NÜKLEER ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE KÜRESEL ISINMAYA ETKİLERİ

Ahmet Hikmet YALÇIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2006
ANKARA

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet Hikmet YALÇIN

NÜKLEER ENERJİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE KÜRESEL ISINMAYA ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Hikmet YALÇIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2006

ÖZET

Fosil yakıtların hızlı tükenmeleri ve yakılmaları sonucu çevre felaketlerine yol açmaları, insanoğlunu yeni enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Bu enerji kaynağının büyük ölçüde nükleer enerji ve yenilenebilir kaynakları olacağı öngörülmektedir. Birincil enerji kaynağı olarak, nükleer enerjiyi kullanan hidrojen enerji sistemleri, gelecekte fosil yakıt sistemlerinin yerini alması beklenmektedir. Bu çalışmada; enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin özellikleri verilerek, en verimli ve sürdürülebilir üretimin termokimyasal çevrimlerle nükleer enerjiden elde edilebileceği tespit edilmiştir. Hidrojen üretiminde kullanılacak nükleer reaktör tiplerinin en uygunu yüksek sıcaklık reaktörleri ve bu reaktörde kullanılacak en uygun termokimyasal çevrimin de sülfür-iyot çevrimi olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmamızda, küresel ısınma ve hidrojen enerji kullanımının temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınmanın etkileri matematiksel olarak formülüze edilerek sonuçlar grafikler çizilerek verilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Bilim Kodu : 708.1.038
Anahtar Kelimeler : Hidrojen, Nükleer-Hidrojen enerji, Küresel ısınma, Sürdürülebilir kalkınma
Sayfa Adedi : 73
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

NUCLEAR –HYDROGEN PRODUCTION AND ITS EFFECTS ON THE GLOBAL WARMING

(M.Sc. Thesis)

Ahmet Hikmet YALÇIN

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

April 2006

ABSTRACT

As a result of rapid consumption and burning of the fossil fuels, the environmental disasters directed humankind towards the new energy resources. This energy resource is mainly predicted to be the nuclear and the renewable energy resources. It is expected that the hydrogen energy one of the primary energy resources produced from nuclear energy is going to replace the fossil fuel systems. In this study, properties of hydrogen as a energy transporter were given and it was stated that the most efficient and sustainable production can be obtained from nuclear energy by means of thermo-chemical cycles. It was realized that the most convenient type of nuclear reactors is the high temperature reactors and the most convenient thermo-chemical cycle used in this reactor is the sulphur-iodine cycle. Furthermore, in our study the effects of the global warming and the utilization of hydrogen energy and the sustainable development with clean energy were mathematically formulated. The results were given graphically and some suggestions were made.

Science Code : 708.1.038
Key Words : Hydrogen, Nuclear-Hydrogen Production, Global Warming, Sustainable Development
Page Number: 73
Adviser : Assoc. Prof. H. Mehmet ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. H. Mehmet ŞAHİN'e yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Prof. Dr. Sümer ŞAHİN'e, ayrıca Ar. Gör. Eşref BAYSAL'a ve manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan çok değerli eşime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iii

ABSTRACT iv

TEŞEKKÜR v

İÇİNDEKİLER vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR x

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 4

2.1. Hidrojen ve Özellikleri 4

2.1.1. Hidrojenin tarihçesi 4

2.1.2. Hidrojenin özellikleri 5

2.1.3. Hidrojenin formları ve izotopları 5

2.1.4. Hidrojen enerji sisteminin avantajları 6

2.2. Nükleer Hidrojen Üretimi 9

2.2.1. Nükleer ısı kullanarak hidrojenin termokimyasal yolla üretimi 12

2.2.2. Nükleer güç ve termokimyasal çevrimler kullanarak hidrojen yakıtının yüksek verimlilikte üretimi 25

2.2.3. Nükleer ısı kaynağının seçimi 32

3. HİDROJEN VE HİDROJEN ENERJİ STRATEJİSİ 39

3.1. Hidrojenin Avantajları ve Dezavantajları 40

3.2. Fosil Yakıtların Kullanımına Bağlı Küresel Problemler 41

Sayfa

3.2.1. Dünya nüfusunun artması, teknolojik gelişmeler ve enerji talebinin artmasından dolayı fosil yakıt rezervlerinin azalması.....41

3.2.2. Atmosferdeki CO_2 emisyonlarının konsantrasyonunun artmasıyla küresel iklim değişikliği 43

3.2.3. Dünya genelindeki enerji fiyatlarındaki artıştan dolayı hayat standardındaki düşüş ve ekonomik gerileme 44

3.3. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen 44

3.3.1. Hidrojenin bugünkü ekonomideki yeri 47

4. ÇALIŞMADA UYGULANAN YÖNTEM VE METOT 48

4.1. Dünya Enerji Durumu 48

4.2. Yöntem 50

4.2.1. Küresel ısınma.....50

4.2.2. Temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma 55

5. UYGULANAN YÖNTEMİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ 58

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 64

KAYNAKLAR 67

ÖZGEÇMİŞ 73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Hidrojen ve diğer konvansiyonel yakıtların özellikleri 11

Çizelge 2.2. İki adımlı prosesler 14

Çizelge 2.3. Üç adımlı prosesler 14

Çizelge 2.4. Dört adımlı prosesler.....17

Çizelge 2.5. Beş adımlı prosesler.....21

Çizelge 2.6. Altı adımlı prosesler.....23

Çizelge 2.7. Çevrim aşamaları 26

Çizelge 2.8. İkinci eleme aşama puanlaması 29

Çizelge 2.9. Nükleer hidrojen üretiminde kullanılması düşünülen nükleer reaktör tipleri.....33

Çizelge 2.10. Reaktör soğutucularının temel özellikleri.....34

Çizelge 2.11. Reaktör soğutucularının termal ve kimyasal özellikleri 35

Çizelge 2.12. Gereksinimler ve kriterler.....36

Çizelge 4.1. Dünya enerji talebi, tüketim ve büyüme oranları 49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Tipik termokimyasal döngünün şeması 12

Şekil 2.2. Kimyasal reaktantların döngüsel ilişkileri 31

Şekil 2.3. Reaktör bazlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi 32

Şekil 2.4. Reaktörlerin nitelik değerlendirme sonuçları.....37

Şekil 3.1. Fosil yakıt kullanımına dayalı dünya problemleri 42

Şekil 3.2. Hidrojen kullanım tipleri ve üretim teknikleri arasındaki bağlantı.....46

Şekil 5.1. Fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen enerji kullanımı ile fosil yakıtlara olan talep 59

Şekil 5.2. Fosil olmayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımına bağlı olarak küresel ısınma potansiyeli 60

Şekil 5.3. Fosil olmayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımına bağlı olarak Sürdürülebilir kalkınma faktörünün gösterimi 62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E_{dbe}	Dünya birincil enerji miktarı, Mtoe
K_k	Kömür kullanımı, Mtoe
K_{H_2}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojen kullanımı, Mtoe
K_{dg}	Doğal gaz kullanımı, Mtoe
K_p	Petrol kullanımı, Mtoe
β_{kk}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin kömür yerine kullanıldıktan sonraki kömür kullanım oranı
β_{fyk}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin fosil yakıtlar yerine kullanıldıktan sonraki fosil yakıt kullanım oranı
β_{dgk}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin doğal gaz yerine kullanıldıktan sonraki doğal gaz kullanım oranı
β_{pk}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin petrol yerine kullanıldıktan sonraki petrol kullanım oranı
$\Phi_{k.ısınma}$	Küresel ısınma potansiyeli
$\Psi_{\text{s.kalkınma}}$	Temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma faktörü
ω_{H_2-k}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin kömür yerine kullanım oranı

Simgeler	Açıklama
ω_{H_2-fy}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin fosil yakıtlar yerine kullanım oranı
ω_{H_2-dg}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin doğal gaz yerine kullanım oranı
ω_{H_2-P}	Fosil olmayan yakıtlardan üretilen hidrojenin petrol yerine kullanım oranı
φ_{dgk}	Doğal gaz kullanım oranı
φ_{pk}	Petrol kullanım oranı
φ_{kk}	Kömür kullanım oranı
φ_{fyk}	Fosil yakıt kullanım oranı

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişimi ve dünya nüfusunun artması sonucu enerji gereksinimi gittikçe büyümektedir. Buna karşılık dünyada kullanılan klasik enerji kaynaklarının rezervleri azalacağından gelecek bir zamanda gereksinimi karşılayamaz hale gelecektir. Buna çözüm olarak iki alternatif vardır: birincisi, mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak; ikincisi, yeni enerji kaynakları ortaya çıkarmak suretiyle kullanıma hazır hale getirmektir. Fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz, kömür vb.) günümüzde dünya enerji talebinin büyük bir kısmını karşılamakla birlikte, hızla tükenmekte ve ayrıca yanmaları sonrasında sera etkisi, ozon delikleri, asit yağmurları ve kirlilik gibi çevre ve dünyadaki yaşam için büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Günümüzde alışagelmiş-birincil-fosil enerji kaynakları (kömür, petrol, doğal gaz) ve birincil nükleer teknolojinin yanı sıra, yeni-yenilenebilir enerji teknolojileri (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisi, gel-git enerjisi v.b) araştırma-geliştirme çalışmaları ve uygulamaları artan bir hızla ilerlemektedir. Yeni enerji teknolojileri kapsamında, üzerinde en çok durulan ve ülkelerin büyük bir yarış halinde uygulamaya geçmek için uğraş verdiği alan, hidrojen enerjisidir. Pek çok mühendis ve bilim adamı bu küresel sorunları gidermenin yolunun varolan fosil yakıt sistemini hidrojen enerji sistemi ile değiştirmek olduğu görüşünü paylaşmaktadır. Hidrojen oldukça verimli ve temiz bir yakıttır. Yanması sera gazları, ozon delikleri, asit yağmurları ve kirlilik gibi sorunlar doğurmayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojenin kullanılması bir daha değiştirmek zorunda kalmayacağımız bir enerji sistemi olacaktır. Buna karşın, sentetik fosil yakıt üretimi gibi petrol devamı enerji sistemleri de bulunmaktadır. Bu sistemlerde, mevcut kömür rezervleri kullanılarak, sentetik benzin ve doğal gaz üretilecektir. Bir açıdan, bu üretimler, günümüz fosil sisteminin devamını garanti edecektir. Günümüz fosil yakıt sistemine alternatif olan bu iki sistem (hidrojen enerji sistemi ve sentetik fosil yakıt sistemi) bugünkü sistem ile maliyet, çevre zararları ve kullanım verimliliği olarak kıyaslandığında, hidrojen enerji sisteminin en iyisi olduğu ve 21. yüzyılın sonunda önce fosil yakıt sisteminin

yerini alması gerektiği sonucu öngörülmektedir [Momirlan ve Veziroğlu, 2002; Ultanir, 1997; Williams, 1980; Schultan, 1979].

Ayrıca, küresel iklim değişikliğinin kaçınılmaz bir biçimde ortaya çıkışında fosil yakıt kullanımının ne denli etkili olduğunun anlaşılmasıyla beraber yeniden yükselişe geçen nükleer enerji yeni nesil nükleer reaktörlerle "temiz enerji" ünvanını daha da sağlamlaştırmaktadır. Bu bağlamda dördüncü nesil olan yüksek sıcaklık reaktörleri, kendiliğinden güvenli yapısından dolayı yakın bir gelecekte elektrik enerjisi üretiminde sıkça görmeye başlayabileceğimiz son derece umut verici reaktör tipleridir. Yüksek sıcaklık reaktörleri, diğer konvansiyonel nükleer reaktörlere göre daha yüksek sıcaklıklara ulaştığından dolayı özellikle bölgesel ısıtma, arıtma işlemleri ve kimya sanayindeki kullanım alanları, nükleer silahların tasfiyesinden elde edilen plütonyumun değerlendirilmesi gibi kullanımının yanında hidrojen üretimi gibi pek çok uygulama için ideal reaktör tipleridir. Yüksek sıcaklık reaktörleri bütün bu olağanüstü özellikleri sayesinde yakın bir gelecekte nükleer teknolojinin kalesi haline gelecek ve nükleer kaza ihtimali bile olmayan bilgi teknolojisine dayalı yapısıyla, insanların bu teknolojiye sempati ile yaklaşmasını sağlayacaktır. Bu rektör tipleri yardımıyla, hem elektrik enerjisi üretimi hem de temiz hidrojen enerjisi üretimine katkı sağlanacaktır [Veziroğlu, 2000; Angelo ve Buden, 1985; Nero, 1979; Simnad, 1971].

Dünya enerji ihtiyacı, dünya nüfusunun artması, teknolojik gelişmeler ve hayat standartlarındaki artışlardan dolayı artmaktadır. Bu faktörler dünya nüfusunun göç etmesine, açlığa, çevresel (özellikle hava ve su kirliliği) problemlere, hastalıklar ve sağlığın bozulması, terörizm, enerji ve doğal kaynakların yetersizliği gibi tepkilere sebep olmuştur. Bu etkiler dünya genelinde sıkıntıların artmasına neden olmaktadır [Veziroğlu, 2002].

Ayrıca, alternatif enerji kaynaklarına olan yatırımlar gelecekteki dünya dengeleri, barışı ve kalkınma için son derece önemli olacaktır. Alternatif enerji kaynaklarının en önemli özelliği çevre kirliliğine olan olumlu etkileridir. Bu sebeplerden dolayı gelecekte hidrojen en önemli enerji taşıyıcısı olarak karşımıza çıkacaktır. Birçok

araştırma deney ve teorik çalışma özellikle son zamanlarda hidrojen üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak, burada en önemlisi hidrojen enerjisi kavramını iyi anlamak olacaktır [Ultanir, 1997].

Bu çalışmada; literatür araştırmamız sonucunda uygulanabilirlik ve verimlilik açısından en uygun reaktör tipinin seçimi ve uygun olan tipleri kullanarak, nükleer enerjiden yararlanarak termokimyasal olarak hidrojen elde edilmesi, ayrıca literatürdeki datalar kullanılarak, küresel ısınma ve hidrojen enerji kullanımının temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınmanın etkileri matematiksel olarak formülüze edilerek karşılaştırmalı olarak grafikler çizilerek, sonuçlar ve öneriler verilmeye çalışılmış ve hidrojen enerjisinin stratejisi ve ekonomisi üzerinde durularak gelecekteki araştırmalara ışık tutmayı amaçlamıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Hidrojen ve Özellikleri

2.1.1. Hidrojenin tarihçesi

Hidrojeni ilk olarak 16. yüzyılda İsviçreli simyacı Paracelsus, asitlerin bazı metaller üzerindeki etkisini araştırırken elde etti. Cavendish'in (1776) hidrojeni ayrı bir madde olarak tanımlamasından yıllarca önce hidrojen çeşitli yollarla elde edilmiştir. Lavoisier (1781) tarafından adlandırılan hidrojen evrende en çok bulunan elementtir. Ancak, dünyada serbest halde bulunmaz, bir enerji kaynağı kullanılarak elde edilir. Hidrojen renksiz, kokusuz, tatsız ve yanıcı bir gazdır [Bentor, 2003].

Hidrojenin Zamansal Gelişimi

- 1800 : Hidrojenin ve oksijenin elektroliz yöntemi ile ilk üretimi
- 1898 : Linde prosesi kullanılarak hidrojenin sıvılaştırılması
- 1902 : Oerlikon tarafından ilk ticari elektroliz ünitesi kurulması
- 1929 : Saf para-hidrojen üretimi
- 1931 : Döteryum izotopunun bulunması
- 1935 : Fosforik asitten nötron bombardımanı yoluyla tirityum, ağır hidrojen, eldesi
- 1954 : İlk hidrojen bombası patlatılması (Bikini Atoll, USA)
- 1955 : Hidrojenin enerji taşınım ortamı olarak tanımlanması ve bu yönde çalışmaların başlaması
- 1969 : Hidrojenin yararlanılabilir özelliklerini kullanarak hidrojen enerjisi kavramının geliştirilmesi
- 1986 : Dünyadaki toplam hidrojen üretimi 500×10^6 m^3 (normal sıcaklık ve basınçta)

2.1.2 Hidrojenin özellikleri

Hidrojenin atomik ve fiziko-kimyasal özellikleri onu diğer bütün elementlerden oldukça farklı kılmaktadır. Bunlar şu şekildedir [Bentor, 2003].

Atomik sembolü	: H
Atom numarası	: 1
Atom ağırlığı	: 1.00794 akb
Elektron konfigürasyonu	: $1s^1$
Ergime noktası	: -259.14 °C
Kaynama noktası	: -252.87 °C
Sınıflandırma	: Ametal
Kristal yapısı	: Hekzagonal
Yoğunluk (293 °K)	: 0.08988 g/cm^3 veya g/ml
Buharlaşma ısıs	: 0.44936 kJ/mol
Füzyon ısısı	: 0.05868 kJ/mol
Özgül ısı	: 14.304 J/gK
Atom yarıçapı	: 0.79 A
Bağ yarıçapı	: 0.32 A
İzotopları	: H-1:(Kararlı); H-2 (Döteryum); H-3 (Trityum)

2.1.3. Hidrojenin formları ve izotopları

- İzotoplarından oldukça farklı olarak, hidrojen gazının, normal şartlar altında, orto ve para hidrojen olarak bilinen, ve birbirlerinden elektronlarının ve çekirdeklerinin spinleri ile farklılaşan iki tip molekülün bir karışımı olduğu gösterilmiştir.
- Normal hidrojen oda sıcaklığında % 25 para form ve % 75 orto form içerir. Orto form saf halde hazırlanamaz. Bu iki form enerji açısından farklı olduklarından fiziksel özellikleri de farklılık arzeder. Parahidrojenin ergime ve kaynama noktaları, normal hidrojeninkinden yaklaşık 0.1 ºC daha düşüktür.

- Hidrojenin olağan izotopu (H) Prosyum olarak bilinir. Diğer ikisi, Döteryum (bir proton ve bir nötron) ve Trityum'dur (bir proton ve iki nötron). İzotoplarına farklı isimler verilmiş olan tek element hidrojen'dir. Döteryum ve Trityum'un her ikisi de nükleer füzyon reaktörlerinde yakıt olarak kullanılırlar. Yaklaşık 6000 olağan hidrojen atomu içinde bir Döteryum atomu bulunur.
- Döteryum, nötronları yavaşlatmakta bir moderatör olarak kullanılmaktadır. Trityum atomları ise çok daha küçük oranlarda mevcuttur. Trityum, nükleer reaktörlerde kolayca meydana gelir ve hidrojen (füzyon) bombasının hazırlanmasında kullanılır. Işık yayan boyalarda radyoaktif bir eleman ve ayrıca izleyici olarak da kullanılır.

2.1.4. Hidrojen enerji sisteminin avantajları

Mevcut fosil yakıt sisteminin yerine hidrojen enerji sistemini getirmenin avantajlarını şu şekilde özetleyebiliriz. Bu değişiklik,

1) Sera problemini çözecektir.
2) Kirlilik ve asit yağmurları problemini çözecektir.
3) Temiz ve sürekli bir enerji sistemini yerleştirecektir.
4) İstihdam sağlayacaktır.
5) Yeni bir enerji teknolojisi için ihracat potansiyeli meydana getirecektir.
6) Petrol ithalatını azaltacaktır.
7) Ticaret açığını azaltacaktır.
8) Çevreyi koruyarak ekonomiye destek olacaktır.

Ülkelerin kalkınmalarında enerjinin ve dolayısıyla enerji hammaddelerinin yeri çok önemlidir. Gelişmişliğin göstergesi olan elektrik enerji kurulu gücü ve buna bağlı olarak kişi başına düşen tüketim miktarlarının değerlendirildiği günümüzde, fosil enerji kaynaklarının bilinçsizce kullanılarak insanların hizmetine sunulması, hem sınırlı ve yenilenemeyen doğal kaynakların kısa zamanda tükenmesine hem de bilinçsiz tüketim yolu ile çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır [Veziroğlu, 2002].

Enerji, tüketiciye son olarak yakıt ve elektrik biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin, çok yönlü kullanışlı olması, temiz olması, dağıtım kolaylığı sağlaması şeklinde özetlenebilecek pek çok avantajı olmasına karşılık, teknoloji yalnız elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da gerektiren biçimde gelişme göstermiştir. Genel enerji tüketiminin % 60' i ısıya dayalı olarak gerçekleşmiştir. Özellikle ulaştırma sektöründe ve stasyoner kuvvet makinelerinde yakıta gereksinim vardır [Veziroğlu, 1998].

İdeal bir yakıtta bulunması istenilen özellikler şöyle sıralanabilir;

- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli
- Taşınırken enerji kaybı hiç veya çok az olmalı
- Her yerde, örneğin, sanayide, evlerde, taşıtlarda kullanılabilmeli
- Depolanabilmeli
- Tükenmez olmalı
- Temiz olmalı
- Birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı
- Değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılmalı
- Güvenli olmalı
- Isı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli
- Çevreye hiç zarar vermemeli
- Çok hafif olmalı
- Çok yüksek verimle enerji üretebilmeli
- Karbon içermemeli
- Ekonomik olmalıdır.

Bugüne kadar yakıt ihtiyacı, fosil yakıtlar ve onların türevleri ile karşılanmıştır. Fosil kökenli yakıtların ağırlıkları, içerdikleri enerji miktarlarına kıyasla azdır. Taşınmaları kolay olup, depolanabilir ve uzun süre saklanabilirler. Buna karşılık tükenir ve hava-toprak-su üçlüsünü aşırı derecede kirletirler. Fosil yakıtlara alternatif olan yeni enerji kaynakları ise, temiz ve tükenmez oldukları halde, örneğin güneş enerjisi, güç

potansiyeli düşüktür, kesiklidir, zamanla şiddeti değişir ve bu nedenle depolama gerektirir. Taşınır formda bulunmadıklarından araçlarda yakıt olarak kullanılamamaktadır. Üretilen enerji, kullanım (tüketim) yerlerinden uzaktır. Birincil enerji kaynaklarından çeşitli yollarla üretilen elektrik enerjisinin de en büyük dezavantajı, çevrim verimlerinin düşük olması ve depolanamamasıdır. Hidrojen, ideal yakıttan istenen tüm özellikleri yerine getiren bir yakıt olup, elektrik enerjisinin dezavantajlarını giderecek ve yeni enerji kaynaklarıyla tüketim yerleri arasında köprü kurarak kullanımını yaygınlaştıracak bir ara sistemdir.

Doğadaki ana enerji kaynakları birincil enerji kaynaklarıdır. Birincil kaynakların fiziksel durumu farklı olacak biçimde dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere enerji taşıyıcısı denir. Elektrik, yüzyılı aşkın süredir kullanılan bir enerji taşıyıcısıdır. Bugüne kadar kullanılan yakıtlar ise ya doğal yapılı ya da bunların fiziksel durumları sabit kalarak değiştirilmesi ile elde edilmiş ürünlerdir. Doğada bileşik biçiminde bol miktarda bulunan hidrojen serbest biçimde olmadığından, diğer enerji kaynaklarından üretilen bir enerji taşıyıcısıdır. Elektrikten sonra teknolojinin geliştirdiği yeni bir enerji taşıyıcısı olan hidrojen, sadece önümüzdeki yüzyılın değil güneş ömrü olarak kestirilen gelecek 5 milyar yılın da yakıtı olarak kabul edilmektedir. Hidrojen yakıtı ve hidrojen enerjisi teknolojisi; hidrojen üretim teknolojisi, hidrojenin taşınması ve depolanması teknolojisi, hidrojen kullanım teknolojisi alt bölümlerine ayrılır. Bu alt bölümlerin tümünde önemli gelişmeler sağlanmış olup, uygulanabilir teknoloji birikimi bulunmaktadır. Uygulamanın yaygınlaştırılmasının önündeki engeller, ekonomik faktörler ve mevcut enerji sistemleri ile geleneksel motorların demodeleşmesinin doğurabileceği stratejik sakıncalardır. Ancak, çevresel koşullar bir an önce kullanımının başlamasını zorunlu kılmaktadır [Veziroğlu, 1998].

