullanımı da önemli bir potansiyele sahiptir. Ormanlarda karbon seküstrasyonu da 0,8-1,1 US\$/tCO<sub>2</sub> (3-4 US\$/tC) maliyet ile ticari olarak dikkatleri üzerine çeken yakın vadedeki umut verici bir indirme seçeneği olarak düşünülmektedir(IPCC, 2000b).

Farklı indirme seçenekleri karşılaştırılırken sadece maliyet açısından değil, emisyon indirme kapasitesi bakımından da ele alınması önemlidir. Bunu yapmak için Marjinal Abatman Maliyet eğrilerinin kullanılması, potansiyel kapasiteyi hesaplamak için uygun bir yoldur. Tüm indirme seçenekleri için bulunmamakla beraber, geliştirilmektedir.

## 1.4. CO<sub>2</sub> tutum ve depolama özellikleri

CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının indirgeme yöntemi olarak nasıl kullanılacağını anlatmak için aşağıda bazı anahtar özelliklerden kısaca bahsedilmiştir.

### 1.4.1 CO<sub>2</sub> tutum ve depolama kavramının ve gelişiminin tanımı

CO<sub>2</sub> tutumu, tipik olarak bir gaz akımından ayrıştırılmasını kapsamaktadır. Uygun teknikler 60 yıl önce şehir gazı üretiminde geliştirilmiştir. İlerleyen zamanlarda kömür ve gaz yakılan santrallerin baca gazından CO<sub>2</sub> tutulması gibi benzeri amaçlara yönelik uyarlanmıştır. Bu gelişmeler, baca gazındaki çözücünün oksidasyonunu engellemeye yönelik ileri işlemleri gerektirmiştir. Değişik türdeki solventler ile ayrıştırmanın yeni metotları daha sonraları geliştirilmiştir. Bu teknik günümüzde yaygın olarak doğal gaz akımından CO<sub>2</sub> ve asit gazlarının ayrıştırılmasında kullanılmaktadır. Horn ve Steinberg (1982) ile Hendriks ve diğ., (1989), bu çeşit bir teknolojinin iklim değişikliğini indirgemedeki uygulanacağını ilk düşünenler arasındadır. CO<sub>2</sub> uzaklaştırılması günümüzde fosil yakıtlardan hidrojen üretiminde kullanılmaktadır; Audus ve diğ., (1996), bu işletmelerde tutum ve depolamanın iklim koruma yöntemi olarak uygulanabileceğini ele almıştır.

Karbondiyoksit muhtemel depolama sahasına naklinde hacmini azaltmak için sıkıştırılır; “yoğun fazda” (dense phase) CO<sub>2</sub>, gazın standart sıcaklık ve basınç altındaki hacminin yaklaşık %0.2’sini kaplamaktadır. Yıllık birkaç milyon ton CO<sub>2</sub>, günümüzde boru hatları, gemi ya da tankerler ile taşınmaktadır.

Yöntem olarak karbondiyoksit depolaması için bir çok seçenek mevcuttur. Bu kavramın ilk önerisi (Marchetti, 1977) ile okyanuslardaki CO<sub>2</sub> enjeksiyonunun sonucunda yüzyıllar boyunca karbondiyoksit derin sularda kalacağı tahmin edilmiştir. Atmosfere sera gazı doldurulması yerine önemli bir sonuç elde etmek için, bu yöntemlerle depolanması gereken CO<sub>2</sub> miktarının günümüzde atmosfere salınan karbondiyoksit kıyasla büyük miktarda olması gerekmektedir ki bu miktar, yıllık gigatonlarla ifade edilir. Jeolojik formasyonlar gibi doğal rezervler ya da derin okyanuslar (Cole ve diğ., 1993) tek başına bu miktardaki kapasiteyi karşılayacak potansiyel depolama sahaslarıdır (Avrupa’daki formasyonların kapasitesi, ilk Holloway ve diğ., tarafından, 1996’da değerlendirilmiştir). Diğer depolama seçenekleri, ileride bahsedildiği üzere ayrıca ele alınmıştır.

Karbondiyoksit yeraltına enjeksiyonu, hidrokarbon araştırma ve üretim için petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan ve ABD’de uygulandığı gibi atıkların yeraltına enjeksiyonu için

kullanılan benzer teknolojileri gerektirir. Jeolojik formasyonlara kuyular açılabilir ve 1970'lerden beri uygulanan geliştirilmiş petrol kurtarımı için enjekte edilen CO<sub>2</sub> ile aynı yolla enjeksiyon yapılabilir (Blunt ve diğ., 1993; Stevens ve Gale, 2000). Bazı durumlarda bu yolla geliştirilmiş hidrokarbon üretimi elde edilebilir ve böylece maliyet düşürülebilir. Bu öneriye ek olarak tuz formasyonlarına (Koide ve diğ., 1992) ya da işletilemeyen kömür yataklarına (Gunter ve diğ., 1997) enjeksiyon yapılabilir; daha ilerideki durumlarda yakıt olarak kullanılacak metan kazanımı elde edilebilir. Dünyanın ilk ticari ölçekteki CO<sub>2</sub> depolama faaliyeti, 1996'da Kuzey Denizi altındaki derin tuz formasyonlarında uygulanmıştır (Korbol ve Kaddour, 1995; Baklid ve diğ., 1996).

Monitörleme hem depolama sahasının yönetimi hem de indirgenen CO<sub>2</sub> emisyonlarının eğiliminin değerlendirilmesi amacıyla gereklidir. Petrol ve gaz endüstrisinde geliştirilen sismik ölçüm yöntemleri, karbondioksitin yeraltında incelenmesi için uygun olacağı görülmüştür (Gale ve diğ., 2001). Dolayısıyla bu tür rezervlerde depolanan karbondioksitin monitörlenmesinde temel oluşturabilir.

