

## DOĞALGAZDAN HİDROJEN ÜRETİLMESİ VE SALINAN KARBONDİOKSİTİN TUTULMASI

Murat ÖZTÜRK \*, Nuri ÖZEK \*\*, Yunus Emre YÜKSEL \*\*\*

### Özet

Kısa ve orta vadede artan hidrojen talebi fosil yakıtlardan, özellikle de doğalgazdan karşılanacaktır. Bu yöntem ile atmosfere karbondioksit salınımları olmadan, makul fiyata hidrojen üretilbileceği için çevresel ve ekonomik açıdan da uygundur. Bunun için iki temel seçenek mevcuttur. Birincisi hidrojenin doğalgazdan geleneksel bir yöntem olan ve karbondioksitin tutularak tecrit edilmesini de içeren buhar-reformasyonu yöntemiyle eldesidir. Açığa çıkan karbondioksit okyanus diplerinde depolanabilir ya da petrol ve doğalgaz yatakları gibi jeolojik oluşumlarda tutularak tecrit edilebilir. İkincisi alternatif yöntem ise doğalgazın yüksek sıcaklıklarda saf hidrojen ve karbona ayrıştırılmasıdır. Elde edilen hidrojen enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Karbon ise yapı malzemeleri, elektrik üretimi ve toprağın ıslahı gibi çeşitli alanlarda kullanılmak üzere pazara sunulabilir. Bu çalışmada, doğalgazdan geleneksel buhar-reformasyonu prosesi ile hidrojen üretimi ve doğalgazın yüksek sıcaklıkta katalitik olarak hidrojen ve karbona ayrıştırılması yöntemleri teknolojik, çevresel ve ekonomik açılarından karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çevre, hidrojen, karbondioksit tutumu.

## HYDROGEN PRODUCTION FROM NATURAL GAS AND CAPTURES OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS

### Abstract

In the near and medium term, increasing demand for hydrogen will be covered from fossil fuels, especially natural gas. This method of hydrogen production without releasing carbon dioxide into the atmosphere, producing a reasonable price for the environmental and economic is also appropriate. In order to achieve this, there are two basic options. The first one is that hydrogen production from natural gas as a conventional method and including carbon dioxide sequestration is steam-reforming method. Emitted carbon dioxide can be captured in the bottom of the ocean or sequestered in geological formations such as oil and natural gas deposits. The second way is natural gas decomposition to produce pure hydrogen and oxygen at high temperatures. Hydrogen obtained from natural gas decomposition can be used as energy carrier. Carbon can be presented to the market such as building materials, electricity generation and improvement of soil to be used in various fields. In this study, hydrogen production process via conventional steam-reforming of natural gas and hydrogen and carbon as natural gas into high-temperature catalytic decomposition methods to technological, environmental and economic aspects were compared.

**Keywords:** Environment, hydrogen, carbon dioxide sequestration.

\* Süleyman Demirel Üniversitesi Hidrojen Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (SDÜ-HİTEM), Çünür, ISPARTA.  
E-posta: [mozturk@sdu.edu.tr](mailto:mozturk@sdu.edu.tr)

\*\* Süleyman Demirel Üniversitesi Hidrojen Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (SDÜ-HİTEM), Çünür, ISPARTA.  
E-posta: [nozек@fef.sdu.edu.tr](mailto:nozек@fef.sdu.edu.tr)

\*\*\* Süleyman Demirel Üniversitesi Hidrojen Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (SDÜ-HİTEM), Çünür, ISPARTA.  
E-posta: [yunusemreyuksel@stud.sdu.edu.tr](mailto:yunusemreyuksel@stud.sdu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

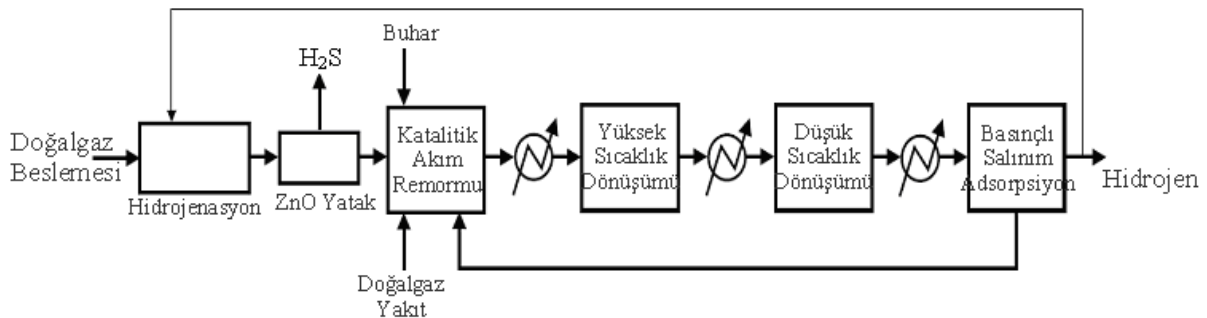
Dünya genelinde yaklaşık olarak yılda 50 milyon ton hidrojen ( $H_2$ ) üretilmekte ve üretilen bu hidrojenin az bir miktarı enerji ve ısı üretiminde kullanılırken büyük bir bölümü ise sanayi uygulamalarında kullanılmaktadır [1]. Dünyadaki hidrojenin %62,4'ü amonyak ( $NH_3$ ) üretimi, %24,3'ü rafineri ve %8,7'si metanol ( $CH_3OH$ ) üretimi için kullanılmaktadır. Bu kadar büyük miktarda hidrojen gerekli olduğu için genellikle tüketiciler tarafından üretilir ve en yaygın üretim yöntemi ise doğalgaz buhar reformasyonu olup dünya hidrojen üretiminin yaklaşık %50'sini karşılamaktadır [2]. Fakat bu teknolojinin önündeki ana engel dönüşüm sisteminin karbondioksit yaymasıdır. Dünyanın önde gelen bilim adamlarının bildirdiklerine göre şu an karşı karşıya kaldığımız çevre, sağlık ve toplum problemleri iklim değişiklikleri (sera etkisi), hava kirlenmesi, oksijen azalması, asit yağmurları, ozon tabakası delinmesi, çevre kirlenmesi, saçılan petroler, gürültü, görüntü kirliliği, petrol harpleri, nüfus artışı olarak verilmiştir. Çevresel sorunların başında gelen iklim değişikliklerinin (sera etkisi) en büyük nedeni olan karbondioksit emisyonlarını azaltmanın yolları aşağıda verilmiştir [3].

