

Hidrojenin Nükleer Enerji ile Üretim Yollarının İncelenmesi

Turgay POLAT^{1*}, A. Hikmet YALÇIN¹ ve H. Mehmet ŞAHİN²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Fosil yakıtların hızlı tükenmeleri ve yakılmaları sonucu çevre felaketlerine yol açmaları, insanlığı 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 ortaya konulmuştur. 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. Sonuç olarak hidrojen üretimine dayalı nükleer santral seçimi için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, nükleer-hidrojen üretimi, sürdürülebilir kalkınma

Study on Processes of Hydrogen Production Based Nuclear Energy

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 introduced 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. As a result it was given suggestions in order to select the nuclear power based on hydrogen production.

Key Words: Hydrogen, nuclear-hydrogen production, sustainable development

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin gelişimi ve dünya nüfusunun artması sonucu enerji gereksinimi gittikçe büyümektedir. Buna karşılık dünyada kullanılan klasik enerji kaynaklarının rezervleri azalacak ve gelecek bir zamanda ihtiyaçları 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 alışagelmış-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.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: turgaypolat@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2012.15.2, 49-69

yüzyılın sonunda önce fosil yakıt sisteminin yerini alması gerektiği sonucu öngörülmektedir [1-4].

Ayrıca, küresel iklim değişikliğinin kaçınılmaz bir biçimde ortaya çıkışında fosil yakıt kullanımının 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 reaktör tipleri yardımıyla, hem elektrik enerjisi üretimi hem de temiz hidrojen enerjisi üretimine katkı sağlanacaktır [5- 8].

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 sıkıntılarının artmasına neden olmaktadır [9].

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 [2].

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, hidrojen enerjisinin stratejisi ve ekonomisi üzerinde durularak gelecekteki araştırmalara ışık tutmayı amaçlanmıştır.

2. HİDROJEN VE ÖZELLİKLERİ (HYDROGEN AND IT'S PROPERTIES)

2.1. Hidrojenin tarihçesi (History of hydrogen)

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 [10].

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 trityum, ağır hidrojen eldesi, 1954: İlk hidrojen bombası patlatılması (Bikini Atoll, USA), 1955: Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak tanımlanması ve bu yönde çalışmaların başlaması, 1969: Hidrojenin yararlanılabilir özelliklerini kullanarak hidrojen enerjisi kavramının geliştirilmesi, 1986: Dünyadaki toplam hidrojen üretimi $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ (normal sıcaklık ve basınçta) ulaşması olarak verilebilir.

2.2. Hidrojenin özellikleri (Properties of hydrogen)

Hidrojenin atomik ve fiziko-kimyasal özellikleri onu diğer bütün elementlerden oldukça farklı kılmaktadır. Bunlar şu şekildedir [10].

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

2.3. Hidrojenin formları ve izotopları (Hydrogen Forms and It's isotopes)

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 °C 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.

2.4. Hidrojen enerji sisteminin avantajları (Advantages of hydrogen energy system)

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

- Sera problemini çözecektir.
- Kirlilik ve asit yağmurları problemini çözecektir.
- Temiz ve sürekli bir enerji sistemini yerleştirecektir.
- İstihdam sağlayacaktır.
- Yeni bir enerji teknolojisi için ihracat potansiyeli meydana getirecektir.
- Petrol ithalatını azaltacaktır.
- Ticaret açığını azaltacaktır.
- Çevreyi koruyarak ekonomiye destek olacaktır.

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 stasyonier kuvvet makinelerinde yakıt gereksinim vardır [11]. İdeal bir yakıtta bulunması istenilen özellikler şöyle sıralanabilir;

- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmesi,
- Taşınırken enerji kaybı hiç veya çok az olmalı,
- Her yerde, örneğin, sanayide, evlerde, taşıtlarda kullanılabilmesi,
- Depolanabilmesi,
- 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, 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 biçimde 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 [11].

Hidrojen su içinde bol bulunan bir maddedir ve yerli enerji kaynakları ile üretimi mümkündür. Kullanım verimi yüksek bir yakıt olup çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Motor ya da gaz türbini ile bir jeneratörü tahrik ederek veya yakıt pili olarak kullanıla-

rak, 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 [5].

3. NÜKLEER HİDROJEN ÜRETİMİ (NUCLEAR HYDROGEN PRODUCTION)

Dünya enerji talebi, büyük oranda uygun kullanışlarından dolayı sıvı fosil yakıtlar vasıtasıyla karşılanmaktadır. 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. Bunlar;

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

Bu sebeple, yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga, termonükleer, vb.) dünya enerji ihtiyacını karşılamada gelecek için öngörülmektedir. Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, fosil yakıtların yerini almasını hedefleyen yeni 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.

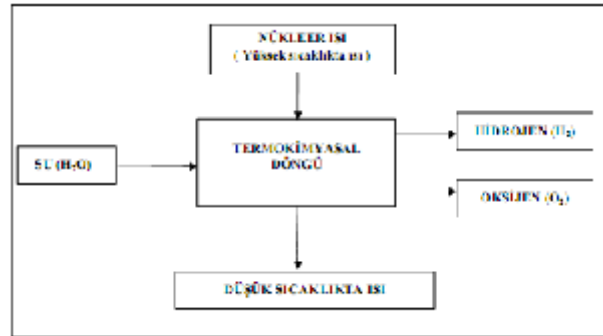
1. Elektroliz
2. Direkt ısıl ayrıştırma
3. Kimyasal reaksiyon
4. Termokimyasal çevrim

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 [12-13]. 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.

4. NÜKLEER ENERJİ KAYNAKLI TERMOKİMYASAL HİDROJEN ÜRETİMİ (THEMOCHEMICAL PRODUCTION OF HYDROGEN BASED NUCLEAR ENERGY)

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 elektrige % 40 verimde çevirebiliriz. Ama hidrojen üretiminde elektroliz ve buharlaştırma işleminde kullanırsak verim % 90'a kadar çıkar. Bu durum hidrojen üretimi için ısı enerji kaynaklarının verimi % 36 arttırır [14- 16]. Tipik bir termokimyasal döngünün şeması Şekil 1'de verilmiştir.

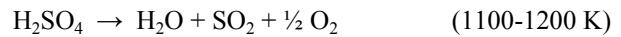


Şekil 1. Tipik termokimyasal döngünün şeması (Schematic view of typical thermochemical cycle)

Termokimyasal hidrojen üretiminde kullanılan çevrimler ve bu çevrimlerde kullanılan 2-3-4-5-6 adımlı reaksiyon tipleri tablolar halinde aşağıda çizelge 1, çizelge 2, çizelge 3, çizelge 4 ve çizelge 5'de sunulmuştur.

4.1. Sülfürik asit-iyot çevrimi (Sulphuric acid-iodine cycle)

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

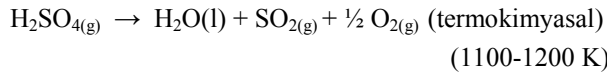


Bu çevrim tüm sıvı ve gaz fazlar için uygulanır. General Atomic tarafından Amerika da test edilerek dakikada 2 litre sıvı hidrojen elde edilmiştir [17].

4.2. Hibrit sülfürik asit çevrimi (Hybrid sulphuric acid cycle)

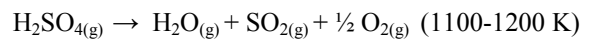
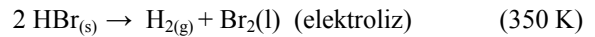
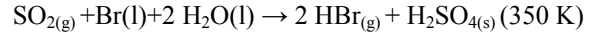
Bu çevrim Los Alamos Scientific laboratuvarında termokimyasal hidrojen programında ilk yapılan çalışmadır. İki adımlık bir çevrimdir. Amerika ve İtalya

aktif olarak geliştirmektedir. Bunlar Westinghouse ve Euratom işbirliği ile yapılmaktadır [13,3].