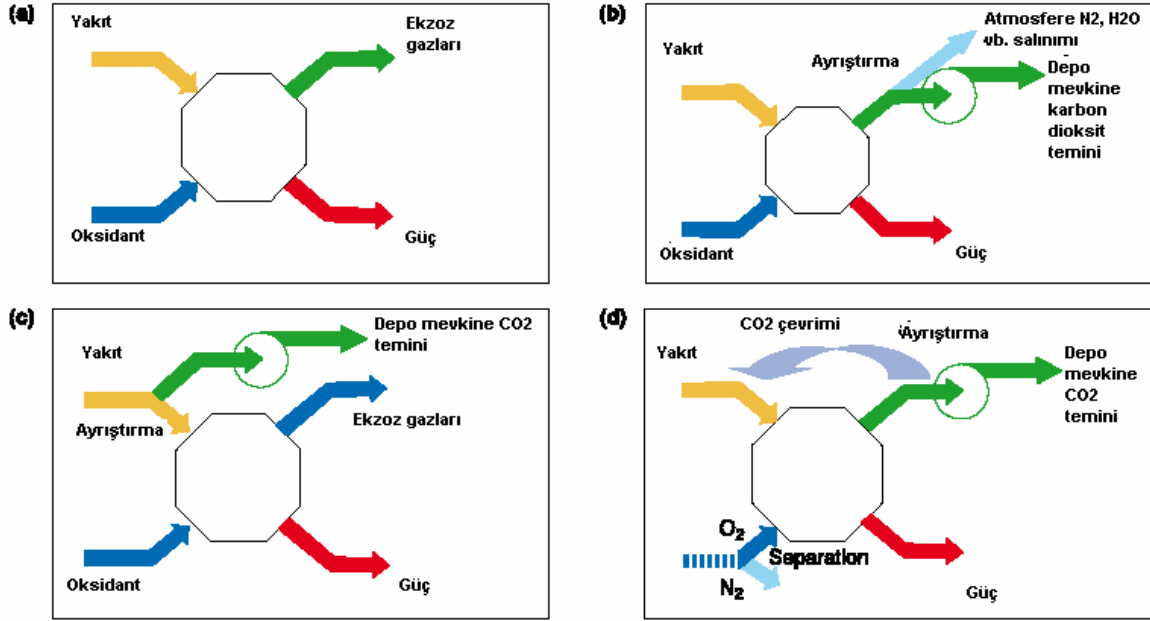
Yoğun fazdaki karbondioksitin depolanması için birçok seçenek düşünülmüştür: örneğin, karbondioksitin kimyasal madde ve diğer ürünlerin yapımında kullanılması (Aresta, 1987), katı bir formda depolama için mineral karbonatlarına yerleştirilmesi (Seifritz, 1990; Dunsmore, 1992), katı CO<sub>2</sub> olarak depo edilmesi ("kuru CO<sub>2</sub>") (Seifritz, 1992), CO<sub>2</sub> hidratları olarak (Uchida ve diğ., 1995), ya da katı karbon olarak (Steinberg, 1996). Diğer bir öneri de biyo-yakıtı dönüşebilecek bir ürün meydana getirmesi amacıyla mikro-yosun (micro-algae) kullanılarak baca gazından karbondioksitin tutulmasıdır.

CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının bir indirgeme yöntemi olarak potansiyel rolü, entegre enerji sistem modelleri kullanarak incelenmelidir (ilk çalışma Yamaji (1997) tarafından yapılmış, ardından birçok kez çalışılmıştır).

Bilinen teknolojilerin kombinasyonuna dayanan CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması kavramı, bundan böyle iklim değişikliğini indirgemeye yönelik yeni bir amaçla uygulanmaktadır. Emisyonlarda derin indirgemelere imkan kılacak bu tekniğin ekonomik potansiyeli, Edmonds ve diğ., (2001) tarafından incelenmiştir. İleriki konularda ayrıntılı olarak ele alınacaktır.



### 1.4.2 CO<sub>2</sub> tutum sistemleri



Şekil 1.3

Şekil 1.3’de CO<sub>2</sub> tutum ve depolamanın elektrik üretiminde nasıl kullanıldığı açıklanmaya çalışılmıştır. Normal bir fosil yakıt kullanılan santraldeki durum şekil 1.3a’da gösterilmiştir. Burada yakıt (örn, doğal gaz) ve bir oksidant (tipik olarak hava) yakım sistemine beraber getirilmektedir; elde edilen ısı elektrik üreten türbini/jeneratörü çalıştırmaktadır. Açığa çıkan gazlar atmosfere salınmaktadır.

Şekil 1.3b’de baca gazından, diğer bir ifadeyle yakım sonrasında karbondioksitin tutulması ile donatılmış bir santral gösterilmektedir. CO<sub>2</sub> tutulduğunda depolama sahasına taşınmak için sıkıştırılmaktadır. Şekil 1.3c’de karbondioksitin yakım öncesinde uzaklaştırıldığı diğer yöntem gösterilmiştir (yakım öncesi dekarbonizasyon). Şekil 1.3d’de yakım öncesi azotun havadan ayrıştırıldığı diğer bir seçenek görülmektedir; yani oksidant olarak saf oksijen sağlanmaktadır. Bu çeşit bir sistem genel olarak oxy-yakıt yakımına tercih edilmektedir. Bu işlemin gerekli bir parçası, karbondioksit ya da suyun yakım sıcaklığını düşürmek için tekrar kullanılmasıdır.

### **1.4.3 Muhtemel kullanım alanları**

Şimdiye kadar CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması için incelenen esas uygulama güç üretimindedir. Bununla birlikte diğer büyük enerji içerikli endüstrilerde (örn, çimento sanayi, petrol rafineleri, ammonia üretimi, demir-çelik sanayi) özel santraller de büyük miktarlarda CO<sub>2</sub> salınımı yapmaktadırlar. Dolayısıyla bu endüstrilerde de bu teknoloji kullanılabilir. Hidrojen ya da ammonia üretimi gibi bazı durumlarda açığa çıkan gazların (yoğunlaştırılmış CO<sub>2</sub>) ayrıştırılmasında maliyet düşebilir.