Hidrojen su içinde bol bulunan bir maddedir ve yerli enerji kaynakları ile üretimi mümkündür. Kullanım verimi yüksek bir yakıt olup çeşitli amaçlar için kullanılabilmektedir. Motor ya da gaz türbini ile bir jenaratörü tahrik ederek veya yakıt pili olarak kullanılarak, yüksek bir verimle elektrik üretilebilir. Taşıtlarda; basınç altında, sıvı halde ve metal hidrid şeklinde depo edilerek motor yakıtı olarak

yararlanılır. Kimya endüstrisinde hammadde olarak kullanılır. Hidrojen çevre dostudur. Çevre etkisini de içeren efektif maliyeti diğer yakıtlardan düşüktür. Yanma sonucunda sadece su buharı meydana gelir. Yanma ısısı oldukça yüksektir ve zehirli etkisi yoktur. Boru ve tankerlerle taşınabilir. Üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanılması durumunda, bu kaynakların kesintili olma sorununa da çözüm getirir. Hidrojenin yukarıda sıralanan özellikleri gösteriyor ki yeni yüzyıl, enerji-ekonomi-ekoloji (kısaca 3E) uyumu açısından hidrojen çağı olacaktır [Veziroğlu, 2000].

2.2. Nükleer Hidrojen Üretimi

Dünya enerji talebi, büyük oranda uygun kullanışlarından dolayı sıvı fosil yakıtlar vasıtasıyla karşılanmaktadır[Awad ve Veziroğlu, 1984; Schultan, 1979]. Ancak petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların rezervleri, kısıtlı olmalarından dolayı fiyatları da her geçen gün artmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yeni bir enerji formuna ihtiyaç vardır. Bu enerji, fosil yakıtların kullanımı yerine geçecektir.

Şu dört sebepten dolayı enerji talebi artmaktadır [Veziroğlu, 1982].

1) Dünya nüfusu artmaktadır.
2) Gelişmekte olan ülkelerin hayat standartlarının artmasından dolayı enerji ihtiyacıda artmaktadır.
3) Fosil yakıt kullanımı artmaktadır.
4) Fosil yakıtların kullanımından dolayı kirlilik artmaktadır

Çeşitli yenilenebilir (alternatif) enerji kaynakları: güneş, rüzgâr, dalga, termonükleer, jeotermal vb. dünya enerji ihtiyacını karşılamada gelecek için öngörülmektedir [Veziroğlu, 1979].

Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, fosil yakıtların yerini almasını hedefleyen hidrojen enerji sistemleri geliştirilmektedir. Geçmişte, hidrojen, doğalgaz ve petrolden üretilmekte idi. Ancak, bu yöntem fosil yakıtların rezervlerinin azalması ve çevreye olumsuz etkilerinden dolayı, birincil hedef olmamalıdır. Diğer hidrojen kaynağı, bol

miktarda olan su'dur. Hidrojen suyun ayrıştırılmasıyla üretilir, fakat bu işlem için enerjiye ihtiyaç vardır.

Suyun ayrıştırılmasında etkili olarak 4 yöntem vardır.

- Elektroliz
- Direkt ısıl ayrıştırma
- Kimyasal reaksiyon
- Termokimyasal çevrim

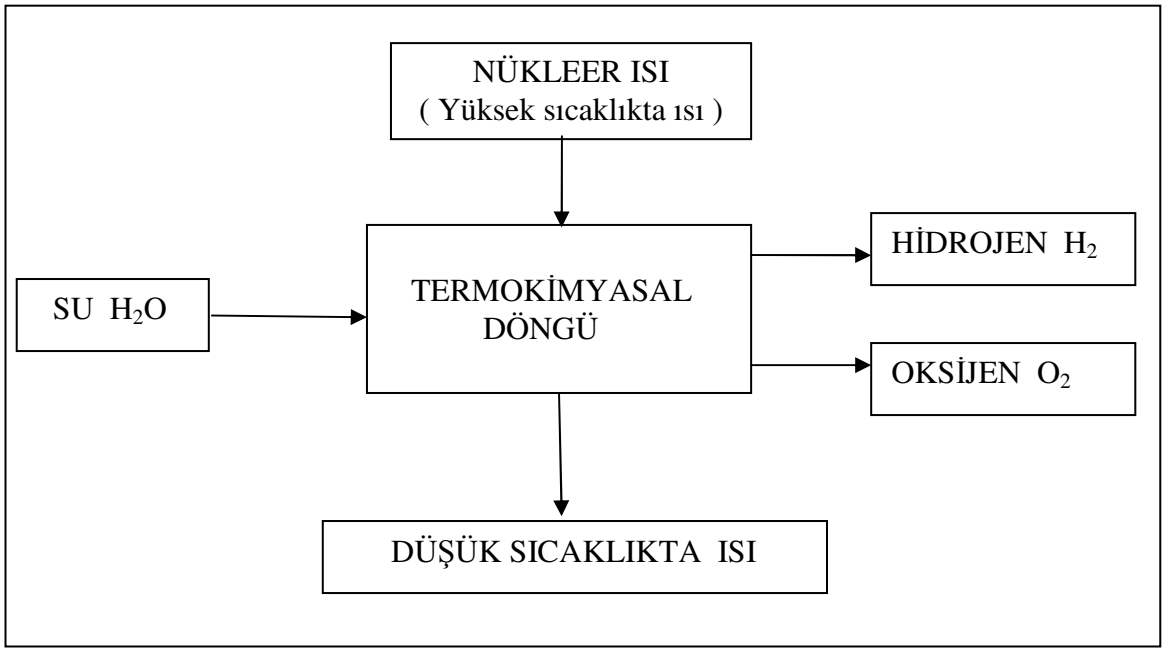
Yüksek sıcaklık reaktörlerin, en ideal uygulaması, termokimyasal metotlar yardımıyla su'dan hidrojen üretebilmeleridir. Son yıllarda kapalı çevrim yoluyla suyun termokimyasal ayrıştırılması yöntemi dikkatleri çekmektedir. Termokimyasal proseslerde, ısıl enerji, ilk olarak mekanik enerjiye dönüşmeksizin kimyasal enerji (hidrojen) formuna dönüşmesi yöntemidir. Aynı zamanda elektrik enerjisiyle elektroliz yoluyla hidrojen üretimi mümkündür [Nanda ve ark., 1986; Cox ve Bartlit, 1983]. Birincil enerji kaynağı olarak yüksek sıcaklık reaktörleri (High Temperature Reactor, HTR) veya güneş enerjisi ısı yoluyla hidrojen üretimini sağlamaktadırlar. Burada birincil enerjiden alınan ısıyla hidrojen üretimi ya elektroliz ya da termokimyasal süreçlerde yapılmaktadır. Termokimyasal süreç elektroliz yöntemine göre daha yüksek verimlidir.

Çizelge 2.1. Hidrojen ve diğer konvansiyonel yakıtların özellikleri [Yalçın, 1989]

Özellikler	Hidrojen	Metan	Metanol	Benzin	Jet Yakıtı
Normal kaynama noktasındaki sıvı sıcaklığı	20.3 K	112 K	338 K	320-500 K	330-530 K
Buharlaşma ısısı	0.45 MJ/kg	0.51 MJ/kg	1.1 MJ/ kg	—	—
Yayılım kaysayısı	0.63 cm^2/s	0.2 cm^2/s	—	0.08 cm^2/s	—
Havanın içinde alevlenebilirlik limitleri (hacimce)	(4.1-7.4%)	(5.3-15%)	(6.0-37%)	(1.5-7.6%)	(0.8-5.6%)
Havanın içinde patlayabilirlik limitleri (hacimce)	(18-59%)	(6.3-14%)	—	—	—
Tutuşma sıcaklığı	850 K	807 K	700 K	530 K	522 K
Tutuşma enerjisi	20 μJ	300 μJ	—	250 μJ	—
Alevlenme sıcaklığı	2400 K	2190 K	—	—	—
Alevlenme hızı	2.75 m/s	0.37 m/s	0.41 m/s	<0.3 m/s	—
Sönme mesafesi	0.06	0.23	—	>0.25 cm	—
Alevin yayılması	0.10	1.0	—	—	—
Yanma (tutuşma) sıcaklığı	120 MJ/ kg 8.5 GJ/ m^3	50 MJ/ kg 21 GJ/ m^3	20 MJ/ kg 16 GJ/ m^3	44 MJ/ kg 31 GJ/ m^3	42 MJ/ kg 34 GJ/ m^3
Hava içindeki yakıtın % hacim stoikimetrik karışımı	29.6	9.5	12.3	~1.32	~1.2

2.2.1. Nükleer enerji kullanarak hidrojenin termokimyasal yolla üretimi

Termokimyasal hidrojen üretimi, yüksek sıcaklık kaynağından direkt olarak ısıyı alarak elde edilir. Aynı zamanda elektroliz yapmada önemli bir etkiye sahiptir. Elektroliz sistemlerde, gerekli buharlaştırma işlemleri için birincil enerji kaynağından yararlanılarak alınan ısıya ihtiyaç vardır. Bu birincil enerjiyi elektriğe %40 verimde çevirebiliriz. Ama hidrojen üretiminde elektroliz ve buharlaştırma işleminde kullanırsak verim %90'na kadar çıkar. Bu durum hidrojen üretimi için ısı enerji kaynaklarının verimi %36 arttırır [Seifritz, 1981; Fillo ve ark., 1979; Beghi, 1985].



Şekil 2.1. Tipik termokimyasal döngünün şeması

Termokimyasal hidrojen üretiminde kullanılan çevrimler ve bu çevrimlerde kullanılan 2-3-4-5-6 adımlı reaksiyon tipleri tablolar halinde aşağıda sunulmuştur.

Sülfürik asit-iyot çevrimi

Sülfürik asit-iyot çevrimi aşağıdaki üç reaktörden oluşan saf termokimyasal bir çevrimdir.

$2\ H_2O + x\ I_2 + SO_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2\ HIx_{(aq)}$, 350 K

$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + ½\ O_2$, 1100-1200 K

$2\ HIx \rightarrow H_2 + x\ I_2$, 600 K

Bu çevrim tüm sıvı ve gaz fazlar için uygulanır. General Atomic tarafından Amerika da test edilerek dakikada 2 litre sıvı hidrojen elde edilmiştir [Engels ve ark., 1986].

Hibrit sülfürik asit çevrimi

Bu çevrim Los Alamos Scientific laboratuarında termokimyasal hidrojen programında ilk yapılan çalışmadır. İki adımlık bir çevrimdir. Amerika ve İtalya aktif olarak geliştirmektedir. Bunlar Westinghouse ve Euratom işbirliği ile yapılmaktadır [Cox ve Bartlit, 1983; Williams, 1980].

$SO_{2(g)} + 2\ H_2O(l) \rightarrow H_{2(g)} + H2SO_{4(s)}$ (elektroliz) , 350 K

$H_2SO_{4(g)} \rightarrow H_2O(l) + SO_{2(g)} + ½\ O_{2(g)}$ (termokimyasal) , 1100-1200 K

Hibrit sülfürik asit - hidrojen bromid çevrimi

İtalya ISPRA Euratom komitesi araştırma merkez komisyonu aşağıdaki reaksiyonu laboratuvarlarında geliştirmiştir.

$SO_{2(g)} + Br(l) + 2\ H_2O(l) \rightarrow 2\ HBr_{(g)} + H_2SO_{4(s)}$, 350 K

$2\ HBr_{(s)} \rightarrow H_{2(g)} + Br_2(l)$ (elektroliz) , 350 K

$H_2SO_{4(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} + SO_{2(g)} + ½\ O_{2(g)}$, 1100-1200 K

Bu proses General Atomic'le işbirliği yapılarak hidrojen üretimi için sülfürik asidin yüksek sıcaklıkta parçalanmasına dayanır. Suyun elektrolizi ile hibrid tipli olmasından dolayı halojen asitlerin elektrolizleri için düşük enerji gerektirmesi bir avantajdır [Engels ve ark., 1986].

Çizelge 2.2. İki adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
1	Muravlev	2200	$Fe_3O_4 \rightarrow 3FeO + ½\ O2$
	(USSR)	400	$3FeO + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + H_2$
2	Hallet Air	700	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2HCl + ½\ O_2$
	Products 1965 (US)	300	$2\ HCl \rightarrow H_2 + Cl_2$ (elektroliz)
3	Westinghouse (US)	77	$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2 + H_2SO_4$ (elektroliz)
		850~950	$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + ½\ O_2$

Çizelge 2.3. Üç adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
1	Julich	200	$3\ FeO + H2O \rightarrow Fe_3O_4 + H_2$
	Center EOS	800	$Fe_3O_4 + FeSO_4 \rightarrow 3\ Fe_2O_3 + 3\ SO_2 + ½\ O_2$
	(batı almanya)	200	$3\ Fe_2O_3 + 3\ SO_2 \rightarrow FeSO_4 + 3\ FeO$
2	Mark 9 (İtalya)	450	$6\ FeCl_2 + 8\ H_2O \rightarrow 2\ FeO_4 + 12\ HCl + 2\ H_2$
		150	$2\ Fe_3O_4 + 3\ Cl_2 + 12\ HCl \rightarrow 6\ FeCl_3 + 6\ H_2O + O_2$
		420	$6\ FeCl_3 \rightarrow 6\ FeCl_2 + 3\ Cl_2$
3	General Atomic (US)	1140	$2\ Fe_3O_4 + 6\ NaOH \rightarrow 3\ NaOFe_2O_3 + 2\ H_2O + H_2$
		530	$3\ Na_2O\ .\ Fe_2O_3 + 3\ H_2O \rightarrow 6\ NaOH + 3\ Fe_2O_3$
		1470	$3\ Fe_2O_3 \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + ½\ O_2$
4	Euratom 1972 (İtalya)	700	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$
		600	$2\ HCl + 2\ FeCl_2 \rightarrow 2\ FeCl_3 + H_2$
		350	$FeCl_3 \rightarrow FeCl_2 + Cl_2$
5	GIRIO (Japonya)		$3\ FeBr_2 + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6\ HBr + H_2$
			$Fe_3O_4 + 8\ HBr \rightarrow 3\ FeBr_2 + 4\ H_2O + Br_2$
			$H_2O + Br_2 \rightarrow 2HBr + ½\ O_2$
6	Euratom1970	700	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
	De Beni (İtalya)	250	$CO + 2\ Fe_3O_4 \rightarrow C + 3\ FeO_3$
		1400	$3\ Fe_2O_3 \rightarrow 2\ Fe_3O + ½\ O_2$
7	Yokohama		$2\ FeSO_4 + I_2 + 2H_2O \rightarrow 2\ Fe(OH)SO + 2\ HI$
	Mark 3		$2\ HI \rightarrow H_2 + I_2$
	1973 (Japonya)	250	$2\ Fe(OH)SO_4 \rightarrow 2\ FeSO_4 + H_2O + ½\ O_2$

Çizelge 2.3.(Devam) Üç adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
8	Aechen Univ. Julich 1972 (batı Almanya)	200 800 700	$2\ CrCL_2 + 2\ HCl \rightarrow 2\ CrCl_3 + H_2$ $2\ CrCl_3 \rightarrow 2\ CrCl_2 + Cl_2$ $H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$
9	Shell Prosesleri (US)	500 300 500	$6\ Cu + 3\ H_2O \rightarrow 3\ Cu_2S + 3\ H_2$ $Cu_2S + SO_2 + 3\ O_2 \rightarrow 2\ CuSO_4$ $2\ Cu_2S + 2\ CuSO_4 \rightarrow 6\ Cu + 4\ SO_2$
10	(US)	700 200	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $HCl + 2\ CuCl \rightarrow 2\ CuCl_2 + H_2$ $2\ CuCl_2 \rightarrow 2\ CuCl + Cl_2$
11	GIRIO (Japonya)	400~500 25 600~700	$2\ CuI + 2\ NH_3 + H_2O + ½\ O_2 \rightarrow 2\ CuO + 2\ NH_4I$ $2\ CuO + I_2 \rightarrow 2\ CuI + O_2$ $2\ NH_4I \rightarrow 2\ Nh_3 + I_2 + H_2$
12	Hitachi (Japonya)	800 100 600	$2\ NH_4I \rightarrow 2\ NH_3 + I_2 + H_2$ $2\ NaI + 2\ NH_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Na_2CO + 2\ NH_4I$ $Na_2CO_3 + I_2 \rightarrow 2\ NaI + CO + ½\ O_2$
13	Mark 2 1972 (İtalya)	725 25~125 825	$Mn_2O_3 + 4\ NaOH \rightarrow 2\ NaO.\ MnO_2 + H_2O + H_2$ $2\ NaO.\ MnO_2 + nH_2O \rightarrow 4\ NaOH(aq) + 2\ MnO_2$ $2\ MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 + ½\ O_2$
14	Gaz De France (Fransa)	700 100 900	$2\ KOH + {}_2\ K \rightarrow 2\ K_2O + H_2$ $K_2O_2 + H_2O \rightarrow 2\ KOH + ½\ O_2$ $2\ K_2O \rightarrow K_2O_2 + 2\ K$
15	Mark 8 (İtalya)	5~700 25~80 800~1000	$6\ MnCl_2 + 8\ H_2O \rightarrow 2\ Mn_3O_4 + 12\ HCl + 2\ H_2$ $3\ Mn_3O_4 + 12\ HCl \rightarrow 6\ MnCl_3 + 3\ MnO_2 + 6\ H_2O$ $3\ MnO_2 \rightarrow Mn_3O_4 + O_2$
16	LASL (US)	800 200 500	$6\ LiOH + 2\ Mn_3O_4 \rightarrow 3\ LiO.\ Mn_2O_3 + 2\ H_2O + H_2$ $3\ LiO.Mn_2O_3 + 3\ H_2O \rightarrow 6\ LiOH + 3\ Mn_2O_3$ $3\ Mn_2O_3 \rightarrow 2\ Mn_3O_4 + ½\ O_2$
17	Mark IS (İtalya)	77 230 850~950	$SrBr_2 + H_2O \rightarrow SrO + 2\ HBr$ $2\ HBr + Hg \rightarrow HgBr_2 + H_2$ $SrO + HgBr_2 \rightarrow SrBr + Hg + ½\ O_2$
18	General Atomic (US)		$2\ H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2\ HI$ $2\ HI \rightarrow H_2 + I_2$ $H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_4 + ½\ O_2$
19	THEME S-3 39 (US)	390 323	$SO_2 + H_2O + I_2 \rightarrow SO_3 + 2\ HI$ $SO_3 \rightarrow SO_2 + ½\ O_2$ $2\ HI \rightarrow H_2 + I_2$
20	General Atomic San Diego (US)		$2\ EuO + H_2O \rightarrow H_2 + Eu_2O_3$ $I_2 + SrO \rightarrow ½\ O_2 + SrI_2$ $Eu_2O_3 + SrI_2 \rightarrow 2\ EuO + I_2 + SrO$

Çizelge 2.3.(Devam) Üç adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
21	GIRIO (Japonya)		$As_2O_3 + 2I_2 + 6NH_3 + 5O_2 \rightarrow 2(NH_4)H_2AsO_4 + 4NH_4I$ $2\ (NH_4)H_2AsO_4 \rightarrow As_2O_3 + 2\ NH_3 + O_2 + 3\ H_2O$ $4\ NH_4I \rightarrow 4\ NH_3 + 2\ I_2 + 2\ H_2$
22	Sourian Gaz De France (Fransa)	400 1700 700	$Sn + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + SnO_2$ $2\ SnO_2 \rightarrow 2\ SnO + O_2$ $2\ SnO \rightarrow SnO_2 + Sn$
23	Miura (Japonya)	5 500~550 950~1000	$½\ Sb_2O_3 + H_2O + I_2 \rightarrow ½\ Sb_2O_5 + 2\ HI$ $2\ HI \rightarrow H_2 + I_2$ $½\ Sb_2O_5 \rightarrow ½\ Sb_2O_3 + ½\ O_2$
24	Osaka Inst. Of Tech. 1975 (Japonya)		$2\ NH_4I \rightarrow 2\ NH_3 + H_2 + I_2$ $BaCO_3 + I_2 \rightarrow BaI_2 + CO_2 + ½\ O_2$ $BaI_2 + 2\ NH_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow BaCO_3 + 2\ NH_4I$
25	Argonne (US)	27 427 427	$LiNO_2 + I_2 + H_2O \rightarrow LiNO_3 + 2\ HI$ $2\ HI \rightarrow I_2 + H_2$ $LiNO_3 \rightarrow LiNO_2 + ½\ O_2$
26	Funk (US)		$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $2\ TaCl_2 + 2\ HCl \rightarrow 2\ TaCl_3 + H_2$ $2\ TaCl_3 \rightarrow 2\ TaCl_2 + Cl_2$
27	US		$U_3O_8 + H_2O + 3\ CO_2 \rightarrow 3\ UO_2CO_3 + H_2$ $3\ UO_2 + CO_3 \rightarrow 3\ UO_3 + 3UO_3 + 3\ CO_2$ $3\ UO_3 \rightarrow U_3O_8 + ½\ O_2$
28	(US)	700 200 300	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $2\ HCl + 2\ CuCl \rightarrow 2\ CuCl_2 + H_2$ $2CuCl_2 \rightarrow 2\ CuCl + Cl_2$ (elektroliz)
29	Mark (İtalya)	77 77 850~950	$SO_2 + Br_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ HBr + H_2SO_4$ $2\ HBr \rightarrow H_2 + Br_2$ (elektroliz) $H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_4 + SO_2 + ½\ O_2$
30	(US)	700 300 500	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $2\ Hg + 2\ HCl \rightarrow 2\ HgCl + H_2$ $2\ HgCl \rightarrow 2\ Hg + Cl_2$ (elektroliz)