4.3. Hibrit sülfürik asit - hidrojen bromid çevrimi (Hybrid sulphuric acid-hydrogen bromid cycle)

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



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 [17]

Cizelge 1. İki adımlı prosesler (Two-step processes)

No	Prosesler	Sıcaklık (°C)	Reaksiyon
1	Muravlev (USSR)	2200	$\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{FeO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		400	$3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$
2	Hallet Air Products 1965 (US)	700	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		300	$2 \text{HCl} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Cl}_2$ (elektroliz)
3	Westinghouse (US)	77	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (elektroliz)
		850~950	$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

Cizelge 2. Üç adımlı prosesler (Three-step processes)

No	Prosesler	Sıcaklık (°C)	Reaksiyon
1	Julich Center EOS (batı almanya)	200	$3 \text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$
		800	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeSO}_4 \rightarrow 3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		200	$3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{SO}_2 \rightarrow \text{FeSO}_4 + 3 \text{FeO}$
2	Mark 9 (İtalya)	450	$6 \text{FeCl}_2 + 8 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{FeO}_4 + 12 \text{HCl} + 2 \text{H}_2$
		150	$2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3 \text{Cl}_2 + 12 \text{HCl} \rightarrow 6 \text{FeCl}_3 + 6 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
		420	$6 \text{FeCl}_3 \rightarrow 6 \text{FeCl}_2 + 3 \text{Cl}_2$
3	General Atomic (US)	1140	$2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{NaOH} \rightarrow 3 \text{NaOFe}_2\text{O}_3 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$
		530	$3 \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{NaOH} + 3 \text{Fe}_2\text{O}_3$
		1470	$3 \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
4	Euratom 1972 (İtalya)	700	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		600	$2 \text{HCl} + 2 \text{FeCl}_2 \rightarrow 2 \text{FeCl}_3 + \text{H}_2$
		350	$\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2$
5	Euratom1970 De Beni (İtalya)		$3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{HBr} + \text{H}_2$
			$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8 \text{HBr} \rightarrow 3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} + \text{Br}_2$
			$\text{H}_2\text{O} + \text{Br}_2 \rightarrow 2\text{HBr} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
6	Yokohama Mark 3	700	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$
		250	$\text{CO} + 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{C} + 3 \text{FeO}_3$
		1400	$3 \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
7	1973 (Japonya)		$2 \text{FeSO}_4 + \text{I}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe(OH)SO}_4 + 2 \text{HI}$
			$2 \text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$
		250	$2 \text{Fe(OH)SO}_4 \rightarrow 2 \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$

8	Aechen Univ. Julich 1972 (batı Almanya)	200	$2 \text{CrCl}_2 + 2 \text{HCl} \rightarrow 2 \text{CrCl}_3 + \text{H}_2$
		800	$2 \text{CrCl}_3 \rightarrow 2 \text{CrCl}_2 + \text{Cl}_2$
		700	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
9	Shell Prosesleri (US)	500	$6 \text{Cu} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{Cu}_2\text{S} + 3 \text{H}_2$
		300	$\text{Cu}_2\text{S} + \text{SO}_2 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CuSO}_4$
		500	$2 \text{Cu}_2\text{S} + 2 \text{CuSO}_4 \rightarrow 6 \text{Cu} + 4 \text{SO}_2$
10	(US)	700	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		200	$\text{HCl} + 2 \text{CuCl} \rightarrow 2 \text{CuCl}_2 + \text{H}_2$ $2 \text{CuCl}_2 \rightarrow 2 \text{CuCl} + \text{Cl}_2$
11	GIRIO (Japonya)	400~500	$2 \text{CuI} + 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CuO} + 2 \text{NH}_4\text{I}$
		25	$2 \text{CuO} + \text{I}_2 \rightarrow 2 \text{CuI} + \text{O}_2$
		600~700	$2 \text{NH}_4\text{I} \rightarrow 2 \text{NH}_3 + \text{I}_2 + \text{H}_2$
12	Hitachi (Japonya)	800	$2 \text{NH}_4\text{I} \rightarrow 2 \text{NH}_3 + \text{I}_2 + \text{H}_2$
		100	$2 \text{NaI} + 2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO} + 2 \text{NH}_4\text{I}$
		600	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{I}_2 \rightarrow 2 \text{NaI} + \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
13	Mark 2 1972 (İtalya)	725	$\text{Mn}_2\text{O}_3 + 4 \text{NaOH} \rightarrow 2 \text{NaO} \cdot \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$
		25~125	$2 \text{NaO} \cdot \text{MnO}_2 + n \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{NaOH}(\text{aq}) + 2 \text{MnO}_2$
		825	$2 \text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
14	Gaz De France (Fransa)	700	$2 \text{KOH} + 2 \text{K} \rightarrow 2 \text{K}_2\text{O} + \text{H}_2$
		100	$\text{K}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{KOH} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		900	$2 \text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{O}_2 + 2 \text{K}$
15	Mark 8 (İtalya)	5~700	$6 \text{MnCl}_2 + 8 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Mn}_3\text{O}_4 + 12 \text{HCl} + 2 \text{H}_2$
		25~80	$3 \text{Mn}_3\text{O}_4 + 12 \text{HCl} \rightarrow 6 \text{MnCl}_3 + 3 \text{MnO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
		800~1000	$3 \text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$
16	LASL (US)	800	$6 \text{LiOH} + 2 \text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow 3 \text{LiO} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$
		200	$3 \text{LiO} \cdot \text{Mn}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{LiOH} + 3 \text{Mn}_2\text{O}_3$
		500	$3 \text{Mn}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{Mn}_3\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
17	Mark IS (İtalya)	77	$\text{SrBr}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SrO} + 2 \text{HBr}$
		230	$2 \text{HBr} + \text{Hg} \rightarrow \text{HgBr}_2 + \text{H}_2$
		850~950	$\text{SrO} + \text{HgBr}_2 \rightarrow \text{SrBr} + \text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
18	General Atomic (US)		$2 \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{I}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{HI}$
			$2 \text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$
			$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
19	THEME S-3 39 (US)	390	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{I}_2 \rightarrow \text{SO}_3 + 2 \text{HI}$
		323	$\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
			$2 \text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$
20	General Atomic San Diego (US)		$2 \text{EuO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Eu}_2\text{O}_3$
			$\text{I}_2 + \text{SrO} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{SrI}_2$
			$\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{SrI}_2 \rightarrow 2 \text{EuO} + \text{I}_2 + \text{SrO}$
21	GIRIO (Japonya)		$\text{As}_2\text{O}_3 + 2 \text{I}_2 + 6 \text{NH}_3 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 2(\text{NH}_4)_2\text{AsO}_4 + 4 \text{NH}_4\text{I}$
			$2(\text{NH}_4)_2\text{AsO}_4 \rightarrow \text{As}_2\text{O}_3 + 2 \text{NH}_3 + \text{O}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
			$4 \text{NH}_4\text{I} \rightarrow 4 \text{NH}_3 + 2 \text{I}_2 + 2 \text{H}_2$
22	Sourian Gaz De France	400	$\text{Sn} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{SnO}_2$
			$2 \text{SnO}_2 \rightarrow 2 \text{SnO} + \text{O}_2$
		1700	$2 \text{SnO} \rightarrow \text{SnO}_2 + \text{Sn}$

23	Miura (Japonya)	5 500~550 950~1000	$\frac{1}{2} \text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{I}_2 \rightarrow \frac{1}{2} \text{Sb}_2\text{O}_5 + 2 \text{HI}$ $2 \text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$ $\frac{1}{2} \text{Sb}_2\text{O}_5 \rightarrow \frac{1}{2} \text{Sb}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
24	Osaka Inst. Of Tech. 1975 (Japonya)		$2 \text{NH}_4\text{I} \rightarrow 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2 + \text{I}_2$ $\text{BaCO}_3 + \text{I}_2 \rightarrow \text{BaI}_2 + \text{CO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $\text{BaI}_2 + 2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{BaCO}_3 + 2 \text{NH}_4\text{I}$
25	Argonne (US)	27 427 427	$\text{LiNO}_2 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiNO}_3 + 2 \text{HI}$ $2 \text{HI} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2$ $\text{LiNO}_3 \rightarrow \text{LiNO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
26	Funk (US)		$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $2 \text{TaCl}_2 + 2 \text{HCl} \rightarrow 2 \text{TaCl}_3 + \text{H}_2$ $2 \text{TaCl}_3 \rightarrow 2 \text{TaCl}_2 + \text{Cl}_2$
27	US		$\text{U}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} + 3 \text{CO}_2 \rightarrow 3 \text{UO}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2$ $3 \text{UO}_2 + \text{CO}_3 \rightarrow 3 \text{UO}_3 + 3 \text{UO}_3 + 3 \text{CO}_2$ $3 \text{UO}_3 \rightarrow \text{U}_3\text{O}_8 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
28	(US)	700 200 300	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $2 \text{HCl} + 2 \text{CuCl} \rightarrow 2 \text{CuCl}_2 + \text{H}_2$ $2 \text{CuCl}_2 \rightarrow 2 \text{CuCl} + \text{Cl}_2$ (elektroliz)
29	Mark (İtalya)	77 77 850~950	$\text{SO}_2 + \text{Br}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HBr} + \text{H}_2\text{SO}_4$ $2 \text{HBr} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Br}_2$ (elektroliz) $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4 + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
30	(US)	700 300 500	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $2 \text{Hg} + 2 \text{HCl} \rightarrow 2 \text{HgCl} + \text{H}_2$ $2 \text{HgCl} \rightarrow 2 \text{Hg} + \text{Cl}_2$ (elektroliz)

Çizelge 3. Dört adımlı prosesler (Four-step processes)