- (1) Nüfus artışını kısıtlamak,
- (2) Enerji dönüşüm ve kullanım verimliliğini geliştirmek,
- (3) Güneş, rüzgar, hidro ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek,
- (4) Fosil yakıtların karbondan arındırılması,
- (5) Fosil yakıtlardaki karbonu ayırarak tutmak.

Bu makalede, hidrojenin doğalgazdan üretilmesi ve karbondioksitin tutumunu içeren iki temel yöntem olan (1) buhar-metan reformu ile hidrojen üretilmesi ve açığa çıkan karbondioksitin ayrılarak tutulması, (2) doğalgazın hidrojen ve karbona ısı ayrıştırılması ve elde edilen karbon elementinin de ayrılarak tutulması prosesleri çevresel açıdan incelenmiştir. Her iki proste ortaya çıkan hidrojen ve karbon ürünlerinin kullanılabilir alanları da açıklanmıştır. Bu çalışmada önerilen hidrojen-karbon alt yapı sisteminin kurulması ile günümüzde hidrojen üretiminin büyük çoğunluğunu karşılayan doğalgazdan hidrojen üretim prosesleri çevresel açıdan çok daha verimli olacaktır. Üretilen karbonun yeni kullanım alanlarının geliştirilmesi ve yeni iş alanlarının oluşturulması da önerilen alt yapı sisteminin diğer bir önemli kazancı olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 2. BUHAR-METAN REFORMASYONU İLE HİDROJEN ÜRETİMİ

Buhar-metan reformasyonunda üç ana bölüm; reformasyon, su-gaz dönüşüm reaksiyonu ve gaz saflaştırma bulunmaktadır[4]. Şekil 1'de gösterildiği gibi besleme yatağında doğalgaz katalizör ile iletişimi engellemek için ilk olarak kükürttten arındırılır. Bu basamakta üründen geri döndürülen küçük bir miktar hidrojen kullanılır.



Şekil 1. Buhar-metan reformasyonu ile hidrojen üretim tesisinin blok akış diyagramı [5]

Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S) bileşiği daha sonra çinko oksit (ZnO) yataklarından dışarıya çıkarılır ve öncül işlemde sonra doğalgaz 2,6 MPa basınçtaki doğalgaz buhar düzenleyicisine gönderilir. Bu karışım gazı daha sonra yüksek sıcaklık dönüşüm ve düşük sıcaklık dönüşüm reaktörlerine aktarılır. Bu reaktörlerde su-gaz dönüşüm reaksiyonu karbondioksitin (CO) %92'sini hidrojene çevirir ve basınç salınımlı adsorbsiyon (PSA) ünitesi kullanılarak saflaştırılır. Düzenleyici birincil olarak PSA gazları ile doldurulur, fakat bir miktar doğalgaz toplam düzenleyicinin yakıt ihtiyacını sağlamak için kullanılır. PSA gazları CO<sub>2</sub> (%55 mol), H<sub>2</sub> (%27 mol), CH<sub>4</sub> (%14 mol), CO (%3 mol), N<sub>2</sub> (%0,4 mol) ve bir miktar su buharından ibarettir. Genellikle buhar metan reformasyon sisteminin verimliliği %65-75 arasında değişmektedir.

### 2.1. Buhar-metan reformasyon reaksiyonu

Hidrojenin üretimi için birçok endüstriyel metot mevcuttur. Fakat bunlar gerekli olan girdi maddelerinin miktarı ve ham madde gibi lokal faktörlere bağlıdır. Halen kullanılan iki proses metan gibi hidrokarbonların buhar reformasyonu ve su-gaz değişim reaksiyonudur.



Su-gaz değişim reaksiyonu, ekzotermik, heterojen katalitik bir reaksiyon olup hidrojen ve amonyak üretiminin en önemli adımını oluşturmaktadır. Aynı zamanda su-gaz değişim reaksiyonu atmosferin zehrini gidermede de kullanılmaktadır. Termodinamik ve kinetik şartlara bağlı olarak su-gaz değişim reaksiyonunu yüksek (320–450 °C) ve düşük (200-250 °C) sıcaklık uygulamaları mevcuttur [6]. Yüksek sıcaklık değişim reaksiyonunda genellikle demir esaslı katalizörler kullanılırken, düşük sıcaklık dönüşüm reaksiyonunda genellikle bakır esaslı katalizörler kullanılmaktadır.

Buhar-metan reformu ile oluşan sıcak gazların soğutulmasıyla açığa çıkan ısı prosesdeki suyun buharlaştırılmasında kullanılır. Su buharının karbonmonoksit ile tepkimeye girmesiyle ilave hidrojen ve karbondioksit oluşur. Dikkate alınması gereken husus; üretilen hidrojenin sadece yarısının hidrokarbondan, diğer yarısının ise sudan geldiğidir.

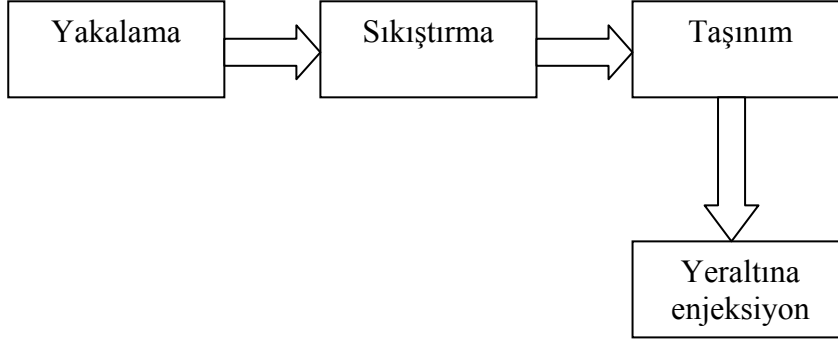
### 2.2. Hidrojenin karbonsuzlaştırılması

Karbondioksit gazı hidrojenden çeşitli yöntemler kullanılarak arındırılabilir. Çözücü absorpsiyon ve sıyırılma ya da adsorpsiyon ve katı adsorban üzerinde sıyırılma yöntemiyle karbondioksitin ayrılması ve geri kazanımı bu metotlardan bazılarıdır. Ardı ardına kullanılan iki reaktörden meydana gelen PSA metodu günümüzde kullanılan en ileri ve en ekonomik karbondioksit ayrıştırma prosesi olarak göze çarpmaktadır. Reaktörlerden birine karbondioksiti aktif karbon gibi katı bir adsorbanın yüzeyinde tutmak amacıyla yüksek basınç uygulanmaktadır. Bu işlem sonucunda saf hidrojen açığa çıkmaktadır. İkinci reaktörde de düşük basınç altında karbondioksit serbest bırakılmaktadır. Daha sonra bu iki tandem yataklardaki akış tersine çevrilmekte ve çevrim tekrar başlatılmaktadır.