Çizelge 2.4. Dört adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
1	B-I Institute of Gas Technology (US)	850 230 330 850	$3\ FeCl_3 + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6\ HCl_2$ $Fe_3O_4 + 8\ HCl \rightarrow 2\ FeCl_3 + FeCl_2 + 4\ H_2O$ $2\ FeCl_3 \rightarrow 2\ FeCl_2 + Cl_2$ $Cl_2 + H_2O \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$
2	UT-3 University of Tokyo (Japonya)	700~750 500~650 200~300 550~600	$CaBr_2 + H_2O \rightarrow CaO + 2\ HBr$ $CaO + Br_2 \rightarrow CaBr_2 + ½\ O_2$ $Fe_3O_4 + 8\ HBr \rightarrow 3\ FeBr_2 + 4\ H_2O + Br_2$ $3\ FeBr_2 + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6\ HBr + H_2$
3	IGT C-5 (US)		$Fe_3O + 3\ SO_4 + H_2O \rightarrow 3\ FeSO_2 + 2\ H_2$ $3\ FeSO_4 \rightarrow 3/2\ Fe_2O_3 + 3/2\ SO_2 + 3/2\ SO_3$ $3/2\ Fe_2O_3 + ½\ SO_2 \rightarrow Fe_3O_4 + ½\ SO_3$ $2\ SO3 \rightarrow 2\ SO2 + O2$
4	Mark 4 (İtalya)	800 100 800 420	$Cl_2 + H_2O \rightarrow S\ HCl + ½\ O_2$ $2\ HCl + S + 2\ FeCl_2 \rightarrow H_2S + 2\ FeCl_3$ $H_2S \rightarrow H_2 + ½\ S_2$ $2\ FeCl_3 \rightarrow 2\ FeCl_2 + Cl_2$
5	Mark 6 (İtalya)	800 170 700 350	$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $2\ HCl + 2\ CrCl_2 \rightarrow 2\ CrCl_3 + H_2$ $2\ CrCl_3 + 2\ FeCl_2 \rightarrow 2\ CrCl_2 + 2\ FeCl_3$ $2FeCl_3 \rightarrow 2\ FeCl_2 + Cl_2$
6	LASL (US)	100 900	$SO_2 + 2\ H_2O + Br_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2\ HBr$ $H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + ½\ O_2$ $2\ HBr + 2\ CrBr_2 \rightarrow 2\ CrBr_3 + H_2$ $2\ CrBr_3 \rightarrow 2\ CrBr_2 + Br_2$
7	Mark I (İtalya)	730 250 200 600	$CaBr_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 2\ HBr$ $2\ HBr + Hg \rightarrow HgBr_2 + H_2$ $HgBr_2 + CA(OH)_2 \rightarrow CaBr_2 + HgO + H_2O$ $HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$
8	Mark IC (İtalya)	730 100 100 900	$2\ CaBr + 4\ H_2O \rightarrow 2\ Ca(OH)_2 + 4\ HBr$ $4\ HBr + CuO \rightarrow 2\ CuBr_2 + H_2O + H_2$ $2\ CuBr_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2\ CuO + 2\ CaBr_2 + 2\ H_2O$ $2\ CuO \rightarrow Cu_2O + ½\ O_2$
9	Argonne Nat. Lab. (US)	27 127 477 727	$H_2O + NH_3 + CO_2 + NaBr \rightarrow NaHCO_3 + NH_4Br$ $NaHCO_3 \rightarrow ½\ Na_2CO_3 + ½\ H_2O$ $NH_4Br + Ag \rightarrow ½\ H_2 + NH_3 + AgBr$ $AgBr + ½\ Na_2CO_3 \rightarrow Ag + NaBr + ½\ CO_2 + ½\ O_2$
10	Mark 2C (İtalya)	850 500 100 600	$Mn_2O_3 + 2\ Na_2CO_3 \rightarrow 2\ Na_2O.MnO_2 + CO_2 + CO$ $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$ $2\ Na_2O.MnO_2 + nH_2O + 2\ CO_2 \rightarrow 2Na_2CO_{3(aq)} + 2\ MnO_2$ $2\ MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 + ½\ O_2$

Çizelge 2.4.(Devam) Dört adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
11	Lawrence Livermore Univ. Of Cali. (US)	100 200 225	$MgSe + 2\ H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2Se$ $2\ H_2Se \rightarrow 2\ H_2 + 2\ Se$ $2\ Se + Mg(OH)_2 \rightarrow H_2Se + ½\ MgSe + ½\ MgSeO_4$ $½\ MgSe + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + ½\ MgSeO_4$
12	Lawrence Livermore Univ. Of Cali. (US)	410 300	$2\ CsOH + (x+1)/2\ O_2 \rightarrow 2\ CsOx + H_2O$ $CsOx + (x+y)\ Hg \rightarrow CsHgy + xHgO$ $HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$ $CsHgy + H_2O \rightarrow Hg + CsOH + ½\ H_2$
13	Astrojet-Cntral (US)	450 250 450	$2H_2O + 2\ Cs \rightarrow 2\ CsOH + H_2$ $2\ CsOH + 3/2\ O_2 \rightarrow 2\ CsO_2 + H_2O$ $2\ CsO_2 \rightarrow Cs_2O + 3/2\ O_2$ $Cs_2O \rightarrow 2\ Cs + ½\ O_2$
14	Tokyo Ins.of Technology 1975 (Japonya)	20~30 550~700	$6\ CaO + 6\ I_2 \rightarrow Ca(IO_3)_2 + 5\ CaI_2$ $Ca(IO_3)_2 \rightarrow CaO + I_2 + 5/2\ O_2$ $5\ CaI_2 + 5\ H_2O \rightarrow 5\ CaO + 10\ HI$ $10\ HI \rightarrow 5\ H_2 + 5\ I_2$
15	GE (US)	25 700 25 700	$2VCl_2 + 2\ HCl \rightarrow 2\ VCl_3 + H_2$ $4VCl_3 \rightarrow 2\ VCl_4 + 2\ VCl_2$ $2\ VCl_4 \rightarrow 2\ VCl_3 + Cl_2$ $H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$
16	Mark 3 (İtalya)	800 170 600 200	$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $2\ HCl + 2\ VOCl \rightarrow 2\ VOCl_2 + H_2$ $2\ VOCl_2 \rightarrow 2\ VOCl + 2\ VOCl_3$ $2\ VOCl_3 \rightarrow 2\ VOCl_2 + Cl_2$
17	Hallet Air Products (US)	700 200 176 150	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$ $2\ HCl + FeCl_2 \rightarrow 2\ FeCl_3 + H_2$ $2\ FeCl_3 + 2\ NO \rightarrow 2\ FeCl_2 + NOCl$ $2\ NOCl \rightarrow 2\ NO + Cl_2$
18	Ispra (İtalya)	800 800 25	$H_2SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO + H_2$ (elektroliz) $H_2SO_4 \rightarrow SO_3 + H_2O$ $SO_3 \rightarrow SO_2 + ½\ O_2$ $SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$
19	LASL	77 77 650~900	$2\ H_2O + SO_2 \rightarrow H_2SO_4 + H_2$ (elektroliz) $H_2SO_4 + BiO_3 \rightarrow Bi_2O_3SO_3 + H_2O$ $Bi_2O_3SO_3 \rightarrow Bi_2O + SO_3$ $SO_3 \rightarrow SO_2 + ½\ O_2$

Bizmut sülfat – sülfürik asit çevrimi

Bu çevrim 3 adımlık sülfürik asit çevriminde oluşabilecek önemli problemleri yok etmek için Los Alamos Scientific laboratuarında geliştirilmiştir [Cox ve. Bartlit, 1983; Williams, 1980]. Bu çevrim 4 adımdan oluşur ve aşağıda verilmiştir.

$2\ H_2O(l) + SO_{2(g)} \rightarrow H_2SO_{4(s)} + H_{2(g)}$ (elektroliz) , 350 K

$H_2SO_{4(s)} + Bi_2O_{3(s)} \rightarrow Bi_2.SO_{3(s)} + H_2O(I)$, 350 K

$Bi_2O_3.SO_{3(s)} \rightarrow Bi_2O_{3(s)} + SO_{3(g)}$, 990-1200 K

$SO_{3(g)} \rightarrow SO_{2(g)} + ½\ O_{2(g)}$

Çinko selenit çevrimi

Amerika enerji bakanlığı tarafından desteklenen Lawrance Livermore laboratuarlarında hidrojen üretimi için çinko selenit çevrimi geliştirilerek ekonomiklik analizleri yapılmıştır [Williams, 1980; Baker, 1978]. Bu çevrim aşağıdaki gibidir.

$2\ ZnO_{(s)} + Se(l) + SO_2(g) \rightarrow ZnSe + ZnSO_4$, 800 K

$ZnSe + 2\ HCl_{(aq)} \rightarrow ZnCl_{2(aq)} + H_2Se_{(g)}$, 350 K

$ZnCl_2(l) + H_2O_{(g)} \rightarrow ZnO_{(s)} + 2\ HCl_{(g)}$, 900 K

$ZnSO_{4(s)} \rightarrow ZnO_{(s)} + SO_{2(g)} + ½\ O_{2(g)}$, 1200 K

$H_2Se_{(g)} \rightarrow Se(l) + H_{2(g)}$, 750 K

Bu çevrim saf bir termokimyasal çevrimdir.

Kalsiyum bromit – demir oksit çevrimi

1978'de Kameyama ve Yoshida tarafından Tokyo üniversitesi Japonya da çok adımlı termokimyasal olarak suyun ayrıştırılması çevrimidir [Aochi ve ark., 1986; Kameyama ve ark., 1984]. Bu çevrim demir bileşikleri kalsiyum bromit ve hidrojenden meydana gelir. Aşağıdaki gibidir.

$CaBr_{2(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(s)} + HBr_{(g)}$, 950-1000 K

$CaO_{(s)} + Br_{2(G)} \rightarrow CaBr_{2(s)} + ½\ O_{2(g)}$, 750-800 K

$Fe_3O_{4(s)} + 8\ HBr_{(g)} \rightarrow 3\ FeBr_{2(s)} + 4\ H_2O_{(g)} + Br_{2(g)}$, 500-550 K

$3\ FeBr_{2(s)} + 4\ H_2O_{(g)} \rightarrow Fe_3O_{4(s)} + 6\ HBr_{(g)} + H_{2(g)}$, 950-1000 K

Magnezyum – iyot çevrimi

Bu çevrimde Mizuta ve Soliman, Milli Kimya Laboratuarı Japonya da H_2SO_4 ve HI'nın ayrışması için birçok yararlar sağladılar. Onlar birçok metal oksitleri denediler ancak sadece MgO'de başarılı oldular [Mizuta ve Kumagi, 1984; Mizuta ve Kumagi, 1986]. Bu Mg – I termokimyasal çevrimi aşağıdaki gibidir.

$I_{2(c)} + SO_{2(aq)} + 2\ H_2O(l) \rightarrow H_2SO_{4(aq)} + 2\ HI_{(aq)}$, 350 K

$2MgO_{(c)} + H2SO_{4(aq)} + 2\ HI_{(aq)} \rightarrow MgSO_{4(aq)} + MgI_{2(aq)}$, 350 K

$MgI_{2(aq)} \rightarrow MgO_{(c)} + 2\ HI_{(g)} + nH_2O_{(g)}$, <680 K

$MgSO_{4(c)} \rightarrow MgO_{(c)} + SO_{2(g)} + ½\ O_{2(g)}$, 1270 K

$2\ HI_{(g)} \rightarrow H_{2(g)} + I_{2(g)}$, 1279 K

Çizelge 2.5. Beş adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
1	Mark 7A (İtalya)	650 350 120 1000 420	$6\ FeCl_2 + 8\ H_2O \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + 12\ HCl + 2\ H_2$ $2\ Fe_3O_4 + ½\ O_2 \rightarrow 3\ Fe_2O_3$ $2\ Fe_2O_3 + 12\ HCl \rightarrow 4\ FeCl_3 + 6\ H_2O$ $Fe_2O_3 + 3Cl_2 \rightarrow 2\ FeCl_3 + 3/2\ O_2$ $6\ FeCl_3 \rightarrow 6\ FeCl_2 + 3\ Cl_2$
2	Mark 7B (İtalya)	650 350 1000 420 400	$6\ FeCl_2 + 8\ H_2O \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + 12\ HCl + 2\ H_2$ $2\ Fe_3O_4 + ½\ O_2 \rightarrow 3\ Gr_2O_3$ $3\ Fe_2O_3 + 9\ Cl_2 \rightarrow 6\ FeCl_3 + 3/2\ O_2$ $6\ FeCl_3 \rightarrow 6\ FeCl_2 + 3\ Cl_2$ $12\ HCl + 3\ O_2 \rightarrow 6\ Cl_2 + 6\ H_2O$
3	Mark 7A (İtalya)	650 350 120 420 800	$6\ FeCl_2 + 8\ H_2O \rightarrow 2\ Fe_3O_4 + 12\ HCl + 2\ H_2$ $2\ Fe_3O_4 + 1/2\ O_2 \rightarrow 3\ Fe_2O_3$ $3\ Fe_2O_3 + 18\ HCl \rightarrow 6\ FeCl_3 + 9\ H_2O$ $6\ FeCl_3 \rightarrow 6\ FeCl_2 + 3\ Cl_2$ $3\ Cl_2 + 3\ H_2O \rightarrow 6\ HCl + 3/2\ O_2$
4	IGT A-2 (US)	500 1000 350 1000 500	$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + + H_2$ $Fe_3O_4 + 9/2\ Cl_2 \rightarrow 3\ FeCl_3 + 2\ O_2$ $FeCl3 \rightarrow 3\ FeCl2 + 3/2\ Cl_2$ $2\ FeCl_2 + 3\ H_2 \rightarrow 3\ Fe + 6\ HCl$ $6\ HCl + 3/2\ O_2 \rightarrow 3\ Cl_2 + 3\ H_2O$
5	IGT 1969 (US)	 550 950 315	$Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2$ $3\ FeO + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + H_2$ $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3\ FeO + CO_2$ $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$ $2\ CO_2 \rightarrow 2\ CO + O_2$
6	Batı Almanya	3~450 3~350 150 atm 5~600 800	$6\ CO + 6\ H_2O \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2$ $6\ CO_2 + 6\ SO_2 + 6\ H_2O \rightarrow 2\ CO + 6\ H_2SO_4$ $6\ H_2SO_4 + 2\ Fe_2O_3 \rightarrow 2\ Fe_2(SO_4)_3 + 6\ H_2O$ $2\ Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2\ Fe_2O_3 + 6\ SO_3$ $6\ SO_3 \rightarrow 6\ SO_2 + 3\ O_2$
7	Agnes (US)	450~750 100~110 300 50~90	$3\ FeCl_2 + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6\ HCl + H_2$ $Fe_3O_4 + 8\ HCl \rightarrow FeCl_2 + 2\ FeCl_3 + 4H_2O$ $2\ FeCl_3 \rightarrow 2\ FeCl_2 + Cl_2$ $Cl_2 + Mg(OH)_2 \rightarrow MgCl_2 + ½\ O_2 + H_2O$ $MgCl_2 + 2\ H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + 2\ HCl$
8	National Chemical Lab. (Japonya)	77 77 400 995 995	$I_2 + SO_2 + 2\ H_2O \rightarrow H_2SO + 2\ HI$ $MgO + H_2SO_4 + 2\ HI \rightarrow MgSO_4 + MgI_2$ $MgI_2 \rightarrow MgO + 2\ HI + nH_2O$ $MgSO_4 \rightarrow MgO + SO_2 + ½\ O_2$ $2\ HI \rightarrow H_2 + I_2$

Çizelge 2.5. (Devam) Beş adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
9	GE	100	$2\ Cu + 2\ HCl \rightarrow 2\ CuCl + H_2$
	Beulah	30~100	$4\ Cucl \rightarrow 2\ CuCl_2 + 2\ Cu$
	(US)	500~600	$2\ CuCl_2 \rightarrow 2\ CuCl + Cl_2$
		80	$Cl_2 + Mg(OH)_2 \rightarrow MgCl_2 + H_2O + ½\ O_2$
		350	$MgCl_2 + 2\ H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + 2HCl$
10	Mark	800	$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2\ HCl + ½\ O_2$
	6C	170	$2\ HCl + 2\ CrCl_2 \rightarrow 2\ CrCl_3 + H_2$
	(İtalya)	700	$2\ Crcl_3 + 2\ FeCl_2 \rightarrow 2\ CrCl_2 + 2\ Fecl_3$
		150	$2\ FeCl_3 + 2\ CuCl \rightarrow 2\ FeCl_2 + 2\ CuCl_2$
			$2\ Cucl_2 \rightarrow 2\ CuCl + Cl_2$
11	Lawrence	630	$ZnO + Se + SO_2 \rightarrow ZnSe + ZnSO_4$
	Livermore	77	$ZnSe + 2\ HCl \rightarrow ZnCl_2 + H_2Se$
	Lab.	630	$ZnCl_2 + H_2O \rightarrow ZnO + 2\ HCl$
	(US)	930	$ZnSO_4 \rightarrow ZnO + SO_2 + ½\ O_2$
		460	$H_2Se \rightarrow Se + H_2$
12	Mark	600	$CaBr_2 + H_2O + CO \rightarrow CaCO_3 + 2\ HBr$
	5	900	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
	(İtalya)	250	$2\ HBr + Hg \rightarrow HgBr_2 + H_2$
		200	$HgBr_2 + CaO + nH_2O \rightarrow CaBr_{2(aq)} + HgO$
			$HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$
13	Mark	730	$CaBr_2 + 2\ H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 2\ HBr$
	IB	120	$2\ HBr + Hg_2Br_2 \rightarrow 2\ HgBr_2 + H_2$
	(İtalya)	120	$HgBr_2 + Hg \rightarrow Hg_2Br_2$
		200	$HgBr_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaBr_2 + HgO + H_2O$
		600	$HgO \rightarrow Hg + ½\ O_2$
14	Argonne		$2\ KNO_3 + I_2 \rightarrow 2\ KI + 2\ NO_2 + O_2$
	(US)		$2\ NO_2 + ½\ O_2 + H_2O \rightarrow 2\ HNO_3$
			$2\ HNO_3 + 2\ NH_3 \rightarrow 2\ NH_4NO_3$
			$2\ KI + 2\ NH_4NO_3 \rightarrow 2\ KNO_3 + 2\ NH_4I$
			$2\ NH_4I \rightarrow 2\ NH_3 + I_2 + H_2$
15	Lawrence	100	$K_2Se + 2\ H_2O \rightarrow 2\ KOH + H_2Se$
	Livermore	200	$H_2Se \rightarrow H_2 + Se$
	Lab.	700	$3/2\ Se + 2\ KOH \rightarrow K_2Se + ½\ SeO_2 + H_2O$
	Univ. Of Cali.	327	$V_2O_4 + ½\ SeO_2 \rightarrow V_2O_5 + 1/2\ Se$
	(US)	500	$V_2O_5 \rightarrow V_2O_4 + 1/2\ O_2$
16	Lawrence	700	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\ H_2$
	Livermore	230	$CO + 2\ H_2 \rightarrow CH_3OH$
	Lab.	227	$CH_3OH + As_2O_4 \rightarrow CH_4 + As_2O_5$
	Univ. Of Cali.	700	$½\ As_2O_5 \rightarrow ½\ As_2O_3 + ½\ O_2$
	(US)		$½\ As_2O_3 + ½\ As_2O_3 \rightarrow As_2O_4$

Çizelge 2.6. Altı adımlı prosesler

No	Prosesler	Sıcaklık (^oC)	Reaksiyon
1	Catherine (US)	100~190	$3\ I_2 + 6\ LiOH \rightarrow 5\ LiI + LiIO_3 + 3\ H_2O$
		0	$LiIO_3 + KI \rightarrow KIO_3 + LiI$
		650	$KIO_3 \rightarrow KI + 3/2\ O_2$
		450~600	$6\ LiI + 6H_2O \rightarrow 6\ HI + 6\ LiOH$
		150	$6\ HI + 3\ Ni \rightarrow 3\ NiI_2 + 3\ H_2$
		700	$3\ NiI_2 \rightarrow 3\ Ni + 3\ I_2$
2	Hitachi (Japonya)	400~600	$2\ Cu + 2\ NH_4Cl \rightarrow 2\ CuCl + 2\ NH_3 + H_2$
		50~80	$2\ CuCl + 2\ NH_3 + H_2O \rightarrow Cu_2O + 2\ NH_4Cl$
		50~100	$2\ Cu_2O + 2\ H_2SO_4 \rightarrow 2\ Cu + 2\ CuSO_4 + 2\ H_2$
		750~850	$2\ CuSO_4 \rightarrow 2\ CuO + 2\ SO_3$
		850~950	$2\ CuO \rightarrow Cu_2O + ½\ O_2$
		120~300	$2\ SO_3 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2SO_4$

Yukarıdaki çevrimlerin gelişimleri

Birçok araştırmacı çalışan hızlı ve verimli termal gelişim için yukarıdaki çevrimlerin durumlarında değişiklik yapmaya çalışmıştır [Soliman,1978; Onstott ve ark., 1984; Hallabough ve Bowman, 1981; Moson ve Bowmann, 1982; Normon ve ark.,1982; Peterson ve ark., 1980; Sato ve ark., 1982]. Bu değişikliğe iki örnek aşağıda verilmiştir.

Amonyak - sülfür çevrimi

Bu çevrim M.A. Soliman [Soliman,1978] tarafından westinghouse çevrimini modifiye ederek geliştirmiştir. Westinghouse çevriminin birinci çevriminde amonyak kullanıldı.

$NH_3 + 2\ H_2O(l) + SO_2 \rightarrow NH_4HSO_4(l) + H_2$, (elektroliz), 500 K

Bu çevrimde amonyak, hidrojen sülfat içerisinde aşağıdaki gibi iki aşamada parçalanır.

1.plan

$NH_4HSO_4(l) + ZnO_{(s)} \rightarrow ZnSO_{4(s)} + NH_3 + H_2O$, 700 K

$ZnSO_{4(s)} \rightarrow ZnO_{(s)} + SO_2 + ½\ O_2$, 1144 K

2.plan

$NH_4HSO_4(l) + Na_2SO_4(l) \rightarrow Na_2S_2O_7(l) + NH_3 + H_2O$, 773 K

$Na_2S_2O_7(l) \rightarrow Na_2SO_4(l) + SO_2 + ½\ O_2$, 1144 K

Lantanyum dioksimonosülfat çevrimi

Bu çevrim Onstott tarafından 1984'de önerildi ve General Atomic sülfür çevrimini modifiye ederek birçok deney yaptı [Onstott ve ark. 1984]. Aşağıdaki şekilde geliştirildi.

$La_2O_2SO_4 + SO_{2(aq)} \rightarrow La_2O(SO_3)(SO_4) + 4\ H_2O$

$La_2O(SO_3)(SO_4)_2 + 4\ H_2O + I_2 \rightarrow La_2O(SO_4)_2 + 2\ HI + 3\ H_2O$

$La_2O(SO_4)_2 \rightarrow La_2O_2SO_4 + SO_2 + ½\ O_2$

$2\ HI \rightarrow H_2 + I_2$

Yukarıdaki reaksiyonlar 600–700 K sıcaklık arasında meydana gelmektedir.

Nükleer enerji kullanımının geliştirilmesi özellikle ısı ve elektrik üretiminde ve en önemlisi termokimyasal hidrojen üretiminde gelecekte çok çok önem arz edecektir.

Nükleer enerjisinin hidrojen üretiminde kullanımının artması aşağıdaki sonuçları doğuracaktır.

- Suyun ayrıştırılmasıyla hidrojen üretiminde nükleer enerji kullanımı kimyasal reaksiyonların gelişimi ile çok önem arz edecektir.

- Özellikle elektrik enerjisi kullanmayan proseslerde nükleer enerji hayati bir rol oynayacaktır.

- Yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde nükleer enerji tek bir alternatif olarak gözükmektedir.

- Hidrojenin Nükleer termokimyasal üretimi mantıklı ve makul yapılabilir bir işlem olacaktır.

- Hidrojen üretimi için suyun termokimyasal olarak ayrıştırılması her ne kadar teorik olarak gözükse de yakın gelecekte pratik olarak uygulanabilir olacaktır. Bu durumun gerçekleşebilmesi için başta nükleer enerji kullanımının ve bu teknolojinin geliştirilmesi ve yüksek sıcaklık yardımıyla kimyasal reaksiyonların geliştirilmesine bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu iki teknolojinin ticari olarak uygulanabilir hale gelmesi gerekmektedir.