Bu teknoloji için öngörülen esas uygulamalar büyük miktarlarda CO<sub>2</sub> üreten geniş, merkezi avantajlı yerlerdedir. Ancak Tablo 1.1'de görüldüğü üzere yapılar, özellikle taşıtlar gibi dağılmış kaynaklardan açığa çıkan emisyonların oranı yaklaşık olarak %38 civarındadır. Bunlar genel olarak, karbondioksitin küçük miktarlarının taşınmasının maliyeti ve zorlukları kadar tutum işlemine ilişkin ekonomik boyutundan dolayı, CO<sub>2</sub> tutumunun direkt olarak uygulaması için pek de elverişli görülmemektedir. Dağılmış kaynaklardan doğan emisyonların indirgenmesine yönelik farklı bir yaklaşım da, biyoyakıt, elektrik ya da hidrojen gibi kullanımından sıfır net CO<sub>2</sub> emisyonu oluşacak bir enerji taşıyıcıları ile desteklenmeleridir (Johansson ve diğ., 1993). Fosil yakıtlarından edinilen elektrik ya da hidrojen CO<sub>2</sub> tutumu ile üretilebilir ve böylece üretim sahasında CO<sub>2</sub> emisyonlarının büyük bir oranında korunmuş olunur (Audus ve diğ., 1996). Çeşitli uygulamalardaki maliyet, uygulanabilirlik ve çevresel etkiler ileride ele alınmıştır.

### **1.4.4 Santral ölçeği**

Gereken tesis ölçeği hakkında, 500 MW<sub>e</sub> üretim yapan kömür yakıtlı bir güç santralini ele alarak fikir edinebiliriz. Burada atmosfere yaklaşık 2,9 MtCO<sub>2</sub>/yıl (0,8 MtC/yıl) salınım gerçekleşecektir. CO<sub>2</sub> tutum ve depolama içeren bir santral ile kıyaslandığında, aynı miktardaki elektrik üretimi ve karbondioksitin yanma sonrası %85 oranının tutulması ve nakli için sıkıştırılması sonucu atmosfere 0,6 MtCO<sub>2</sub>/yıl (0,16 MtC/yıl) salınım gerçekleşecektir. Diğer bir ifadeyle tutumun olmadığı durumdan %80 daha az salınım meydana gelmektedir. Bu ikinci santralde ayrıca 3,4 MtCO<sub>2</sub>/yıl (0,9 MtC/yıl) depolamaya gönderilecektir. Buradan görüldüğü gibi tutum ve sıkıştırma işlemi içeren santralde, diğer santrale oranla daha fazla CO<sub>2</sub> miktarı elde edilmektedir (bu örnekte %38 daha fazla). Bu sonuç tutum tesisi ve CO<sub>2</sub> sıkıştırılması için enerji gereksiniminden kaynaklanmaktadır. Tutulan bu oran (%85), mevcut teknoloji ile kolaylıkla sağlanabilecek düzeydedir; daha yüksek bir oranda tutum

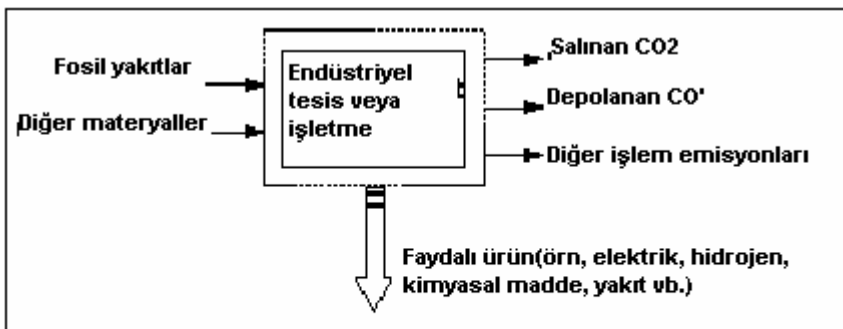
gerçekleşmesi olasıdır ve bu proje duruma göre değişecektir. Bu sonuç, CO<sub>2</sub> tutum tesisinin işletme boyutunu göstermekte ve özel güç santralleri ve benzeri tesislerden emisyonlarda derin indirgemeleri başarabilecek CO<sub>2</sub> tutumunu örnekle açıklamaktadır(IEA GHG, 2000a).

Bu boyuttaki bir santral 300-400 mm çapındaki boru hatları ile ileride sıkıştırma işlemi gerektirmeden yüzlerce kilometre uzaklıklarda CO<sub>2</sub> kontrolünü gerçekleştirebilir; daha uzak mesafelerde basıncın devamlılığı için ekstra sıkıştırma işlemi gerekebilir. Daha büyük boru hatları, uzun mesafelerde daha düşük birim maliyet ile birkaç santralden CO<sub>2</sub> taşıyabilir. Jeolojik bir formasyona enjeksiyonu gibi CO<sub>2</sub> depolaması, yıllık birkaç milyon ton CO<sub>2</sub> içermesi muhtemeldir ancak kesin miktarı bölgeden bölgeye değişir.