### 2.3. Karbondioksitin tutulması

Hidrojen üretmek için eğer fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğalgaz) kullanılıyorsa, karbondioksitin çevreye salınması kaçınılmazdır. Fakat karbon ayrıştırma teknolojisi bu problemi ortadan kaldırmak için kullanılabilir. Karbonun ayrıştırılması iki ana basamaktan

oluşmaktadır: bir prosesten karbondioksit emisyonlarını yakalamak ve onu güvenli bir şekilde yer altına veya okyanusa depolamak (kısaca yakalama ve depolama). Buhar-metan reformasyonu prosesi ile doğalgazdan hidrojen üretiminde, yakalanan karbondioksitin %80-85'i üretilen hidrojenin maliyetine yaklaşık olarak %25-30 arasında ek yük getirmektedir. Şekil 2'de gösterilen karbondioksit ayrıştırma prosesindeki ana basamakların enerji kullanımı yakalama, basınçlama (80 bar) ve taşıma (100-500 km boru hattı) için sırasıyla 3000 kJ, 281 kJ ve 2000 kJ olmaktadır [7].



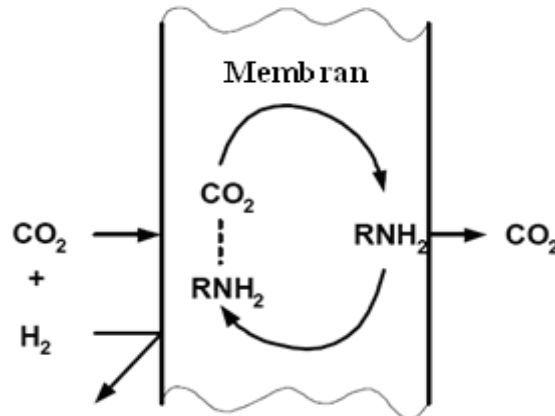
Şekil 2. Karbondioksitin tutulma prosesi

### 2.3.1. Karbondioksit yakalama teknolojileri

#### 2.3.1.1. Amine absorpsiyon

Karbondioksit yakalamada kullanılabilir teknolojilerin içinde amine absorpsiyon teknolojisi ticari olarak en yaygın olanıdır. Aminler organik bileşikler ve fonksiyonel gruplar olup yalnız bir çift ile temel bir azot atomu içerirler. Alkanolamineler, alkanolaminenin amine işlevselliği ile birlikte karbondioksitin ekzotermik reaksiyonu sayesinde gaz akımından karbondioksiti ayırır. Alkanolamineler aşağıda gösterildiği gibi üç gruba ayrılmaktadır.

1. Birincil amineler (taşıma mekanizması Şekil 3'de verilmiştir)  $\rightarrow$  RNH<sub>2</sub>
  - MonoEtanolAmine (MEA)
2. İkincil Amineler  $\rightarrow$  R<sub>2</sub>NH
  - DiEtanolAmine (DEA)
3. Üçüncü derece amineler  $\rightarrow$  R<sub>3</sub>N
  - MetilDiEtanolAmine (MDEA)



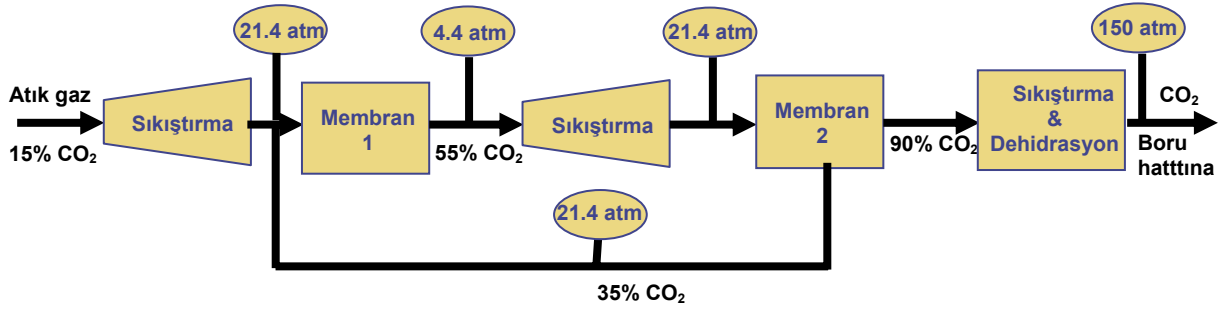
Şekil 3. Birincil aminelerde taşıma mekanizması

### 2.3.1.2. Kriyojenikler

Herhangi bir gaz karışımından karbondioksit soğutma ve yoğuşma ile ayrıştırılabilir. Kriyojenik ayrıştırma sıvı karbondioksitin direk üretimine imkan verir ve aynı zamanda uzun mesafe taşınımı içinde uygundur. Dezavantajları ise soğutmayı sağlamada gerekli olan enerjinin miktarı önerilen bu proses için yüksek olması ve su gibi bazı bileşenlerin proses esnasında alınarak gaz akımının blokları soğutmasının önlenmesinin gerekli olmasıdır.

### 2.3.1.3. Membranlar

Gaz ayırımı için membran kullanımı gelişmekte olan bir prosestir ve hem saflaştırma hem de temizleme amacıyla iyi bir potansiyele sahiptir. Membranlar belirli maddelerin geçişine izin veren bir duvar olup, herhangi bir madde için özel olarak hazırlanmaktadır. Karbondioksiti ayrıştırmada kullanılan membranlar polimerik membranlar, paladyum membranlar ve zeolitlerlerdir. İstenilen ayrıştırmalara ulaşmak için Şekil 4’de gösterildiği gibi çoklu membran kullanımı gereklidir.