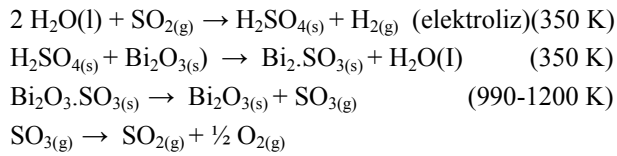
No	Prosesler	Sıcaklık(°C)	Reaksiyon
1	B-I Institute of Gas Technology (US)	850 230 330 850	$3 \text{FeCl}_3 + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{HCl}$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8 \text{HCl} \rightarrow 2 \text{FeCl}_3 + \text{FeCl}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$ $2 \text{FeCl}_3 \rightarrow 2 \text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2$ $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
2	UT-3 University of Tokyo (Japonya)	700~750 500~650 200~300 550~600	$\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + 2 \text{HBr}$ $\text{CaO} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CaBr}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8 \text{HBr} \rightarrow 3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} + \text{Br}_2$ $3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{HBr} + \text{H}_2$
3	IGT C-5 (US)		$\text{Fe}_3\text{O} + 3 \text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{FeSO}_2 + 2 \text{H}_2$ $3 \text{FeSO}_4 \rightarrow \frac{3}{2} \text{Fe}_2\text{O}_3 + \frac{3}{2} \text{SO}_2 + \frac{3}{2} \text{SO}_3$ $\frac{3}{2} \text{Fe}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{SO}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{SO}_3$ $2 \text{SO}_3 \rightarrow 2 \text{SO}_2 + \text{O}_2$
4	Mark 4 (İtalya)	800 100 800 420	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $2 \text{HCl} + \text{S} + 2 \text{FeCl}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2 \text{FeCl}_3$ $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{S}_2$ $2 \text{FeCl}_3 \rightarrow 2 \text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2$
5	Mark 6 (İtalya)	800 170	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ $2 \text{HCl} + 2 \text{CrCl}_2 \rightarrow 2 \text{CrCl}_3 + \text{H}_2$ $2 \text{CrCl}_3 + 2 \text{FeCl}_2 \rightarrow 2 \text{CrCl}_2 + 2 \text{FeCl}_3$

		700	
		350	
6	LASL (US)	100	$2 \text{CrCl}_3 + 2 \text{FeCl}_2 \rightarrow 2 \text{CrCl}_2 + 2 \text{FeCl}_3$
		900	$2 \text{FeCl}_3 \rightarrow 2 \text{FeCl}_2 + \text{Cl}_2$
			$\text{SO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{HBr}$
			$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
7	Mark I (İtalya)	730	$2 \text{HBr} + 2 \text{CrBr}_2 \rightarrow 2 \text{CrBr}_3 + \text{H}_2$
		250	$2 \text{CrBr}_3 \rightarrow 2 \text{CrBr}_2 + \text{Br}_2$
		200	$\text{CaBr}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{HBr}$
		600	$2 \text{HBr} + \text{Hg} \rightarrow \text{HgBr}_2 + \text{H}_2$
8	Mark IC (İtalya)	730	$\text{HgBr}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaBr}_2 + \text{HgO} + \text{H}_2\text{O}$
		100	$\text{HgO} \rightarrow \text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		100	$2 \text{CaBr} + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Ca(OH)}_2 + 4 \text{HBr}$
		900	$4 \text{HBr} + \text{CuO} \rightarrow 2 \text{CuBr}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$
9	Argonne Nat. Lab. (US)	27	$2 \text{CuBr}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow 2 \text{CuO} + 2 \text{CaBr}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
		127	$2 \text{CuO} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		477	$\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{NaBr} \rightarrow \text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Br}$
		727	$\text{NaHCO}_3 \rightarrow \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{CO}_3 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$
10	Mark 2C (İtalya)	850	$\text{NH}_4\text{Br} + \text{Ag} \rightarrow \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{NH}_3 + \text{AgBr}$
		500	$\text{AgBr} + \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ag} + \text{NaBr} + \frac{1}{2} \text{CO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		100	$\text{Mn}_2\text{O}_3 + 2 \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2 \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + \text{CO}_2 + \text{CO}$
		600	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$
			$2 \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + n \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{Na}_2\text{CO}_{3(\text{aq})} + 2 \text{MnO}_2$
			$2 \text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
11	Lawrence Livermore Univ. Of Cali. (US)	100	$\text{MgSe} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2 + \text{H}_2\text{Se}$
		200	$2 \text{H}_2\text{Se} \rightarrow 2 \text{H}_2 + 2 \text{Se}$
		225	$2 \text{Se} + \text{Mg(OH)}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{Se} + \frac{1}{2} \text{MgSe} + \frac{1}{2} \text{MgSeO}_4$
			$\frac{1}{2} \text{MgSe} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{MgSeO}_4$
12	Lawrence Livermore Univ. Of Cali. (US)	410	$2 \text{CsOH} + (x+1)/2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CsOx} + \text{H}_2\text{O}$
		300	$\text{CsOx} + (x+y) \text{Hg} \rightarrow \text{CsHgy} + x \text{HgO}$
			$\text{HgO} \rightarrow \text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
			$\text{CsHgy} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Hg} + \text{CsOH} + \frac{1}{2} \text{H}_2$
13	Astrojet- Cntral (US)	450	$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{Cs} \rightarrow 2 \text{CsOH} + \text{H}_2$
		250	$2 \text{CsOH} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CsO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
		450	$2 \text{CsO}_2 \rightarrow \text{Cs}_2\text{O} + 3/2 \text{O}_2$
			$\text{Cs}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Cs} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
14	Tokyo Ins.of Technology 1975 (Japonya)	20~30	$6 \text{CaO} + 6 \text{I}_2 \rightarrow \text{Ca(IO}_3)_2 + 5 \text{CaI}_2$
		550~700	$\text{Ca(IO}_3)_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{I}_2 + 5/2 \text{O}_2$
			$5 \text{CaI}_2 + 5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 5 \text{CaO} + 10 \text{HI}$
			$10 \text{HI} \rightarrow 5 \text{H}_2 + 5 \text{I}_2$
15	GE (US)	25	$2 \text{VCl}_2 + 2 \text{HCl} \rightarrow 2 \text{VCl}_3 + \text{H}_2$
		700	$4 \text{VCl}_3 \rightarrow 2 \text{VCl}_4 + 2 \text{VCl}_2$
		25	$2 \text{VCl}_4 \rightarrow 2 \text{VCl}_3 + \text{Cl}_2$
		700	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
16	Mark 3 (İtalya)	800	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		170	$2 \text{HCl} + 2 \text{VOCl} \rightarrow 2 \text{VOCl}_2 + \text{H}_2$
		600	$2 \text{VOCl}_2 \rightarrow 2 \text{VOCl} + 2 \text{VOCl}_3$
		200	$2 \text{VOCl}_3 \rightarrow 2 \text{VOCl}_2 + \text{Cl}_2$

17	Hallet	700	$H_2O + Cl_2 \rightarrow 2 HCl + \frac{1}{2} O_2$
	Air	200	$2 HCl + FeCl_2 \rightarrow 2 FeCl_3 + H_2$
	Products	176	$2 FeCl_3 + 2 NO \rightarrow 2 FeCl_2 + NOCl$
	(US)	150	$2 NOCl \rightarrow 2 NO + Cl_2$
18	Ispra (İtalya)	800	$H_2SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO + H_2$ (elektroliz)
		800	$H_2SO_4 \rightarrow SO_3 + H_2O$
		25	$SO_3 \rightarrow SO_2 + \frac{1}{2} O_2$
			$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$
19	LASL	77	$2 H_2O + SO_2 \rightarrow H_2SO_4 + H_2$ (elektroliz)
		77	$H_2SO_4 + BiO_3 \rightarrow Bi_2O_3SO_3 + H_2O$
		650~900	$Bi_2O_3SO_3 \rightarrow Bi_2O + SO_3$
			$SO_3 \rightarrow SO_2 + \frac{1}{2} O_2$

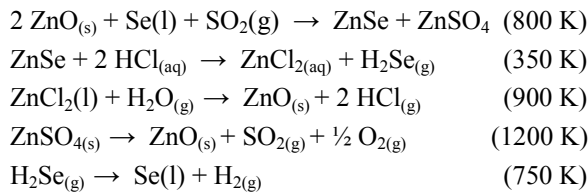
4.4. Bizmut sülfat – sülfürik asit çevrimi
(Bismuth sulphate-sulphuric acid cycle)

Bu çevrim 3 adımlık sülfürik asit çevriminde oluşabilecek önemli problemleri yok etmek için Los Alamos Scientific laboratuvarında geliştirilmiştir [13-3]. Bu çevrim 4 adımdan oluşur ve aşağıda verilmiştir.