### 1.5. KTD'nin çevresel etkiler ve maliyet bakımından değerlendirilmesi

KTD'nin kullanımına bakıldığında maliyet kadar kaynak ve çevresel yönden önemli hususların bulunduğu görülmektedir. KTD sisteminin bu açılarından tüm evrelerini gözden geçirecek ve bu ya da diğer indirim seçenekleri için kullanılacak sistematik bir değerlendirme sürecine gereksinim vardır. Sistematik bir biçimde çevresel etkileri analiz edecek iyi kurulmuş bir metot, Yaşam Döngüsü Analizi (LCA, Life Cycle Analysis) tekniğidir. Bu teknik Uluslararası Standart'ta (International Standard, ISO, 1997) düzenlenmiştir. Gerekli olan ilk adım bir sistem sınırı değerlendirmesi ve ardından KTD sistemi ile KTD bulundurmeyen referans sistemi arasındaki mukayesedir. Arasındaki fark, KTD'nin çevresel etkisini tanımlayacaktır. Benzer bir yaklaşım, KTD'nin kaynak ve/veya maliyet açısından sistematik değerlendirmesini sağlayacaktır.

#### 1.5.1 Sistem sınırının ortaya konulması



Şekil 1.4 Karbondioksit salınımı yapan bir santral veya işletme için sistem sınırı

Genel bir sistem sınırı, şekil 1.4'te malzemenin sistem içerisine ve dışına akış diyagramı ile birlikte verilmiştir. Ana akış diyagramı, bir enerji ürünü (elektrik ya da ısı gibi) ya da hidrojen, çimento, kimyasal maddeler, yakıtlar ve diğer maddeler gibi ekonomik değeri bulunan diğer ürünleri kapsayabilen ürün akımıdır. KTD'nin çevresel ve kaynak bakımından analizinde bu rapordaki genel kullanımı tüm sistem girdi ve çıktıları, ürünün bir birim miktarına dengelemiştir(örn, elektrik). Daha ileride anlatılacağı üzere bu kavram, yöntemin etkililiği için gereklidir; özellikle de üretilen karbondioksitin toplam miktarının ek ekipman ve KTD tesisinin işletimine bağlı olarak artması durumunda. Aksi halde tutulan CO<sub>2</sub> miktarı gibi basit bir parametre de yanıltıcı olabilir.

İşleme sokulan girdiler, enerji gereksinimleri karşılamak için kullanılan fosil yakıtları kadar işlemlerde kullanılan diğer malzemeleri (su, hava, kimyasal maddeler, beslenme stoğu ya da enerji kaynağı olarak kullanılan biyokütle) de içermektedir. Yenilenebilir ya da yenilenmeyen kaynakları da kapsayabilir. Çevreye verilen çıktılar depolanan ve salınan CO<sub>2</sub> ve atmosfere, suya ya da toprağa salınan diğer gazlı, sıvı ya da katı emisyonları içerir. Diğer emisyonlardaki değişimler (sadece CO<sub>2</sub> değil) de önemli olabilir. Sadece KTD ile ilgili olabilecek diğer etkenler, atmosferden ayrılan karbondioksiti tutma kabiliyeti ve önceden kestirilemeyen etkileri kapsar(örneğin, iklim değişikliği sonucu).

Bu yolla KTD seçenekleri arasında sağlam bir karşılaştırma yapılabilir. Diğer yollarla elektrik üretiminden (örn, yenilenebilir enerji kullanımı) CO<sub>2</sub> emisyonlarının indirgenmesi amacıyla kurulacak KTD bulunduran güç santralının karşılaştırılması için geniş bir sistem sınırı çalışılmalıdır.

### ***1.5.3 Maliyet değerlendirmesi***

CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının maliyeti tipik olarak üç ayrı elemandan oluşturulur: tutum maliyeti(sıkıştırma dahil), nakliyat maliyeti ve depolama maliyeti(monitörleme masrafları ve gerekirse sızıntı düzenlemesi maliyeti dahil). EOR'dan (eğer uygunsa) sağlanacak kazanç, maliyeti kısmen düşürmeye yardımcı olacaktır.

Maliyet verilerinin elde edilmesinde çeşitli yöntemler mevcuttur(Freund ve Davison, 2002). Genel olarak tercih edilen bir yol, CO<sub>2</sub> tutumundan kaynaklanan ek enerji(ve emisyonlar) hesabında önem arz eden, US\$/t önlenen CO<sub>2</sub> ifadesiyle maliyetlerin belirtilmesidir. Bu, CO<sub>2</sub> tutulan santralde özellikle de enerji kullanımı artışında direkt olarak sonuçları anlamak için çok önemlidir. Bununla birlikte indirgeme seçeneklerinin karşılaştırılması yoluyla sonuç karşılaştırılan durumlara bağlı olduğu için yanıltıcı

olabilir(örn, önlenen nedir?). Bundan dolayı görevlerin ve enerjinin teminatının diğer yollarla karşılaştırılması için tutum bulunduran veya bulundurmeyen sistem maliyeti, en güvenilir yolla, üretilen elektriğin her birimini(örn, tCO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup>) CO<sub>2</sub> emisyonları ile birleştirerek üretim maliyeti(örn, US\$ MWh<sup>-1</sup>) gibi birim ürün ifadesiyle gösterilmesidir. Böylece kullanıcılar amaçları doğrultusunda en uygun durumu kendileri seçebilirler. Bu raporda bu yöntem kullanılmıştır.

Önlenen US\$/tCO<sub>2</sub> ifadesiyle indirgeme maliyetinin belirtilmesi, ayrıca santrallerin bir toplamı(ulusal bir elektrik sistemi gibi) için indirgeme yöntemi olarak düşünülen durumlarda da kullanılan yaklaşımdır. Bu yaklaşım, tipik olarak tasarım amaçları için entegre değerlendirme modellemelerinde bulunmuştur. Bu yolla yapılan hesaplamalar, özel bir tasarımda tek bir güç santrali için hesaplanan önlenmiş CO<sub>2</sub> maliyeti ile karşılaştırılamayabilir. Çünkü temel durumlar her ikisinde aynı olmayacaktır. Bununla birlikte her iki durumda “önlenen” kelimesi kullanıldığından, açık bir ayırım yapılmazsa yanlış değerlendirilebilir.