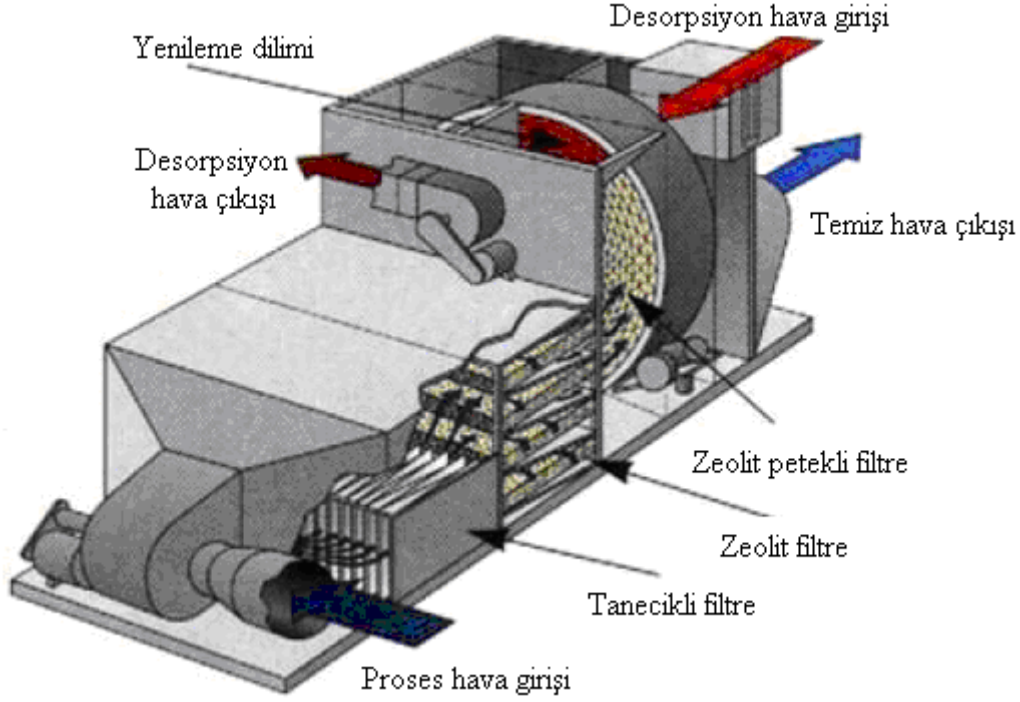
Şekil 4. Membranları kullanarak CO<sub>2</sub>'in tutulması

### 2.3.1.4. Katı üzerine adsorpsiyon

Katı üzerine adsorpsiyon cihazı Şekil 5’de gösterildiği gibi döner yoğunlaştırıcı kullanılmaktadır. Adsorpsiyonda kullanılan katı maddelerin bazıları aşağıda verilmiştir.

1. Aktive edilmiş karbonlar
2. İnorganik maddeler
  - aktive edilmiş alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) jel, killer, zeolitler.
3. Sentetik polimerler, negatif iyon değişimli polimerler (stiren), pozitif iyon değişimli polimerler (akilamin grubları), akrilik ester polimerler.

Basınçlı salınım adsorpsiyonunda (PSA), istenilen gazın konsantrasyonu dengeye ulaşana kadar arttırılan basınçta adsorbentin paketlenmiş yatağına doğru gaz karışımı akar. Yatak basınç düşürülerek tekrar düzenlenir.