4.5. Çinko selenit çevrimi (Zinc selenite cycle)

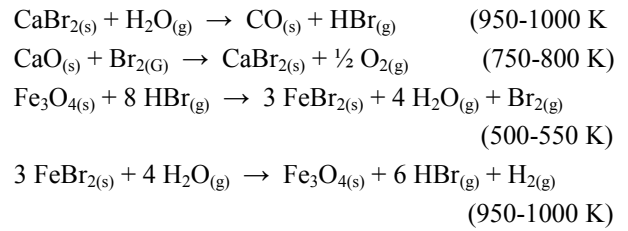
Amerika enerji bakanlığı tarafından desteklenen Lawrance Livermore laboratuvarlarında hidrojen üretimi için çinko selenit çevrimi geliştirilerek ekonomiklik analizleri yapılmıştır [3-18]. Bu çevrim aşağıdaki gibidir. Bu çevrim saf bir termokimyasal çevrimdir.



4.6. Kalsiyum bromit – demir oksit çevrimi
(Calcium bromide- ferric oxide cycle)

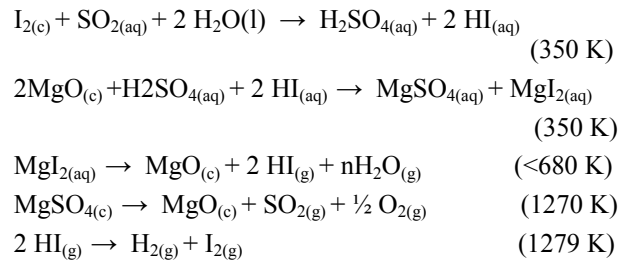
1978’de Kameyama ve Yoshida tarafından

Tokyo üniversitesi Japonya da çok adımlı termokimyasal olarak suyun ayrıştırılması çevrimidir [19-20]. Bu çevrim demir bileşikleri kalsiyum bromit ve hidrojenen meydana gelir. Aşağıdaki gibidir.



4.7. Magnezyum – iyot çevrimi (Magnesium-iodine cycle)

Bu çevrimde Mizuta ve Soliman, Milli Kimya Laboratuvarı Japonya da H_2SO_4 ve HI’nın ayrışması için birçok yararlar sağladılar. Onlar birçok metal oksitleri denediler ancak sadece MgO ’de başarılı oldular [21 22]. Bu Mg – I termokimyasal çevrimi aşağıdaki gibidir.



Çizelge 4. Beş adımlı prosesler (Five-step processes)

No	Prosesler	Sıcaklık (°C)	Reaksiyon
1	Mark 7A (İtalya)	650	$6 FeCl_2 + 8 H_2O \rightarrow 2 Fe_3O_4 + 12 HCl + 2 H_2$
		350	$2 Fe_3O_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 3 Fe_2O_3$
		120	$2 Fe_2O_3 + 12 HCl \rightarrow 4 FeCl_3 + 6 H_2O$
		1000	$Fe_2O_3 + 3Cl_2 \rightarrow 2 FeCl_3 + 3/2 O_2$
		420	$6 FeCl_3 \rightarrow 6 FeCl_2 + 3 Cl_2$
2	Mark 7B (İtalya)	650	$6 FeCl_2 + 8 H_2O \rightarrow 2 Fe_3O_4 + 12 HCl + 2 H_2$
		350	$2 Fe_3O_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 3 Gr_2O_3$
		1000	$3 Fe_2O_3 + 9 Cl_2 \rightarrow 6 FeCl_3 + 3/2 O_2$
		420	$6 FeCl_3 \rightarrow 6 FeCl_2 + 3 Cl_2$
		400	$12 HCl + 3 O_2 \rightarrow 6 Cl_2 + 6 H_2O$

Çizelge 4. Beş adımlı prosesler (Five-step processes)

No	Prosesler	Sıcaklık (°C)	Reaksiyon
3	Mark 7A (İtalya)	650	$6 \text{ FeCl}_2 + 8 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + 12 \text{ HCl} + 2 \text{ H}_2$
		350	$2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + 1/2 \text{ O}_2 \rightarrow 3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
		120	$3 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 18 \text{ HCl} \rightarrow 6 \text{ FeCl}_3 + 9 \text{ H}_2\text{O}$
		420	$6 \text{ FeCl}_3 \rightarrow 6 \text{ FeCl}_2 + 3 \text{ Cl}_2$
		800	$3 \text{ Cl}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{ HCl} + 3/2 \text{ O}_2$
4	IGT A-2 (US)	500	$3 \text{ Fe} + 4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{ H}_2$
		1000	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 9/2 \text{ Cl}_2 \rightarrow 3 \text{ FeCl}_3 + 2 \text{ O}_2$
		350	$\text{FeCl}_3 \rightarrow 3 \text{ FeCl}_2 + 3/2 \text{ Cl}_2$
		1000	$2 \text{ FeCl}_2 + 3 \text{ H}_2 \rightarrow 3 \text{ Fe} + 6 \text{ HCl}$
		500	$6 \text{ HCl} + 3/2 \text{ O}_2 \rightarrow 3 \text{ Cl}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O}$
5	IGT 1969 (US)	550	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2$
		950	$3 \text{ FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$
			$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3 \text{ FeO} + \text{CO}_2$
		315	$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ $2 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ CO} + \text{O}_2$
6	Bati Almanya	3~450	$6 \text{ CO} + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2$
		3~350	$6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ SO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ CO} + 6 \text{ H}_2\text{SO}_4$
		150 atm	
		5~600	$6 \text{ H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
		800	$2 \text{ Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 6 \text{ SO}_3$ $6 \text{ SO}_3 \rightarrow 6 \text{ SO}_2 + 3 \text{ O}_2$
7	Agnes (US)	450~750	$3 \text{ FeCl}_2 + 4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{ HCl} + \text{H}_2$
		100~110	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8 \text{ HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + 2 \text{ FeCl}_3 + 4 \text{ H}_2\text{O}$
		300	$2 \text{ FeCl}_3 \rightarrow 2 \text{ FeCl}_2 + \text{Cl}_2$
		50~90	$\text{Cl}_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgCl}_2 + 1/2 \text{ O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{MgCl}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + 2 \text{ HCl}$
8	National Chemical Lab. (Japonya)	77	$\text{I}_2 + \text{SO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ HI}$
		77	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ HI} \rightarrow \text{MgSO}_4 + \text{MgI}_2$
		400	$\text{MgI}_2 \rightarrow \text{MgO} + 2 \text{ HI} + \text{nH}_2\text{O}$
		995	$\text{MgSO}_4 \rightarrow \text{MgO} + \text{SO}_2 + 1/2 \text{ O}_2$
		995	$2 \text{ HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$
9	GE Beulah (US)	100	$2 \text{ Cu} + 2 \text{ HCl} \rightarrow 2 \text{ CuCl} + \text{H}_2$
		30~100	$4 \text{ CuCl} \rightarrow 2 \text{ CuCl}_2 + 2 \text{ Cu}$
		500~600	$2 \text{ CuCl}_2 \rightarrow 2 \text{ CuCl} + \text{Cl}_2$
		80	$\text{Cl}_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{ O}_2$
		350	$\text{MgCl}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + 2 \text{ HCl}$
10	Mark 6C (İtalya)	800	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ HCl} + 1/2 \text{ O}_2$
		170	$2 \text{ HCl} + 2 \text{ CrCl}_2 \rightarrow 2 \text{ CrCl}_3 + \text{H}_2$
		700	$2 \text{ CrCl}_3 + 2 \text{ FeCl}_2 \rightarrow 2 \text{ CrCl}_2 + 2 \text{ FeCl}_3$
		150	$2 \text{ FeCl}_3 + 2 \text{ CuCl} \rightarrow 2 \text{ FeCl}_2 + 2 \text{ CuCl}_2$ $2 \text{ CuCl}_2 \rightarrow 2 \text{ CuCl} + \text{Cl}_2$
11	Lawrence Livermore Lab. (US)	630	$\text{ZnO} + \text{Se} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{ZnSe} + \text{ZnSO}_4$
		77	$\text{ZnSe} + 2 \text{ HCl} \rightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{Se}$
		630	$\text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZnO} + 2 \text{ HCl}$
		930	$\text{ZnSO}_4 \rightarrow \text{ZnO} + \text{SO}_2 + 1/2 \text{ O}_2$
		460	$\text{H}_2\text{Se} \rightarrow \text{Se} + \text{H}_2$