#### ***1.5.4 Diğer maliyet ve çevresel etki sorunları***

Spesifik projelerin yayınlanmış çalışmalarının çoğunluğu, özel CO<sub>2</sub> kaynakları ve depolama rezervuarlarına bakar. Bunlar kesinlikle santrallerin özel türlerine yönelik maliyetlerine dayanmaktadır ve gereken CO<sub>2</sub> miktarları tipik olarak yıllık sadece birkaç milyon tondur. Bu miktarın ilk projeler için gerçekçi olmasına rağmen, iklim değişikliğinin indirgenmesi için bu teknoloji yaygın olarak kullanılırsa, daha büyük miktarlardaki karbondioksitin tutumu, nakli ve depolaması ile sonuçlanacak muhtemel ölçekte potansiyel ekonomisinin yansıtılmasında yetersiz kalabilir. Bu geniş kullanımın bir sonucu olarak, hem ekonomik ölçek ve sanayi ile artan deneyim, hem de KTD sisteminin aşamalarının işletmesinin bir sonucu olarak maliyetlerde bir azalma beklenebilir. Bu da birkaç on yıllık bir periyotta meydana gelecektir.

Herhangi bir santralin yapımı, bu türden projelerin onayından önce bir çok ülkede gereken etki analizlerinin nedeni olan çevresel sorunlar oluşturacaktır. Büyük olasılıkla işletme için ruhsat gerekli olacaktır. Bir güç santralindeki etkiler, geniş bir oranda çalıştırılan tutum sisteminin türüne ve gerekli olan ek enerjiye bağlı olacaktır. CO<sub>2</sub> boru hatlarının yapım ve işletmesi, çevreye doğal gaz borularındakine benzer bir etki oluşturacaktır. Şayet büyük bir miktardaki CO<sub>2</sub> sızıntı meydana getirirse, büyük ölçekteki CO<sub>2</sub> taşıma ve depolaması da ayrıca muhtemel bir tehlike oluşturabilir.

Farklı depolama seçenekleri, monitörlenme ve sorumluluk açısından farklı yükümlülükler gerektirebilir. CO<sub>2</sub> akımının monitörlenmesi, işlem kontrol nedeniyle sistemin tüm parçalarında olmaktadır. Ayrıca sistemin monitörlenmesi, depolamanın güvenliğinden emin olmak, ulusal envanterler için veri sağlamak ve CO<sub>2</sub> emisyonları ticareti için bir temel oluşturmak için gereklidir.

Monitörlenme stratejilerinin gelişiminde, özellikle de regülatör uyumu ve verifikasyonu için temel soru, monitörlenmenin ne kadar süreceğidir; monitörlenme kesinlikle enjeksiyon süresi boyunca gerekecektir fakat yine de enjeksiyon tamamlandıktan sonra monitörlenmenin sıklığı ve ölçüsü saptanmalıdır ve uzun vadede monitörlenme için organizasyon sorumluluğu tanımlanmalıdır. Ek olarak CO<sub>2</sub> kullanılırken, örneğin geliştirilmiş petrol kurtarımında, depolanan CO<sub>2</sub> net miktarının saptanması gereklidir.

Risklerin türünü anlamaya yardımcı olmak için, karbondioksitin yavaş sızıntısı ile sistemin bazı parçalarının yetersizliği sebebiyle muhtemelen tehlikeli, daha büyük ve beklenmedik salınımları arasında bir ayırım yapmak faydalı olabilir. CO<sub>2</sub> çalkantılı havada kolaylıkla dağılır fakat yeraltındaki depolardan oluşacak sızıntılar, salınım yapan miktara ve etkilenen bölgenin büyüklüğüne bağlı olarak bölgesel ekosistemler üzerinde önemli etkiler yaratabilir. Denizde, okyanus akımları deniz suyunda çözülmüş olan karbondioksiti hızlı bir biçimde dağıtır. Depo rezervuarından sızan CO<sub>2</sub>, sığ akiferlere ya da yüzey suyu kütlelerine varabilir; şayet içme suyu kaynağına ulaşırsa insan yaşamını etkileyecek direkt sonuçlar doğurabilir. Yeraltındaki rezervuarlardan sızan karbondioksitten kaynaklanabilecek muhtemel lokal ekosistem zararları hakkında önemli belirsizlikler mevcuttur: küçük sızıntılar hiçbir saptanabilir etki üretmeyebilir ancak doğal CO<sub>2</sub> rezervuarlarındaki nispeten büyük salınımların önemli zararlar meydana getireceği bilinmektedir (Sorey ve diğ., 1996). Bununla beraber depolamadan salınan kümülatif miktar büyük ise, iklim üzerinde de etki oluşturabilir. Bu durumda ulusal envanterlerin bunu da hesaba katması gereklidir. Jeolojik depolama rezervuarlarından oluşacak sızıntının kabul edilebilir ölçüsü bugünkü araştırma konularından bir tanesidir.

## **1.6 KTD'nin enerji temini ve CO<sub>2</sub> depolaması bakımından değerlendirilmesi**

CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması konusunda bazı sorulara öncelik verilmelidir;

- Uygulamaya geçecek yeterli fosil yakıtları mevcut mudur?
- CO<sub>2</sub> depoda ne kadar süre duracaktır?
- Yeterli depolama kapasitesi bulunuyor mu ve ne kadar genişlikte mevcut bulunuyor?

Bu sorular, iklim değişikliğinin azaltılması amacıyla atmosferden uzaklaştırılan karbondioksitin tutulması için gerekli minimum zamanı yakından ilgilendirir. Bundan dolayı son olarak dördüncü bir soru: “Karbondioksitin depoda ne kadar süre kalması gerekir?”. Bu bölümde bu soruları cevaplamak için bir yaklaşım sunulmaktadır.