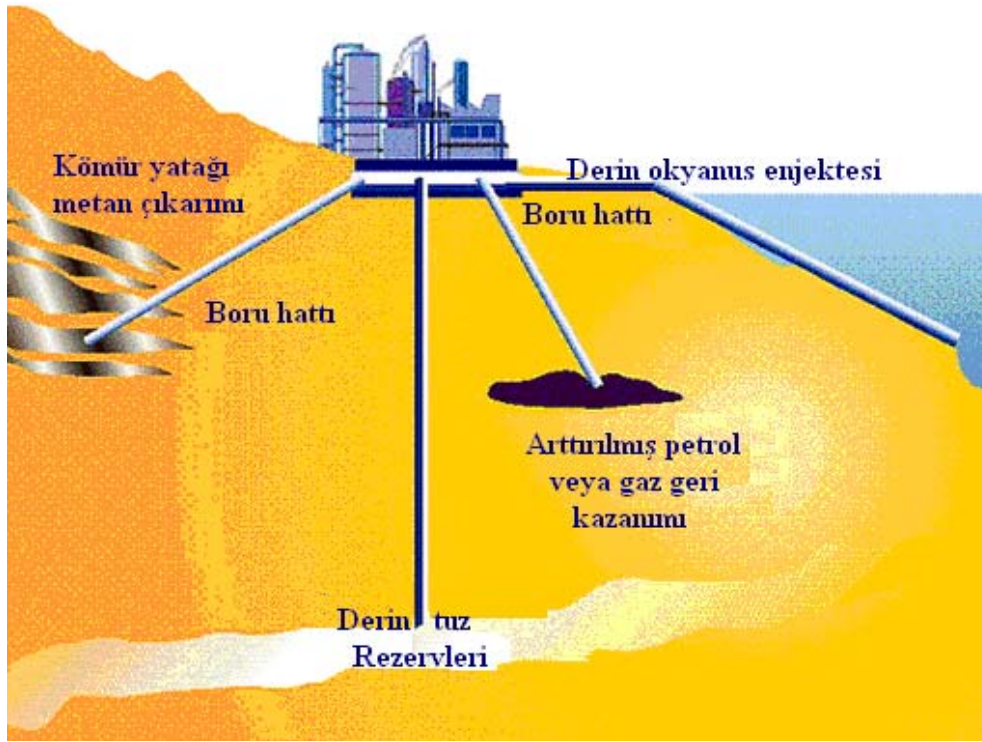


Şekil 5. Döner yoğunlaştırıcı ile karbondioksitin tutulması

### 2.3.2. CO<sub>2</sub> depolama metotları

Karbondioksitin tutulması için birkaç alternatif metot bulunmaktadır. Bunlar jeolojik formasyonlarda yer altı depolama, okyanuslarda depolama, katı mineral haline getirme veya fotosentez esnasında kendi besin ihtiyaçları için karbondioksiti kullanma kapasitesine sahip tarım alanları veya ormanlar sağlamaktır. Jeolojik formasyonlar, okyanuslar ve ormanların sırasıyla 300–3200, 1400–20 milyon ve >100 gigaton depolama kapasitesine sahip olduğu düşünülmektedir. Karbondioksitin yakalanması ve tutulması proseslerinde karbondioksitin taşınması, toplanması ve depo ortamına gönderilmesi için yeni sektörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıştırmanın yanında, yakalanan karbondioksit petrol iyileştirilmesinin geliştirilmesinde, kömür yataklarında metanın üretiminde ve tükenen gaz rezervlerinde basıncı korumak için kullanılabilir [8]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Sera Gazı Ar-Ge Programı [9] Şekil 6’da gösterildiği farklı tutulma seçeneklerini detaylandırmıştır.

- Derin Tuz Rezervleri: Derin tuz rezervleri 800 m derinliğe ulaşan ve karbondioksitin yoğun süper-kritik formda depolanmasını sağlayan tuzlu yer altı su havzalarıdır. Bu su havzaları geniş bir şekilde yayılmıştır ve genellikle sınırlı miktarda karbondioksiti kabul edebilecek boşluklara sahiptir. Fakat bu havzaların bazıları birbirinden ayrı yapılara sahiptirler ve karbondioksitin suda yavaşça çözündüğü için daha fazla depolamaya izin vermektedir.
- Arttırılmış Petrol Geri Kazanımı: Konvansiyonel iyileştirmede, daha fazla rezerv bulunsa bile petrol alanındaki basınç onu yüzeye iter ve bu basınç bitene kadar yavaşça azalır. Su ya da gaz basıncını sürdürmek ve petrol çıkarımını artırmak için hidrojen üretim prosesinden ayrıştırılan karbondioksit enjekte edilebilir.



Şekil 6. Karbondioksitin tutulması yöntemleri [1]

- Kömür Yatağı Metan Çıkarımı: Kömür rezervleri genelde yüksek içerikte metana sahiptir. Eğer yakalanan karbondioksit kömür madenine pompalanırsa, kömürün metana göre karbondioksit ile olan kimyasal bağ yapma ilgisi daha iyi olduğundan, metan salınacaktır. Daha sonra, bu metan daha sonra elektrik üretmek için kullanılabilir.
- Derin Okyanus Enjektisi: Okyanus atmosferdeki karbondioksitin eşsiz durağı olarak düşünülmektedir, fakat sistemin kurulması uzun zaman almaktadır. Bu yüzden okyanus enjekte yöntemi doğal sürecin ivmelendiricisi olarak görülmektedir. Okyanusların karbondioksit depolama için yüksek potansiyele sahip olmasına rağmen bu prosesin önündeki engeller çevresel, yasal ve halkın kabulü gibi konuları içermektedir.

Hidrojen üretim prosesinden ortaya çıkan karbondioksit sıkıştırılmış gaz, sıvı, katı veya yüksek basınçta süper-kritik formda atılacak hedeflere transfer edilebilir. Eğer boru hattı sağlanabilirse, karbondioksiti süper-kritik formda transfer etmek genelde daha elverişlidir. Bu yöntem yeni teknoloji olarak gösterilmesine rağmen, taşınması gereken karbondioksitin gelecekteki miktarının iklimsel değişiklik hakkındaki kaygılardan dolayı daha fazla olduğu öngörülmektedir. Boru hattını kurmak zor olabilir ve özellikle nüfusun fazla olduğu alanlarda güvenlik problemleri ortaya çıkabilir. Ek olarak, bilgilendirilmeyen kazılardan dolayı boru hattının zarar görme tehlikesi sıkıntılara, sigorta ile ilgili karmaşıklıklara ve güvenilirlik konularında problemlere yol açabilir. Bir diğer konu da karbondioksitin atımı için uygun yer bulma sorunudur. Yüksek hacimdeki atılması gereken karbondioksiti depolama bölgelerinin karşılayamadığı durumlarda, karbondioksitin gemiler vasıtasıyla uluslararası taşınması ekonomik ve güvenli bir şekilde gerekli olabilir. Bu yöntem aynı zamanda daha geniş ve karmaşık yasaları gerektirmektedir [8].

Okyanuslar antropojenik karbondioksit emisyonlarının %85'ini depolayacak alanlardır. Fakat bu proses çok yavaş gerçekleşmektedir. Karbondioksit okyanusun yüzeye yakın seviyelerine

enjekte edildiğinde gaz tekrar atmosfere kaçabileceği için daha derin tabakalara enjekte edilmelidir. Bu da maliyeti artırmaktadır. Bir diğer problem de büyük miktarda enjeksiyon gerçekleştiğinde pH dengesinin değişmesidir. Farklı bölgelere küçük miktarda enjekte edilmesi bu problemi aşabilir. Fakat yine maliyeti arttıracaktır [10]. Jeolojik formasyonlarda karbondioksitin depolanması ne tür değişiklikleri ortaya çıkaracağı tekniğin formasyonun entegresinde ters etkisinin olup olmadığı, depolamanın güvenli ve çevresel olarak kabul görüp görmeyeceği gibi soruları artırmaktadır [11].

Petrol ve gaz rezervlerinde bulunan karbondioksitin jeolojik ayrıştırılması ile ilgili ana problem hem doğal bozulmalardan hem de kullanılmayan kuyulara olan zararından dolayı sızıntı potansiyelidir. Bu problemi aşmak için karbondioksit karbonat taşı oluşturarak katı formda transfer edilebilir. Fakat bu prosesinde mali zorlukları bulunmaktadır [10]. Eğer mevcut teknoloji kullanılırsa, istenmeyen karbon emisyonlarının karbon ayrıştırma maliyeti 100\$/ton ile 300\$/ton arasında değişmektedir.

### 3. METANIN TERMOKATALİTİK AYRIŞTIRILMASI

Bu yaklaşımda, metan yüksek sıcaklıkta (850-1200 °C) katalist varlığında karbon ve hidrojene aşağıda verilen reaksiyon ile ayrıştırılır.