2.2.2. Nükleer güç ve termokimyasal çevrimler kullanarak hidrojen yakıtının yüksek verimlilikte üretimi

Bu bölümde; birincil enerji kaynağı olarak ileri düzey yüksek sıcaklık reaktörlerini kullanarak hidrojenin en verimli üretimini seçmek amacıyla suyun ayrıştırılması temeline dayalı sudan hidrojen ve oksijen elde etmeyi sağlayan bir kimyasal proses olan termokimyasal metotlarla hidrojen üretimi konusu incelenerek en iyi çevrim seçilmeye çalışılacaktır.

Bu amaçla literatür araştırmasında termokimyasal çevrimlerle yapılmış olan yayınlar ve çevrimler incelenmiştir. Bu çevrimleri uygulanabilirlik ve verimlilik durumlarına göre inceleyerek en uygun çevrim ve en uygun nükleer reaktör tipleri seçilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle literatürden Shultz ve ark. Tarafından yapılan çalışmadan yararlanılmıştır. Yaptıkları çalışmada 800'ün üzerinde yayını tarayarak 1115 çevrimin içinden en uygununu belirlemişlerdir [Schultz ve ark., 2002]. Bu çalışmanın ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

Yaptıkları çalışmada literatürdeki 1115 adet çevrimi incelemişler 115 tanesinin uygulanabilirlik açısından incelemeye değer olduğu sonucuna varmışlardır [Funk ve Reinstrom, 1966; Yalçın, 1986; Yoshıda ve Kameyama, 1990]. Çevrim reaksiyonlarını sıcaklık değerlerinin 1600 ^{o}C'nin üzerinde gerektirdiği, reaksiyon aşamalarının zorlukları, reaksiyon basamak sayılarına ve reaksiyonlarının elektrokimyasal çevrime uygun olmadığı ve bazılarının uygulanabilirliklerinin gerçekçi olmadıkları sonucuna varılarak, elemeler yaparak 25 çevrime indirilmiştir [Brecher ve Spewock, 1977]. Bu çevrimlerin detayları çizelge 2.7.'de verilmiştir [Schultz ve ark., 2002].

Çizelge 2.7. Çevrim aşamaları

Çevrim	Çevrimin İsmi	T/E*	T ^{o}C	Reaksiyon
1	Westinghouse [Brecher ve Spewock, 1977]	T	850	$2H_2OSO_4(g) \rightarrow 2SO_2(g) + 2H_2O(g) + O_2(g)$
		E	77	$SO_2(g) + 2H_2O(a) \rightarrow H2SO_4(a) + H_2(g)$
2	Ispra Mark 13	T	850	$2H_2SO_4(g) \rightarrow 2SO_2(g) + 2H_2O(g) + O_2(g)$
	[Beghi, 1986]	E	77	$2HBr(a) \rightarrow Br_2(a) + H_2(g)$
		T	77	$Br_2(l) + SO_2(g) + 2H_2O(l) \rightarrow 2HBr(g) + H_2SO_4(a)$
3	UT-3	T	600	$2Br_2(g) + 2CaO \rightarrow 2CaBr_2 + O_2(g)$
	Univ. Of Tokyo	T	600	$3FeBr_2 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 6HBr + H_2(g)$
	[Besenbruch, 1982]	T	750	$CaBr_2 + H_2O \rightarrow CaO + 2HBr$
		T	300	$Fe_3O_4 + 8HBr \rightarrow Br_2 + 3FeBr_2 + 4H_2O$
4	Sulfur-Iodine	T	850	$2H_2SO_4(g) \rightarrow 2SO_2(g) + 2H_2O(g) + O_2(g)$
	[Besenbruch, 1982]	T	450	$2HI \rightarrow I_2(g) + H_2(g)$
		T	120	$I_2 + SO_2(a) + 2H_2O \rightarrow 2HI(a) + H_2SO_4(a)$
5	Julich Center	T	800	$2Fe_3O_4 + 6FeSO_4 \rightarrow 6Fe_2O_3 + 6SO_2 + O_2(g)$
	EOS	T	700	$3FeO + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + H_2(g)$
	[Williams, 1980]	T	200	$Fe_2O_3 + SO_2 \rightarrow FeO + FeSO_4$

* T= termokimyasal, E= elekrtrokimyasal

Çizelge 2.7. (Devam) Çevrim aşamaları

Çevrim	Çevrimin İsmi	T/E*	T °C	Reaksiyon
6	Tokyo Inst. Tech. Ferrite	T	1000	$2MnFe_2O_4 + 3NaCO_3 + H_2O \rightarrow 2Na_3MnFe_2O_6 + 3CO_2(g) + H_2(g)$
	[Ueda ve Tagawa, 1974]	T	600	4Na3MnFe2O6 + 6CO2(g) → 4 MnFe2O4 + 6Na2CO3 + O2(g)
7	Hallett Air Products 1965 [Williams, 1980]	T	800	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
		E	25	2HCl → Cl2(g) + H2(g)
8	Gaz de France [Williams, 1980]	T	725	2K + 2KOH → 2K2O + H2(g)
		T	825	2K2O → 2K + K2O2
		T	125	2K202 + 2H2O → 4KOH + O2(g)
9	Nickel Ferrite [17] [Tamaura ve Steinfeld, 1995]	T	800	NiMnFe4O6 + 2H2O(g) → NiMnFe4O8 + 2H2(g)
		T	800	NiMnFe4O8 → NiMnFe4O6 + O2(g)
10	Aachen Univ Julich 1972 [Williams, 1980]	T	850	2Cl2(g) +2H2O → 4HCl(g) +O2(g)
		T	170	2CrCl2 + 2HCl → 2 CrCl3 + H2(g)
		T	800	2CrCl3 → 2CrCl2 + Cl2(g)
11	Ispra Mark 1C [Beghi, 1986]	T	100	2CuBr2 + CA(OH)2 → 2CuO + 2CaBr2 + H2O
		T	900	4CuO(s) → 2Cu2O(s) + O2(g)
		T	730	CaBr2 + 2H2O → Ca(OH)2 + 2HBr
		T	100	Cu2O + 4HBr → 2 CuBr2 + H2(g) + H2O
12	LASL-U [Williams, 1980]	T	25	3CO2 + U3O8 + H2O → 3UO2CO3 +H2(g)
		T	250	3UO2CO3 → 3CO2(g) + 3UO3
		T	700	6UO3(s) → 2U3O8(s) + O2(g)
13	Ispra Mark 8 [Besenbruch, 1982]	T	700	3MnCl2 + 4 H2O → Mn3O4 + 6HCl + H2(g)
		T	900	3MnO2 → Mn3O4 + O2(g)
		T	100	4HCl + Mn3O4 → 2MnCl2(a) + MnO2 +2H2O
14	Ispra Mark 6 [Beghi, 1986]	T	850	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
		T	170	2CrCl2 + 2HCl → 2CrCl3 + H2(g)
		T	700	2CrCl3 + 2 FeCl2 → 2CrCl2 + 2 FeCl3
		T	420	2FeCl3 → Cl2(g) + 2FeCl2
15	Ispra Mark 4 [Beghi, 1986]	T	850	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
		T	100	2FeCl2 + 2HCl + S → 2FeCl3 + H2S
		T	420	2FeCl3 → Cl2(g) + 2FeCl2
		T	800	H2S → S + H2(g)
16	Ispra Mark 3 [Beghi, 1986]	T	850	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
		T	170	2VOCl2 + 2HCl → 2VOCl3 + H2(g)
		T	200	2VOCl3 → Cl2(g) + 2VOCl2
17	Ispra Mark 2 [Beghi, 1986]	T	100	Na2O.MnO2 + H2O → 2NaOH(a) + MnO2
		T	487	4MnO2(S) → 2Mn2O3(s) + O2(g)
		T	800	Mn2O3 + 4NaOH → 2Na2O.MnO2 + H2(g)+H2O

* T= termokimyasal, E= elekrtrokimyasal

Çizelge 2.7. (Devam) Çevrim aşamaları

Çevrim	Çevrimin İsmi	T/E*	T °C	Reaksiyon
18	Ispra CO/Mn3O4	T	977	6Mn2O3 → 4Mn3O4 + O2(g)
	[Bamberger, 1978]	T	700	C(s) + H2O(g) → CO(g) + H2(g)
		T	700	CO(g) + 2Mn3O4 → C + 3Mn2O3
19	Ispra Mark 7B	T	1000	2Fe2O3 + 6Cl2(g) → 4FeCl3 + 3O2(g)
	[Beghi, 1986]	T	420	2FeCl3 → Cl2(g) + 2FeCl2
		T	650	3FeCl2 + 4H2O → Fe3O4 + 6HCl + H2(g)
		T	350	4Fe3O4 + O2(g) → 6Fe2O3
		T	400	4HCl + O2(g) → 2Cl2(g) + 2H2O
20	Vanadium Chloride	T	850	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
	[Knoche ve Schuster, 1984]	T	25	2HCl + 2VCl2 → 2VCl3 + H2(g)
		T	700	2VCl3 → VCl4 + VCl2
		T	25	2VCl4 → Cl2(g) + 2VCl3
21	Mark 7A	T	420	2FeCl3(l) → Cl2(g) + 2FeCl2
	[Beghi, 1986]	T	650	3FeCl2 + 4H2O(g) → Fe3O4 + 6HCl(g) + H2(g)
		T	350	4Fe3O4 + O2(g) → 6Fe2O3
		T	1000	6Cl2(g) + 2Fe2O3 → 4FeCl3(g) + 3O2(g)
		T	120	Fe2O3 + 6HCl(a) → 2FeCl3(a) + 3H2O(l)
22	GA Cycle 23	T	800	H2S(g) → S(g) + H2(g)
	[Russell ve Porter, 1974]	T	850	2H2SO4(g) → 2SO2(g) + 2H2O(g) + O2(g)
		T	700	3S + 2H2O(g) → 2H2S(g) + SO2(g)
		T	25	3SO2(g) + 2H2O(l) → 2H2SO4(a) + S
		T	25	S(g) + O2(g) → SO2(g)
23	US –Chlorine	T	850	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
	[Williams, 1980]	T	200	2CuCl + 2HCl → 2CuCl2 + H2(g)
		T	500	2CuCl2 → 2CuCl + Cl2(g)
24	Ispra Mark 9	T	420	2FeCl3 → Cl2(g) + 2FeCl2
	[Beghi, 1986]	T	150	3Cl2(g)+2Fe3O4+ 12HCl → 6FeCl3+6H2O+O2(g)
		T	650	3FeCl2 + 4H2O → Fe3O4 + 6HCl + H2(g)
25	Ispra Mark 6C	T	850	2Cl2(g) + 2H2O(g) → 4HCl(g) + O2(g)
	[Beghi, 1986]	T	170	2CrCl2 + 2HCl → 2CrCl3 + H2(g)
		T	700	2CrCl3 + 2FeCl2 → 2CrCl2 + 2FeCl3
		T	500	2CuCl2 → 2CuCl + Cl2(g)
		T	300	CuCl + FeCl3 → CuCl2 + FeCl2

* T= termokimyasal, E= elekrtokimyasal

Yaptıkları ikinci eleme aşamasında incelenen 25 çevrimin kimyasal reaksiyonlarının termodinamik açısından detayları incelenerek, uygulanabilirlikleri belirlenmiştir [Shultz ve ark, 2002].

Her bir çevrimin uygulanabilirliği göz önüne alınarak 3 bağımsız araştırmacı tarafından incelemeler dikkate alınarak ve literatürdeki (Shultz ve ark.) değerlendirme ışığı altında oluşturulan Çizelge 2.8.'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde en uygun UT-3 ve S-I olduğu verilmektedir [Shultz ve ark, 2002]. İncelemeler sonucunda araştırmacıların çevrimlerinin uygulanabilirliği hakkında olumlu (+1), olumsuz (-1) ve kabul edilebilir (0) şeklinde ki görüşleri neticesinde sonuçlar elde edilmiştir. İncelemeler sonucunda uygulanabilir en olumlu UT-3 ve S-I çevrimleri olduğu görülmektedir [Shultz ve ark, 2002].

Çizelge 2.8. İkinci eleme aşama puanlaması

Çevrim	Çevrimin İsmi	SNL	UK	GA	Puan
1	Westinghouse	1	0	0	1
2	Ispra Mark 13	0	0	0	0
3	UT-3 Univ. Of Tokyo	1	1	1	3
4	Sulfur-Iodine	1	1	1	3
5	Julich Center EOS	1	-1	-1	-1
6	Tokyo Inst. Tech. Ferrite	-1	0	0	-1
7	Hallett Air Products 1965	1	-1	0	0
8	Gaz de France	-1	-1	-1	-3
9	Nickel Ferrite	-1	0	0	-1
10	Aachen Univ Julich 1972	0	-1	0	-1
11	Ispra Mark 1C	-1	-1	-1	-3
12	LASL-U	1	-1	-1	-1
13	Ispra Mark 8	0	-1	-1	-2
14	Ispra Mark 6	-1	-1	-1	-3
15	Ispra Mark 4	0	-1	-1	-2
16	Ispra Mark 3	0	-1	-1	-2
17	Ispra Mark 2	1	-1	-1	-1
18	Ispra CO/Mn3O4	-1	0	0	-1
19	Ispra Mark 7B	-1	-1	-1	-3
20	Vanadium Chloride	0	1	-1	0
21	Mark 7A	-1	-1	-1	-3
22	GA Cycle 23	-1	-1	-1	-3
23	US-chlorine	0	1	0	1
24	Ispra Mark 9	0	-1	-1	-2
25	Ispra Mark 6C	-1	-1	-1	-3

Bu iki çevrim kısaca özetlenecek olursa ;

Adyabatik UT-3 çevrimi

UT-3 çevrimi ilk olarak Tokyo Üniversitesi tarafından 1970'lerin sonunda tanımlanmış ve Japonya daki birçok çalışma bunu doğrulamıştır. 1996'da çevrimin adyabatik uygulaması son defa revize edilmiştir. Reaksiyona giren katı maddeleri ve çıkan ürünleri içeren 4 tane adyabatik karışım, kimyasal reaktöründe 4 kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Kimyasal reaktörler bir çifti kalsiyum bileşenleri içeren ve diğer çifti demir bileşenleri içeren iki çiftten oluşmuştur [Shultz ve ark, 2002].

Bu çevrimde hidrojen üretiminin verimliliği santralde %30–40 civarındadır. Daha yüksek verimlilik ise ko-jeneratörlüğü yani hem hidrojen hemde elektrik üreten santrallerde %45–49 arasındadır [Funk ve Reinstrom, 1966].

Sülfür – İyot çevrimi

Sülfür-iyot çevrimi ilk olarak 1970 yılında General Atomic tarafından tanımlandı. Bu çevrim, suyu bileşenlerine ayırmak için üç aşamalı reaksiyondan oluşmaktadır. Bu reaksiyonlardan birincisi çevrim için gerekli asitlerin üretimini diğer ikisi ise bu asitlerin parçalanmasını gerçekleştirmektedir. Bu reaksiyonlardan en fazla enerji gerektiren ve teknolojik zorlukları olan birinci reaksiyondur. Çevrimde optimum reaksiyon sıcaklığı 850 ^{o}C'dir fakat 750 ^{o}C de kabul edilebilirdir. [DOE/EIA-0484, 2000; DOE/EIA-0383, 2000] ve yüksek basınçlarda yüksek sıcaklıklardan yararlanılmalıdır.

Bu kimyasal çevrimin gerçekleştirilmesi dört ana bölümde yapılmaktadır: 1) sülfürik asit, hidrojen iyodür asitlerinin üretildiği ve ürün olarak elde edilen oksijen gazının ayrıştırıldığı bölüm, 2) sülfürik asitin bileşenlerine ayrıştırıldığı bölüm, 3) hidrojen iyodürün konsantrasyonunun yükseltildiği bölüm ve son olarak, 4) hidrojen

iyodürün bileşenlerine ayrıştırıldığı ve ürün olarak üretilen hidrojen gazının ayrıştığı bölümdür.

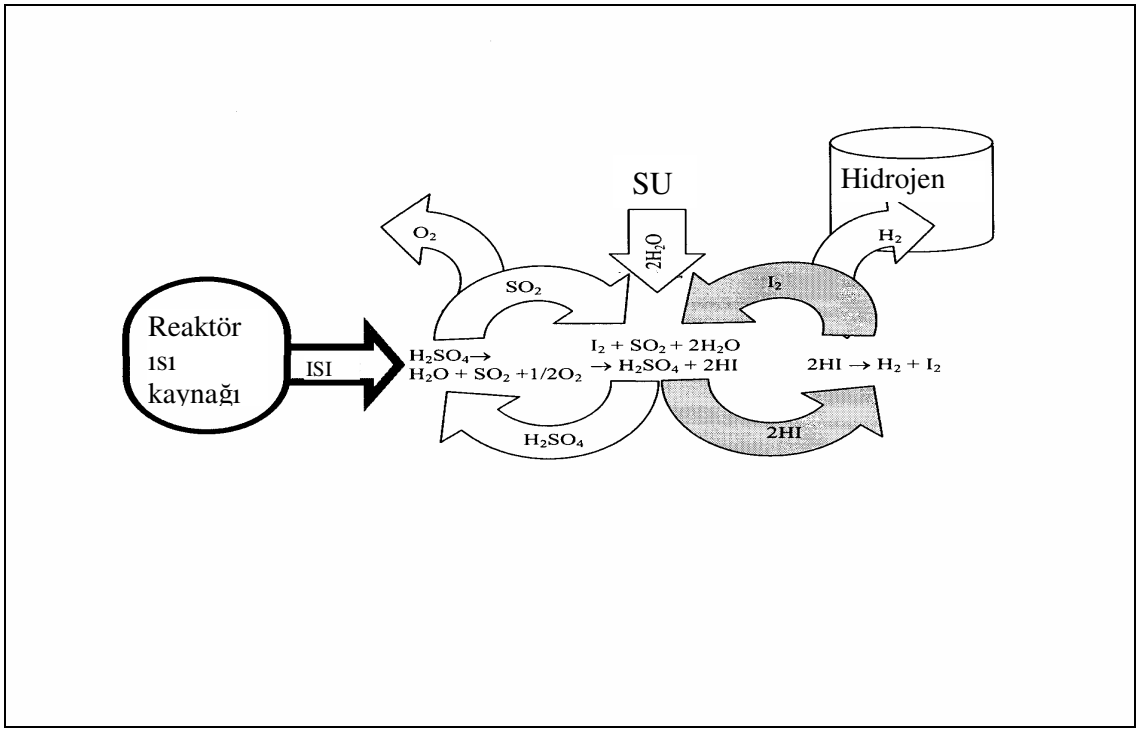
Döngü reaksiyonları ve sıcaklıklar:

1. $H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + 1/2\ O_2$ 850 ^oC (Endotermik)

2. $2HI \rightarrow I_2 + H_2$. 350 ^oC (Endotermik)

3. $2H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow 2HI + H_2SO_4$ 100 ^oC (Ekzotermik)

Bu döngüde madde bilançosu yapılırsa ; $H_2O \rightarrow H_2 + ½O$ şeklinde Su'dan H_2 ve Oksijen elde edilmektedir.

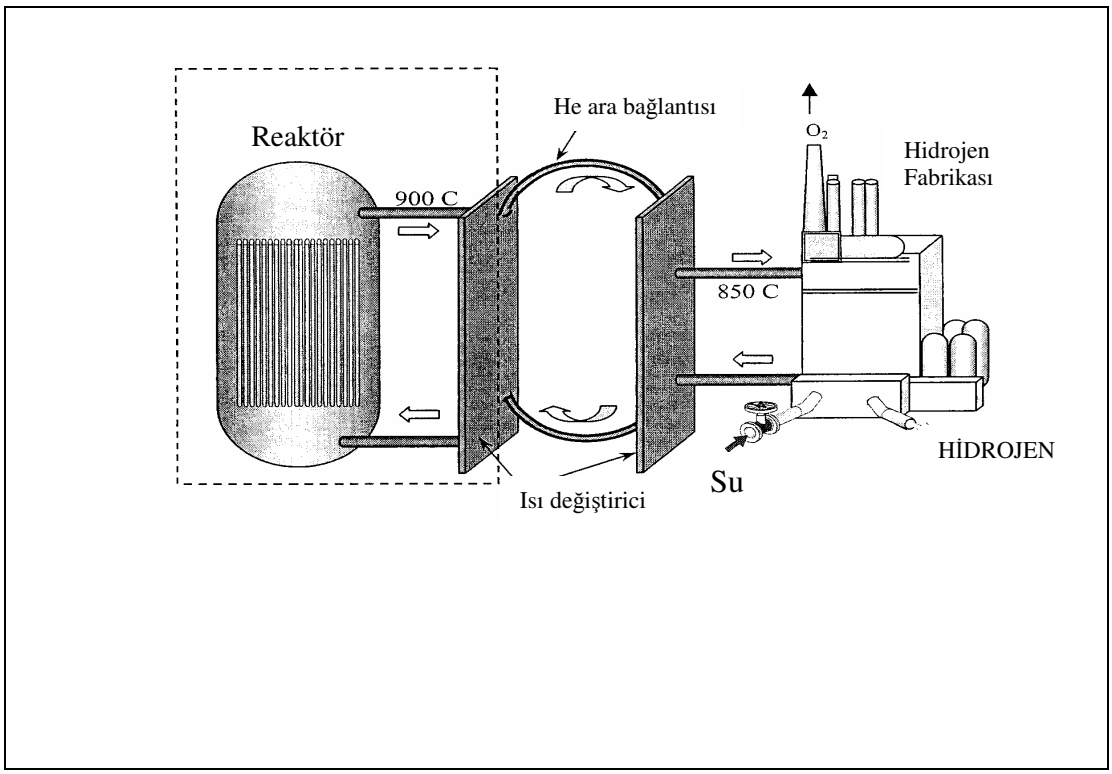


Şekil 2.2. Kimyasal reaktantların döngüsel ilişkileri

Kimyasal reaktantların döngüsel ilişkileri Şekil 2.2.'de, ve reaktör bazlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.3.'de verilmiştir. 1. reaksiyon bir hayli

endotermiktir; ve işleme verilen ısının büyük kısmını alır. Reaksiyon 2 az endotermiktir, 3. reaksiyon ise bir hayli ekzotermiktir.

Şimdiye kadar olan araştırmalara dayanarak en uygun termokimyasal çevrimin sülfür-iyot olduğu sonucuna varılmıştır. Literatürlerin ışığında, ileriki yıllarda en verimli ve çevreye zarar vermeyen nükleer-hidrojen üretiminin S-I çevrimiyle olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.3. Reaktör bazlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi

2.2.3. Nükleer ısı kaynağının seçimi

Yukarda bahsedilen çevrimler için UT-3'ün verimi %35-40 arasında iken sülfür-iyot çevrimi için %52 olarak ve aynı zamanda daha düşük maliyette olabileceği görülmektedir [Shultz ve ark, 2002]. Ayrıca yüksek sıcaklıklı nükleer reaktörlerden ısı kaynağı olarak yararlanmak suretiyle sülfürik iyodürün termokimyasal çevrimle suyun ayrıştırılmasına dayalı çevrimin en uygun olduğu görülmektedir. Sülfür-iyot

çevrimini kullanarak sudan hidrojen üretmeye dayalı çeşitli nükleer reaktör tipleri Çizelge 2.9.'da verilmiştir. Reaktörlerde kullanılacak soğutucu tipleri ve özellikleri Çizelge 2.10. ve Çizelge 2.11.'de verilmiştir.