12	Mark 5 (İtalya)	600	$\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{HBr}$
		900	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
		250	$2 \text{HBr} + \text{Hg} \rightarrow \text{HgBr}_2 + \text{H}_2$
		200	$\text{HgBr}_2 + \text{CaO} + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaBr}_{2(\text{aq})} + \text{HgO}$ $\text{HgO} \rightarrow \text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
13	Mark IB (İtalya)	730	$\text{CaBr}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{HBr}$
		120	$2 \text{HBr} + \text{Hg}_2\text{Br}_2 \rightarrow 2 \text{HgBr}_2 + \text{H}_2$
		120	$\text{HgBr}_2 + \text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2\text{Br}_2$
		200	$\text{HgBr}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaBr}_2 + \text{HgO} + \text{H}_2\text{O}$
		600	$\text{HgO} \rightarrow \text{Hg} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
14	Argonne (US)		$2 \text{KNO}_3 + \text{I}_2 \rightarrow 2 \text{KI} + 2 \text{NO}_2 + \text{O}_2$
			$2 \text{NO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HNO}_3$
			$2 \text{HNO}_3 + 2 \text{NH}_3 \rightarrow 2 \text{NH}_4\text{NO}_3$
			$2 \text{KI} + 2 \text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow 2 \text{KNO}_3 + 2 \text{NH}_4\text{I}$
			$2 \text{NH}_4\text{I} \rightarrow 2 \text{NH}_3 + \text{I}_2 + \text{H}_2$
15	Lawrence Livermore Lab. Univ. Of Cali. (US)	100	$\text{K}_2\text{Se} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{KOH} + \text{H}_2\text{Se}$
		200	$\text{H}_2\text{Se} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Se}$
		700	$\frac{3}{2} \text{Se} + 2 \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{Se} + \frac{1}{2} \text{SeO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
		327	$\text{V}_2\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{SeO}_2 \rightarrow \text{V}_2\text{O}_5 + \frac{1}{2} \text{Se}$
		500	$\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{V}_2\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
16	Lawrence Livermore Lab. Univ. Of Cali. (US)	700	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$
		230	$\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
		227	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{As}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{As}_2\text{O}_5$
		700	$\frac{1}{2} \text{As}_2\text{O}_5 \rightarrow \frac{1}{2} \text{As}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
			$\frac{1}{2} \text{As}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{As}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{As}_2\text{O}_4$

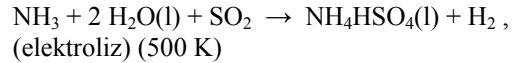
Çizelge 5. Altı adımlı prosesler (Six-step processes)

No	Prosesler	Sıcaklık (°C)	Reaksiyon
1	Catherine (US)	100~190	$3 \text{I}_2 + 6 \text{LiOH} \rightarrow 5 \text{LiI} + \text{LiIO}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$
		0	$\text{LiIO}_3 + \text{KI} \rightarrow \text{KIO}_3 + \text{LiI}$
		650	$\text{KIO}_3 \rightarrow \text{KI} + \frac{3}{2} \text{O}_2$
		450~600	$6 \text{LiI} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{HI} + 6 \text{LiOH}$
		150	$6 \text{HI} + 3 \text{Ni} \rightarrow 3 \text{NiI}_2 + 3 \text{H}_2$
		700	$3 \text{NiI}_2 \rightarrow 3 \text{Ni} + 3 \text{I}_2$
2	Hitachi (Japonya)	400~600	$2 \text{Cu} + 2 \text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow 2 \text{CuCl} + 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2$
		50~80	$2 \text{CuCl} + 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + 2 \text{NH}_4\text{Cl}$
		50~100	$2 \text{Cu}_2\text{O} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{Cu} + 2 \text{CuSO}_4 + 2 \text{H}_2$
		750~850	$2 \text{CuSO}_4 \rightarrow 2 \text{CuO} + 2 \text{SO}_3$
		850~950	$2 \text{CuO} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$
		120~300	$2 \text{SO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{SO}_4$

Birçok araştırmacı çalışan hızlı ve verimli termal gelişim için yukarıdaki çevrimlerin durumlarında değişiklik yapmaya çalışmıştır [23- 29]. Bu değişikliğe iki örnek aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

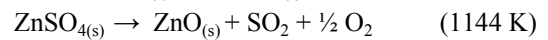
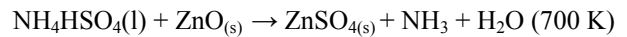
4.8. Amonyak - sülfür çevrimi (Ammonia-sulphur cycle)

Bu çevrim M.A. Soliman [23] tarafından westinghouse çevrimini modifiye ederek geliştirmiştir. Westinghouse çevriminin birinci çevriminde amonyak kullanıldı.

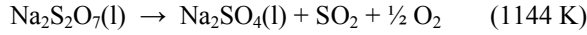
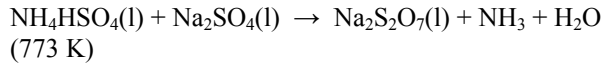


Bu çevrimde amonyak, hidrojen sülfat içerisinde aşağıdaki gibi iki aşamada parçalanır.

1.plan

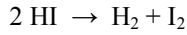
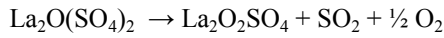
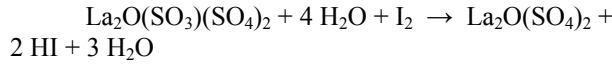
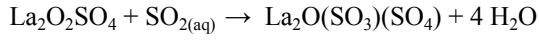


2. plan



4.9. Lantanyum dioksimonosülfat çevrimi (Lantanium dioximosulphate cycle)

Bu çevrim Onstott tarafından 1984'de önerildi ve General Atomic sülfür çevrimini modifiye ederek birçok deney yaptı [24]. Aşağıdaki şekilde geliştirildi.



Yukarıdaki reaksiyonlar 600–700 K sıcaklık aralığında 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. Bunlar;

- 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.

5. NÜKLEER GÜÇ VE TERMOKİMYASAL ÇEVİRİMLERLE HİDROJENİN YÜKSEK VERİMLİLİKTE ÜRETİMİ (NUCLEAR POWER AND HIGH EFFICIENCY HYDROGEN PRODUCTION WITH THERMOCHEMICAL CYCLES)

Burada; 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 [30]. Bu çalışmanın ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

Yaptıkları çalışmada literatürdeki 1115 adet çevrimi incelemişler 115 tanesinin uygulanabilirlik açısından incelemeye değer olduğu sonucuna varmışlardır [31- 33]. Çevrim reaksiyonlarını sıcaklık değerlerinin 1600 °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 [34]. Bu çevrimlerin detayları çizelge 6'da verilmiştir [30].

Çizelge 6. Çevrim aşamaları (Cycle stages)

Çevrim	Çevrimin İsmi	T/E*	T °C	Reaksiyon
1	Westinghouse [34]	T	850	$2\text{H}_2\text{OSO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		E	77	$\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{a}) \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4(\text{a}) + \text{H}_2(\text{g})$
2	Ispra Mark 13 [35]	T	850	$2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		E	77	$2\text{HBr}(\text{a}) \rightarrow \text{Br}_2(\text{a}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T	77	$\text{Br}_2(\text{l}) + \text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{HBr}(\text{g}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{a})$
3	UT-3 Univ. Of Tokyo [36]	T	600	$2\text{Br}_2(\text{g}) + 2\text{CaO} \rightarrow 2 \text{CaBr}_2 + \text{O}_2(\text{g})$
		T	600	$3 \text{FeBr}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HBr} + \text{H}_2(\text{g})$
		T	750	$\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + 2\text{HBr}$
		T	300	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{HBr} \rightarrow \text{Br}_2 + 3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$
4	Sulfur-Iodine [36]	T	850	$2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	450	$2\text{HI} \rightarrow \text{I}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T	120	$\text{I}_2 + \text{SO}_2(\text{a}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HI}(\text{a}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{a})$