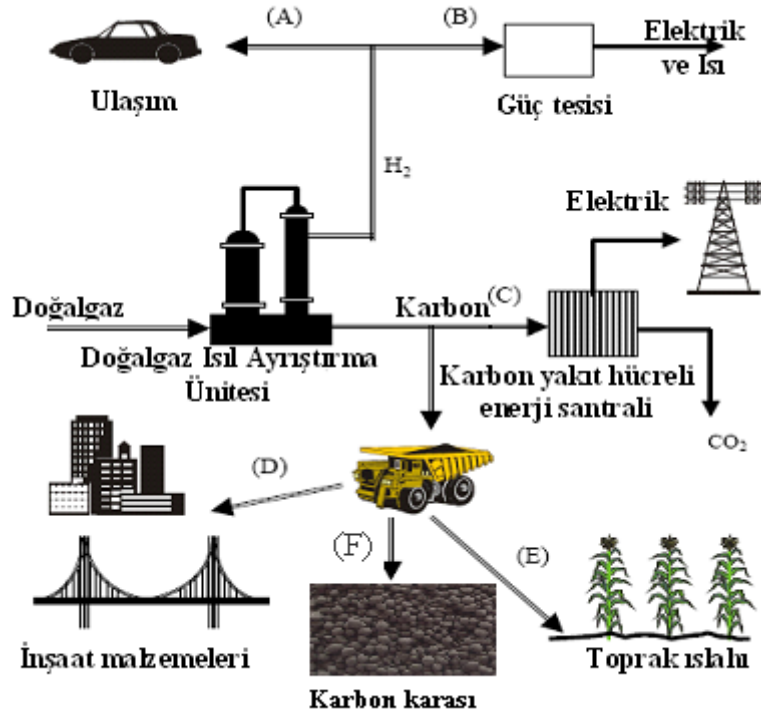
Bu reaksiyon endotermik olduğu için doğalgaz beslemesinin 10%'nu enerji girdi ihtiyacı için kullanılır. Tepkime sonucunda oluşan ana ürün hidrojendir. Yan ürün olarak üretilen karbon tanecikli yapıda olduğu için hidrojenden ayrılması kolaydır. Büyük ölçekli hidrojen üretimi için bu teknoloji günümüzde dönüşüm verimliliği açısından gelişim aşamasındadır.

Karbon ürünleri için yeterince büyük piyasaların oluşturulması halinde doğalgazın ısıl ayrıştırılması yöntemiyle hidrojenin büyük çaplı üretiminde karşılaşılan ekonomik ve çevresel sınırlamalar ortadan kalkacaktır. Doğal olarak bu süreç hidrokarbonların hidrojen ve karbon bileşenlerinin ayrı ayrı değerlendirildiği yeni bir hidrojen-karbon altyapı sistemini oluşturacaktır. Bu hidrokarbonların bir bütün olarak değerlendirildiği ve büyük miktarda karbondioksit emisyonuna sebep olan mevcut hidrokarbon altyapı sisteminden farklı çevreye son derece duyarlı bir sistemdir.

### 4. HİDROJEN-KARBON ALTYAPI SİSTEMİ

Bu çalışmada, öne sürülen hidrojen-karbon alt yapı sistemi enerji, çevre, kaynakların etkin kullanımı ve ekonomi arasındaki karşılıklı etkileşimi vurgulamaktadır. İki önemli nedene bağlı olarak bu altyapı sistemi doğalgaza (metana) dayanmaktadır: (i) doğalgaz için dağıtım altyapısının mevcut olması, (ii) enerji kaynağı olarak rezerv açısından mevcut duruma bakıldığında doğalgaz arzının, petrol arzına kıyasla daha uzun süreli olmasıdır. Şekil 7'de hidrojen-karbon altyapı sistemi gösterilmiştir. Doğalgaz ısıl ayrıştırma yöntemi kullanılarak yüksek saflıkta hidrojen (hacim olarak 99.99%) ve karbona dönüştürülmektedir. Hidrojen ulaşımda, elektrik ve ısı enerjisi üretiminde kullanılabilirken, karbonun geniş çaplı kullanılabilmesi dört potansiyel alan mevcuttur: (i) inşaat malzemeleri, (ii) karbon yakıt pilleri kullanarak elektrik üretimi, burada azda olsa CO<sub>2</sub> salınımı mevcuttur, (iii) toprağın ıslah edilmesi ve (iv) karbon karası üretimi.





Şekil 7. Hidrojen-karbon altyapı kavramı. Hidrojenin Uygulama Alanları: (A) ulaşım, (B) güç tesisi; Karbonun Uygulama Alanları: (C) karbon yakıt hücresel elektrik üretimi, (D) inşaat malzemeleri, (E) toprak ıslahı, (F) karbon karası [12]

#### 4.1. Hidrojenin kullanım alanları

##### 4.1.1. Ulaşım sektörü

İçten yanmalı motorlardan 3 kat daha verimli olan hidrojen yakıt pilleriyle araçlar çalıştırılabilmektedir. 5 çeşit yakıt pili şu anda geliştirme aşamasındadır. Bunların içinde proton değişimli zar (PEM) yakıt hücreleri ulaşım uygulamaları için en uygun olanıdır. Yakıt hücrelerinin diğer türleri de fosforik asit, alkali, erimiş karbonat ve katı oksit yakıt hücreleridir. Ayrıca hidrojen gazı içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılabilir. Hidrojen çok geniş bir yanma aralığına (%4 ile %75) sahip olduğu için, hidrojenle çalışan araçlar petrolle çalışan araçlara göre daha geniş aralıkta hava/yakıt karışımını kullanabilmektedirler ve ön ateşleme komplikasyonları olmadan yakıt verimlilik düzeninde çalışabilmektedirler [13]. %38 toplam verimliliğe ulaşan hidrojen motoru içten yanmalı motorundan yaklaşık %20 daha yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Dahası, yakıt karbon içermediği için, yanma prosesi herhangi bir hidrokarbon ya da karbondioksit emisyonu üretmemektedir. Aşağıdaki nedenlerle birlikte değerlendirildiğinde ulaşım yakıtı olarak düşünülmesi gereken hidrojenin önemli bir son kullanım ürünü olduğu ortaya çıkmaktadır.