Çizelge 2.9. Nükleer hidrojen üretiminde kullanılması düşünülen nükleer reaktör tipleri

1. Basınçlı Su Reaktörleri [Nero, 1979]
   - Basınçlı su reaktörleri (hafif ve ağır su)
   - Süperkritik basınçlı su reaktörleri

2. Kaynar Su Reaktörler [Forsberg ve Weinberg, 1998]
   - Kaynar su reaktörler (hafif ve ağır su)
   - Kızgın buharlı reaktörler

3. Organik Soğutuculu-Reaktörler [Simnad, 1971]
   - Difenil
   - Diğer organik soğutucular

4. Alkali Sıvı Metal Soğutuculu-Reaktörler[EI-Genk,1994]
   - Kurşun-soğutuculu
   - Diğer (Na, K, NaK)

5. Ağır Sıvı Metal Soğutuculu Reaktörler [Bugreev, 1999]
   - Kurşun-bizmut
   - Diğer (Pb, Bi, Sn ,Hg)

6. Gaz Soğutuculu Reaktörler [Kemm, 2000]
   - Soygazlar (he, ar)
   - Diğer gazlar (Co_2, H_2, N_2 , Air ,Ar , Buhar)

7. Eriyik Tuz Soğutuculu-Reaktörler [El-Wakil, 1962]
   - $2LiF\text{-}BeF_2$
   - Diğer tuzlar

8. Sıvı Kor Reaktörler [Angelo ve Buden, 1985]
   - Eriyik tuzlu
   - Sıvı metalli
   - Su esaslı kor

9. Gaz Merkezli Reaktörlerdir [Koshizuka ve Oka, 1998]
   - UF_6
   - Diğer gaz yakıtlı (UF_4, U-plazma)

Çizelge 2.10. Reaktör soğutucularının temel özellikleri

Soğutucu	Moleküler Ağırlığı	Yoğunluk* (g/cm^3)	σ_{th} Parazit(b)	Nötron Aktivasyonu	Radyolotik Bozulma	Tehlikeler Zehir	Ateş	Patlama
Su								
H_2O	18	1	0.66	biraz	biraz	yok	yok	yok
D_2O	20	1,1	0.001					
Organik								
Difenil	154	0.86	0.33	düşük	var	yok	yok	yok
Alkali Metal								
Li	7	0.53	71	yüksek	sabit	var	var	var
Na	23	0.82	0.525					
NaK	-	0.74	~0.5					
K	39	0.70	2.07					
Ağır Metal								
Sn	118	6.5	0.625	yüksek	sabit	yok	yok	yok
Hg	200	13.6	380			yüksek		
Pb	207	11.4	0.17			var		
Bi	209	9.75	0.034			yok		
PbBi	-	~10	~0.1			var		
Gazlar								
H_2	2	0.00009	0.332	düşük	sabit	yok	yüksek	yüksek
He	4	0.00018	0.007	yok	sabit	yok	yok	yok
N_2	14	0.0013	1.88	yok	sabit			
Ar	40	0.0018	0.66	var	sabit			
CO_2	44	0.0015	0.0038	biraz				
Hava	-	0.0013	~1.3	var				
Buhar	18	0.00056	0.66	biraz	biraz			
Erimiş Tuz								
$2LiF\text{-}BeF_2$	-	~2	-	var	sabit	var	yok	yok
Sıvı Çekirdekli								
Su esaslı	-	~1	-	Bölünme sonuçları çok yüksek	biraz	var	yok	yok
Sıvı Metal	-	~10	-		sabit	var	var	var
Erimiş Tuz	-	~2.5	-		sabit	var	yok	yok

* @ çevre sıcaklığında

Çizelge 2.11. Reaktör Soğutucularının termal ve kimyasal özellikleri

Soğtucu	Erime Noktası (^oC)	Kaynama Noktası (^oC)	Buhar Basıncı (MPa)*	Isı İletim Özellikleri	Termal Sağlamlık Limiti (K)	Kimyasal hareket @ 900 ^oC
Su						
H_2O	0	100	13.7	Çok iyi	Sabit	Var
D_2O	0	101	13.7		Sabit	
Organik						
Difenil	69	255	0.2	iyi	750	var
Alkali Metal						
Li	181	1331	10^{-10}	Mükemmel	sabit	var
Na	98	881	$5x10^{-6}$			
NaK	-11	784	$\sim10^{-4}$			
K	64	761	10^{-4}			
Ağır Metal						
Sn	232	2270	$<10^{-4}$	Mükemmel	Sabit	Var
Hg	-38.5	358	0.07			
Pb	327	1740	10^{-13}			
Bi	271	1570	10^{-11}			
PbBi	125	1670	10^{-11}			
Gazlar						
H_2	-	-	-	Düşük	sabit	Var
He	-	-	-		Sabit	Yok
N_2	-	-	-		Sabit	Var
Ar	-	-	-		Sabit	Yok
CO_2	-	-	-		<850	Var
Hava	-	-	-		<850	Var
Buhar	0	100	-		-	Yüksek
Erimiş Tuz						
$2LiF-BeF_2$	457	1397	$<10^{-9}$	Mükemmel	Sabit	Var
Sıvı Çekirdekli						
Su esaslı	-	-	~10	Mükemmel	Birçok yakıt Hızlı	Var
Sıvı Metal	~300	~1500	Düşük		Birçok yakıt Hızlı	Var
Erimiş Tuz	497	-	$<10^{-9}$		sabit	Var

* @ doymuş, 600 K

Bu reaktör tipleri Çizelge 2.12.'de verilen gereksinimler ve kriterler neticesinde değerlendirilmiştir. 900^{o}C'deki eşanjör iç yüzeylerindeki ısı transferinin uygun şekilde yapılabilmesi için birtakım kriterler belirlemişlerdir Helyum gaz soğutmalı reaktör, ağır soğutmalı reaktör ve ergimiş su soğutmalı reaktörlerin sülfür-iyot çevrimi için en uygun reaktör tipleri olduğu sonucuna varmışlardır [Shultz ve ark, 2002]. Helyum gaz soğutmalı reaktör diğer ikisine nazaran daha uygun oldukları ve ayrıca modüler Helyum reaktör ve çakıl taşlı yataklı modüler reaktör tipleri elektrik üretmek için geliştirilmektedir. Bunların termokimyasal yolla hidrojen üretimi için ayrıca ilave bir geliştirmeye ihtiyaçları yoktur. Sülfür-iyot çevrimi için He gaz soğutmalı reaktör tipleri önerilmektedir.

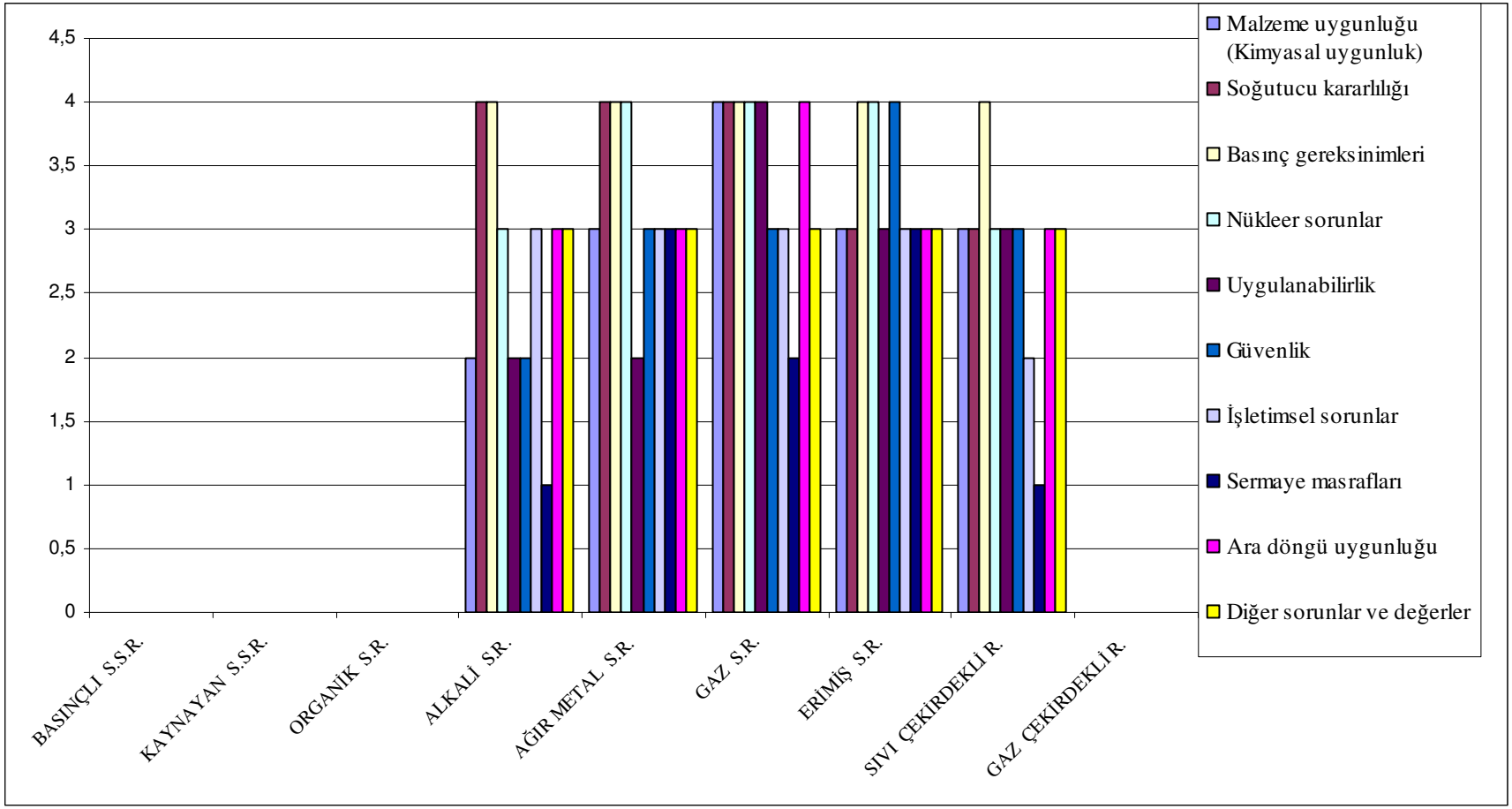
Çizelge 2.12. Gereksinimler ve kriterler

(a) *Gereksinimler* :
1. Kimyasal uygunluk
2. Soğutucu kararlılığı
3. Basınç gereksinimleri
4. Nükleer sorunlar
5. Uygunluk

(b) *Kriterler* :
1. Güvenlik
2. İşletme sorunları
3. Sermaye masrafları
4. Ara döngü uygunluğu
5. Diğer sorun ve değerler

Nitelik değerlendirmesi

Çizelge 2.12.'de gösterilen gereksinimleri ve kriterleri kullanarak, aday reaktörler için literatürde bir not değerlendirmesi yapılmıştır [Shultz ve ark, 2002]. Değerlendirmenin ve gereklilik arz eden kriterlerin sonucunda reaktör tiplerinin uygulanabilirlik ve seçilebilme açısından incelenerek, gaz soğutmalı reaktör tiplerinin uygun olduğu görülerek bunun grafiksel olarak yapısı Şekil 2.4.'de gösterilmiştir.



(*Gereksinimler için notlandırma esasları ;* 4: istenileni karşılama, 3:istenilenin karşılanmasını beklemesi, 2:mümkün fakat geliştirme riski taşıyor, 1:uygun değil (dikkatten çıkarılma). *Kriterler için notlandırma esasları;* 4 : mükemmel, 3 : iyi tam en uygunu değil, 2 : kabul edilebilir, 1 : kabul edilemez (dikkatten çıkarılma))

Şekil 2.4. Reaktörlerin nitelik değerlendirme sonuçları

Bu reaktörlerin özellikle ısı eşanjörlerinin (soğutucular ve ısıtıcılardaki) geliştirilmesi ve atık ısının kojenerasyon sistemleriyle faydalı hale getirilmesi açısından ekonomikliklerinin arttırılması gerekmektedir. Ayrıca malzeme teknolojilerinin ve enerji dönüşümlerinin geliştirilmesi şarttır. Hidrojenin ekonomik olarak üretilmesindeki anahtar rolü hidrojen üretim fabrikasındaki ekipmanların fiyatlarının minimize edilerek, enerji kullanım etkinliğinin maksimum değerde olmasına bağlıdır. Diğer taraftan ekonomiklik ve standartların kimya mühendisliği teknolojisinin gelişimine de bağlıdır.

3. HİDROJEN VE HİDROJEN ENERJİ STRATEJİSİ

Enerji, tarım ve sanayide üretimi arttırmak için en önemli hayati ürünlerden biridir. Bir ülkenin enerji tüketimindeki artış, o memleketin ekonomik gelişmesine olduğu kadar sosyal gelişimine de olumlu katkı sağlar. Ayrıca, enerjinin temiz, düşük fiyatlı kullanımı dünya genelinde teknolojik gelişmelere ve endüstride hayati bir rol oynadığından dünya barışı ve dengeleri açısından oldukça önemlidir [Dincer, 1999]. 21. yüzyılın ortalarında dünya nüfusu ikiye katlanarak 12 milyar olacaktır. Bu nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılacak enerji özellikle fosil yakıtların yakılmasıyla sağlanırsa CO_2 emisyonundan dolayı küresel ısınma seviyesi artacaktır [TUSİAD, 1998]. 1990'larda dünya, fosil yakıtların kıtlığı ve kirliliği gibi problemlerle mücadele etmiştir. Bunlara ilave olarak, dünya enerji ihtiyacı, dünya nüfusunun artması, teknolojik gelişmeler ve hayat standartlarındaki artışlardan dolayı artmaktadır. Bu faktörler dünya nüfusunun göç etmesine, açlığa, çevresel (özellikle hava ve su kirliliği) problemler, hastalıklar ve sağlığın bozulması, terörizm, enerji ve doğal kaynakların yetersizliği gibi tepkilere sebep olmuştur. Bu etkiler dünya genelinde sıkıntıların artmasına neden olmaktadır [Midilli ve ark, 2001].

Sonuç olarak, alternatif enerji kaynaklarına olan yatırımlar gelecekteki dünya dengeleri, barışı ve kalkınma için son derece önemli olacaktır. Alternatif enerji kaynaklarının en önemli özelliği çevre kirliliğine olan olumlu etkileridir. Bu sebeplerden dolayı gelecekte hidrojen en önemli enerji taşıyıcısı olarak karşımıza çıkacaktır. Birçok araştırma deney ve teorik çalışma özellikle son zamanlarda hidrojen üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak, burada en önemlisi hidrojen enerjisi kavramını iyi anlamak olacaktır.

Literatürde yapılan çalışmalarda [Momirlan ve Veziroğlu, 2002; Veziroğlu, 1995], birçok önemli çalışma hidrojen enerjisinin önemini vurgulanmaktadır. Bazı çalışmalar temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma için hidrojen üzerine yoğunlaşmaktadırlar [Barreto ve ark., 2003; Dunn, 2002]. Bazıları da hidrojenin çevre üzerine olumlu etkileri konusuna değinmişlerdir [Dincer, 2002]. Hidrojen enerjisi için gelecekteki beklentiler, özellikle hidrojen ekonomisi üzerine dikkat

çekmektedir [Veziroğlu, T.N., 1992]. Bu çalışmalar göstermektedir ki hidrojen enerjisinin rolü enerji taşıyıcısı olarak elektrik enerjisinden çok daha önemlidir [Midilli, 1991].

3.1. Hidrojenin Avantajları ve Dezavantajları

Hidrojenin bazı avantajları aşağıda verilmiştir;

- Hidrojen, toksit içermez, yüksek özgül enerji taşıyıcısıdır. (9,5 kilo hidrojen 25 kilo benzine eşdeğerdir) [Ultanir, 1997].
- Birçok hidrojen üretim yolu vardır[Rosen ve Scott, 1998]. Bunlar, fosil yakıtlardan (doğalgazın veya diğer hafif hidrokarbonların buharlaştırılması, suyun elektrolizi, direkt ve indirekt termokimyasal ayrıştırma ve direkt güneşten elde edilmesi).
- Hidrojen, borularla güvenli olarak taşınabilir.
- Hidrojen kullanımının avantajlarından biriside, petrolü kimya sanayinde kullanımını sağlamaktır. Petrol, kimya sanayinde en önemli ham maddedir. Örneğin; Demir olmayan malzemeler, polimer sanayinde kullanılır.
- Hidrojen yakıldığında hiç toksit madde üremez (sadece yüksek sıcaklıklarda yakıldığında NO_x ler üretilebilir) [Olgun ve ark., 1997; Midilli ve ark., 1998].
- Hidrojen çeşitli alternatif enerjilerden üretilebilir.
- Elektrikle karşılaştırıldığında hidrojen uzun zaman depo edilebilir. Bu özelliğinden dolayı otomobil gibi araçlarda avantaj sağlamaktadır.
- Hidrojen tüm sektörlerde enerji taşıyıcısı olarak kullanılır (otomobil yakıtı, yakıt hücreleri ile elektrik üretimi).

Hidrojenin bazı dezavantajları aşağıda verilmiştir;

- Hava ile karıştığında düşük konsantrasyonlar da kolayca yanabilir. Bu durum güvenlik önlemlerini arttırmayı gerektirir.
- Hidrojenin sıvı formda depo edilmesi zordur. Çok düşük sıcaklıklar gerektirir.

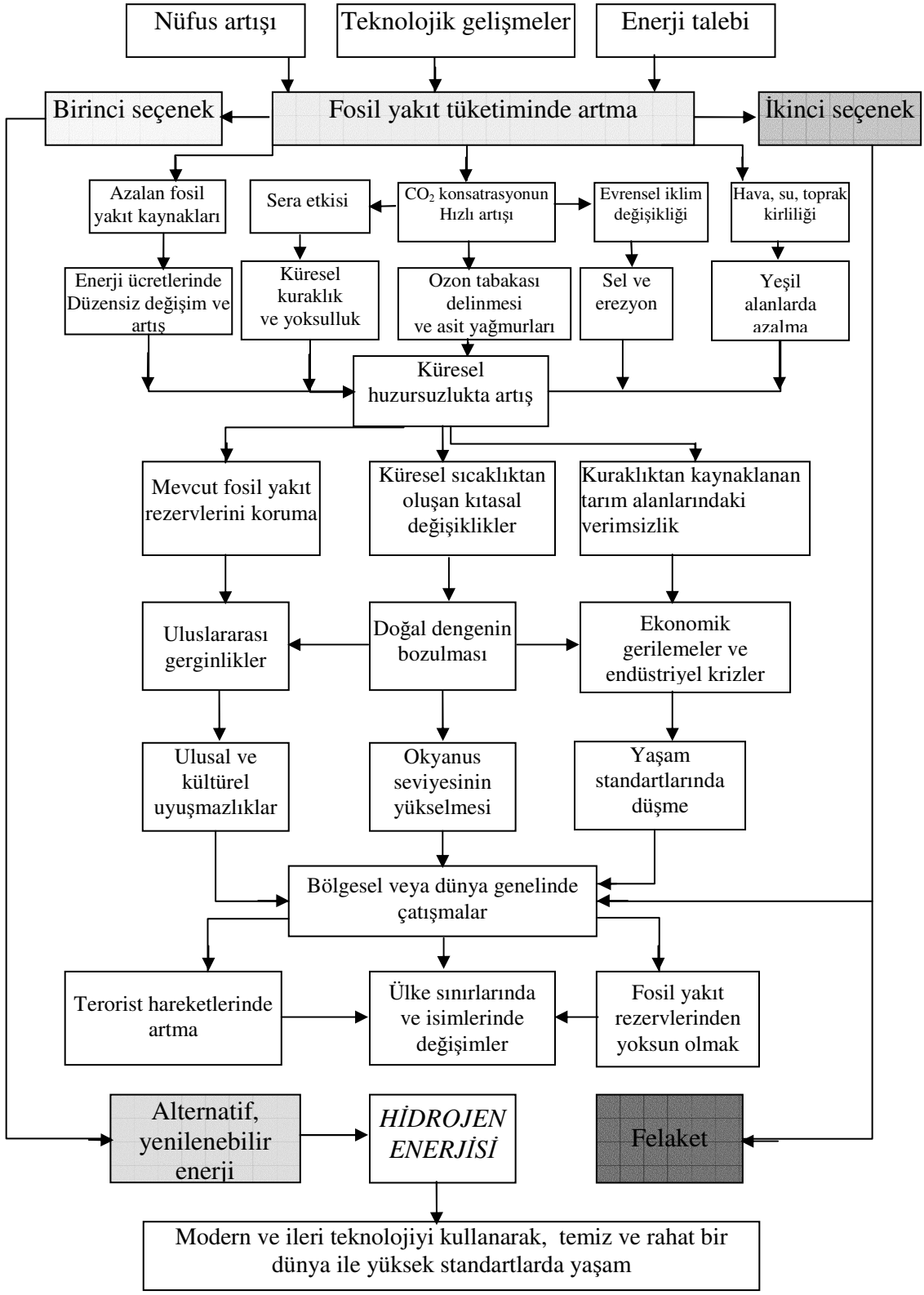
3.2. Fosil Yakıtların Kullanımına Bağlı Küresel Problemler

Fosil yakıtların kullanımı başta küresel ısınma olmak üzere dünya genelinde fosil yakıtların azalmasına paralel olarak enerji fiyatlarının artması ve çatışmalara sebep olmaktadır. Bu zorluklar fosil yakıtlarına sahip olmayan ülkeler olmak üzere bölgesel huzursuzluklara sebep olmakta ve dünya barışını tehdit etmektedir. Eğer fosil yakıtların kullanımı bu şekilde artarak devam ederse, Şekil 3.1.'de verilen dünya genelindeki problemler meydana gelecektir.

3.2.1. Dünya nüfusunun artması, teknolojik gelişmeler ve enerji talebinin artmasından dolayı fosil yakıt rezervlerinin azalması

Geçmişte, fosil enerji kaynakları dünya enerji problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Ne yazık ki, dünya enerji talebi ve tüketiminin hızlı bir şekilde artmasından dolayı temel enerji kaynağı olarak fosil yakıtlarının sonsuza kadar devam etmesi mümkün değildir. Fosil yakıt tiplerinin kullanım dağılımı son 80 yılda önemli bir şekilde değişmiştir. 1925'de dünya genelindeki enerji ihtiyacı % 80 oranında kömürden karşılanırken bu oran zamanla azalmıştır. Şimdi bu oran % 30 civarındadır. Fosil yakıtlarına dayalı teknolojilerin gelişmesi ve dünya nüfusunun artmasından dolayı, fosil yakıt rezervleri dünya enerji ihtiyacını karşılayamaz hale gelecektir. Enerji uzmanlarına göre petrolün ömrü 40, doğalgazın 60 ve kömürün 250 yıl olarak öngörülmektedir [Ultanir, 1997]. Ayrıca, fosil yakıt fiyatları yakın gelecekte artacaktır. Bu durum güneş, rüzgâr, hidrolik ve nükleer enerji gibi alternatif enerji kullanımını zorunlu hale getirecektir.

Dünya nüfusu 6 milyardır, 40 yıl önce nüfus 3 milyar idi. 40 yıl sonrada dünya nüfusunun 12 milyar olacağı tahmin edilmektedir. Dünya nüfusunun 2010 yılında 7 milyar olacağı öngörülmektedir. Dünya nüfus artış oranı sabitlense bile 2040 yılında dünya nüfusu 10 miyar olacaktır [Midilli, 2001]. Dünya nüfusundaki bu artışlar, fosil yakıtların hızla tükenmesine yol açmaktadır. Çok yakın bir gelecekte, yenilenebilir enerji kullanımı bu konvansiyonel enerji rezervlerinin azalmasını yavaşlatacaktır.



Şekil 3.1. Fosil yakıt kullanımına bağlı dünya genelinde olabilecek muhtemel Problemler [Midilli ve ark., 2001].