5	Julich Center EOS [3]	T	800	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{FeSO}_4 \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{SO}_2 + \text{O}_2(\text{g})$
		T	700	$3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	200	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{FeO} + \text{FeSO}_4$
6	Tokyo Inst. Tech. Ferrite [37]	T	1000	$2\text{MnFe}_2\text{O}_4 + 3\text{NaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Na}_3\text{MnFe}_2\text{O}_6 + 3\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T	600	$4\text{Na}_3\text{MnFe}_2\text{O}_6 + 6\text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{MnFe}_2\text{O}_4 + 6\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{O}_2(\text{g})$
7	Hallett Air Products 1965 [3]	T	800	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		E	25	$2\text{HCl} \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
8	Gaz de France [3]	T	725	$2\text{K} + 2\text{KOH} \rightarrow 2\text{K}_2\text{O} + \text{H}_2(\text{g})$
		T	825	$2\text{K}_2\text{O} \rightarrow 2\text{K} + \text{K}_2\text{O}_2$
		T	125	$2\text{K}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{KOH} + \text{O}_2(\text{g})$
9	Nickel Ferrite [18-38]	T	800	$\text{NiMnFe}_4\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{NiMnFe}_4\text{O}_8 + 2\text{H}_2(\text{g})$
		T	800	$\text{NiMnFe}_4\text{O}_8 \rightarrow \text{NiMnFe}_4\text{O}_6 + \text{O}_2(\text{g})$
10	Aachen Univ Julich 1972 [3]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	170	$2\text{CrCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	800	$2\text{CrCl}_3 \rightarrow 2\text{CrCl}_2 + \text{Cl}_2(\text{g})$
11	Ispra Mark 1C [35]	T	100	$2\text{CuBr}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{CuO} + 2\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O}$
		T	900	$4\text{CuO}(\text{s}) \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	730	$\text{CaBr}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HBr}$
		T	100	$\text{Cu}_2\text{O} + 4\text{HBr} \rightarrow 2\text{CuBr}_2 + \text{H}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
12	LASL-U [3]	T	25	$3\text{CO}_2 + \text{U}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{UO}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	250	$3\text{UO}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{UO}_3$
		T	700	$6\text{UO}_3(\text{s}) \rightarrow 2\text{U}_3\text{O}_8(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$
13	Ispra Mark 8 [36]	T	700	$3\text{MnCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
		T	900	$3\text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g})$
		T	100	$4\text{HCl} + \text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow 2\text{MnCl}_2(\text{a}) + \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
14	Ispra Mark 6 [35]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	170	$2\text{CrCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	700	$2\text{CrCl}_3 + 2\text{FeCl}_2 \rightarrow 2\text{CrCl}_2 + 2\text{FeCl}_3$
		T	420	$2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
15	Ispra Mark 4 [35]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	100	$2\text{FeCl}_2 + 2\text{HCl} + \text{S} \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{S}$
		T	420	$2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T	800	$\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2(\text{g})$
16	Ispra Mark 3 [35]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	170	$2\text{VOCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{VOCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	200	$2\text{VOCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{VOCl}_2$
17	Ispra Mark 2 [35]	T	100	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}(\text{a}) + \text{MnO}_2$
		T	487	$4\text{MnO}_2(\text{S}) \rightarrow 2\text{Mn}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	800	$\text{Mn}_2\text{O}_3 + 4\text{NaOH} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MnO}_2 + \text{H}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$
18	Ispra CO/Mn ₃ O ₄ [39]	T	977	$6\text{Mn}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g})$
		T	700	$\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T	700	$\text{CO}(\text{g}) + 2\text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{C} + 3\text{Mn}_2\text{O}_3$
19	Ispra Mark 7B [35]	T	1000	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{FeCl}_3 + 3\text{O}_2(\text{g})$
		T	420	$2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T	650	$3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
		T	350	$4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$
		T	400	$4\text{HCl} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$

19	Ispra Mark 7B [35]	T	1000	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{FeCl}_3 + 3\text{O}_2(\text{g})$
		T	420	$2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T	650	$3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
		T	350	$4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$
		T	400	$4\text{HCl} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}$
20	Vanadium Chloride [40]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	25	$2\text{HCl} + 2\text{VCl}_2 \rightarrow 2\text{VCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	700	$2\text{VCl}_3 \rightarrow \text{VCl}_4 + \text{VCl}_2$
		T	25	$2\text{VCl}_4 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{VCl}_3$
21	Mark 7A [35]	T	420	$2\text{FeCl}_3(\text{l}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T	650	$3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T	350	$4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$
		T	1000	$6\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{FeCl}_3(\text{g}) + 3\text{O}_2(\text{g})$
		T	120	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl}(\text{a}) \rightarrow 2\text{FeCl}_3(\text{a}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$
22	GA Cycle 23 [41]	T	800	$\text{H}_2\text{S}(\text{g}) \rightarrow \text{S}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$
		T	850	$2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	700	$3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{S}(\text{g}) + \text{SO}_2(\text{g})$
		T	25	$3\text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4(\text{a}) + \text{S}$
		T	25	$\text{S}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SO}_2(\text{g})$
23	US –Chlorine [3]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	200	$2\text{CuCl} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CuCl}_2 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	500	$2\text{CuCl}_2 \rightarrow 2\text{CuCl} + \text{Cl}_2(\text{g})$
24	Ispra Mark 9 [35]	T	420	$2\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{FeCl}_2$
		T	150	$3\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 12\text{HCl} \rightarrow 6\text{FeCl}_3 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(\text{g})$
		T	650	$3\text{FeCl}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{HCl} + \text{H}_2(\text{g})$
25	Ispra Mark 6C [35]	T	850	$2\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 4\text{HCl}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
		T	170	$2\text{CrCl}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CrCl}_3 + \text{H}_2(\text{g})$
		T	700	$2\text{CrCl}_3 + 2\text{FeCl}_2 \rightarrow 2\text{CrCl}_2 + 2\text{FeCl}_3$
		T	500	$2\text{CuCl}_2 \rightarrow 2\text{CuCl} + \text{Cl}_2(\text{g})$
		T	300	$\text{CuCl} + \text{FeCl}_3 \rightarrow \text{CuCl}_2 + \text{FeCl}_2$

* T= termokimyasal, E= elektrokimyasal

Yaptıkları ikinci eleme aşamasında incelenen 25 çevrimin kimyasal reaksiyonlarının termodinamik açısından detayları incelenerek, uygulanabilirlikleri belirlenmiştir [30].

Her bir çevrimin uygulanabilirliği göz önüne alınarak 3 bağımsız araştırmacı tarafından incelemeler dikkate alınarak ve literatürdeki [30] değerlendirme ışığı altında oluşturulan Çizelge 7.'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde en uygun UT-3 ve S-I olduğu verilmektedir [30]. 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 [30].

Bu iki çevrim kısaca özetlenecek olursa ;

5.1. Adyabatik UT-3 çevrimi (Adiabatic UT-3 cycle)

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 [30].

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 [31].

Çizelge 7. İkinci eleme aşama puanlaması (Score of second elimination stage)

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

5.2. Sülfür – İyot çevrimi (Sulphur-iodine cycle)

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 °C'dir fakat 750 °C de kabul edilebilirdir. [42; 43] ve yüksek basınçlarda yüksek sıcaklıklardan yararlanılmalıdır.

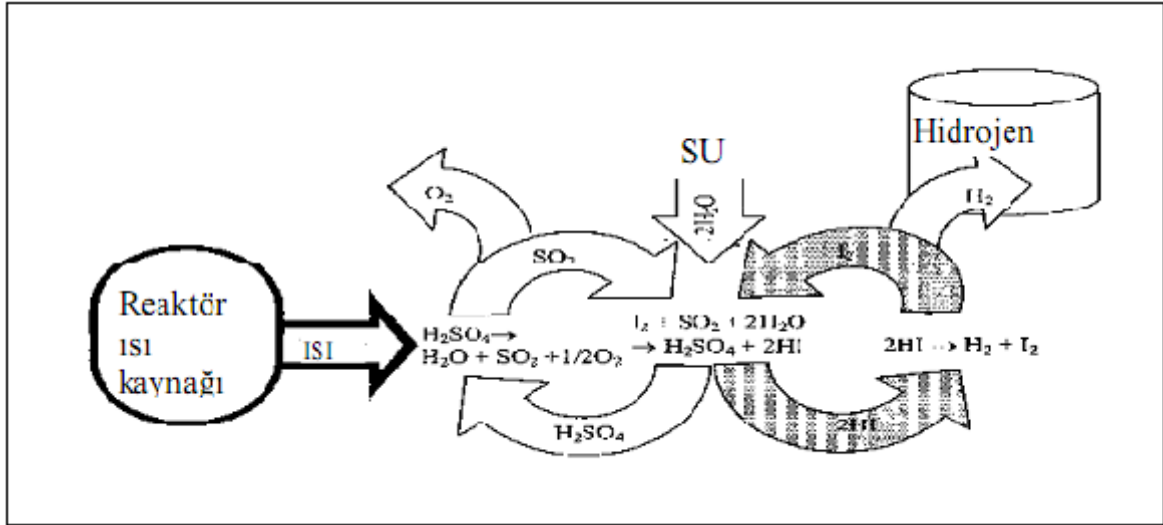
Bu kimyasal çevrimin gerçekleştirilmesi dört ana bölümde yapılmaktadır: 1) sülfürik asit, hidrojen iyodür asitlerinin üretildiği ve ürün olarak elde edilen

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 °C (Endotermik)
2. $2HI \rightarrow I_2 + H_2$. 350 °C (Endotermik)
3. $2H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow 2HI + H_2SO_4$ 100 °C (Ekzotermik)