### ***1.6.1 Fosil yakıt bulunabilirliği***

Fosil yakıtlar, tüm ülkelerde ticareti yapılan ürünlerdir. 21. yüzyılda daha çok kullanılabilir olmalarına karşın farklı yakıtlarda denge değişebilir. CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması, sera gazı emisyonlarındaki katı kısıtlamaların bulunması halinde bile enerji bileşimlerinde yine fosil yakıtlarının kullanılmasına imkan tanır.

Fosil yakıtların yeteri miktarda uzun süreceği konusu pek de doğrulanmasa da CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının büyük ölçekte yayılması ve gelişimi, tüketim oranı, maliyet, fosil yakıt kaynaklarının bileşimi ve rezervleri gibi bir seri etkenlere bağlıdır.

#### ***1.6.1.1 Tüketim oranı ve kullanım maliyeti***

Bulunan kömür, petrol ve doğal gaz rezervleri sonludur, dolayısıyla bu ilksel yakıtların tüketimi doruk noktasına çıkabilir ve sonrasında gelecekte bir zamanda zayıflayabilir(IPCC, 2001a). Bununla beraber fosil yakıtların kullanım hızının düşeceğinin önceden bildirilmesi, birçok farklı etkenlerden dolayı kolay değildir. Fosil yakıtlar ile tamamlanan alternatif enerji kaynakları gelişmektedir. Farklı bölgelerden fosil yakıtların çıkartılması, dağıtım maliyetini arttırdığı gibi işletme için daha fazla miktarlarda gerekecek beslenme stoğununun kullanımını da arttıracaktır; maliyette ortaya çıkan bu artış sonucu talepte de azalma eğilimi olacaktır. Emisyonlardaki kısıtlamalar ayrıca, fosil yakıtların kullanım maliyetini de arttırdığı gibi KTD yöntemine geçişi de arttıracaktır.

### ***1.6.2 Yeterli depolama kapasitesi mevcut mu?***

Üçüncü Değerlendirme Raporu(IPCC, 2001e), 550 ppmv’de stabilizasyonu sağlamak için 2100 yılına kadar emisyonlarda yıllık ortalama 38 GtCO<sub>2</sub> (10 GtC) indirgeme yapılması gerektiğini belirtmiştir. şayet CO<sub>2</sub> tutum ve depolamasının emisyon indirgemesine önemli katkıda bulunması için yüzlerce ya da binlerce tesisin kurulması ve her birinin de yıllık 1-5 MtCO<sub>2</sub> (0,27-1,4 MtC/yıl) tutum gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu rakamlar inşa edilen ve

elektrik şirketleri ve diğer imalat girişimleri ile işletilen tesislerin sayısı ile tutarlılık göstermektedir.

### ***1.6.3 CO<sub>2</sub> depoda ne kadar kalacaktır?***

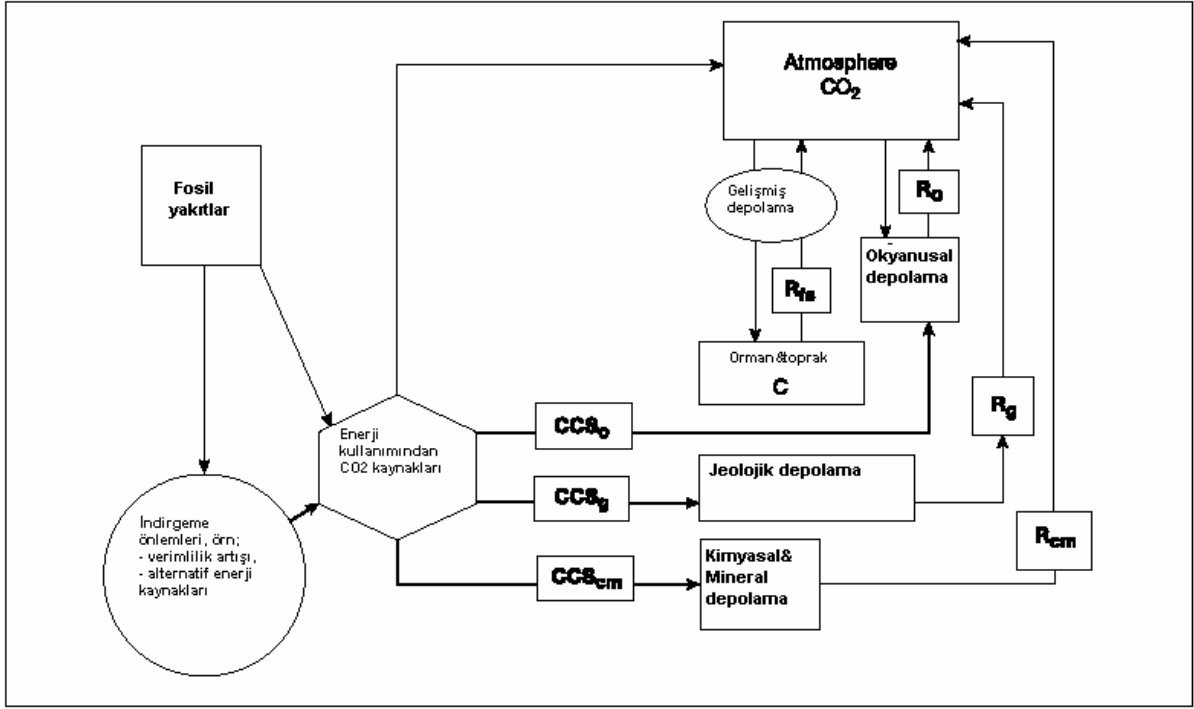
Aslında basit görünen bu sorunun cevabı, mekanizmaların ve farklı yöntemler için tamamen farklı salınımların oranlarından dolayı şaşırtıcı olarak komplikedir. Bu raporda kullanılan “saklanan fraksiyon”(tutulan fraksiyon) terimi, depoda ne kadar sürede ne kadar CO<sub>2</sub> saklanacağını belirtmektedir. Bu terim, aşağıdaki gibi tanımlanır:

- “Saklanan fraksiyon”, belirli bir zaman periyodunda, örneğin yüz veya bir milyon yıl, depolama rezervuarında saklanacak enjekte karbondioksitin kümülatif miktarının fraksiyonu olarak tanımlanır.