Şekil 3.1. incelendiğinde küresel boyutta fosil yakıt tüketimine bağlı problemler sıralanmıştır. Birinci seçeneğin alternatif enerjilere yönelmekle problemlerin aşılacağı şeklindedir. Eğer ikinci seçenek yönünde bir eğilim olursa, sonucun küresel boyutta problemlere, çatışmalara ve sonuç olarak felaketlere doğru gidileceği görülmektedir. İki seçeneğin arasında kalındığında, ülkelerin gelişme ve refah içerisinde yaşamaları tehdit altına girecektir. Dünya genelinde başta çevre felaketleri olmak üzere, dengesiz büyüme (batı ile doğu, gelişmiş ile az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler), ve sonuç olarak küresel huzursuzluklar devam edecektir.

3.2.2. Atmosferdeki CO_2 emisyonlarının konsantrasyonunun artmasıyla küresel iklim değişikliği

Fosil yakıtların en önemli çevresel etkisi, kullanılırken fark edilebilir kirliliktir. Bunlar, katran, toz ve zehirli gazlar (CO_x, SO_x, NO_x gibi) atmosferin havasını kirletmektedir. Fosil yakıtları endüstri, evsel, ticarethaneler gibi sektörlerde kullanılır. Otomobil, uçak, gemi gibi ulaştırma araçlarında fosil yakıt kullanımının artması kirlenmeye sebep olmaktadır. Atmosferdeki gazlar, partikül maddeler ve toz bulutları dünyaya direkt olarak güneş radyasyonunu absorbe ederek ve dünyadan uzaya yansıyan ışınları yutarak küresel ısınmaya ayrıca atmosferdeki hayatımız için gerekli oksijen miktarının düşmesine sebep olmaktadır. Küresel ısınmanın başlıca sebebi fosil yakıtlardır. Örneğin, fosil yakıt başına (Gj) CO_2 emisyonu fosil yakıtın tipine bağlı olarak 85,5 kg CO_2 kömürde, 69,4 kg CO_2 petrolde ve 52 kg CO_2 doğalgaz için değerler vermektedir. Bu CO_2 emisyonu 2020 yılında 8,2-10 gigaton civarına ulaşacaktır [TUSİAD, 1998; Ultanir, 1997]. CO_2 emisyonundan dolayı küresel iklim değişikliği insanlık için en önemli çevre problemi olacaktır. Yeryüzünün ortalama sıcaklık değeri 1860'dan beri 0,7 ^oC artmıştır. Eğer fosil yakıt kullanımı bugünkü değerleriyle artmaya devam ederse, dünyanın ortalama sıcaklık artışı 1,25 ^oC 2025, 2,2^oC 2050, 3.5^oC 2075 ve 5,4^oC 2100 değerlerinde olacaktır [TUSİAD, 1998; Ultanir, 1997]. Eğer fosil yakıt kullanımı 1000 Ej (1 evajoule= 10^9 Gj =22,7.10^6 TEP (ton petrol eşdeğeri)) 2050 de olduğundan, dünyanın ortalama sıcaklık artışı 3-5 ^oC olacaktır. Bu sıcaklık değerleri dünya genelinde çok büyük etkilere sebep olacaktır. 1^oC sıcaklık artışı kuzey ve güney yarımkürede önemli iklim

değişikliklerine yol açacaktır. Dünya genelinde 5 ^{o}C'lik ortalama yıllık sıcaklık artışı kutuplardaki buzulların erimesine ve okyanus ve denizlerin seviyesinin 1m yükselmesine sebep olacaktır [TUSİAD, 1998]. Bu olumsuz etkilerin önüne geçmek için hidrojen kullanımı zorunlu olmaktadır.

3.2.3. Dünya genelindeki enerji fiyatlarındaki artıştan dolayı hayat standardındaki düşüş ve ekonomik gerileme

Fosil yakıt rezervlerindeki azalma ve 1900'lerden beri yakıt fiyatlarının artması hayat standartlarımızı ve yaşam koşullarının değişimine yol açmaktadır. Bu etkiler bazı bölgelerde tüm sosyal yaşamın hayat standardını düşürmektedir. Fazla enerji kaynaklarına sahip ülkeler enerjiyi ucuza mal etmekteler ve halklarına daha ucuza satmaktadırlar. Kendi halkının refah düzeyini yükseltmek isteyen ve bu arayışta olan ülkeler fosil yakıt tedariklerini dikkatlice ele almaktalar ve bu enerjilere sahip olmak için dünya barışını tehdit etmekteler. Bu problemler fosil yakıt rezervlerinin azalmasının bir doğal sonucudur.

3.3. Bir Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen

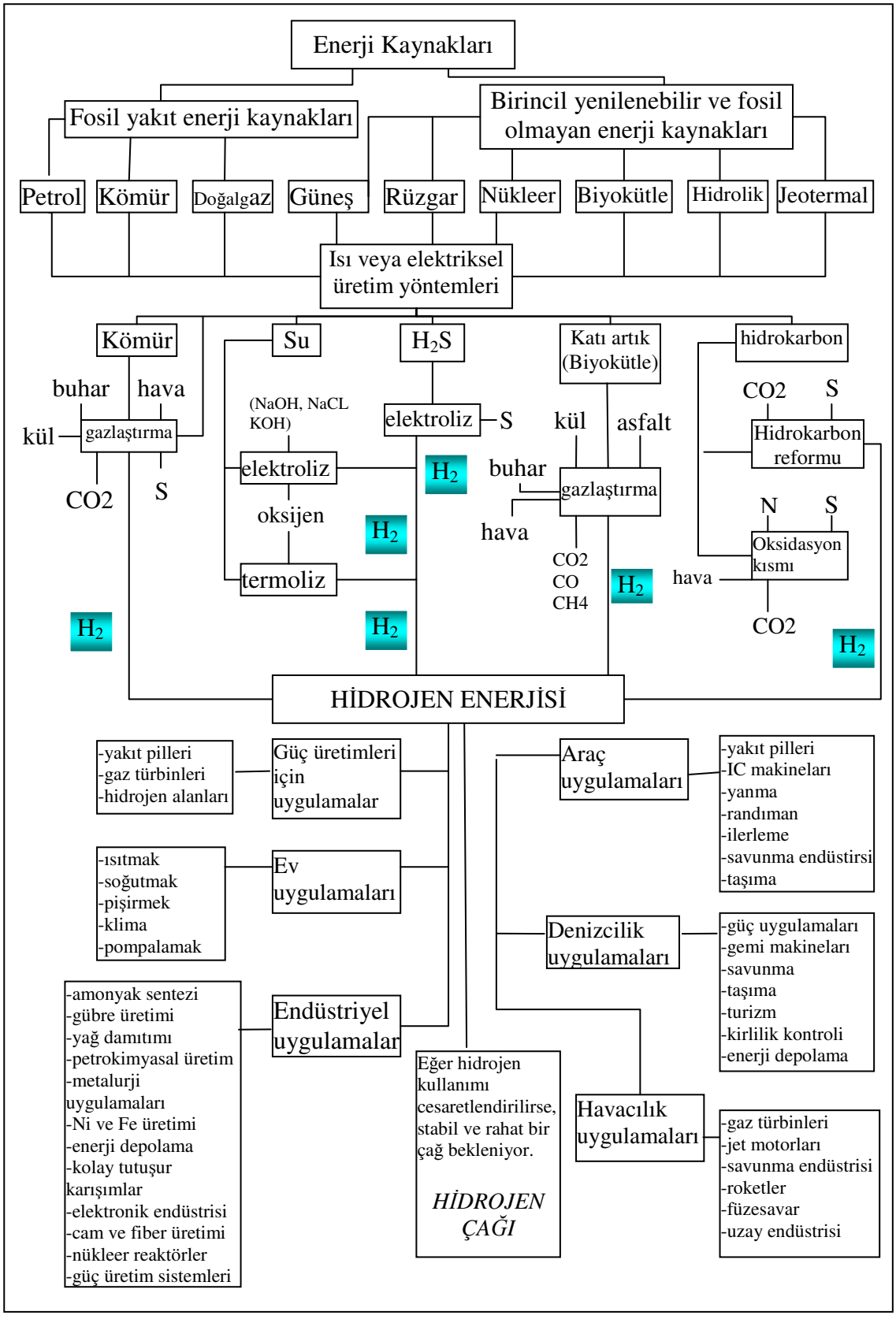
Hidrojenin gelecek enerji senaryolarında çok önemli rol oynayacağı belirlenmektedir. Hidrojen yakın bir gelecekte fosil yakıtların yerini alarak araçlarda taşınabilir bir enerji taşıyıcısı olacaktır.

Bugünlerde 500 milyar m^3 hidrojen 6,5 Ej enerji eşdeğerinde yıllık olarak dünya genelinde üretilmektedir. Yaklaşık olarak % 99'u fosil yakıtlardan üretilmektedir. Özellikle doğalgazın buharlaştırılması yoluyla hidrojen üretilmektedir [Hart ve ark., 1999]. Diğer enerji kaynaklarından ve üretim teknikleriyle hidrojen üretimi mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga ve katı atıkların enerjisinden sudan ve/veya hidrokarbonlardan hidrojen üretilir. Örneğin, 108,7 kg hidrojen $1m^3$ sudan elektrik kullanılarak elektroliz yoluyla üretilebilir. Buda 422,1 kg benzinin vereceği enerjiye eşittir [Sloop, 1978]. Hidrojen

üretimi için gerekli elektrik, fosil yakıtlardan veya yenilenebilir enerjilerden üretilebilmektedir.

Şekil 3.2. hidrojenin kullanım alanlarını ve üretim teknolojilerini göstermektedir. Şekildeki kullanım alanları literatürden [Contreas ve ark., 1997; Midilli, 2001] alınmıştır.

Hidrojenin en önemli kullanım alanlarından ve dikkati çekenlerinden bir tanesi taşıtlarda kullanımıdır. Özellikle bu alanda çok yönlü, verimli kullanım faktörü ve güvenliği ön plana çıkarmaktadır [Pusz, 2001; Goltsov ve Veziroğlu, 2002]. Hidrojenin atığı sadece sudur. Motorlu araçların kirletici atığı sadece yağlamada kullanılan yağlar olacaktır.



Şekil 3.2. Hidrojen kullanım tipleri ve üretim teknikleri arasındaki bağlantı

3.3.1. Hidrojenin bugünkü ekonomideki yeri

Kimyasal olmayan elektrik enerjisinden kimyasal enerji taşıyıcısı olan, hidrojen enerjisi ekonomisine geçiş aşamalı olacaktır. Bu geçiş 21.yüzyılın ortalarına kadar devam edecektir.

Dünya hidrojen üretimi yaklaşık olarak 50 milyar ton/yıl (45 milyar kg/yıl) bu değer dünya enerji talebinin %2'si kadardır [Raman, 2003]. Ancak, toplam dünya genelindeki yıllık tüketim 400-500 milyar N/m^3 kadardır. Bu değerin %97'si sanayide enerji dışında ancak %3'ü enerji olarak kullanılmaktadır [Winter, 2000; Manitoba, 2003].

Yakın gelecekte hidrojen kullanımı iki sahada artacaktır. Birincisi, taşıtlarda doğalgazla karıştırılarak kullanılması; bu durum içten yanmalı motorun performansını artıracak ve hava kirliliğini azaltacaktır. Diğeri ise, yakıt hücreleriyle araçlarda güç üretilecek su buharı dışında sıfır emisyonla çalışacaktır [Cownden ve ark. 2001; Dincer ve ark., 2004].

4. ÇALIŞMADA UYGULANAN YÖNTEM VE METOT

4.1. Dünya Enerji Durumu

Ekonomik ve toplumsal kalkınmanın en önemli girdilerinden olan enerji, 70'li yıllardan itibaren tüm dünya ülkelerinin gündemini ağırlıklı olarak işgal etmektedir. Dünya enerji sektöründe, önceleri petrol krizinden kaynaklanan arz kısıtlamaları, günümüzde ise çevresel baskılardan kaynaklanan büyük maliyet artışları söz konusudur. Ayrıca, rezervlerin azalmasına paralel fiyat artışları ve krizlerle karşı karşıya olduğumuz unutulmamalıdır. Enerji sektörü artık ülke sınırlarını aşmış, uluslararası boyutları ile irdelenme konumuna girmiştir. Uluslararası organizasyonların enerji sektörü ile ilgili olarak uyguladıkları kararlar tüm dünya ülkelerini etkilemektedir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde dünya genelinde enerji tüketimi ortalama % 1.8 mertebesinde artış göstermiş, gelecek tahminleri de aşağı yukarı bu oranlarda olacağı tahmin edilmektedir [World Energy Outlook, 2002].

Dünya genelinde enerji fosil yakıtlarına bağlıdır ve fosil yakıt kullanımı sürmektedir. Dolayısıyla çevre kirliliği ve en önemlisi olan küresel ısınma problemi devam etmektedir. Diğer taraftan fosil yakıtların tüketimiyle rezervler azalmakta, fiyat artışlarıyla ülkelerin sürdürülebilir kalkınmaları tehdit altına girmektedir.

Bu çalışmada, küresel ısınma ve sürdürülebilir kalkınma değerleri matematiksel olarak formülüze edilerek fosil yakıt tüketimine bağlı değişimler incelenmiştir. Fosil olmayan birincil kaynaklardan üretilen hidrojen kullanım oranlarıyla küresel ısınma değerinin düştüğü ve buna paralel olarak sürdürülebilir kalkınma seviyelerinin artışı grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Dünya enerji talebi, tüketim ve büyüme oranları

	Enerji Talebi (Mtoe)					*Pay (%)*					*Büyüme Oranı (%)*			
	1971	2000	2010	2020	2030	1971	2000	2010	2020	2030	1971-2000	2000-2010	2000-2020	2000-2030
Toplam birincil enerji miktarı	4999	9179	11132	13167	15267	100	100	100	100	100	2,1	1,9	1,8	1,7
Kömür	1449	2355	2702	3128	3606	29	26	24	24	24	1,7	1,4	1,4	1,4
Petrol	2450	3604	4272	5003	5769	49	39	38	38	38	1,3	1,7	1,7	1,6
Uluslar arası denizcilik kömürlüğü	112	133	145	158	174	2	1	1	1	1	0,6	0,9	0,8	0,9
Gaz	895	2085	2794	3531	4203	18	23	25	27	28	3	3	2,7	2,4
Nükleer	29	674	753	719	703	1	7	7	5	5	11,5	1,1	0,3	0,1
Hidrolik	104	228	274	327	366	2	2	2	2	2	2,7	1,9	1,8	1,6
Diğer yenilenebilir	73	233	336	457	618	1	3	3	3	4	4,1	3,7	3,4	3,3
Toplam tüketilen enerji	3634	6032	7254	8636	10080	100	100	100	100	100	1,8	1,9	1,8	1,7
Kömür	630	554	592	630	664	17	9	8	7	7	-0,4	0,7	0,6	0,6
Petrol	1890	2943	3545	4229	4956	52	49	49	49	49	1,5	1,9	1,8	1,8
Gaz	604	1112	1333	1566	1790	17	18	18	18	18	2,1	1,8	1,7	1,6
Elektrik	377	1088	1419	1812	2235	10	18	20	21	22	3,7	2,7	2,6	2,4
Isı	68	247	260	272	285	2	4	4	3	3	4,5	0,5	0,5	0,5
Yenilenebilir	66	88	106	126	150	2	1	1	1	1	1	1,8	1,8	1,8

* toe : Ton eşdeğer petrol

4.2.Yöntem

4.2.1. Küresel Isınma

Yeni bir ölçü tekniği geliştirerek, küresel ısınmanın seviyesini; petrol, kömür ve doğalgaz kullanım değerlerinin bir fonksiyonu şeklinde aşağıdaki parametrelere bağlı olarak hesap edebiliriz.

- Dünya birincil enerji kaynağı, E_{dbe}
- Petrol, kömür ve doğalgaz kullanımı, K_p, K_k, K_{dg}
- Fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı, K_{H_2}
- Petrol kullanımının yerine fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı, ω_{H_2-P}
- Kömür kullanımının yerine, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı, ω_{H_2-k}
- Doğalgaz kullanımının yerine, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı, ω_{H_2-dg}
- Diğer fosil kaynaklı yakıtlar yerine, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı, ω_{H_2-fy}

Genel olarak, fosil yakıt kullanımı arttıkça küresel kirlilik veya küresel ısınma artışı fosil yakıtların kullanımının bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Bu eşitlikler aşağıda verilmektedir:

$$\varphi_{pk} = \frac{K_p}{E_{dbe}} = \frac{Petrol\ Kullanımı}{Dünya\,birincil\,enerji\,miktarı} < 1 \quad \text{ve} \quad (K_p < E_{dbe}) \tag{4.1}$$

$$\varphi_{kk} = \frac{K_k}{E_{dbe}} = \frac{Kömür\ \ Kullanımı}{Dünya\,birincil\,enerji\,miktarı} < 1 \quad \text{ve} \quad (K_k < E_{dbe}) \tag{4.2}$$

$$\varphi_{dgk} = \frac{K_{dg}}{E_{dbe}} = \frac{Doğalgaz\ Kullanımı}{Dünya\ birincil\ eneji\ miktarı} < 1 \quad \text{ve} \quad (\ K_{dg} < \ E_{dbe} \ ) \tag{4.3}$$

Dünya birincil enerji kaynak kullanımı genel olarak her yıl dünya nüfus artışına ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişmektedir. Toplam fosil yakıt kullanımı oranı, φ_{pk} , φ_{kk} , φ_{dgk} değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varphi_{fyk} = \varphi_{pk} + \varphi_{kk} + \varphi_{dgk} \tag{4.4}$$

Ayrıca, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojenin petrol, kömür ve doğalgaz kullanımının yerine kullanımından sonraki oranları:

$$\beta_{pk} = \varphi_{pk} - \omega_{H_2-P} \tag{4.5}$$

$$\beta_{kk} = \varphi_{kk} - \omega_{H_2-k} \tag{4.6}$$

$$\beta_{dgk} = \varphi_{dgk} - \omega_{H_2-dg} \tag{4.7}$$

Eş. 4.5–4.7 ele alınarak, fosil yakıt kullanımının yerine, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımını dikkate alınarak toplam fosil yakıt kullanım oranlarını aşağıdaki eşitliklerle yazabiliriz.

$$\beta_{fyk} = \beta_{pk} + \beta_{kk} + \beta_{dgk} \tag{4.8a}$$

$$\beta_{fyk} = \varphi_{fyk} - (\omega_{H_2-P} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg}) \tag{4.8b}$$

Burada;

$$\omega_{H_2-fy} = \omega_{H_2-P} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg} \tag{4.9}$$

Eş.4.9 Eş. 4.8b'de yerine yazılırsa;

$$\beta_{fyk} = \varphi_{fyk} - \omega_{H_2-fy} \tag{4.10}$$

Toplam fosil yakıt kullanım oranı (φ_{fyk}) dünyadaki küresel ısınmaya (yani çevre kirliliğine) negatif bir etki yapacaktır. Böylece, dünyanın küresel ısınma miktarını ($\Phi_{k.ısınma}$) belirleyebiliriz. Fosil enerji kaynaklarına bağlı teknolojik gelişmeler, kişi başına fosil enerji tüketiminin artması, dünya fosil enerji talebi gibi fosil yakıt kullanımına bağlı olacak şekilde küresel ısınmayı artıracaktır.

Gerçekten, ister teorik ister deneysel veya hesap edilmiş bilgiler veya verilerin küresel ısınmaya etkilerini literatürde rahatlıkla bulabiliriz. Fakat şimdiye kadar bu bilgilerin küresel ısınmaya etkileri matematiksel olarak formülüze edilerek değerlendirilmemiştir. Bu çalışmada, literatürdeki datalar kullanılarak, küresel ısınma ve hidrojen enerji kullanımının temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınmanın etkileri matematiksel olarak formülüze edilip, grafikler çizilerek sonuçlar verilmiştir.

Literatürden alınan veriler değerlendirilirken, en düşük küresel ısınma seviyesi 1'e eşitlendi. Bu da bize en düşük ısınma seviyesi olan 1 ile karşılaştırma fırsatı verecektir. Böylece karşılaştırmalı olarak çizilen grafiklerin anlatacağı ifadeler kolayca anlaşılacaktır. Küresel ısınma seviyesi, fosil yakıt kullanımının yerine fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımının bir fonksiyona bağlı matematiksel olarak belirlendi. Bu durumda, küresel ısınma matematiksel formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Phi_{k.ısınma} = \frac{1}{(1-\beta_{fyk})} \tag{4.11}$$

Bu formül küresel ısınma seviyesini, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımına bağlı olarak verilebilir.

$$\Phi_{k.ısınma} = \frac{1}{1-(\varphi_{fyk} - (\omega_{H_2-p} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg}))} \tag{4.12}$$

Sonuçta, Eş. 4.1'den Eş. 4.12'ye kadar dünya genelindeki enerji kullanımlarına bağlı olarak küresel ısınmayı matematiksel olarak formülüze etmiş bulunmaktayız.

Bu formülü daha da genişletirsek;

$$\Phi_{k.ısınma} = \left\{1 - \left[\left(\frac{K_p}{E_{dbe}} + \frac{K_k}{E_{dbe}} + \frac{K_{dg}}{E_{dbe}}\right) - \left(\omega_{H_2-P} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg}\right)\right]\right\}^{-1} \tag{4.13}$$

Eş. 4.13'de görüleceği gibi, küresel ısınma değeri, petrol, kömür ve doğal gaz kullanımı ve petrol, kömür ve doğal gaz kullanımının yerine fosil olamayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımının bir fonksiyonudur. Bu formül teorik olarak küresel ısınma seviyesini kolayca karşılaştırma yapmamıza ve anlamamıza yardımcı olur. Eğer, fosil yakıt kullanımı yerine fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı toplam fosil yakıt kullanımına eşit olduğunda bu değer;

$$\omega_{H_2-fy} = \varphi_{fy} = \frac{K_p}{E_{dbe}} + \frac{K_k}{E_{dbe}} + \frac{K_{dg}}{E_{dbe}} = \omega_{H_2-P} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg}$$

fosil olmayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımından sonra toplam fosil yakıt kullanım değeri sıfır olacaktır. Bu da aşağıda verilmektedir;

$$\varphi_{fyk} = \left[\left(\frac{K_P}{E_{dbe}} + \frac{K_k}{E_{dbe}} + \frac{K_{dg}}{E_{dbe}}\right) - \left(\omega_{H_2-P} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg}\right)\right] = 0$$

bu değer en düşük küresel ısınma değeridir. ($\Phi_{k.ısınma}=1$)

Bunun anlamı, fosil yakıt kullanımı düşürülmelidir. Ancak, fosil yakıt yerine toplam fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı sıfır olursa ($\omega_{H_2-fy}=\omega_{H_2-P}+\omega_{H_2-k}+\omega_{H_2-dg}=0$) yani yenilenebilir ve diğer fosil olmayan kaynakların kullanımı da sıfır olursa, dünya enerji talebi tamamen fosil kaynaklardan karşılanacaktır.

Bunun anlamı; dünya küresel ısınma değeri $\Phi_{k.ısınma} = \infty$ sonsuza doğru gider. Normal şartlarda, küresel ısınma değeri 1 ile ∞ arasındadır. Buda φ_{fyk} ve ω_{H_2-fy} değerlerine bağlı olarak yazılabilir.

$$\Phi_{k.ısınma}=\frac{1}{(1-\beta_{fyk})} * \mathrm{N} \tag{4.14}$$

Burada; $N=\frac{E_{dbe}{}^{@\text{yıl}}}{E_{dbe}{}^{@1971}}$ normalizasyon katsayısıdır.