1. Ulusal enerji sürdürülebilirlik problemi ulaşım sektöründe daha önemlidir.
2. Ulaşımdan kaynaklanan kirlilik derecesi çevresel problemler oluşturmaktadır.
3. En uygun yenilenebilir kaynak kullanım ekonomisi ulaşım sektöründedir.
4. Ulaşımda tüketiciye bağlılık ve seçim yüksektir.

### 4.1.2. Elektrik üretimi

Hidrojen ayrımı zamanda elektrik üretmek içinde yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Yakıt pilleri kullanılarak yerel enerji ihtiyacını karşılayacak bir ortamda üretilebilir veya büyük ölçekli hidrojen yakıt hücresi tesisi halihazırda kullanımda olan dağıtım hatlarını besleyebilir. Yakıt hücresi, yakıt enerjisini (genellikle hidrojen) doğru akım elektrik enerjisine yanma prosesi olmadan dönüştüren bir araçtır. Yakıt hücresi bir zar tarafından ayrılan iki elektrottan oluşmaktadır. Elektrotun birinden hidrojen diğerinden de oksijen geçmektedir. Elektrotların yüzeyindeki katalizör hidrojeni proton ve elektronlarına ayırmaktadır. Protonlar oksijenle tepkimeye girmek için zardan geçerken, elektronlar kullanılabilir enerjiyi üretirler ve zardan geçemezler.

### 4.1.3. Termal enerji

Yanma odası, katalitik yakıcı ve hidrojen/oksijen buhar jeneratörü kullanılarak hidrojenle termal enerji üretilir. Diğer son kullanımlara benzer olarak hidrojendeki enerji, yanma üzerinden ısı olarak salındığında bile az kirlilik üretir ya da hiç üretmez. Hidrojenin yanması bazı azot oksit hava kirliliği üretmesine rağmen (yüksek sıcaklıktan dolayı), son testler azot oksit konsantrasyonlarının çok küçük miktarda tutulduğunu göstermiştir.

## 4.2. Karbonun kullanım alanları

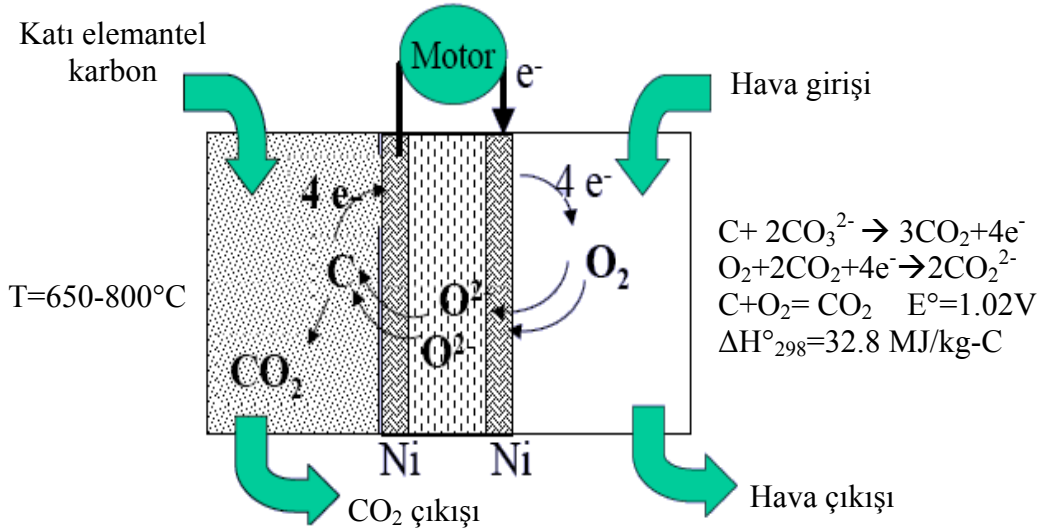
### 4.2.1. Karbonun inşaat sektöründe kullanımı

Karbon ürünlerinin yoğun olarak kullanılabilceği alanlardan biri de inşaat malzemeleri sektörüdür. Geleneksel inşaat malzemelerinin yerini alan karbon esaslı malzemelerin kullanıldığı birçok örnek vardır. Kanada, Japonya ve Amerika'da karbon bileşikleri kullanılarak inşa edilmiş köprüler bulunmaktadır. Çelik gibi geleneksel malzemelerin yerine karbon bileşiklerinin kullanılmasının avantajlarından bazıları aşınma olmaması, çelikten 5 kat daha hafif olmaları ve ağır yapı teçhizatına gerek duyulmadan kurulmalarıdır.

### 4.2.2. Karbonun yakıt pillerinde kullanımı

Karbonun yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri potansiyel olarak en yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip olmalarına rağmen bu konuda literatürde çok az çalışma mevcuttur. Son zamanlarda 700-800 °C'de ergimiş karbonat tuzunu elektrolit olarak kullanan saf karbon yakıt pilleri üzerinde çalışmalara başlanmıştır [14]. Deneysel olarak %80 ve üzerinde dönüşüm verimliliği elde edilmiştir [15]. Şekil 8'de karbon yakıt hücresi gösterilmiştir.

Karbon yakıt pillerinin önemli bir avantajı da saf karbondioksit üretmeleri sayesinde karbondioksitin tutulması ve ayrıştırılması işlemlerine gerek olmadan karbondioksitin kolay ve ekonomik olarak tutulmasının gerçekleştirilmesine olanak vermesidir.



Şekil 8. Karbon yakıt hücresi

#### 4.2.3. Karbonun toprağın ıslahında kullanılması

Karasal ekosistemler (toprak ve bitkiler) karbondioksit için en önemli biyolojik arındırıcı rolüne sahiptir. Bitkiler her sene atmosfere 60 milyar ton karbondioksit gazı vermekte ve 61.3 milyar ton civarında da karbondioksit gazını absorbe etmektedirler; aradaki fark yeşil bitkilerin fotosentezle karbonu tutmasından kaynaklanmaktadır. Karbondioksitin karasal tutumu iki yolla güçlendirilebilir: fotosentezle atmosferdeki karbondioksitin azaltılması ve/veya karasal ekosistemden atmosfere karbondioksit emisyonlarının azaltılması. Son zamanlarda yapılan çalışmalar karbon ürünlerinin karasal sistemlerde kullanılmasının iki alanda da faydalı olacağını göstermiştir. Karbonlu ürünlerin toprağa ilavesi tohumların çimlenmesini, bitkilerin büyümesini ve mahsul verimini büyük ölçüde arttırabilir. Toprağa giren karbon karbondioksit için uzun vadeli bir alıcı olup karbondioksitin küresel tutumu için büyük önem taşımaktadır [16]. Toprağa karbonun uygulanması tohum çimlenmesine, bitki büyümesine ve ürün verimini önemli miktarda (%200'e kadar) arttırabilir. Toprak özelliğine ve iklime bağlı olarak toprağa olan karbon ilavesi 0,1-1,0 ton/ha-yıl arasında olmalıdır.