Yukarıdaki tanım, depoda saklanacak CO<sub>2</sub> miktarının zaman içinde ne kadar değişeceği hakkında hiçbir hüküm sağlamaz; eğer CO<sub>2</sub> kaçağı var ise oran aynı kalmayabilir.

CO<sub>2</sub> depolama işlemi ve bunun atmosferdeki konsantrasyonlar ile ilişkisi, depolanan CO<sub>2</sub> ve rezervuarlar arasındaki akım stokları düşünülerek anlaşılabilir. Şekil 1.5’de, doğal ve potansiyel olarak planlanan depolama rezervuarları büyük stoklar olarak ve akımlar oklarla gösterilmiştir. Fosil yakıt kullanımının günümüzdeki modelinde, insan kaynaklarından atmosfere CO<sub>2</sub> direkt olarak salınmaktadır. Yakım ya da endüstriyel işletmelerden atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı, çeşitli indirgeme yöntemlerinin kombinasyonu ile azaltılabilir. Bu akımlar, Şekil 1.5’de alternatif yol olarak gösterilmiştir.





**Şekil 1.5**

Şekil 1.5’de KTD ile belirtilmiş akımlar, düşünülen üç çeşit depolama rezervinin her biri için karbondioksitin yıllık net tonlarıdır. Şekilde CO<sub>2</sub> tutum ve depolaması ile ilişkili ek emisyonlar açıkça belirtilmemiştir fakat atmosfere karışan CO<sub>2</sub> emisyonlarının ek kaynakları olarak düşünülebilir. Rezervuarlardan atmosfere olabilecek muhtemel sızıntılar,  $R$  ile gösterilmiştir. Bazı depolama seçeneklerinde sızıntı akımları, depolama rezervlerine olacak akımlar ile karşılaştırıldığında çok küçük olabilirler.

Belirli bir süre içerisinde depodaki miktar, rezervin kapasitesi ve rezervuara olacak ilaveler ya da rezervuardaki sızıntının durumu ile belirlenir. Belirli bir süre boyunca depolama rezervinde CO<sub>2</sub> stoklarındaki değişiklik, mevcut stok ile ve hangi oranlarda gazın eklendiği veya salındığı ile belirlenebilir; okyanusal depolama söz konusu ise, bunlardan başka atmosferdeki CO<sub>2</sub> derecesi de salınımın net oranını etkileyecektir. Girdi oranının salınım oranından fazla olduğu sürece rezervuarda CO<sub>2</sub> birikecektir ve belirli bir miktar atmosferden uzaklaştırılacaktır. Bu raporda gösterilen analizler, farklı depolama seçenekleri için zaman dilinimi, geniş bir konu kapsar:

Karasal biyosfer, global karbon döngüsü boyunca doğal ve fosil yakıt karbondioksiti depolar ve salınım yapar. Saklanan fraksiyonun basit bir tasvirini yapmak, hareketli tabiatından dolayı zordur. Günümüzde karasal biyosfer, karbondioksit için net bir yutak durumundadır ancak bazı mevcut biyolojik yutaklar da sıcaklık artışıyla net kaynak olmaktadır. Yıllık depolama

akımları ve toplam karbon depolama kapasitesi, ormancılık ve arazi yönetim uygulamaları ile zenginleştirilebilir.

Okyanuslar, hareketli karbondioksiti büyük miktarlarda tutarlar. Küresel karbon döngüsüne göre doğal ve fosil yakıt karbondioksitini absorbe eder ve salar. Bu işlem okyanus kimyasında değişiklik meydana getirir. 3000 m’de okyanusal depolama ile saklanan fraksiyon, 500 yıl sonra %85 civarında olabilir. Ancak bu işlem, uzun zaman dilinimi için büyük bir ölçek üzerinde henüz araştırılmamıştır. Daha sığ derinliklerdeki enjeksiyon, daha kısa tutum zamanı ile sonuçlanacaktır.

Jeolojik depolamada olası saklanan fraksiyonun tasviri, milyonlarca yıl boyunca doğal jeolojik haznelerdeki karbondioksitin bulunduğu doğal sistemlerin gözlemlerinden yapılabilir. Karşılaştırılabilir performanslara sahip depolama haznelerini hesaplamak mümkün olabilir. Uygun bir şekilde seçilen ve kontrol edilen jeolojik haznelerde saklanan fraksiyon, 1000 yıl boyunca %99’un üzerinde bulunması olasıdır. Bununla birlikte jeolojik hazneden ani gaz salınımları, depolamanın ya da enjeksiyon kuyusunun başarısızlığına, deprem ya da volkanik püskürmelere, veya sonradan sondaj çalışması yapıldığında tesadüfen patlamaya neden olabilir. Bu gibi salınımlar, önemli bölgesel etkilere yol açabilir. Doğal CO<sub>2</sub> hazneleri ve doğal gaz depolama uygulamalarından sahip olunan deneyimler, bu gibi salınımların olup olmayacağını anlamaya yardımcı olur.

Kimyasal reaksiyonlar yoluyla mineral karbonatlama, karbonat kayaçlarında olağanüstü uzun zamanlar için yaklaşık %100 saklanan fraksiyon sağlar. Ancak bu işlem, uzun zaman dilimi için büyük ölçekte henüz araştırılmamıştır ve enerji dengesi elverişli olmayabilir.