Eş. 4.14'de,1971 yılında toplam birincil enerji miktarı 4990 Mtoe, 2000 yılında 9179 Mtoe, 2010 yılında 11132 Mtoe, 2020 yılında 13167 Mtoe ve 2030 yılında ise 15267 Mtoe olduğu Çizelge 4.1'den alınarak 1971 yılına göre ilerleyen yılların normalizasyonu yapılmıştır.

Genel olarak, Eş. 4.13'den de görüleceği gibi küresel ısınma veya çevre kirliliği fosil yakıtların kullanımının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Fosil yakıt kullanımını azaltarak küresel ısınmayı azaltmak için, bu tezdeki önerimiz: fosil yakıtlar yerine, hidrojen enerjisi kullanımını desteklemeliyiz. Hidrojeni de yenilenebilir güneş, rüzgar, jeotermal vb. enerji kaynaklarından üretmeliyiz. Bu da son derece sınırlı olduğundan geriye sadece alternatif enerji olan nükleer enerji kullanımı kalmaktadır. Nükleer enerjiye olan yatırımlar ve özellikle yeni nesil nükleer reaktörlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar desteklenmelidir.

4.2.2. Temiz enerjiye bağlı sürdürülebilir kalkınma faktörü

Sürdürülebilir kalkınma, yukarıdaki parametrelerin (petrol, kömür ve doğal gaz kullanım değerleri) bir fonksiyonu olarak bulunur. Eğer fosil kaynakların kullanımı artarsa, $\Psi_{\text{s.kalkınma}}$ sürdürülebilir kalkınmanın seviyesi düşecektir, çünkü fosil yakıt rezervlerinin azalmasına paralel olarak, fosil yakıtların fiyatları da artacaktır. Dolayısıyla kalkınmanın temel girdisi olan enerji fiyatları yükselecek, hayat pahalılığı artacak, sürdürülebilir kalkınma risk altına girecektir.

Sürdürülebilir kalkınma ile fosil olmayan enerjilerden elde edilen H_2 kullanımı arasındaki ilişkiyi, aşağıdaki eşitliklerle açıklanabilir:

$$\omega_{H_2} = \frac{K_{H_2}}{E_{dbe}} = \frac{\textit{Fosil olmayan kaynaklardan elde edilen } H_2 \textit{ kullanımı}}{\textit{Dünya birincil enerji miktarı}} < 1, \quad (K_{H_2} < E_{dbe}) \tag{4.15}$$

fosil olmayan kaynaklardan elde edilen H_2 kullanımı artıkça ω_{H_2} değer artacaktır.

Küresel ısınma ile H_2 kullanımı arasındaki ilişkiyi ω_{H_2} ile açıklayabiliriz. Petrol, kömür, doğal gaz kullanımına bağlı olarak küresel ısınmada artmaktadır. Ne kadar fazla fosil yakıt kullanılırsak o kadar çok bu rezervler azalacaktır. Buda fosil yakıtların bitmesiyle dünya genelinde birçok probleme sebep olacaktır. Bunlar kısaca aşağıda özetlenmiştir;

- Fosil yakıtlara dayalı teknolojik gelişmeler duracağından, dünya genelinde krizlere yol açacaktır.
- Kişi başına tüketilen enerji miktarı düşeceğinden toplumsal ve bireysel gerilmeler olacaktır.
- Eğer bu hızla fosil yakıtlar tüketilirse Şekil 3.1'de gösterilen çevre felaketleri olacaktır.

- Bu problemlerin üstesinden gelmek için H_2 üretimini arttırmamız gerekmektedir.

Küresel ısınmayı düşürmek, temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınmayı ve dünya barışına katkı sağlamak için fosil olmayan kaynaklardan elde edilen H_2 kullanımı hızla sanayide, taşımacılıkta, evlerimizde kullanımını ve bu yöndeki teknolojik gelişmeleri desteklememiz gerekmektedir.

Fosil olmayan kaynaklardan üretilen H_2 kullanımının artması küresel ısınmaya etki eden fosil yakıt kullanımını düşürecektir. Ayrıca, fosil olmayan kaynaklardan üretilen H_2 kullanımındaki artış fosil yakıtlara olan talebi düşürecektir. Temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma terimi ile $\Phi_{k.ısınma}$ ve ω_{H_2} arasında bir ilişki kurmamız gerekmektedir.

Temiz enerji ile sürdürülebilir kalkınma değerini belirleyebilmek için temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma değerinin en üst değerini 1'e eşit olduğunu kabul edeceğiz. Bu değer referans değerimiz olacaktır. Aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\Psi_{\text{s.kalkınma}} = \omega_{H_2}(1-\beta_{fyk}) \tag{4.16}$$

burada değerler yerlerine konursa;

$$\Psi_{\text{s.kalkınma}} = \omega_{H_2}(1-(\varphi_{fyk}-\omega_{H_2-fy})) \tag{4.17}$$

$$\Psi_{\text{s.kalkınma}} = \omega_{H_2}\left(1-((\varphi_{pk}+\varphi_{kk}+\varphi_{dgk})-(\omega_{H_2-P}+\omega_{H_2-k}+\omega_{H_2-dg}))\right) \tag{4.18}$$

bu eşitlikte $\Phi_{k.ısınma}$, küresel ısınma değeri ile ifade edilirse;

$$\Psi_{\text{s.kalkınma}} = \frac{\omega_{H_2}}{\Phi_{k.ısınma}} \tag{4.19}$$

olduğu görülür ve genel bir eşitlik yazılırsa;

$$\Psi_{\text{s.kalkınma}} = \frac{\omega_{H_2}}{E_{dbe}} \times \left\{1 - \left[\left(\frac{K_P}{E_{dbe}} + \frac{K_k}{E_{dbe}} + \frac{K_{dg}}{E_{dbe}}\right) - \left(\omega_{H_2-P} + \omega_{H_2-k} + \omega_{H_2-dg}\right)\right]\right\} \quad (4.20)$$

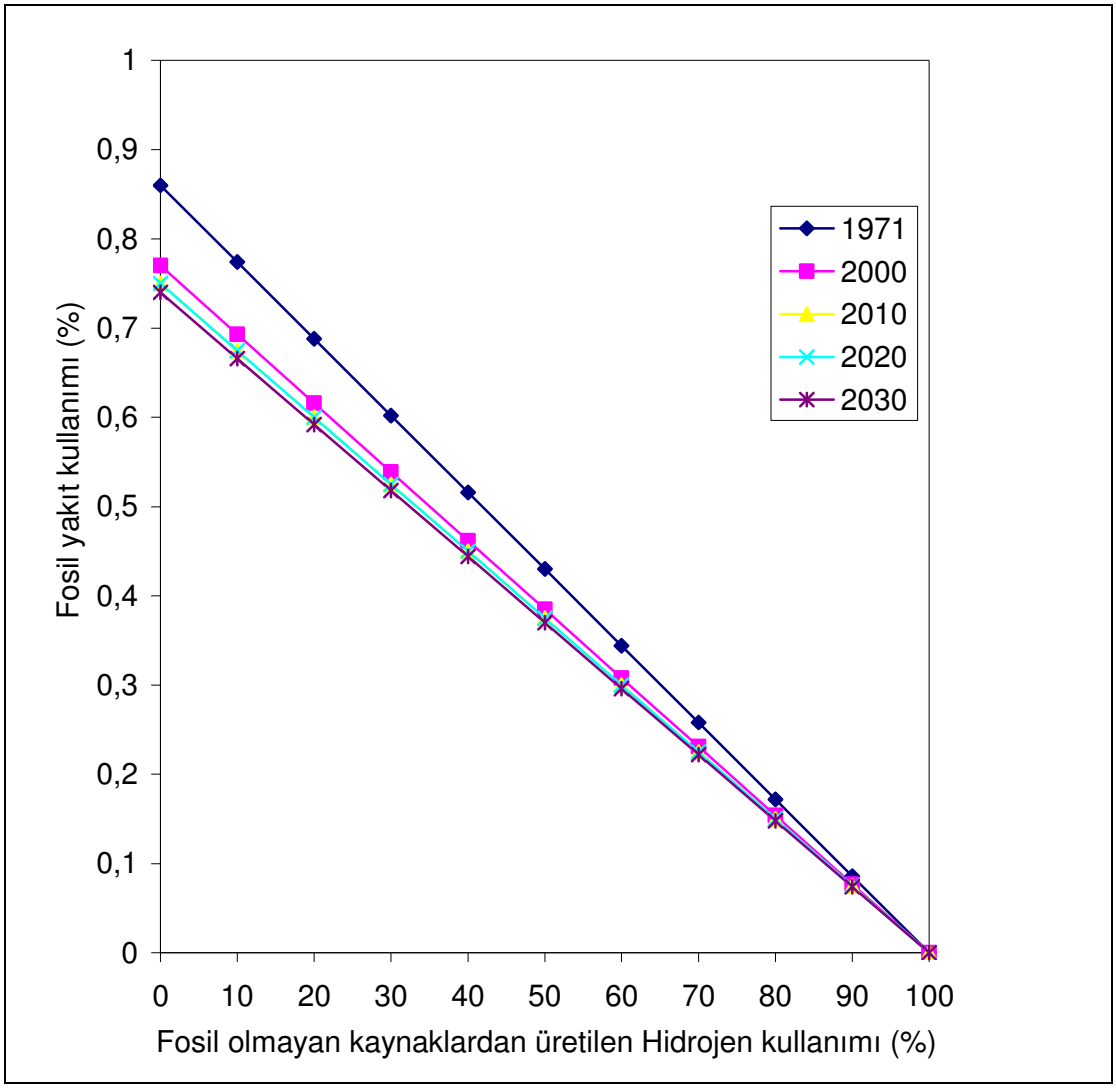
Eş. 4.20, kömür, petrol, doğalgaz kullanımı ve fosil olmayan kaynaklardan üretilen H_2 kullanımının bir fonksiyonu olarak yazılmıştır.

$\Phi_{k.ısınma}$ değerinin 1 ile ∞ arasında , ω_{H_2} değeri 0 ile 1 arasında olduğu dikkate alınarak incelenirse, temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma değeri $\Psi_{\text{s.kalkınma}}$ = 1 olduğunda ($\Phi_{k.ısınma}$=1 : en az küresel ısınma değeri, ve ω_{H_2}=1 en fazla H_2 kullanımı).

Literatürden alınan dünya birincil enerji kullanım verileri yardımıyla eşitlik Eş. 4.14 ve Eş. 4.20 kullanılarak çeşitli sonuçlar elde edilerek grafikler çizilmiş bundan sonraki bölümde verilmiştir.

5. UYGULANAN YÖNTEMİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

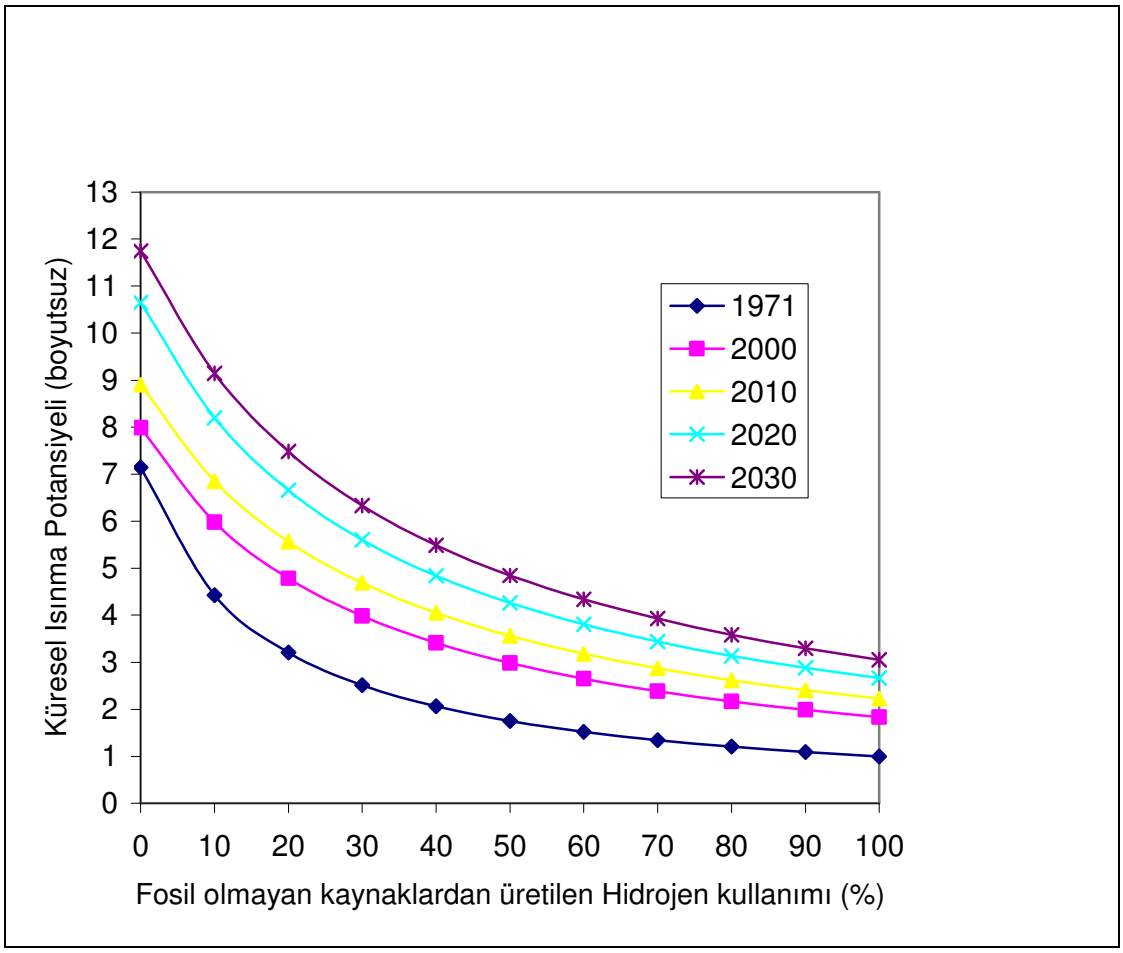
Şekil 5.1.'de fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanım oranının bir fonksiyonu olarak fosil yakıt kullanımının değişimi gösterilmektedir. Fosil yakıtlar yerine hiç hidrojen kullanılmadığında ($\omega_{H_2-fy} = 0$), fosil yakıt kullanım oranları maksimum seviyede olmaktadır. Zaman içerisinde fosil yakıt rezervleri azalmasına bağlı olarak fosil yakıt kullanımı da azalmaktadır.



Şekil 5.1. Fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen enerji kullanımı ile fosil yakıtlara olan talep

Eğer fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen enerji kullanım oranı artarsa ($\omega_{H_2-fy} > 0$), fosil yakıt kullanım oranı ($\beta_{fyk} < \varphi_{fyk}$) düşecek, dolayısıyla fosil kaynaklara olan talep de azalacaktır. Eş. 4.10 göz önüne alınırsa, fosil yakıtlar yerine fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı fosil yakıt kullanımına eşit oluğunda, fosil kullanım oranı β_{fyk} = 0 olur. Bu durumda, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı arttırılırsa, fosil yakıt rezervlerinin ömürleri de artacaktır. Dünya birincil enerji tüketim verileri Eş. 4.10'da kullanılarak Şekil 5.1. elde edilmiştir.

Şekil 5.2. fosil olmayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımına bağlı olarak küresel ısınma potansiyelini boyutsuz olarak göstermektedir.



Şekil 5.2. Fosil olmayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımına bağlı olarak küresel ısınma potansiyeli

Şekil 5.2. incelendiğinde, $\Phi_{k.ısınma}=1$, en düşük küresel ısınma potansiyeli, fosil olmayan hidrojen fosil yakıtlarının yerine kullanıldığında elde edilmektedir. Bu değer 1971 yılı verilerine göre 2000 yılına gelindiğinde toplam fosil kullanımı miktarı 9179 Mtoe olduğundan 1971 yılına göre 1,836 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeli elde edilmektedir. Bunun anlamı atmosferde birtakım kalıcı tahribatlardır. Bu değer, 2010 yılında 2,226 ,2020 yılında 2,663 ve 2030 yılında ise 3,054 en düşük küresel ısınma potansiyelleri beklenmektedir. Bunun için zaman geçirilmeden fosil yakıtların kullanımı bırakılarak, fosil olmayan kaynaklara yönelinmelidir. Fosil olmayan kaynaklar içerisinde enerji potansiyeli ve uygulanabilirlik açısından nükleer enerji olduğu görülmektedir. Diğer taraftan yenilenebilir enerji kaynakları (Güneş, Rüzgar, Jeotermal vb.) potansiyelleri sınırlıdır. Ancak araştırmalar bu yönde sürdürülmelidir.

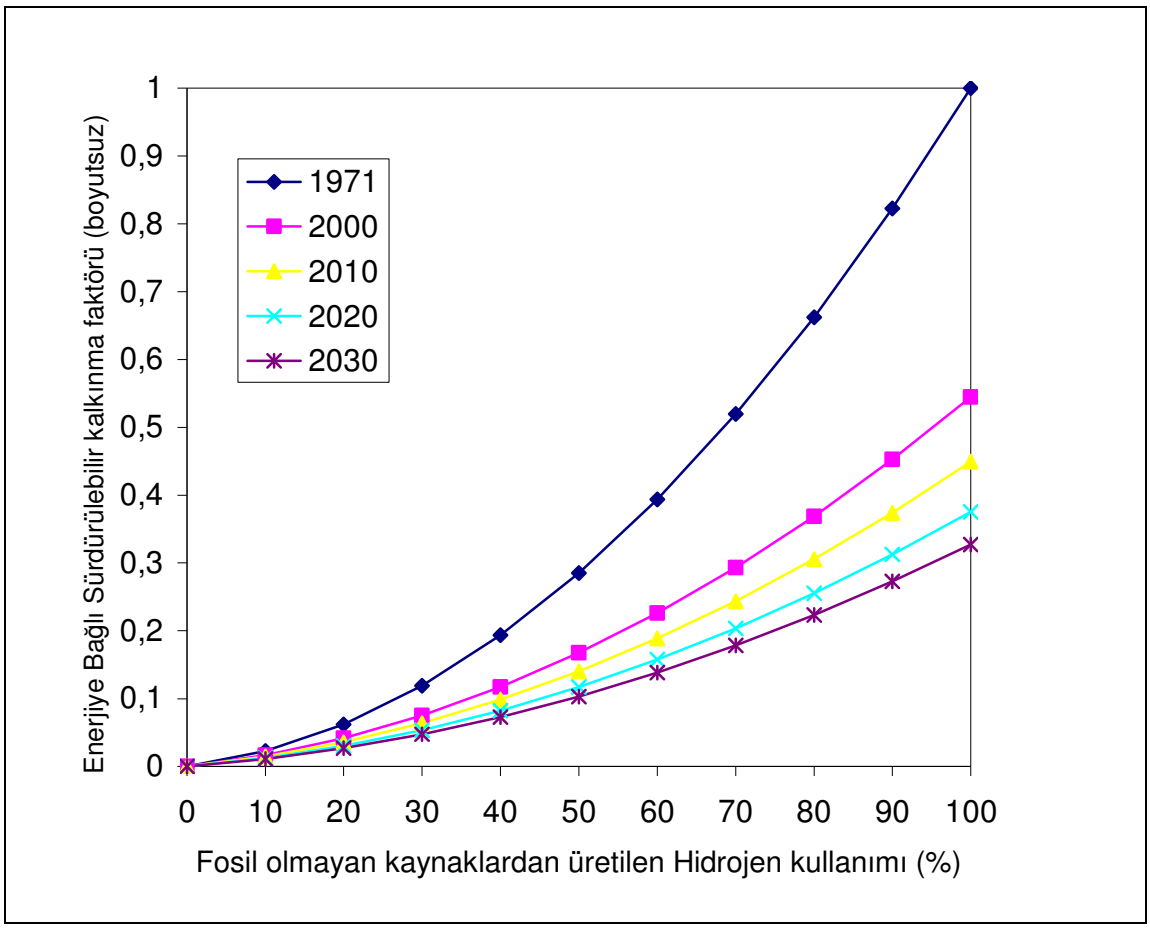
Genel olarak küresel ısınma seviyesini düşürmenin tek yolu, fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojeni, fosil yakıtların yerine kullanmaktır. Eş. 4.14 kullanılarak elde edilen değerler Şekil 5.2'de maksimum küresel ısınma potansiyelleri 1971 için 7.142, 2000 için 7.981, 2010 için 8.904, 2020 için 10.652 ve 2030 için 11.745 olarak verilmiştir. Bu değerler hidrojen kullanma değerleri 0 içindir ($\omega_{H_2-P}=0$, $\omega_{H_2-k}=0$ ve $\omega_{H_2-dg}=0$). Hidrojen kullanımı arttıkça küresel ısınma potansiyeli azalacaktır.

Şekil 5.2. incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar ve yorumlar yapılabilir:

- Fosil yakıt kullanımıyla rezervler azalacak, fiyatlar artacaktır.
- Fosil yakıt kullanımıyla, küresel ısınma, ozon tabakasının tahribi ve çevre felaketlerine sebep olan emisyonlar artacaktır.
- Rezervlerin azalmasıyla kişi başına tüketilecek fosil enerji azalacak, pahalı enerji kullanımıyla yaşam standartları düşecektir.
- Enerji talebenin artmasıyla, fosil yakıt temeline dayalı teknolojik gelişmeler duracaktır.
- Fosil yakıtların sınırlı rezervleri tükenecektir.

- Fosil yakıt rezervlerinin azalmasıyla bölgesel huzursuzluklar olacak dünya savaşlarının olma ihtimalleri artacak.
- Acilen yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır.
- Ancak, yenilenebilir enerji kullanımı çok sınırlı olduğundan tek alternatif nükleer enerji olduğu görülmektedir.

Şekil 5.3. fosil olmayan kaynaklardan üretilen hidrojen kullanımının fonksiyonu olarak temiz enerji ile sürdürülebilir kalkınma faktörünün değişimini vermektedir. Şekilden görüldüğü gibi hidrojen kullanım oranı % 100 olduğunda, temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınma faktörü 1 olmaktadır. Bu değer kıyaslamalar yapmak için seçilmiştir, aynı zamanda da küresel ısınmanın en düşük seviyesidir. Bu yüzden fosil yakıtlar yerine hidrojen kullanımı desteklenmelidir.



Şekil 5.3. Fosil olmayan yakıtlardan elde edilen hidrojen kullanımına bağlı olarak sürdürülebilir kalkınma faktörünün gösterimi

Şekil 5.3. incelendiğinde 1971 yılında fosil kaynaklar yerine, fosil olmayan kaynaklardan üretilen hidrojenin %100 oranında kullanıldığında sürdürülebilir kalkınma faktörü en üst seviyededir. İlerleyen yıllara bakılacak olursa, bu değer 2000 yılında 0,54466, 2010 yılında 0,4492, 2020 yılında 0,37552 ve 2030 yılında 0,3274 olduğu görülmektedir. Yıllar ilerledikçe sürdürülebilir kalkınma faktörünün azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi fosil yakıt rezervlerinin azalmasına bağlı fiyat artışlarıdır. Fiyat artmasıyla hayat pahalılığı artmakta ve sürdürülebilir kalkınma faktöründe bir düşüş gözlenmektedir. Çünkü sürdürülebilir kalkınmanın temel girdisi olan enerji fiyatları doğrudan etkili olmaktadır.