#### 4.2.4. Karbon karası

Günümüzde, dünya karbon karası üretimi karbonun kalitesine bağlı olarak ton başına yüz dolarlar ve bin dolarlar arasında değişen fiyatlarla birlikte yıllık 6 milyon tona ulaşmıştır. Karbon karası hem geleneksel (lastik endüstrisi, plastik, mürekkep, vb.) ve hem de metalürji endüstrisi gibi yeni alanlarda geniş bir piyasa potansiyeline sahiptir. Karbon karası SiC ve diğer karbitlerin üretimi ve çelik endüstrisinde karbon ilavesi (karbonlama) gibi proseslerin azaltılmasında önemli bir yere sahiptir. Avrupa'da bu uygulamalar için karbon karası piyasası tonu 615 \$ ulaşan yüksek kaliteli materyaller ile birlikte yılda 0,5 milyon tona ulaşmıştır. İyi kaliteli karbon karası için fiyatlar ton başına 1000-4000 \$'a ulaşabilir. Karbon esaslı kompozitler ve yapım materyalleri üretilen karbonun çok büyük miktarını azaltabilecektir. Bu materyaller üstün fiziksel özelliklere sahip oldukları ve kolayca işlendikleri için yapı sektöründe ve teknolojiksel cihazların kaplanmasında oldukça uygundur.

## 5. SONUÇLAR

Kısa ve orta vadede hidrojen üretimi fosil yakıtlara özellikle de mevcut ve yapım süreci devam eden boru hatlarından dolayı doğalgaza dayanacaktır. Hidrojenin doğalgazdan buhar-metan reformasyon yöntemi ile üretilmesi ve beraberinde açığa çıkan karbondioksitten arındırılması ve karbondioksitin tutulması yerine doğalgazın hidrojen ve karbona ısıl ayrıştırılması çevresel ve ekonomik açıdan daha avantajlı olacaktır. Bu kapsamda araştırmacılar fosil yakıtlara dayalı hidrojen-karbon altyapı sistemini önermektedirler. İleri sürülen bu kavramın başlıca avantajı mevcut doğalgaz altyapı sistemine dayandığı için hidrojen-karbon ekonomisine geçiş maliyetini azaltmasıdır. Hidrojen-karbon sistemi hidrojen ve elektrik santrallerinden açığa çıkan karbondioksit emisyonlarını önlemekle kalmayıp, çimento ve çelik yerine karbon malzemeler kullanılacağı için çimento ve metalürji fabrikalarının sebep olduğu karbondioksit emisyonlarının da önüne geçecektir. Ayrıca hidrojen-karbon ekonomisi mevcut hidrokarbon esaslı ekonomiden gelecekteki yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen ekonomisine geçişte bir köprü vazifesi görecektir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, M., Hidrojen Üretim Metotlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [2] Middleton, P., Larson, R., Niclas, M., Collins, B., Renewable Hydrogen Forum: A Summary of Expert Opinion and Policy Recommendations. Forum presented by the American Solar Energy Society. Washington, D.C. National Press Club, 473 p, 2003.
- [3] Kaya, Y., et al., A Grand Strategy for Global Warming. Paper presented at Tokyo Conference on Global Environment, September 1989.
- [4] Veziroglu, T. N., Barbir, F., Hydrogen Energy Technologies. Emerging Technology Series. Vienna, Austria: United Nations Industrial Development Organization, 122 p, 1998.
- [5] Spath, P. L., Mann, M.K., Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming, NREL, 2001.
- [6] Öztürk, M., Güneş Enerjili Kimyasal Reaktörlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2005.
- [7] Muradov, N., Hydrogen From Fossil Fuels Without CO<sub>2</sub> Emissions. In Advance in hydrogen energy. Edited by C.E.G. Padro and F Lau, New York; Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1-16, 2002.
- [8] Doctor, R.D., Molburg, J.C., Brockmeier, Stiegel, G., Designing for Hydrogen, Electricity, and CO<sub>2</sub> Recovery from a Shell Gasification Based System. Presented at the 18th Annual International Pittsburgh Coal Conference, December 4-7, Newcastle, New South Wales, Australia. Edited by Sperling D., Cannon, J.S., Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2001.
- [9] International Energy Agency Greenhouse Gas Program (IEA-GHGP), 2005. <http://www.ieagreen.org.uk>. Erişim Tarihi: 17.05.2008
- [10] Pacala, S.W., Could Carbon Sequestration Solve the Problem of Global Warming? In The hydrogen economy: Opportunities, cost, barriers, and R&D needs. Washington, D.C.: The National Academics Press, 83 p. 2004.
- [11] USDOE (U.S. Department of Energy), Hydrogen Posture Plan: An Integrated Research, Development and Demonstration Plan. Washington, DC: U.S., Department of Energy, 24 p, 2004.
- [12] Muradov, N., Veziroglu, N., From Hydrocarbon to Hydrogen-Carbon to Hydrogen Economy, International Journal of Hydrogen Energy, 30, 225-237, 2005.

[13] Hydrogen Internal Combustion, Ford Motor Company, 2004.

<http://www.ford.com/en/innovation/engineFueltechnology/hydrogenInternalCombustion.htm>.

Erişim Tarihi: 27.08.2006

[14] Cooper, J., Turning Carbon into Electricity. Science and technology review. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2001.

[15] Steinberg M., Cooper J., Cherepy N., High Efficiency Direct Carbon and Hydrogen Fuel Cells for Fossil Fuel Power Generation. Proceedings of the AIChE Meeting, Spring, 2002.

[16] Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W., Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in The Tropics with Charcoal–A Review, Biol Fert Soils, 35:219, 2002.