Karbondioksitin diğer kullanışlı kimyasallara dönüştürülmesi, bu reaksiyonların, üretilen kimyasal maddenin miktarının ve etkili ömürlerinin enerji tepkimeleri ile sınırlıdır. Çoğu durumda CO<sub>2</sub> net depolamasının çok küçük miktarları ile sonuçlanır.

#### ***1.6.4 CO<sub>2</sub> depoda ne kadar süre kalmalıdır?***

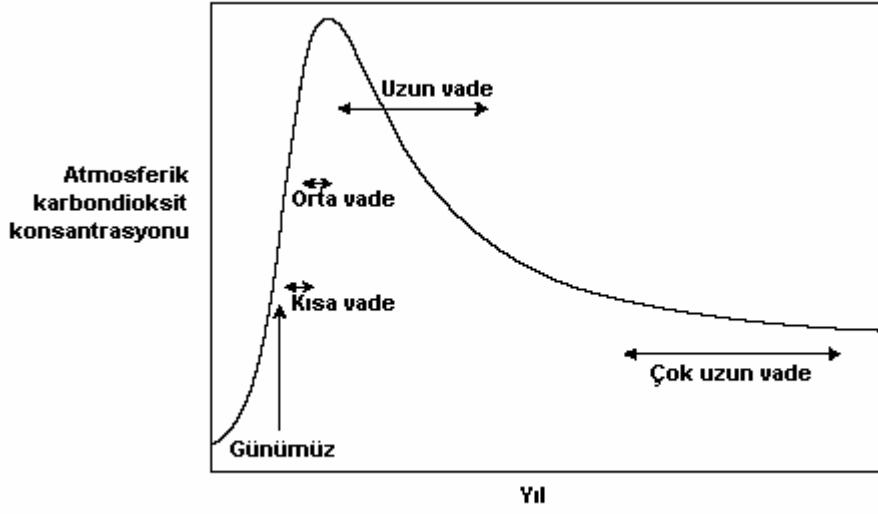
Belirli bir depolama seçeneğinin önleme amacını karşılayıp karşılayamayacağını belirlemede, zamanla saklanan fraksiyonun ve net depolama kapasitesinin her ikisinin de bilinmesi önemlidir. Aynı soruyu ifade edebilecek diğer sorular: “Belirlenen bir tasarım amacını başarmak için ne kadar süre gereklidir?” ya da “Karbondioksitin belirli bir miktarının atmosferden yüz ya da milyon yıl boyunca uzaklaştırılmasının yararı ne olacaktır?”. Depolamanın verimliliğini anlamak için tasarım olarak hedeflenen maksimum atmosferik CO<sub>2</sub>

konsantrasyonu, bu maksimum düzeyin zamanlanması, fosil yakıt çağının düşünölen süresi ve gelecekteki büyük salınımları halinde CO<sub>2</sub> konsantrasyonun mevcut kontrol yöntemi gibi bir çok faktörlerin düşünölməsi gerekir.

### ***1.6.5 Teknoloji için zaman çerçevesi***

KTD tartışmaları, çeşitli zaman ölçeklerini konu alır. Elektrik santrali ve elektrik dağıtım şebekesi gibi enerji sistemleri, tipik olarak 30-40 yıllık operasyon ömürlerine sahiptirler; yenileme ya da kuvvetlendirme hesaba katıldığında üretim santrali daha uzun sürede elektrik sağlıyor olabilir. Bu ömrü süresince santralin tasarımında ve yatırımın kazanç oranında düşünölen beklentiyi üretir. Tutum ekipmanı, CO<sub>2</sub> taşıma sistemi ile inşa edilip benzer bir döngüde yenilenebilir. CO<sub>2</sub> haznesinin uygulama ömrü, kapasitesi ve kolaylıkla üretilemeyecek karbondioksitin saklanacağı zaman çerçevesi ile belirlenebilir. Yine de haznenin doldurulma aşaması, en az elektrik santralinin operasyon ömrü kadar olacaktır. İklimi koruma bakımından işletme ve benzeri faaliyetlerin sürdürölmesi hakkındaki kararlara ilişkin ölçüm özelliklerinin “kısa vade”sine karşılık, bu ömürden “orta vade” olarak söz edebiliriz.

Diğer yandan iklim değışikliğinin önlenmesi, uzun zaman ölçekleri ile tanımlanır: örneğın, karbondioksitin atmosferdeki ömrü genellikle 100 yıl olarak bahsedilir(IPCC, 2001c). İklim değışikliğinin önlenmesi üzerine beklentiler, tipik olarak uygulamanın birkaç on yıl ya da yüzyıl boyunca gerekliliğini ele alır. Bu da “uzun vade” olarak bahsedilmiştir. Ancak karbondioksitin büyük çoğunluğunun stabilizasyonu sağlamak için gereken zamandan daha uzun sürede depolanması gerekir ki bu da “çok uzun vade” olarak ele alınmıştır. Diğer bir deyişle yüzyıllar ya da bin yıla dayanan zaman periyodudur.



**Şekil 1.6** Atmosfere salınan emisyonlardan dolayı atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonlarının değişimi. “Kısa vade”, “orta vade”, “uzun vade” ve “çok uzun vade” için tipik zaman değerleri sırasıyla yıllar, onyıllar, yüzyıllar ve binyıllar şeklindedir. Bu örnekte kümülatif emisyonlar maksimum bir değer ile sınırlandırılmıştır ve konsantrasyonlar 550 ppmv’de durağanlaştırılmıştır (Kheshgi, 2003’ten uyarlanmıştır). Şekil, örnek olarak verilmiştir ve bu zaman aralıkları için spesifik değerlerin göstergesi olarak algılanmamalıdır. Eğer atmosferdeki konsantrasyonların daha düşük seviyelerde tutulması amaçlanıyor ise, o halde emisyon oranlarında daha büyük indirgemeler gerekecektir.