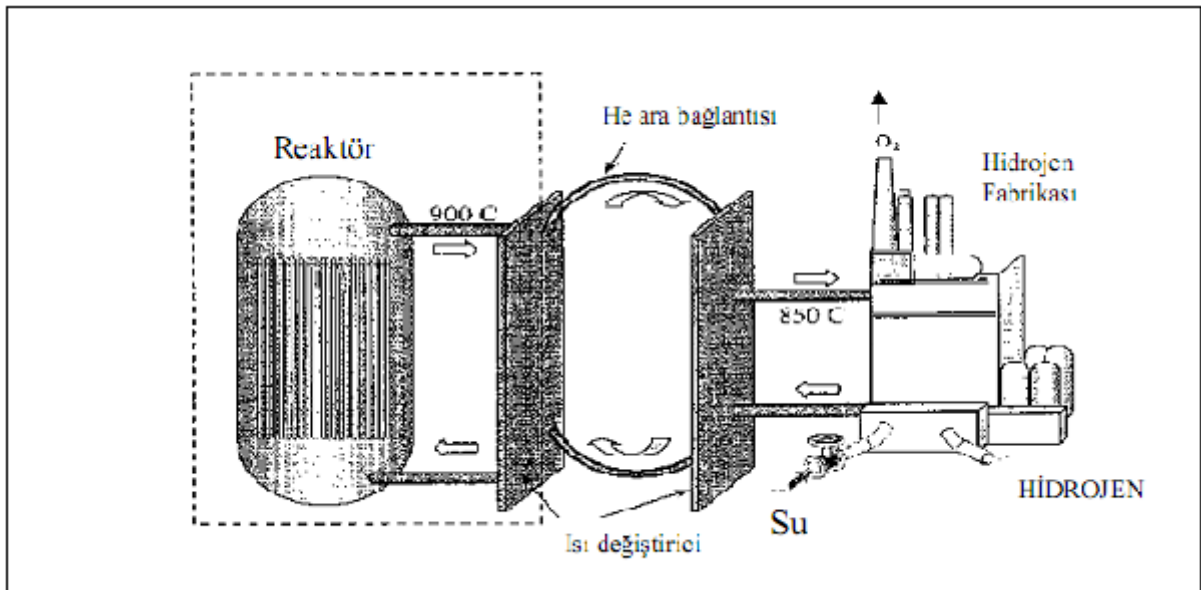
Bu döngüde madde bilançosu yapılırsa; $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O$ şeklinde Su'dan H_2 ve Oksijen elde edilmektedir.



Kimyasal reaktantların döngüsel ilişkileri Şekil 2’de, ve reaktör bazlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi Şekil 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.

52 olarak ve aynı zamanda daha düşük maliyette olabileceği görülmektedir [30]. Ayrıca yüksek sıcaklıklı nükleer reaktörlerden ısı kaynağı olarak yararlanmak suretiyle sülfür-iyot termokimyasal çevrimle suyun ayrıştırılmasına dayalı çevrimin en uygun olduğu görülmektedir. Sülfür-iyot çevrimini kullanarak sudan hidrojen üretmeye dayalı çeşitli nükleer reaktör tipleri Çizelge 8’de verilmiştir. Reaktörlerde kullanılacak soğutucu tipleri ve özellikleri Çizelge 9. ve Çizelge 10’da verilmiştir.



Şekil 3. Reaktör bazlı hidrojen üretim sisteminin şematik gösterimi (Schematic view of hydrogen production system based

5.3. Nükleer ısı kaynağının seçimi (Choosing of nuclear heat source)

Yukarda bahsedilen çevrimler için UT-3’ün verimi % 35-40 arasında iken sülfür-iyot çevrimi için %

Çizelge 8. Nükleer hidrojen üretiminde kullanılması düşünülen nükleer reaktör tipleri (Nuclear reactor type using considered nuclear hydrogen production)

<p>1. Basınçlı Su Reaktörleri [7]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Basınçlı su reaktörleri (hafif ve ağır su) • Süperkritik basınçlı su reaktörleri <p>2. Kaynar Su Reaktörler [44]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kaynar su reaktörler (hafif ve ağır su) • Kızgın buharlı reaktörler <p>3. Organik Soğutuculu-Reaktörler [8]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Difenil • Diğer organik soğutucular <p>4. Alkali Sıvı Metal Soğutuculu-Reaktörler[45]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurşun-soğutuculu • Diğer (Na, K, NaK) <p>5. Ağır Sıvı Metal Soğutuculu Reaktörler [46]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurşun-bizmut • Diğer (Pb, Bi, Sn ,Hg) 	<p>6. Gaz Soğutuculu Reaktörler [47]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soygazlar (he, ar) • Diğer gazlar (CO₂, H₂, N₂ , Air ,Ar , Buhar) <p>7. Eriyik Tuz Soğutuculu-Reaktörler [48]</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2LiF-BeF₂ • Diğer tuzlar <p>8. Sıvı Kor Reaktörler [6]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eriyik tuzlu • Sıvı metali • Su esaslı kor <p>9. Gaz Merkezli Reaktörlerdir [49]</p> <ul style="list-style-type: none"> • UF₆ <p>Diğer gaz yakıtlı (UF₄, U-plazma)</p>
---	--

Çizelge 9. Reaktör soğutucularının temel özellikleri (Fundamental properties of reactor fluids)

Soğutucu	Moleküler Ağırlığı	Yoğunluk* (g/cm ³)	σ_{th} Parazit(b)	Nötron Aktivasyonu	Radyolitik Bozulma	Tehlikeler Zehir Ateş Patlama		
<i>Su</i>								
H ₂ O	18	1	0.66	biraz	biraz	yok	yok	yok
D ₂ O	20	1,1	0.001					
<i>Organik</i>								
Difenil	154	0.86	0.33	düşük	var	yok	yok	yok
<i>Alkali Metal</i>								
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					
<i>Ağır Metal</i>								
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		
<i>Gazlar</i>								
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			
<i>Erimiş Tuz</i>								
2LiF-BeF ₂	-	~2	-	var	sabit	var	yok	yok
<i>Sıvı Çekirdekli</i>								
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 10. Reaktör Soğutucularının termal ve kimyasal özellikleri (Basic and chemical properties of reactor fluids)

Soğutucu	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Buhar Basıncı (MPa)*	Isı İletim Özellikleri	Termal Sağlamlık Limiti (K)	Kimyasal hareket @ 900 °C
<i>Su</i>						
H ₂ O	0	100	13.7	Çok iyi	Sabit	Var
D ₂ O	0	101	13.7		Sabit	
<i>Organik</i>						
Difenil	69	255	0.2	iyi	750	var
<i>Alkali Metal</i>						
Li	181	1331	10 ⁻¹⁰	Mükemmel	sabit	var
Na	98	881	5x10 ⁻⁶			
NaK	-11	784	~10 ⁻⁴			
K	64	761	10 ⁻⁴			
<i>Ağır Metal</i>						
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			
<i>Gazlar</i>						
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
<i>Erimiş Tuz</i>						
2LiF-BeF ₂	457	1397	<10 ⁻⁹	Mükemmel	Sabit	Var
<i>Sıvı Çekirdekli</i>						
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 11'de verilen gereksinimler ve kriterler neticesinde değerlendirilmiştir. 900°C'deki eşanjör iç yüzeylerindeki ısı transferinin

uygun şekilde yapılabilmesi için birtakım kriterler belirlenmiştir. Helyum gaz soğutmalı reaktör, ağır soğutmalı reaktör ve erimiş su soğutmalı reaktörlerin sül-

für-iyot çevrimi için en uygun reaktör tipleri olduğu sonucuna varmışlardır [30]. 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 11. Gereksinimler ve kriterler (Demands and criteria)

(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

5.4. Nitelik değerlendirmesi (Quality evaluation)

Çizelge 11'de gösterilen gereksinimleri ve kriterleri kullanarak, aday reaktörler için literatürde bir not değerlendirmesi yapılmıştır [30]. Değerlendirmenin ve gereklilik arz eden kriterlerin sonucunda reaktör tiplerinin uygulanabilirlik ve seçilebilme açısından incelenerek, gaz soğutmalı reaktör tiplerinin uygun olduğu görülmüştür.

Bu reaktörlerin özellikle ısı eşanjörlerinin (soğutucular ve ısıtıcılardaki) geliştirilmesi ve atık ısının kojenerasyon sistemleriyle faydalı hale getirilmesi açısından ekonomikliklerinin artırılması 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.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Dünya nüfusunun hızla artması, mevcut enerji kaynaklarına insan ömrü ile kıyaslanabilir ömür biçilmesi, fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO₂ 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.