Temiz enerji sürdürülebilir kalkınma faktörünün en üst değerde olmasının aşağıdaki avantajları vardır.

- Fosil yakıt rezervleri ve fiyatları makul seviyelerde olacaktır. Aksi halde her geçen gün fosil yakıt fiyatları artacak buda gelişmekte olan ülkeler için tehdit teşkil edecektir.
- Fosil yakıtlardan kaynaklanan çevresel etkiler yavaşlayacaktır.
- Fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı ile yenilenebilir enerji ve nükleer enerji teknolojileri gelişecektir.
- Fosil yakıt teknolojileri gerilerken, fosil olmayan kaynaklardan hidrojen üretim teknolojileri gelişecektir.
- Hidrojen kullanımı arttıkça insanlığın yaşam standartları artacaktır.
- Yeni enerji kaynakları arama çalışmalarından dolayı harcamalar düşecektir.
- Dünyadaki savaş tehditleri, bölgesel huzursuzluklar son bulacaktır.
- Teknolojiye dayalı enerji kaynakları gelişecek, bölgeye dayalı enerji (tüm fosil yakıtlar kaynaklarına) olan ilgi azalacak buda fosil yakıta sahip bölgelere barış getirecektir.
- Bölgesel zenginlikler (fosil yakıtlara bağlı) son bulacak, teknoloji kullanan ülkeler zengileşecektir.

Eğer hidrojen bu fosil olmayan yenilenebilir enerjilerden üretilirse, dünyamızı tehdit eden çevre felaketlerine sebep olan CO, CO_2, NO_X ve SO_X kirletici partiküller ve uçucu maddeler en aza inecek ve sonunda da tamamen ortadan kalkacaktır. Bu etkilerden kurtulmak için mutlaka suyun elektrolizi, gazlaştırma teknolojileri ve en önemlisi de yüksek sıcaklıklarda üretilen termokimyasal metotlar kullanılmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya nüfusunun hızla artması, mevcut enerji kaynaklarına insan ömrü ile kıyaslanabilir ömür biçilmesi, fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO_2 in dünya küresel ısınma sürecine etkisi, 20 yılı aşkın süredir yeni yakıt arayışı ile hidrojeni gündeme getirmiştir. Hidrojen çok yönlü kullanıma uygun, dönüşebilirliği ve kullanım veriminin yüksekliği, emniyetli, olumlu çevre etkisi ile efektif maliyeti diğer yakıtlarla rekabet edebilecek bir yakıt olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çalışmalarımızın sonucunda temiz bir yakıt olan hidrojenin endüstriyel düzeyde üretimini sağlayacak en önemli birincil enerji kaynağının nükleer enerji olduğu sonucuna varılmıştır. Buna ilave olarak çalışmamızda, nükleer ısı kaynağından yararlanarak termokimyasal olarak hidrojen üretiminin en uygun ve verimli olduğu üzerinde durularak, en uygun termokimyasal çevrimler için UT-3'ün verimi % 35-40 arasında iken sülfür-iyot çevrimi için % 52 olarak ve aynı zamanda daha düşük maliyette olabileceği görülmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklı nükleer reaktörlerinden ısı kaynağı olarak yararlanmak suretiyle sülfürik iyodürün termokimyasal çevrimle suyun ayrıştırılmasına dayalı çevrimin daha uygun olduğu saptanmıştır. Sülfür-iyot çevrimini kullanarak sudan hidrojen üretmeye dayalı çeşitli nükleer reaktör tiplerinden, helyum gaz soğutmalı reaktör, ağır su soğutmalı reaktör ve ergimiş tuz soğutmalı reaktörlerin sülfür-iyot çevrimi için en uygun reaktör tipleri olduğu sonucuna varılmıştır. Helyum gaz soğutmalı reaktör diğer ikisine nazaran daha uygun oldukları ve ayrıca modüler Helyum reaktör ve çakıl taşlı yataklı modüler reaktör tipleri elektrik üretmek için geliştirilmektedir. Bunların termokimyasal yolla hidrojen üretimi için ayrıca ilave bir geliştirmeye ihtiyaçları yoktur. Sülfür-iyot çevrimi için helyum gaz soğutmalı reaktör tipleri önerilmektedir.

Çalışmamızda asıl vardığımız sonuçlara bakacak olursak, küresel ısınma ve hidrojen enerji kullanımının temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınmanın etkilerini, elde ettiğimiz formüller yardımıyla, literatürdeki veri kaynaklarından alınan bilgilere dayalı olarak oluşturulan grafikler sonucunda, çevre kirliliğinin, fosil yakıtların kullanımının artmasına bağlı olarak arttığını görmekteyiz. Fosil yakıt kullanımını

azaltarak küresel ısınmayı azaltmak için, bu tezdeki önerimiz; fosil yakıtlar yerine, hidrojen enerjisi kullanımı desteklenmelidir. Hidrojeni de yenilenebilir güneş, rüzgâr, jeotermal vb. enerji kaynaklarından üretmeliyiz. Bu yenilenebilir enerji teknolojilerinin son derece sınırlı olmasından dolayı geriye sadece alternatif enerji olan nükleer enerji kullanımı kalmaktadır. Geleceğin hidrojen teknolojilerinin gelişmesinde nükleer teknolojilerden yararlanılacaktır.

Fosil olmayan kaynaklardan üretilen hidrojen kullanımının artması küresel ısınmaya etki eden fosil yakıt kullanımını düşürecektir. Ayrıca, fosil olmayan kaynaklardan üretilen hidrojen kullanımındaki artış fosil yakıtlara olan talebi düşürecektir. Küresel ısınmayı düşürmek, temiz enerjiyle sürdürülebilir kalkınmayı ve dünya barışına katkı sağlamak için fosil olmayan kaynaklardan elde edilen hidrojen kullanımı hızla sanayide, taşımacılıkta, evlerimizde kullanımını ve bu yöndeki teknolojik gelişmeleri desteklememiz gerekmektedir. Unutulmaması gereken, en büyük çevre kirliliğinin, fakirlik ve geri kalmışlık olduğudur. Fakirliği yenmenin en emin yolu da yüksek teknolojiye sahip olmaktır.

Nükleer-Hidrojen üretimi ile sürdürülebilir kalkınma ve küresel ısınmaya etkileri konulu bu çalışmada vardığımız sonuçları ve önerileri aşağıdaki ana hatları ile iki başlık altında özetleyebiliriz:

a) Türkiyede nükleer teknolojiye geçiş için:

- Hidrojen yakıtı üretiminde, birincil enerji kaynağı olarak nükleer enerji rakipsiz olarak ön sırayı almaktadır.

- Türkiye gecikmeden nükleer santrallar vasıtasıyla elektrik enerjisi üretmek suretiyle nükleer çağı yakalamalıdır.

b) İleriye dönük hidrojen teknolojilerine geçmek için diğer alınması gereken önlemler:

- Çevreyle ilgili uluslararası protokollara dahil olunması, hidrojenle ilgili ulusal politika ve sivil insiyatifler oluşturulması,
- Muhtelif sektörlerde yenilenen teknolojinin hidrojen uyumlu olarak seçilmesi,
- Ulaşımda hidrojenin yakıt olarak kullanımı için alt yapı hazırlanması (pilot projeler, demonstrasyon taşıtları, dolum istasyonları gibi),
- Hidrojen uyumlu malzeme komponent ve teknoloji geliştirilmesi ve teknoloji transferi için mevzuat değişikliği ve teşviklerin getirilmesi,
- Hidrojenle ilgili çok hassas güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi,
- Hidrojenle ilgili teknolojilerin verimini arttırmak ve maliyetini azaltmak amacıyla araştırmaların yaptırılması; bu çalışmaları yapan ve yaptıran kuruluşlara mali destek sağlanması,
- Hidrojenle ilgili araştırma-geliştirme yapan özel sektöre teşvikler uygulanması,
- Hidrojenin üretimi, depolanması, iletimi ve kullanımı ile ilgili güvenlik mevzuatı ve standartlarının, ayrıca hukuki mevzuatın uluslar arası eşdeğerleriyle uyumlu biçimde oluşturularak yürürlüğe konması,
- Hidrojenle ilgili tüm süreç, ekipman ve tesisat için test ve belgelendirme standartlarının uluslararası eşdeğerleriyle uyumlu olarak geliştirilmesi ve uygulanması,
- Hidrojen konusunda çalışmak üzere ve hidrojenle ilgili kazalara müdahale etmek üzere personel yetiştirilmesi,
- Hidrojenle ilgili temel konuların okullardaki ders müfredatına eklenmesi,
- Halkın medya yoluyla hidrojen konusunda bilinçlendirilmesi,
- Doğal gaz fazlasının hidrojene dönüştürülerek kullanılması,

gibi bazı öneriler hemen akla gelmektedir. Önerilen çalışmalar ister istemez yeni iş sahaları ve mesleklerin gelişmesine yol açarak ekonomiye de canlılık kazandıracak, katma değeri yüksek ürünlerin üretimini sağlayacaktır. Ayrıca, çevreyle ilgili uluslararası protokollara dahil olunması başka ülkelerin zararlı teknoloji ve atıklarının Türkiye'ye ithalini önlemek açısından çok önemlidir.

KAYNAKLAR

Angelo, J. A. and D. Buden, 1985. "*Space Nuclear Power",* ***Orbit Book Co***., Malabar, FL, 18: 224-275.

Awad, A.H. and N. Veziroğlu, 1984. "Hydrogen versus synthetic fosil fuels", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 9: 355–366.

Aochi, T., Y. Tadoroko, K. Yoshida., N.Kameyama, M.Nobue and T. Tamaguchi, 1986. "Economical and technical evaluation process for an industnal scale plan", ***Hydrogen Energy Progress VI***, Pergamon Press, Oxford, 2: 663–672.

Brecher, L.E., S. Spewock, 1977. "Westinghouse sulfur cycle for the thermochemical decomposition of water", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 2: 7–15.

Beghi,G.E., 1986. "A decade of research on thermochemical hydrogen at the joint research center, Ispra", ***Int. J.Hydrogen Energy*****,** 11: 761–771.

Besenbruch, G.E., 1982. "General Atomic sulfur-iodine thermochemical water-splitting process", ***Am. Chem. Soc., Div.Pet.Chem.***, Prepr. 271: 48–53.

Bamberger, C.E., 1978. "Hydrogen production from water by thermochemica1 cycles; a 1977 update", ***Cryogenics***,18: 170-183.

Bugreev, M. I., 1999. "Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposals", ***Kluver Academic Publishers***, Netherlands, 261–264.

Beghi, G. E., 1985. "A decade of research on thermochemical hydrogen at the Joint Research Centre-Ispra", ***Hydrogen System***, Beijing, China, 1: 153–171.

Baker, C. E., 1978. "sponsored national program on hydrogen production from water via thermochemical cycles", ***Alternative Energ Sources,*** Hemispbere, Washington, 8:3479–3493.

Barreto, L., Makihira, A., Riahi, K., 2003. "The Hydrogen economy in the 21st century:a suistainable development scenario", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 28:267-84.

Bentor, Y., 2003. "Hydrogen at Chemical Elements", ***Int. J. Hydrogen Energy,*** 4: 12-23.

Cownden, R., Nahon, M. and Rosen, M.A., 2001. "Modeling and analysis of a solid polymer fuel cell systems for transportation applications" ***Int. J. Hydrogen Energy***, 26(6): 615-23.

Contreas, A., Yiğit S., Ozay, K., Veziroğlu, T.N., 1997. "hydrogen as aviation fuel:a comparison with hydrocarbon fuels", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 22(10/11):1053-60.

Cox, K. E. and Bartlit, J. R., 1983. "The environmental impact of thermochemical processes for hydrogen production: a preliminary assessment", ***Alternative Energy Sources lll***, Hemisphere, Washington, 5: 385–397.

DOE/EIA-0484, 2000. "International Energy Outlook 2000", ***The Energy Information Administration of the Department of Energy***, 1: 39.

DOE/EIA-0383, 2000. "Annual Energy Out1ook 2000 with projections to 2020", ***The Energy Information Administration of the Department of Energy***, 1: 76.

Dincer, I., 2002. "Technical,environmental and exergetic aspects of hydrogen energy sistems", ***In.t J. Hydrogen Energy***, 27: 265-85.

Dincer, I., 1999. "Environmental impacts of energy", ***Energy Policy***, 27: 845-54.

Dunn, S., 2002. "Hydrogen futures:toward a suitainable energy sistem", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 27: 235-64.

Dincer, I. and Rosen, M.A., 2004. "Exergy as a driver for achieving sustainability", ***Int. J. Gren Energy***, 1(1): 1-19.

EI-Genk, M. S., 1994. "A Critical Review of Space Nuclear Power and Propulsion 1984- 1993", ***American Institute of Physics***, NY, 12: 87-132.

El-Wakil, M. M., 1962. "*Nuclear Power Engineering*", ***McGraw-Hill Book Co***., NY, 8: 35-48.

Engels, H., Knoche, K. F. and Roth, M., 1986. "Direct association of hydrogen iodide: an alternative to the General Atomic proposal", ***hydrogen Energy Progress VI,*** Pergamon Press, Oxford, 2: 657–662.

Funk, J.K., Reinstrom, R.M., 1966. "Energy reguirements in the production of hydrogen from water", ***Ind.Eng.Chem.Proc.Des.Develpo***, 5: 336-342.

Forsberg, W. And Weinberg, A.M.,1998. "Advanced Reactors, Passive Safety and Acceptance of Nuclear Safety", ***Annu. Rev.- Energy,*** 15: 133–152.

Fillo, J. A., Powell, J. R., Steinberg, M., Salzano, F. and Benandi, R., 1979. "Hydrogen Production from fusian reactors coupled with high temperature electrolysis", ***Hydrogen Energy System,*** Pergamon Press, Oxford, 3: 1135–1168.

Goltsov, V.A. and Veziroğlu, TN., 2002. "A step on the road to hydrogen civillization", ***Int. J. Hydrogen Energy*** , 27: 719-23.

Hallabough, C.M. and Bowman, M. G., 1981. "The La2(SO4) thermochemical cycle for hydrogen production", ***Proc. Fourth Technical Workshap,*** International Energy Agency, Julich, West Germany, 9: 372-433.

Hart, D., Freund, P., Smith, A., 1999. "Hydrogen-today and tomorrow", ***IEA Greenhouse Gas R&D Programme***, ISBN 1 898373 24 8. Available from:http://www.iaegreen.org.uk/h2rep.htm

Knoche, K.F. and Schuster, P., 1984. "Thermochemical production of hydrogen by a vanadium /chlorine cycle. Part 1: An energy and exergy analysis of the process", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 9: 457–472.

Kemm, K., 2000. "Development of the South Africa Pebble Bed Modular Reactor System", http:www.uilondon.org/sym/1999kemm.htm.

Koshizuka, S. and Oka, Y., 1998. "Supercritical-Pressure, Light-Water-Cooled Reactors for Economical Nuc1ear Power Plants", ***Prog. Nucl Ener.*** 32: 547–554.

Kameyama, H., Tomino, Y., Yashida, K. and Orihara, A., 1986. "process simulation of [mascot] plant using the UT-3 thermochemical cycle for hydrogen production", ***Hydrogen Energy Progress VI,*** Pergamon Press, Oxford, 2: 688–695.

Mizuta, S. and Kumagi, T., 1984. "Progress report on the thermochemical hidrogen. Production by. the Mg-.S-.I cycles- Iaboratery scale demonstration", ***Hydrogen Energy Progress V,*** Pergamon Press, Oxford, 2: 421–431.

Mizuta, S. And Kumagi, T., 1986. "Progress report on the Mg-S-I thermochemica1 water-splitting cycle", ***Hydrogen Energy Progress VI,*** , Pergamon Press, Oxford, 2: 696–705.

Moson, C. V. F. and Bowmann, M.G., 1982. "Reaction for improving efficiencies in thermochemical cyc1es re1ated to the sulfur dioxide-iodine process", ***Proc. 4th orld Hydrogen Energy Conf.,*** Pergamon Press, Oxford, 2: 665-674.

Momirlan, M. and Veziroğlu, T.N., 2002. "Current status of hydrogen energy", ***Renewale and Sustainable Energy Reviews***, 6: 141–79.

Midilli, A., Olgun, H., Rzayev, P., Ayhan, T., 1991. "Solar hydrogen produvtion from hazelnut shells", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 25: 723–32.

Midilli, A., Rzayev, P., Ayhan, T., 1998. "Güneş enerjili kapalı çevrimli hidrojen ayrıştırma sistemi", ***Guneş Günü Sempozyumu ve Fuarı***, İzmir, Türkiye, 1: 34-8.

Midilli, A., Doğru, M., Howarth, C.R., Ayhan, T., 2001. "Hydrogen production from hazelnut shell by appleying air-blown downdraft gasification technique", ***Int. J. Hydrogen Energy,*** 26: 29-37.

Manitoba, 2003. “Energy Development Initiative”, ***Departmen of Energy,Science and Technology:Preliminary hydrogen opportunuties report***., available from:http://www.manitobaenergy.com.

Nero, V., 1979. “A Guidebook to Nuclear Reactors”, ***U. of Cal. Press***, Berkeley.

Nanda, A. K., Ulrichson, D. L. and Adesanya, B. A., 1986. “Chlorination of water vapor and chlorination-hydrolysis of magnesium oxide”, ***Hydrogen Energy Progress VI***, Pergamon Press, Oxford, 2: 706–714.

Normon, J. H., O'Keete, D. R., Besenbruch, G.E., Brown, L. C. and Gibson, J. B., 1982. “Methodsof processing HI-H2O-I2 solution”, ***Proc. 4th World Hydrogen Energy Conf,*** Pergamon Press, Oxford, 2: 510–521.

Onstott, E.I., Bowman, M.G., Michnovicz, M.F. and Hollabough, C.M., 1984. “Modification of the sulfur dioxide-iodine thermochemical hydrogen cycle with lanthanum sulfites andsu1fates”, **Hydrogen Energy Progress V**, Pergamon Press,.Oxford, 2: 433-437.

Olgun, H., Midilli, A., Rzayev, P., Ayhan, T., 1997. “Pyrolsis studies of nutshells”, ***Proceeding of 10th ınternational Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO)***, Budapeşt, Hungary, 16-21.

Peterson, E.J, Foltyn, E. M. and Onstott, E.I., 1980. “Preparation and thermal studies of a cerium(III) sulfite-sulfate- hydrate”, ***The Rare Earths in Modern Science and Technology,*** Plenum Press, New York, 2: 65–66.

Pusz, J., 2001. “Alternative energy sources”, Available from: http://www.fuelcells.prv.pl.

Raman, V., 2003. “hydrogen infrastructura-market development”, ***Allntown (PA) USA:Air products and chemicals Inc.***, Available from://www.cleanair.org.

Russell, J., Porter,. J., 1974. “Production of hydrogen from water”, ***General Atomics Report GA***- A12889.

Rosen, M.A., Dincer, I., 2004. “Sectoral energy and exergy modeling of Turkey”, ***ASME J Energy Resour Technol***, 119(3).

Rosen, M.A., Scott, D.S., 2003. “Entropy production and exergy destruction-part I:hierarchy of Earth’s major constituences and part II:illustrative Technologies”, ***Int. J. Hydrogen Energ***y, 28(12):1307-23.

Sato, S., Shimizu, S., Nakajima, H., Onuki, K., Ikezoe, Y. and Suwa, T., 1982. “Studies on the nickel- iodine-sulfur process for hydrogen production”, ***Proc. 4th World Hydrogen Energy Conf.,*** Pergamon press, Oxford, 2: 553–566.

Simnad, M., 1971. "Fuel Element Experience in Nuclear Power Reactors", ***Gordon and Breach Science Publ***. NY, 2: 143-179.

Schultz, K.R., Lloyd, C., Besenbruch, G.E., 2002. "Hydrogen production and nucleer power", ***Sping National Meeting***, New Orleans, 139b.

Schultan, R., 1979. "Nuclear energy as a primary energy source for hydrogen production", ***Hydrogen Energy System,*** Pergamon press, Oxford, 3: 3–24.

Seifritz, W., 1981. "Possible use of fusian power for hydrogen production", ***Int. J. Hydrogen Energy,*** 6: 331–338.

Soliman, M.A., 1978. "A highly efficient thermochemical cycle for hydrogen production", ***Alternative Energy Sources,*** Hemisphere, Washington, 8: 3541–3550.

Sloop, L.J., 1978. "Liquid hydrogen as a propulsion fuel", ***The NASA History Series***, Washington(DC), 32: 92-141.

Tamaura, Y., Steinfeld, A., 1995. "Production of solar hydrogen by a novel, 2- step, water-splitting thermochemica1 cycle", ***Energy (Oxford)*** , 20: 325-330.

TUSİAD, 1998. "Evalution of energy strategy of Turkey towards 21st century (in Turkish)", İstanbul, TUSİAD-T/98–12/239.

Ueda, R., Tagawa, H., 1974. "Production of hydrogen from water using nuclear energy", ***A review, Japan At. Energy Res. Inst.***, Tokyo, Japan., 69.

Ultanir, M.O., 1997. "Hidrojenin yakıt olarak kullanımı ve özellikleri", ***Çevre-Enerji Kongresi***, TMMOB Makine Mühendisleri Odası., 195-315.

Veziroğlu, T.N., Von Vorst, , W.D., and Kelley, J.H., 1982. "hydrogen energy", ***Proc. 4th World Hydrogen Energy Conf.,*** California, Pergamon Press, Oxford, 1: 76-85.

Veziroğlu, T.N., 1979. "The unifier of non-conventional energy sources: hydrogen Energy system", ***Non-Conventiona/ Energy Sources,*** Pergamon Press, Oxford, 3: 526–543.

Veziroğlu, T.N., 2000. "Qarter century of hydrogen movement 1974–2000", ***Int. J. Hydrogen energy,*** 25: 1143–50.

Veziroğlu T.N., 1995. "Twenty years of the hydrogen movement 1972-1994", ***Int. J. Hydrogen Energy***, 20(1):1-7.

Veziroğlu, T.N., 2002. "Importance of HTM conferences for future of hydrogen economy", ***Int. J. Hydorgen Energy***, 27: 715.

Veziroğlu, T.N., 1998. “Dawn of the hydrogen age”, ***Int. J. Hydrogen Energy***, 23(12): 1077-8.

Veziroğlu, T.N and Barbir F., 1992. “Hydrogen the wonderfull fuel”, ***Int. J. Hydrogen Energy***, 17: 391-9.

Williams, L. O., 1980. “Hydrogen Power”, ***Pergamon Press***, New York, 8: 22-74.

Winter C-J., 2000. “Energy sustainability the road is the destination”, ***Invited paper presented at tha Energy and Sustainability Forum of the Federal Institue of Technology***, Lausanne, Switzerland.

Yalcin, S., 1989. ”A review of nuclear hydrogen production”, ***Int. J. Hydrogen energy***, 14: 551-561.

Yoshika, H., Nakayama, T., Kameyama, H. and Yoshida, K., 1984. “Operation of a bench-scale plan for hydrogen production by the UT-3 cycle”, ***Hydrogen Energy Progress V,*** Persaman Press, Oxford, 2: 413-420.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YALÇIN, Ahmet Hikmet

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 27.12.1976 Ankara

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (312) 380 47 69

Faks : 0 (312) 380 79 69

e-mail : ahmetyalcin06@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Erciyes Üni./ Makine Müh. Bölümü	2001
Lise	Hacı Sabancı Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2002-2006	Özel Sektör	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Kitap okumak, Spor yapmak