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 ön sıralama almalıdır.
- Türkiye gecikmeden nükleer santraller 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,
- 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 yaptırın kuruluşlara mali destek sağlanması,
- Hidrojenle ilgili tüm süreç, ekipman ve tesisat için test ve belgelendirme standartlarının uluslararası eşdeğerleriyle uyumlu olarak geliştirilmesi ve uygulanması,
- Hidrojenle ilgili temel konuların okullardaki ders müfredatına eklenmesi, gibi bazı öneriler hemen akla gelmektedir.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Momirlan, M. and Veziroğlu, T.N. "Current status of hydrogen energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6: 141–79. 2002
- 2) Ultanir, M.O. "Hidrojenin yakıt olarak kullanımı ve özellikleri", *Çevre-Enerji Kongresi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası., 195-315. 1997
- 3) Williams, L. O. "Hydrogen Power", *Pergamon Press*, New York, 8: 22-74. 1980
- 4) Schultan, R. "Nuclear energy as a primary energy source for hydrogen production", *Hydrogen Energy System*, Pergamon press, Oxford, 3: 3–24. 1979
- 5) Veziroğlu, T.N. "Quarter century of hydrogen movement 1974–2000", *Int. J. Hydrogen energy*, 25: 1143–50. 2000
- 6) Angelo, J. A. and D. Buden. "Space Nuclear Power", *Orbit Book Co.*, Malabar, FL, 18: 224-275. 1985
- 7) Nero, V. "A Guidebook to Nuclear Reactors", *U. of Cal. Press*, Berkeley. 1979
- 8) Simnad, M. "Fuel Element Experience in Nuclear Power Reactors", *Gordon and Breach Science Publ.* NY, 2: 143-179. 1971
- 9) Veziroğlu, T.N. "Importance of HTM conferences for future of hydrogen economy", *Int. J. Hydrogen Energy*, 27: 715. 2002.
- 10) Bentor, Y. "Hydrogen at Chemical Elements", *Int. J. Hydrogen Energy*, 4: 12-23. 2003
- 11) Veziroğlu, T.N. "Dawn of the hydrogen age", *Int. J. Hydrogen Energy*, 23(12): 1077-8. 1998
- 12) Nanda, A. K., Ulrichson, D. L. and Adesanya, B. A. "Chlorination of water vapor and chlorination-hydrolysis of magnesium oxide", *Hydrogen Energy Progress VI*, Pergamon Press, Oxford, 2: 706–714. 1986
- 13) Cox, K. E. and Bartlit, J. R. "The environmental impact of thermochemical processes for hydrogen production: a preliminary assessment", *Alternative Energy Sources III*, Hemisphere, Washington, 5: 385–397. 1983
- 14) Seifritz, W. "Possible use of fusion power for hydrogen production", *Int. J. Hydrogen Energy*, 6: 331–338. 1981
- 15) Fillo, J. A., Powell, J. R., Steinberg, M., Salzano, F. and Benandi, R., "Hydrogen Production from fusion reactors coupled with high temperature electrolysis", *Hydrogen Energy System*, Pergamon Press, Oxford, 3: 1135–1168. 1979
- 16) Beghi, G. E. "A decade of research on thermochemical hydrogen at the Joint Research Centre-Ispra", *Hydrogen System*, Beijing, China, 1: 153–171. 1985
- 17) Engels, H., Knoche, K. F. and Roth, M. "Direct association of hydrogen iodide: an alternative to the General Atomic proposal", *Hydrogen Energy Progress VI*, Pergamon Press, Oxford, 2: 657–662. 1986
- 18) Baker, C. E. "Sponsored national program on hydrogen production from water via thermochemical cycles", *Alternative Energy Sources*, Hemisphere, Washington, 8:3479–3493. 1978
- 19) Aochi, T., Y. Tadoroko, K. Yoshida, N.Kameyama, M.Nobue and T. Tamaguchi, "Economic and technical evaluation process for an industrial scale plan", *Hydrogen Energy Progress VI*, Pergamon Press, Oxford, 2: 663–672. 1986
- 20) Kameyama, H., Tomino, Y., Yashida, K. and Orihara, A. "Process simulation of [mascot] plant using the UT-3 thermochemical cycle for hydrogen production", *Hydrogen Energy Progress VI*, Pergamon Press, Oxford, 2: 688–695. 1986
- 21) Mizuta, S. and Kumagi, T. "Progress report on the thermochemical hydrogen. Production by the Mg-S-I cycles- laboratory scale demonstration", *Hydrogen Energy Progress V*, Pergamon Press, Oxford, 2: 421–431. 1984
- 22) Mizuta, S. And Kumagi, T. "Progress report on the Mg-S-I thermochemical water-splitting cycle", *Hydrogen Energy Progress VI*, Pergamon Press, Oxford, 2: 696–705. 1986
- 23) Soliman, M.A. "A highly efficient thermochemical cycle for hydrogen production", *Alternative Energy Sources*, Hemisphere, Washington, 8: 3541–3550. 1978
- 24) Onstott, E.I., Bowman, M.G., Michnovicz, M.F. and Hollabough, C.M. "Modification of the sulfur dioxide-iodine thermochemical hydrogen cycle with lanthanum sulfites and sulfates", *Hydrogen Energy Progress V*, Pergamon Press, Oxford, 2: 433-437. 1984
- 25) Hallabough, C.M. and Bowman, M. G. "The La₂(SO₄) thermochemical cycle for hydrogen production", *Proc. Fourth Technical Workshop*, International Energy Agency, Julich, West Germany, 9: 372-433. 1981
- 26) Moson, C. V. F. and Bowman, M.G. "Reaction for improving efficiencies in thermochemical cycles related to the sulfur dioxide-iodine process", *Proc. 4th world Hydrogen Energy Conf.*, Pergamon Press, Oxford, 2: 665-674. 1982
- 27) Normon, J. H., O'Keete, D. R., Besenbruch, G.E., Brown, L. C. and Gibson, J. B. "Methods of processing HI-H₂O-I₂ solution", *Proc. 4th World Hydrogen Energy Conf*, Pergamon Press, Oxford, 2: 510–521. 1982
- 28) Peterson, E.J, Foltyn, E. M. and Onstott, E.I., "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. 1980
- 29) Sato, S., Shimizu, S., Nakajima, H., Onuki, K., Ikezoe, Y. and Suwa, T. "Studies on the nickel- iodine-sulfur process for hydrogen production", *Proc. 4th World Hydrogen Energy Conf.*, Pergamon press, Oxford, 2: 553–566. 1982
- 30) Schultz, K.R., Lloyd, C., Besenbruch, G.E. "Hydrogen production and nuclear power", *Spring National Meeting*, New Orleans, 139b. 2002
- 31) Funk, J.K., Reinstrom, R.M. "Energy requirements in the production of hydrogen from water", *Ind.Eng.Chem.Proc.Des.Developo*, 5: 336-342. 1966
- 32) Yalcin, S. "A review of nuclear hydrogen production", *Int. J. Hydrogen energy*, 14: 551-561. 1989
- 33) Yoshika, H., Nakayama, T., Kameyama, H. and Yoshida, K. "Operation of a bench-scale plan for hydrogen production by the UT-3 cycle", *Hydrogen Energy Progress V*, Persaman Press, Oxford, 2: 413-420. 1984

- 34) Brecher, L.E., S. Spewock. "Westinghouse sulfur cycle for the thermochemical decomposition of water", *Int. J. Hydrogen Energy*, 2: 7–15. 1977
- 35) Beghi, G.E. "A decade of research on thermochemical hydrogen at the joint research center, Ispra", *Int. J. Hydrogen Energy*, 11: 761–771. 1986
- 36) Besenbruch, G.E. "General Atomic sulfur-iodine thermochemical water-splitting process", *Am. Chem. Soc., Div. Pet. Chem.*, Prepr. 271: 48–53. 1982
- 37) Ueda, R., Tagawa, H. "Production of hydrogen from water using nuclear energy", *A review, Japan At. Energy Res. Inst.*, Tokyo, Japan., 69. 1974
- 38) Tamaura, Y., Steinfeld, A. "Production of solar hydrogen by a novel, 2- step, water-splitting thermochemical cycle", *Energy (Oxford)*, 20: 325-330. 1995
- 39) Bamberger, C.E. "Hydrogen production from water by thermochemical cycles; a 1977 update", *Cryogenics*, 18: 170-183. 1978
- 40) Knoche, K.F. and Schuster, P. "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. 1984
- 41) Russell, J., Porter, J., "Production of hydrogen from water", *General Atomics Report GA- A12889*. 1974
- 42) DOE/EIA-0484, "International Energy Outlook 2000", *The Energy Information Administration of the Department of Energy*, 1: 39. 2000
- 43) DOE/EIA-0383, "Annual Energy Outlook 2000 with projections to 2020", *The Energy Information Administration of the Department of Energy*, 1: 76. 2000
- 44) Forsberg, W. And Weinberg, A.M. "Advanced Reactors, Passive Safety and Acceptance of Nuclear Safety", *Annu. Rev.- Energy*, 15: 133–152. 1998
- 45) El-Genk, M. S. "A Critical Review of Space Nuclear Power and Propulsion 1984- 1993", *American Institute of Physics*, NY, 12: 87-132. 1994
- 46) Bugreev, M. I. "Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposals", *Kluwer Academic Publishers*, Netherlands, 261–264. 1999
- 47) Kemm, K. "Development of the South Africa Pebble Bed Modular Reactor System", <http://www.uilondon.org/sym/1999kemm.htm>. 2000
- 48) El-Wakil, M. M. "Nuclear Power Engineering", *McGraw-Hill Book Co.*, NY, 8: 35-48. 1962
- 49) Koshizuka, S. and Oka, Y. "Supercritical-Pressure, Light-Water-Cooled Reactors for Economical Nuclear Power Plants", *Prog. Nucl Ener.* 32: 547–554. 1998